





**Presidenta Ejecutiva del SENAMHI**

Ing. Amelia Díaz Pabló

**Coordinador General del PREVAE**

Ing. Fernando Arboleda Orosco

**Director Regional de Puno**

Ing. Sixto Flores Sancho

**Elaboración:** Ing. Efraín Lujano Laura

**Asesoramiento y Revisión:** Ing. Oscar Felipe Obando

**Diciembre - 2013**

**PUNO – PERÚ**

## SINTESIS DEL ESTUDIO

El presente estudio denominado Estudio Hidrológico Superficial de las cuencas de los ríos Ilave y Coata”, se ha desarrollado en el marco del Programa Presupuestal, Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias – PREVAE1 que ejecuta el SENAMHI a través de su Dirección Regional de Puno. En este trabajo se ha integrado y consolidado los tres componentes contemplados en el Plan Operativo del presente año, en primer término “La caracterización Hidrológica de cuencas”, abordado desde el capítulo II hasta el IX; “ La Modelización Hidrológica de cuencas”, abordado en el Capítulo X y XI; la “Caracterización de Eventos hidrometeorológicos Extremos”, abordado en el Capítulo XII. Los tres componentes están estrechamente ligados y parten de una base de datos común para el análisis, por tanto se consideró pertinente consolidarlos en solo documento para tener una visión integral del comportamiento hidrológico de las dos cuencas.

En este sentido para el cumplimiento de las metas, se ha partido de la caracterización morfométrica de las cuencas utilizando las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), descripción de los parámetros meteorológicos locales y regionales utilizando datos observados de 23 estaciones ubicadas dentro y alrededor de las cuencas en estudio, entre ellas Precipitaciones y Temperaturas. Para la descripción climática de las cuencas, se realizó la interpolación espacial de datos promedios multianuales anuales bajo el entorno de Arc Map, haciendo uso de la calculadora raster de análisis espacial, para este proceso primeramente se dio el análisis de regresión lineal multivariada a través del método de los mínimos cuadrados, teniendo como variable de respuesta la precipitación y las variables predictores la Altitud (z), coordenadas Este (x) y Norte (y) y sus combinación respectivas.

Para verificar la existencia de valores atípicos, la información disponible de precipitación total mensual, paso por un Análisis Exploratorio de Datos (AED), encontrándose estaciones con valores atípicos alejados y muy alejados así como otras con valores adyacentes a su media general, seguidamente antes de completar datos faltantes, se han identificado 03 grupos de estaciones con datos homogéneos a partir del Análisis de conglomerados (AC) y el Método del Vector Regional (MVR), al término de ello se realizó el análisis de consistencia de los datos utilizando pruebas paramétricas (t student) y no paramétricas (Man – Kendall), de donde se concluye que la información utilizada es confiable a un 95% de probabilidad, homogénea y libre de saltos y tendencias. Finalmente, se determinó la precipitación media de cada cuenca a través del método de los Polígonos de Thiessen (PTh), Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) y Kriging (K).

El análisis de caudales se realizó de forma similar al de los datos de precipitación, tomando como referencia los medidos en la estación Puente Unocolla, Ilave, Isla Cabanillas, Lampa y río Verde. Para la modelización hidrológica lluvia escorrentía, el modelo utilizado fue el GR2M (Genie Rural de dos parámetros a paso mensual) caracterizado por basarse en la conceptualización del ciclo hidrológico, utilizando parámetros de entrada la Precipitación media areal mensual, Evapotranspiración y Descargas medias mensuales de los ríos en estudio. El modelo utilizado fue muestreado en dos

subconjuntos de datos el 70% del total de datos utilizado como fase de calibración y el 30% restante para validación, mostrando porcentajes de ajuste por encima del 69%, siendo muy bueno para el pronóstico mensual.

Como parte final la caracterización de los eventos hidrológicos extremos de precipitación y caudal, se determinó para diferentes periodos de retorno los cuales están plasmados en gráficos y cuadros respectivos, que servirán como datos de entrada para el diseño de estructuras hidráulicas.

## Contenido

<b>I. INTRODUCCION</b> .....	5
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	6
3.1. Objetivo general .....	6
3.2. Objetivos específicos.....	6
<b>IV. UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO</b> .....	6
4.1. Ubicación geográfica y política .....	6
4.2. Ubicación Hidrográfica .....	7
<b>V. INFORMACION BASICA</b> .....	9
5.1. Información cartográfica.....	9
5.2. Información meteorológica .....	9
5.3. Información hidrométrica .....	10
<b>VI. CARACTERIZACION DE LAS UNIDADES HIDROGRAFICAS</b> .....	11
6.1. Delimitación hidrográfica.....	11
6.2. Parámetros morfométricos .....	13
6.2.1. Parámetros de forma .....	13
6.2.2. Parámetros de relieve.....	16
6.2.3. Parámetros relativos a la red de drenaje .....	35
<b>VII. DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS METEOROLOGICOS</b> .....	39
7.1. Distribución espacial de los parámetros meteorológicos .....	39
7.1.2. Regresión Lineal Multivariada (RLM) .....	39
7.2. Precipitación (P).....	40
7.2.1. Precipitación Total Promedio Multimensual local .....	40
7.2.2. Precipitación Total Promedio Multianual regional.....	41
7.3. Temperatura (T) .....	44
7.3.1. Temperatura Máxima Promedio Multimensual local .....	44
7.3.2. Temperatura Máxima Promedio Multianual Regional .....	45
7.3.3. Temperatura Mínima Promedio Multimensual local .....	48
7.3.4. Temperatura Mínima Promedio Multianual Regional .....	49
7.3.5. Temperatura Media Promedio Multimensual local .....	52
7.3.6. Temperatura Media Promedio Multianual regional.....	53
<b>VIII. ANALISIS DE LA INFORMACION PLUVIOMETRICA</b> .....	56
8.1. Red de estaciones meteorológicas .....	56
8.2. Análisis exploratorio de datos .....	57
8.2.1. Diagrama de cajas (box plot).....	57
8.2.2. Histogramas .....	66
8.3. Identificación de estaciones homogéneas .....	67
8.3.1. Agrupamiento por análisis de conglomerados (AC).....	67

8.3.2.	Método del Vector Regional (MVR) .....	68
8.4.	Completación de datos faltantes.....	75
8.5.	Análisis de consistencia .....	81
8.5.1.	Análisis visual de hidrogramas .....	81
8.5.2.	Análisis de doble masa.....	82
8.5.3.	Análisis estadístico de saltos y tendencias.....	85
8.6.	Precipitación media de la cuenca.....	89
<b>IX.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA INFORMACION HIDROMETRICA .....</b>	<b>90</b>
9.1.	Análisis exploratorio de datos (AED) .....	90
9.1.1.	Diagrama de cajas (box plot).....	90
9.1.2.	Histogramas .....	93
<b>X.</b>	<b>MODELIZACION HIDROLOGICA LLUVIA ESCORRENTIA.....</b>	<b>94</b>
10.1.	MODELO HIDROLOGICO GR2M .....	94
10.1.1.	Evaluación de la bondad del modelo.....	95
10.2.	APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO GR2M.....	97
10.2.1.	Parámetros de entrada .....	97
10.2.2.	Fase de calibración .....	97
10.2.3.	Fase de validación.....	103
10.2.4.	Evaluación del modelo.....	107
<b>XI.</b>	<b>DISPONIBILIDAD HIDRICA .....</b>	<b>108</b>
<b>XII.</b>	<b>CARACTERIZACION DE LOS EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS .....</b>	<b>113</b>
12.1.	Análisis de frecuencias de Caudales Máximos Instantáneos.....	113
12.1.1.	Estimacion de caudales maximos instantaneos .....	115
12.1.2.	Estadísticas descriptivas .....	115
12.1.3.	Calidad de la serie de datos .....	116
12.1.4.	Ajuste de las funciones de distribución .....	116
12.2.	Análisis de frecuencias de Precipitaciones Máximas .....	117
12.2.1.	Factor entre la Pmax en 24 horas y la Pmax diaria (F).....	118
12.2.2.	Estadísticas descriptivas .....	118
12.2.3.	Calidad de la serie de datos .....	118
12.2.4.	Ajuste de las funciones de distribución .....	121
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>123</b>

## I. INTRODUCCION

El estudio de Hidrología superficial aporta elementos de línea base para el conocimiento y comprensión del funcionamiento hidrológico de las cuencas de los ríos Ilave y Coata; que coadyuvará a una adecuada Planificación y/o Gestión de los Recursos Hídricos.

El estudio hidrológico contiene sustanciales aportes, como la implementación de una base de datos de diversa información cartográfica, meteorológica e hidrológica; mapas hidroclimáticos de alta resolución espacial, modelamiento hidrológico lluvia escorrentía, caracterización de eventos extremos, los cuales servirán como una gran alternativa para disponer de información más confiable desde el punto de vista hidrológico meteorológico y probabilístico.

La metodología utilizada, pone en evidencia la situación hidrometeorológica, presentada en cuadros, gráficos y mapas, donde muestran sus variaciones temporales y espaciales en la zona de estudio.

## II. ANTECEDENTES

En el Perú desde la década de los años 60, se han iniciado la realización de estudios hidrológicos para la evaluación y cuantificación de los recursos hídricos en cuencas de mayor y menor importancia para el desarrollo agropecuario de nuestro país. En la zona de estudio existen estudios realizados por diferentes instituciones, tales como el PELT, ALT y ANA, los cuales se revisaron como fuentes de información. A continuación se mencionan los estudios realizados por las respectivas instituciones:

- PELT (Proyecto Especial Lago Titicaca): “Plan Director Global Binacional de Protección, Prevención de Inundaciones y Aprovechamiento de Recursos del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Lago Salar de Coipasa (Sistema TDPS)”; Puno 1,993.
- ALT (Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico TDPS): “Disponibilidad hídrica de las cuencas afluentes al lago Titicaca”, Puno 2005.
- ANA (Autoridad Nacional de Agua): “Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa, Puno 2007.
- ANA (Autoridad Nacional de Agua): “Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Ilave”, Puno 2009.

### III. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

- Realizar el estudio hidrológico superficial de las Cuencas llave y Coata, que sirva de base para la realización de estudios integrados de oferta/demanda y hacer proyecciones de la disponibilidad hídrica futura, como base para su planificación de largo plazo.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización hidrológica de las cuencas
- Realizar el modelamiento hidrológico lluvia – escorrentía
- Determinar la disponibilidad hídrica superficial de las cuencas
- Realizar la caracterización de los eventos extremos de precipitación y caudal

### IV. UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO

#### 4.1. Ubicación geográfica y política

Las cuencas se encuentran ubicadas en coordenadas UTM (WGS84):

**Cuadro 4.1.- Ubicación geográfica de las cuencas llave y Coata**

Cuenca	llave	Coata
Este (m)	352,3530 – 452,0520	263,554 – 401,525
Norte (m)	8'104,770.0 – 8'248,751.0	8'328,327 – 8'239,697
Altitud (msnm)	3,824.00 – 5,558.00	3,831 - 5,422

*Altitud Fuente: Modelo de elevación digital global (Global Digital Elevation Model - DEM)*

Políticamente se encuentran ubicadas en el departamento de Puno, provincias y distritos especificadas en el cuadro 4.2.

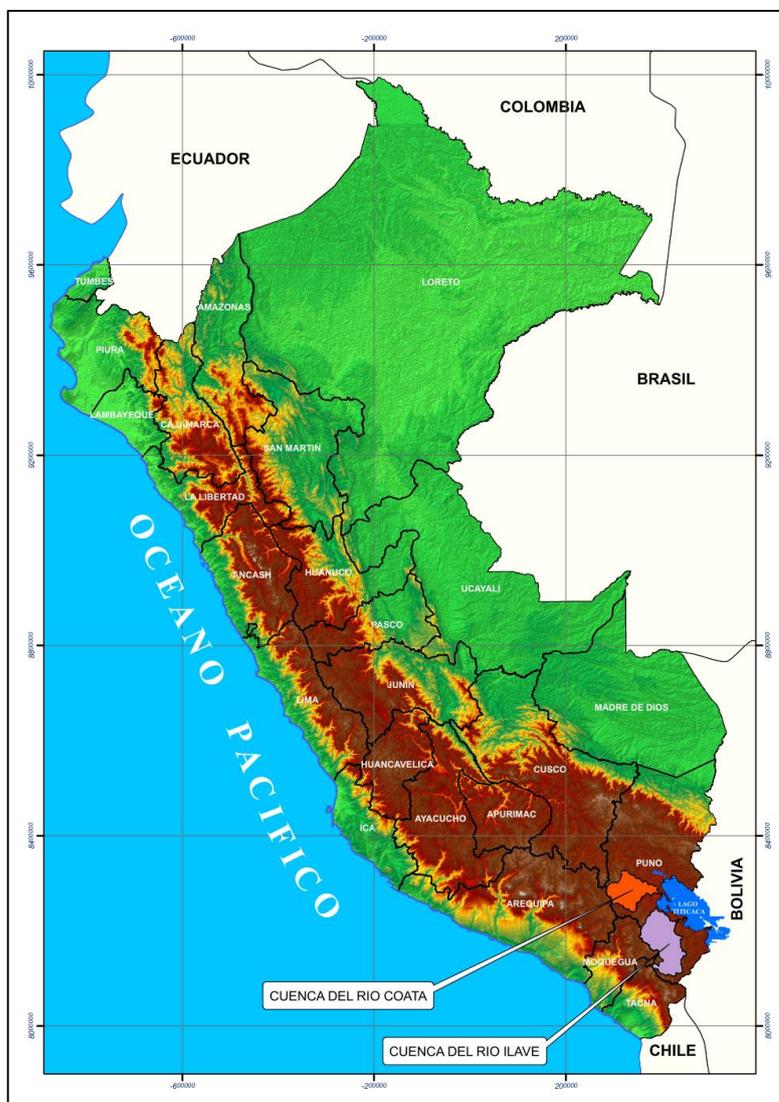
**Cuadro 4.2.- Ubicación política de las cuencas llave y Coata**

Cuenca llave		Cuenca Coata	
Provincia	Distrito	Provincia	Distrito
Chucuito, El Collao, y Puno	Huacullani, Juli, Capazo, Mazocruz, Conduriri, llave, Acora, Platería, Chucuito, Laraqueri, Puno y San Antonio.	San Roman, Lampa, Puno y Huancané	Santa Lucia, Paratia, Palca, Lampa, Vila Vila, Cabanillas, Cabanilla, Juliaca, Cabana Caracoto, Pusi, Huata y Coata.

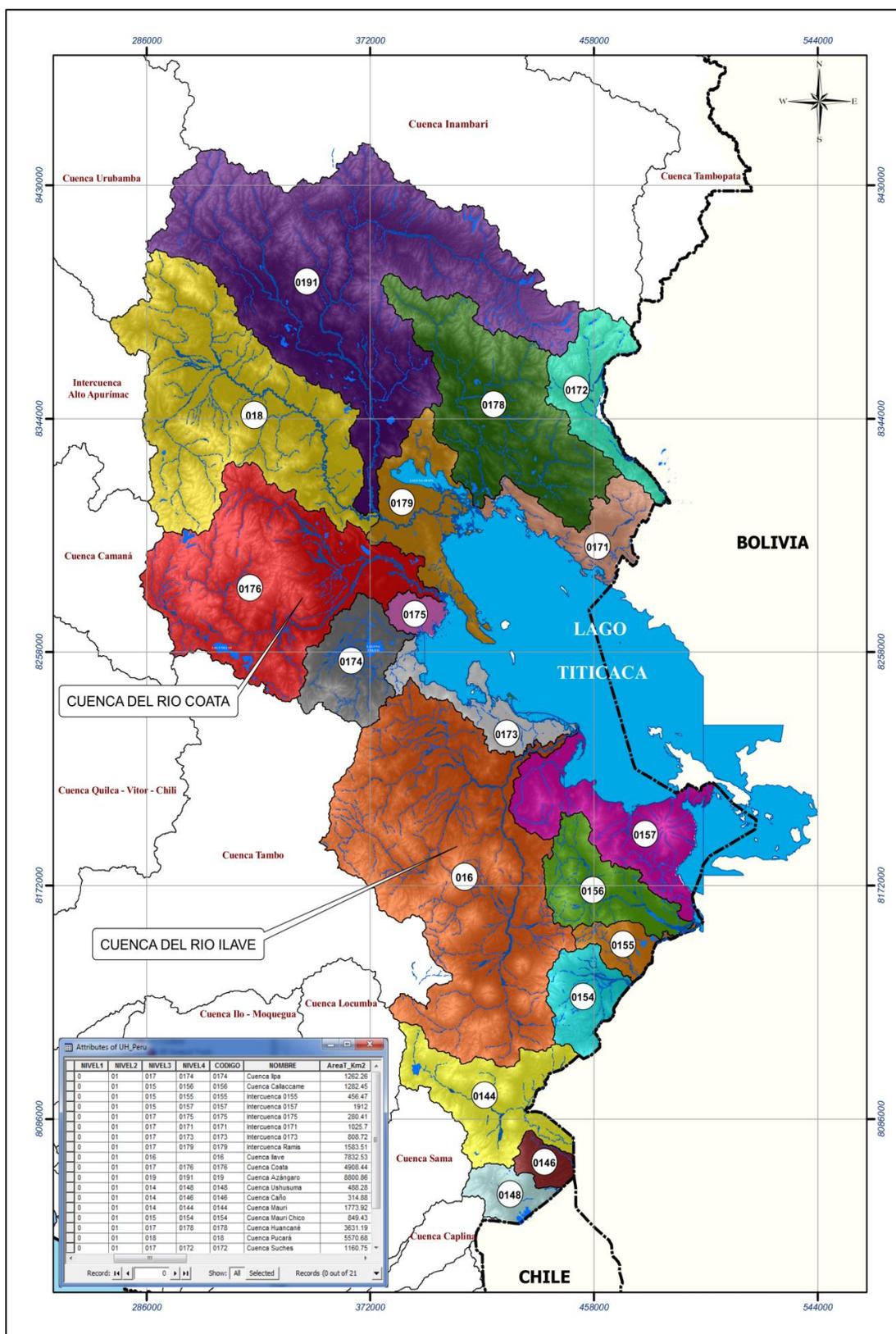
## 4.2. Ubicación Hidrográfica

Según el Resumen Ejecutivo de la Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú, elaborado por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2008, utilizando la metodología de Otto Pfafstetter, las cuencas en estudio se encuentran ubicadas en la Región Hidrográfica del Titicaca, jerarquizada en el nivel 2 con el código 01, abarcando el Sistema Titicaca - Poopó con 149,588.72 Km<sup>2</sup>. La cuencas llave y Coata según esta metodología están jerarquizadas en el nivel 3 y nivel 4 con códigos de 016 y 0176 respectivamente. En el mapa 4.2 se puede observar la ubicación y codificación hidrográfica de las cuencas bajo la metodología mencionada.

**Mapa 4.1.-** Ubicación geográfica y política de las cuencas llave y Coata



Mapa 4.2.- Ubicación Hidrográfica de las cuencas llave y Coata



## V. INFORMACION BASICA

Para el desarrollo del presente estudio se ha recurrido básicamente a la información cartográfica e hidrometeorológica. A continuación se detalla cada una de estas informaciones en forma breve.

### 5.1. Información cartográfica

- Modelo de elevación digital global (Global Digital Elevation Model - DEM) que abarcan las cuencas en estudio, creado a partir de imágenes captadas por el sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), el cual se encuentra a bordo de la nave espacial TERRA, con resolución espacial de 30\*30m de tamaño del pixel. La primera versión del mapa fue lanzado por la NASA (United States National Aeronautics and Space Administration) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) del Japón en el año 2009 y la versión significativamente mejorada es lanzada en octubre del 2011.
- Red de estaciones de observación del SENAMHI en formato shp
- Límite de las cuencas provenientes de la delimitación de unidades hidrográficas del Perú a escala 1/100,000 elaborado por la Autoridad Nacional del Agua en el año 2008, basado en la metodología de Otto Pfafstetter.

### 5.2. Información meteorológica

La información corresponde a la precipitación total mensual, temperatura máxima, mínima y media mensual, humedad relativa y evaporación de las estaciones que se encuentran dentro y fuera de las cuencas en estudio. El Cuadro 4.3, muestra la red de estaciones meteorológicas para las cuencas en estudio administradas por el SENAMHI el 100% se encuentran en condiciones operativas.

**Cuadro 4.3.- Características de las estaciones meteorológicas cuencas llave, Coata y cuencas vecinas**

N°	Estación	Código	Dpto	Provincia	Distrito	Este [m]	Norte [m]	Altitud [msnm]
1	Arapa	115035	Puno	Azángaro	Arapa	379823	8326267	3892
2	Ayaviri	114038	Puno	Melgar	Ayaviri	328602	8355116	3921
3	Cabanillas	115033	Puno	San Roman	Cabanillas	355675	8270502	3877
4	Capachica	100021	Puno	Puno	Capachica	409496	8273379	3827
5	Capazo	117041	Puno	El collao	Capazo	421758	8099499	4470
6	Chuquibambilla	114035	Puno	Melgar	Umachiri	313519	8364727	3899
7	Desaguadero	000883	Puno	Chucuito	Desaguadero	495691	8168147	3813
8	llave	116027	Puno	El collao	llave	430990	8221164	3837
9	Juli	116061	Puno	Chucuito	llave	450813	8208437	3814
10	Juliaca	115138	Puno	San Roman	Juliaca	374843	8289717	3828
11	Lampa	100081	Puno	Lampa	Lampa	352861	8301728	3929
12	Laraqueri	116033	Puno	Puno	Pichacani	385938	8213627	3952
13	Llally	114034	Puno	Melgar	Llally	297126	8347800	4211
14	Mañazo	115051	Puno	Puno	Mañazo	357163	8252704	3910
15	Mazocruz	116026	Puno	El collao	Santa Rosa	424708	8149030	3963
16	Pampahuta	115027	Puno	Lampa	Paratía	320200	8287459	4292
17	Pizacoma	116029	Puno	Chucuito	Pizacoma	460721	8130662	3913
18	Pucara	115046	Puno	Lampa	Pucará	353035	8336523	3869
19	Puno	100110	Puno	Puno	Puno	390979	8250334	3831
20	Rincon de la Cruz	000821	Puno	Puno	Acora	413212	8231906	3875
21	Santa Lucia	115140	Puno	Lampa	Santa Lucia	327577	8263529	4035
22	Tahuaco Yunguyo	000882	Puno	Yunguyo	Yunguyo	491988	8196981	3864
23	Taraco	115047	Puno	Huancané	Taraco	395292	8307846	3817

### 5.3. Información hidrométrica

Las cuencas en estudio cuentan con una estación de aforo, las cuales son administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). A continuación se muestran sus características principales.

**Cuadro 4.4.- Características de las estaciones hidrométricas**

N°	Estación	Código	Dpto	Provincia	Distrito	Este [m]	Norte [m]	Altitud [msnm]
1	Puente llave	210301	Puno	El Collao	llave	432979	8221592	3850
2	Puente Unocolla	210407	Puno	San Roman	Juliaca	372122	8291393	3835
3	Río Cabanillas	210406	Puno	San Roman	Juliaca	368618	8289038	3850
4	Río Lampa	210405	Puno	San Roman	Juliaca	370255	8292189	3838
5	Río Verde	270300	Puno	Lampa	Santa Lucia	316419	8278814	4229

## VI. CARACTERIZACION DE LAS UNIDADES HIDROGRAFICAS

### 6.1. Delimitación hidrográfica

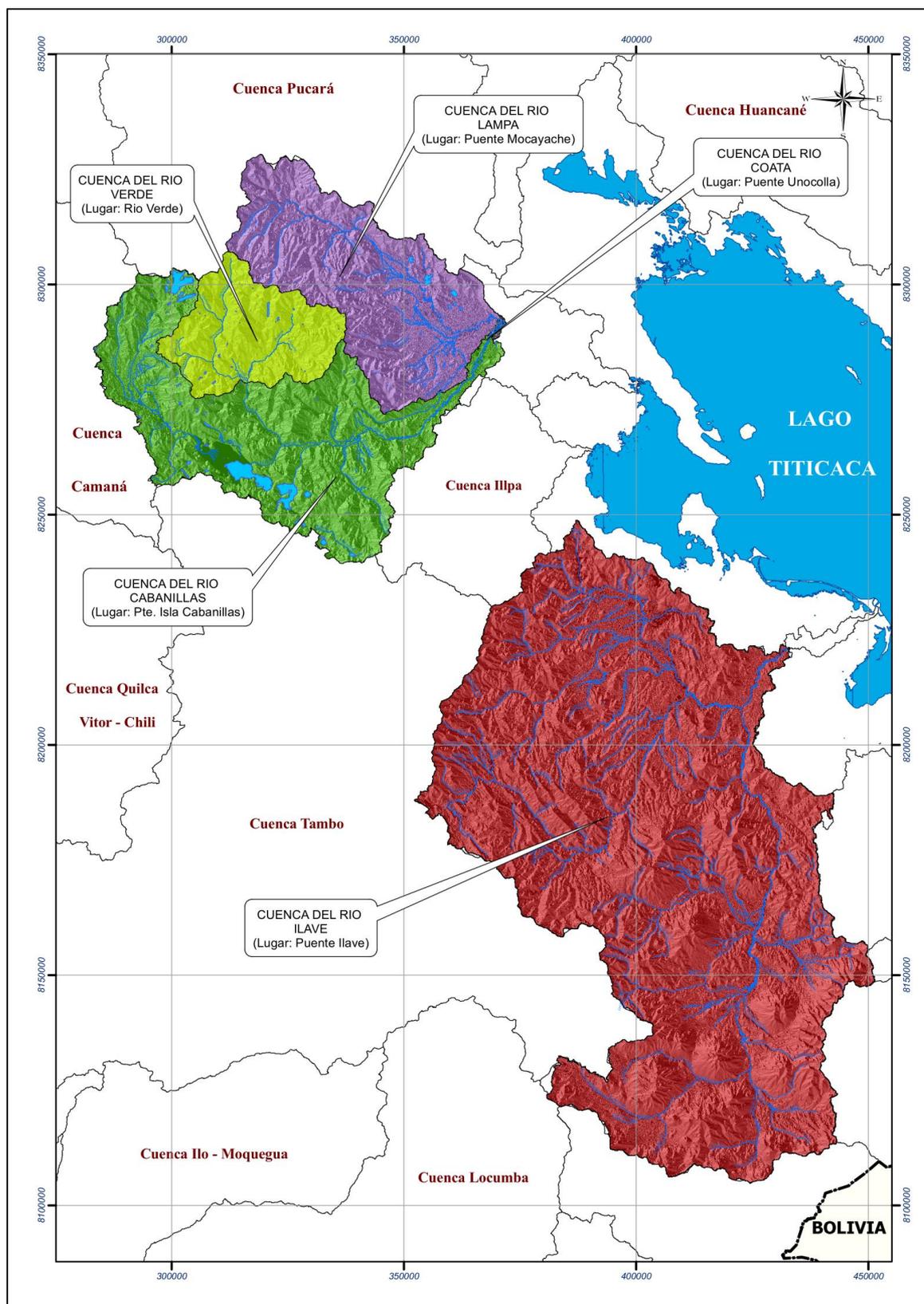
Tradicionalmente la delimitación de cuencas, se realizaban mediante la interpretación de los mapas cartográficos y este proceso, ha ido evolucionando con la tecnología. Hoy en día los sistemas de información geográfica –SIG- proporcionan una gama amplia de aplicaciones y procesos que, con entender los conceptos y teorías, se puede realizar de una forma más sencilla y rápida el análisis y delimitación de una cuenca.

Los SIG, tales como ArcMap y sus herramientas y extensiones tales como Hydrology y Arc Hydro, IDRISI y su módulo de gestión integrada del agua, GRASS, QGIS, HydroSIG, etc., proporciona al usuario herramientas que se utilizan en el análisis y procesamiento de información relacionada al recurso agua en el manejo de las cuencas hidrográficas, a partir de un DEM.

El presente reporte muestra los resultados obtenidos y realizados bajo el entorno del Arc Map con la utilización de la extensión Arc Hydro que almacena los parámetros de cálculo en formato raster - vector dentro de un geodatabase y que consta de dos componentes claves: **Archydro** Data Model y **Archydro** Tools. Archydro es una herramienta de análisis hidrológico desarrollado por Centro de Investigaciones en Recursos de Agua (CRWR) de la Universidad de Texas, de los EE.UU.

Las herramientas de Arc Hydro tienen dos objetivos fundamentales. El primero consiste en manipular (asignar) atributos clave en el modelo de datos de Arc Hydro. Estos atributos constituyen la base para análisis posteriores. Incluyen los identificadores clave (como HydroID, DrainID, NextDownID, etc.) y los atributos de medida (como LengthDown). El segundo objetivo de estas herramientas consiste en proporcionar algunas funciones principales en las aplicaciones de recursos de aguas como, por ejemplo, delineación de cuencas hidrográficas basada en DEM, generación de redes y trazado, basado en atributos. En el siguiente mapa se muestra las cuencas delimitadas.

Mapa 6.1.- Delimitación hidrográficas de las cuencas en estudio



## **6.2. Parámetros morfométricos**

Una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico es la morfometría de cuencas (Maidment, 1992; Verstappen, 1983; Campos, 1992, Gregory and Walling, 1985) ya que nos permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región.

Para el estudio y determinación de los parámetros geomorfológicos se precisa de la información cartográfica de la topografía, del uso del suelo y de la permeabilidad de la región en estudio. Los planos para estos análisis son usados en escalas desde 1:25,000 hasta 1:100,000, dependiendo de los objetivos del estudio y del tamaño de la cuenca en cuestión. Se podría decir que para cuencas de un tamaño superior a los 100 km<sup>2</sup> un plano topográfico en escala 1:100,000 es suficiente para las metas pretendidas en el análisis general del sistema de una cuenca. Obviamente, los trabajos tendientes a un mismo estudio regional deberán efectuarse sobre planos de una misma escala y preferiblemente que hayan sido elaborados bajo los mismos criterios cartográficos. De esta forma se podría contar con resultados homogéneos que podrían ser comparados en estudios posteriores al estudio mismo de las cuencas.

Toda cuenca en estudio debe estar delimitada en cuanto a su río principal tanto aguas abajo como aguas arriba. Aguas abajo idealmente por la estación de aforo más cercana a los límites de la cuenca en que se está interesado. (Siendo el punto de la estación el punto más bajo en el perfil del río y en el borde de la cuenca de interés). Aguas arriba por otra estación que sea el punto más alto en el perfil del río donde se incluya el área en estudio, o por las cabeceras del río si es el caso del estudio de la cuenca desde el nacimiento.

### **6.2.1. Parámetros de forma**

Permite realizar estudios cuantitativos sobre particularidades de cada una de las cuencas, evitándose las descripciones subjetivas y se introducen parámetros matemáticos que se pueden calcular, pudiéndose analizar el medio Físico mediante términos matemáticos y su respuesta hidrológica. A su vez, permite establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas, tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación de la cuenca más rápida, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base, principalmente.

Por otro lado interviene en las características del hidrograma de descarga de un río (eventos máximos). En general, cuencas de igual área pero de diferente forma generan hidrogramas diferentes.

#### **6.2.1.1. Área de la cuenca (A)**

El área de la cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro (P). Esta línea se traza normalmente mediante fotointerpretación de fotografía aéreas en las que se aprecia el relieve (y por lo tanto las divisorias de aguas) o sobre un mapa topográfico en función las curvas de nivel representadas. Generalmente es el factor más importante en la relación escorrentía - características morfológicas.

Para su cálculo se puede usar papel milimetrado o un planímetro, pero también es posible determinarla por medio de herramientas informáticas, para lo que es necesario disponer de una base cartográfica digital y de un SIG, tal como se mencionó en el contenido anterior.

Según la ANA, Las cuencas de los ríos Ilave y Coata, tienen un área de 7832.53 km<sup>2</sup> y 4908.44 Km<sup>2</sup>, hasta la desembocadura del lago Titicaca.

En el presente estudio las cuencas se han delimitado hasta los lugares donde se tienen instaladas las estaciones Hidrológicas, resumiendo que el área de las cuencas Ilave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son de 7755.79 km<sup>2</sup>, 4443.54 km<sup>2</sup>, 1556.43km<sup>2</sup>, 2878.26 km<sup>2</sup>, 748.33 km<sup>2</sup>, respectivamente.

#### **6.2.1.2. Perímetro (P)**

Al igual que en el caso de la superficie y de todas las medidas lineales que se puedan medir sobre la representación en un mapa topográfico, al calcular la longitud de la línea del perímetro lo que realmente estaremos midiendo será la de la proyección en el plano horizontal, medida que diferirá de la real, dependiendo del relieve o inclinación de dicha línea. De todas formas, el error que se comete es de una magnitud muy inferior a la de la medida en sí y, por tanto, totalmente despreciable.

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la cuencas Ilave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son de 600.39 km, 393.00 km, 237.78 km, 375.96 km y 144.50 km, respectivamente.

### 6.2.1.3. Índice de Compacidad de Gravelius (Kc)

Relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia, cuanto más irregular se la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad.

El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano se encuentre, más se aproximará su forma a la del círculo, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir crecientes con mayores picos (caudales). Por el contrario, si el índice es mayor a 2 o se aleja más del valor de la unidad significa un mayor alargamiento en la forma de la cuenca y tendrá una menor tendencia a crecidas.

$$K_c = 0.282 * \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad \dots\dots\dots[\text{Ec. 6.1}]$$

Siendo:

P = Perímetro de la cuenca (Km)  
A = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Las cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde tienen valores adimensionales de 1.92, 1.66, 1.70, 1.98 y 1.49, las cuales están más próximos a 2, lo que significa que son de forma irregular los cuales están expuestas a moderadas crecientes.

### 6.2.1.4. Factor de forma de Horton (Ff)

Parámetro adimensional para medir la forma de la cuenca, relacionado entre el área de la cuenca y la longitud del río principal, denominado factor o relación de forma de Horton, el cual viene expresado por:

$$F_f = \frac{A}{L^2} \quad \dots\dots\dots[\text{Ec. 6.2}]$$

Siendo:

A = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)  
L = Longitud del río principal (Km)

Para ver la forma de las cuencas en estudio se pueden utilizar los valores interpretativos de la relación de Horton presentados en el siguiente cuadro.

**Tabla 6.1.-** Valores interpretativos de la relación de Horton

Factor	Forma
< 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

La cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas tienen factores de 0.22, 0.17, 0.14 y 0.12, respectivamente por lo que están en el rango de alargada a muy alargada, mientras que la cuenca del río verde tiene un factor de 0.41 el cual según la clasificación de Horton sería una cuenca no muy alargada ni muy ensanchada.

#### 6.2.1.5. Coeficiente de Circularidad de Miller (Cc)

El coeficiente de circularidad de Miller varía entre 0 y 1. En este caso valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que unos coeficientes de circularidad cercanos a 0, indican que las cuencas son alargadas.

$$C_c = 4\pi \frac{A}{P^2} \dots\dots\dots[\text{Ec. 6.3}]$$

Siendo:

A = Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

P = Perímetro de la cuenca (Km)

De los resultados obtenidos para la cuenca llave, Coata, Lampa y Cabanillas, sus valores estimados son de 0.27, 0.36, 0.35 y 0.26 respectivamente, los cuales están más cercanos a 0 representado a la forma alargada, mientras que para la cuenca del río verde el valor adimensional estimado es de 0.45, estando entre la media de los valores establecidos representando a una cuenca no muy alargada ni circular.

#### 6.2.2. Parámetros de relieve

La influencia del relieve sobre la respuesta hidrológica de la cuenca es importante, puesto que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades del agua en las corrientes y menor será el tiempo de concentración de la cuenca. La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente. A una mayor pendiente corresponderá una menor

duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.

### 6.2.2.1. Pendiente de la cuenca

Es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve de la misma y permite hacer comparaciones entre cuencas (Guilarte, 1978). La pendiente media estimada de esta manera, aunque útil para comparar cuencas, implica representar toda la cuenca con un sólo valor de pendiente, una situación que para algunos autores se aleja de la realidad (Guilarte, 1978). Por esta razón, en la actualidad se trabaja en el modelo de elevación digital del terreno de la cuenca, pieza clave en la delimitación de las unidades de paisaje presentes en una cuenca.

La pendiente de la cuenca tiene una importante correlación con la infiltración del escurrimiento superficial y la humedad del suelo, y es uno de los factores físicos que controla el flujo sobre el terreno y tiene una influencia directa en la magnitud de las avenidas y crecidas.

Para la caracterización de la pendiente se utilizó el DEM para cada área específica y bajo el entorno de ArcMap, se determinó de forma inmediata, reclasificándolo por rangos según el reglamento de clasificación de tierras presentadas en la siguiente tabla:

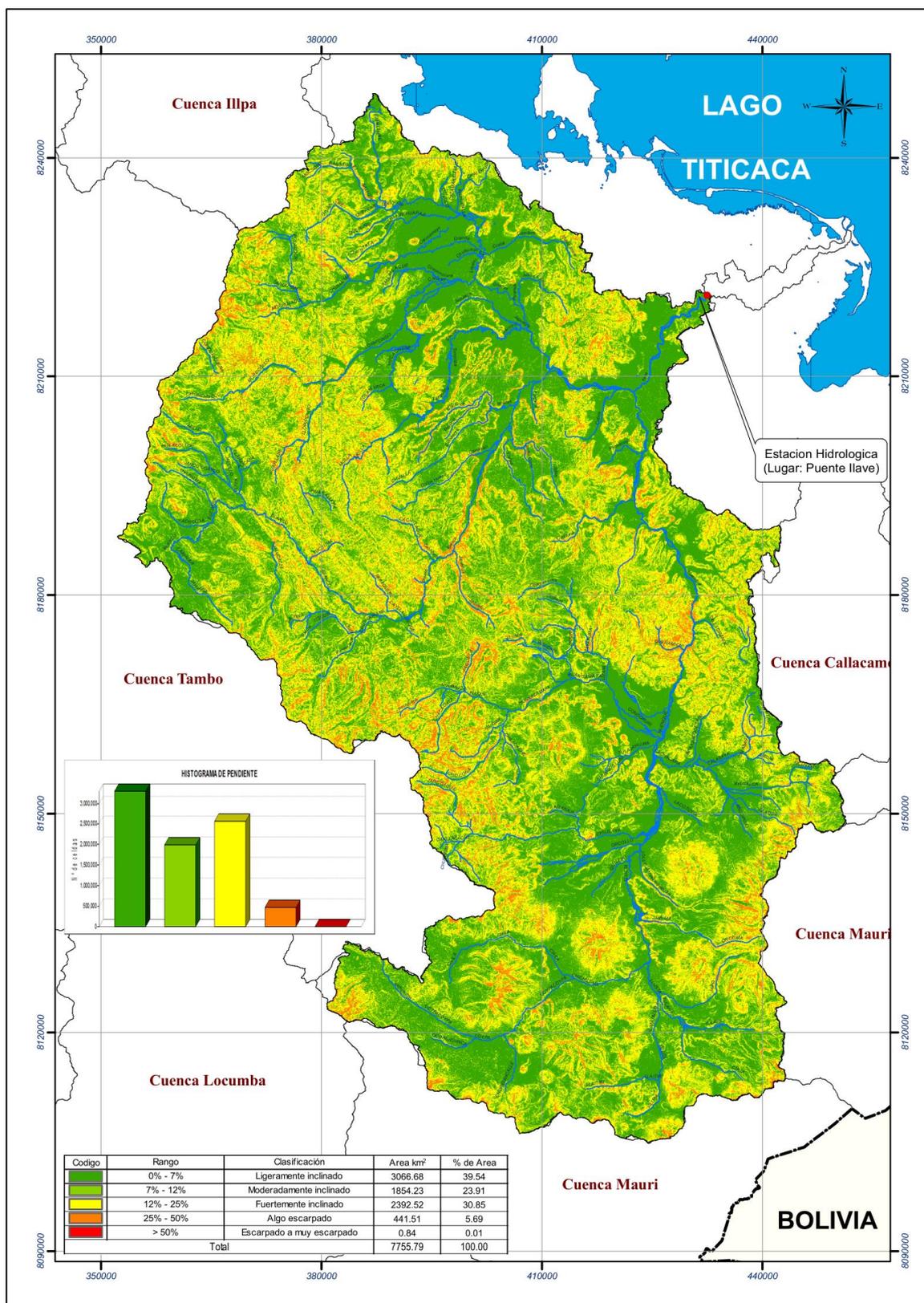
**Tabla 6.2.-** Clasificación de terrenos según pendiente media

Pendiente media	Terrenos
0% - 7%	Ligeramente inclinado
7% - 12%	Moderadamente inclinado
12% - 25%	Fuertemente inclinado
25% - 50%	Algo escarpado
> 50%	Escarpado a muy escarpado

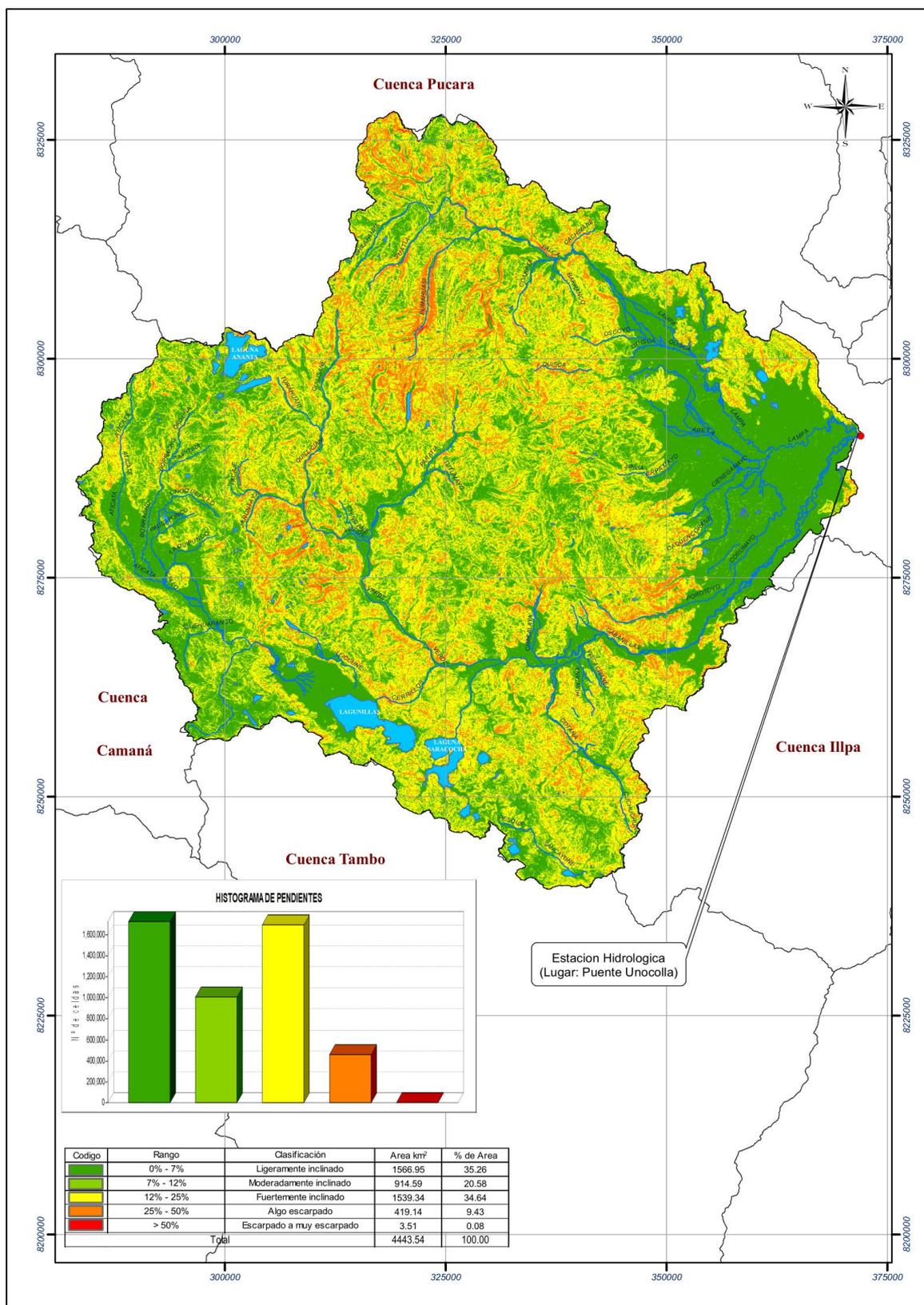
*Fuente: Reglamento de Clasificación de Tierras, decreto supremo Nº 0062/75-AG.*

La pendiente media de las cuencas Ilave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son de 10.60%, 11.99%, 11.99%, 12.01% y 14.65% respectivamente, del cual se deduce que según la clasificación presentada en la tabla 6.1, las primeras cuatro cuencas estarían en el rango de moderadamente inclinado y la cuenca del río Verde fuertemente inclinado. En los siguientes mapas se presentan la distribución espacial de las pendientes y su respectiva clasificación así como también se adjunta en cuadros y gráficos la pendiente predominante en cada cuenca.

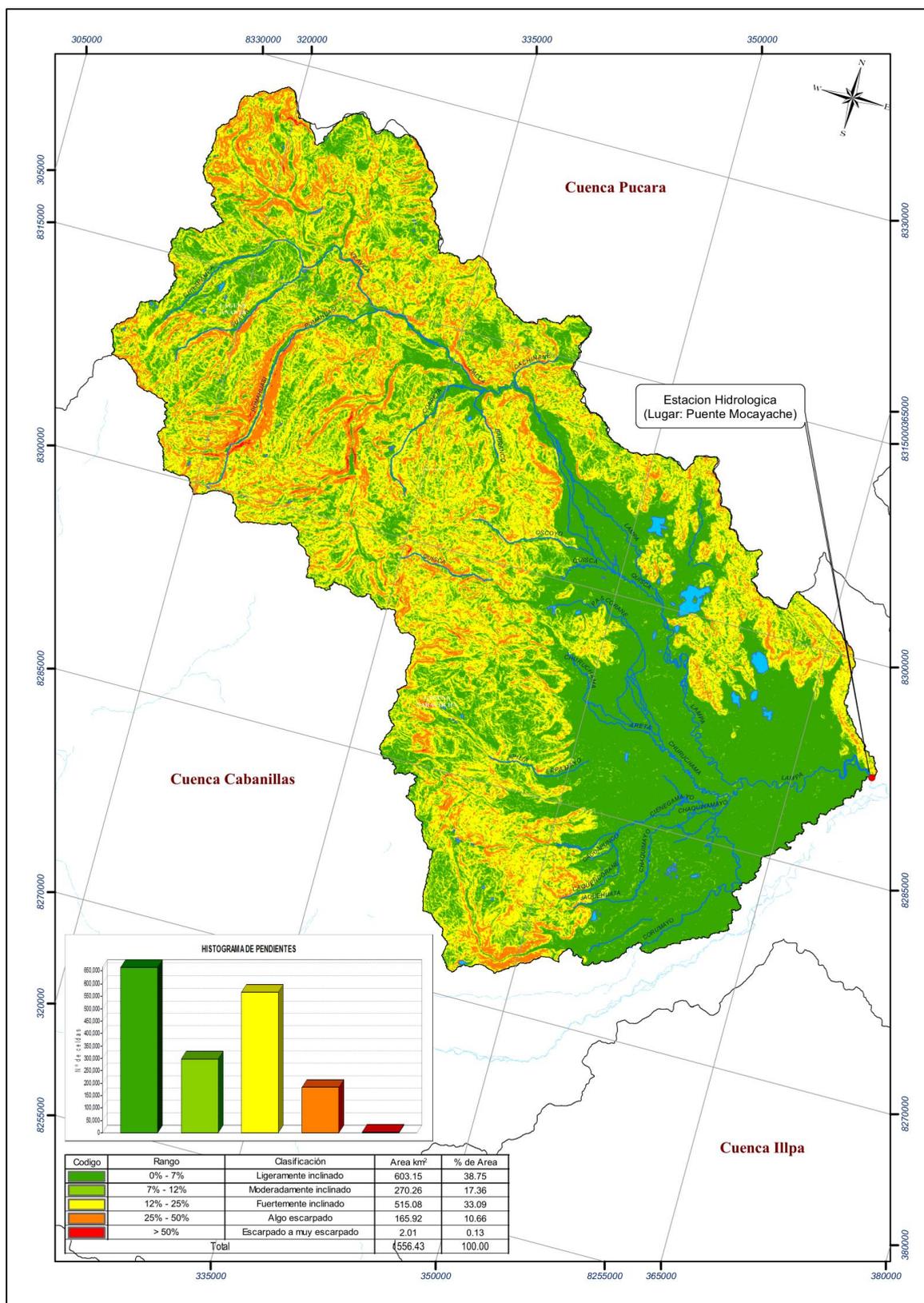
**Mapa 6.2.- Distribución espacial de pendientes – Cuenca del rio llave**



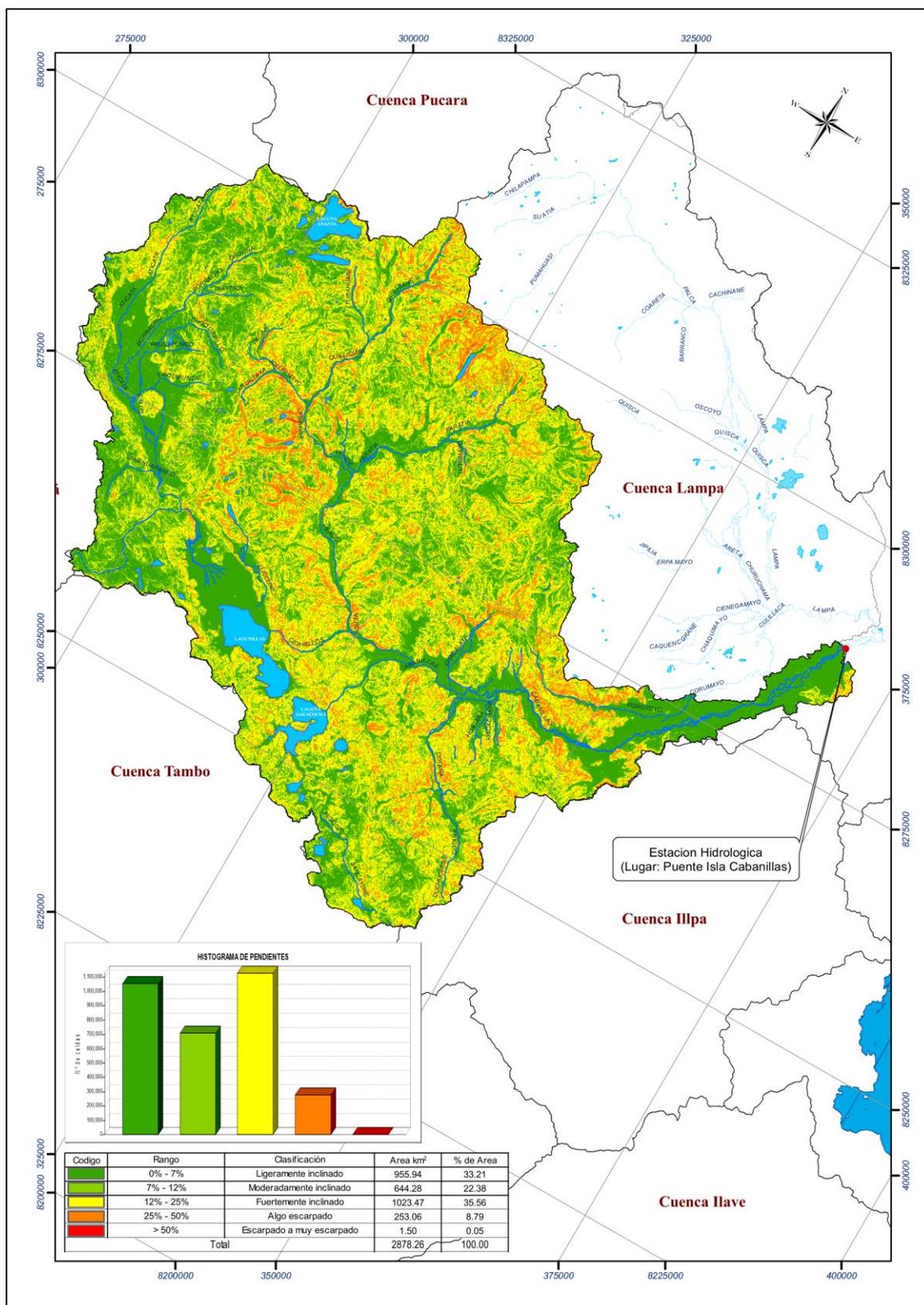
**Mapa 6.3.- Distribución espacial de pendientes – Cuenca del rio Coata**



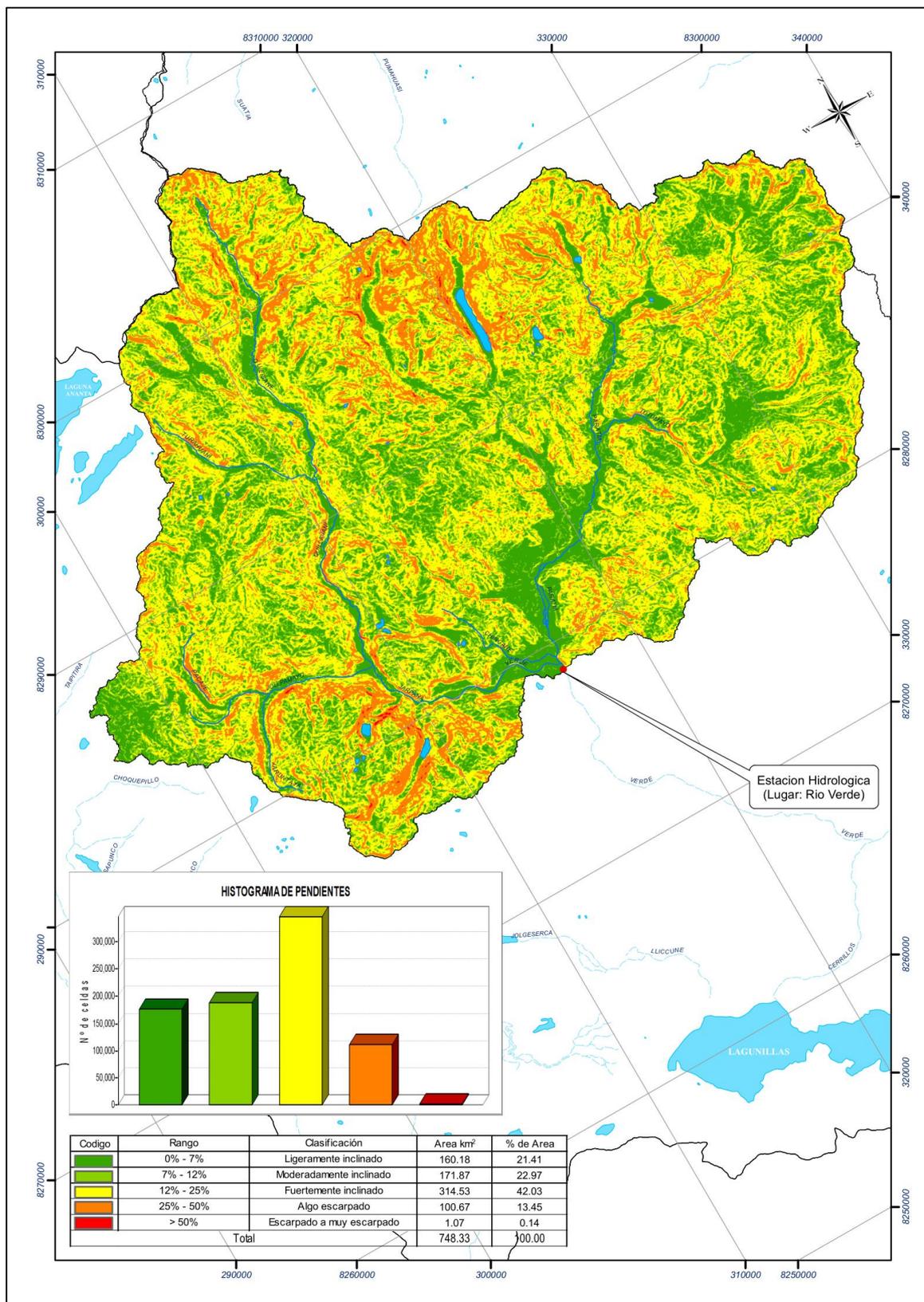
**Mapa 6.4.- Distribución espacial de pendientes – Cuenca del rio Lampa**



**Mapa 6.5.- Distribución espacial de pendientes – Cuenca del río Cabanillas**



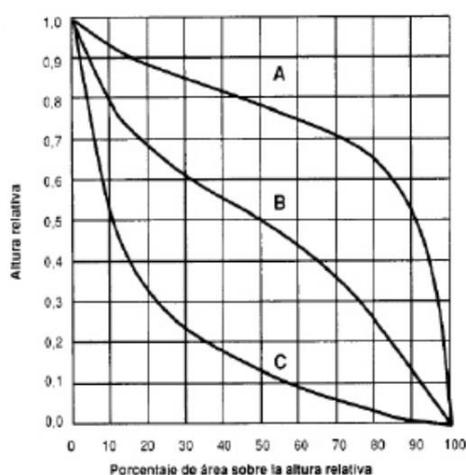
**Mapa 6.6.- Distribución espacial de pendientes – Cuenca del rio Verde**



### 6.2.2.2. Curva hipsométrica

El reflejo más preciso sobre la elevación de una cuenca se logra a través de la curva hipsométrica, y esta es el producto del área de acuerdo con la elevación, es decir, una representación bidimensional, que grafica en el eje vertical la elevación y en el eje horizontal el porcentaje del área sobre cada curva de nivel en términos del área total. También es una representación gráfica de la superficie del terreno, que se encuentra por encima de determinada cota. A través de esta curva también podemos determinar la altitud más frecuente, altitud media y la altitud de frecuencia media.

Por otro lado este parámetro también nos brinda una idea respecto al grado de madurez de una cuenca, a su vez el parámetro está directamente relacionado con la temperatura y la precipitación en función de la altitud.



**Figura 1.-** Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (según Strahler).  
(fuente: LLamas, J., Hidrología general).

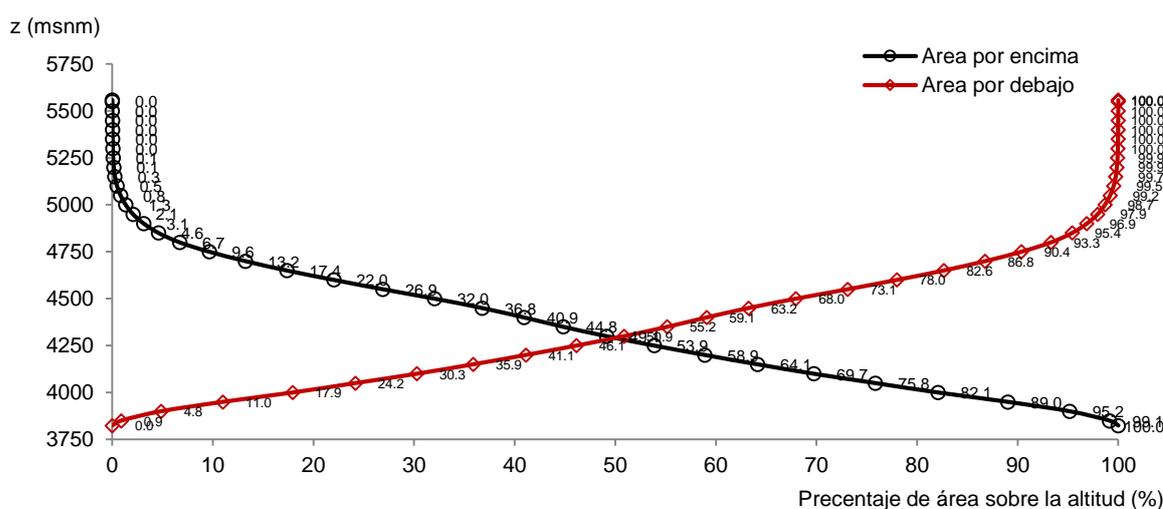
La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos: curva A: fase de juventud- curva B: fase de madurez- curva C: fase de vejez.

Para generar la C.H. en SIG se debe reclasificar el MDT, según los intervalos deseados, para obtener el cálculo de cada área en cada rango.

**Cuadro 6.1.- Distribución altimétrica - cuenca del rio Ilave**

Z min, max, med [msnm]			N° de celdas	Area parcial [km2]	Area Acum. [km2]	Area sobre z [km2]	Area parcial [%]	Area por debajo [%]	Area por encima [%]	
<										
<	3824			0.00	0.00	7755.79	0.00	0.00	100	
3824	-	3850	3837.0	72905.0	67.82	67.82	7687.97	0.87	0.87	99.13
3850	-	3900	3875.0	331264.0	308.14	375.96	7379.83	3.97	4.85	95.15
3900	-	3950	3925.0	512431.0	476.67	852.63	6903.16	6.15	10.99	89.01
3950	-	4000	3975.0	578831.0	538.43	1391.06	6364.73	6.94	17.94	82.06
4000	-	4050	4025.0	518279.0	482.11	1873.17	5882.62	6.22	24.15	75.85
4050	-	4100	4075.0	510502.0	474.87	2348.04	5407.75	6.12	30.27	69.73
4100	-	4150	4125.0	465626.0	433.13	2781.17	4974.62	5.58	35.86	64.14
4150	-	4200	4175.0	437944.0	407.38	3188.54	4567.24	5.25	41.11	58.89
4200	-	4250	4225.0	418859.0	389.63	3578.17	4177.62	5.02	46.14	53.86
4250	-	4300	4275.0	394420.0	366.89	3945.06	3810.73	4.73	50.87	49.13
4300	-	4350	4325.0	358530.0	333.51	4278.57	3477.22	4.30	55.17	44.83
4350	-	4400	4375.0	325964.0	303.21	4581.78	3174.01	3.91	59.08	40.92
4400	-	4450	4425.0	346515.0	322.33	4904.11	2851.68	4.16	63.23	36.77
4450	-	4500	4475.0	394214.0	366.70	5270.81	2484.97	4.73	67.96	32.04
4500	-	4550	4525.0	428877.0	398.94	5669.76	2086.03	5.14	73.10	26.90
4550	-	4600	4575.0	406568.0	378.19	6047.95	1707.84	4.88	77.98	22.02
4600	-	4650	4625.0	389281.0	362.11	6410.06	1345.73	4.67	82.65	17.35
4650	-	4700	4675.0	342374.0	318.48	6728.54	1027.25	4.11	86.76	13.24
4700	-	4750	4725.0	300587.0	279.61	7008.15	747.64	3.61	90.36	9.64
4750	-	4800	4775.0	245760.0	228.61	7236.75	519.03	2.95	93.31	6.69
4800	-	4850	4825.0	174940.0	162.73	7399.48	356.30	2.10	95.41	4.59
4850	-	4900	4875.0	121932.0	113.42	7512.90	242.88	1.46	96.87	3.13
4900	-	4950	4925.0	89285.0	83.05	7595.96	159.83	1.07	97.94	2.06
4950	-	5000	4975.0	60634.0	56.40	7652.36	103.43	0.73	98.67	1.33
5000	-	5050	5025.0	42829.0	39.84	7692.20	63.59	0.51	99.18	0.82
5050	-	5100	5075.0	29257.0	27.22	7719.42	36.37	0.35	99.53	0.47
5100	-	5150	5125.0	17267.0	16.06	7735.48	20.31	0.21	99.74	0.26
5150	-	5200	5175.0	10067.0	9.36	7744.84	10.94	0.12	99.86	0.14
5200	-	5250	5225.0	5320.0	4.95	7749.79	6.00	0.06	99.92	0.08
5250	-	5300	5275.0	2654.0	2.47	7752.26	3.53	0.03	99.95	0.05
5300	-	5350	5325.0	1417.0	1.32	7753.58	2.21	0.02	99.97	0.03
5350	-	5400	5375.0	974.0	0.91	7754.48	1.30	0.01	99.98	0.02
5400	-	5450	5425.0	620.0	0.58	7755.06	0.73	0.01	99.99	0.01
5450	-	5500	5475.0	511.0	0.48	7755.54	0.25	0.01	100.00	0.00
5500	-	5550	5525.0	262.0	0.24	7755.78	0.01	0.00	100.00	0.00
5550	-	5558	5554.0	8.0	0.01	7755.79	0.00	0.00	100.00	0.00
Area total de la cuenca :			7755.79	Km <sup>2</sup>	Altitud de frecuencia media :			4290.85	m.s.n.m.	
Altitud media de la cuenca :			4325.64	m.s.n.m.	Altitud mas frecuente :			3950 - 4000	m.s.n.m.	

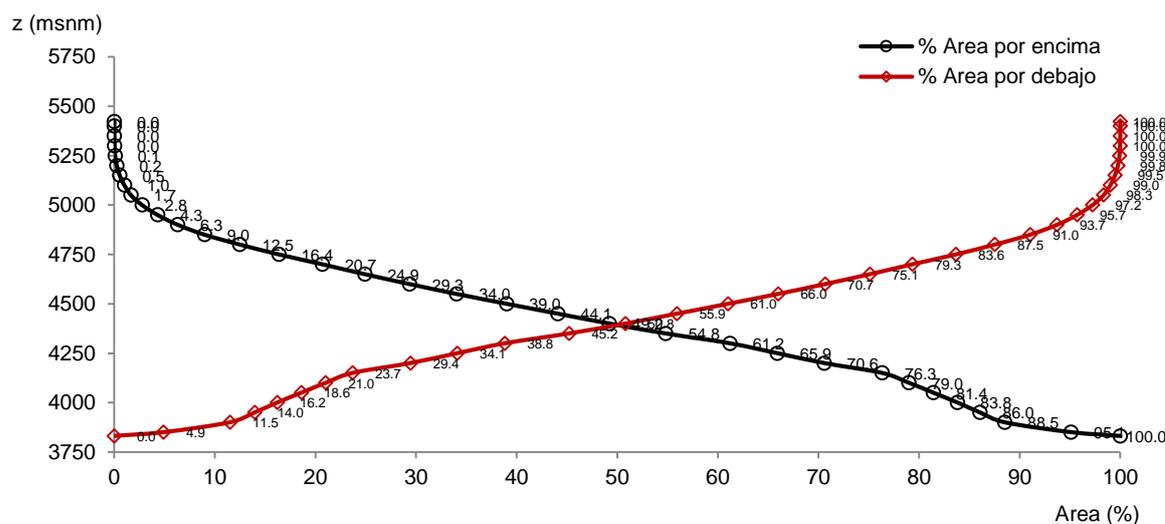
**Gráfico 6.1.- Curva hipsométrica – Cuenca del rio Ilave**



**Cuadro 6.2.- Distribución altimétrica - cuenca del rio Coata**

Z min, max, med [msnm]			N° de celdas	Area parcial [km2]	Area Acum. [km2]	Area sobre z [km2]	Area pacial [%]	Area por debajo [%]	Area por encima [%]
<	3831			0.00	0.00	4443.54	0.00	0.00	100
3831	-	3850	3840.5	239704.0	217.67	217.67	4225.87	4.90	95.10
3850	-	3900	3875.0	322669.0	293.01	510.69	3932.85	6.59	88.51
3900	-	3950	3925.0	120767.0	109.67	620.36	3823.19	2.47	86.04
3950	-	4000	3975.0	109029.0	99.01	719.37	3724.18	2.23	83.81
4000	-	4050	4025.0	117490.0	106.69	826.06	3617.48	2.40	81.41
4050	-	4100	4075.0	118723.0	107.81	933.87	3509.67	2.43	78.98
4100	-	4150	4125.0	130199.0	118.23	1052.10	3391.44	2.66	76.32
4150	-	4200	4175.0	281838.0	255.94	1308.04	3135.50	5.76	70.56
4200	-	4250	4225.0	227688.0	206.76	1514.80	2928.74	4.65	65.91
4250	-	4300	4275.0	230433.0	209.26	1724.06	2719.48	4.71	61.20
4300	-	4350	4325.0	313181.0	284.40	2008.46	2435.09	6.40	54.80
4350	-	4400	4375.0	273915.0	248.74	2257.20	2186.34	5.60	49.20
4400	-	4450	4425.0	250227.0	227.23	2484.43	1959.11	5.11	44.09
4450	-	4500	4475.0	248734.0	225.87	2710.30	1733.24	5.08	39.01
4500	-	4550	4525.0	244131.0	221.69	2932.00	1511.55	4.99	34.02
4550	-	4600	4575.0	228352.0	207.37	3139.36	1304.18	4.67	29.35
4600	-	4650	4625.0	217454.0	197.47	3336.83	1106.71	4.44	24.91
4650	-	4700	4675.0	207003.0	187.98	3524.81	918.73	4.23	20.68
4700	-	4750	4725.0	210802.0	191.43	3716.24	727.30	4.31	16.37
4750	-	4800	4775.0	190472.0	172.97	3889.21	554.34	3.89	12.48
4800	-	4850	4825.0	171525.0	155.76	4044.97	398.57	3.51	8.97
4850	-	4900	4875.0	130487.0	118.49	4163.46	280.08	2.67	6.30
4900	-	4950	4925.0	97920.0	88.92	4252.38	191.16	2.00	4.30
4950	-	5000	4975.0	75378.0	68.45	4320.83	122.71	1.54	2.76
5000	-	5050	5025.0	53727.0	48.79	4369.62	73.92	1.10	1.66
5050	-	5100	5075.0	32483.0	29.50	4399.12	44.42	0.66	1.00
5100	-	5150	5125.0	22652.0	20.57	4419.69	23.85	0.46	0.54
5150	-	5200	5175.0	14511.0	13.18	4432.87	10.67	0.30	0.24
5200	-	5250	5225.0	7858.0	7.14	4440.01	3.54	0.16	0.08
5250	-	5300	5275.0	2804.0	2.55	4442.55	0.99	0.06	0.02
5300	-	5350	5325.0	902.0	0.82	4443.37	0.17	0.02	0.00
5350	-	5400	5375.0	170.0	0.15	4443.53	0.02	0.00	0.00
5400	-	5422	5411.0	20.0	0.02	4443.54	0.00	0.00	0.00
Area total de la cuenca :				4443.54	Km <sup>2</sup>	Altitud de frecuencia media :		4392.88	m.s.n.m.
Altitud media de la cuenca :				4395.07	m.s.n.m.	Altitud mas frecuente :		3850 - 3900	m.s.n.m.

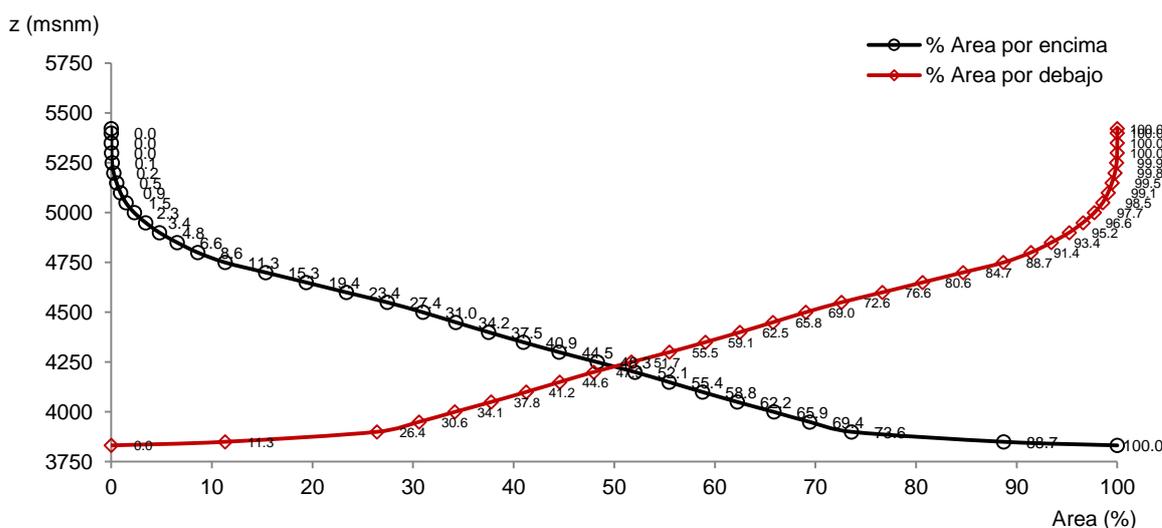
**Gráfico 6.2.- Curva hipsométrica – Cuenca del rio Coata**



**Cuadro 6.3.- Distribución altimétrica - cuenca del rio Lampa**

Z min, max, med [msnm]			N° de celdas	Area parcial [km2]	Area Acum. [km2]	Area sobre z [km2]	Area pacial [%]	Area por debajo [%]	Area por encima [%]	
<	3832			0.00	0.00	1556.43	0.00	0.00	100	
3832	-	3850	3841.0	193764.0	175.96	175.96	1380.47	11.31	11.31	88.69
3850	-	3900	3875.0	258903.0	235.11	411.07	1145.37	15.11	26.41	73.59
3900	-	3950	3925.0	71504.0	64.93	476.00	1080.43	4.17	30.58	69.42
3950	-	4000	3975.0	60975.0	55.37	531.37	1025.06	3.56	34.14	65.86
4000	-	4050	4025.0	62150.0	56.44	587.81	968.62	3.63	37.77	62.23
4050	-	4100	4075.0	59417.0	53.96	641.76	914.67	3.47	41.23	58.77
4100	-	4150	4125.0	57209.0	51.95	693.72	862.72	3.34	44.57	55.43
4150	-	4200	4175.0	57807.0	52.49	746.21	810.22	3.37	47.94	52.06
4200	-	4250	4225.0	64384.0	58.47	804.68	751.75	3.76	51.70	48.30
4250	-	4300	4275.0	64863.0	58.90	863.58	692.85	3.78	55.48	44.52
4300	-	4350	4325.0	61174.0	55.55	919.13	637.30	3.57	59.05	40.95
4350	-	4400	4375.0	58781.0	53.38	972.51	583.92	3.43	62.48	37.52
4400	-	4450	4425.0	56281.0	51.11	1023.62	532.81	3.28	65.77	34.23
4450	-	4500	4475.0	55867.0	50.73	1074.35	482.08	3.26	69.03	30.97
4500	-	4550	4525.0	60749.0	55.17	1129.52	426.91	3.54	72.57	27.43
4550	-	4600	4575.0	69843.0	63.42	1192.94	363.49	4.07	76.65	23.35
4600	-	4650	4625.0	68373.0	62.09	1255.03	301.40	3.99	80.64	19.36
4650	-	4700	4675.0	69016.0	62.67	1317.70	238.73	4.03	84.66	15.34
4700	-	4750	4725.0	68847.0	62.52	1380.22	176.21	4.02	88.68	11.32
4750	-	4800	4775.0	46684.0	42.39	1422.62	133.81	2.72	91.40	8.60
4800	-	4850	4825.0	34946.0	31.73	1454.35	102.08	2.04	93.44	6.56
4850	-	4900	4875.0	30256.0	27.48	1481.83	74.60	1.77	95.21	4.79
4900	-	4950	4925.0	23574.0	21.41	1503.23	53.20	1.38	96.58	3.42
4950	-	5000	4975.0	19430.0	17.64	1520.88	35.55	1.13	97.72	2.28
5000	-	5050	5025.0	14198.0	12.89	1533.77	22.66	0.83	98.54	1.46
5050	-	5100	5075.0	9255.0	8.40	1542.18	14.26	0.54	99.08	0.92
5100	-	5150	5125.0	6552.0	5.95	1548.13	8.31	0.38	99.47	0.53
5150	-	5200	5175.0	5083.0	4.62	1552.74	3.69	0.30	99.76	0.24
5200	-	5250	5225.0	2818.0	2.56	1555.30	1.13	0.16	99.93	0.07
5250	-	5300	5275.0	925.0	0.84	1556.14	0.29	0.05	99.98	0.02
5300	-	5350	5325.0	271.0	0.25	1556.39	0.04	0.02	100.00	0.00
5350	-	5400	5375.0	42.0	0.04	1556.42	0.01	0.00	100.00	0.00
5400	-	5422	5411.0	7.0	0.01	1556.43	0.00	0.00	100.00	0.00
Area total de la cuenca :			1556.43	Km <sup>2</sup>	Altitud de frecuencia media :		4227.37	m.s.n.m.		
Altitud media de la cuenca :			4270.45	m.s.n.m.	Altitud mas frecuente :		3850 - 3900	m.s.n.m.		

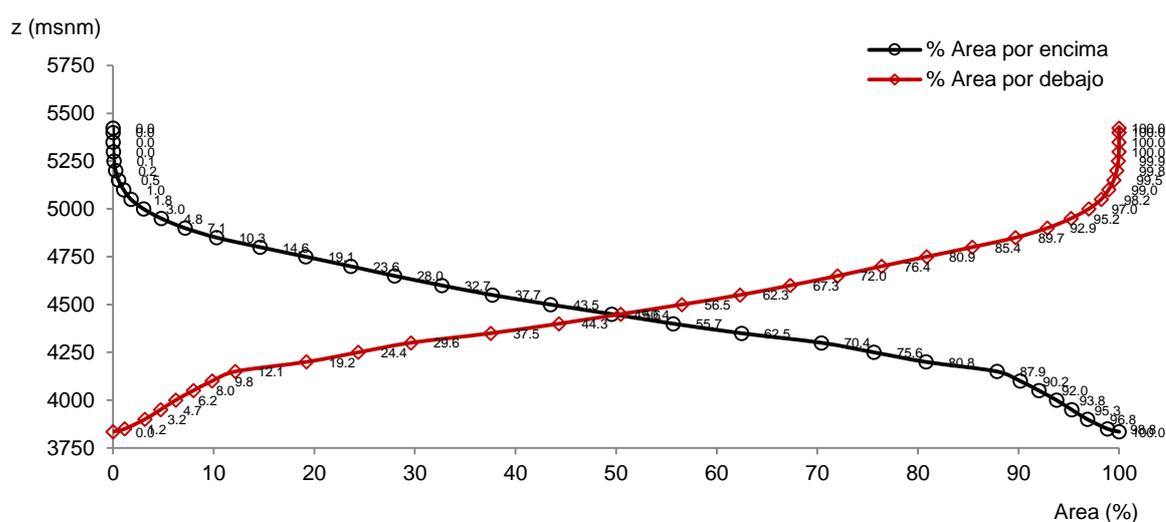
**Gráfico 6.3.- Curva hipsométrica – Cuenca del rio Lampa**



**Cuadro 6.4.- Distribución altimétrica - cuenca del rio Cabanillas**

Z min, max, med [msnm]			N° de celdas	Area parcial [km2]	Area Acum. [km2]	Area sobre z [km2]	Area pacial [%]	Area por debajo [%]	Area por encima [%]	
<										
	<	3835		0.00	0.00	2878.26	0.00	0.00	100	
3835	-	3850	3842.5	36693.0	33.32	33.32	2844.94	1.16	98.84	
3850	-	3900	3875.0	63468.0	57.64	90.96	2787.30	2.00	96.84	
3900	-	3950	3925.0	49173.0	44.65	135.61	2742.65	1.55	95.29	
3950	-	4000	3975.0	47938.0	43.53	179.14	2699.12	1.51	93.78	
4000	-	4050	4025.0	55340.0	50.25	229.40	2648.86	1.75	92.03	
4050	-	4100	4075.0	59306.0	53.86	283.25	2595.01	1.87	90.16	
4100	-	4150	4125.0	72990.0	66.28	349.53	2528.72	2.30	87.86	
4150	-	4200	4175.0	224031.0	203.44	552.98	2325.28	7.07	80.79	
4200	-	4250	4225.0	163304.0	148.30	701.27	2176.99	5.15	75.64	
4250	-	4300	4275.0	165570.0	150.35	851.63	2026.63	5.22	70.41	
4300	-	4350	4325.0	252007.0	228.85	1080.47	1797.79	7.95	62.46	
4350	-	4400	4375.0	215134.0	195.36	1275.83	1602.42	6.79	55.67	
4400	-	4450	4425.0	193946.0	176.12	1451.96	1426.30	6.12	49.55	
4450	-	4500	4475.0	192867.0	175.14	1627.10	1251.16	6.08	43.47	
4500	-	4550	4525.0	183382.0	166.53	1793.63	1084.63	5.79	37.68	
4550	-	4600	4575.0	158509.0	143.94	1937.57	940.69	5.00	32.68	
4600	-	4650	4625.0	149081.0	135.38	2072.95	805.31	4.70	27.98	
4650	-	4700	4675.0	137987.0	125.31	2198.25	680.00	4.35	23.63	
4700	-	4750	4725.0	141955.0	128.91	2327.16	551.09	4.48	19.15	
4750	-	4800	4775.0	143788.0	130.57	2457.74	420.52	4.54	14.61	
4800	-	4850	4825.0	136579.0	124.03	2581.76	296.49	4.31	10.30	
4850	-	4900	4875.0	100231.0	91.02	2672.78	205.48	3.16	7.14	
4900	-	4950	4925.0	74346.0	67.51	2740.30	137.96	2.35	4.79	
4950	-	5000	4975.0	55948.0	50.81	2791.10	87.16	1.77	3.03	
5000	-	5050	5025.0	39529.0	35.90	2827.00	51.26	1.25	1.78	
5050	-	5100	5075.0	23228.0	21.09	2848.09	30.17	0.73	1.05	
5100	-	5150	5125.0	16100.0	14.62	2862.71	15.55	0.51	0.54	
5150	-	5200	5175.0	9428.0	8.56	2871.27	6.98	0.30	0.24	
5200	-	5250	5225.0	5040.0	4.58	2875.85	2.41	0.16	0.08	
5250	-	5300	5275.0	1879.0	1.71	2877.56	0.70	0.06	0.02	
5300	-	5350	5325.0	631.0	0.57	2878.13	0.13	0.02	0.00	
5350	-	5400	5375.0	128.0	0.12	2878.25	0.01	0.00	0.00	
5400	-	5422	5411.0	13.0	0.01	2878.26	0.00	0.00	0.00	
Area total de la cuenca :			2878.26	Km <sup>2</sup>			Altitud de frecuencia media :		4446.36	m.s.n.m.
Altitud media de la cuenca :			4464.17	m.s.n.m.			Altitud mas frecuente :		4300 - 4350	m.s.n.m.

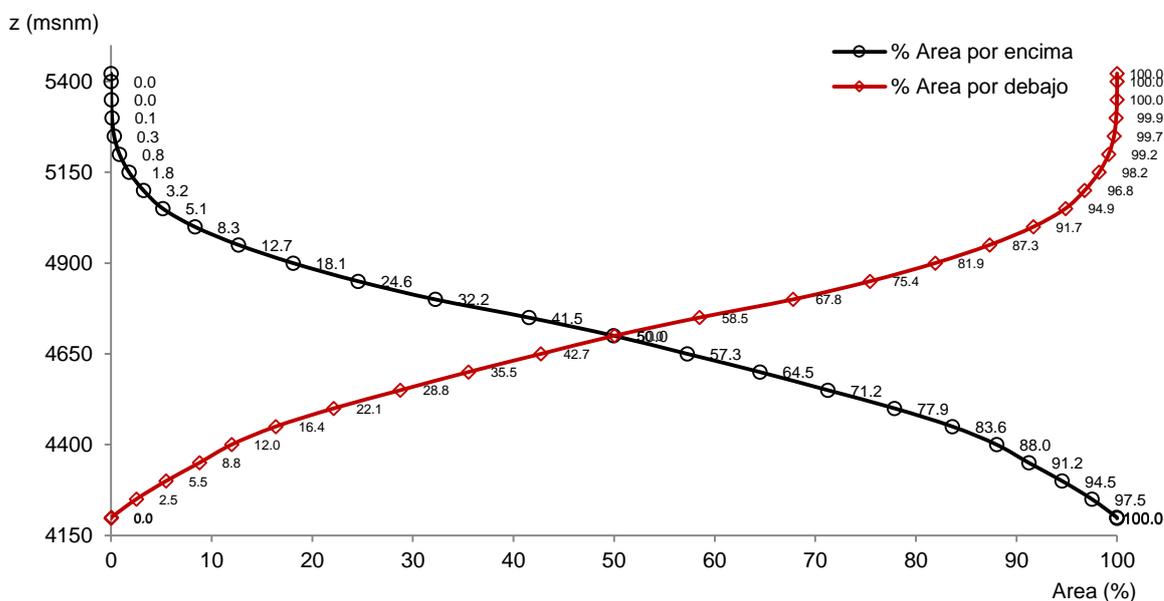
**Gráfico 6.4.- Curva hipsométrica – Cuenca del rio Cabanillas**



**Cuadro 6.5.- Distribución altimétrica - cuenca del rio Verde**

Z min, max, med [msnm]			N° de celdas	Area parcial [km <sup>2</sup> ]	Area Acum. [km <sup>2</sup> ]	Area sobre z [km <sup>2</sup> ]	Area pacial [%]	Area por debajo [%]	Area por encima [%]
<	4197			0.00	0.00	748.33	0.00	0.00	100
4197	-	4200	4198.5	314.0	0.29	748.04	0.04	0.04	99.96
4200	-	4250	4225.0	20365.0	18.49	729.55	2.47	2.51	97.49
4250	-	4300	4275.0	24395.0	22.15	707.40	2.96	5.47	94.53
4300	-	4350	4325.0	27228.0	24.73	682.67	3.30	8.77	91.23
4350	-	4400	4375.0	26333.0	23.91	658.76	3.20	11.97	88.03
4400	-	4450	4425.0	36322.0	32.98	625.78	4.41	16.38	83.62
4450	-	4500	4475.0	47415.0	43.06	582.72	5.75	22.13	77.87
4500	-	4550	4525.0	54580.0	49.56	533.15	6.62	28.75	71.25
4550	-	4600	4575.0	55634.0	50.52	482.63	6.75	35.51	64.49
4600	-	4650	4625.0	59509.0	54.04	428.59	7.22	42.73	57.27
4650	-	4700	4675.0	60303.0	54.76	374.50	7.32	50.04	49.96
4700	-	4750	4725.0	69525.0	63.14	437.63	8.44	58.48	41.52
4750	-	4800	4775.0	76668.0	69.62	507.25	9.30	67.78	32.22
4800	-	4850	4825.0	63091.0	57.29	564.55	7.66	75.44	24.56
4850	-	4900	4875.0	53322.0	48.42	612.97	6.47	81.91	18.09
4900	-	4950	4925.0	44660.0	40.56	653.52	5.42	87.33	12.67
4950	-	5000	4975.0	35815.0	32.52	686.05	6.22	91.68	8.32
5000	-	5050	5025.0	26195.0	23.79	709.84	38.49	94.86	5.14
5050	-	5100	5075.0	15792.0	14.34	724.18	24.15	96.77	3.23
5100	-	5150	5125.0	11814.0	10.73	734.90	13.42	98.21	1.79
5150	-	5200	5175.0	7927.0	7.20	742.10	6.23	99.17	0.83
5200	-	5250	5225.0	4382.0	3.98	746.08	2.25	99.70	0.30
5250	-	5300	5275.0	1702.0	1.55	747.63	0.70	99.91	0.09
5300	-	5350	5325.0	631.0	0.57	748.20	0.13	99.98	0.02
5350	-	5400	5375.0	128.0	0.12	748.32	0.01	100.00	0.00
5400	-	5422	5411.0	13.0	0.01	748.33	0.00	100.00	0.00
Area total de la cuenca :			748.33	Km <sup>2</sup>	Altitud de frecuencia media :		4699.70	m.s.n.m.	
Altitud media de la cuenca :			4687.65	m.s.n.m.	Altitud mas frecuente :		4750 - 4800	m.s.n.m.	

**Gráfico 6.5.- Curva hipsométrica – Cuenca del rio Verde**



### **6.2.2.3. Altitud media de la cuenca**

Definida como la correspondiente al percentil 50 de la curva hipsométrica. Por tanto es la altura para la cual las áreas quedan igual repartidas. La altitud media de la cuenca, así como la diferencia entre sus elevaciones extremas, influye en las características meteorológicas, que determinan principalmente las formas de la precipitación. Por lo general, existe una buena correlación, entre la precipitación y la elevación de la cuenca, es decir, a mayor elevación la precipitación es también mayor. Por otro lado las variaciones de altitud en el interior de la cuenca, así como su altitud media, son esenciales también para el estudio de la temperatura, que tienen un efecto importante sobre las pérdidas de agua por evaporación, como consecuencia de la altitud.

Según los cuadros presentados anteriormente, la altitud media de las cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son de 4325.64, 4395.07, 4270.45, 4464.17 y 4687.65 metros sobre el nivel del mar respectivamente. Este parámetro se determinó utilizando la herramienta de análisis espacial y estadísticas zonales de ArcMap.

### **6.2.2.4. Altitud más frecuente**

Definida por el intervalo correspondiente al mayor porcentaje de la superficie total. Este parámetro se obtiene a través de los polígonos o histograma de frecuencia de altitudes o también a partir del cuadro de distribución altimétrica presentados anteriormente.

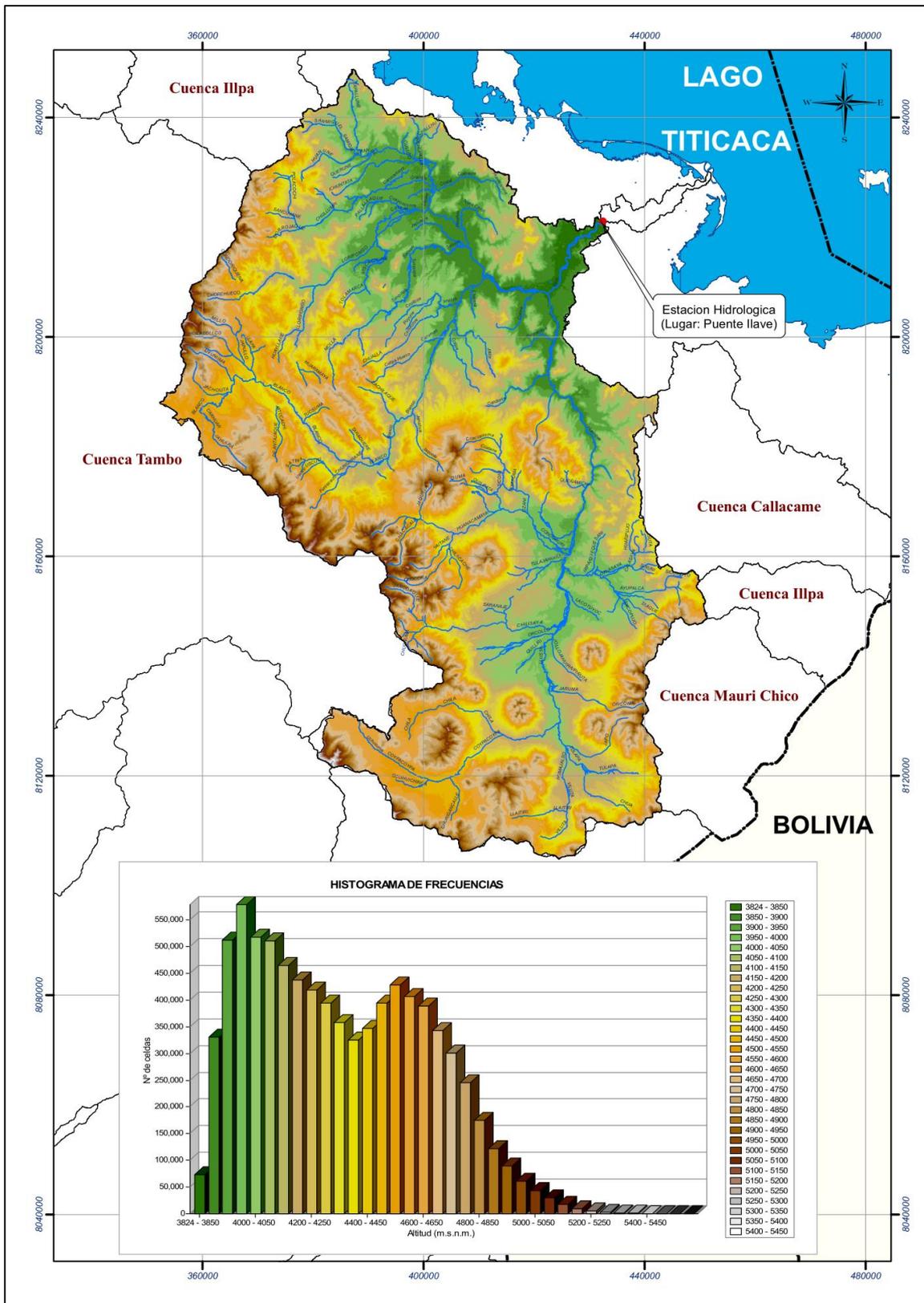
Según los histogramas de frecuencias presentados en los mapas altimétricos de las cuencas, las altitudes más frecuentes para las cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son las comprendidas entre 3950 a 4000, 3850 a 3900, 3850 a 3900, 4300 a 4350 y 4750 a 4800 m.s.n.m., respectivamente.

### **6.2.2.5. Histograma de frecuencia de altitudes**

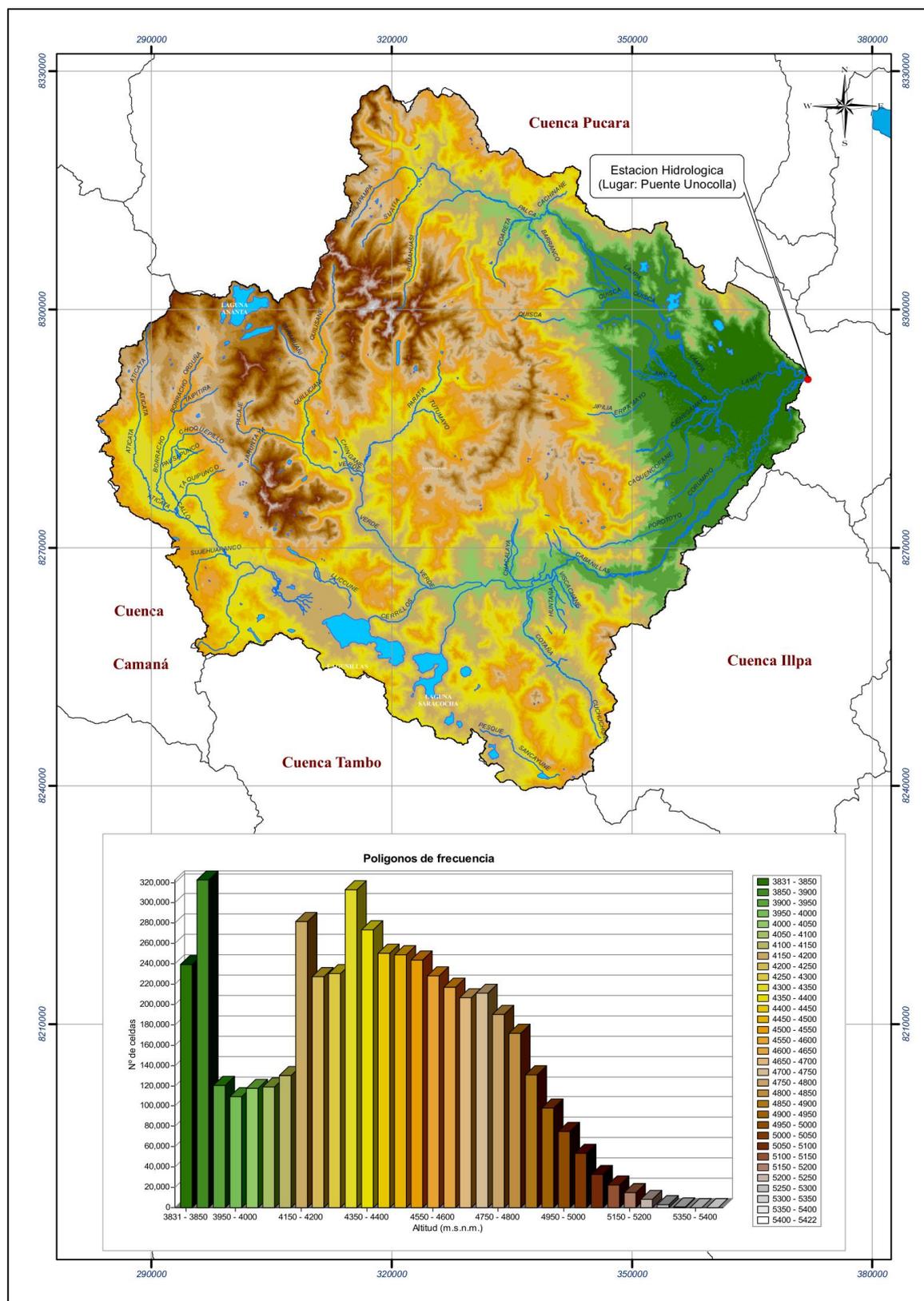
Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca.

En los siguientes mapas se aprecian la altimetría de cada cuenca con equidistancia de 50 metros entre curvas de nivel, así como también su respectivo histograma o polígonos de frecuencias.

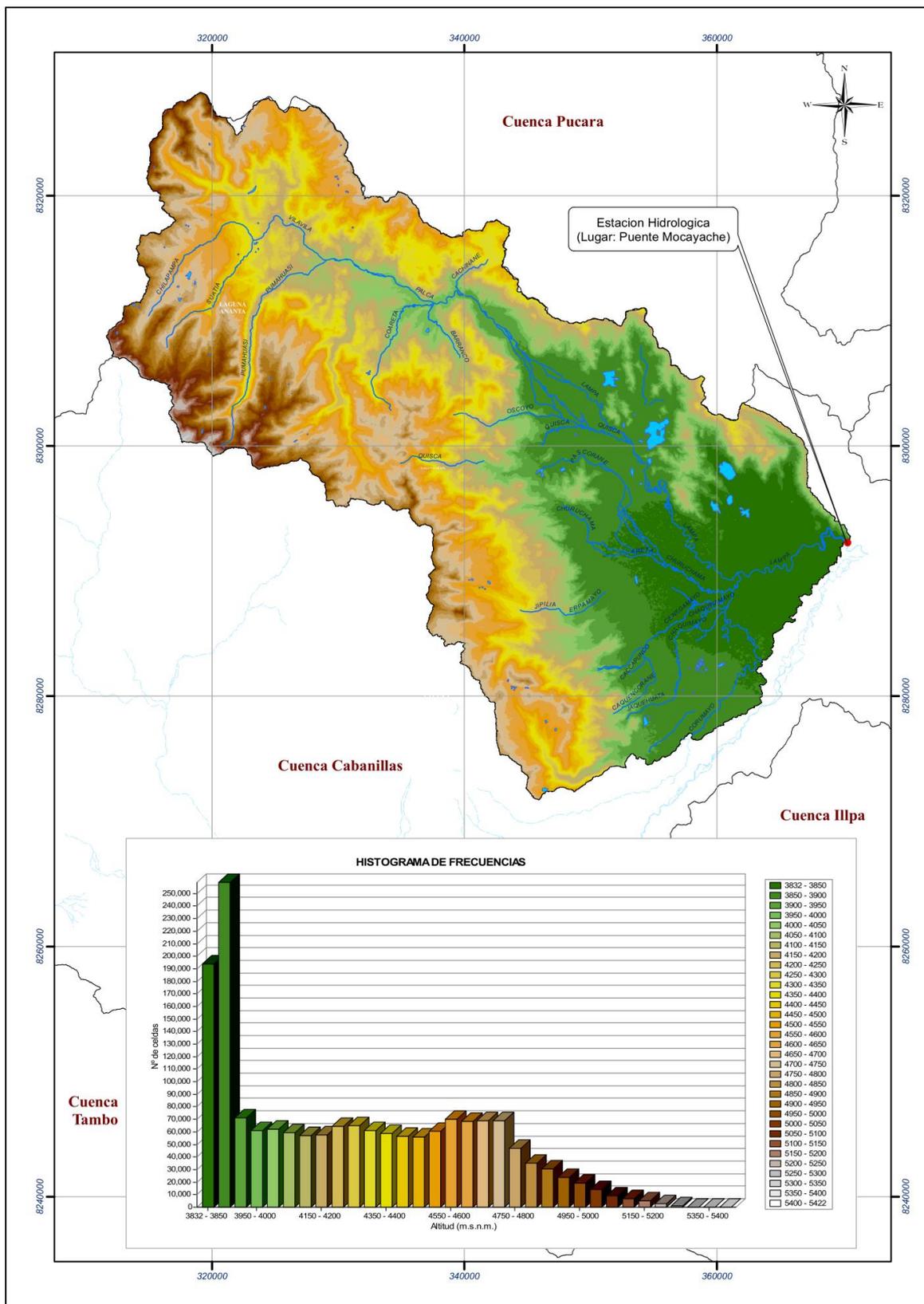
**Mapa 6.7.- Distribución altimétrica e histograma de frecuencia – Cuenca del rio Ilave**



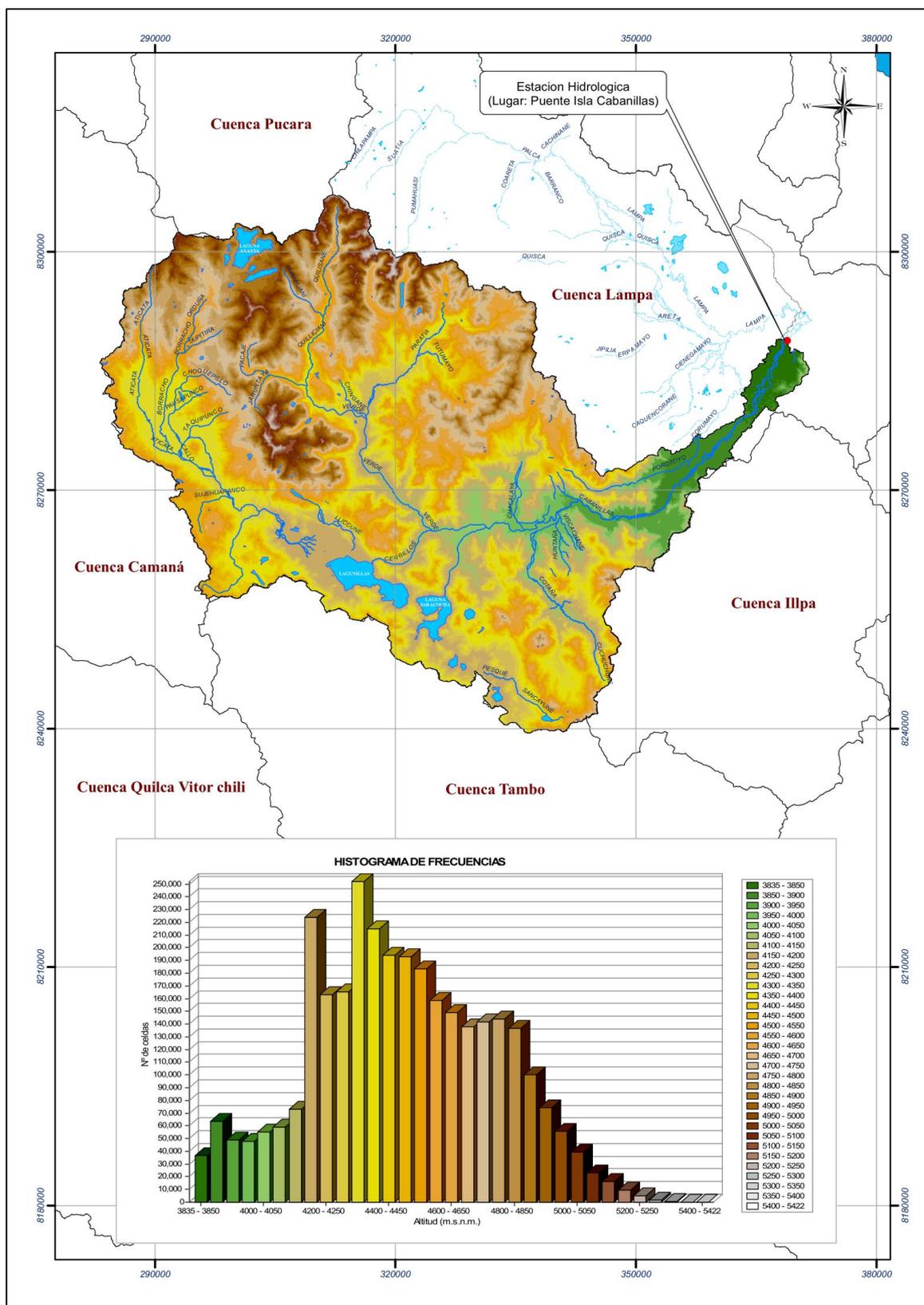
**Mapa 6.8.- Distribución altimétrica e histograma de frecuencia – Cuenca del río Coata**



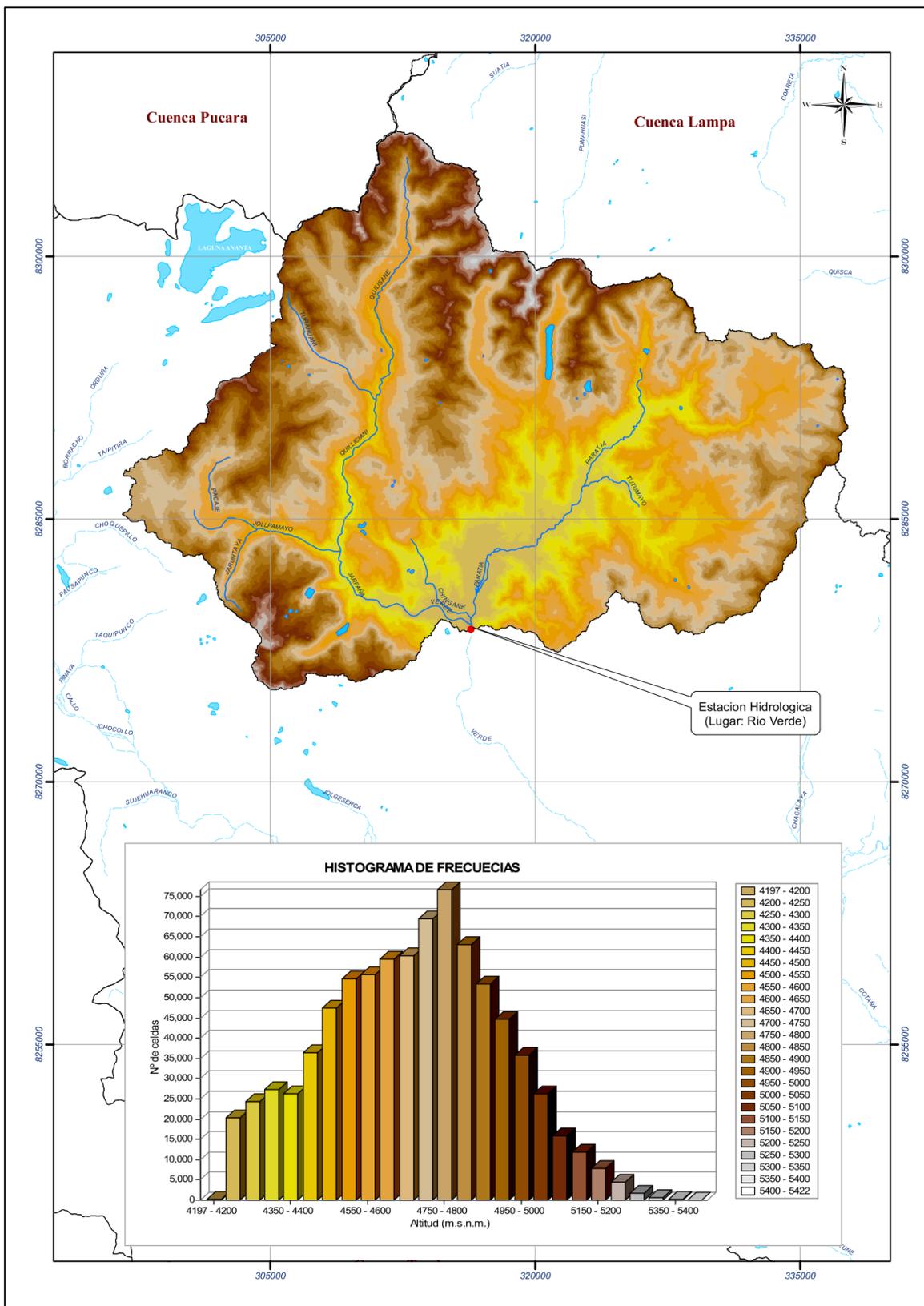
**Mapa 6.9.- Distribución altimétrica e histograma de frecuencia – Cuenca del rio Lampa**



**Mapa 6.10.- Distribución altimétrica e histograma de frecuencia – Cuenca del rio Cabanillas**



**Mapa 6.11.- Distribución altimétrica e histograma de frecuencia – Cuenca del río Cabanillas**



### **6.2.3. Parámetros relativos a la red de drenaje**

La forma en que estén conectados los canales en una cuenca determinada, influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. Se han desarrollado una serie de parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del drenaje en la escorrentía superficial directa.

#### **6.2.3.1. Longitud del cauce principal (Lrp)**

Medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde la parte más alta hasta la salida (estación hidrológica). Este parámetro es muy importante, para determinar el tiempo de concentración de una cuenca, para ello se cuenta con la extensión ArcHydro, para ArcMap, en el que necesariamente se debe tener como entradas la cuenca y la dirección de flujo que se genera a partir de un DEM.

La Lrp, de las cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde son de 188.89 km, 162.3 km, 105.08 km, 157.01 km, 42.47 km, respectivamente.

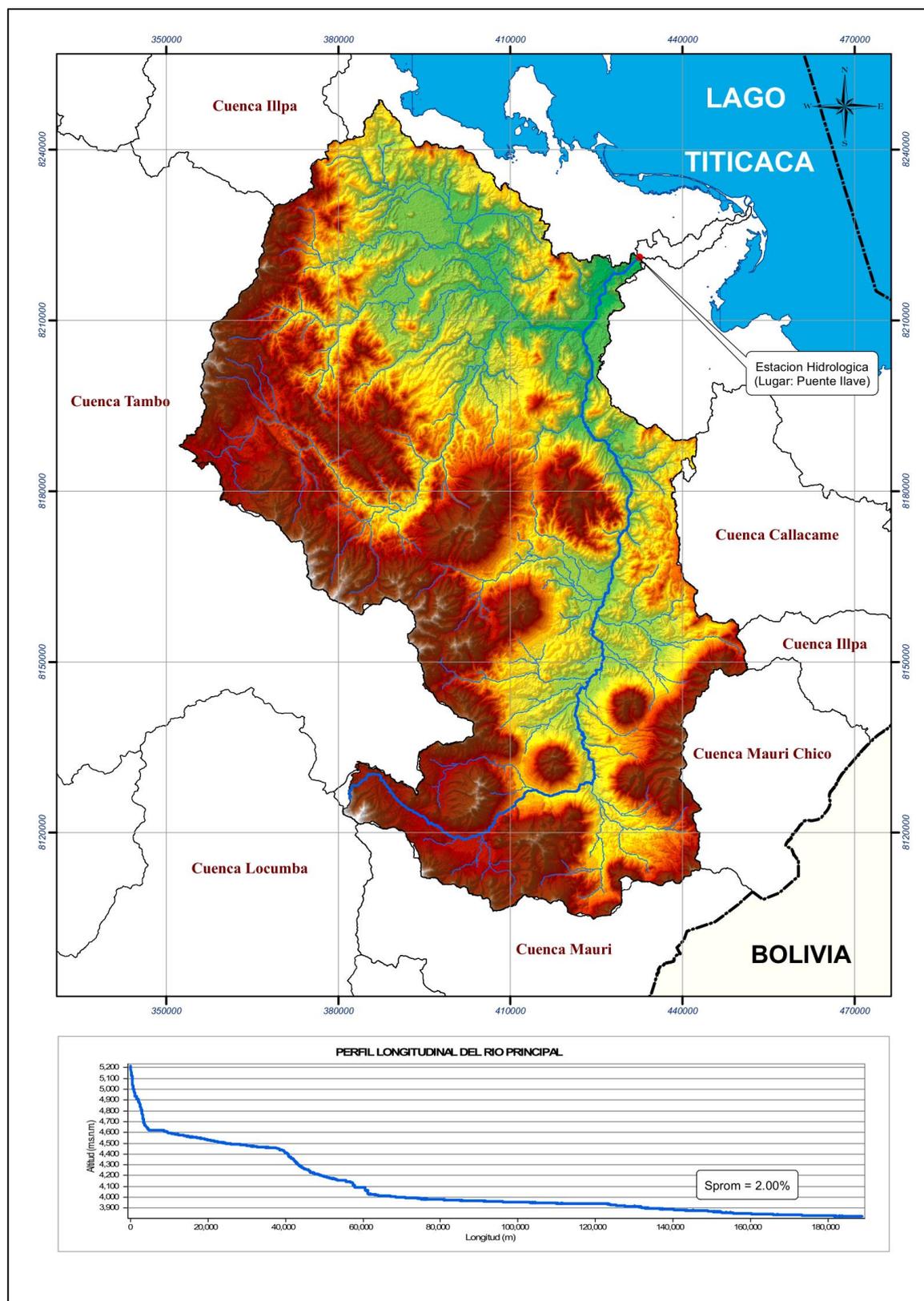
#### **6.2.3.2. Pendiente media del río principal (Smp)**

En la medida que este valor se incremente mayor será la probabilidad de generar crecidas ya que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas se incrementa en aquellas cuencas con valores altos de pendientes, caso contrario ocurre cuando la pendiente media del cauce principal, presenta valores bajos los cuales contribuyen a que los picos de crecidas sean menos violentos.

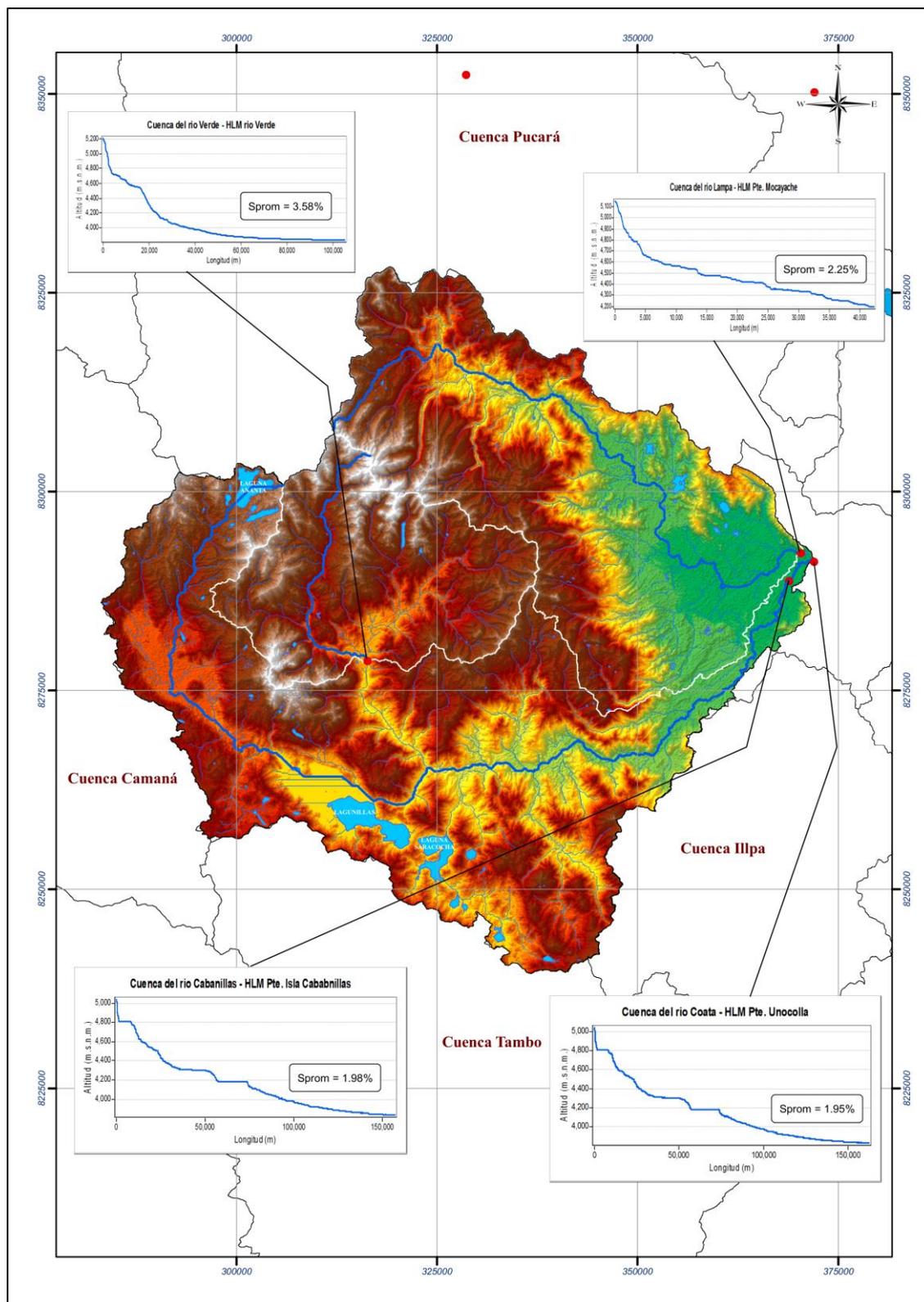
La pendiente media del río principal se determinó a través de funciones zonales de la caja de herramientas de ArcMap, de donde se deduce que para los ríos principales llave, Coata, Lampa, Cabanillas y Verde, son de 2.00%, 1.95%, 2.25%, 1.98% y 3.58% respectivamente.

Los siguientes Mapas 6.12 al 6.15, se muestran la distribución espacial del río principal, así como también en un gráfico adjunto se visualiza el perfil longitudinal desde el punto de desembocadura en este caso que vendría a ser la estación hidrométrica y el punto más alejado de la cuenca.

**Mapa 6.12.- Distribución espacial y perfil longitudinal del rio principal - cuenca del rio Ilave**



**Mapa 6.12.- Distribución espacial y perfil longitudinal del río principal - cuencas de los ríos Ilave, Coata, Lampa, Cabanilla y Verde**



### 6.2.3.3. Tiempo de concentración (Tc)

Definido como el tiempo que se demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. El tiempo de concentración es necesario para determinar la torrencialidad potencial de una cuenca en función de sus características físicas, además es un parámetro fundamental en el estudio del comportamiento hidrológico de una cuenca.

Para el cálculo del Tc, existen numerosas formulas pero las más utilizadas es la propuestas por Kirpich la cual se presentan a continuación.

Ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.0195 * \frac{L_{cp}^{0.77}}{S^{0.385}} \dots\dots\dots [Ec. 6.4]$$

Siendo:

- Tc = Tiempo de concentración (min)
- Lcp = Longitud del cauce principal (m)
- S = Pendiente del cauce principal (m/m)

Ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.0003245 * \left( \frac{L_{cp}}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \dots\dots\dots [Ec. 6.5]$$

Siendo:

- Tc = Tiempo de concentración (Hr)
- Lcp = Longitud del cauce principal (m)
- S = Pendiente del cauce principal (m/m)

El Tc, de las cuencas llave, Coata, Lampa, Cabanillas y verde, son de 16.9, 15.2, 10.3, 14.7 y 4.3 horas respectivamente.

## VII. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Para la descripción de los principales parámetros meteorológicos influyentes sobre las cuencas llave y Cota fueron considerados como mínimo 20 años para datos de precipitación. Así mismo para datos de Temperatura (máxima, mínima y media), los años como mínimo de registro histórico fueron de 05 (cinco). A continuación se describen cada uno de ellos a nivel de cuencas, representados a través de Cuadros, Gráficos y Mapas.

### 7.1. Distribución espacial de los parámetros meteorológicos

Para la realización de este análisis se ha utilizado los datos promedios multianuales de las estaciones que están dentro y alrededor de cada cuenca, cuyos valores se pueden apreciar en los cuadros mostrados para cada parámetro meteorológico los cuales están considerados como promedio para las Temperaturas y acumulado para las Precipitaciones, la metodología utilizada para la descripción de los parámetros meteorológicos se describe a continuación.

#### 7.6.2. Regresión Lineal Multivariada (RLM)

El método fue desarrollado por S. Naoum y I. K. Tsanis y publicado en la revista Journal of Hydroinformatic en el año 2004 a través del artículo "A multiple linear regression GIS module using spatial variables to model orographic rainfall" para la estimación de la precipitación en distintas cuencas. El método está basado en una técnica de módulo de interpolación espacial basada en el SIG, que adopta una técnica de regresión lineal múltiple.

La funcionalidad del módulo SIG es aplicado en diferentes lugares entre ellos la isla de Crete ubicada en Grecia en donde los valores de precipitación anual eran requeridos. La variable de respuesta es la precipitación y las variables predictores son la elevación, longitud, latitud y cualquier combinación de estas. El módulo es capaz de realizar una secuencia de tareas que a la larga conducen a una estimación de la precipitación media areal y el volumen total de precipitación. Además, se puede generar hasta nueve variables de predicción y sus parámetros, en donde se puede estimar la precipitación areal para un punto especificado. El modelo de regresión está representado por la siguiente función matemática:

$$T = a_0 + a_1 * z + r \quad \dots\dots\dots[\text{Ec. 7.1}]$$

$$Pp = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5YZ + a_6XZ + a_7X^2 + a_8Y^2 + a_9Z^2 + r \quad \dots\dots\dots[\text{Ec. 7.2}]$$

Siendo:

T y Pp	=	Temperatura (°C) y precipitación (mm)
a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , ..., a <sub>9</sub>	=	Coefficientes de la ecuación de regresión
x	=	Coordenadas x (m)
y	=	Coordenadas y (m)
z	=	Altitud (m.s.n.m.)
r	=	Error

## 7.2. Precipitación (P)

Se engloba dentro del término precipitación a todas las aguas meteóricas que caen sobre la superficie de la tierra, tanto bajo la forma líquida como sólida (nieve, granizo). Estos diversos tipos de precipitaciones son normalmente medidos sin efectuar su discriminación por medio de su equivalente en agua. La precipitación es el origen de todas las corrientes superficiales y profundas, por lo cual su cuantificación y el conocimiento de su distribución, en el tiempo y en el espacio, se constituyen en problemas básicos para la hidrología.

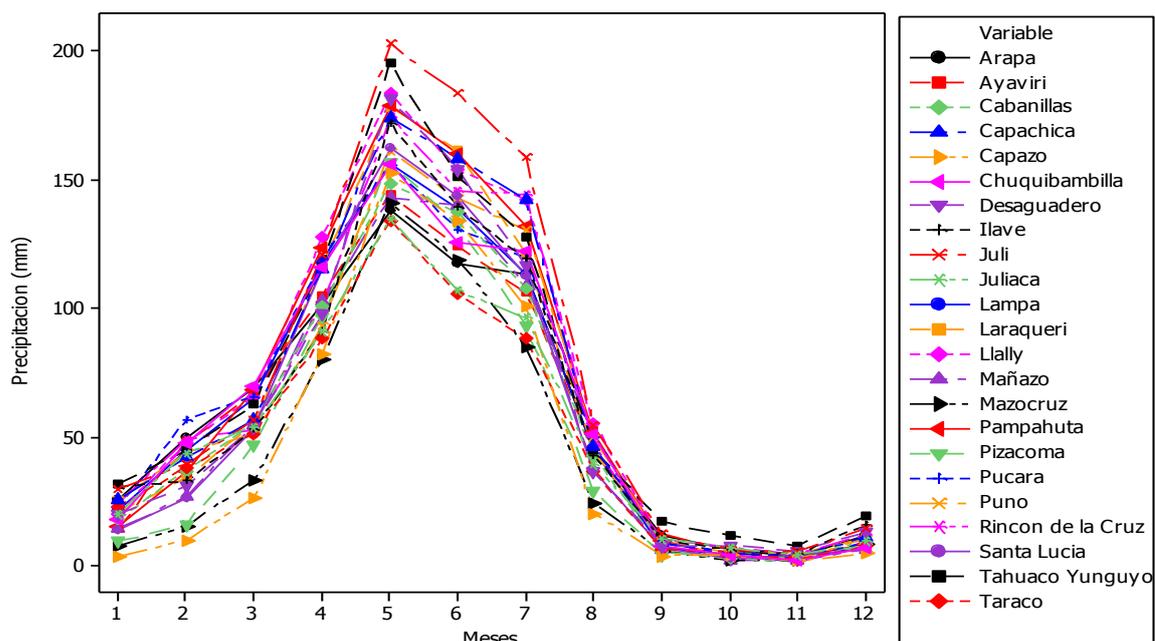
### 7.2.1. Precipitación Total Promedio Multimensual local

En el cuadro 7.1, se muestra los valores temporales de la precipitación, donde se deduce que la mayor precipitación se presenta entre los meses de diciembre a marzo, presentando el mayor valor de 203.0 mm en promedio multimensual de la estación Juli

**Cuadro 7.1.- Precipitación promedio multimensual (mm)**

Estacion	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
Arapa	379823	8326267	3892	25.5	49.8	68.9	101.4	138.5	117.3	113.6	45.7	11.4	6.0	3.7	12.0	693.8
Ayaviri	328602	8355116	3921	14.6	48.2	66.5	105.2	144.4	124.1	106.4	45.3	6.8	3.6	2.0	7.5	674.5
Cabanillas	355675	8270502	3877	18.0	37.0	55.1	101.3	148.4	137.3	108.1	43.0	5.9	2.6	1.9	8.1	666.6
Capachica	409496	8273379	3827	25.9	41.9	56.5	115.7	174.2	158.6	142.3	46.5	9.1	4.6	3.7	11.1	790.1
Capazo	421758	8099499	4470	3.4	9.8	26.2	82.3	152.9	134.4	100.7	20.1	3.8	3.9	1.8	4.5	543.8
Chuquibambilla	313519	8364727	3899	18.3	47.9	69.9	115.8	156.4	126.1	122.7	51.3	7.6	3.9	2.3	6.6	728.7
Desaguadero	495691	8168147	3813	19.9	31.0	53.8	97.9	182.1	154.5	116.7	36.6	7.9	7.8	5.8	13.2	727.3
Ilave	430990	8221164	3837	30.7	32.9	52.9	91.5	172.2	139.4	119.4	43.1	10.2	6.0	4.7	16.0	719.1
Juli	450813	8208437	3814	29.6	39.6	56.8	121.0	203.0	183.8	158.8	54.4	12.4	5.9	5.3	14.4	885.1
Juliaca	374843	8289717	3828	19.9	43.7	54.2	91.0	134.9	106.8	96.5	39.2	10.3	6.9	4.1	9.4	616.8
Lampa	352861	8301728	3929	21.2	44.8	64.6	117.7	156.4	138.9	113.2	45.9	7.1	4.0	1.7	8.5	724.2
Laraqueri	385938	8213627	3952	20.4	34.4	55.4	115.2	178.5	161.6	121.6	44.2	9.4	4.8	4.6	10.9	760.9
Llally	297126	8347800	4211	20.2	47.7	65.3	127.6	183.7	154.1	142.5	55.3	9.5	2.4	2.7	9.3	820.1
Mañazo	357163	8252704	3910	14.2	27.0	54.7	102.8	142.8	140.4	108.6	51.1	5.9	2.3	2.2	6.3	658.2
Mazocruz	424708	8149030	3963	7.9	15.5	33.4	79.9	141.3	119.2	85.1	24.1	5.7	2.1	2.1	8.1	524.5
Pampahuta	320200	8287459	4292	14.9	37.0	68.5	123.8	178.9	160.7	131.7	51.6	9.7	3.3	3.8	8.2	792.0
Pizacoma	460721	8130662	3913	9.4	15.9	46.9	96.7	157.2	132.6	93.0	28.7	4.4	4.9	3.1	8.3	601.2
Pucara	353035	8336523	3869	22.3	56.6	65.9	119.4	156.3	130.8	119.7	50.5	8.6	5.2	2.8	8.9	746.9
Puno	390979	8250334	3831	25.5	44.4	51.0	93.2	161.3	142.9	130.7	50.0	9.2	4.1	2.5	10.6	725.3
Rincon de la Cruz	413212	8231906	3875	24.4	49.1	53.0	101.0	174.8	145.8	144.6	46.8	9.9	7.1	4.5	12.4	773.5
Santa Lucia	327577	8263529	4035	13.6	26.1	53.0	115.2	162.5	143.6	112.6	37.4	7.0	2.5	4.1	6.2	683.8
Tahuaco Yunguyo	491988	8196981	3864	31.9	45.1	62.7	116.2	195.9	151.4	128.0	44.9	17.1	11.4	7.9	19.3	831.9
Taraco	395292	8307846	3817	22.6	38.1	51.4	88.2	134.4	105.6	88.7	36.7	6.4	5.2	2.3	7.4	586.9

**Grafico 7.1.- Variación temporal de la Precipitación Total Promedio Multimensual**



**7.2.2. Precipitación Total Promedio Multianual regional**

Según el análisis estadístico de la regresión, los valores observados y simulados, alcanzan un coeficiente de determinación de 0.79 o 79% de ajuste, estando dentro de un rango confiable, además las precipitaciones en la cuenca, varían entre un rango de 590mm a 1084 mm en promedio multianual, siendo la más predominante de 725 y 850 mm.

**Cuadro 7.2.- Estadísticos y parámetros del modelo de regresión**

**Cuenca Ilave**

Coefficiente de correlación múltiple	0.894
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.799
R <sup>2</sup> ajustado	0.627
Error típico	77.350
Observaciones	14

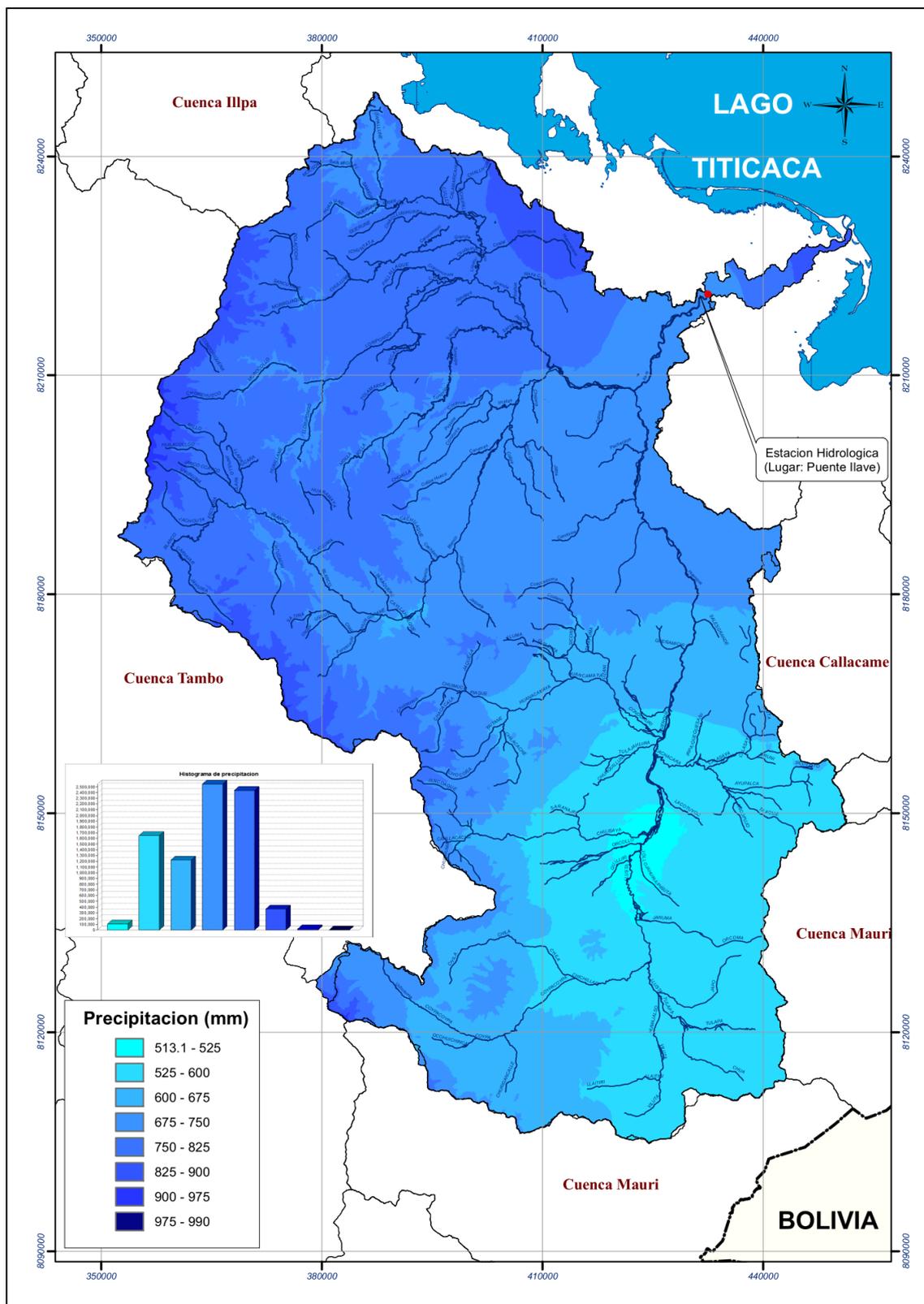
a0	23715.5500395732
a1	-0.178867595982547
a2	-0.00364612623426825
a3	9.92140714841105
a4	0.000000238033490683848
a5	-0.00000379093513798741
a6	-0.00000101410893371756

**Cuenca Coata**

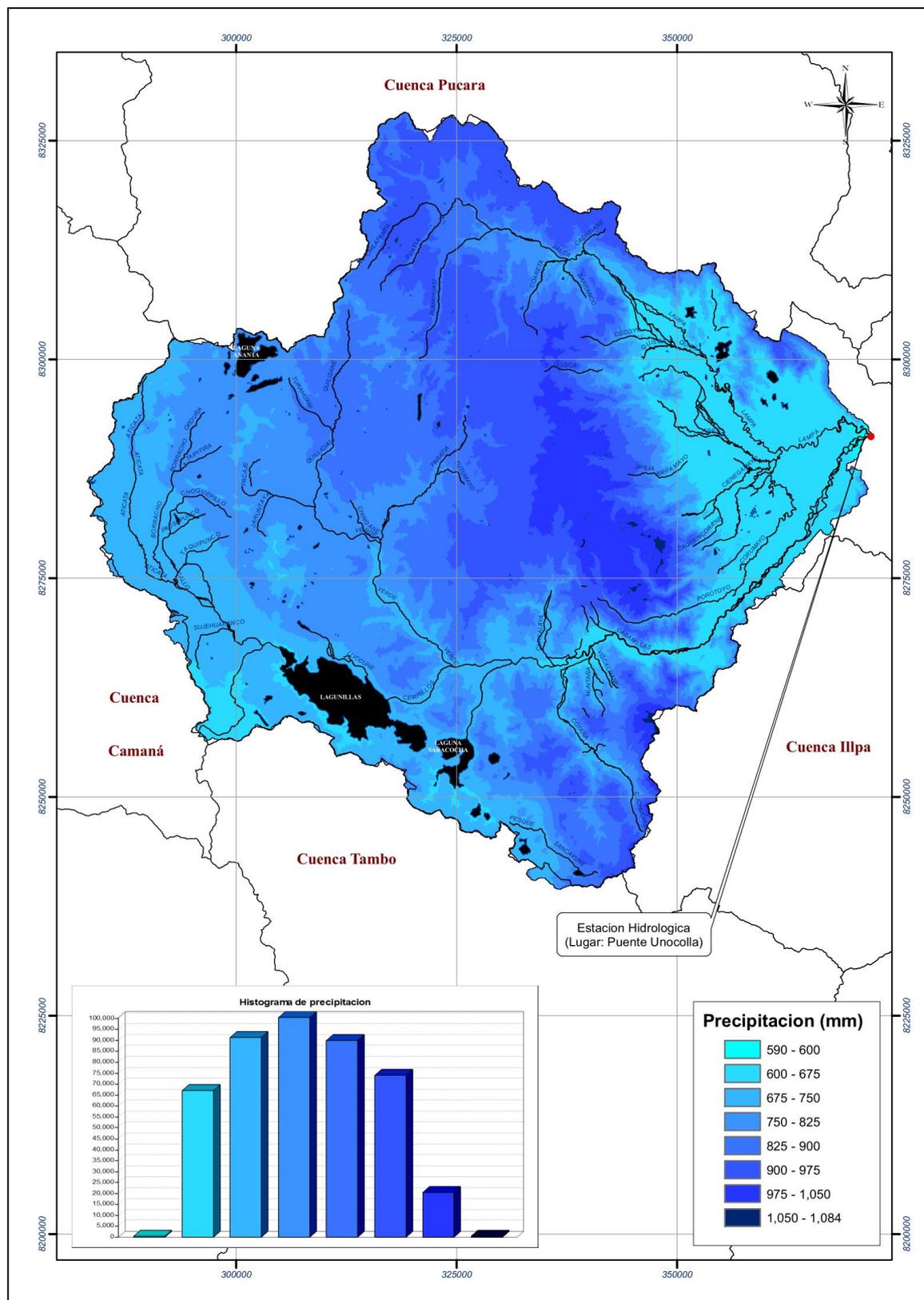
Coefficiente de correlación múltiple	0.89
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.79
R <sup>2</sup> ajustado	0.59
Error típico	59.46
Observaciones	20

a0	-2815669.17333461
a1	0.506274752947244
a2	0.647422916196116
a3	19.435264357522
a4	-0.000000643717159575731
a5	-0.00000218486579823562
a6	0.00000586137766825767
a7	0.0000000826982422556479
a8	-0.000000371082490175261
a9	-0.000336807955869366

**Mapa 7.1.-** Distribución espacial de la precipitación Total Promedio Multianual – Cuenca Coata



**Mapa 7.2.- Distribución espacial de la Precipitación Total Promedio Multianual – Cuenca Coata**



### 7.3. Temperatura (T)

Mediante la temperatura se expresa numéricamente el efecto que en los cuerpos produce el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida. Los elementos básicos de constitución de la materia son los átomos y las moléculas. En un estado de agitación constante, es el nivel de su energía cinética (y por ende de la velocidad de las partículas), la que se mide como temperatura.

En las aplicaciones de la Hidrología y de la Ingeniería Hidrológica, interesa especialmente la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre.

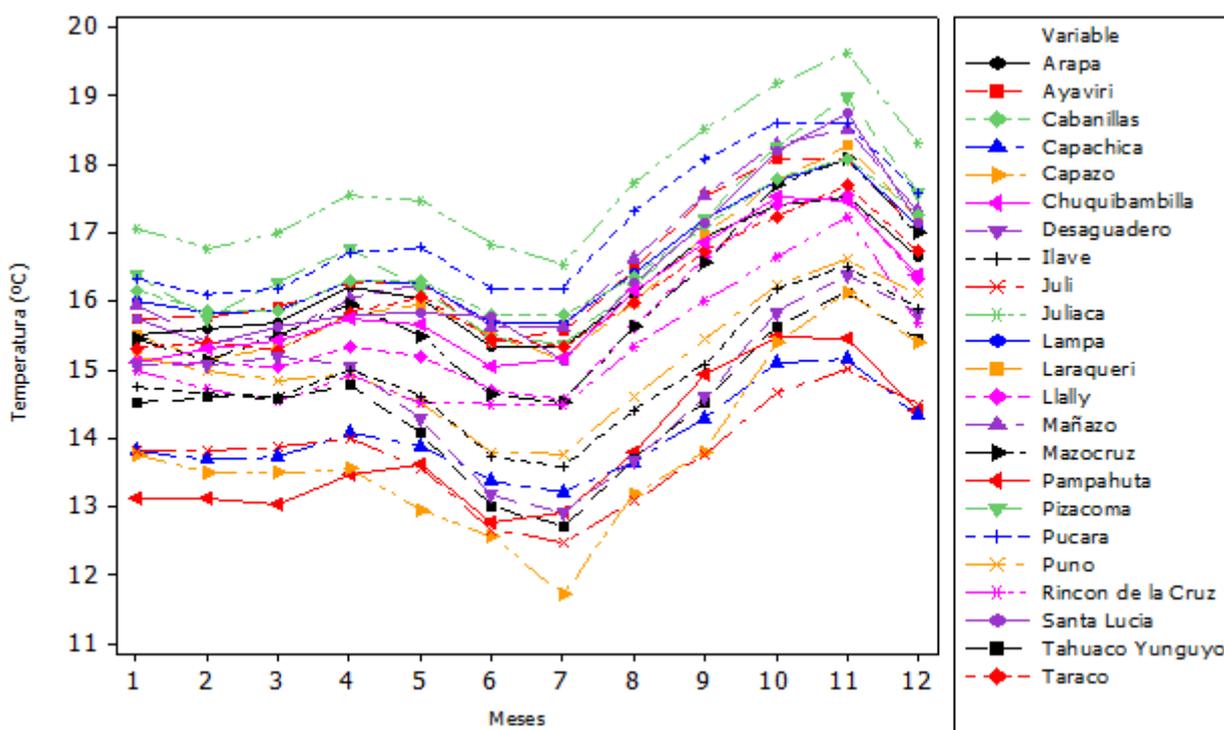
#### 7.3.1. Temperatura Máxima Promedio Multimensual local

Proviene de la máxima temperatura registrada durante el día, cuyo promedio histórico representa de varios por varios años del mismo mes. El Cuadro 7.3, muestra los valores de la Temperatura Máxima Promedio Multimensual para cada estación y por cada mes, de donde se deduce que la estación Juliaca registra 19.6°C en el mes de noviembre, siendo la más alta en comparación de todas las estaciones y la más mínima es de 11.7°C en el mes de julio de la estación Capazo.

**Cuadro 7.3.- Temperatura Máxima Promedio multimensual (°C)**

Estacion	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Arapa	379823	8326267	3892	15.5	15.6	15.7	16.2	16.0	15.4	15.3	16.1	16.9	17.4	17.5	16.6	16.2
Ayaviri	328602	8355116	3921	15.8	15.8	15.9	16.3	16.3	15.4	15.6	16.5	17.5	18.1	18.1	17.0	16.5
Cabanillas	355675	8270502	3877	16.2	15.9	15.9	16.3	16.3	15.8	15.8	16.4	17.1	17.8	18.1	17.3	16.6
Capachica	409496	8273379	3827	13.8	13.7	13.7	14.1	13.9	13.4	13.2	13.7	14.3	15.1	15.2	14.3	14.0
Capazo	421758	8099499	4470	13.8	13.5	13.5	13.5	13.0	12.6	11.7	13.2	13.8	15.4	16.1	15.4	13.8
Chuquibambilla	313519	8364727	3899	15.1	15.3	15.4	15.8	15.7	15.0	15.2	16.1	16.9	17.5	17.5	16.4	16.0
Desaguadero	495691	8168147	3813	15.1	15.1	15.2	15.1	14.3	13.2	12.9	13.7	14.6	15.8	16.4	15.8	14.8
Ilave	430990	8221164	3837	14.8	14.7	14.6	15.0	14.6	13.7	13.6	14.4	15.1	16.2	16.5	15.9	14.9
Juli	450813	8208437	3814	13.8	13.8	13.9	14.0	13.6	12.7	12.5	13.1	13.8	14.7	15.0	14.5	13.8
Juliaca	374843	8289717	3828	17.1	16.8	17.0	17.6	17.5	16.8	16.5	17.7	18.5	19.2	19.6	18.3	17.7
Lampa	352861	8301728	3929	16.0	15.8	15.9	16.3	16.3	15.7	15.7	16.4	17.2	17.8	18.1	17.1	16.5
Laraqueri	385938	8213627	3952	15.5	15.1	15.3	15.8	16.0	15.5	15.2	16.0	17.0	17.8	18.3	17.2	16.2
Llally	297126	8347800	4211	15.1	15.1	15.0	15.3	15.2	14.7	14.6	15.6	16.6	17.4	17.6	16.3	15.7
Mañazo	357163	8252704	3910	16.0	15.4	15.5	16.1	16.3	15.6	15.6	16.6	17.6	18.3	18.5	17.3	16.6
Mazocruz	424708	8149030	3963	15.5	15.1	15.5	16.0	15.5	14.6	14.5	15.6	16.6	17.7	18.1	17.0	16.0
Pampahuta	320200	8287459	4292	13.1	13.1	13.0	13.5	13.6	12.8	12.9	13.8	14.9	15.5	15.5	14.4	13.8
Pizacoma	460721	8130662	3913	16.4	15.8	16.3	16.8	16.2	15.5	15.4	16.2	17.2	18.3	19.0	17.6	16.7
Pucara	353035	8336523	3869	16.3	16.1	16.2	16.7	16.8	16.2	16.2	17.3	18.1	18.6	18.6	17.6	17.1
Puno	390979	8250334	3831	15.2	15.0	14.8	14.9	14.5	13.8	13.8	14.6	15.5	16.2	16.6	16.1	15.1
Rincon de la Cruz	413212	8231906	3875	15.0	14.7	14.5	14.9	14.5	14.5	14.5	15.3	16.0	16.7	17.2	15.7	15.3
Santa Lucia	327577	8263529	4035	15.8	15.4	15.6	15.8	15.8	15.8	15.1	16.3	17.2	18.2	18.7	17.2	16.4
Tahuaco Yunguyo	491988	8196981	3864	14.5	14.6	14.6	14.8	14.1	13.0	12.7	13.7	14.5	15.6	16.1	15.5	14.5
Taraco	395292	8307846	3817	15.3	15.4	15.3	15.8	16.1	15.5	15.3	16.0	16.7	17.2	17.7	16.7	16.1

**Grafico 7.2.- Variación temporal de la Temperatura Máxima Promedio Multimensual**



**7.3.2. Temperatura Máxima Promedio Multianual Regional**

El modelo de regresión muestra un alto grado de ajuste ente el parámetro de temperatura y la altitud, alcanzando un coeficiente de correlación de 64.9% de ajuste. El mapa 7.2 y 7.3, muestra la variación espacial de la temperatura en las cuencas, encontrándose en un rango de 8.4 a 15.6°C para la cuenca llave, con una predominante temperatura de 13.5 a 15°C según el histograma adjunto. Para la cuenca Coata la temperatura varia de 9.9 a 16.4°C, teniendo una predominancia de 12 a 16°C.

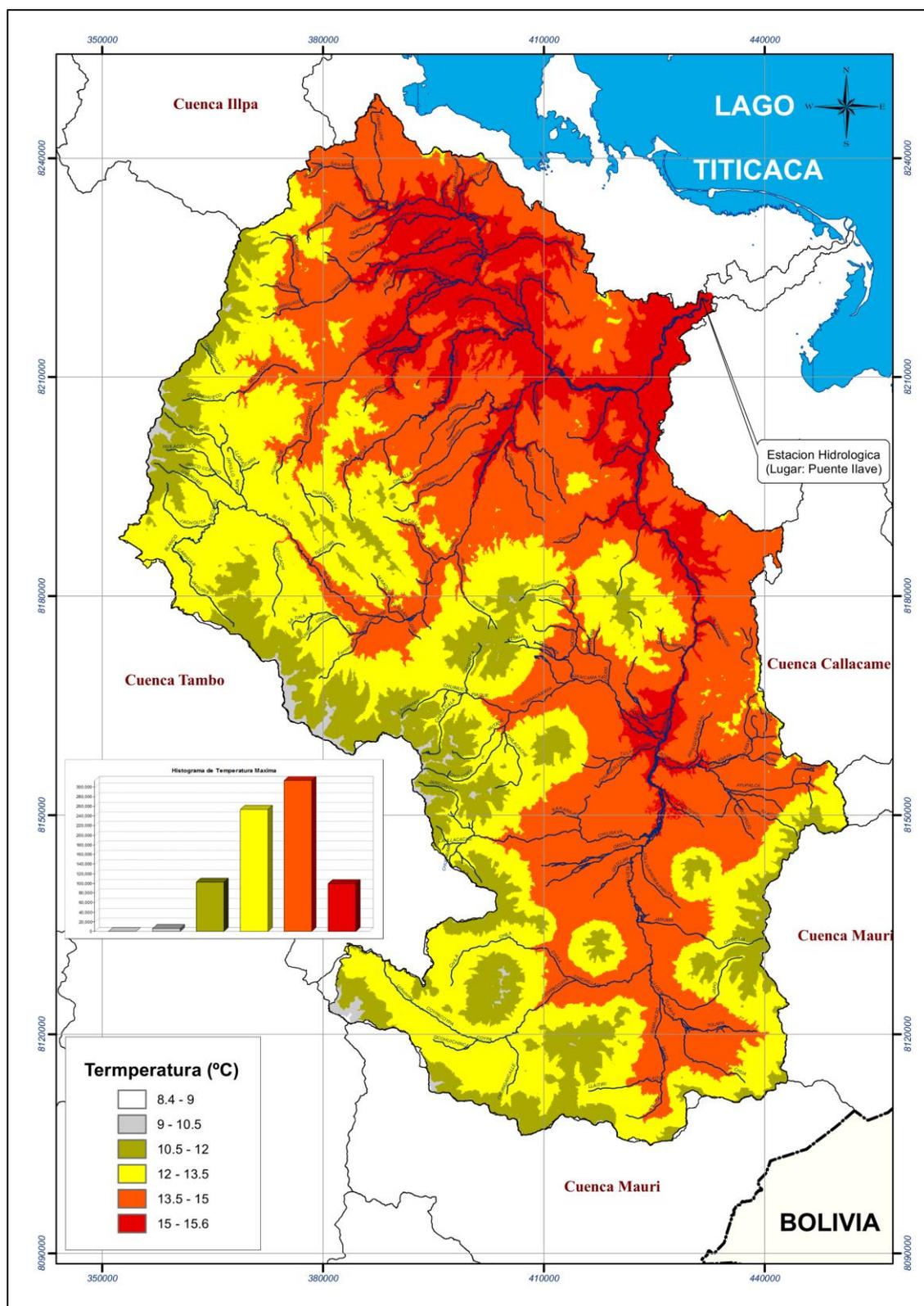
- Modelo de regresión cuenca llave

$$T_{max} = -0.004129232 * z + 31.36955737 \dots\dots\dots[\text{Ec. 7.3}]$$

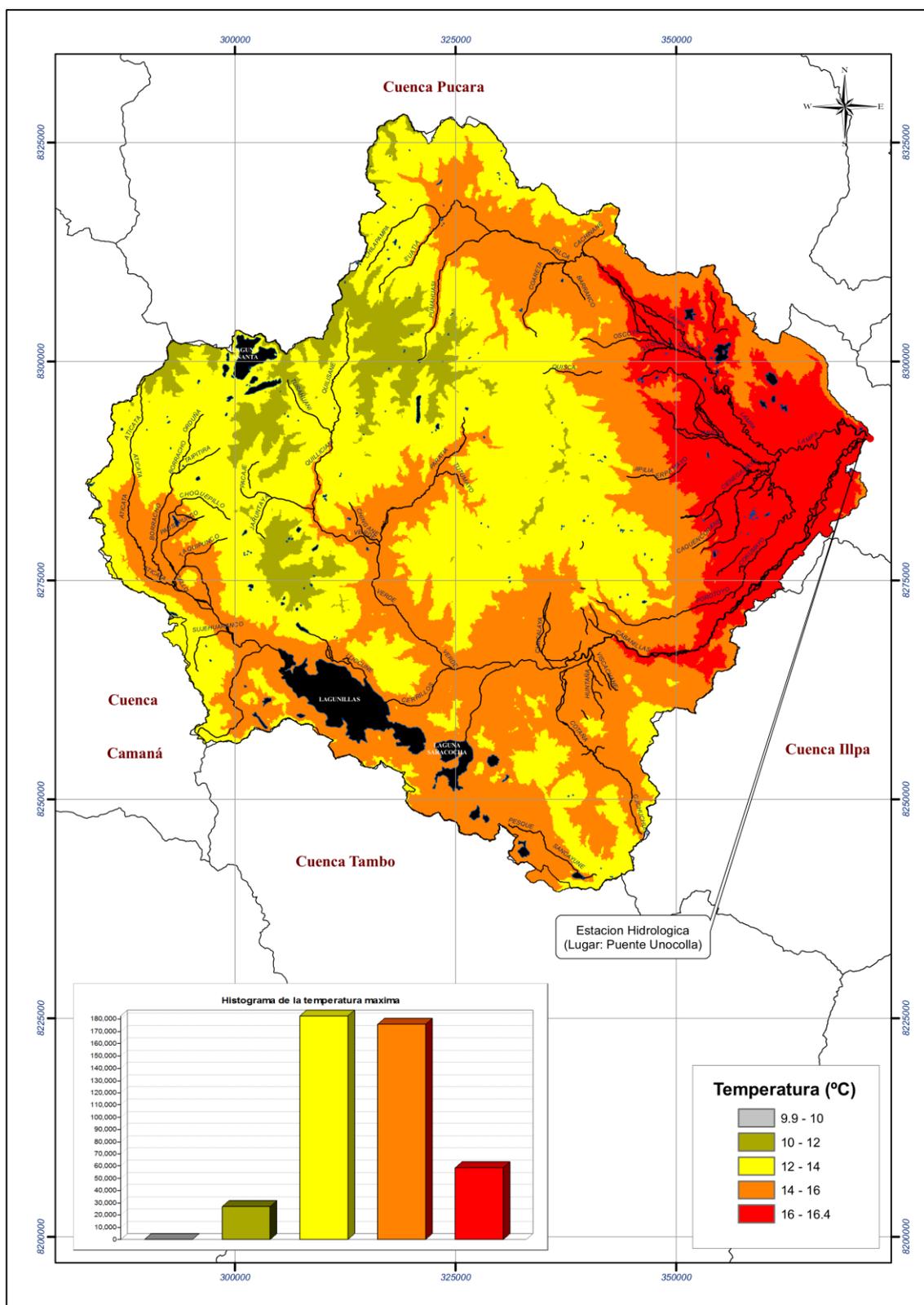
- Modelo de regresión cuenca Coata

$$T_{max} = -0.004111172 * z + 32.16796583 \dots\dots\dots[\text{Ec. 7.4}]$$

**Mapa 7.3.-** Distribución espacial de la Temperatura Máxima Promedio Multianual – Cuenca Ilave



**Mapa 7.4.- Distribución espacial de la Temperatura Máxima Promedio Multianual – Cuenca Coata**



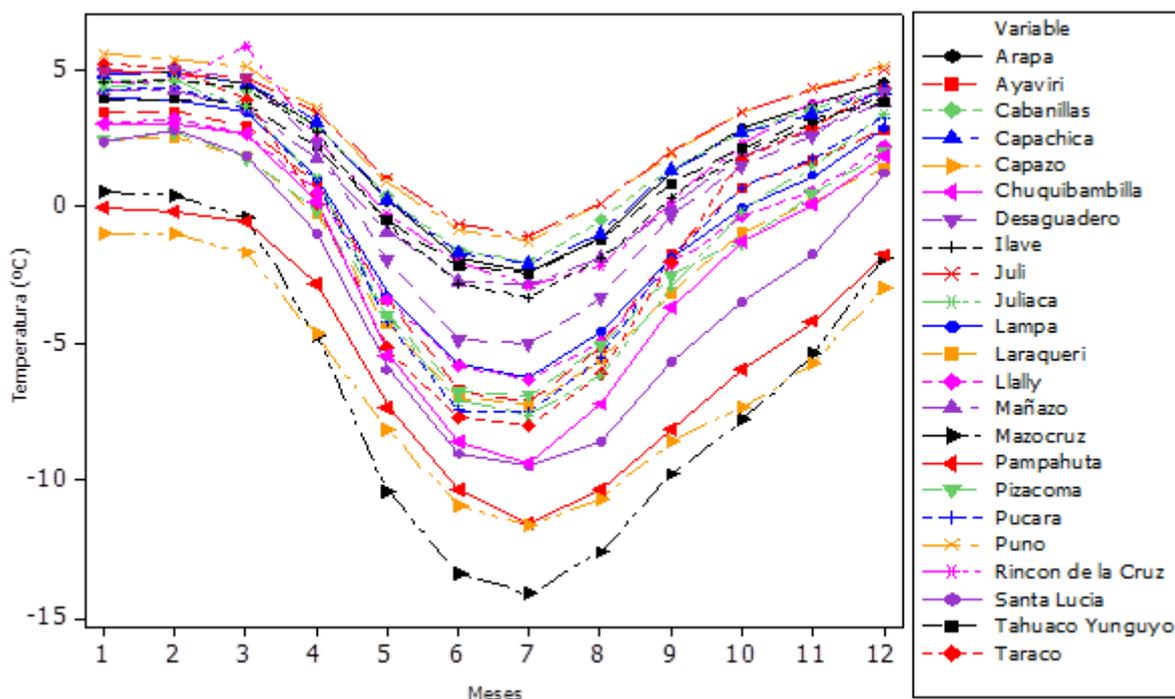
### 7.3.3. Temperatura Mínima Promedio Multimensual local

Es la temperatura mínima registrada de un día y estas se dan durante la madrugada. El Cuadro 7.4, muestra la serie temporal de la temperatura mínima en promedio multimensual de donde se observa numéricamente que la más baja se presenta en el mes de julio alcanzando valores de 14.2°C bajo cero. Por otro lado el Grafico 7.3, muestra la variación mensual de la temperatura de enero a diciembre, de donde se observa en forma clara que las temperaturas más bajas presentan las estaciones ubicadas en la zona sur de la cuenca llave, tales como las estaciones de Mazocruz y Capazo, mientras que por el lado norte la temperatura más baja se da en la estación Pampahuta ubicada en la parte alta de la cuenca Coata a 4292 msnm.

**Cuadro 7.4.- Temperatura Mínima promedio multimensual (°C)**

Estacion	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Arapa	379823	8326267	3892	4.9	4.9	4.5	2.9	0.1	-1.9	-2.4	-1.1	1.3	2.8	3.7	4.5	2.0
Ayaviri	328602	8355116	3921	3.4	3.4	2.9	0.8	-3.4	-6.7	-7.1	-5.2	-1.7	0.7	1.7	2.8	-0.7
Cabanillas	355675	8270502	3877	4.6	4.6	4.2	2.9	0.4	-1.6	-2.1	-0.5	1.4	2.7	3.5	4.3	2.0
Capachica	409496	8273379	3827	4.8	4.9	4.5	3.1	0.2	-1.7	-2.1	-1.0	1.3	2.7	3.3	4.2	2.0
Capazo	421758	8099499	4470	-1.0	-1.0	-1.7	-4.7	-8.2	-10.9	-11.6	-10.7	-8.6	-7.4	-5.7	-3.0	-6.2
Chuquibambilla	313519	8364727	3899	3.0	3.0	2.6	0.1	-5.4	-8.6	-9.4	-7.2	-3.7	-1.3	0.1	1.8	-2.1
Desaguadero	495691	8168147	3813	4.9	4.9	4.7	2.3	-2.0	-4.9	-5.0	-3.3	-0.4	1.5	2.6	4.2	0.8
Ilave	430990	8221164	3837	4.5	4.6	4.3	2.7	-0.7	-2.8	-3.3	-1.9	0.3	2.0	3.0	4.0	1.4
Juli	450813	8208437	3814	5.0	4.8	4.7	3.4	1.0	-0.7	-1.1	0.1	2.0	3.4	4.3	5.0	2.7
Juliaca	374843	8289717	3828	4.3	4.6	3.6	1.0	-4.1	-7.1	-7.7	-6.2	-3.0	-0.2	1.5	3.4	-0.8
Lampa	352861	8301728	3929	4.0	3.9	3.4	1.0	-3.3	-5.7	-6.3	-4.6	-1.9	-0.1	1.1	2.9	-0.5
Laraqueri	385938	8213627	3952	2.4	2.5	1.8	-0.3	-4.3	-6.9	-7.3	-5.6	-3.2	-0.9	0.2	1.4	-1.7
Llally	297126	8347800	4211	3.0	3.2	2.6	0.5	-3.4	-5.8	-6.3	-5.0	-2.1	-0.4	0.5	2.2	-0.9
Mañazo	357163	8252704	3910	4.3	4.3	3.6	1.8	-0.9	-2.7	-2.9	-1.9	0.0	1.8	2.8	3.8	1.1
Mazocruz	424708	8149030	3963	0.5	0.4	-0.4	-4.8	-10.4	-13.4	-14.2	-12.6	-9.8	-7.8	-5.4	-1.9	-6.7
Pampahuta	320200	8287459	4292	-0.1	-0.2	-0.6	-2.8	-7.4	-10.3	-11.5	-10.3	-8.2	-5.9	-4.2	-1.8	-5.3
Pizacoma	460721	8130662	3913	2.4	2.7	1.8	-0.2	-4.0	-6.7	-6.9	-5.1	-2.5	-1.3	0.4	2.0	-1.5
Pucara	353035	8336523	3869	4.3	4.4	3.5	0.9	-4.2	-7.5	-7.5	-5.5	-1.8	0.7	1.8	3.2	-0.7
Puno	390979	8250334	3831	5.5	5.4	5.1	3.6	0.8	-0.8	-1.3	0.1	1.9	3.4	4.3	5.1	2.8
Rincon de la Cruz	413212	8231906	3875	4.5	4.6	5.8	2.5	-0.3	-2.1	-2.9	-2.2	0.2	2.3	3.8	4.2	1.7
Santa Lucia	327577	8263529	4035	2.3	2.8	1.8	-1.0	-6.0	-9.0	-9.4	-8.6	-5.7	-3.5	-1.8	1.2	-3.1
Tahuaco Yunguyo	491988	8196981	3864	3.9	3.9	3.7	2.2	-0.5	-2.2	-2.5	-1.2	0.8	2.1	3.2	3.7	1.4
Taraco	395292	8307846	3817	5.2	5.0	3.9	0.1	-5.2	-7.7	-8.0	-6.1	-2.1	1.7	2.9	4.3	-0.5

**Grafico 7.3.- Variación temporal de la Temperatura Mínima Promedio Multimensual**



**7.3.4. Temperatura Mínima Promedio Multianual Regional**

El modelo de regresión muestra un alto grado de ajuste ente el parámetro de temperatura y la altitud, alcanzando un coeficiente de determinación de 64.9% y 77.8% de ajuste para las cuencas llave y coata respectivamente. El mapa 7.5 y 7.6, muestra la variación espacial de las isotermas en las cuencas, encontrándose en un rango de -20.2 a 1.6°C para la cuenca llave, con una predominante temperatura de -7 a -3.5°C según el histograma adjunto. Por otro lado en la cuenca Coata la temperatura varia de -14.6 a 3°C, teniendo una predominancia de -5.9 a -3°C, presentándose las más bajas en la parte alta de la cuenca.

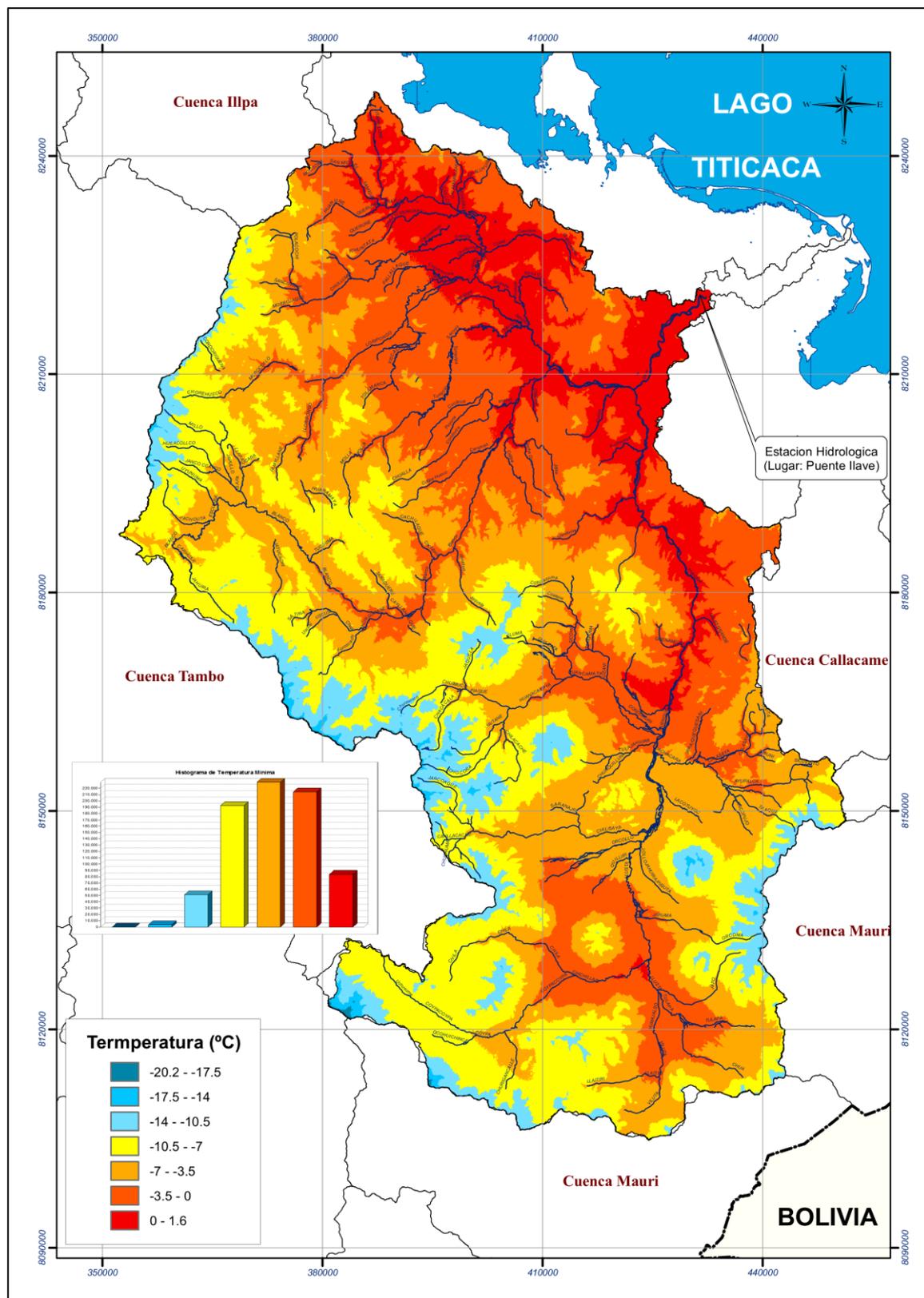
- Modelo de regresión cuenca llave

$$T_{min} = -0.011359428 * z + 44.5233698 + r \dots\dots\dots[Ec. 7.5]$$

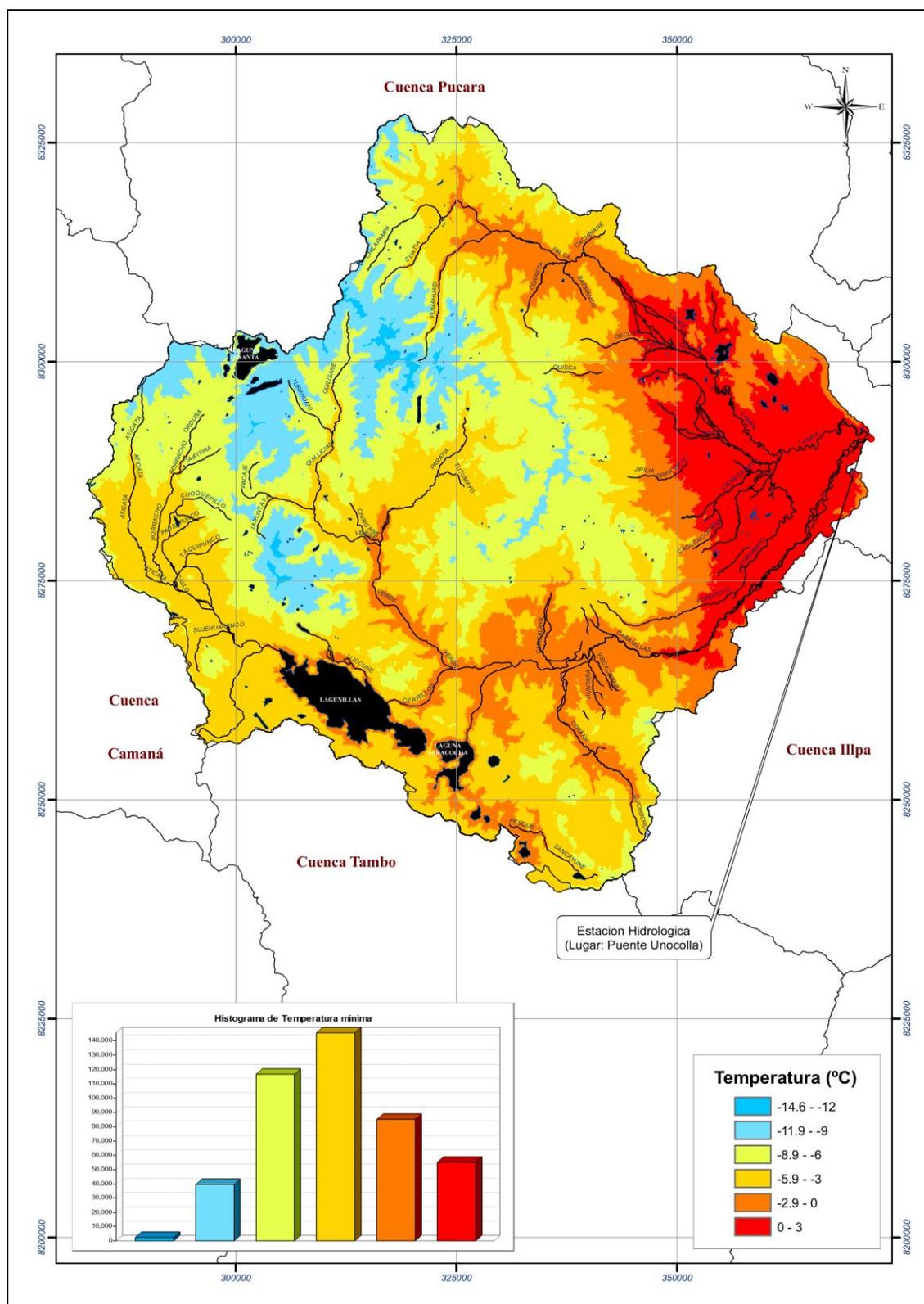
- Modelo de regresión cuenca Coata

$$T_{min} = -0.009700447 * z + 37.97245754 \dots\dots\dots[Ec. 7.6]$$

**Mapa 7.5.- Distribución espacial de la Temperatura Mínima Promedio Multianual – Cuenca Ilave**



**Mapa 7.6.-** Distribución espacial de la Temperatura Mínima Promedio Multianual – Cuenca Coata

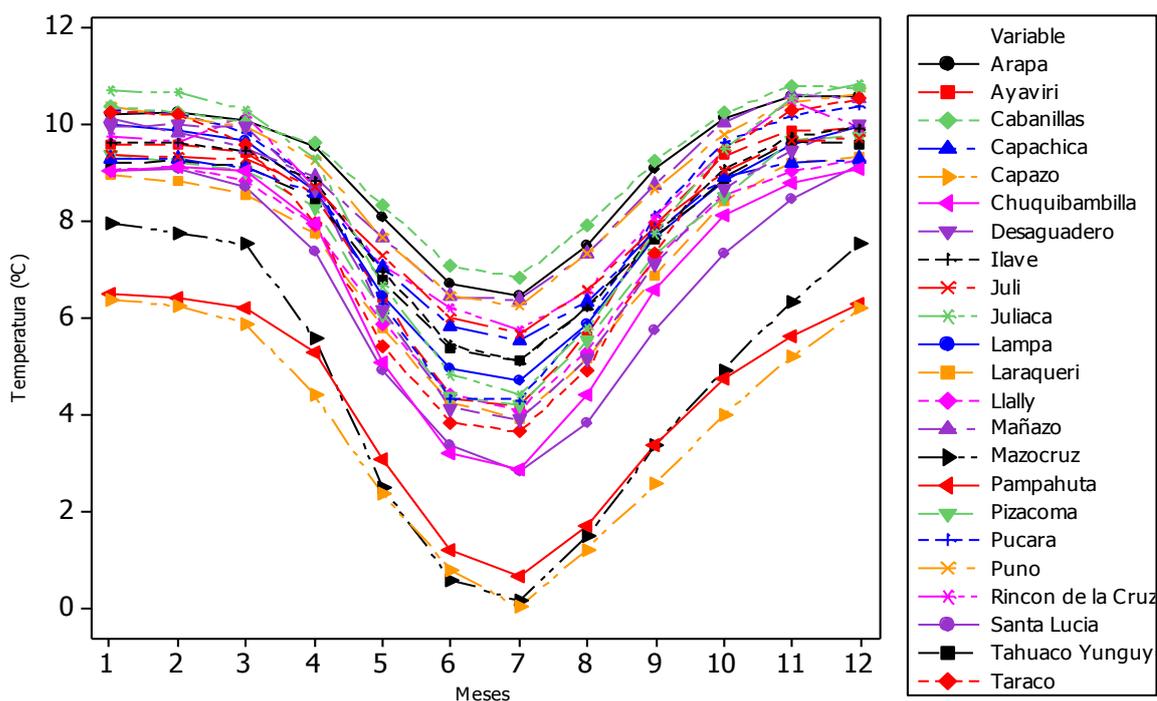


### 7.3.5. Temperatura Media Promedio Multimensual local

Representada por el promedio de la temperatura máxima y mínima de un día. El Cuadro 7.5 muestra la variación de la temperatura media anual, donde la zona más fría está en la cuenca llave con 3.8°C, se trata de la estación Capazo, seguido de la estación Pampahuta con 4.3°C ubicado en la parte alta media de la cuenca Coata. Además la serie temporal de temperaturas medias, se ha representado en forma gráfica de donde se puede visualizar el descenso de la temperatura en los meses de junio y julio (ver Gráfico 7.4)

**Cuadro 7.5.- Temperatura Media promedio multimensual (°C)**

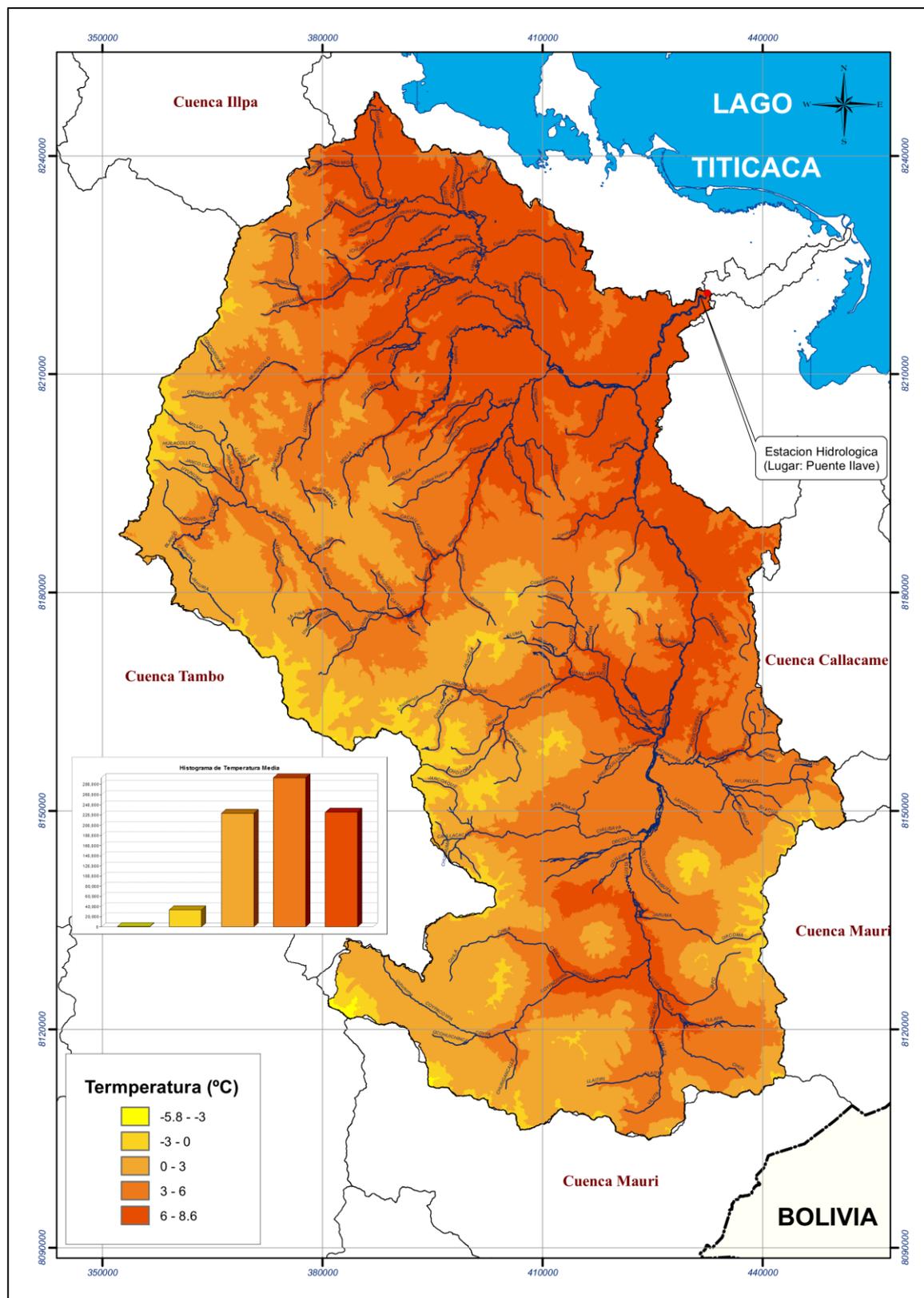
Estacion	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m.s.n.m.]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Arapa	379823	8326267	3892	10.2	10.3	10.1	9.6	8.1	6.7	6.5	7.5	9.1	10.1	10.6	10.6	9.1
Ayaviri	328602	8355116	3921	9.6	9.6	9.4	8.6	6.4	4.4	4.2	5.7	7.9	9.4	9.9	9.9	7.9
Cabanillas	355675	8270502	3877	10.4	10.3	10.0	9.6	8.3	7.1	6.9	7.9	9.2	10.2	10.8	10.8	9.3
Capachica	409496	8273379	3827	9.3	9.3	9.1	8.6	7.1	5.8	5.5	6.3	7.8	8.9	9.2	9.3	8.0
Capazo	421758	8099499	4470	6.4	6.3	5.9	4.4	2.4	0.8	0.0	1.2	2.6	4.0	5.2	6.2	3.8
Chuquibambilla	313519	8364727	3899	9.0	9.1	9.0	8.0	5.1	3.2	2.9	4.5	6.6	8.1	8.8	9.1	7.0
Desaguadero	495691	8168147	3813	10.0	10.0	10.0	8.7	6.2	4.2	3.9	5.2	7.1	8.7	9.5	10.0	7.8
llave	430990	8221164	3837	9.6	9.6	9.5	8.8	7.0	5.5	5.1	6.2	7.7	9.1	9.8	9.9	8.2
Juli	450813	8208437	3814	9.4	9.3	9.3	8.7	7.3	6.0	5.7	6.6	7.9	9.0	9.7	9.7	8.2
Juliaca	374843	8289717	3828	10.7	10.7	10.3	9.3	6.7	4.9	4.4	5.8	7.8	9.5	10.6	10.8	8.5
Lampa	352861	8301728	3929	10.0	9.9	9.7	8.7	6.5	5.0	4.7	5.9	7.7	8.8	9.6	10.0	8.0
Laraqueri	385938	8213627	3952	9.0	8.8	8.6	7.7	5.8	4.3	3.9	5.2	6.9	8.4	9.2	9.3	7.3
Llally	297126	8347800	4211	9.1	9.1	8.8	7.9	5.9	4.4	4.1	5.3	7.3	8.5	9.0	9.3	7.4
Mañazo	357163	8252704	3910	10.1	9.8	9.5	8.9	7.7	6.5	6.4	7.3	8.8	10.1	10.6	10.5	8.9
Mazocruz	424708	8149030	3963	8.0	7.8	7.5	5.6	2.5	0.6	0.2	1.5	3.4	4.9	6.3	7.6	4.7
Pampahuta	320200	8287459	4292	6.5	6.4	6.2	5.3	3.1	1.2	0.7	1.7	3.4	4.8	5.6	6.3	4.3
Pizacoma	460721	8130662	3913	9.4	9.2	9.0	8.3	6.1	4.4	4.2	5.5	7.3	8.5	9.7	9.8	7.6
Pucara	353035	8336523	3869	10.3	10.2	9.8	8.8	6.3	4.3	4.3	5.9	8.1	9.6	10.2	10.4	8.2
Puno	390979	8250334	3831	10.4	10.2	10.0	9.3	7.7	6.5	6.3	7.4	8.7	9.8	10.5	10.6	8.9
Rincon de la Cruz	413212	8231906	3875	9.8	9.7	10.2	8.7	7.1	6.2	5.8	6.6	8.1	9.5	10.5	9.9	8.5
Santa Lucia	327577	8263529	4035	9.0	9.1	8.7	7.4	4.9	3.4	2.9	3.9	5.8	7.4	8.5	9.2	6.7
Tahuaco Yunguyo	491988	8196981	3864	9.2	9.2	9.1	8.5	6.8	5.4	5.1	6.3	7.7	8.9	9.7	9.6	8.0
Taraco	395292	8307846	3817	10.3	10.2	9.6	8.0	5.4	3.9	3.7	4.9	7.3	9.5	10.3	10.5	7.8

**Grafico 7.4.-** Variación temporal de la Temperatura Media Promedio Multimensual

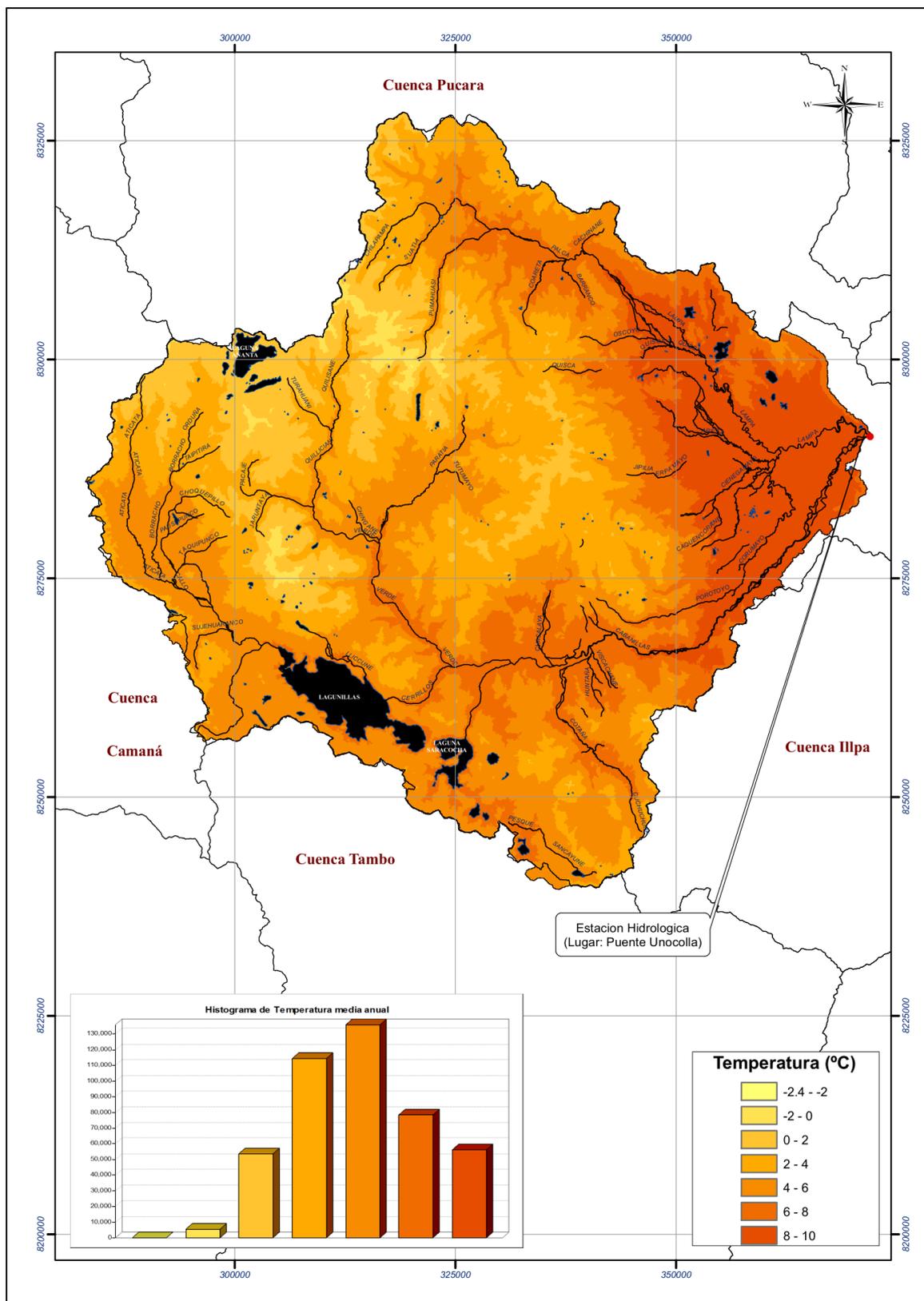
### 7.3.6. Temperatura Media Promedio Multianual regional

El Mapa 7.7 y 7.8, muestra la distribución espacial de la temperatura media a nivel regional denominados isotermas, los cuales varían de  $-5.8$  a  $8.6^{\circ}\text{C}$  para la cuenca Ilave y de  $-2.4$  a  $10^{\circ}\text{C}$  para la cuenca Coata. Para la realización de este mapa se optó por utilizar el álgebra de mapas, tomando en promedio la temperatura máxima y mínima regional.

**Mapa 7.7.-** Distribución espacial de la Temperatura Media Promedio Multianual – Cuenca Ilave



**Mapa 7.8.-** Distribución espacial de la Temperatura Media Promedio Multianual – Cuenca Coata



## VIII. ANALISIS DE LA INFORMACION PLUVIOMETRICA

### 8.1. Red de estaciones meteorológicas

La red de 23 estaciones meteorológicas corresponde al SENAMHI, ubicadas dentro del ámbito del departamento de Puno. El Mapa 8.1, muestra la red de estaciones influyentes al área de estudio.

**Mapa 8.1.- Red de estaciones meteorológicas**



## 8.2. Análisis exploratorio de datos

El Análisis exploratorio de datos (AED) surge de los trabajos realizados por Tukey (1977), desde entonces su uso se ha venido incrementando, debido a que se ha comprobado que el examen previo de los datos es un paso necesario. Este análisis toma su tiempo y habitualmente se descuida por parte de los analistas de datos. Muchas veces las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico. El uso directo de la data sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre variables, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos.

La finalidad del AED, es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística. De esta forma el analista consigue un entendimiento básico de sus datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas, además el AED proporciona métodos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en la recogida de datos, identificación de casos atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes.

### 8.2.1. Diagrama de cajas (box plot)

Utilizado para obtener información relativa a la concentración, localización y variación de los datos. Las series de precipitaciones anuales han sido sometidas a este proceso para tener una primera aproximación de la calidad de los datos, los patrones de su comportamiento y la posible presencia de datos atípicos (outliers); así como identificar valores que son numéricamente distantes del resto de los datos.

Para realizar el diagrama de cajas, es necesaria la determinación de los cuartiles Q1, Q2, Q3, que son el 25, 50 y 75% de la muestra de datos, el rango intercuartil (RIQ) y los límites superior (Ls) e inferior (Li), denominados también bigotes y se obtienen a partir de la [Ec. 8.1], los cuales son los límites internos del diagrama de cajas. El RIQ, se obtiene a partir de una resta que sería el Q3 menos el Q1.

#### 8.2.1.1. Valores atípicos

En las estadísticas, tales como muestras estratificadas, un valor atípico es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos. Las estadísticas derivadas de los conjuntos de datos que incluyen valores atípicos serán frecuentemente engañosas.

Tomando como referencia la diferencia entre el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil Q3, o valor intercuartil, en un diagrama de caja se considera un valor atípico el que se encuentra

1,5 veces esa distancia de uno de esos cuartiles (atípico leve) o a 3 veces esa distancia (atípico extremo).

- **Valor atípico leve**

Aquellos valores que se encuentran más allá de los límites internos:

$$\begin{array}{l} < Q1 - 1.5 * RIQ & \dots\dots\dots[Ec. 8.1] \\ 0 & \\ > Q3 + 1.5 * RIQ & \end{array}$$

- **Valor atípico extremo**

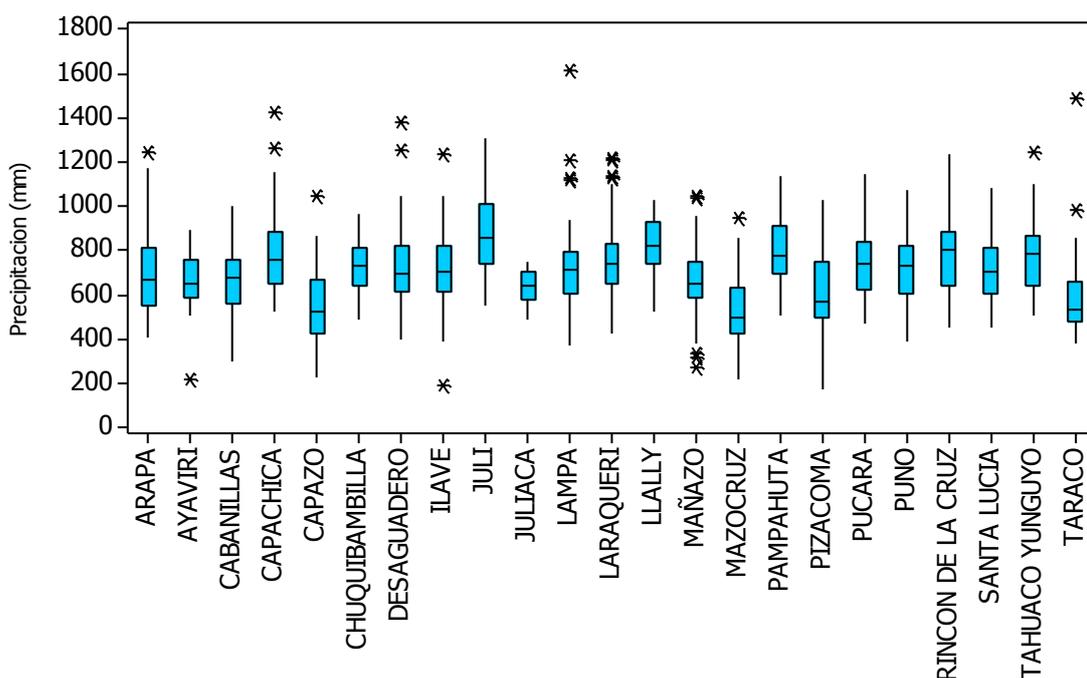
Son observaciones que se encuentran más allá de los límites externos:

$$\begin{array}{l} < Q1 - 3 * RIQ & \dots\dots\dots[Ec. 8.2] \\ 0 & \\ > Q3 + 3 * RIQ & \end{array}$$

El Gráfico 8.1, muestran el diagrama de cajas de las precipitaciones totales anuales del periodo septiembre de 1965 - agosto 2013, donde se visualiza de una forma clara la existencia de valores atípicos leves y extremos, representados por un asterisco o doble asterisco respectivamente, los cuales están fuera de los intervalos Ls y Li, estos valores de precipitación serán analizados posteriormente en el análisis de saltos y así verificar si su existencia se debe a un fenómeno natural o es la presencia de un valor erróneo.

Por otro lado se observa que los valores de precipitación de otras estaciones son adyacentes a su media por estar dentro de su primer límite superior e inferior, algunas presentan menos dispersión de datos por debajo de la media, debido a que la primera caja que se encuentra entre el Q1 y el Q2 es más grande que la caja del Q2 y Q3 o viceversa, entre otros se puede observar la asimetría de la observación, la concentración de valores a través de los bigotes, tal es el caso de que la estación Taraco tiene el 25% de datos más concentrados que los que están por encima del 75%, presentando una asimetría a la izquierda, además presenta valor atípico extremo al igual que la estación Lampa.

Gráfico 8.1.- Diagrama de cajas de la precipitación total anual



Los valores atípicos no pueden ser caracterizados categóricamente como benéficos o problemáticos sino que deben ser contemplados en el contexto del análisis y debe evaluarse el tipo de información que pueden proporcionar. Su principal problema radica en que son elementos que pueden no ser representativos de la población pudiendo distorsionar seriamente el comportamiento de los contrastes estadísticos. Por otra parte, aunque son diferentes a la mayor parte de la muestra, pueden ser indicativos de las características de un segmento válido de la población y por consiguiente, una señal de la falta de representatividad de la muestra.

Otra metodología para la identificación de valores atípicos es la siguiente (Tukey, 1977):

1. Cálculo del paso

$$\text{Paso} = 1.5 * \text{RIQ} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.3}]$$

2. Cálculo de las cercas internas y externas

$$\text{CI}_i = \text{Q1} - \text{Paso} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.4}]$$

$$\text{CI}_s = \text{Q3} - \text{Paso} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.5}]$$

$$\text{CE}_i = \text{Q1} - 2 * \text{Paso} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.5}]$$

$$\text{CE}_s = \text{Q3} - 2 * \text{Paso} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.6}]$$

Siendo:

CI<sub>i</sub> = Cerca interna inferior

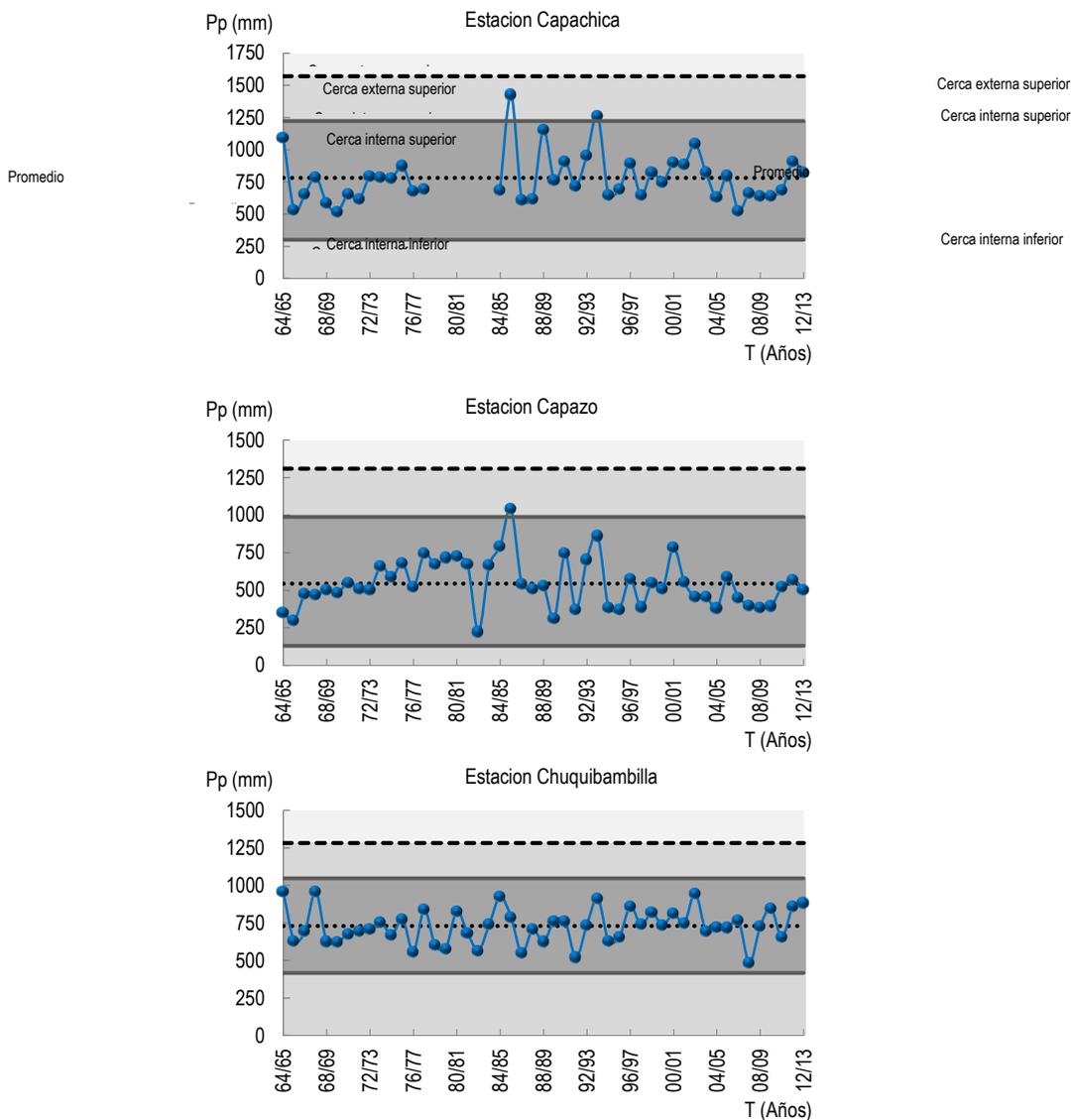
CIs	=	Cerca interna superior
Cei	=	Cerca externa inferior
Ces	=	Cerca externa superior

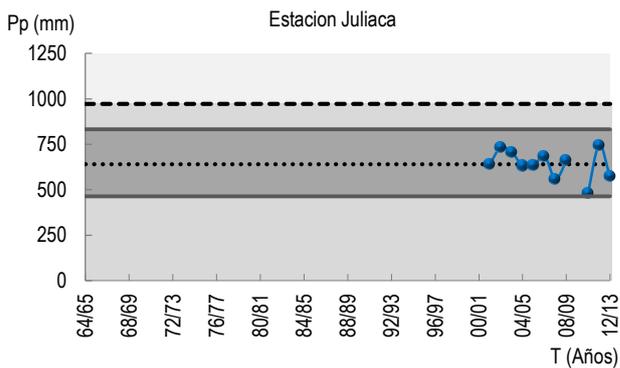
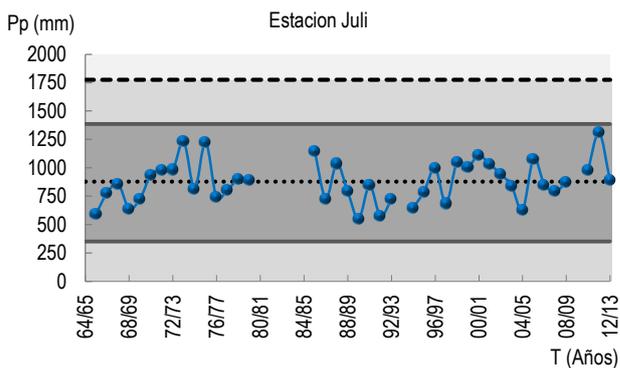
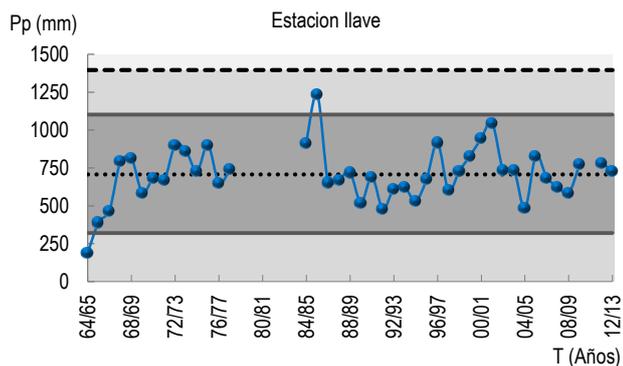
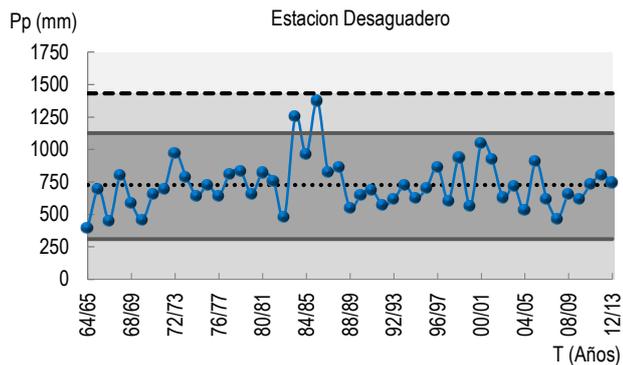
Los valores ubicados entre la media y las cercas internas (inferior y superior) son denominados adyacentes, los valores entre las cercas internas y las cercas externas son considerados como alejados y los valores ubicados fuera de las cercas externas (inferior y superior) son considerados como muy alejados. Los valores ubicados fuera de las cercas externas son por lo general considerados como valores atípicos.

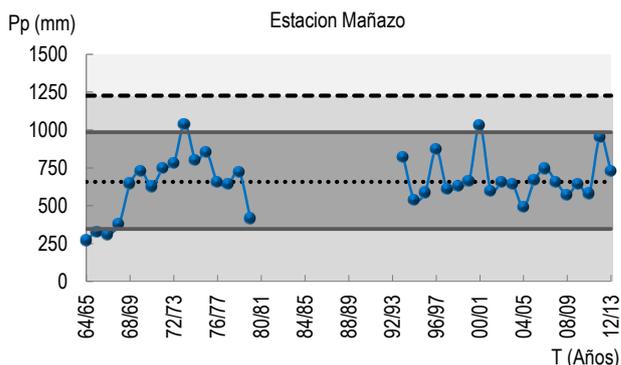
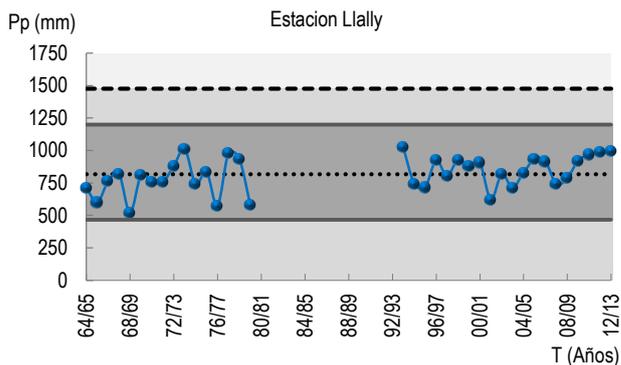
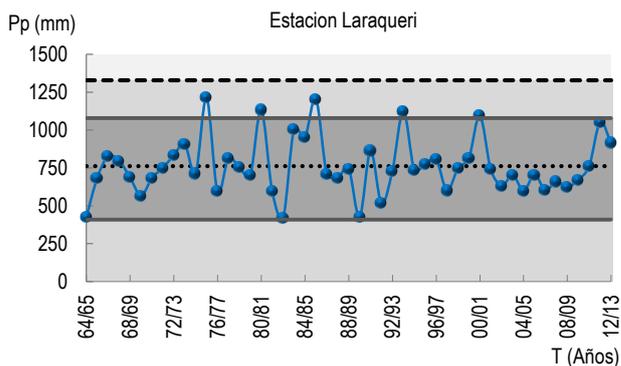
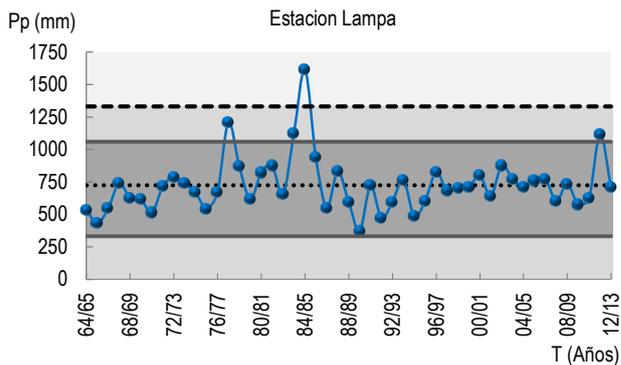
En el Gráfico 8.2, se muestran los valores anuales de las precipitaciones, donde se observa claramente que las estaciones Cabanillas, Chuquibambilla, Juli, Juliaca, Llally, Pampahuta, Pizacoma, Pucara, Puno y Santa Lucia, muestran valores que se encuentran dentro de la cerca interna los cuales son considerados como adyacentes.

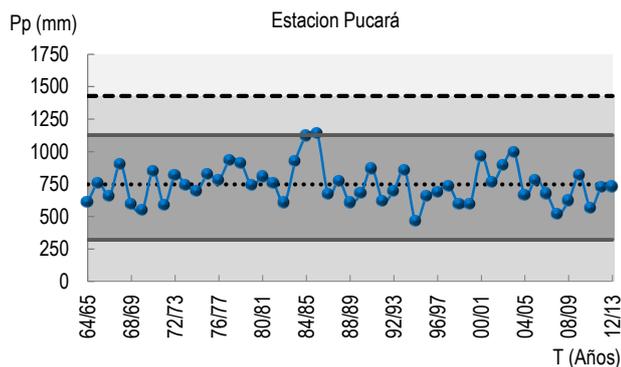
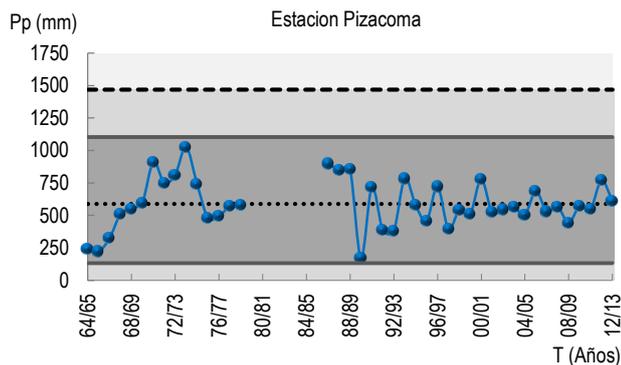
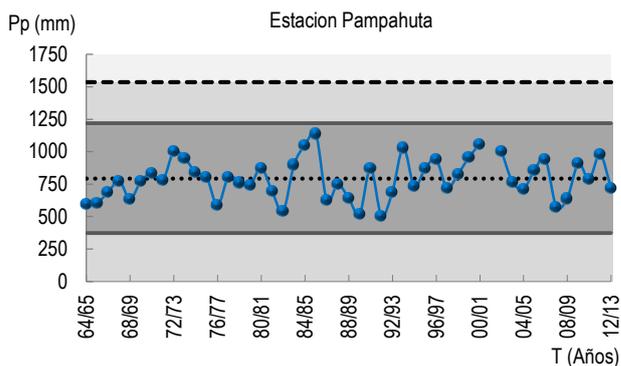
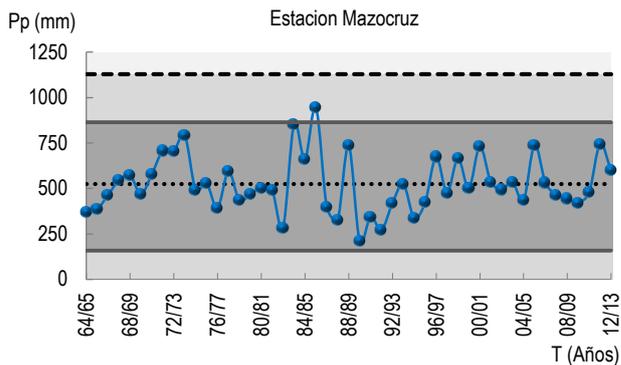
En el caso de las estaciones Arapa, Ayaviri, Capachica, Capazo, desaguadero, llave, Laraqueri, Mañazo, Mazocruz, Rincon de la Cruz y Yunguyo, tienen valores alejados debido a que alguno de ellos se encuentran dentro de la cerca interna y externa, mientras que las estaciones Lampa y Taraco sobrepasan la cerca externa superior los cuales son considerados valores atípicos extremos referidos al igual que los diagramas de caja.

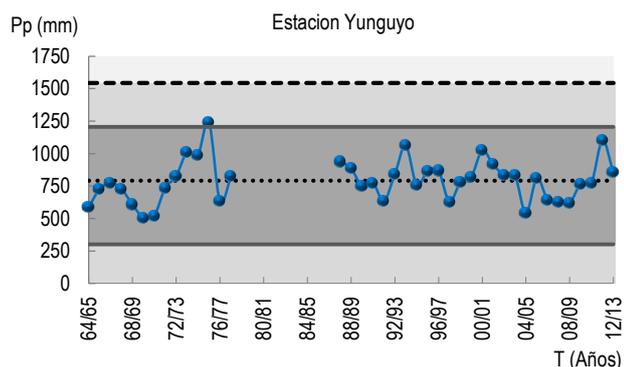
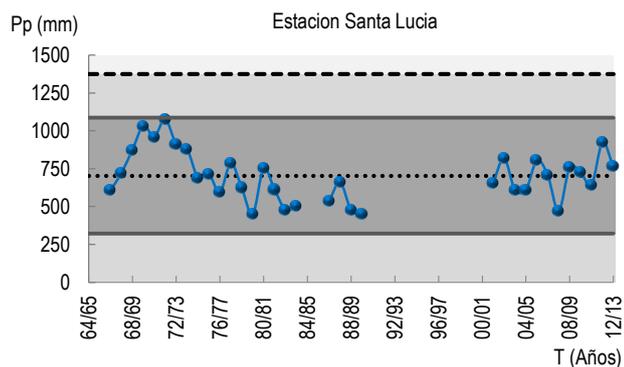
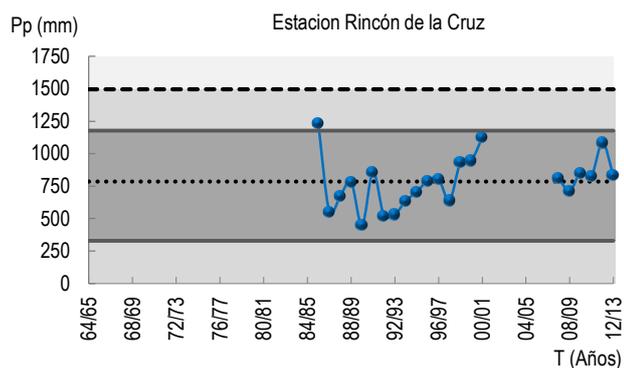
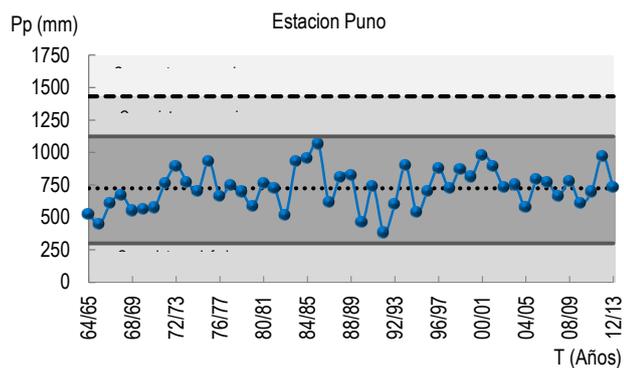
**Gráfico 8.2.-** Distribución de los valores anuales en relación a la media general de la precipitación, mostrando las cercas internas y externas.

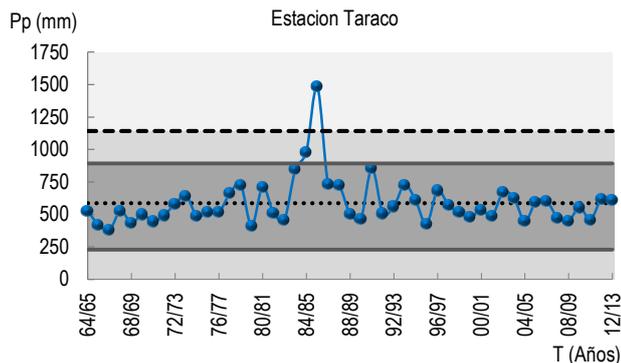








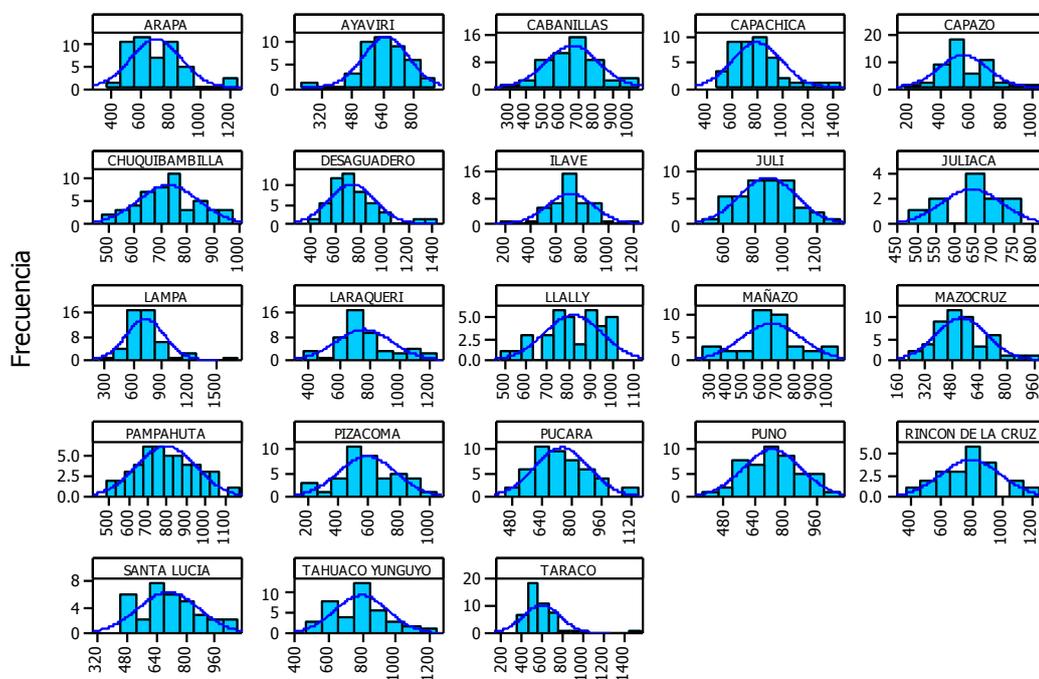




### 8.2.2. Histogramas

Representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirven para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua, de la misma y que es de interés para el observador. El propósito del histograma es el de resumir gráficamente la distribución del conjunto univariado de datos. El Gráfico 8.2, señala las diferencias que existen entre la distribución de los datos de precipitación anual de las 23 estaciones, existiendo una notable asimetría positiva y negativa, mientras que otras muestran una distribución cercana a la distribución normal o son simétricas.

**Gráfico 8.2.-** Histograma de precipitación total anual



### **8.3. Identificación de estaciones homogéneas**

El agrupamiento de estaciones se realizó primeramente en base a técnicas multivariadas como es el Análisis de Conglomerados (AC) o Cluster. El AC consiste en el agrupamiento de objetos (en este caso estaciones meteorológicas) con base a medidas de similaridad que están en función de variables preconcebidas como aquellas que mejor caracterizan a la población en estudio. Seguidamente para darle una mejor representación se utilizó el software hidrológico Hydraccess en el cual viene incorporado el Método del Vector Regional (MVR), desarrollado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) en los años 70 con el objetivo de homogenizar los datos pluviométricos.

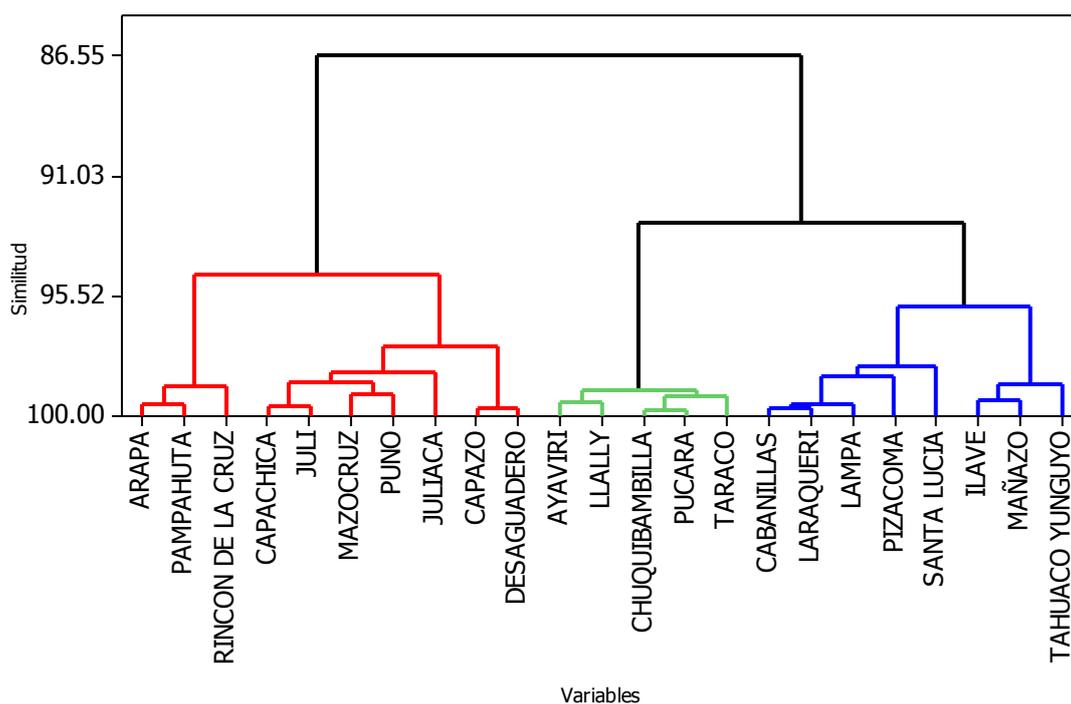
#### **8.3.1. Agrupamiento por análisis de conglomerados (AC)**

El análisis de Cluster es un método que permite descubrir asociaciones y estructuras en los datos que no son evidentes a priori pero que pueden ser útiles una vez que se han encontrado.

Para realizar el análisis de conglomerados se utilizó el software Minitab 16 que tiene la opción de realizar en forma rápida utilizando el agrupamiento jerárquico a través del método de Ward con la medición de la distancia de correlación. Para realizar el análisis de conglomerados, se utilizaron las medidas estadísticas de centralización y dispersión partir de los datos observados de precipitación, entre ellos se determinaron la media ( $\bar{\mu}$ ), desviación típica ( $S_x$ ), Varianza ( $S^2_x$ ), Coeficiente de Variación (Cv) y el Rango (R). En el Gráfico 8.3, se muestra el resultado de la formación de 03 grupos con un comportamiento similar según el análisis de conglomerados.

##### **8.3.1.1. El dendograma**

Representación gráfica en forma de árbol que resume el proceso de agrupación en un análisis de clusters. Los objetos similares se conectan mediante enlaces cuya posición en el diagrama está determinada por el nivel de similitud/disimilitud entre los objetos. El proceso completo puede resumirse mediante un dendograma, de donde se deduce evidentemente que tenemos 03 clusters de estaciones.

**Grafico 8.3.-** Dendrograma – Enlace de Ward, distancia de coeficiente de correlación

### 8.3.2. Método del Vector Regional (MVR)

El método del vector regional se basa en la construcción de una estación ficticia en base a la información disponible, tal que sea representativa de la zona de estudio. En cada estación se calcula un promedio extendido para todo el período de estudio y para cada año, se calcula un índice. (>1 año con superávit, <1 año deficitario). A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional (VR), ya que toma en cuenta la información de una región que se supone es climáticamente homogénea. Existen dos métodos para el cálculo del VR, el primero dado por G. Hiez y el segundo por Brunet Moret.

Con la ayuda del VR, se analiza lo siguiente:

- Calidad de los datos de cada estación por curvas de dobles acumuladas con los índices del vector regional.
- Correlación de los datos de una estación con los índices del vector regional.

La calidad del vector regional depende de la calidad de los datos de entrada. Aunque los algoritmos utilizados por los dos métodos intentan minimizar la influencia de los datos erróneos, el vector calculado al comienzo sigue contaminado por los errores que existen en los datos de las estaciones. Sólo de manera iterativa, eliminando los datos visiblemente imaginarios y corrigiendo poco a poco los errores más evidentes sobre los datos de entrada, se llegará a un vector regional de buena calidad. Para evitar estas evidencias se han

utilizado las agrupaciones realizados por el análisis de conglomerados evaluando cada grupo de estaciones de acuerdo al Gráfico N° 8.3.

Consideraciones para elaborar el vector regional:

- Para el cálculo del vector regional debemos tener como mínimo 3 estaciones por año, y 3 años como mínimo por estación.
- La hipótesis principal de este método es el principio de “pseudo-proporcionalidad”, por lo cual los datos deben tener el mismo comportamiento (cantidad y variación temporal), es decir deben tener una tendencia climática regional única.
- La pseudo-proporcionalidad de una zona es medida por el valor del coeficiente de correlación media entre las estaciones y el vector correspondiente (1 representa buena proporcionalidad). Este coeficiente en el software Hydraccess aparece como “Correl./Vector”.
- Se ha considerado una zona como homogénea si los coeficientes de correlación anual entre el vector y la estación son superiores o iguales a 0.7; debido a que la poca densidad de la red de estaciones, no nos permite ser más estrictos y reducir la zona.
- Teniendo en cuenta las consideraciones antes descritas y considerando la misma formación de grupos por el análisis de conglomerados se ha optado por mantener los 04 grupos (regiones homogéneas) debido a que tienen buena proporcionalidad entre ellos.

### 8.3.2.1. Resultados de la homogenización

A fin de poder escoger las estaciones en función de su calidad, se planteó una clasificación con cinco niveles de calidad, la cual está en función a comparaciones hechas con el vector regional de la zona geográfica donde se encuentran y el propio método de control de Hydraccess:

**Muy Buena.-** Correlación ( $r^2 > 0.75$ ) con el vector, con series largas y/o la calidad de la estación es superior a 7.5, según Hydraccess.

**Buena.-** Correlación ( $0.75 < r^2 < 0.6$ ) con el vector, pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación está en el rango de 7.5 – 6, según Hydraccess.

**Aceptable.-** Correlación ( $0.6 < r^2 < 0.5$ ) con el vector, pudiendo tener series cortas o largas, algunas pueden ser consideradas como de buena calidad, pero presentan series demasiado cortas (solo útiles para formar el vector) y/o la calidad de la estación está en el rango de 6 – 5, según Hydraccess.

**Mala.-** Correlación ( $0.5 < r^2 < 0.4$ ) con el vector pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación está en el rango de 5 – 4, según Hydraccess.

**Pésima.-** Correlación ( $r^2 < 0.4$ ) con el vector, pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación esta inferior a 4, según Hydraccess.

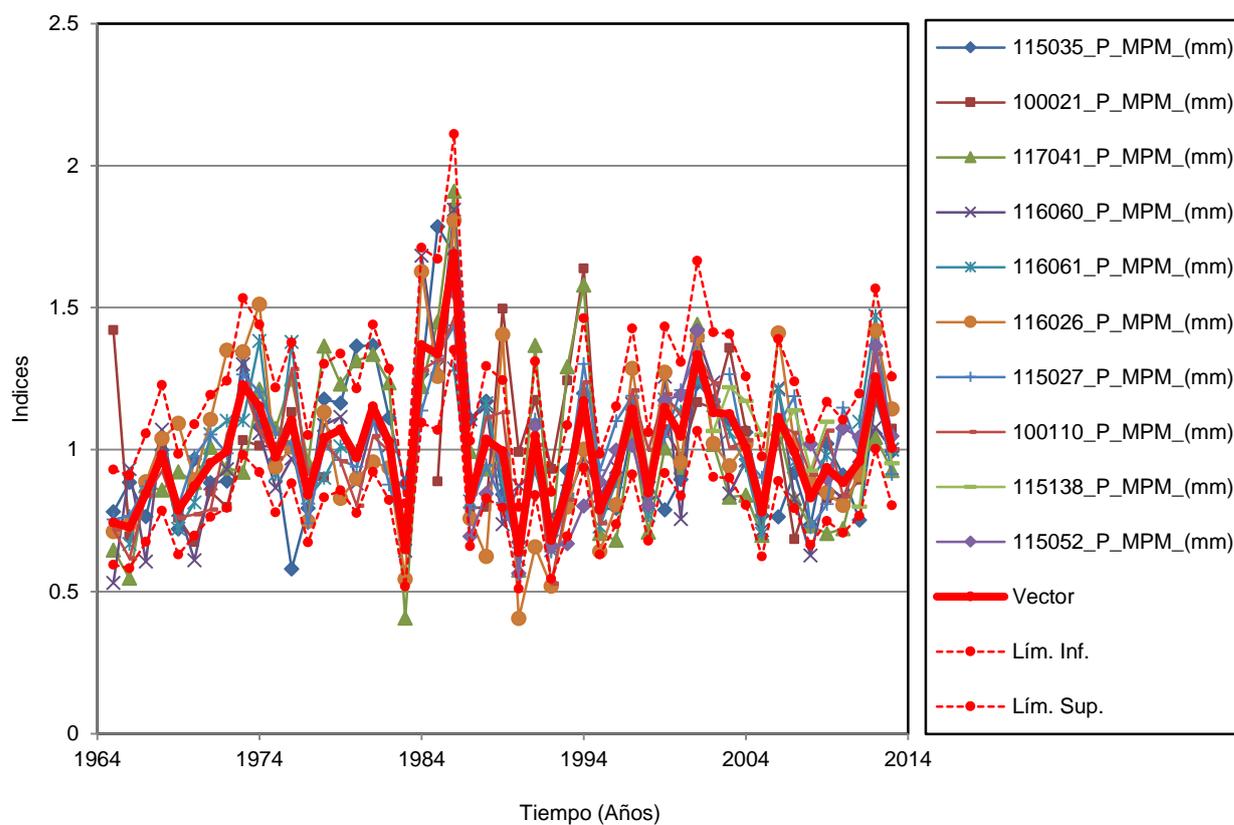
Debido al poco número de estaciones existentes en la zona no se puede juzgar la estación en función al número de datos, diferentes estudios toman en cuenta la longitud de la serie para calificar la calidad (ejemplo: Espinoza, 2008; Rossell 1993; etc).

#### A. Grupo 1

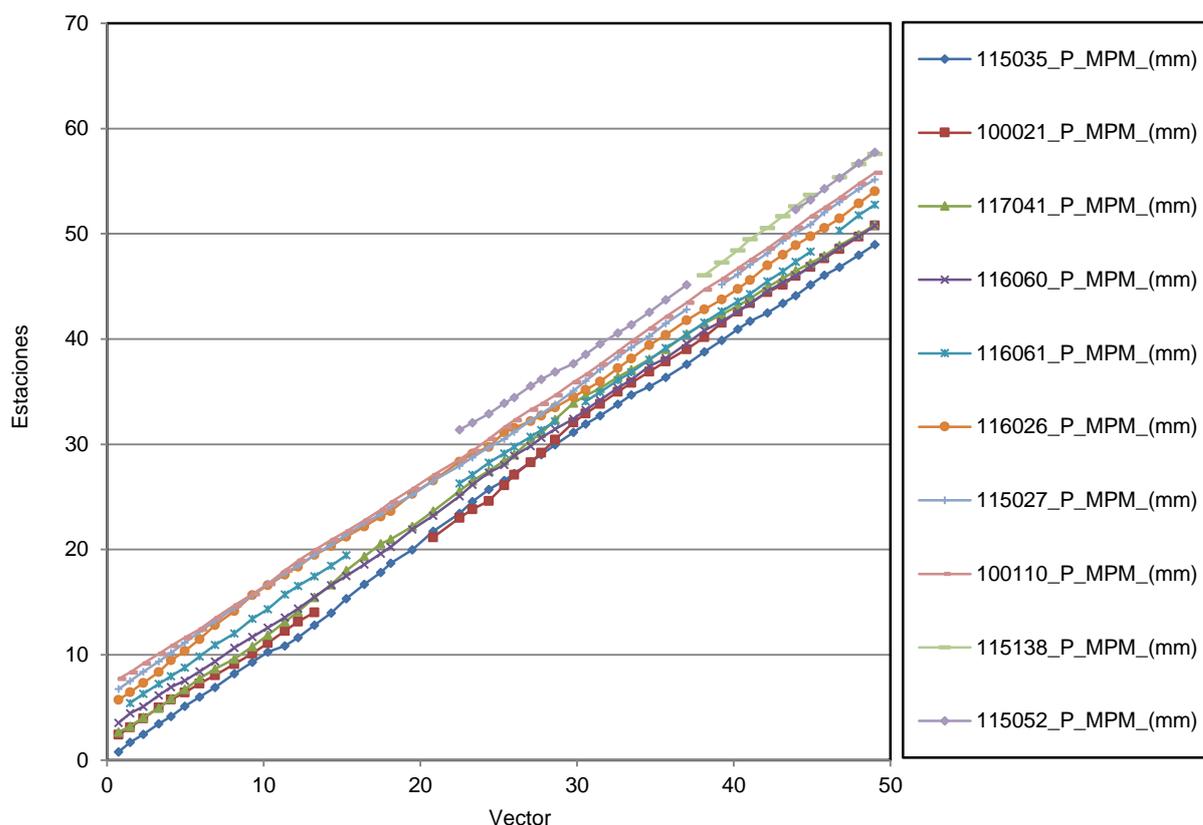
En el Gráfico 8.4 se muestra el vector regional generado en base a 10 estaciones de comportamiento similar, la DED (desviación estándar de desvío) promedio es de 0.15 y con una correlación anual promedio de 0.77, clasificándose en forma regional como muy buena, según la metodología utilizada. El Cuadro 8.1, muestra que la DED varía de 0.089 a 0.216, siendo valores óptimos para la conformación de una región homogénea.

**Cuadro 8.1.-** Parámetros de estimación del vector regional – Grupo 1

Estacion	Id Estación	Nº Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
Arapa	115035_P_MPM_(mm)	49	171.7	0.248	693.8	694.1	0.168	0.037	0.732
Capachica	100021_P_MPM_(mm)	43	194	0.248	781.3	764.3	0.216	0.114	0.566
Capazo	117041_P_MPM_(mm)	49	160.2	0.295	543.8	542.7	0.178	0.001	0.801
Desaguadero	116060_P_MPM_(mm)	49	191.4	0.263	727.3	742.1	0.14	0.159	0.843
Juli	116061_P_MPM_(mm)	41	185.3	0.211	878.6	890.1	0.114	0.134	0.838
Mazocruz	116026_P_MPM_(mm)	49	155.5	0.297	524.5	523.4	0.175	0.018	0.813
Pampahuta	115027_P_MPM_(mm)	48	154.7	0.195	792.1	786.7	0.115	0.005	0.836
Puno	100110_P_MPM_(mm)	49	152.8	0.211	725.3	728	0.089	0.036	0.907
Juliaca	115138_P_MPM_(mm)	11	79.7	0.124	640.6	601.5	0.136	0.169	0.533
Rincon de la Cruz	115052_P_MPM_(mm)	22	200.2	0.255	786.3	782.9	0.142	0.013	0.828

**Gráfico 8.4.- Índices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret)**

Del Gráfico 8.5, se resume que la doble acumulación de índices anuales del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres que no son significativos que serán evaluados posteriormente.

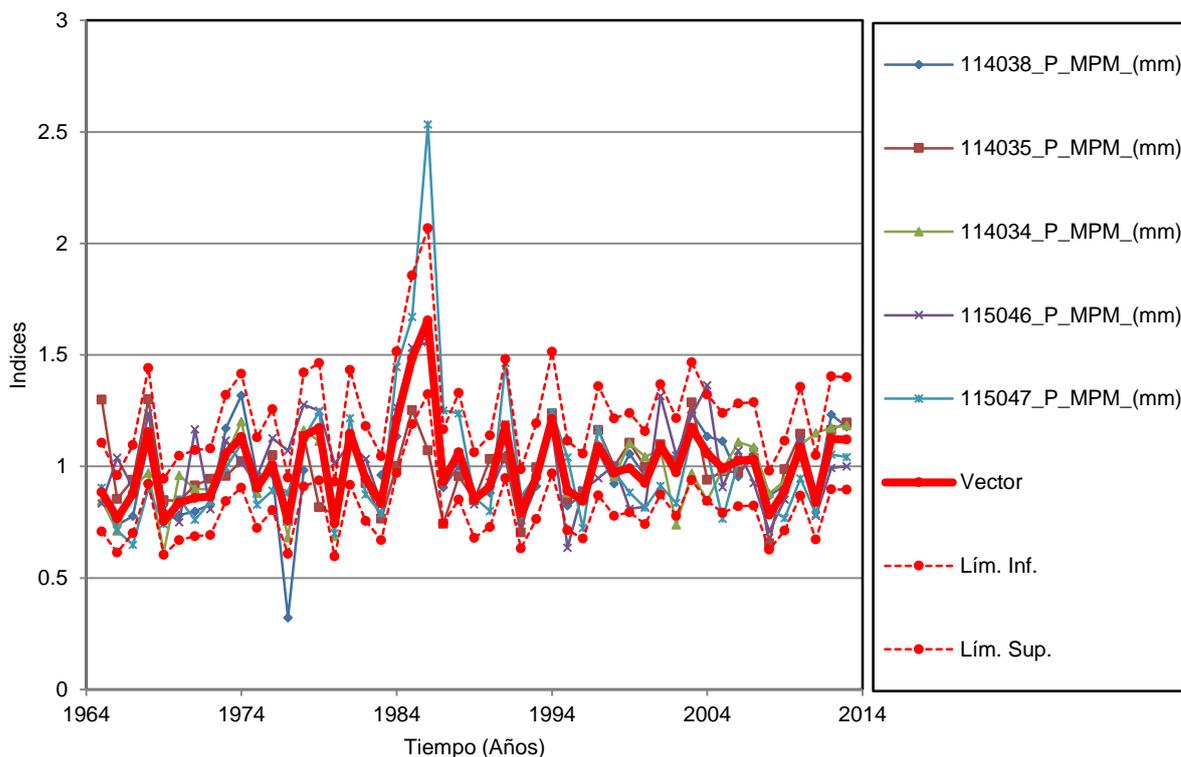
**Gráfico 8.5.- Acumulación de los índices anuales del Vector y de las Estaciones****B. Grupo 2**

Conformado por 05 estaciones con series que van de 36 a 49 años de comportamiento similar según el Gráfico 8.6. La DED (desviación estándar de desvío) promedio es de 0.14 y con una correlación anual promedio de 0.78, perteneciendo a una calidad muy buena, además el Cuadro 8.2, muestra que la DED varía de 0.099 a 0.175, siendo valores óptimos para la conformación de una región homogénea.

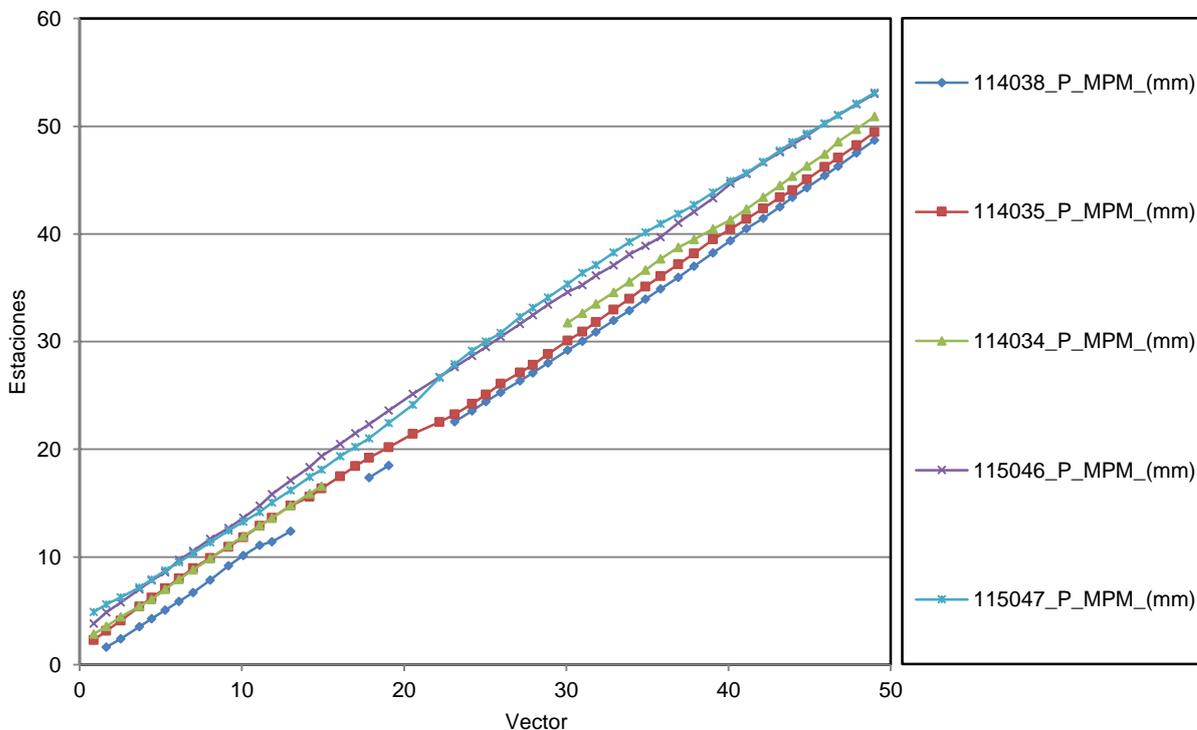
**Cuadro 8.2.- Parámetros de estimación del vector regional – Grupo 2**

Estacion	Id Estación	Nº Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
Ayaviri	114038_P_MPM_(mm)	42	122.5	0.187	655.5	677.1	0.099	0.06	0.838
Chuquibambillas	114035_P_MPM_(mm)	49	116.5	0.16	728.7	737	0.144	0.001	0.642
Llally	114034_P_MPM_(mm)	36	134.3	0.164	817.5	842.3	0.104	0.344	0.759
Pucara	115046_P_MPM_(mm)	49	147.2	0.197	746.9	731.6	0.128	0.102	0.783
Taraco	115047_P_MPM_(mm)	49	181.7	0.31	586.9	585.4	0.175	0	0.872

**Gráfico 8.6.- Índices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret)**



**Gráfico 8.7.- Acumulación de los índices anuales del Vector y de las Estaciones**



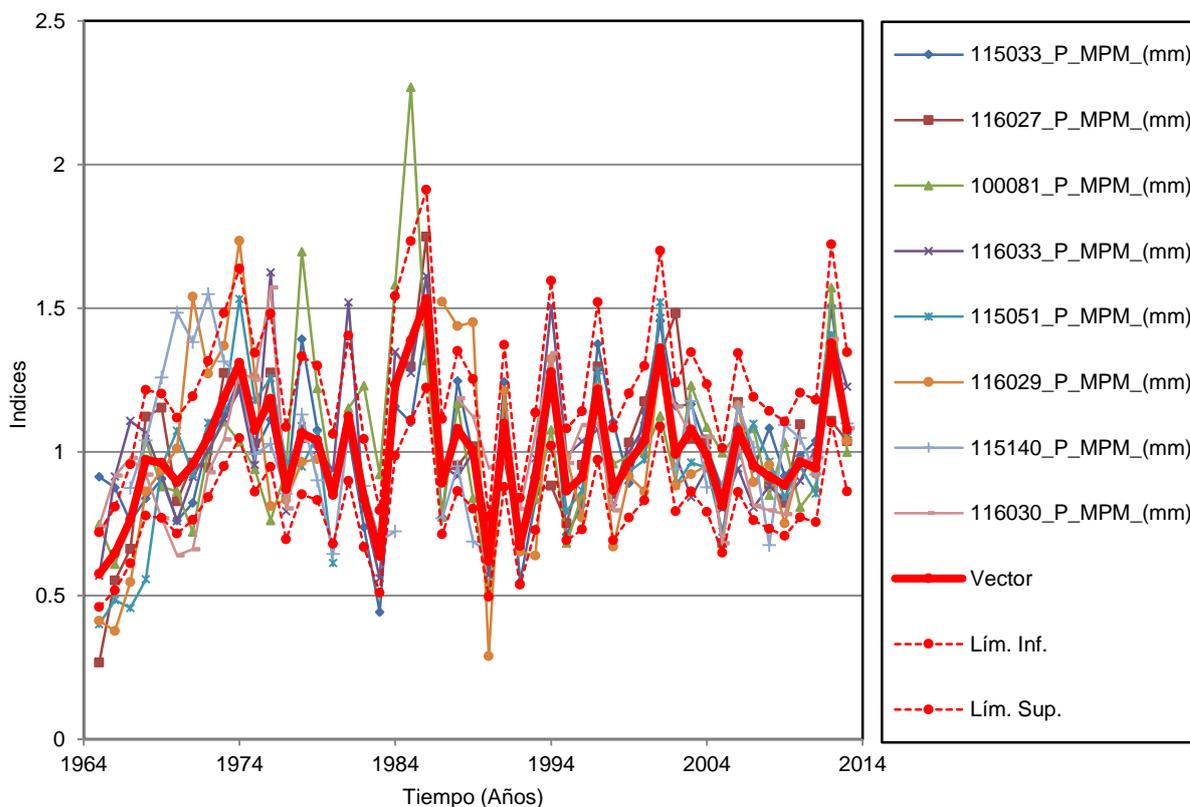
### C. Grupo 3

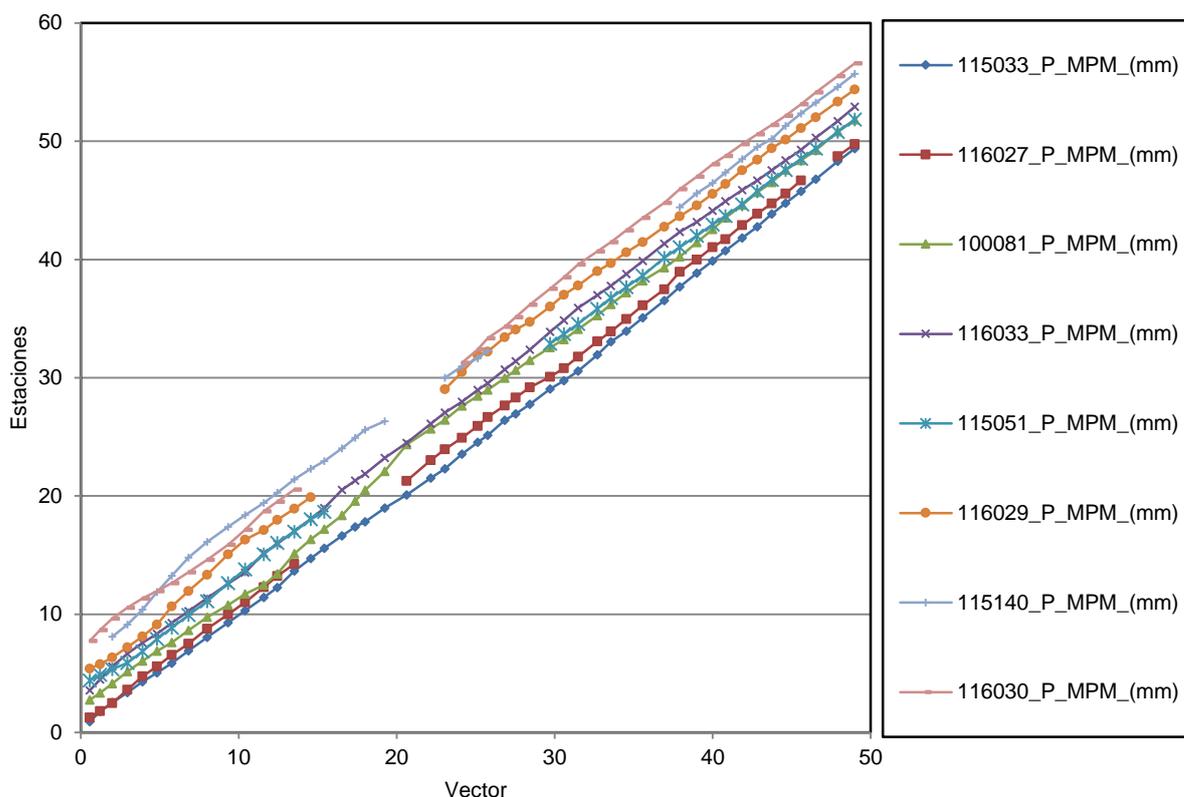
En el Gráfico 8.8, se muestra el vector regional generado en base a 08 estaciones de comportamiento similar, la DED promedio es de 0.17 para este grupo, con una correlación anual promedio de 0.75, clasificándose en forma regional como muy buena. El Cuadro 8.1, muestra que la DED varía de 0.146 a 0.222, siendo valores óptimos para la conformación de una región homogénea. Así mismo los quiebres significativos de las dobles acumulación presentadas en el Grafico 8.9, serán evaluados en el análisis de consistencia.

Cuadro 8.3.- Parámetros de estimación del vector regional – Grupo 3

Estacion	Id Estación	Nº Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
Cabanillas	115033_P_MPM_(mm)	49	154.2	0.231	666.6	661.5	0.129	0.015	0.832
Ilave	116027_P_MPM_(mm)	42	182.9	0.258	707.6	705.9	0.146	0.553	0.823
Lampa	100081_P_MPM_(mm)	49	212.2	0.293	724.2	712.2	0.222	0.175	0.663
Laraqueri	116033_P_MPM_(mm)	49	188.8	0.248	760.9	746.7	0.139	0.507	0.834
Mañazo	115051_P_MPM_(mm)	36	180	0.274	656.4	678.5	0.133	0.264	0.9
Pizacoma	116029_P_MPM_(mm)	42	191.3	0.325	588.1	591.2	0.222	0.055	0.74
Santa Lucia	115140_P_MPM_(mm)	34	167.1	0.238	702.5	695	0.213	0.001	0.486
T. Yunguyo	116030_P_MPM_(mm)	40	163.9	0.207	792	790.8	0.151	0.141	0.706

Gráfico 8.8.- Índices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret)



**Gráfico 8.9.-** Acumulación de los índices anuales del Vector y de las Estaciones

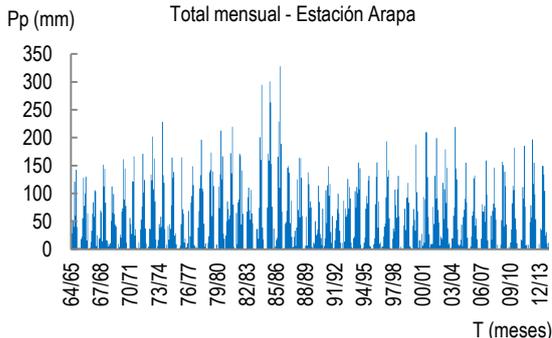
#### 8.4. Completación de datos faltantes

La completación de datos se ha realizado mediante el uso del programa HEC4, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. El programa en su aplicación se encuentra en una versión de D.O.S. y aun no se tiene en una versión más amigable, este programa realiza una correlación cruzada entre todas las estaciones de cada mes en común del grupo o región homogénea y utiliza para la completación de datos faltantes la que tiene mejor correlación. Una de sus limitaciones del programa es que solo puede realizar el análisis para un grupo conformado de 10 estaciones.

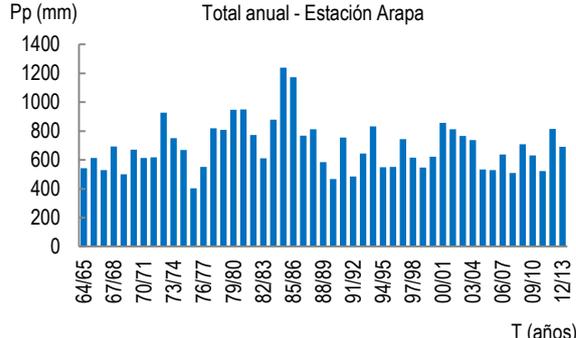
En los Gráficos 8.10 al 8.12, se muestran los hidrogramas completados según los grupos homogéneas.

**Gráfico 8.10.- Hidrograma de precipitación total mensual y anual completado – Grupo 1**

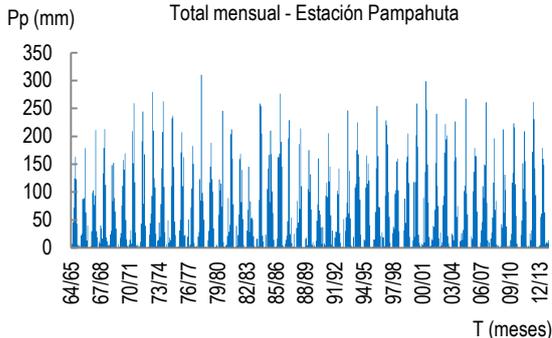
Total mensual - Estación Arapa



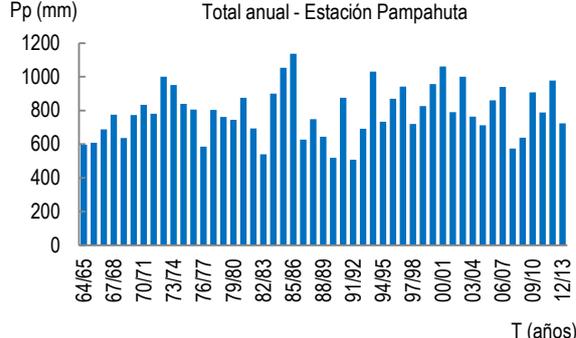
Total anual - Estación Arapa



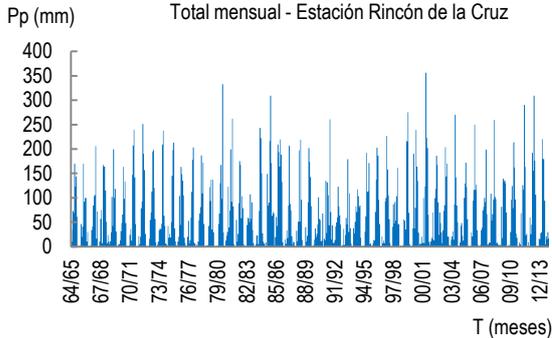
Total mensual - Estación Pampahuta



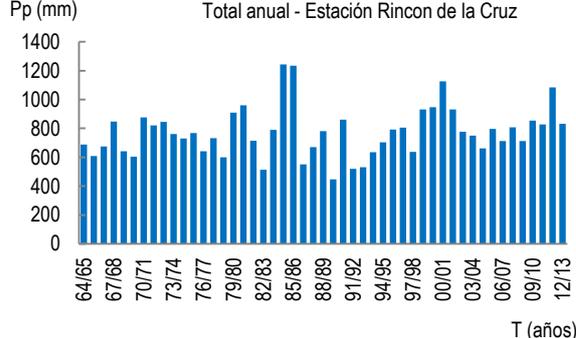
Total anual - Estación Pampahuta



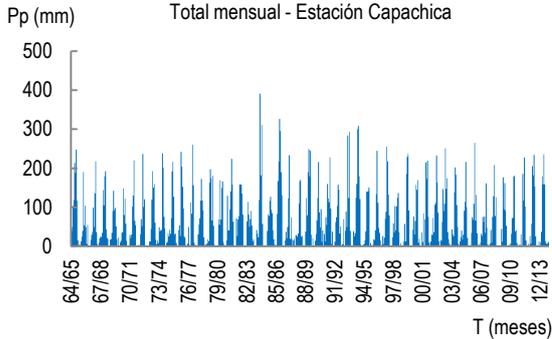
Total mensual - Estación Rincón de la Cruz



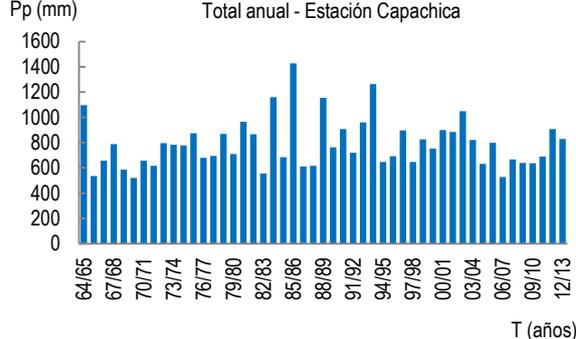
Total anual - Estación Rincon de la Cruz

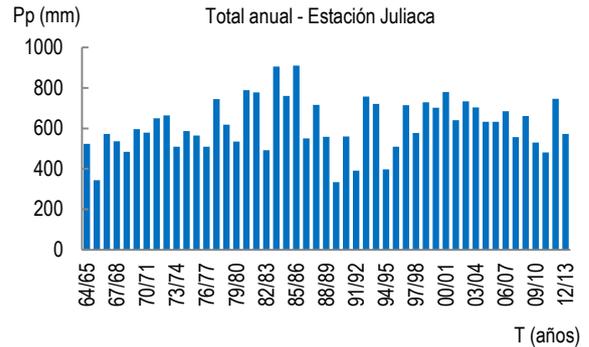
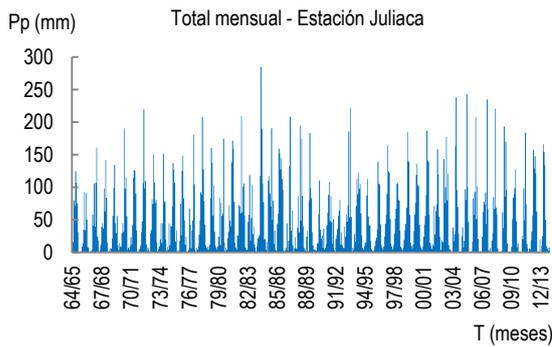
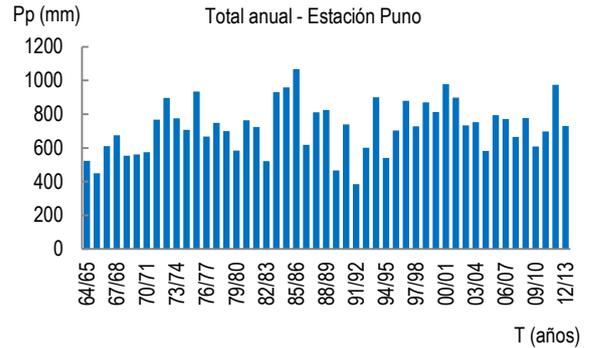
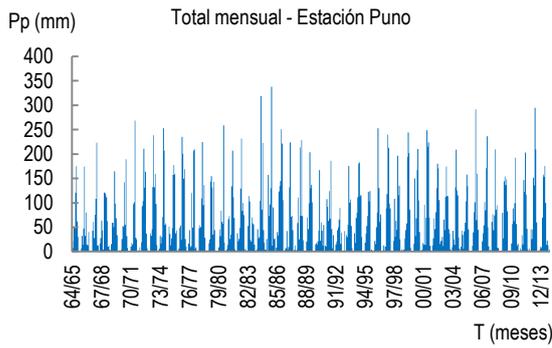
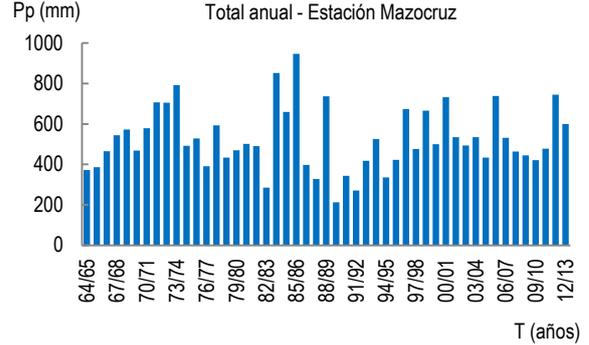
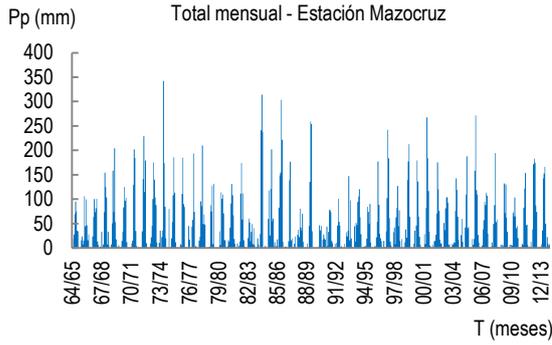
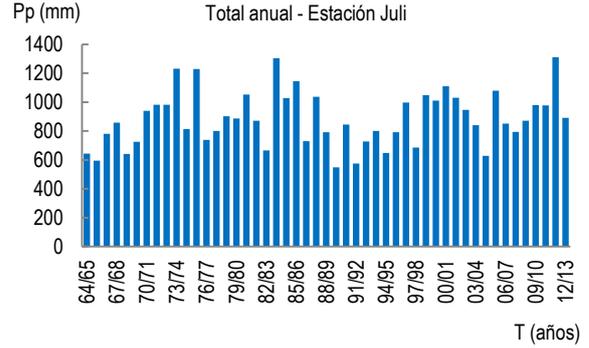
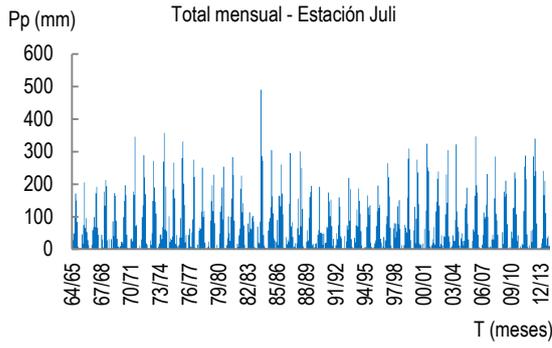


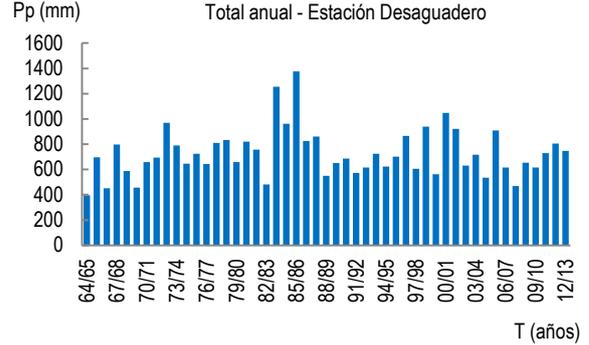
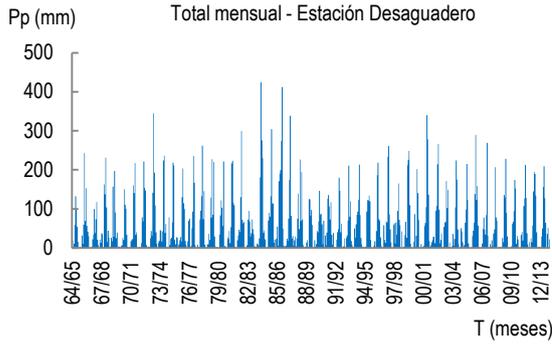
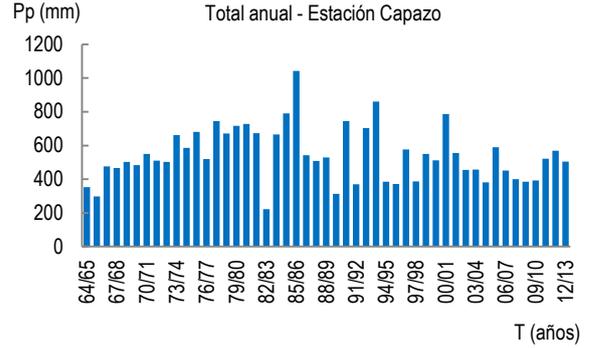
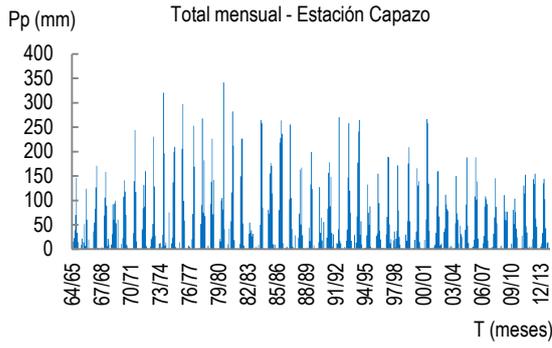
Total mensual - Estación Capachica



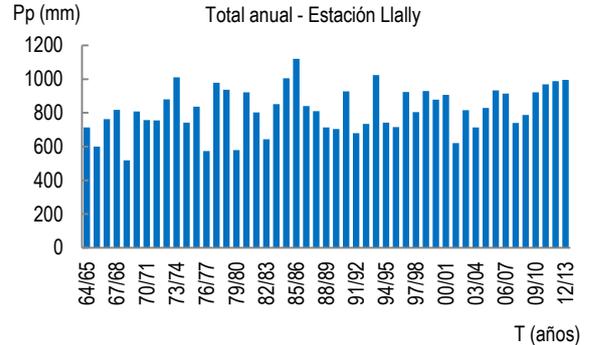
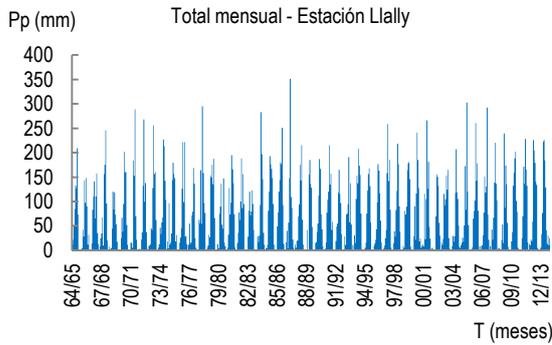
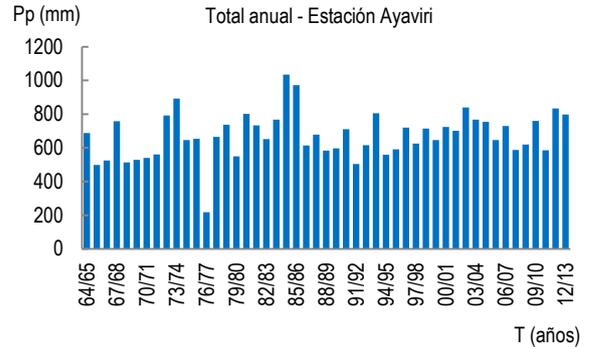
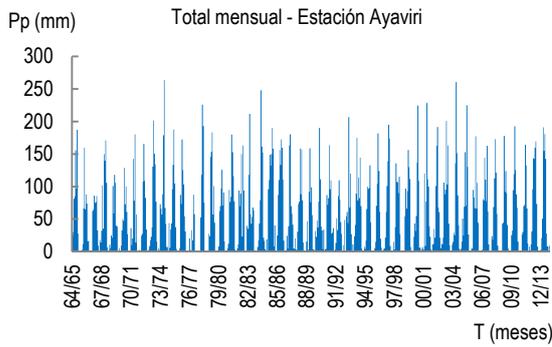
Total anual - Estación Capachica

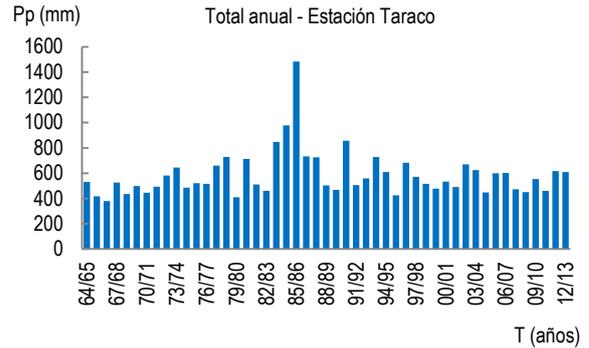
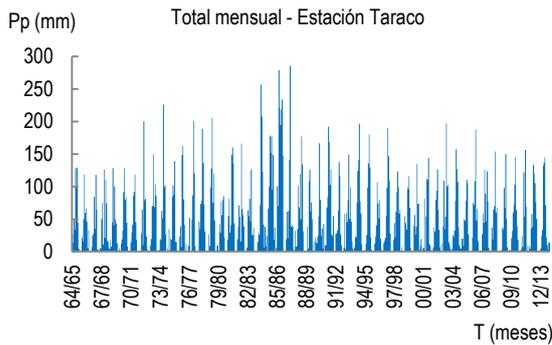
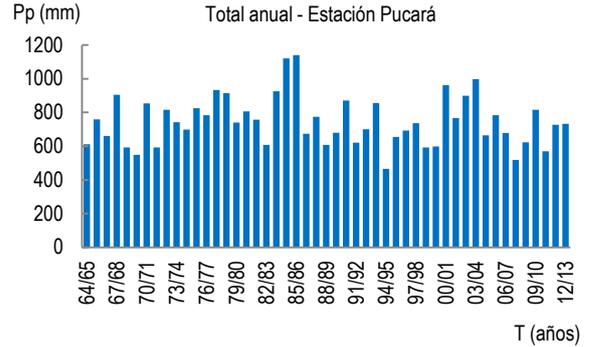
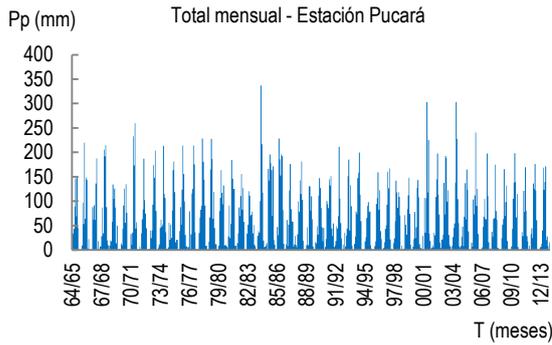
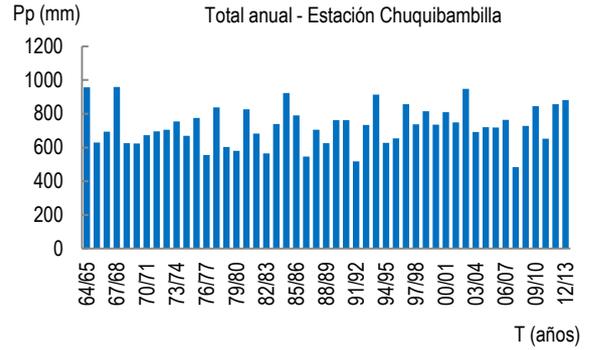
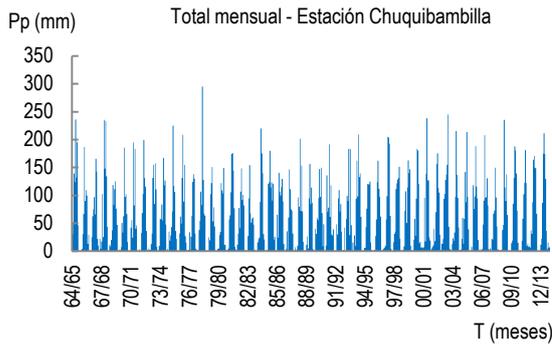




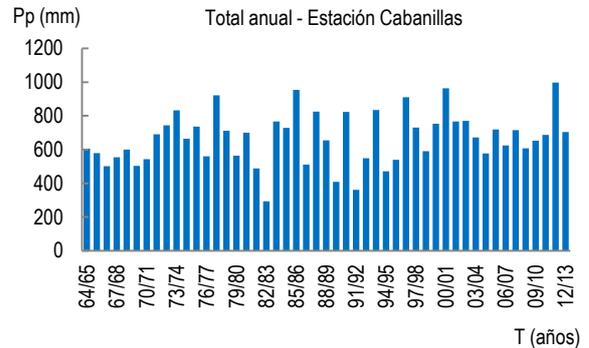
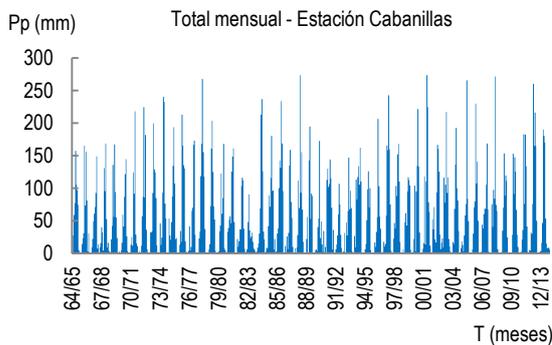


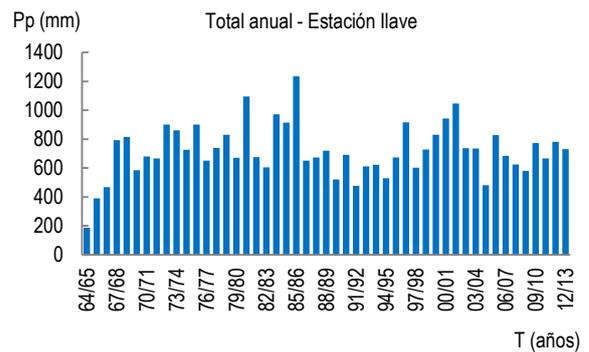
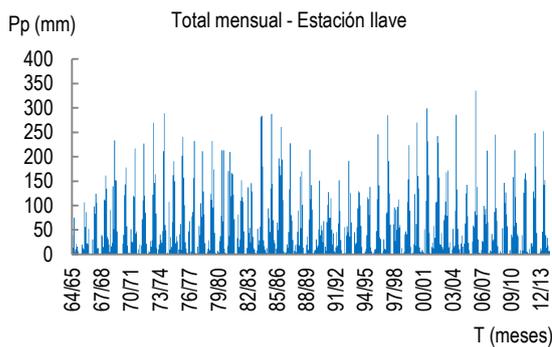
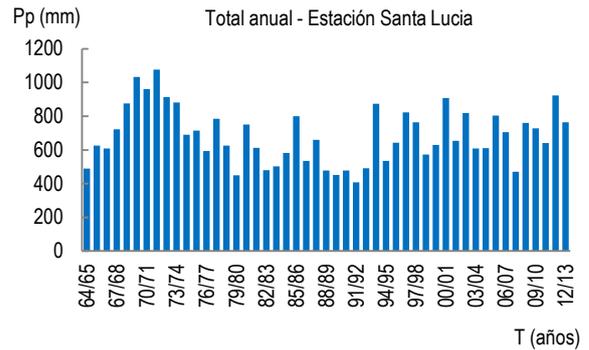
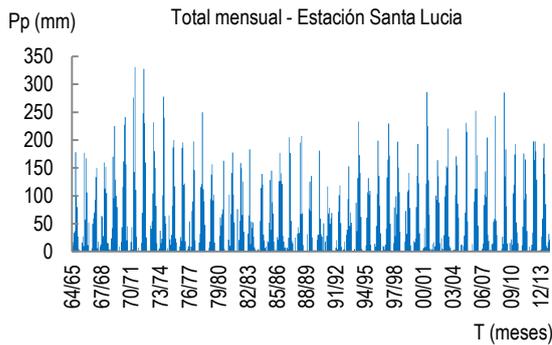
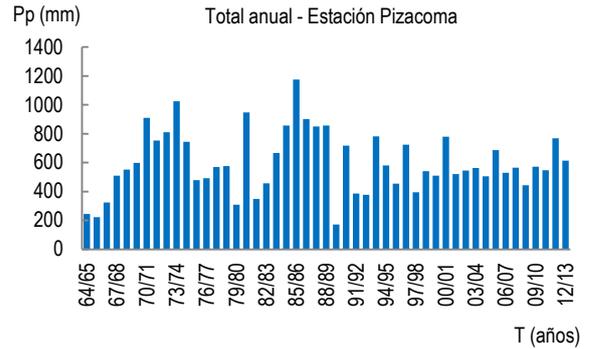
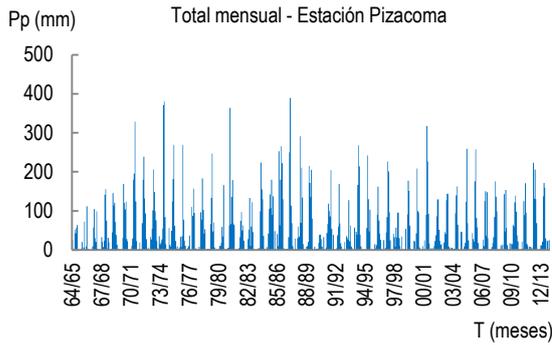
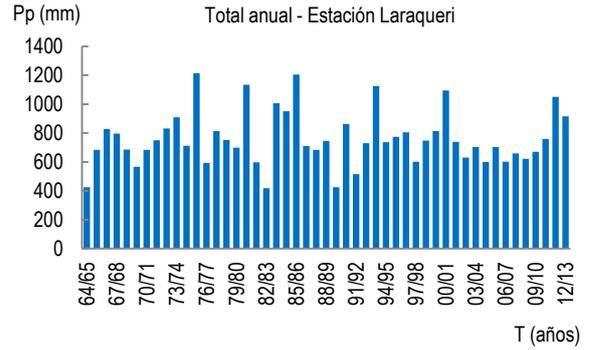
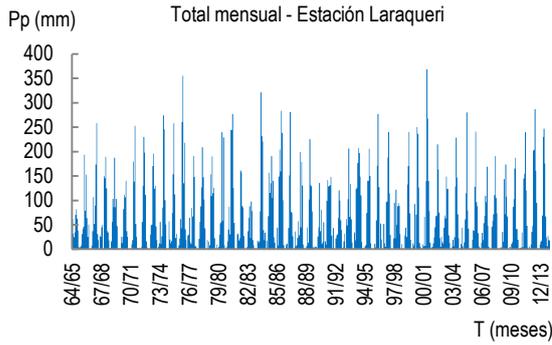
**Gráfico Nº 8.11.-** Hidrograma de precipitación total mensual y anual completado – Grupo 2

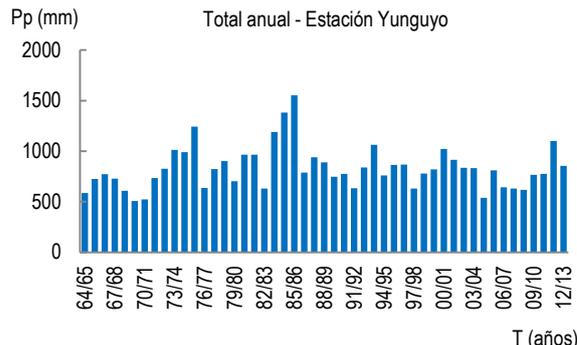
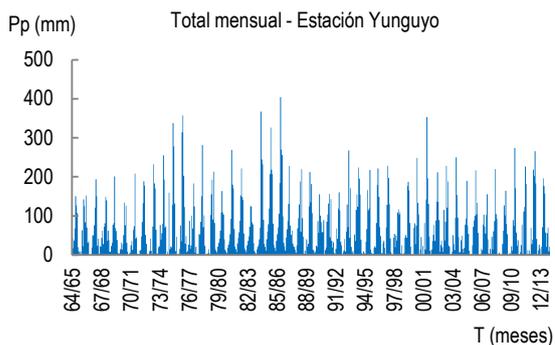
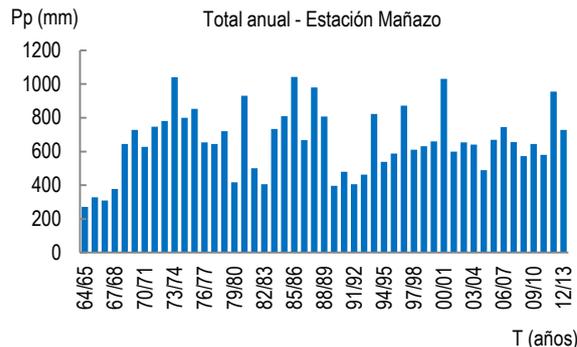
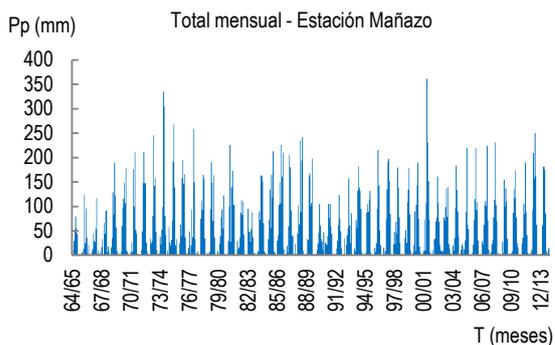




**Gráfico N° 8.12.- Hidrograma de precipitación total mensual y anual completado – Grupo 3**







## 8.5. Análisis de consistencia

El análisis de consistencia es una técnica que permite detectar, identificar, cuantificar, corregir y eliminar los errores sistemáticos de la no homogeneidad e inconsistencia de una serie hidrometeorológica. Antes de proceder a efectuar modelos de cualquier serie hidrometeorológica es necesario efectuar el análisis de consistencia respectivo a fin de obtener una serie homogénea, consistente y confiable; porque la inconsistencia de datos puede producir un sobre y subdiseño de estructuras hidráulicas. El análisis de consistencia se realiza con tres fases, tales como son:

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

### 8.5.1. Análisis visual de hidrogramas

El análisis visual de hidrogramas es la primera fase que ayuda a identificar saltos o cambios lo cual consiste en observar las gráficas de forma mensual y anual de los datos. Los anteriores Gráficos 8.10 al 8.12, muestran la evolución de la precipitación mensual desde septiembre del 1965 a agosto del 2013.

## 8.5.2. Análisis de doble masa

El análisis de doble masa se realizó utilizando el Software hidrológico Hydrognomon 4, el cual está disponible en la página web (<http://hydrognomon.org/download.html>) de forma gratuita y en una versión amigable. Hydrognomon tiene incluido este análisis en el cual selecciona en forma automática la separación de periodos posibles a evaluar, también tiene la opción de corregir las series, utilizando la ecuación respectiva de la pendiente de ambos periodos, para nuestro caso solo se utilizó para la separación de periodos y que posteriormente serán comparados las medias de ambos periodos a través de la prueba de t S'tudents.

**Cuadro 8.4.- Precipitación total anual y promedio regional (mm) –Grupo 1**

Año	Arapa	Capachica	Capazo	Desaguadero	Juli	Juliaca	Mazocruz	Pampahuta	Puno	R. de la Cruz	Promedio
64/65	542.0	1096.0	352.2	395.2	644.4	523.1	372.6	596.5	523.9	688.0	573.4
65/66	614.2	535.2	298.2	695.3	595.4	344.0	385.6	607.3	449.3	608.0	513.3
66/67	530.2	657.5	475.4	452.1	780.0	573.0	464.9	688.2	610.0	675.0	590.6
67/68	692.6	787.9	467.2	798.4	858.8	536.0	544.8	775.3	674.1	847.0	698.2
68/69	499.7	586.1	503.0	587.9	642.5	483.9	573.0	635.8	553.5	643.0	570.8
69/70	671.5	519.4	482.8	455.5	724.7	597.0	468.5	772.8	562.1	605.0	585.9
70/71	612.9	657.1	549.9	657.4	939.0	578.5	579.6	833.6	575.0	876.0	685.9
71/72	617.2	615.7	510.0	694.4	981.2	649.4	707.4	780.7	767.3	822.0	714.5
72/73	927.1	796.4	501.9	970.1	982.9	664.4	704.6	1000.3	896.4	846.0	829.0
73/74	750.1	782.0	661.7	789.8	1231.1	509.3	792.3	950.9	775.9	762.0	800.5
74/75	668.9	778.0	585.9	645.1	813.1	587.5	492.3	839.7	706.3	730.0	684.7
75/76	402.7	872.8	681.3	723.3	1228.4	564.1	528.6	804.7	935.0	767.0	750.8
76/77	551.4	679.2	520.5	643.8	739.4	509.2	391.6	586.2	666.8	642.0	593.0
77/78	817.9	695.4	744.5	811.4	801.7	745.2	593.5	803.7	748.9	732.0	749.4
78/79	807.1	869.5	671.6	831.8	901.9	618.0	433.8	762.0	698.8	600.0	719.5
79/80	947.3	709.0	716.1	657.7	887.5	534.4	470.4	743.8	584.4	909.0	716.0
80/81	948.6	964.0	728.3	820.5	1053.4	788.9	501.3	875.8	763.5	961.0	840.5
81/82	771.6	865.0	673.8	757.6	872.0	778.0	490.7	693.9	724.7	715.0	734.2
82/83	610.3	555.0	222.2	480.8	665.0	491.8	285.2	539.5	521.5	513.0	488.4
83/84	878.5	1159.0	666.3	1255.3	1305.0	906.3	852.3	899.5	931.5	791.0	964.5
84/85	1239.3	685.0	790.7	962.6	1027.5	761.0	659.3	1052.6	958.5	1243.9	938.0
85/86	1172.5	1427.5	1041.9	1376.0	1146.0	910.3	946.5	1137.4	1067.4	1233.3	1145.9
86/87	768.3	611.8	541.6	825.4	729.1	551.0	397.1	627.2	618.8	551.5	622.2
87/88	812.2	615.6	508.5	859.7	1036.3	715.9	327.2	747.6	811.2	671.1	710.5
88/89	584.8	1153.8	528.5	550.0	791.7	558.2	736.6	643.2	824.9	780.2	715.2
89/90	468.2	763.8	313.4	651.1	548.1	334.5	212.8	518.3	467.2	447.6	472.5
90/91	755.2	905.7	745.6	685.8	845.4	559.2	344.3	875.1	739.9	860.3	731.7
91/92	484.4	718.7	370.5	571.8	575.0	390.6	271.8	507.1	384.8	521.3	479.6
92/93	643.2	958.7	704.2	615.0	726.7	758.0	418.4	691.5	600.3	531.0	664.7
93/94	831.7	1263.4	861.5	724.5	800.5	721.1	524.6	1030.7	900.7	636.4	829.5
94/95	548.2	646.6	384.5	624.2	649.0	396.7	336.6	734.0	539.5	703.8	556.3
95/96	550.6	691.0	371.5	700.8	791.3	509.3	422.6	870.3	703.7	792.1	640.3
96/97	743.9	896.2	575.8	866.1	998.3	714.2	674.0	940.6	880.3	805.6	809.5
97/98	615.0	646.8	387.0	606.2	685.0	577.8	475.8	720.5	727.9	638.2	608.0
98/99	547.3	826.0	549.0	938.0	1048.8	728.5	666.6	826.4	870.4	931.0	793.2
99/00	621.1	751.4	512.1	563.6	1010.4	701.4	500.2	956.5	814.1	946.8	737.8
00/01	856.7	900.0	785.8	1047.2	1111.1	779.5	732.3	1060.6	977.4	1126.6	937.7
01/02	811.7	882.8	555.2	922.1	1030.8	640.7	535.5	790.1	898.0	930.8	799.8
02/03	766.3	1047.0	454.4	630.3	946.0	733.6	494.3	1001.1	733.2	776.0	758.2
03/04	736.3	822.0	457.9	717.8	841.0	704.4	534.1	764.1	752.6	750.0	708.0
04/05	532.9	632.3	380.7	534.3	627.4	632.6	433.5	713.2	582.1	661.0	573.0
05/06	529.6	797.9	589.4	908.1	1079.5	633.2	739.1	859.5	793.7	796.0	772.6
06/07	638.0	528.4	452.2	616.1	852.5	685.1	531.9	940.1	771.6	711.9	672.8
07/08	510.0	665.8	399.4	468.1	794.3	556.8	463.7	574.2	664.7	808.8	590.6
08/09	708.3	638.3	384.5	654.3	871.8	660.4	444.8	639.2	777.5	713.5	649.3
09/10	631.8	636.9	393.6	616.1	979.9	529.3	421.3	908.3	608.1	854.0	657.9
10/11	521.7	689.2	520.7	729.7	978.0	480.8	477.4	787.6	698.0	828.6	671.2
11/12	815.3	905.5	568.8	804.2	1310.3	746.2	744.3	978.4	973.5	1084.8	893.1
12/13	689.6	827.5	505.2	746.1	890.4	572.4	599.3	723.6	729.4	832.4	711.6

**Cuadro 8.5.- Precipitación total anual y promedio regional (mm) – Grupo 2**

Año	Ayaviri	Chuquibambilla	Llally	Pucara	Taraco	Promedio
64/65	687.5	957.1	713.0	610.5	530.0	699.6
65/66	499.3	630.0	599.2	759.9	416.6	581.0
66/67	525.8	693.8	763.1	660.4	379.6	604.5
67/68	758.6	958.9	817.7	905.9	527.1	793.6
68/69	513.9	624.8	518.7	592.9	433.9	536.8
69/70	528.7	623.4	808.5	548.7	499.1	601.7
70/71	540.8	673.8	757.4	853.1	445.2	654.1
71/72	562.0	696.7	755.8	591.6	493.0	619.8
72/73	792.6	705.2	881.0	816.6	581.8	755.4
73/74	893.0	754.6	1011.7	742.5	643.8	809.1
74/75	645.6	668.9	741.3	699.2	485.1	648.0
75/76	653.5	774.9	836.0	824.7	521.4	722.1
76/77	218.3	556.2	574.0	783.8	516.5	529.8
77/78	665.9	837.0	978.6	934.0	660.5	815.2
78/79	737.9	602.1	937.2	914.4	728.8	784.1
79/80	549.0	579.4	579.0	740.0	409.8	571.4
80/81	802.0	826.2	922.7	806.5	712.3	813.9
81/82	733.3	682.0	803.0	756.7	511.4	697.3
82/83	651.5	564.2	644.0	607.4	461.1	585.6
83/84	768.5	738.6	851.0	926.7	846.2	826.2
84/85	1033.8	923.6	1005.0	1121.3	978.1	1012.4
85/86	972.1	789.9	1121.0	1139.4	1483.4	1101.2
86/87	613.3	546.6	840.0	674.2	732.1	681.2
87/88	678.4	704.9	811.0	775.1	724.5	738.8
88/89	584.3	625.0	714.0	607.3	504.1	606.9
89/90	597.1	762.0	705.0	679.3	468.5	642.4
90/91	710.5	762.7	927.0	870.1	857.0	825.5
91/92	504.5	518.6	680.0	620.6	506.7	566.1
92/93	616.6	734.1	733.8	699.7	559.9	668.8
93/94	805.8	912.7	1025.0	855.8	728.1	865.5
94/95	558.7	628.1	742.9	465.4	608.9	600.8
95/96	591.1	653.7	715.4	654.8	423.8	607.8
96/97	721.0	857.7	923.3	693.1	682.8	775.6
97/98	624.6	737.8	803.7	736.1	571.3	694.7
98/99	715.1	815.9	929.1	592.7	517.1	714.0
99/00	647.1	735.7	879.0	598.3	477.3	667.5
00/01	723.7	810.0	905.9	962.1	534.6	787.3
01/02	701.2	748.6	621.3	767.7	489.6	665.7
02/03	840.4	948.2	816.5	898.8	669.1	834.6
03/04	768.4	692.4	713.5	997.7	625.0	759.4
04/05	753.9	720.1	828.7	663.8	447.8	682.9
05/06	645.8	718.0	934.2	783.7	598.2	736.0
06/07	730.3	764.0	914.8	677.7	600.7	737.5
07/08	587.4	483.0	740.3	518.8	473.0	560.5
08/09	619.4	728.3	787.3	623.0	450.4	641.7
09/10	759.1	845.6	922.5	816.5	554.0	779.5
10/11	585.1	652.7	969.3	568.9	460.0	647.2
11/12	834.1	856.8	988.0	726.1	617.2	804.4
12/13	797.7	881.6	996.3	732.3	609.8	803.5

En los Cuadros 8.4, 8.5 y 8.6, se muestran los datos utilizados como datos de ingreso al programa, tomando como estación base el promedio regional de todas las estaciones conformadas por el grupo, para luego evaluarlas con cada estación de su respectivo grupo y así obtener los periodos de análisis.

**Cuadro 8.6.- Precipitación total anual y promedio regional (mm) – Grupo 3**

Año	Cabanillas	Ilave	Lampa	Laraqueri	Mañazo	Pizacoma	Santa Lucia	Yunguyo	Promedio
64/65	604.8	188.2	532.8	424.8	271.1	244.0	490.0	587.9	418.0
65/66	579.7	389.9	433.5	683.5	328.8	222.7	625.2	725.7	498.6
66/67	500.7	468.3	544.9	827.0	310.2	323.5	608.0	774.2	544.6
67/68	554.5	793.0	740.5	796.9	377.7	509.4	722.5	728.3	652.9
68/69	599.5	814.5	625.8	686.6	644.9	552.9	875.1	608.5	676.0
69/70	503.4	584.3	614.8	566.5	728.5	597.5	1032.1	506.2	641.7
70/71	543.5	679.9	513.6	682.8	627.2	910.1	960.8	522.7	680.1
71/72	691.3	667.0	716.7	749.7	747.1	752.4	1076.7	735.0	767.0
72/73	744.7	900.1	786.7	832.5	780.1	809.5	913.8	825.9	824.2
73/74	832.4	860.9	736.8	908.4	1040.1	1025.8	880.7	1012.5	912.2
74/75	664.4	726.1	668.6	713.0	800.2	744.8	690.0	989.4	749.6
75/76	735.8	900.8	542.3	1213.2	853.0	479.5	714.2	1242.9	835.2
76/77	559.5	650.7	669.5	593.0	654.3	493.2	594.0	635.5	606.2
77/78	921.6	740.1	1208.6	813.0	644.2	570.2	785.5	824.1	813.4
78/79	711.6	830.8	869.8	751.2	719.5	576.6	625.9	903.4	748.6
79/80	563.3	671.0	618.1	699.8	416.8	307.8	448.6	703.9	553.7
80/81	700.0	1095.0	821.1	1134.6	930.4	948.0	750.9	964.8	918.1
81/82	488.3	676.0	875.9	597.0	501.0	349.0	612.0	965.4	633.1
82/83	292.6	604.0	655.6	418.0	406.0	456.0	479.9	630.7	492.8
83/84	766.3	972.8	1125.9	1006.9	733.0	666.0	503.2	1190.3	870.6
84/85	729.2	915.3	1615.9	951.9	809.0	856.0	581.5	1383.7	980.3
85/86	954.5	1234.7	938.5	1204.3	1043.0	1174.3	799.2	1551.2	1112.5
86/87	510.8	652.4	551.0	709.9	667.0	900.3	534.5	789.9	664.5
87/88	824.7	672.8	832.4	684.1	980.0	850.3	660.5	938.9	805.5
88/89	654.5	719.3	597.6	744.4	808.0	857.6	478.3	888.4	718.5
89/90	408.0	520.7	370.9	426.0	396.2	171.0	450.7	747.8	436.4
90/91	822.7	691.1	722.8	862.9	479.0	716.8	477.8	776.7	693.7
91/92	362.0	477.5	472.5	515.7	405.0	385.3	408.0	634.3	457.5
92/93	549.7	610.9	596.7	730.5	463.5	377.8	491.0	839.4	582.4
93/94	834.6	622.5	767.2	1126.0	823.4	782.5	874.0	1062.7	861.6
94/95	471.8	529.9	486.3	737.3	538.9	580.2	534.0	759.7	579.8
95/96	539.3	673.9	605.9	774.3	587.5	455.6	643.0	865.4	643.1
96/97	910.5	915.6	825.1	805.3	871.1	723.3	823.0	868.7	842.8
97/98	730.1	602.7	682.8	601.2	609.9	395.9	764.0	630.6	627.2
98/99	589.6	728.7	701.9	746.8	631.9	541.7	572.0	779.9	661.6
99/00	753.2	830.5	710.2	814.0	660.1	510.0	629.0	820.1	715.9
00/01	963.9	944.0	801.6	1094.8	1032.0	779.8	908.2	1023.3	943.5
01/02	767.1	1046.6	640.1	738.5	599.8	522.1	653.2	915.6	735.4
02/03	771.2	737.8	876.5	629.5	653.8	545.7	818.0	835.5	733.5
03/04	671.2	736.3	773.2	704.1	641.2	563.1	609.2	831.5	691.2
04/05	576.5	481.7	710.1	598.8	490.1	505.5	610.5	540.0	564.2
05/06	719.1	828.8	761.2	704.3	668.4	686.1	804.4	811.1	747.9
06/07	624.2	684.9	770.0	602.8	745.3	529.3	705.9	642.1	663.1
07/08	715.8	625.6	604.7	659.6	655.4	564.5	470.1	630.6	615.8
08/09	606.9	581.1	736.5	622.3	572.0	443.7	760.4	619.6	617.8
09/10	652.2	773.8	575.3	671.0	644.1	571.5	728.4	765.7	672.8
10/11	687.5	667.9	625.8	759.5	580.2	546.5	640.3	775.3	660.4
11/12	997.5	782.5	1119.1	1051.2	954.6	769.1	922.3	1101.6	962.2
12/13	705.0	731.8	711.8	916.0	727.6	613.8	763.9	856.2	753.3

Los Cuadros 8.7, 8.8 y 8.9, muestran los periodos de análisis para las diferentes estaciones conformadas por cada grupo, si se quiere hacer un análisis más detallado se puede realizar haciendo la separación con más de dos periodos según los quiebres existentes.

**Cuadro 8.7.- Periodo de análisis – Grupo 1**

Estación	Primer periodo		Segundo periodo	
Arapa	sep-64	ago-95	sep-95	ago-13
Capachica	sep-64	ago-06	sep-06	ago-13
Capazo	sep-64	ago-98	sep-98	ago-13
Desaguadero	sep-64	ago-01	sep-01	ago-13
Juli	sep-64	ago-77	sep-77	ago-13
Juliaca	sep-64	ago-83	sep-83	ago-13
Mazocruz	sep-64	ago-73	sep-73	ago-13
Pampahuta	sep-64	ago-93	ago-93	ago-13
Puno	sep-64	ago-92	ago-92	ago-13
R. de la Cruz	sep-64	ago-05	ago-05	ago-13

**Cuadro 8.8.- Periodo de análisis – Grupo 2**

Estacion	Primer periodo		Segundo periodo	
Ayaviri	sep-64	ago-97	sep-97	ago-13
Chuquibambilla	sep-64	ago-66	sep-66	ago-13
Llally	sep-64	ago-05	sep-05	ago-13
Pucara	sep-64	ago-85	sep-85	ago-13
Taraco	sep-64	ago-99	sep-99	ago-13

**Cuadro 8.9.- Periodo de análisis – Grupo 3**

Estación	Primer periodo		Segundo periodo	
Cabanillas	sep-64	ago-95	sep-95	ago-13
Ilave	sep-64	ago-09	sep-09	ago-13
Lampa	sep-64	ago-86	sep-86	ago-13
Laraqueri	sep-64	ago-00	sep-00	ago-13
Mañazo	sep-64	ago-83	sep-83	ago-13
Pizacoma	sep-64	ago-96	sep-96	ago-13
Santa Lucia	sep-64	ago-71	sep-71	ago-13
Yunguyo	sep-64	ago-02	sep-02	ago-13

### 8.5.3. Análisis estadístico de saltos y tendencias

Para el análisis estadístico de saltos se realizó con el test paramétrico de t Student, utilizado para ver si existen diferencias en la media de dos periodos y para el análisis de tendencias se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Para este análisis se utilizó el software TREND en el cual vienen incorporados los dos métodos.

#### a) Prueba paramétrica t` Student

Uno de los análisis estadísticos más comunes en la práctica es probablemente el utilizado para comparar dos grupos independientes de observaciones con respecto a una variable numérica. La aplicación de un contraste paramétrico requiere la normalidad de las observaciones para cada uno de los grupos. La comprobación de esta hipótesis puede realizarse tanto por métodos gráficos (por medio de histogramas, diagramas de cajas o gráficos de normalidad) como mediante pruebas estadísticas.

El t estadístico de prueba son valores críticos para varios niveles de significación y se puede obtener a partir de tablas estadísticas de t Student:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.5}]$$

Siendo:

- x, y = Medias de los períodos primero y segundo, respectivamente.  
 m, n = Número de observaciones en los períodos 1 y 2, respectivamente.  
 S = Desviación estándar (de la totalidad de m y n observaciones).

**Cuadro 8.10.-** Análisis estadístico de saltos de la precipitación anual y la significancia de t Student's

Región	Estación	Prueba estadística (t)	Valores críticos (tablas estadísticas)			Resultado
			a=0.1	a=0.05	a=0.01	
1	Arapa	1.119	1.68	2.011	2.682	NS
	Capachica	1.541	1.68	2.011	2.682	NS
	Capazo	1.25	1.68	2.011	2.682	NS
	Desaguadero	0.156	1.68	2.011	2.682	NS
	Juli	-1.092	1.68	2.011	2.682	NS
	Juliaca	-1.212	1.68	2.011	2.682	NS
	Mazocruz	-0.748	1.68	2.011	2.682	NS
	Pampahuta	-1.542	1.68	2.011	2.682	NS
	Puno	-0.958	1.68	2.011	2.682	NS
	R. de la Cruz	-0.52	1.68	2.011	2.682	NS
2	Ayaviri	-1.146	1.68	2.011	2.682	NS
	Chuquibambilla	-0.945	1.68	2.011	2.682	NS
	Llally	-1.387	1.68	2.011	2.682	NS
	Pucara	0.334	1.68	2.011	2.682	NS
	Taraco	1.055	1.68	2.011	2.682	NS
3	Cabanillas	-1.548	1.68	2.011	2.682	NS
	Ilave	0.427	1.68	2.011	2.682	NS
	Lampa	0.856	1.68	2.011	2.682	NS
	Laraqueri	0.071	1.68	2.011	2.682	NS
	Mañazo	-0.999	1.68	2.011	2.682	NS
	Pizacoma	0.635	1.68	2.011	2.682	NS
	Santa Lucia	0.007	1.68	2.011	2.682	NS
	Yunguyo	0.927	1.68	2.011	2.682	NS

NS: No Significativo, S(0.01): Significativo a un nivel de 0.01

Para esta prueba estadística se ha tomado la referencia del análisis de doble masa cuyos periodos de separación se muestran anteriormente en los cuadros respectivos.

El nivel de significancia es un medio para medir si la estadística de prueba es muy diferente, si la t calculada es mayor que la t tabla entonces existe una diferencia significativa de los

periodos en análisis de tal forma que esos datos deben de corregirse o verificarse con más detalle. En el Cuadro 8.10, todas las estaciones muestran resultados no significativos en la comparación de medias de los pedidos de análisis.

### b) Prueba no paramétrica de Mann-Kendall

La prueba no paramétrica de Mann-Kendall, originalmente creado por Mann (1945) y reformulada por Kendall (1948), consiste en comparar cada valor de la serie de tiempo con valores restantes, siempre en orden secuencial, contando el número de veces que los términos restantes sean más grandes que el valor analizado. El método describe que la tendencia de una serie temporal de datos, es adecuado para los casos en que puede ser la tendencia asumida como monótona y por lo tanto no presentar ninguna otra tendencia o ciclo estacional de los datos. Según Goossens y Berger (1986) el método de Mann-Kendall es el más adecuado para analizar el cambio climático en serie climatológica y también permite la detección y localización aproximada del punto de partida de una tendencia particular.

Teniendo en cuenta la prueba de tendencia monótona creciente o decreciente, que desea probar la hipótesis nula de ausencia de sesgo,  $H_0$  es decir son las notas al azar ordenados en el tiempo, frente a la hipótesis alternativa,  $H_1$  donde hay una tendencia monotónica ampliación o reducción. La prueba estadística de Mann-Kendall se determina de la siguiente manera.

Los valores de tiempo de serie  $n$  ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ) se sustituyen por las filas relativas ( $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ ) (a partir de 1 para el más bajo hasta  $n$ ).

El  $S$  estadístico de prueba es:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right] \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.6}]$$

Siendo:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x) &= 1, \text{ para } x > 0 \\ \text{sgn}(x) &= 0, \text{ para } x = 0 \\ \text{sgn}(x) &= -1, \text{ para } x < 0 \end{aligned}$$

Si la hipótesis nula  $H_0$  es verdadera, entonces  $S$  es una distribución aproximadamente normal con:

$$\begin{aligned} \mu &= 0 \\ \sigma &= n(n-1)(2n+5)/18 \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.6}] \end{aligned}$$

El z-estadística es por lo tanto (críticos de valores estadísticos de prueba para varios niveles de significación puede ser obtenido a partir de tablas de probabilidad normal):

$$z = |S| / \sigma^{0.5} \dots\dots\dots[\text{Ec. 8.7}]$$

Un valor positivo de S indica que hay una tendencia creciente y viceversa.

**Cuadro 8.11.-** Tendencia de las precipitaciones anuales y la significación estadística de Mann-kendall

Región	Estación	Prueba estadística (z)	Valores críticos (tablas estadísticas)			Resultado
			a=0.1	a=0.05	a=0.01	
1	Arapa	-0.067	1.645	1.96	2.576	NS
	Capachica	0.602	1.645	1.96	2.576	NS
	Capazo	-0.535	1.645	1.96	2.576	NS
	Desaguadero	0.468	1.645	1.96	2.576	NS
	Juli	1.087	1.645	1.96	2.576	NS
	Juliaca	1.205	1.645	1.96	2.576	NS
	Mazocruz	0.402	1.645	1.96	2.576	NS
	Pampahuta	1.104	1.645	1.96	2.576	NS
	Puno	1.355	1.645	1.96	2.576	NS
	R. de la Cruz	1.506	1.645	1.96	2.576	NS
2	Ayaviri	1.405	1.645	1.96	2.576	NS
	Chuquibambilla	0.485	1.645	1.96	2.576	NS
	Llally	1.991	1.645	1.96	2.576	S (0.05)
	Pucara	-0.945	1.645	1.96	2.576	NS
	Taraco	0.351	1.645	1.96	2.576	NS
3	Cabanillas	1.957	1.645	1.96	2.576	S (0.1)
	Ilave	0.151	1.645	1.96	2.576	NS
	Lampa	1.589	1.645	1.96	2.576	NS
	Laraqueri	0.309	1.645	1.96	2.576	NS
	Mañazo	0.97	1.645	1.96	2.576	NS
	Pizacoma	0.184	1.645	1.96	2.576	NS
	Santa Lucia	-0.569	1.645	1.96	2.576	NS
	Yunguyo	0.502	1.645	1.96	2.576	NS

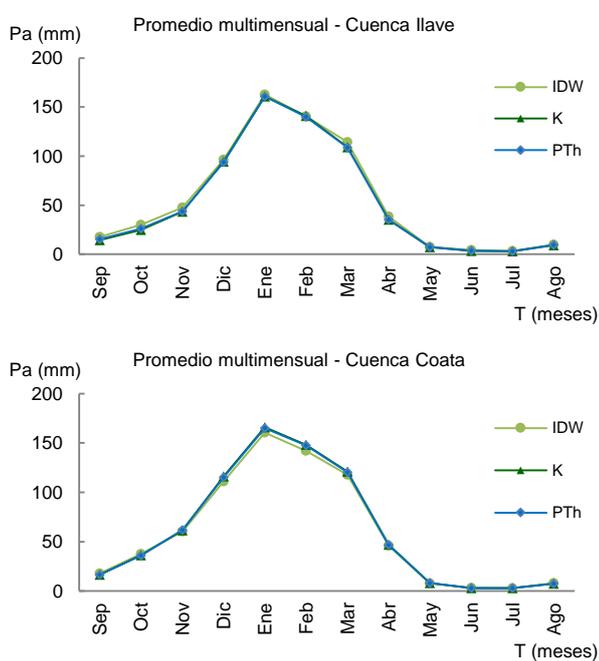
NS: No Significativo, S(0.1): Significativo a un nivel de 0.1, S(0.05): Significativo a un nivel de 0.05

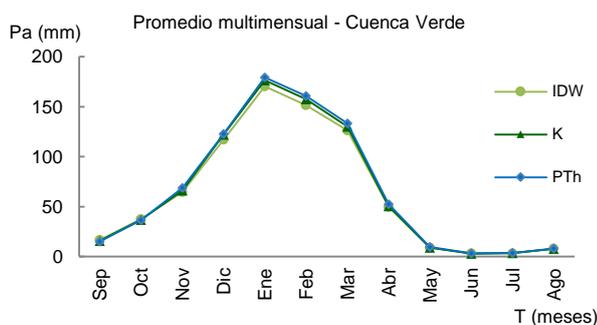
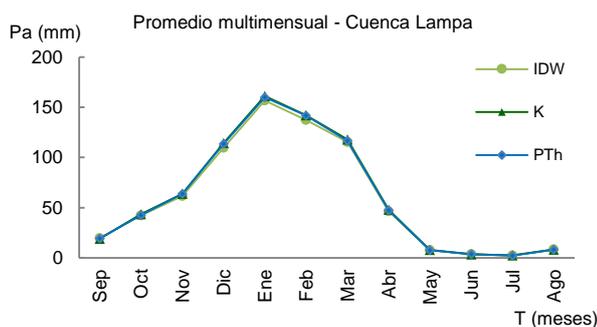
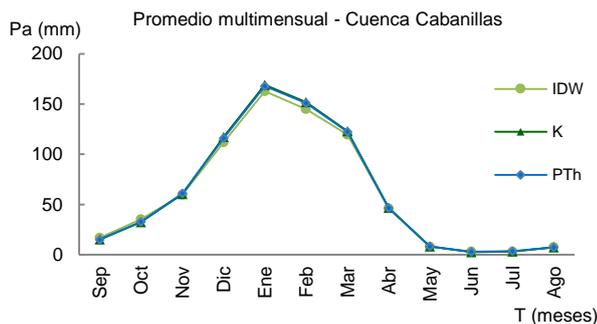
Los resultados mostrados en el Cuadro 8.11, nos da a conocer que el estadístico z para la tendencia es menor que el de las tablas para los niveles de significancia (a=0.1, a=0.05, a=0.01), no existiendo tendencia significativa en la mayoría de las estaciones, excepto las estaciones de Llally y cabanillas, con niveles de significancia de 5% y 10% respectivamente, las estaciones mencionadas tienen una tendencia positiva con un valor de S positivo.

## 8.6. Precipitación media de la cuenca

Utilizando la estaciones meteorológicas que están ubicadas dentro y alrededor de las cuencas llave y Coata se ha determinado la precipitación areal respectiva utilizando los métodos de Media Aritmetica (MA), Polígonos de Thiessen (Th), Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) y Kriging (K), para ello se utilizó el Software hidrológico Hydraccess, cuyos resultados serán utilizados en el modelamiento hidrológico lluvia escorrentía. El resumen de la precipitación media areal promedio multimensual, cuyo periodo de análisis corresponde a septiembre del 1964 a agosto del 2013, se muestran en el Grafico 8.13.

**Grafico 8.13.-** Variación temporal de la precipitación areal - Promedio multimensual





## IX. ANALISIS DE LA INFORMACION HIDROMETRICA

Se ha recurrido al análisis de caudales medios mensuales de 05 ríos ubicados dentro del ámbito de estudio, a continuación se detallan en forma breve.

### 9.1. Análisis exploratorio de datos (AED)

Para la realización del AED, se ha seguido el mismo procedimiento del AED de precipitación.

#### 9.1.1. Diagrama de cajas (box plot)

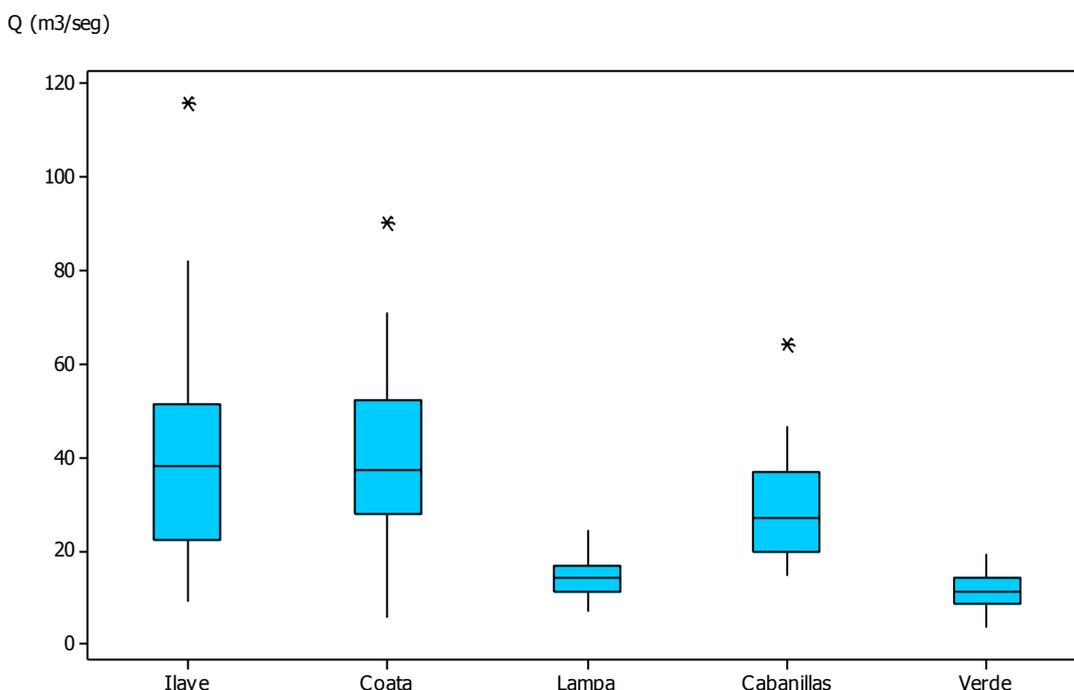
Seguido bajo el mismo procedimiento del análisis de precipitaciones.

##### 9.1.1.1. Valores atípicos

En el Gráfico 9.1, se muestran el diagrama de cajas de las descargas medias anuales del periodo septiembre de 1964 a agosto del 2013, donde existen valores atípicos en las estaciones de Ilave, Coata y Cabanillas. Estos valores atípicos serán analizados

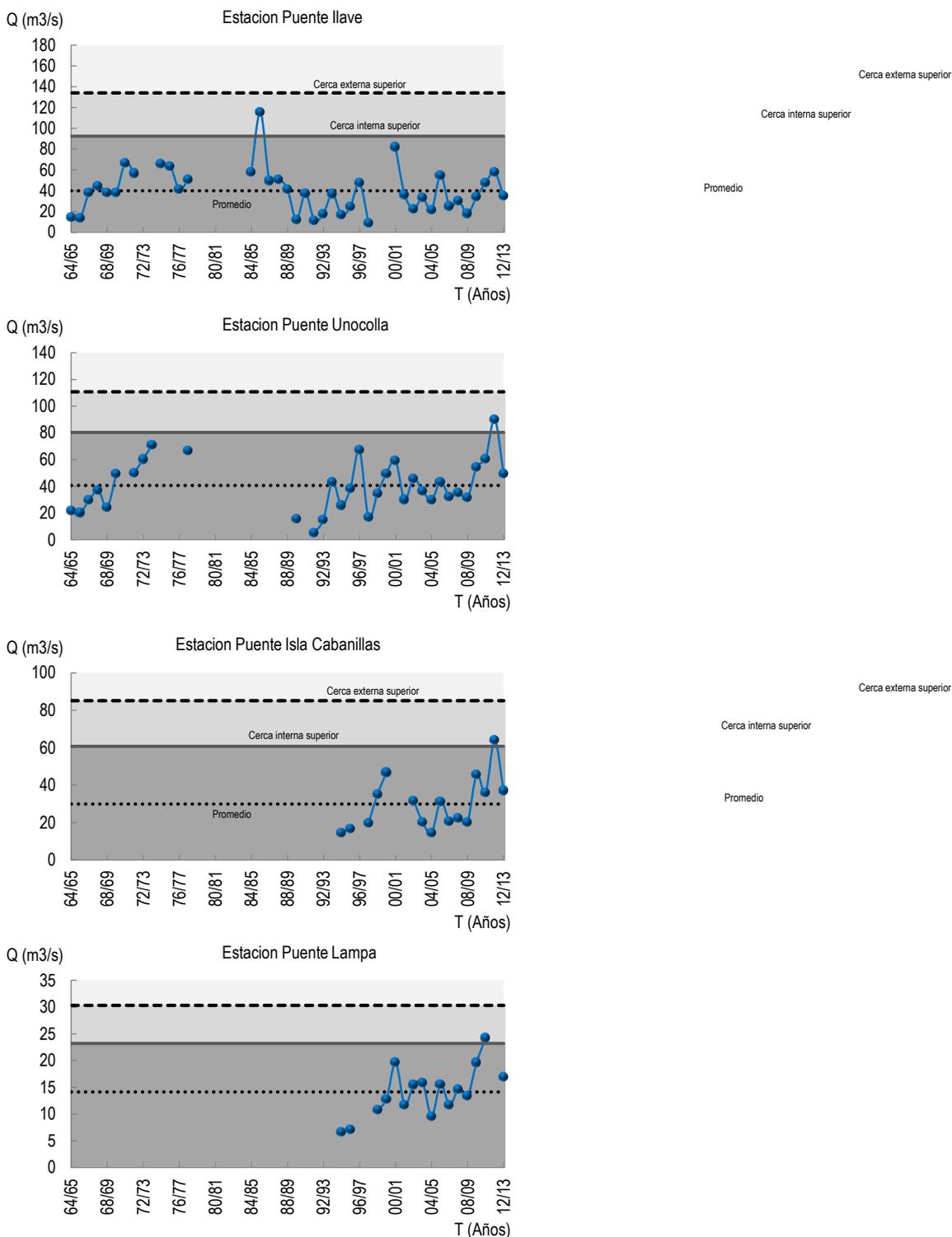
posteriormente en el análisis de saltos y así verificar si esos valores se presentaron o no en dicha estación

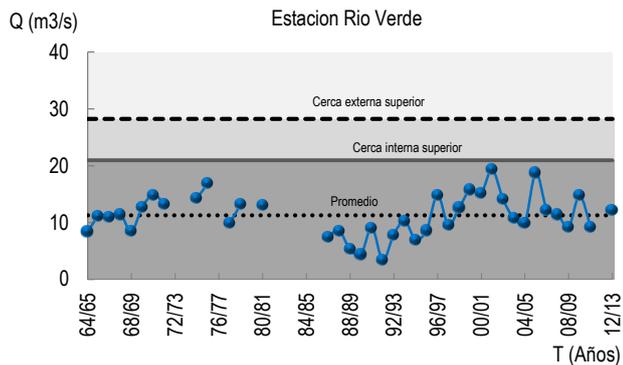
**Grafico 9.1.-** Diagrama de cajas de las descargas medias anuales



Otra metodología similar al diagrama de cajas para la identificación de valores atípicos en una serie de datos, es la que se muestra en el Grafico 9.2, seguido con los mismos pasos del análisis de datos pluviométricos, en el cual también se puede observar en forma clara que las estaciones Ilave, Coata y Cabanillas sobrepasan las cercas internas superiores lo cual son valores atípicos leves, mientras que la estación del río Verde muestra sus valores adyacentes a la media general y es la que está próxima a una distribución normal. En el caso del río Lampa según el diagrama de cajas el bigote da la parte superior es más largo que el de la parte inferior lo que significa que la mayor parte de sus datos se encuentran por encima de la media tal como se puede ver en el Grafico 9.2.

**Gráfico 9.2.-** Distribución de los valores anuales en relación a la media general de las descargas, mostrando las cercas internas y externas.

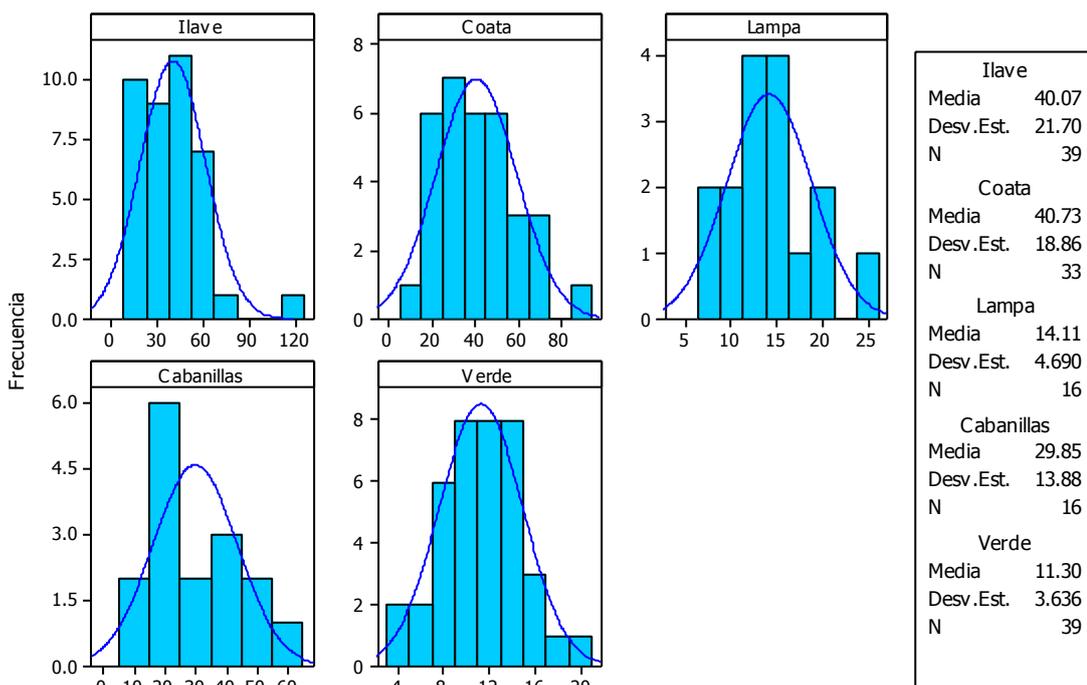




**9.1.2. Histogramas**

El Gráfico 9.3, señala las diferencias que existen entre las distribuciones de los datos de precipitación anual de las 05 estaciones, existiendo asimetría negativa en la estación de Cabanillas, mientras que otras muestran una distribución cercana a la distribución normal.

**Grafica 9.3.- Histograma de las descargas medias anuales**



## X. MODELIZACION HIDROLOGICA LLUVIA ESCORRENTIA

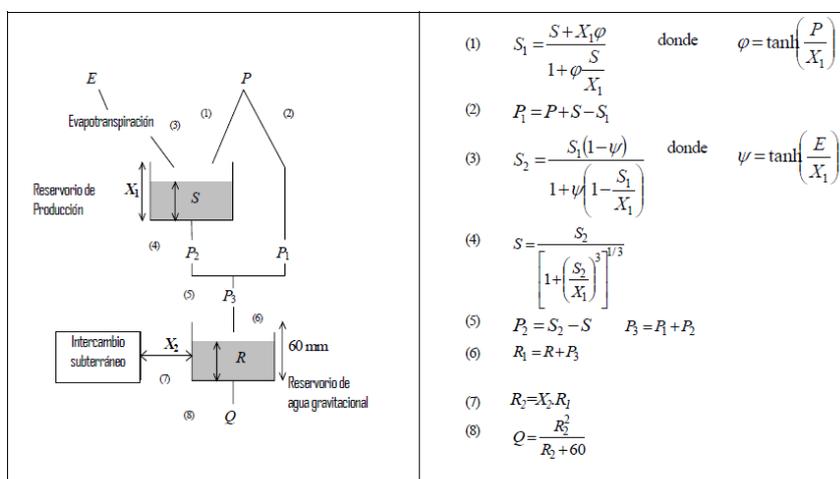
### 10.1. MODELO HIDROLOGICO GR2M

La unidad de investigación en hidrología del Cemagref d'Antony (Francia), ha desarrollado una serie de modelos precipitación – escorrentía llamados modelos “GR” por Génie Rural. En 1983, Michel propuso un modelo global, lo más simple posible, para reconstruir los caudales diarios a partir de la precipitación y la temperatura (para estimar la evaporación). Posteriormente el modelo GR a continuado evolucionando presentando diferentes versiones como el GR1A, GR2M, GR3J, GR4J. El número indica el número de parámetros a modelar y la última letra el paso de tiempo: J (diario), M (mensual), y A (anual). El modelo GR2M, es un modelo global que funciona a paso de tiempo mensual y que depende de dos parámetros. De manera general este tipo de modelos son basados en la transformación de la precipitación - escorrentía por la aplicación de dos funciones: Una función de producción y una función de transferencia

El modelo GR2M, es un modelo de dos reservorios donde:

- La función de producción del modelo se organiza alrededor de un reservorio llamado reservorio-suelo,
- La función de transferencia está gobernada por el segundo reservorio llamado reservorio de agua gravitacional donde el aporte es instantáneo al inicio del paso de tiempo, y luego el reservorio se vacía gradualmente. El nivel de este reservorio determina el caudal que puede liberar. A continuación se presenta la arquitectura del modelo.

**Figura 10.1.-** Arquitectura del modelo GR2M



\* Fuente: CEMAGREF ([www.cemagref.fr](http://www.cemagref.fr))

Los flujos entrantes de precipitación (P) y salientes evapotranspiración (E) del reservorio suelo (capacidad máxima  $X_1$ ) son calculados en base a estado de stock S. Una parte de la precipitación  $P_1$  corresponde a la diferencia entre P y la precipitación que ingresa en el suelo y otra parte  $P_2$  corresponde a la percolación.

La suma de ambas  $P_1 + P_2$  corresponden a la precipitación efectiva  $P_3$  que ingresa en el reservorio de agua gravitacional (capacidad máxima fijada en 60 mm). Un término de intercambio subterráneo es incluido dentro del modelo  $X_2$ .

Finalmente el reservorio de agua gravitacional se vacía siguiendo una función cuadrática, dándonos como resultado el caudal de salida. Por lo tanto los dos parámetros a optimizar son:

- ✓  $X_1$ : capacidad del reservorio suelo en milímetros
- ✓  $X_2$ : coeficiente de intercambios subterráneos (adimensional)

La evaluación de la calidad del modelo puede realizarse de manera cuantitativa o cualitativa: la evaluación cuantitativa consiste en determinar el mayor valor óptimo de una función objetivo o función criterio por técnicas de optimización. La función objetivo o criterio de evaluación resume los resultados de comparación entre los datos calculados y los datos observados en una sola cifra y la evaluación cualitativa se basa en la comparación grafica entre los valores calculados y los valores observados.

### 10.1.1. Evaluación de la bondad del modelo

El modelo GR2M utiliza como principal criterio para verificar la bondad de ajuste la eficiencia de Nash y el Bias. Entre otros criterios de evaluación se utilizaron el ECM,  $R^2$  y R.

#### A. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots [Ec. 10.1]$$

Siendo:

- E : Eficiencia de Nash
- $y_i$  : Valor observado
- $\hat{y}_i$  : Valor calculado

y mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta,  $E=1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E=0$ . Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla.

**Tabla 10.1.-** Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011

Este indicador puede ser utilizado para cualquier escala de tiempo. Cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele utilizar la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe”:

$$E_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(\hat{y}_i) - \log(y_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(y_i) - \overline{\log(y)})^2} \dots\dots\dots[\text{Ec. 10.2}]$$

## B. Error cuadrático medio normalizado (ECMN)

$$\text{ECMN} = \frac{n-1}{n} \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots[\text{Ec.10.3}]$$

Siendo:

- $n$  : Número de observaciones  
 $\bar{y}$  : Promedio de los datos observados

Este índice de desempeño corresponde al ECM pero normalizado por la varianza de los datos. Mientras más cercano a 0, mejor ajuste de los valores a los reales y por tanto mejor es el modelo evaluado y contrariamente mientras más se aleje a 0 menos representativo es del fenómeno observado

### C. Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

Este índice de desempeño, representa la fracción de variación de la variable dependiente explicada por el modelo.

$$R^2 = 1 - ECMN \quad \dots\dots\dots[Ec. 10.4]$$

En el caso de un predictor perfecto el coeficiente  $r^2$  debiera ser 1. Si se obtiene valores cercanos a la unidad se tiene un modelo adecuado.

### D. Coeficiente de correlación ( $r$ )

Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, en nuestro caso, son los caudales observados y los caudales simulados. Se formula como:

$$r = \sqrt{R^2} = \sqrt{1 - ECMN} \quad \dots\dots\dots[Ec. 10.5]$$

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre  $0 < r < 1$ : a mayor valor de  $r$ , mejor ajuste. El uso de esta medida de bondad de ajuste se recomienda cuando se espera una relación lineal entre las variables observadas y simuladas.

## 10.2. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO GR2M

### 10.2.1. Parámetros de entrada

Los principales parámetros de entrada son las precipitaciones, evapotranspiración media del área de influencia y los caudales medios mensuales de los ríos en mm.

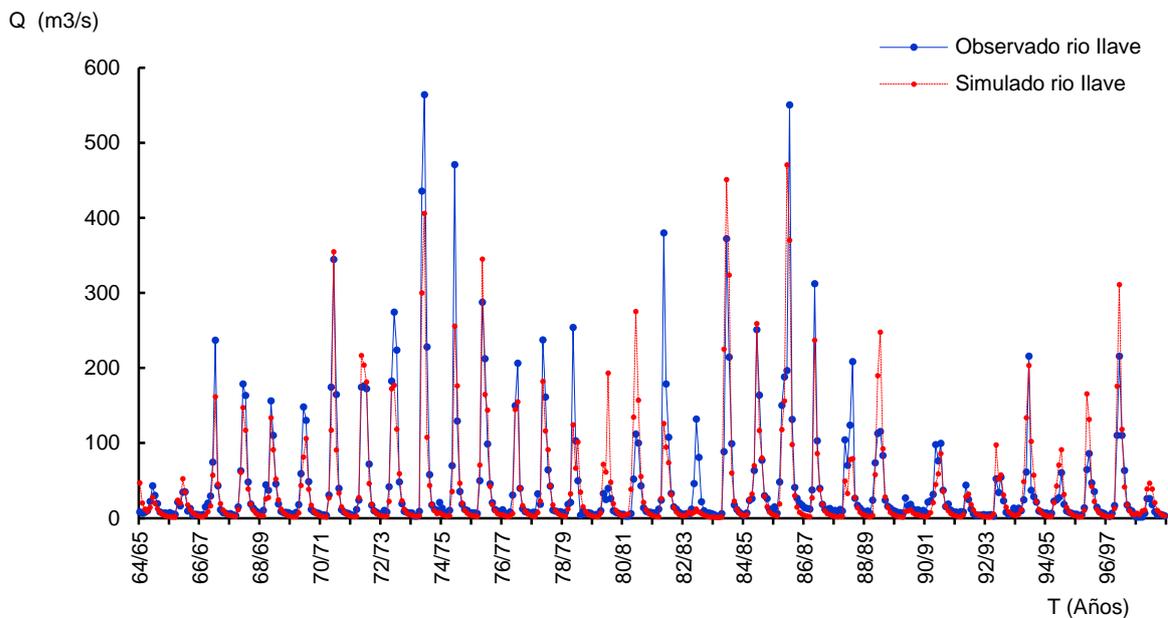
### 10.2.2. Fase de calibración

Para esta fase se ha utilizado el 70% del total de datos que vendría a ser de 34 años periodo (septiembre 1964 a agosto 1998), además para reproducir mejor los caudales, se debe de optimizar los parámetros X1 (reservorio suelo) y X2 (coeficiente de intercambios subterráneos), con el uso de la herramienta SOLVER de Excel. El Cuadro 10.1, muestra los parámetros de calibración obtenidos en la etapa de calibración del modelo, además en los Gráficos 10.1 al 10.10, se puede observar la comparación de hidrogramas y los diagramas de dispersión entre caudales observados y simulados de los ríos Ilave, Coata, Cabanillas, Lampa y Verde, cabe recalcar que para el río Lampa la etapa de calibración se realizó con 11 años (132 meses).

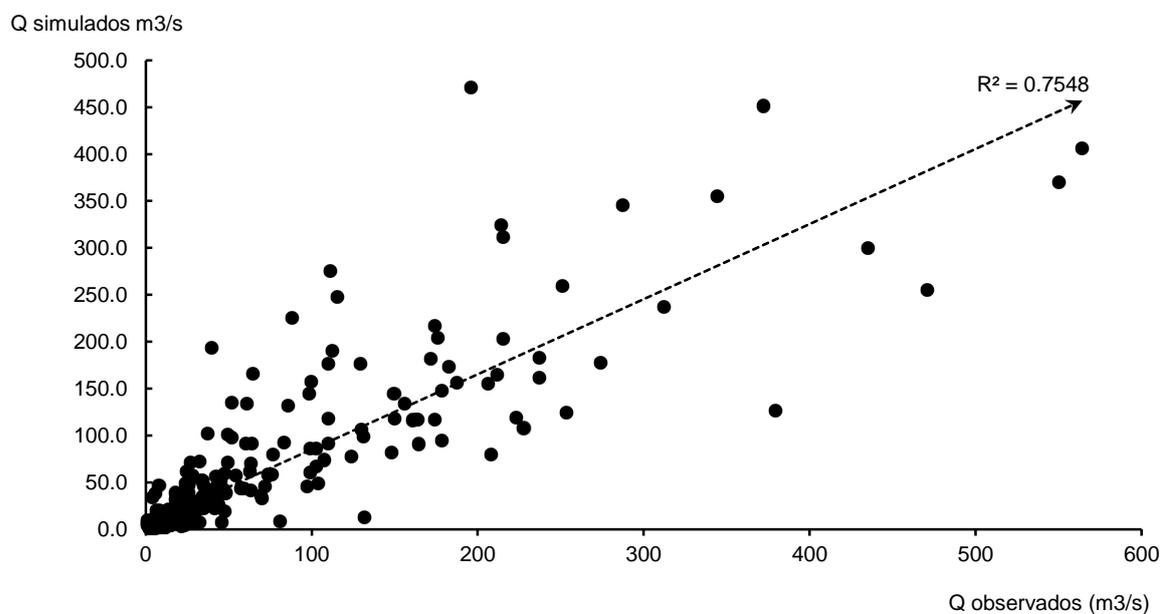
**Cuadro 10.1.-** Parámetros de calibración del modelo

Parametro	Rio Ilave	Rio Coata	Rio Cabanillas	Rio Lampa	Rio Verde
$X_1$	5.27	5.57	5.81	5.58	5.07
$X_2$	0.97	1.33	1.33	1.23	1.37

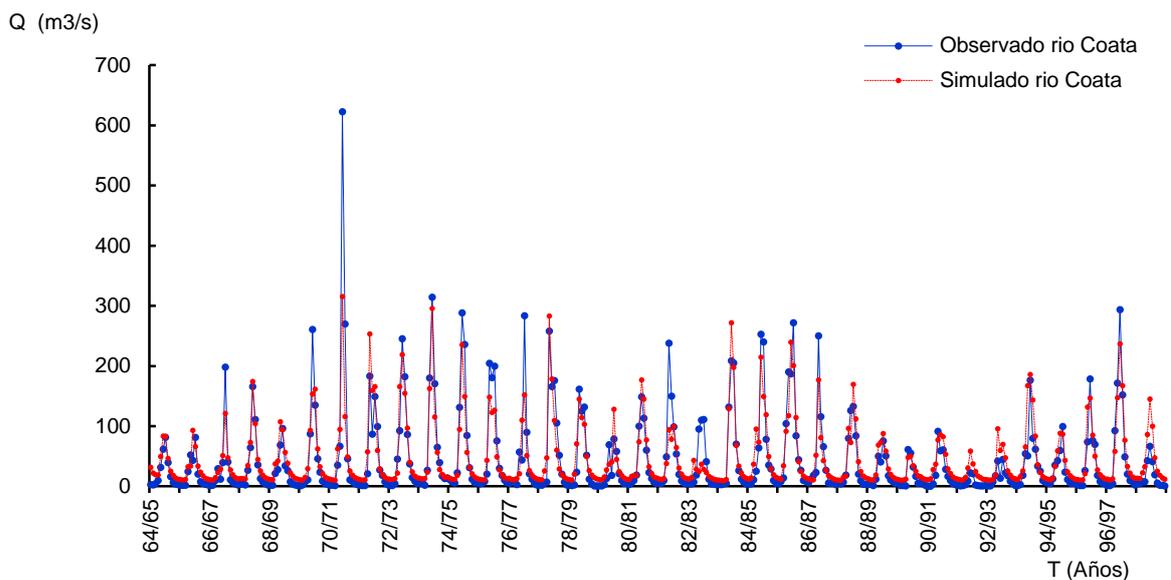
**Gráfico 10.1.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Ilave



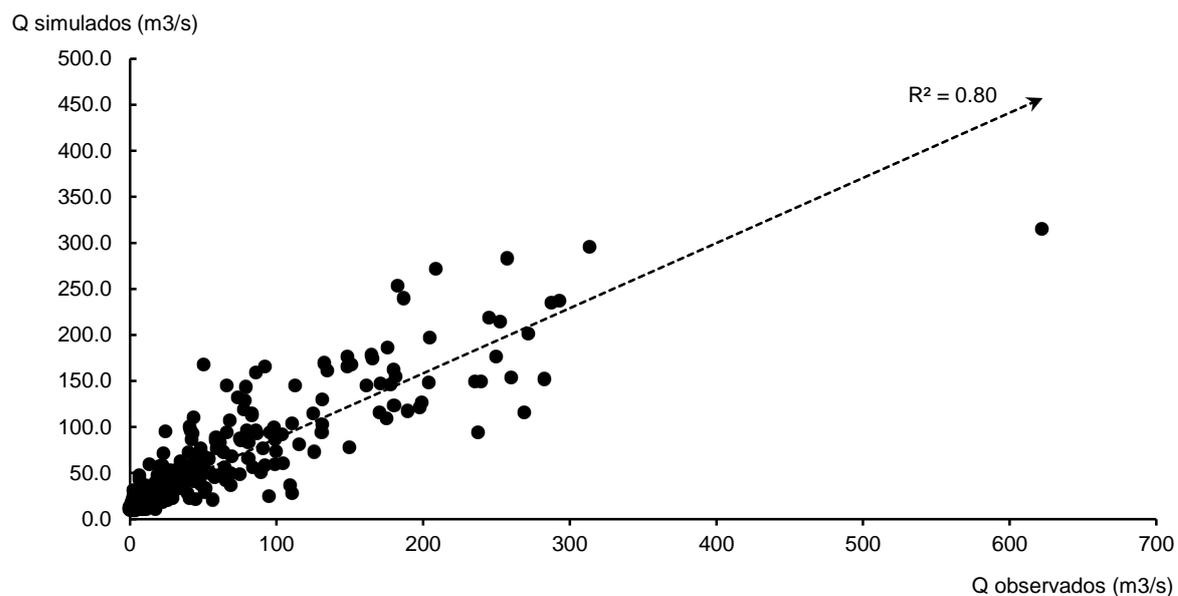
**Gráfico 10.2.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Ilave



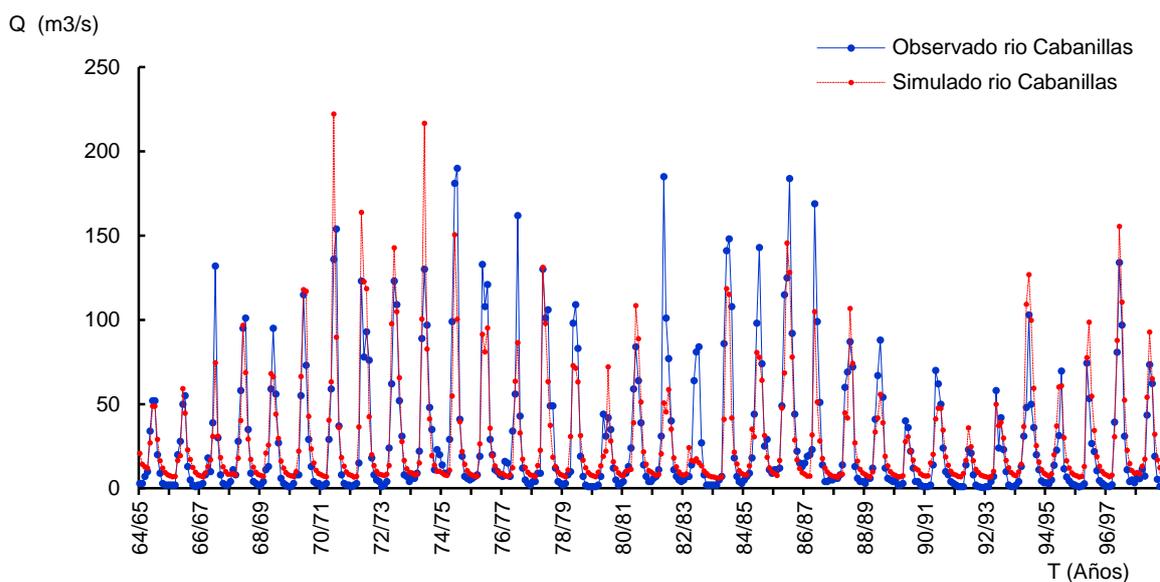
**Gráfico 10.3.- Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Coata**



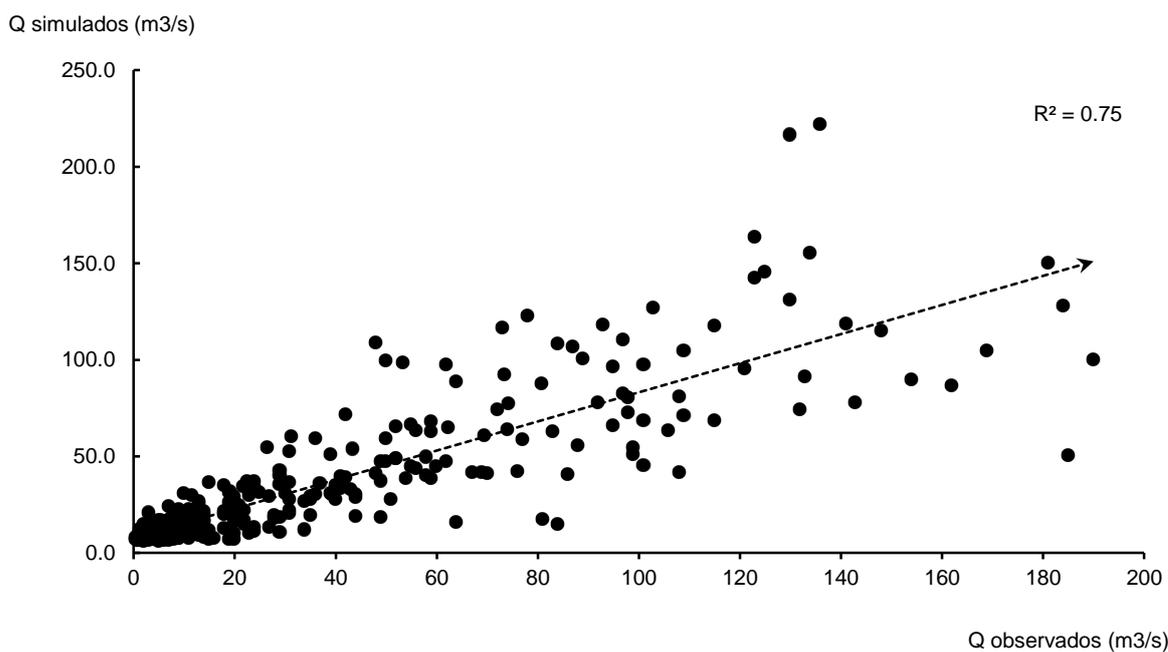
**Gráfico 10.4.- Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Coata**



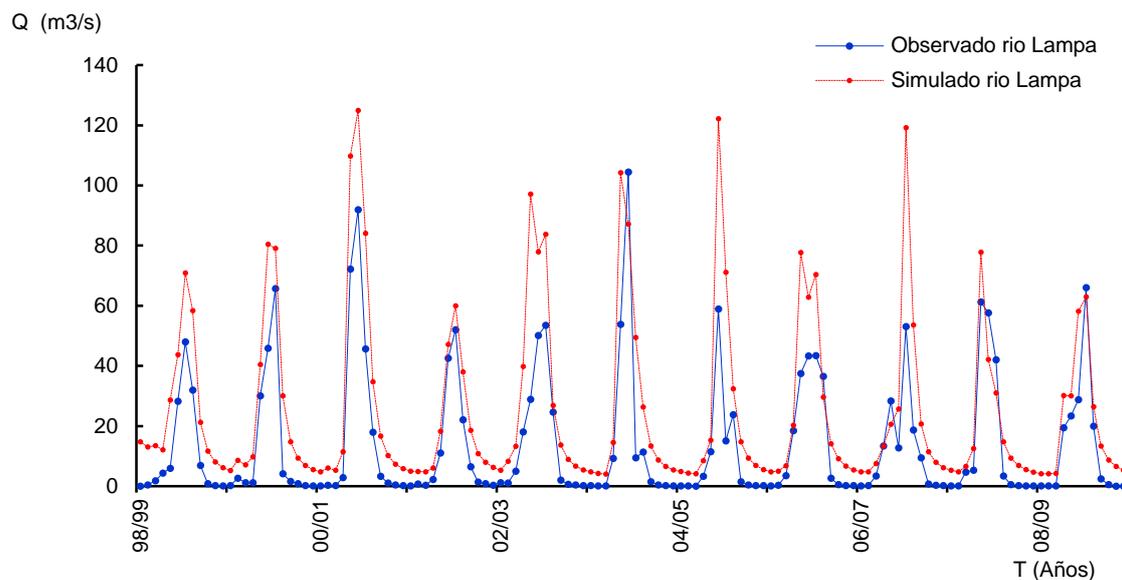
**Gráfico 10.5.- Hidrograma de caudales observados y simulados – Río Cabanillas**



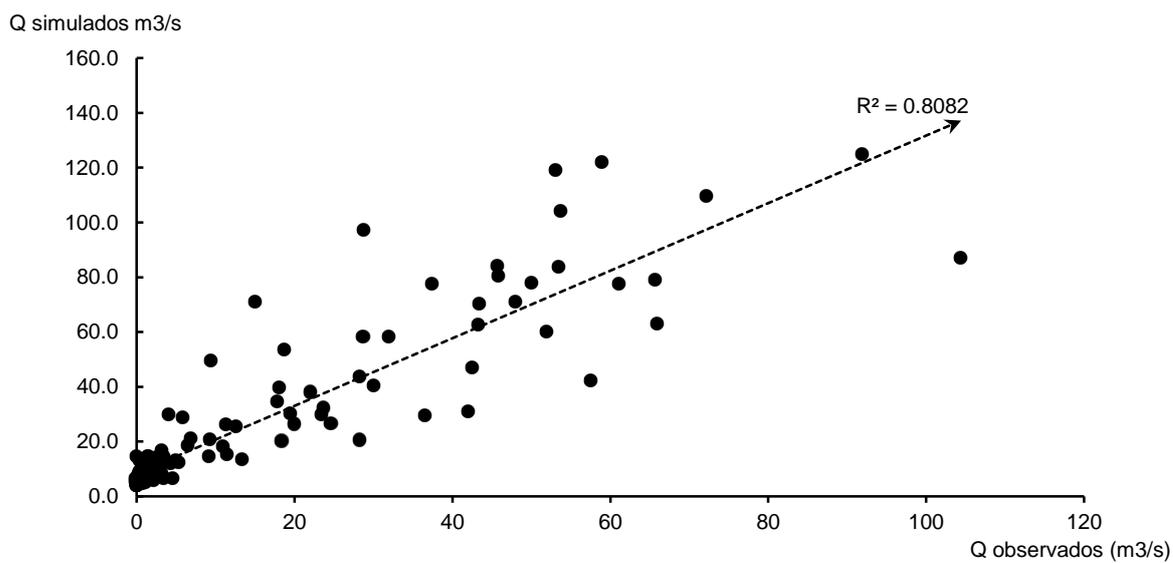
**Gráfico 10.6.- Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Río Cabanillas**



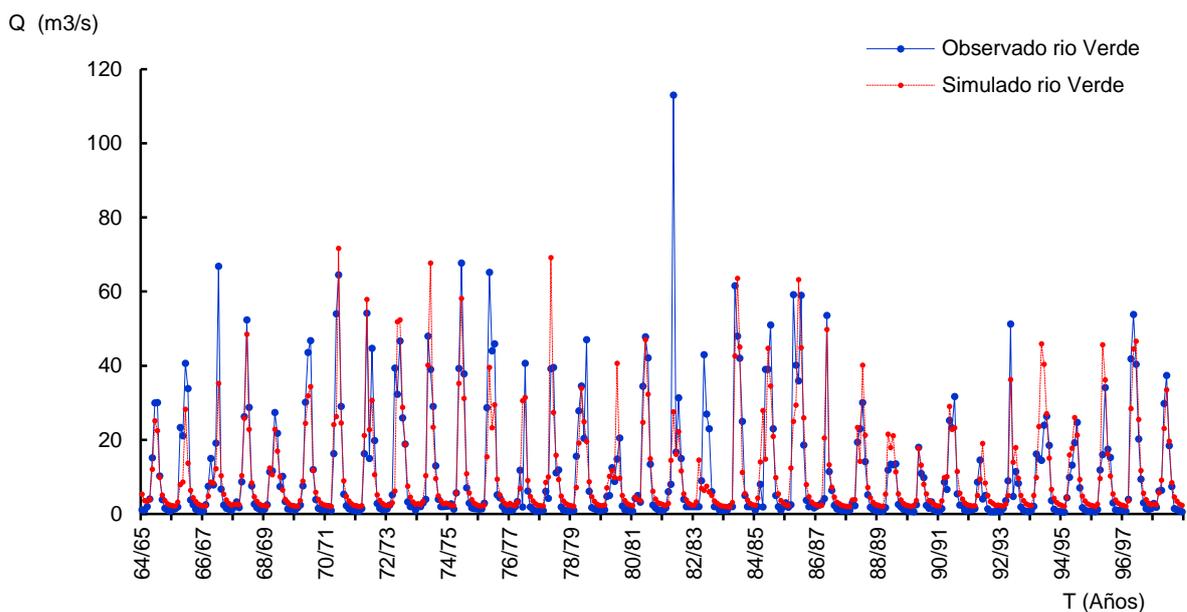
**Gráfico 10.7.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Lampa



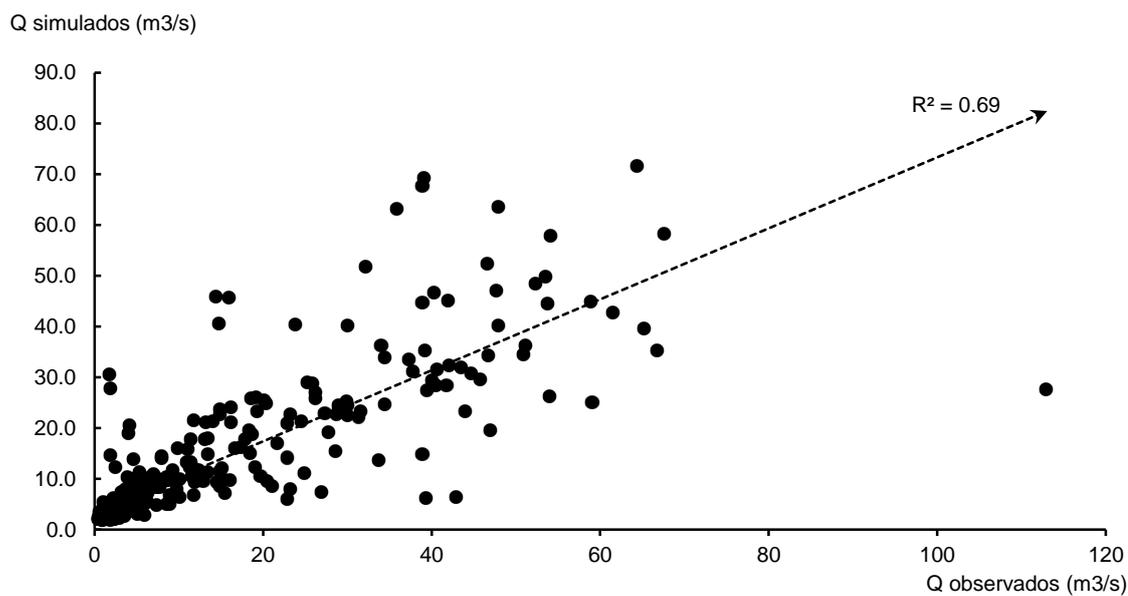
**Gráfico 10.8.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Lampa



**Gráfico 10.9.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Verde



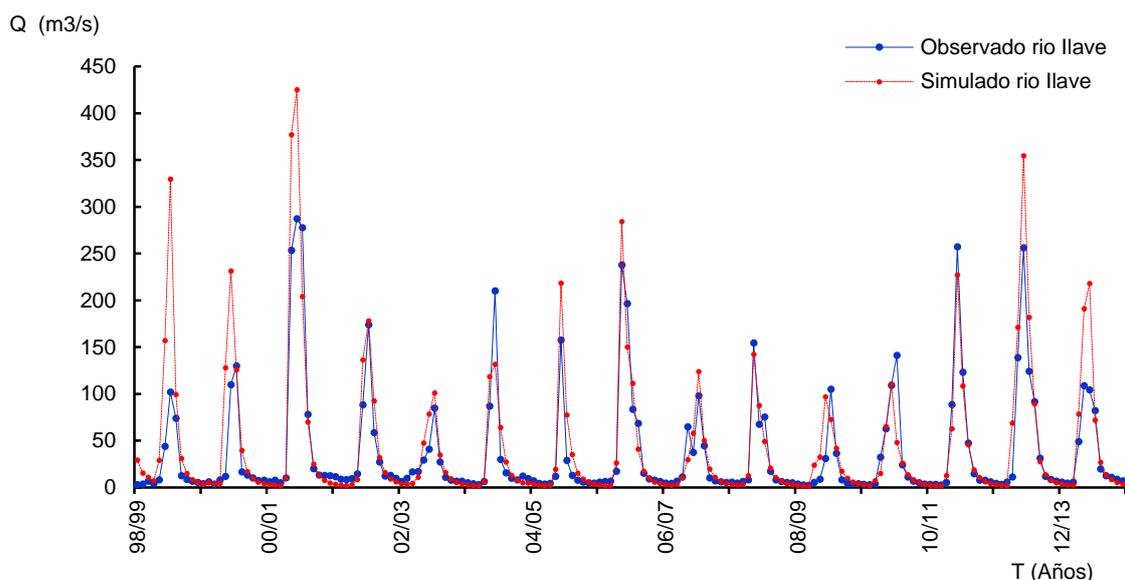
**Gráfico 10.10.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Verde



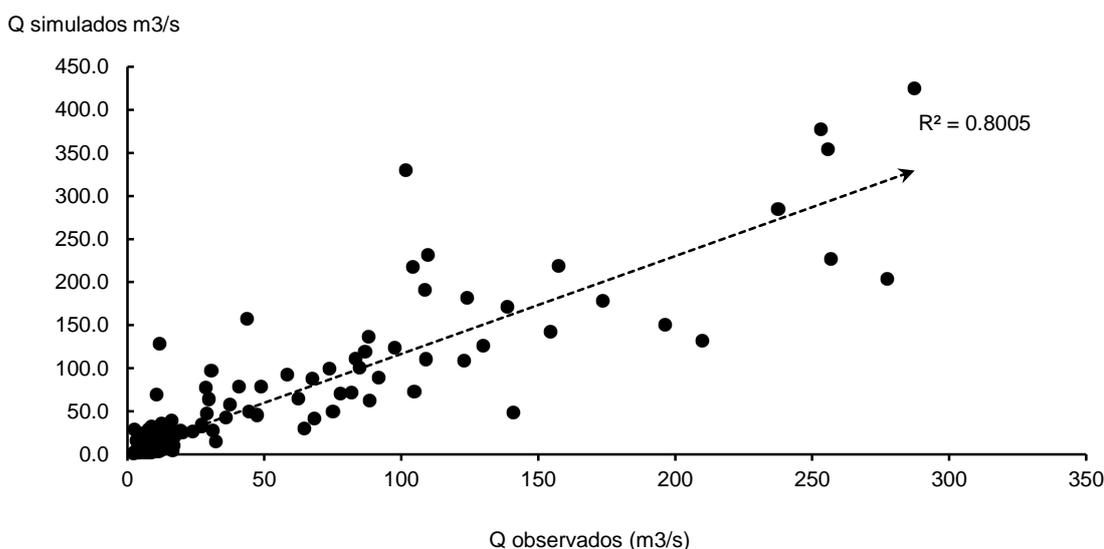
### 10.2.3. Fase de validación

Una vez terminado el proceso de calibración y los parámetros X1 y X2 han sido determinados, es importante validar el modelo, para ello se ha realizado una simulación de caudales desde septiembre de 1998 hasta agosto del 2013 y de septiembre del 2009 a agosto del 2013 para el río Lampa, los resultados se muestran a continuación en graficas de hidrogramas y diagramas de dispersión.

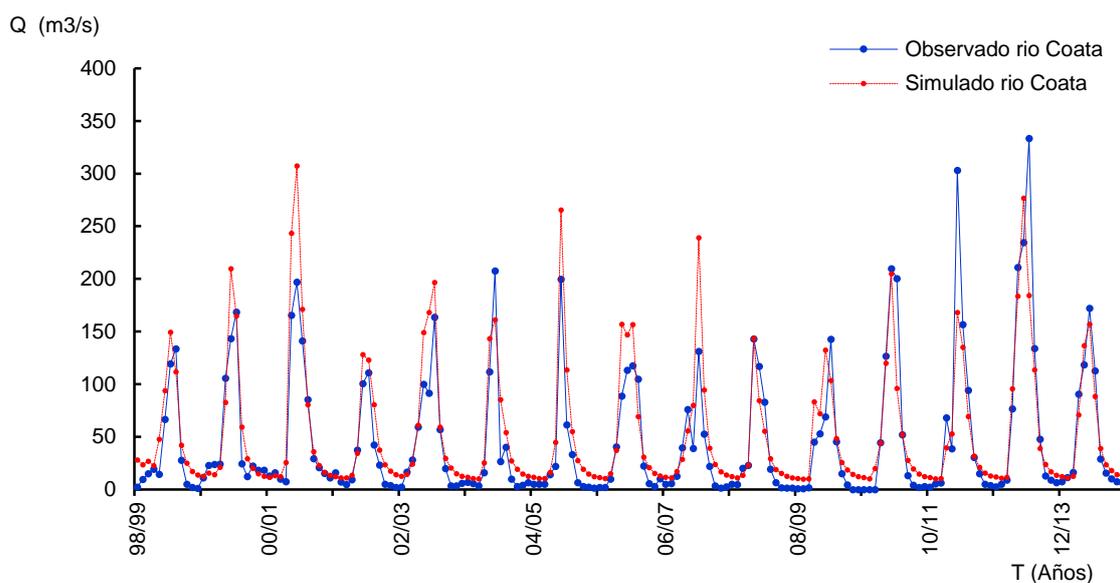
**Gráfico 10.11.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Río Ilave



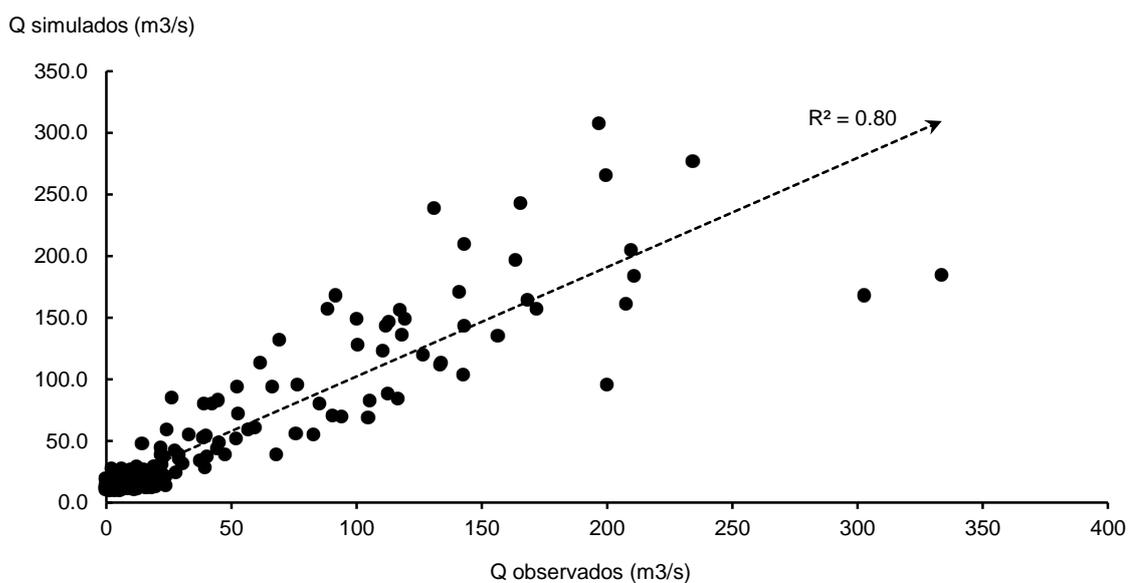
**Gráfico 10.12.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Río Ilave



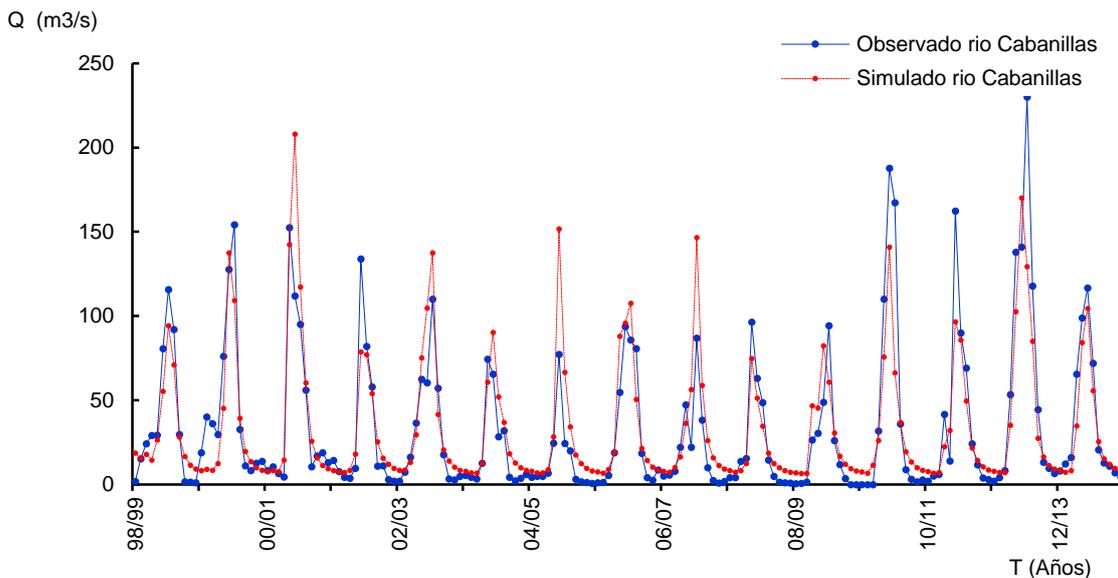
**Gráfico 10.13.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Coata



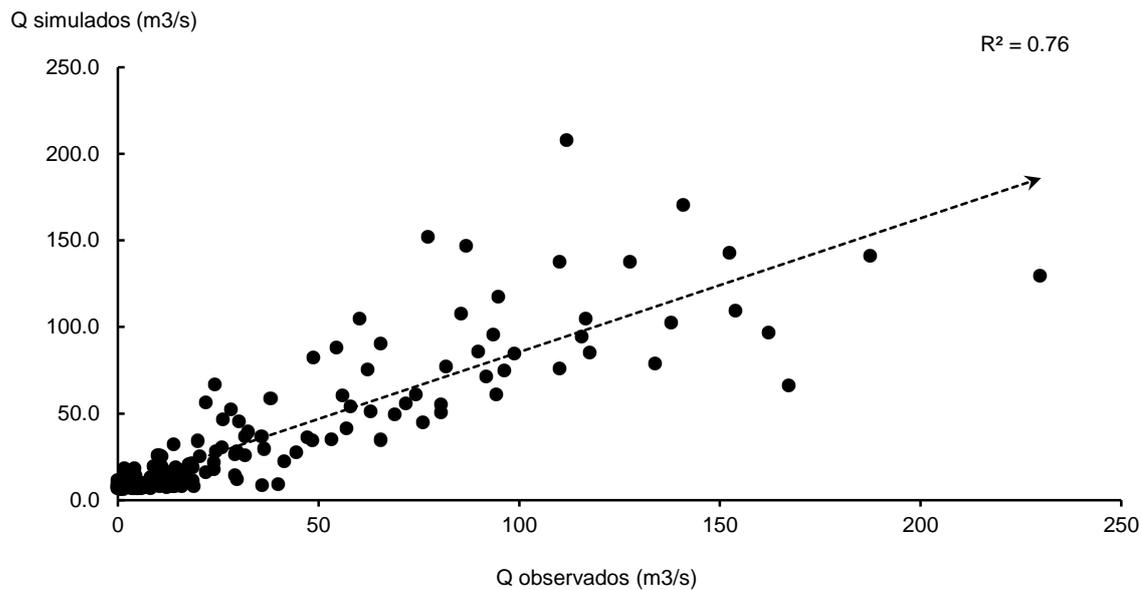
**Gráfico 10.14.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Coata



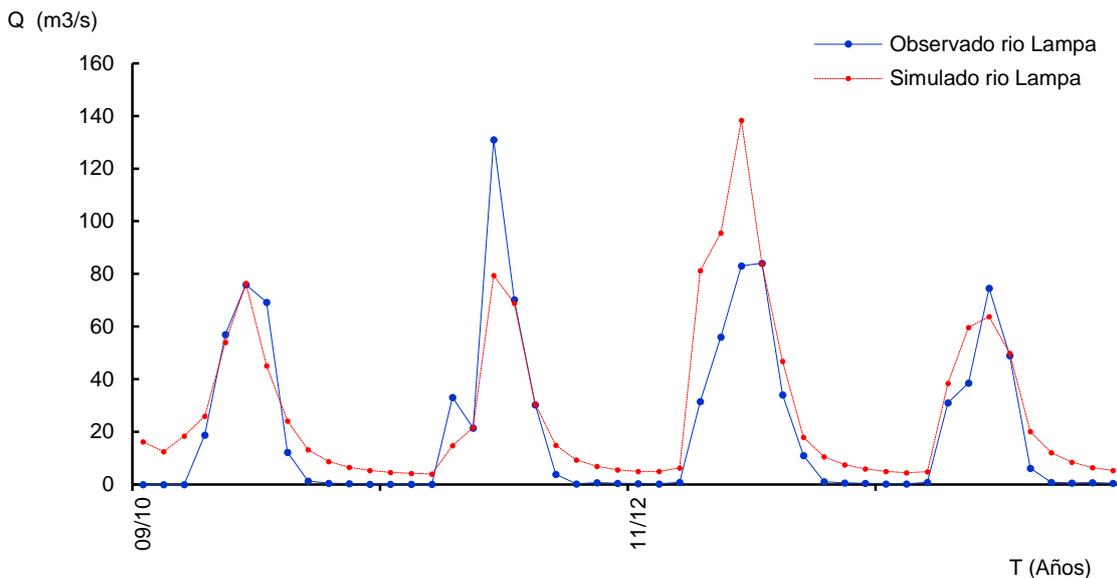
**Gráfico 10.15.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Río Cabanillas



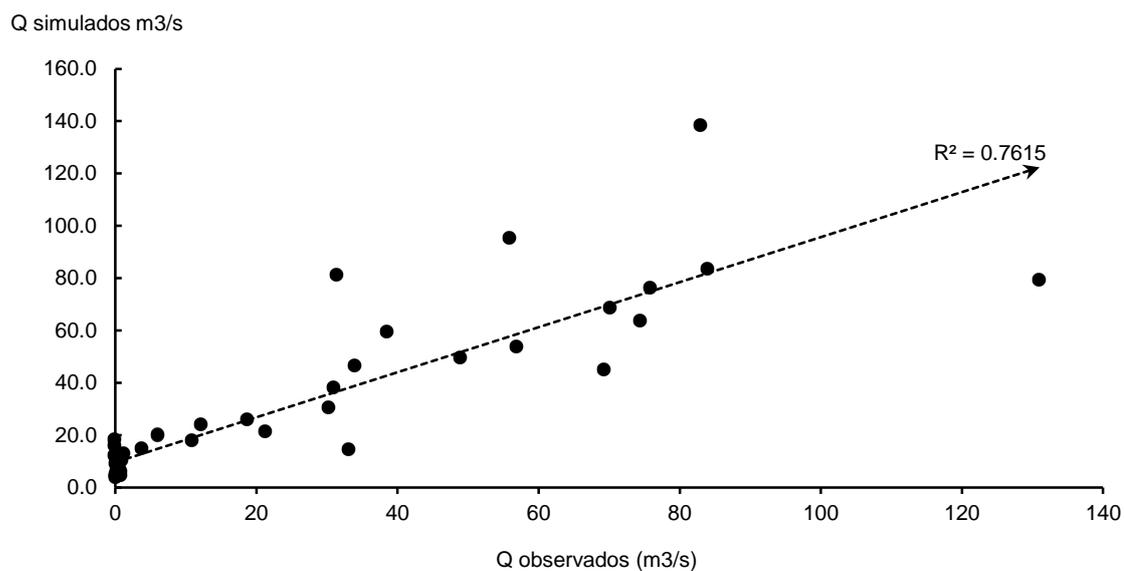
**Gráfico 10.16.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Río Cabanillas

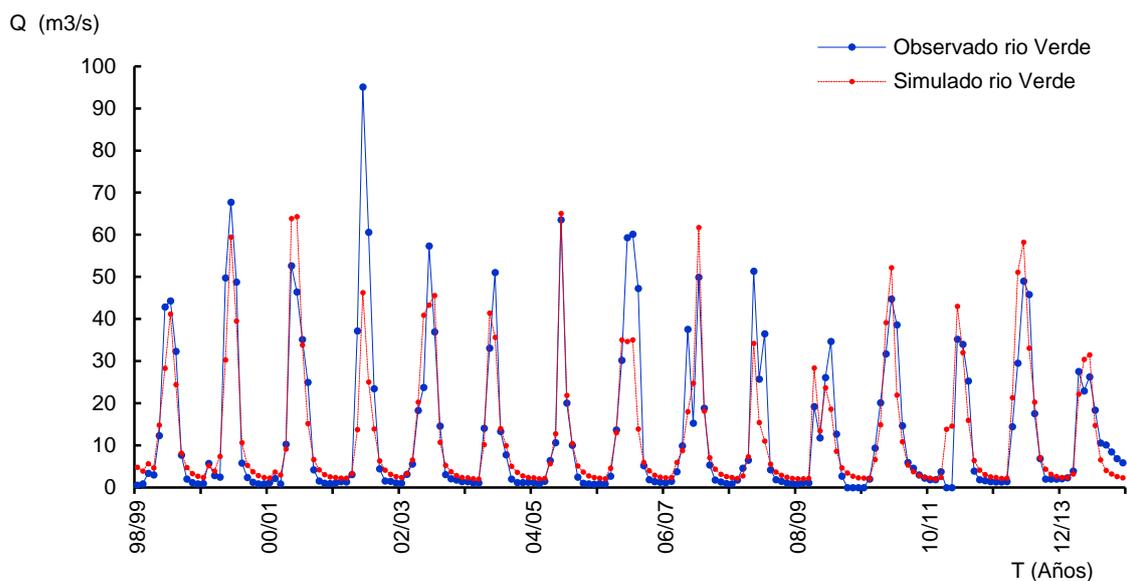
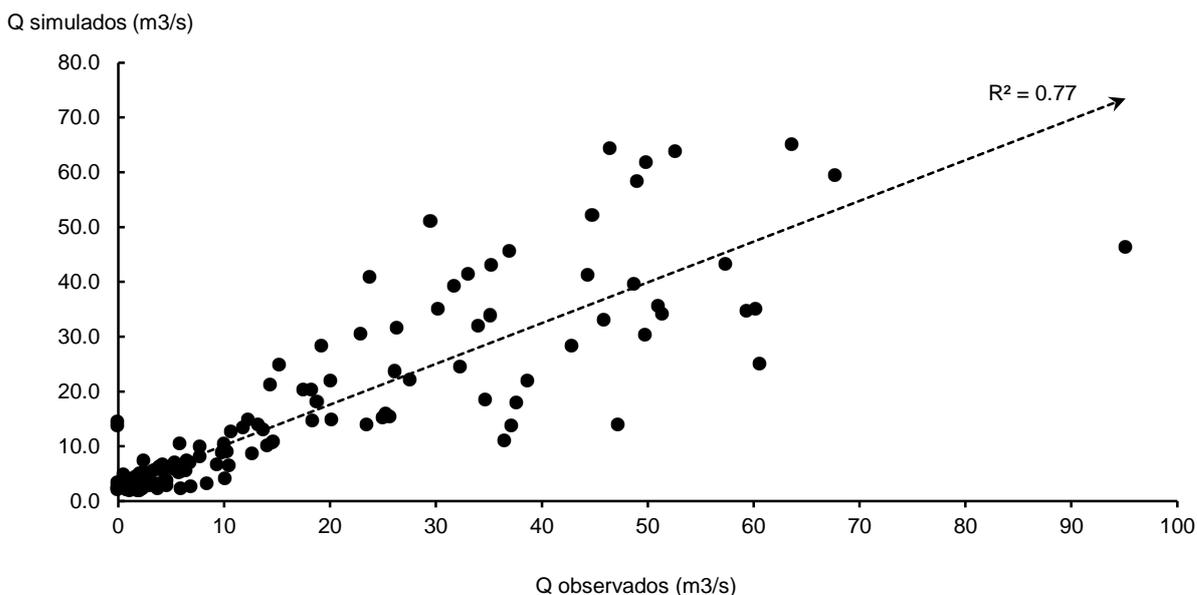


**Gráfico 10.17.- Hidrograma de caudales observados y simulados – Río Lampa**



**Gráfico 10.18.- Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Río Lampa**



**Gráfico 10.19.-** Hidrograma de caudales observados y simulados – Rio Verde**Gráfico 10.20.-** Diagrama de dispersión entre caudales observados y simulados – Rio Verde

#### 10.2.4. Evaluación del modelo

El modelo utilizado, muestran un ajuste muy bueno para todos los ríos según la calificación del criterio de Nash, ya que sus coeficientes de calibración están entre 68.2 y 79.7%, por otro lado en la etapa de validación el modelo presenta también resultados muy buenos, obteniendo coeficientes de NASH, comprendidos entre 69% y 76.9%. Además para la evaluación de los resultados, se han utilizado otros indicadores estadísticos como el Error Cuadrático Medio Normalizado (ECMN), Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y coeficiente de

correlación ( $r$ ), de donde se deduce que se encuentran en muy buenos calificativos. Los resultados de la evaluación se presentan el Cuadro N° 2.4 y 2.5.

**Cuadro 10.2.-** Evaluación estadística del modelo GR2M – Fase de calibración

Rios	NASH E [%]	ECMN [%]	R <sup>2</sup> [%]	r [%]
Rio llave	74.8	25.0	75.5	86.9
Rio Coata	78.2	21.3	80.1	89.5
Rio Cabanillas	74.3	25.2	74.8	86.5
Rio Lampa	79.7	23.7	80.8	88.0
Rio Verde	68.2	30.8	69.1	83.1

**Cuadro 10.3.-** Evaluación estadística del modelo GR2M – Fase de validación

Rios	NASH E [%]	ECMN [%]	R <sup>2</sup> [%]	r [%]
Rio llave	74.3	35.7	80.1	89.5
Rio Coata	76.9	22.6	80.0	89.5
Rio Cabanillas	75.2	24.2	75.7	87.0
Rio Lampa	69.0	29.1	76.2	87.3
Rio Verde	76.0	22.7	77.5	88.0

## XI. DISPONIBILIDAD HIDRICA

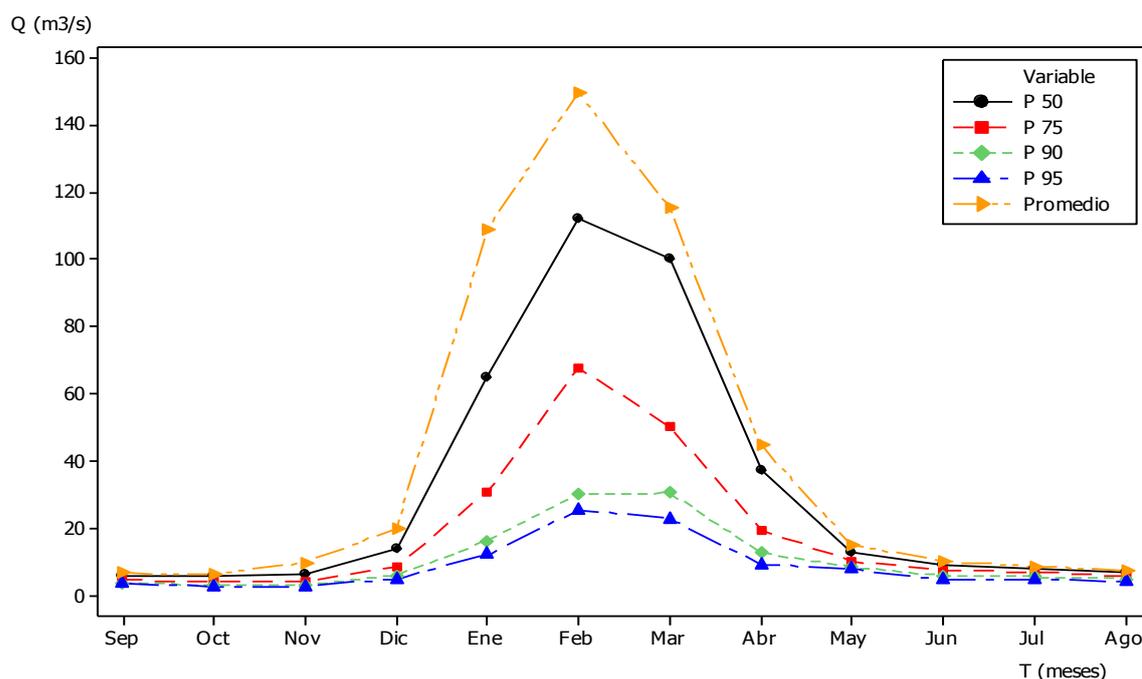
La oferta de agua o disponibilidad hídrica, se refiere a la cantidad de agua que la naturaleza nos ofrece en diferentes lugares y en diferentes formas. La oferta de agua implica una fuente, una forma y una oportunidad.

Debido a que el agua es el elemento sustentador de la vida, la naturaleza nos ofrece este elemento en múltiples formas y en todos los lugares imaginables del planeta. Así, tenemos las aguas de precipitación pluvial, las aguas de precipitación nival, los glaciares, las lagunas, los ríos, los manantiales, inclusive las neblinas, y las aguas subterráneas.

La metodología adoptada para la definición de la disponibilidad hídrica fue a partir de un análisis de caudales medios de largo período, con permanencia de 50%, 75%, 90% y 95%. Esta metodología se adoptó a partir de percentiles (P), cuyos resultados se muestran en los Cuadros 9.1 al 9.5, así mismo su variación en el tiempo se puede apreciar gráficamente.

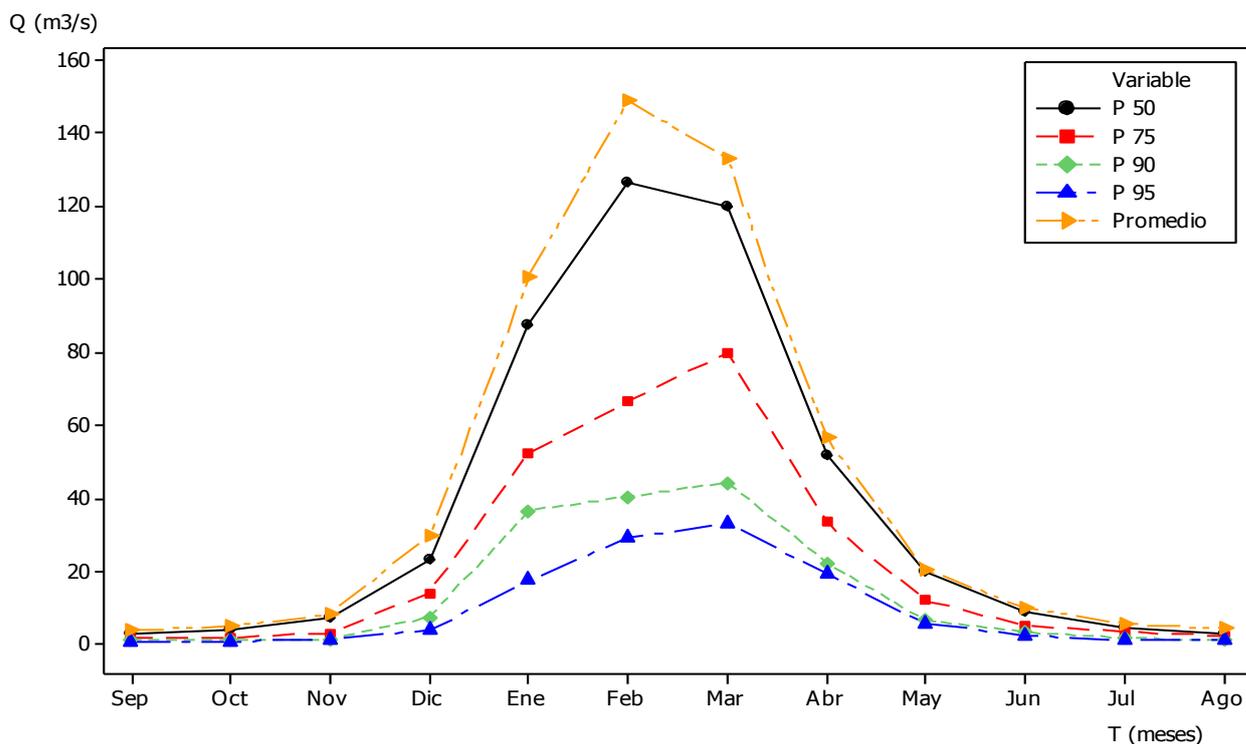
**Cuadro 9.1.- Persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) - Rio Ilave**

Percentil	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
P 50	5.9	5.8	6.5	13.9	64.9	112.0	100.0	37.3	12.8	9.0	7.9	6.7	38.3
P 75	4.5	4.0	4.2	8.4	30.8	67.6	50.2	19.5	10.0	7.4	6.9	5.7	24.8
P 90	3.7	3.0	2.9	5.9	16.2	30.2	30.4	12.7	8.3	5.8	5.5	4.8	14.8
P 95	3.3	2.6	2.7	4.9	12.0	25.5	22.7	9.1	7.8	4.5	4.7	4.0	12.6
<b>Promedio</b>	<b>6.6</b>	<b>6.3</b>	<b>9.7</b>	<b>20.0</b>	<b>108.8</b>	<b>149.5</b>	<b>115.1</b>	<b>44.6</b>	<b>14.9</b>	<b>10.1</b>	<b>8.5</b>	<b>7.5</b>	<b>41.8</b>

**Grafico 9.1.- Variación temporal de la persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) - Rio Ilave****Cuadro 9.2.- Persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) - Rio Coata**

Percentil	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
P 50	3.0	4.0	7.0	23.0	87.4	126.0	119.4	51.5	19.8	8.8	4.7	3.0	43.0
P 75	1.7	1.8	3.0	14.0	52.4	66.3	79.7	33.3	12.0	4.9	3.4	2.2	29.9
P 90	1.0	1.0	1.4	7.3	36.4	40.4	44.2	22.3	6.5	3.3	1.6	1.1	21.6
P 95	0.7	0.7	1.3	3.7	17.5	29.1	33.1	19.2	5.5	2.3	1.2	1.0	16.2
<b>Promedio</b>	<b>3.8</b>	<b>4.8</b>	<b>8.1</b>	<b>29.7</b>	<b>100.3</b>	<b>148.7</b>	<b>132.8</b>	<b>56.3</b>	<b>20.3</b>	<b>10.0</b>	<b>5.6</b>	<b>4.2</b>	<b>43.7</b>

**Grafico 9.2.-** Variación temporal de la persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) -  
Rio Coata



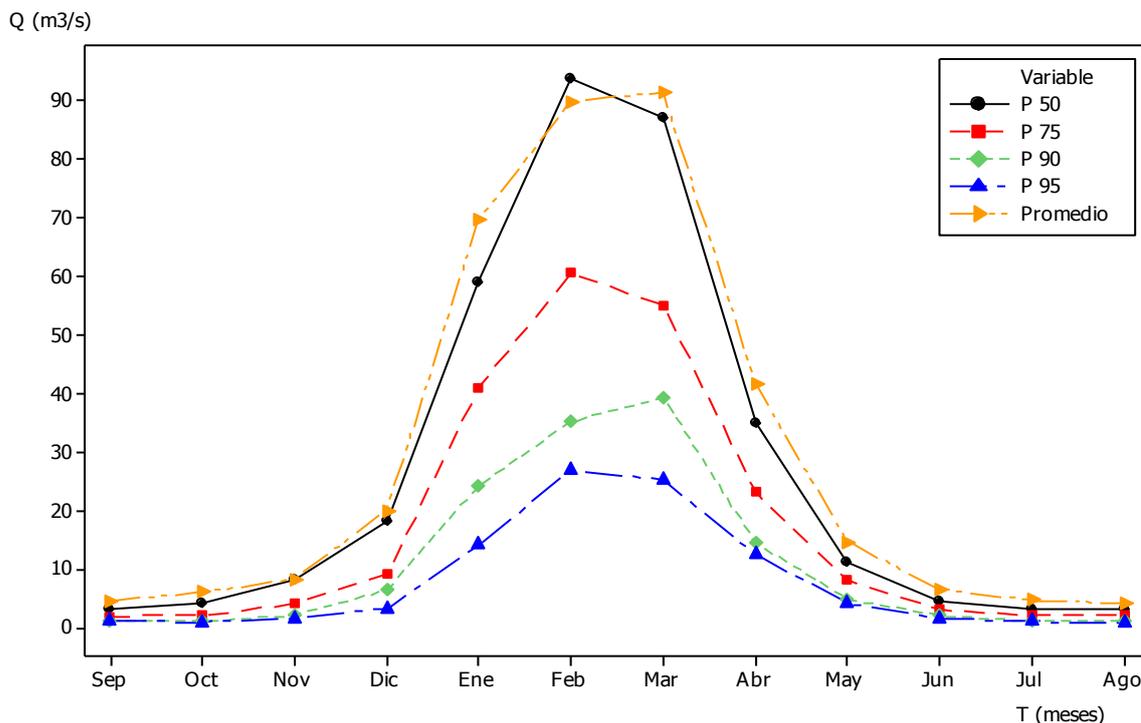
**Cuadro 9.3.-** Persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) – Rio Cabanillas

Percentil	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
P 50	3.0	4.1	8.0	18.0	59.0	93.8	86.9	35.0	11.0	4.5	3.0	3.0	29.1
P 75	1.9	2.0	4.0	9.0	41.0	60.4	55.0	23.0	8.0	3.0	2.0	2.0	20.8
P 90	1.0	1.0	2.0	6.3	24.2	35.1	39.3	14.4	4.7	1.9	1.0	1.0	15.1
P 95	1.0	0.9	1.4	3.3	14.0	26.8	25.2	12.4	4.0	1.5	1.0	0.7	14.5
Promedio	4.4	6.0	8.2	19.9	69.5	89.7	91.4	41.6	14.5	6.5	4.6	4.0	30.0

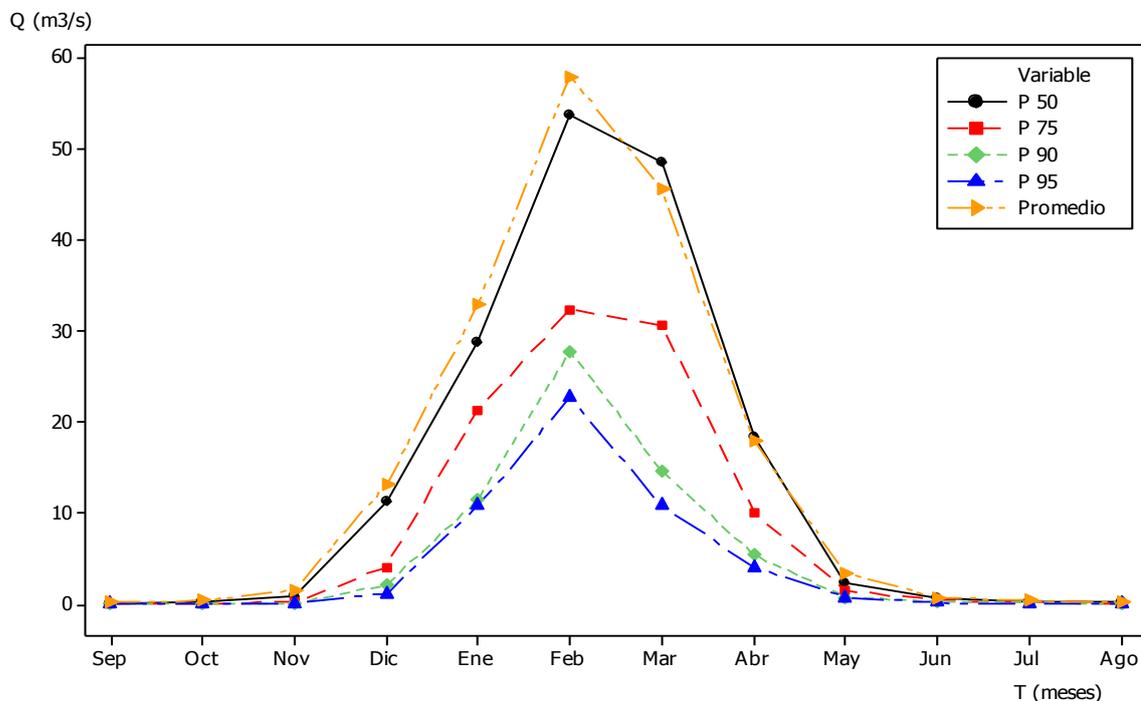
**Cuadro 9.4.-** Persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) – Rio Lampa

Percentil	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
P 50	0.14	0.21	0.80	11.32	28.63	53.56	48.46	18.33	2.35	0.59	0.29	0.17	14.0
P 75	0.10	0.11	0.22	4.09	21.30	32.27	30.57	10.03	1.49	0.43	0.24	0.13	11.4
P 90	0.05	0.05	0.06	2.13	11.43	27.74	14.61	5.40	0.77	0.26	0.19	0.12	7.7
P 95	0.00	0.00	0.05	1.19	10.78	22.65	10.79	4.09	0.72	0.17	0.14	0.09	7.1
Promedio	0.18	0.37	1.58	13.05	32.81	57.83	45.54	17.96	3.34	0.73	0.38	0.21	14.5

**Grafico 9.3.-** Variación temporal de la persistencia de descargas medias mensuales (m3/s) - Rio Cabanillas

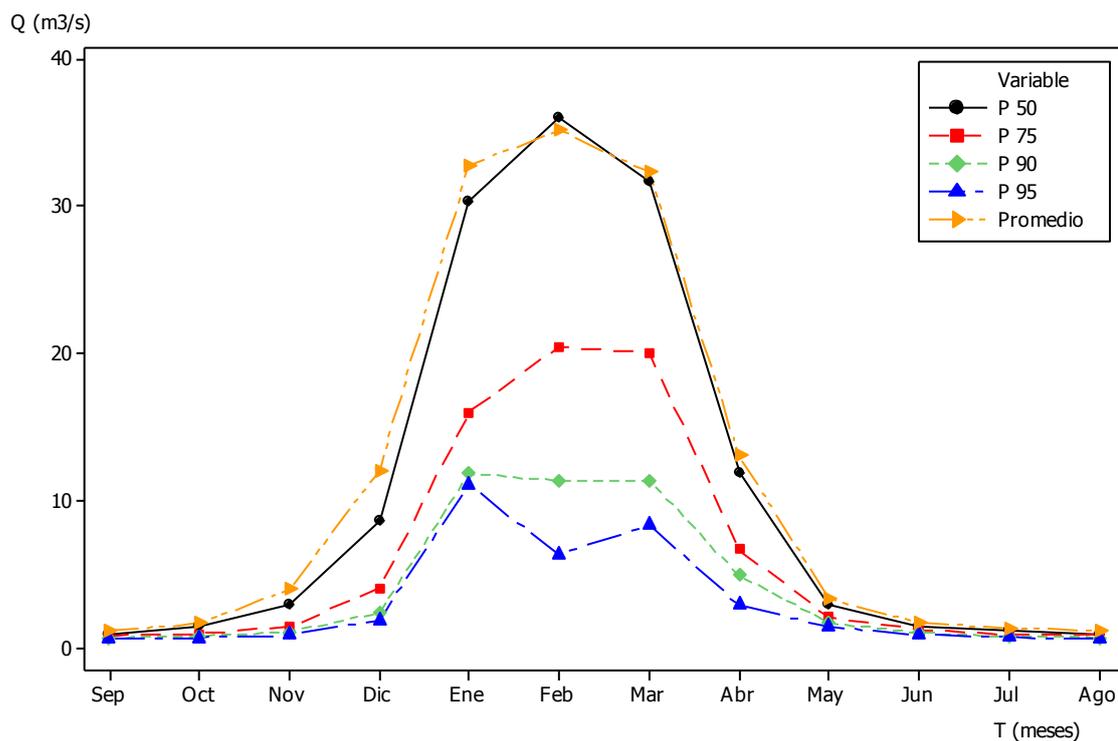


**Grafico 9.4.-** Variación temporal de la persistencia de descargas medias mensuales (m3/s) - Rio Lampa



**Cuadro 9.5.- Persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) – Rio Verde**

Percentil	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
P 50	1.00	1.49	3.00	8.69	30.25	35.95	31.67	11.91	2.92	1.55	1.17	1.00	11.4
P 75	0.85	1.02	1.49	4.07	16.02	20.43	20.08	6.73	2.13	1.25	0.97	0.89	9.1
P 90	0.73	0.85	1.12	2.41	11.86	11.36	11.39	4.96	1.75	1.07	0.81	0.75	6.8
P 95	0.64	0.74	0.91	1.94	11.14	6.37	8.37	2.92	1.49	0.95	0.78	0.66	5.6
Promedio	1.19	1.71	4.00	12.10	32.78	35.14	32.26	13.07	3.37	1.76	1.36	1.24	11.7

**Grafico 9.5.- Variación temporal de la persistencia de descargas medias mensuales (m<sup>3</sup>/s) - Rio Verde**

## XII. CARACTERIZACION DE LOS EVENTOS HIDROMETEOROLOGICOS EXTREMOS

### 12.1. Análisis de frecuencias de Caudales Máximos Instantáneos

El objetivo fundamental del análisis de frecuencias es la estimación de los sucesos extremos, correspondientes a diferentes períodos de retorno mediante el uso de funciones de distribución de probabilidad. La relación resultante entre las magnitudes de los eventos extremos y sus correspondientes períodos de retorno  $PT - T$ , se le conoce como curva de frecuencia y es de gran utilidad en diseño en ingeniería.

Los métodos comúnmente utilizados para el análisis de frecuencia en nuestro país son aquellos donde se tiene registros de una estación particular a los cuales se les considera como una muestra aleatoria e idénticamente distribuida para ajustarlo a una distribución de probabilidad.

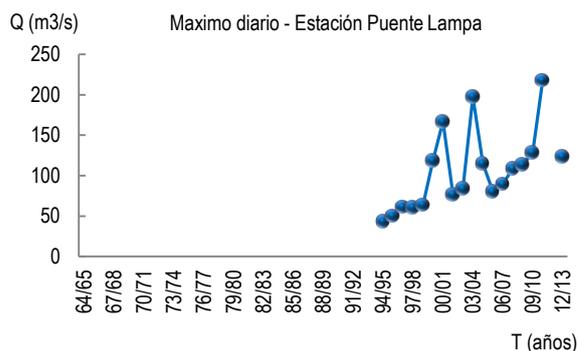
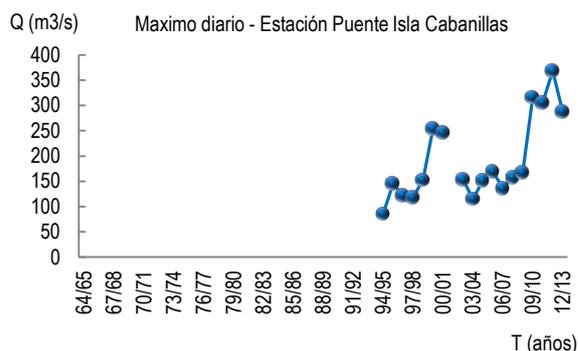
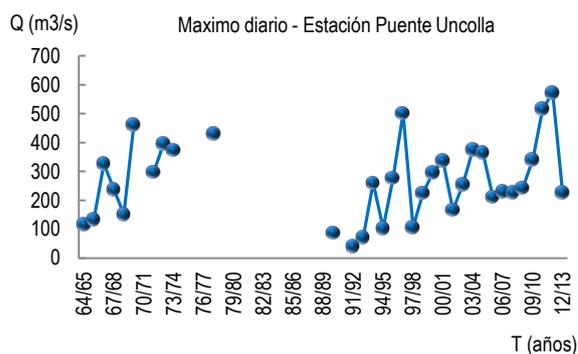
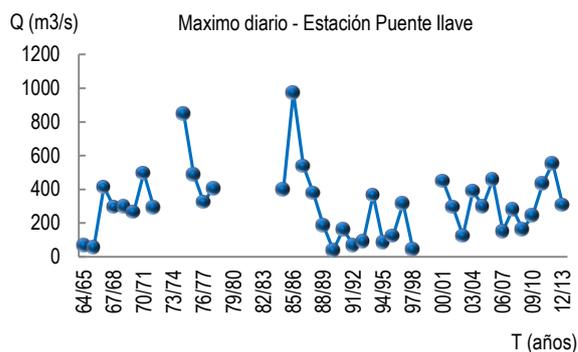
1. Selección de la serie anual de máximos
2. Ajuste modelo probabilístico
3. Pruebas de Bondad de ajuste
  - Chi-Cuadrado
  - Kolmogorov-Smirnov
4. Determinación de los cuantiles de diseño

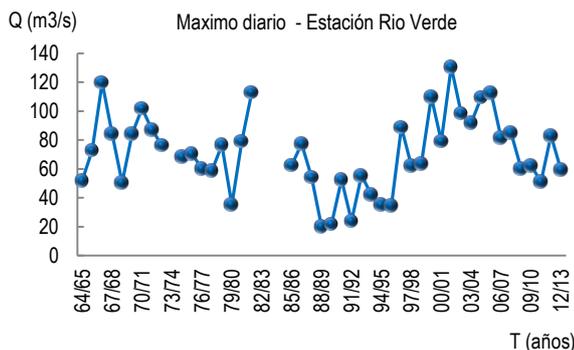
**Cuadro 12.1.-** Distribuciones de probabilidad usadas en Hidrología

Normal	(N)	(Gauss)
Log-normal	(LN)	(Hazen, 1914)
Pearson de tipo 3	(P3)	(Foster, 1924)
Valores extremos tipo 1	(EV1)	(Gumbel, 1941)
Valores extremos tipo 2	(EV2)	(Gumbel, 1941)
Valores extremos tipo 3	(EV3)	(Jenkinson, 1969)
Distribución Gamma de tres parámetros		(Kritsky, Menkel, 1946)
Gamma	(G)	(Moran, 1957)
Log-Pearson tipo 3	(LP3)	(U.S. Water Resources Council, 1967, 1981)
Valores extremos generalizados	(GEV)	(Jenkinson, 1955)
Weibull		(Wu et Goodbridge, 1976)
Wakeby	(WAK)	(Houghton, 1978)
Boughton		(Boughton, 1980)
Valores extremos con dos componentes	(TCEV)	(Rossi, y col., 1984)
Logística logarítmica	(LLG)	(Ahmad, y col., 1988)
Logística generalizada	(GLG)	(Ahmad, 1988)

El Grafico 12.1, muestra el comportamiento temporal de los caudales máximos diarios del periodo septiembre del 1964 - agosto del 2013.

**Gráfico 12.1.- Hidrograma de descargas máximas diarias (m3/seg)**





La estimación de cuantiles locales para los ríos llave, Coata, Cabanillas, Lampa y Verde, se han determinado a través del análisis de frecuencia de las descargas máximas instantáneas.

**12.1.1. Estimacion de caudales maximos instantaneos**

El SENAMHI en el ámbito del área de estudio solo obtiene datos de caudales máximos medios diarios debido a que no se tiene información horaria y esto nos lleva a utilizar formulas empíricas propuestas por autores para la obtención de las descargas máximas instantáneas. El método utilizado en el presente estudio, es el propuesto por Fuller, cuya ecuación empírica está en función del área de la cuenca.

$$Q_{max\ i} = Q_{max\ d} * \left( 1 + \frac{2.66}{A^{0.3}} \right) \dots\dots\dots[Ec. 12.1]$$

Siendo:

- Qmaxi = Caudal máximo instantáneo (m³/s)
- Qmaxd = Caudal máximo medio diario (m³/s)
- A = Área de la cuenca (Km²)

**Cuadro 12.2.- Funciones para la estimación de caudales instantáneos**

Ri llave	Rio Coata	Rio Cabanillas	Rio Lampa	Rio Verde
Q inst= 1.18* Qmaxd	Q inst= 1.21* Qmaxd	Q inst= 1.24* Qmaxd	Q inst= 1.29* Qmaxd	Q inst= 1.37* Qmaxd

**12.1.2. Estadísticas descriptivas**

Las medidas descriptivas son valores numéricos calculados a partir de la muestra y que nos resumen la información contenida en ella. El cuadro 12.3, muestra las estadísticas de base de la serie utilizada, entre ellos la cantidad de datos por cada estación, el valor máximo, mínimo y el promedio de la muestra.

**Cuadro 12.3.- Estadísticas descriptivas de la muestra de datos de caudales**

Parametros	Rio Ilave	Rio Coata	Rio Cabanillas	Rio Lampa	Rio Verde
Tamaño de la muestra	39	33	16	16	39
Maximo	1152.0	694.5	271.1	476.7	178.4
Minimo	46.4	49.1	54.3	110.4	27.1
Promedio	369.6	330.2	138.5	249.6	97.0
Desviacion estandar	242.0	164.7	61.2	109.5	36.8
Coefficiente de asimetria	1.2	0.3	0.8	0.9	0.1

### 12.1.3. Calidad de la serie de datos

Según el cuadro 12.4, se han identificado la independencia y la homogeneidad de las series de caudales utilizando las pruebas de Kendall y Man-Kendall respectivamente, de donde se deduce que todos los datos utilizados son independientes y homogéneos con excepción de las estaciones del rio Cabanillas y Lampa según la prueba de Man-Kendall no son homogéneos. Así mismo no se han encontrados valores anómalos según las pruebas de Grubs y Beck.

**Cuadro 12.4.- Pruebas de independencia, homogeneidad e identificación de valores atípicos**

Prueba	Coefficiente	Rio Ilave	Rio Coata	Rio Cabanillas	Rio Lampa	Rio Verde
	r	0.1821	0.1694	0.3524	0.4095	0.3883
Kendall	Estadística Z	1.597	1.346	1.782	2.078	3.42
	Valor limite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Z <  Z	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Man - Kendall	Estadística U	0.0605	1.286	2.656	3.107	0.3871
	Valor limite  U	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	U >  U	homogenea	homogenea	No homogenea	No homogenea	homogenea
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	2382	1407	351.5	593.7	295.3
	Max	1152	694.5	271.1	476.7	178.4
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Max<Ls	No hay valores atipicos				
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	34.69	57.01	45.43	88.72	26.84
	Min	46.4	49.1	54.3	110.4	27.1
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Min>Li	No hay valores atipicos				

### 12.1.4. Ajuste de las funciones de distribución

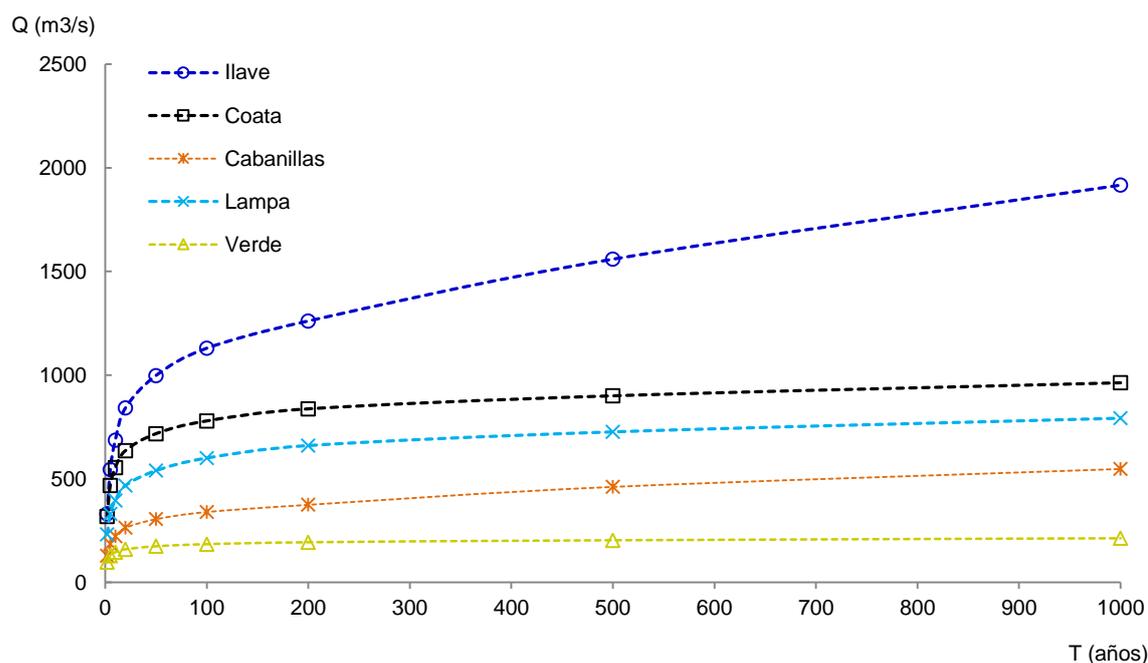
SEAF, es un software especializado para el análisis de frecuencias, en el cual vienen incluidos 08 distribuciones teóricas las cuales fueron analizadas para cada estación y las distribuciones recomendadas se muestran en el Cuadro 12.5 a un nivel de confianza que está por encima de 81.13% a 98.27% de nivel de confianza. Por otro lado el cuadro 12.6 muestra los cuantiles estimados para diferentes periodos de retorno con la distribución recomendada para cada estación plasmándose en curvas de frecuencia en el Grafico 12.2.

**Cuadro 12.5.- Distribuciones recomendadas**

Distribución	Rio Ilave	Rio Coata	Rio Cabanillas	Rio Lampa	Rio Verde
Normal		0.8824	0.6676		<b>0.9733</b>
LogNormal			0.9715	0.7679	
Gumbel	<b>0.9019</b>	0.8367	<b>0.9827</b>	<b>0.8113</b>	0.6119
Exponential					
Pearson-III	0.7128	<b>0.9713</b>	0.9337	0.7623	
LogPearson-III					
GEV					
GPA					

**Cuadro 12.6.- Estimación de cuantiles locales**

Rio	Distribución	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Ilave	Gumbel	329.8	543.8	685.5	841.4	997.3	1129.1	1260.4	1558.6	1915.7
Coata	Pearson-III	317.6	467.8	553.7	635.4	717.2	778.8	837.1	899.9	962.8
Cabanillas	Gumbel	128.0	184.6	222.1	263.4	304.7	339.6	374.4	461.1	547.8
Lampa	Gumbel	231.3	329.9	395.2	467.0	538.9	599.6	660.2	726.1	792.1
Verde	Normal	97.0	128.4	144.9	159.3	173.8	184.0	193.3	202.9	212.5

**Grafico 12.2.- Curvas de frecuencia de caudales máximos instantáneos**

## 12.2. Análisis de frecuencias de Precipitaciones Máximas

Dado que los datos de precipitación son obtenidos a horas de observación fijas (por ejemplo, horas enteras), no siempre permitirán conocer las cantidades máximas verdaderas durante el periodo deseado. Por ejemplo, estudios efectuados a partir de varios años – estación de datos, indican que multiplicando por 1.13 las cantidades máximas anuales

horarias o diarias de un único intervalo de observación comprendido entre 1 y 24 horas, se obtendrán valores cercanos a los obtenidos mediante un análisis de máximos verdaderos.

### 12.2.1. Factor entre la Pmax en 24 horas y la Pmax diaria (F)

A falta de información real se puede adoptar el valor aceptado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM) de  $F=1.13$ . F, es el factor que permite transformar máximas lluvias diarias en máximas lluvias en 24 horas.

### 12.2.2. Estadísticas descriptivas

Los Cuadros 12.7, 12.8 y 12.9, muestran los estadísticos descriptivos de las precipitaciones máximas diarias corregidos a máximas en 24 horas según el factor de la OMM para los tres grupos conformados a partir del vector regional.

**Cuadro 12.7.-** Estadísticas descriptivas de la muestra de datos de precipitaciones – Grupo 1

Parametros	Arapa	Capachica	Capazo	Desaguadero	Juli	Juliaca	Mazocruz	Pampahuta	Puno	R. de la Cruz
Tamaño de la muestra	48	42	48	49	43	41	45	48	48	24
Maximo	53.6	52.8	57.4	80.0	100.8	80.0	47.4	49.9	78.2	51.0
Minimo	21.7	20.8	16.0	22.8	25.4	20.0	13.4	22.5	23.6	20.0
Promedio	32.8	33.5	26.2	43.2	43.3	34.8	27.4	34.9	38.3	32.9
Desviacion estandar	8.3	8.7	7.4	12.5	13.9	11.9	7.1	6.6	11.8	7.6
Coefficiente de asimetria	1.0	0.8	1.9	0.9	2.1	1.8	0.7	0.4	1625.0	0.7

**Cuadro 12.8.-** Estadísticas descriptivas de la muestra de datos de precipitaciones - Grupo 2

Parametros	Ayaviri	Chuquibambilla	Llally	Pucara	Taraco
Tamaño de la muestra	42	42	34	48	48
Maximo (mm)	92.0	59.2	45.7	76.4	66.4
Minimo (mm)	16.0	15.6	21.2	13.9	20.0
Promedio (mm)	34.7	32.9	32.6	35.7	34.2
Desviacion estandar	12.1	9.8	6.9	11.5	11.9
Coefficiente de asimetria	2.6	1.0	0.2	1.4	1.0

**Cuadro 12.9.-** Estadísticas descriptivas de la muestra de datos de precipitaciones – Grupo 3

Parametros	Cabanillas	Ilave	Lampa	Laraqueri	Mañazo	Pizacoma	Santa Lucia	Yunguyo
Tamaño de la muestra	47	41	46	46	34	42	27	42
Maximo (mm)	67.7	46.0	64.0	54.8	57.4	61.2	115.6	74.2
Minimo (mm)	15.5	20.6	22.2	21.6	16.6	15.0	19.9	19.0
Promedio (mm)	35.2	32.8	36.5	33.8	35.1	32.5	41.6	13.0
Desviacion estandar	11.6	6.4	9.0	8.9	10.4	9.3	20.7	10.7
Coefficiente de asimetria	0.9	0.1	0.8	0.7	0.6	0.5	2.2	1.7

### 12.2.3. Calidad de la serie de datos

Según el cuadro 12.10, se ha identificado la independencia y la homogeneidad de las series de caudales utilizando las pruebas de Kendall y Man-Kendall respectivamente, de donde se

deduce que todos los datos utilizados son independientes y homogéneos a un 95% de probabilidad, con excepción de la estación Pampahuta, que según las pruebas de Man-Kendall sus datos no son homogéneos. Así mismo también se puede observar que en la mayoría de las estaciones no hay presencia de valores atípicos.

Para el caso de análisis de calidad de datos para el Grupo 2, las series son datos independientes, no existiendo valores atípicos en las estaciones de Chuquibambilla, Llally Pucara y taraco.

Simultáneamente el Cuadro 12.12, muestra los resultados de las pruebas de independencia, homogeneidad y valores atípicos del Grupo 3.

**Cuadro 12.10.- Pruebas de Independencia, homogeneidad e identificación de valores atípicos – Grupo 1**

Prueba	Coeficiente	Arapa	Capachica	Capazo	Desaguadero	Juli
	r	0.0712	0.1244	0.1036	-0.0381	-0.101
Kendall	Estadística Z	0.6971	1.135	1.018	0.3733	0.9322
	Valor límite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Z <  Z	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Man - Kendall	Estadística U	1.431	0.3686	1.564	1.827	0.0837
	Valor límite  U	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	U >  U	Homogeneo	homogenea	Homogenea	Homogeneo	homogenea
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	61.25	63.66	50.13	90.47	87.33
	Max	53.6	52.8	57.4	80	100.8
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Max < Ls	No hay valores atipicos	No hay valores atipicos	Hay valores atipicos	No hay valores atipicos	hay valores atipicos
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	16.61	16.53	17.34	19.06	19.8
	Min	21.7	20.8	23.6	22.8	25.4
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Min > Li	No hay valores atipicos				
Prueba	Coeficiente	Juliaca	Mazocruz	Pampahuta	Puno	R de la Cruz
	r	-0.0038	-0.1247	0.0444	0.2498	-0.0435
Kendall	Estadística Z	0.0233	1.184	0.4311	2.467	0.2641
	Valor límite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Z <  Z	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Man - Kendall	Estadística U	0.4944	0.9295	2.213	0.0889	0.8682
	Valor límite  U	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	U >  U	homogenea	homogenea	No homogeneo	Homogenea	homogenea
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	73.52	53.4	57.82	78.07	56
	Max	80	47.4	49.9	78.2	51
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Max < Ls	hay valores atipicos	hay valores atipicos	No hay valores atipicos	No hay valores atipicos	No hay valores atipicos
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	19.8	13.22	20.31	17.34	20.31
	Min	25.4	13.4	22.5	23.6	22.5
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Min > Li	No hay valores atipicos				

**Cuadro 12.11.- Pruebas de Independencia, homogeneidad e identificación de valores atípicos – Grupo 2**

Prueba	Coefficiente	Ayaviri	Chuquibambilla	Llally	Pucara	Taraco
	r	0.1305	-0.0963	0.1667	-0.0009	0.136
Kendall	Estadística Z	1.191	0.8764	1.35	0	1.34
	Valor límite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Z<  Z	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Man - Kendall	Estadística U	2.732	0.7696	1.424	0.3111	1.005
	Valor límite  U	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	U>  U	No homogéneo	Homogénea	Homogénea	Homogéneo	homogénea
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	74.16	67.86	55.95	78.98	79.15
	Max	92	59.2	45.7	76.4	66.4
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Max<Ls	Hay valores atípicos	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	14.82	14.73	18.17	14.69	13.3
	Min	16	15.6	21.2	13.9	20
	Alfa	5%	5%	5%	5%	5%
	Min>Li	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos	Hay valores atípicos	No hay valores atípicos
Asimetría	Ls	Hay valor atípico	No hay valor atípico	No hay valor atípico	No hay valor atípico	No hay valor atípico
	Li	No hay valor atípico	No hay valor atípico	No hay valor atípico	Hay valor atípico	No hay valor atípico

**Cuadro 12.12.- Pruebas de Independencia, homogeneidad e identificación de valores atípicos – Grupo 3**

Prueba	Coefficiente	Cabanillas	Ilave	Lampa	Laraqueri
	r	0.0657	-0.0244	-0.0051	0.0727
Kendall	Estadística Z	0.6344	0.2098	0.0391	0.6948
	Valor límite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Z<  Z	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Man - Kendall	Estadística U	1.99	0.7302	0	0.625
	Valor límite  U	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	U>  U	No homogéneo	homogénea	Homogénea	Homogéneo
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	80.9	55.16	68.43	65.81
	Max	68.7	46	64	54.8
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Max<Ls	No hay valores atípicos			
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	13.85	18.78	18.43	16.26
	Min	15.5	20.6	22.2	21.6
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Min>Li	No hay valores atípicos			
Prueba	Coefficiente	Mañazo	Pizacoma	Santa Lucía	Yunguyo
	r	0.0909	0.2415	0.5292	0.3024
Kendall	Estadística Z	0.7286	2.214	3.771	2.775
	Valor límite  Z	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Z<  Z	Independiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente
Man - Kendall	Estadística U	0.3855	2.873	3.357	0.2818
	Valor límite  U	1.96	1.96	1.96	1.96
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	U>  U	homogénea	No homogéneo	No homogéneo	Homogéneo
Grubbs & Beck (Umbral alto)	Ls	72.47	69.85	106.8	69
	Max	57.4	61.2	115.6	74.2
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Max<Ls	No hay valores atípicos	No hay valores atípicos	hay valores atípicos	hay valores atípicos
Grubbs & Beck (Umbral bajo)	Li	15.59	13.95	13.51	15.5
	Min	16.6	15	19.9	19
	Alfa	5%	5%	5%	5%
	Min>Li	No hay valores atípicos			

### 12.2.4. Ajuste de las funciones de distribución

Las distribuciones recomendadas se muestran en los Cuadros 12.13 al 12.15 a un porcentaje de ajuste que está por encima de 92.7%. Por otro lado los cuadro 12.16 al 12.17, muestra los cuantiles estimados para diferentes periodos de retorno con las distribuciones recomendadas para cada estación plasmándose en curvas de frecuencia en los Gráficos 12.3 al 12.5.

**Cuadro 12.13.- Distribuciones recomendadas – Grupo 1**

Distribución	Arapa	Capachica	Capazo	Desaguadero	Juli	Juliaca	Mazocruz	Pampahuta	Puno	R. de la Cruz
Normal							0.5509	0.7174		0.6618
LogNormal	0.5747	0.6846		0.9723			<b>0.976</b>	<b>0.9307</b>		0.9662
Gumbel	0.8872	<b>0.8593</b>		0.9713		0.5667	0.9468	0.7443	0.6132	<b>0.9856</b>
Exponential	0.6602								0.9345	
Pearson-III	<b>0.927</b>	0.8275		0.9428		0.8985	0.9662	0.7659	0.8105	0.9826
LogPearson-III	0.8923	0.8579	0.9557	<b>0.9749</b>	0.9283	0.9646			0.8831	0.9845
GEV			<b>0.9645</b>		<b>0.9831</b>	<b>0.9917</b>			<b>0.9667</b>	
GPA										

**Cuadro 12.14.- Distribuciones recomendadas – Grupo 2**

Distribución	Ayaviri	Chuquibambilla	Llally	Pucara	Taraco
Normal			0.8034		
LogNormal	<b>0.7274</b>		<b>0.8864</b>	0.8408	
Gumbel	0.7069	0.7977	0.6296	<b>0.9044</b>	0.7338
Exponential					<b>0.8141</b>
Pearson-III					0.8119
LogPearson-III		0.7102			0.5772
GEV		<b>0.824</b>			
GPA					

**Cuadro 12.15.- Distribuciones recomendadas – Grupo 3**

Distribución	Cabanillas	Ilave	Lampa	Laraqueri	Mañazo	Pizacoma	Santa Lucia	Yunguyo
Normal		<b>0.9691</b>				0.7771		
LogNormal	0.9822	0.8905	0.9385	0.719	0.8557	0.7547	0.5374	
Gumbel	<b>0.9847</b>	0.5519	<b>0.9689</b>	<b>0.9319</b>	<b>0.8858</b>	0.7456		0.6425
Exponential							0.9046	
Pearson-III	0.907		0.8222	0.7809	0.7563	<b>0.8773</b>	0.7537	
LogPearson-III							0.9075	0.9593
GEV							<b>0.9435</b>	<b>0.9927</b>
GPA								

**Cuadro 12.16.- Estimación de cuantiles locales Grupo 1**

Estacion	Distribución	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Arapa	Pearson-III	31.0	39.9	44.2	50.0	55.7	60.5	65.1	70.4	75.6
Capachica	Gumbel	32.0	39.9	45.2	51.0	56.8	61.6	66.5	78.7	90.8
Capazo	GEV	24.3	30.3	35.0	41.6	48.2	55.1	63.0	74.4	85.8
Desaguadero	Log Pearson III	41.4	52.7	60.0	67.9	75.7	82.2	88.8	96.4	104.1
Juli	GEV	39.6	50.5	59.4	72.1	84.8	98.7	114.8	139.0	163.1
Juliaca	GEV	31.7	41.2	48.9	59.9	70.9	82.8	96.5	117.0	137.5
Mazocruz	Log Normal	26.6	33.0	36.9	41.0	45.1	48.3	51.5	55.2	58.8
Pampahuta	Log Normal	34.3	40.2	43.7	47.2	50.6	53.3	55.9	58.8	61.7
Puno	GEV	35.3	45.1	52.7	63.0	73.3	83.9	95.9	112.9	129.9
R. de la Cruz	Gumbel	31.6	38.6	43.3	48.4	53.5	57.9	62.2	72.9	83.7

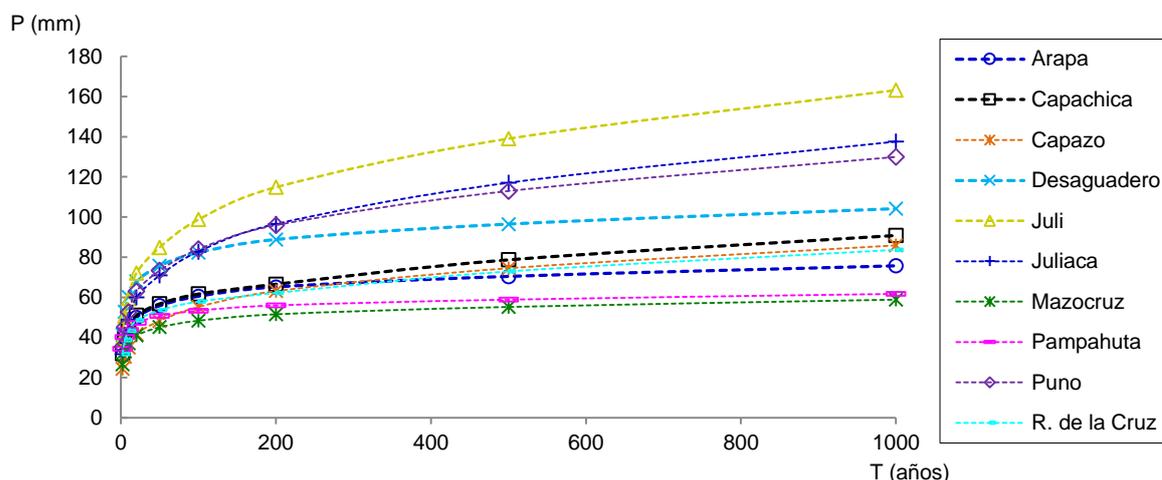
**Cuadro 12.17.- Estimación de cuantiles locales – Grupo 2**

Estacion	Distribución	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Ayaviri	Log Normal	33.1	42.2	47.9	53.9	59.8	64.7	69.5	75.1	80.6
Chuquibambilla	GEV	30.6	39.2	45.6	54.0	62.3	70.5	79.5	91.6	103.8
Llally	Log Normal	31.9	38.4	42.3	46.2	50.2	53.3	56.3	59.7	63.0
Pucara	Gumbel	33.8	43.7	50.2	57.4	64.6	70.7	76.7	88.9	106.9
Taraco	Exponencial	30.2	42.2	51.3	61.8	72.3	81.4	90.5	101.0	111.6

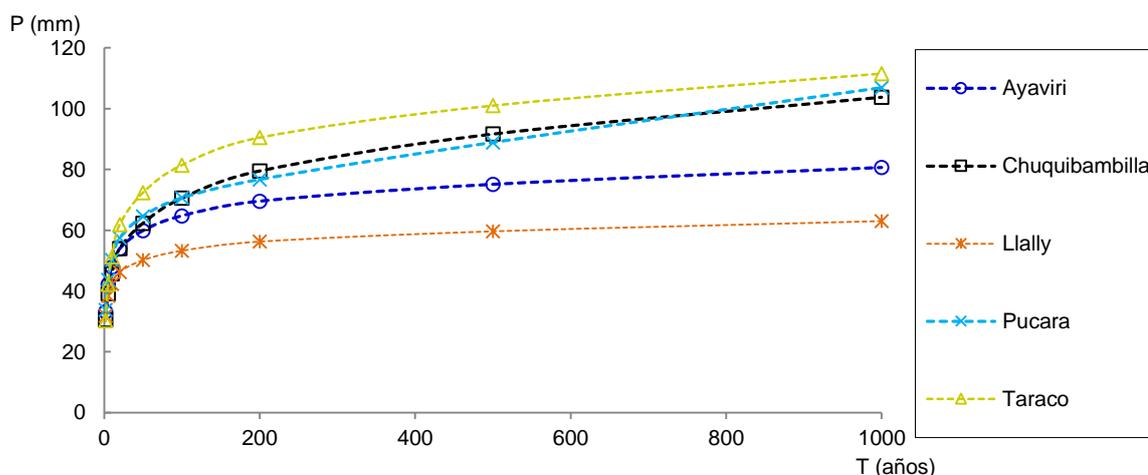
**Cuadro 12.18.- Estimación de cuantiles locales – Grupo 3**

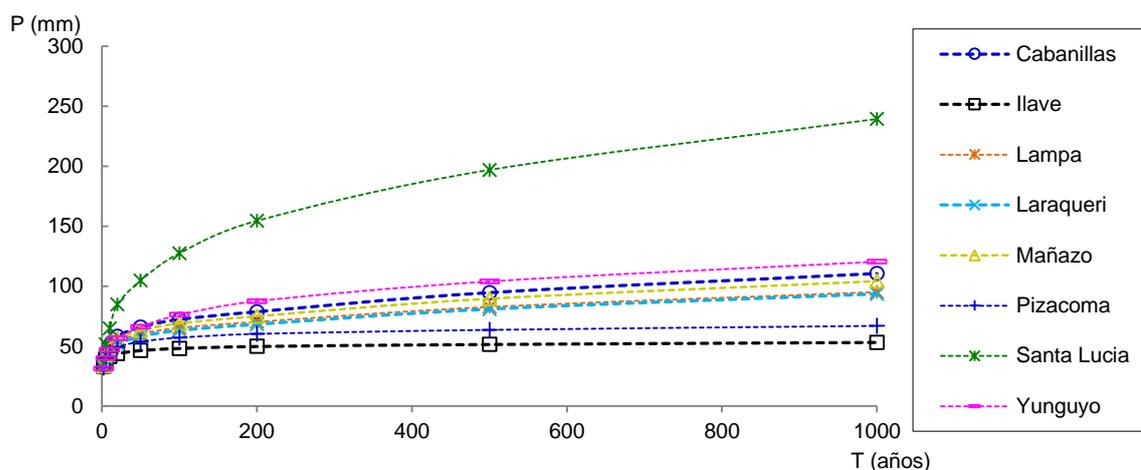
Estacion	Distribución	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Cabanillas	Gumbel	33.3	43.7	50.6	58.2	65.8	72.2	78.6	94.6	110.6
Ilave	Normal	32.8	38.4	41.2	43.8	46.3	48.1	49.8	51.5	53.2
Lampa	Gumbel	35.0	43.1	48.5	54.4	60.3	65.3	70.3	82.8	95.2
Laraqueri	Gumbel	32.3	40.5	46.0	52.0	58.0	63.1	68.2	80.8	93.5
Mañazo	Gumbel	33.3	42.8	49.2	56.1	63.1	69.0	74.9	89.5	104.2
Pizacoma	Pearson III	31.9	40.2	44.9	49.3	53.7	57.0	60.1	63.5	66.8
Santa Lucia	GEV	35.8	51.5	64.8	84.7	104.7	127.4	154.5	196.9	239.3
Yunguyo	GEV	31.3	40.1	47.0	56.5	66.1	76.1	87.5	104.0	120.4

**Grafico 12.3.- Curvas de frecuencia de precipitaciones máximas – Grupo 1**



**Grafico 12.4.- Curvas de frecuencia de precipitaciones máximas – Grupo 2**



**Grafico 12.5.-** Curvas de frecuencia de precipitaciones máximas – Grupo 3

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- La realización del Estudio Hidrológico Superficial de las cuencas Ilave y Coata, comprende la sistematización de diferentes parámetros, físicos, climáticos e hidrológicos, que servirán como herramienta de apoyo para Instituciones, Universidades y público en general que están directamente relacionados en el área de los Recursos Hídricos.
- La caracterización de las Unidades Hidrográficas se realizó utilizando las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), determinándose entre ellas los parámetros de forma, relieve y los relativos a la red de drenaje.
- Para el modelamiento hidrológico lluvia escorrentía, se utilizó el modelo GR2M que está basado en la estructura conceptual del ciclo hidrológico, cuya eficiencia de NASH en la evaluación de resultados (Calibración y validación), obteniéndose grados superiores del 69% de ajuste, estando dentro de un calificativo muy bueno para la simulación de caudales medios mensuales.
- La disponibilidad hídrica de las cuencas Ilave, Coata, Cabanillas, Lampa y Verde, se ha obtenido a partir de los percentiles 50, 75, 90 y 95, para cada una, que son provenientes de los ríos del mismo nombre siendo esta fuente hídrica superficial.
- La caracterización de los eventos hidrometeorológicos extremos se obtuvieron a partir del análisis de frecuencia local, estimando los caudales y precipitaciones para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 de periodo de retorno.

## RECOMENDACIONES

- La distribución espacial de los parámetros meteorológicos, requieren de un ingreso de datos observados en diferentes puntos de una zona geográfica, por lo general a cada 25 km, por tal motivo es de necesidad la instalación de estaciones meteorológicas en zonas altas de la cuenca llave, debido a la baja densidad de estaciones que se tiene. Otro punto en particular de la necesidad es que la cuenca tiene un comportamiento muy diferente, existiendo correlación que a más altura menor precipitación (zona sur) y para el caso de la zona norte de la cuenca, existe correlación inversa que en la zona sur (a mayor altura mayor precipitación). Desde este punto de vista la ubicación de estaciones nuevas como propuesta serian en el Centro poblado de San Antonio de Esquilache y Jancolaya, ubicado a 4670 y 4430 msnm respectivamente.

**BIBLIOGRAFIA**

1. **Aliaga ASV.** Hidrología: Tratamiento de Datos Hidrometeorológicos. Lima: Perú; 1983.
2. **Aliaga ASV.** Hidrología Estadística. Lima: Perú; 1985.
3. **Aparicio MFJ.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. México.1997.
4. **Chereque MW.** Hidrología – Para Estudiantes de Ingeniería Civil. Lima, Perú; 1994
5. **Chow VT, Maidment D R, Mays LW.** “Hidrología Aplicada”. Editorial McGraw –Hill. Bogotá: Colombia; 1994.
6. **Hastie T, Thibshirani R, Friedman J.** The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction 2da ed. Stanford: California; 2008.
7. **Linsley K, Paulhus.** Hidrología para Ingenieros. Editorial McGraw-Hill. 2da Ed.Mexico; 1988.
8. **Mejía MJA.** Hidrología Aplicada – Volumen 1. Lima: Perú; 2001.
9. **Mejía MJA.** Hidrología Aplicada – Volumen 2. Lima: Perú; 2001.
10. **Mejía MJA.** Métodos Estadísticos en Hidrología, Universidad Agraria la Molina. Lima: Perú; 1991.
11. **Reyes C, Luís V.** Hidrología Básica. Lima: Perú; 1992.
12. **Salas J.** Modelamiento Estocástico de Series Hidrológicas, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima: Perú; 1979.
13. **Vásquez VA.** Manejo de Cuencas Alto andinas. Lima: Peru; 1997.
14. **Gregory JK. and Walling ED.** Drenaige Bassin Analysis. The Bath Press. Victoria, Australia; 1985
15. **Gutiérrez E, M.** “Geomorfología”. Ed. Pearson Prentice Hall; 2008.
16. **Maidment DR.** Handbook of Hydrology. McGraw Hill. New York; 1992
17. **Verstappen HTh.** Applied Geomorphology. Geomorphological Surveys for Environmental Development. ITC. Enschede, The Netherlands; 1983.
18. **Temez, JR.** Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. 1991.