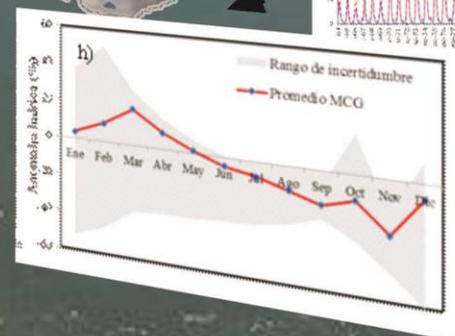
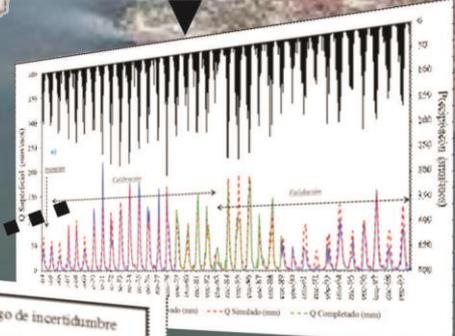
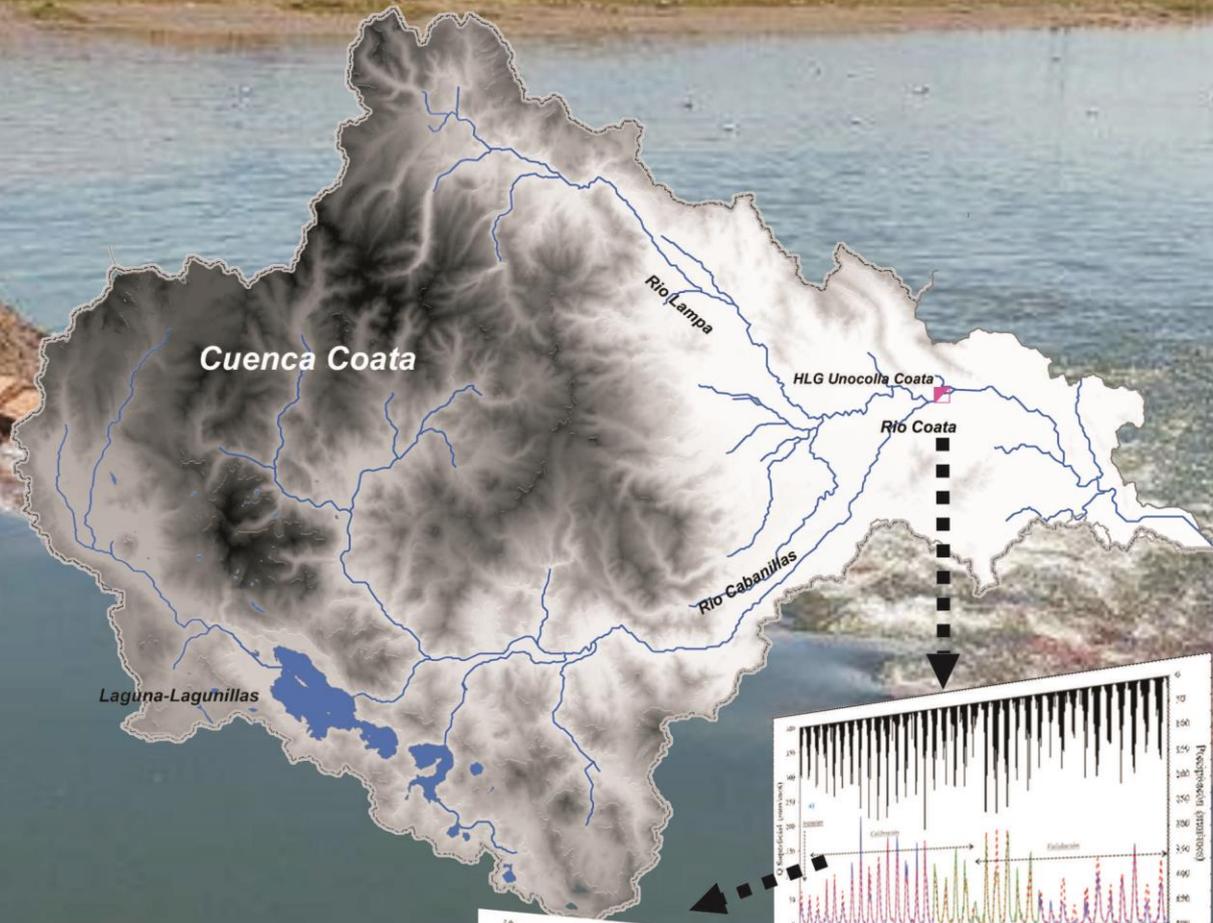


# OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL DEL RÍO COATA-PUNO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO





DIRECTORIO

**Ing. Amelia Díaz Pabló**  
*Presidenta Ejecutiva del SENAMHI*

**Ing. Oscar G. Felipe Obando**  
*Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI*

**Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte**  
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI*

REVISOR DEL ESTUDIO

**Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte**  
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI*

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

**Bach. Darwin Santos Villar**  
*Especialista en Hidrología del SENAMHI*

Lima-Perú  
Noviembre - 2016

---

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos .....	3
2. EL MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.....	3
2.2. El Cambio Climático.....	4
2.2.1. Factores causantes del Cambio Climático.....	4
2.2.2. Los Modelos Climáticos Globales.....	5
2.2.3. Predicciones, proyecciones y escenarios climáticos.....	1
2.2.4. Corrección de la distribución temporal de las variables.....	4
2.3. Modelo hidrológico .....	5
2.3.1. El proceso de transformación lluvia - escorrentía .....	5
2.3.2. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	6
2.3.3. Fuentes de incertidumbre .....	9
2.3.4. Medidas de bondad de ajuste .....	9
2.3.5. Análisis de sensibilidad .....	1
2.4. Modelo GR2M .....	1
2.4.1. Descripción .....	1
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
3.1. Área de estudio .....	5
3.2. Aspectos socio-económicos.....	6
3.2.1. Densidad de la población.....	6
3.2.2. Dinámica de la estructura económica .....	7
3.3. Aspecto físico ambiental .....	8
3.3.1. Clima .....	8
3.3.2. Suelo .....	11
3.3.3. Hidrografía .....	11
3.4. Materiales.....	11
3.4.1. Información utilizada .....	11
3.4.2. Programas utilizados.....	15
3.5. Metodología .....	15
3.5.1. Etapa I: Tratamiento de la información observada .....	16
3.5.2. Etapa II: Caracterización climatológica .....	17
3.5.3. Etapa III: Análisis de la información de los MCG.....	17
3.5.4. Etapa IV: Modelización hidrológica del modelo GR2M .....	20

3.5.5.	Etapa V: Generación de escenarios hídricos futuros .....	23
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	23
4.1.	ETAPA I .....	23
4.1.1.	Análisis exploratorio de datos (AED) .....	23
4.1.2.	Análisis de consistencia y homogeneidad.....	26
4.2.	ETAPA II .....	31
4.2.1.	Precipitación .....	31
4.2.2.	Temperatura .....	32
4.3.	ETAPA III .....	33
4.3.1.	Selección y validación de la grilla de los MCG para el periodo actual .....	33
4.3.2.	Escenarios climáticos .....	37
4.4.	ETAPA IV .....	42
4.4.1.	Calibración y validación del modelo GR2M .....	42
4.4.2.	Análisis de sensibilidad del modelo GR2M .....	44
4.5.	ETAPA V .....	45
4.5.1.	Mediante la curva de duración mensual .....	45
4.5.2.	Mediante el análisis estacional .....	46
4.5.3.	Respuesta hidrológica ante los cambios de precipitación y evapotranspiración .....	48
5.	CONCLUSIONES .....	49
5.1.	Sobre modelos climáticos globales.....	49
5.2.	Sobre el modelo hidrológico.....	49
5.3.	Sobre Escenarios hídricos .....	49
6.	RECOMENDACIONES .....	49
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
8.	ANEXO .....	54
8.1.	Análisis exploratorio de datos .....	54
8.2.	Análisis comparativo del cálculo de la Evapotranspiración potencial mensual .....	63

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Valores referenciales del criterio de NSE .....	11
Tabla 3-1 Tasa de crecimiento intercensal de 1993 y del 2007 .....	7
Tabla 3-2 Factores que intervienen en la formación y modificación de los climas.....	9
Tabla 3-3 Descripción de los modelos climáticos globales seleccionados .....	12
Tabla 3-4 Red de estaciones hidrológicas para el estudio .....	13
Tabla 3-5 Red de estaciones meteorológicas para el estudio.....	13
Tabla 3-6 Hoja de cálculo del modelo GR2M .....	22
Tabla 4-1 Estadística descriptiva de variables hidroclimáticas .....	25
Tabla 4-2 Características de la información de las estaciones hidrométricas.....	27
Tabla 4-3 Matriz de correlación de las estaciones pluviométricas. ....	28
Tabla 4-4 Características de la información de las estaciones pluviométricas .....	31
Tabla 4-5 Selección de las grillas de los MCG - precipitación.....	34
Tabla 4-6 Selección de las grillas de los MCG - temperatura .....	34
Tabla 4-7 Estadísticos de validación entre la información de los MCG y la información observada areal .....	34
Tabla 4-8 Calibración de parámetros estadísticos del mes de enero del modelo MRI-CGCM3.....	37
Tabla 4-9 Sesgo en valor absoluto entre el régimen pluviométrico observado y de los MCG.....	40
Tabla 4-10 Estadísticas de la calibración y validación del modelo hidrológico .....	44
Tabla 8-1 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Lagunillas a Pucara .....	57
Tabla 8-2 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Mañazo a Capachica.....	58
Tabla 8-3 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Puno a Imata .....	59
Tabla 8-4 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Pampahuta a Cabanillas .....	60
Tabla 8-5 Estadística descriptiva de la temperatura media mensual Estación Lagunillas a Cabanillas .....	61
Tabla 8-6 Estadística descriptiva de la temperatura media mensual Estación Puno a Imata .....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos, entre 1970-2004.....	5
Figura 2-2 Evolución de los modelos climáticos globales .....	1
Figura 2-3 Trayectoria de concentraciones de CO2 de los distintos escenarios .....	3
Figura 2-4 El ciclo hidrológico, evaporación, transpiración y precipitación .....	5
Figura 2-5 El proceso lluvia - escorrentía .....	6
Figura 2-6 Clasificación de los modelos hidrológicos según la representación espacial .....	7
Figura 2-7 Efectos de la medida de ajuste sobre la calibración de un modelo .....	10
Figura 2-8 Esquema de la precipitación de transformación a caudal .....	2
Figura 2-9 Esquema conceptual y ecuaciones del modelo GR2M .....	3
Figura 3-1 Ubicación geográfica de la cuenca del río Coata .....	5
Figura 3-2 Ubicación política de la cuenca del río Coata .....	6
Figura 3-3 Tasa de crecimiento promedio anual de la población total, 1940-2007.....	7
Figura 3-4 Factores que intervienen en la formación y modificación de los clima .....	9
Figura 3-5 Red hidrometeorológica de la cuenca del río Coata .....	14
Figura 3-6 Esquema metodológico para el desarrollo de los escenarios hídricos .....	16
Figura 4-1 Régimen y variabilidad de caudales medios mensuales registrados en la estación hidrológica - Unocola, periodo (1964-1999) .....	23
Figura 4-2 a) Diagrama de cajas de la serie de precipitación total anual por estación y b) Diagrama de cajas de la serie de temperatura media anual por estación. (Símbolo: azul la mediana y rojo la media) .....	24
Figura 4-3 Comparación de los hidrogramas de los ríos Coata y Ramis.....	26
Figura 4-4 a) Índices anuales y b) Suma de índices anuales del vector regional de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la región Titicaca .....	27
Figura 4-5 Grupos de índices anuales del vector regional y de las estaciones pluviométricas (Brunet Moret) ...	29
Figura 4-6 Suma de los índices anuales del vector regional y de las estaciones pluviométricas de cada grupo ..	30
Figura 4-7 Variación estacional (a, d); interanual (b,e) y altitudinal (c ,f) de la precipitación y temperatura areal promediada sobre la cuenca del río Coata .....	32
Figura 4-8 Ubicación de los centroides de las grillas del MCG-CCSM4 y observado.....	33
Figura 4-9 Comparación de la variabilidad y régimen pluviométrico de los MCG y la información observado, periodo 1964-1989.....	35
Figura 4-10 Comparación de índices de precipitación anual observados (rojo) y simulados (verde y azul) del clima actual, periodo 1964-1989 .....	36
Figura 4-11 Comparación de la variabilidad y régimen térmico de los MCG y la información observada actual, periodo 1964-1989.....	37
Figura 4-12 Ajuste probabilísticos de la precipitación y temperatura mensual de los datos observados y simulados por el MCG .....	38
Figura 4-13 Sesgo en (%) de la precipitación media multianual de los MCG respecto a la observada. MCG (barra azul) y su promedio (barra roja).....	39
Figura 4-14 Comparación del régimen pluviométrico observado con los MCG.....	39
Figura 4-15 Sesgo anual de la temperatura media multianual de los MCG (barra azul) y su promedio (barra roja) respecto a la observada .....	40
Figura 4-16 Comparación de la media mensual de la precipitación observada, de los MCG y su promedio .....	40

Figura 4-17 Anomalía de la precipitación y temperatura media multianual .....	41
Figura 4-18 Régimen mensual de la precipitación observada y simulada .....	41
Figura 4-19 Régimen mensual de la temperatura observada y simulada .....	42
Figura 4-20 a) Modelamiento hidrológico del río Coata b) Diagramas de dispersión de caudales observados y simulados .....	43
Figura 4-21 Dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de avenidas diciembre-abril y estiaje mayo-noviembre .....	43
Figura 4-22 Sensibilidad de los parámetros $X_1$ y $X_2$ .....	44
Figura 4-23 Cambio en magnitud, frecuencia y duración de la respuesta hidrológica debido al cambio climático para la cuenca del río Coata .....	46
Figura 4-24 Régimen estacional de los caudales medios simulados y las proyecciones de los 6 modelos climáticos de la cuenca del río Coata .....	47
Figura 4-25 Anomalías, de las variables media multianual de la precipitación, evapotranspiración y caudal .....	48
Figura 8-1 Diagrama de cajas de la precipitación total mensual. Estación Lampa a Estación Taraco .....	54
Figura 8-2 Diagrama de cajas de la precipitación total mensual. Estación Capachica a Estación Ichuña .....	55
Figura 8-3 Diagrama de cajas de la temperatura media mensual. Estación Lagunillas a Estación Llalli .....	56
Figura 8-4 Comparación de la EP mensual calculado a partir de la temperatura diaria y la temperatura mensual, utilizando la metodología de Oudin .....	63

## RESUMEN

La cuenca del río Coata está ubicado en el departamento de Puno, al sur de Perú; éste podría verse afectado, ante un potencial cambio futuro principalmente en las condiciones medias del clima, por lo que es de sumo interés inferir qué cambios se presentarían en el caudal del río Coata, fuente indispensable dedicada en mayor medida al sector agropecuario.

En este contexto, el estudio ha generado la disponibilidad hídrica superficial del río Coata para el horizonte 2050-2075; comparado respecto al periodo base 1964-1989. Para ello se utilizó las salidas de 6 modelos climáticos globales (MCG) descargados del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados – Fase 5 (siglas en inglés, CMIP5) y una Trayectoria de Concentración Representativas (siglas en inglés, RCP8.5). Debido a la baja resolución espacial de los MCG, se seleccionó la grilla que mejor simule el clima observado y, a escala temporal, se utilizó la técnica denominada (quantile-mapping) para corregir el error sistemático de los modelos. Dichos escenarios alimentan al modelo hidrológico francés Ingeniería Rural de 2 parámetros a paso mensual (GR2M), la cual fue calibrada y validado obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.84 y 0.64 respectivamente, lo que representa un rendimiento muy bueno del modelo.

Los resultados muestran que parte de los modelos seleccionados del CMIP5 representan mejor la dinámica estacional del clima observado. En base a los MCG seleccionados, la esorrentía superficial futura en promedio indican: Un aumento la oferta hídrica anual en 6.3%; a nivel mensual, la mayor anomalía hídrica se presentó en marzo (19.2%) y la menor, en noviembre (-27.4%).

En general, los impactos del cambio climático en la disponibilidad superficial del río Coata, varían según el MCG, manteniendo una relación directa con los cambios de precipitación, a pesar del aumento de la evapotranspiración potencial (EP) durante el siglo XXI.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), como ente rector en las actividades hidrológicas y meteorológicas del país; administra una red de observación hidrometeorológicas que permite el desarrollo de estudios e investigación, que se vienen elaborando a través de la Dirección de Hidrología, las cuales están relacionados a la disponibilidad del recurso agua. En el marco del plan operativo 2016 se ha elaborado el estudio "Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático".

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Coata, que es una de las cuencas de mayor importancia económica del departamento de Puno debido a las diversas actividades (agricultura, ganadería etc.) económicas que se desarrollan. En la parte media de la cuenca se ubica una de las reservas hídricas más importantes del país "Lagunillas" cuyo espejo de agua dulce (65.12 Km<sup>2</sup>) podría dotar de agua potable a ciudades grandes como Puno, Juliaca y Lampa; así como ampliar la frontera agrícola y generar electricidad. El embalse de Lagunillas tiene un almacenamiento de 500 millones de metros cúbicos disponibles que se renuevan en forma permanente con las lluvias y ha permitido planificar proyectos de irrigación (Sistema Integral Lagunillas) con un área total bajo riego de 27,450 ha, siendo el mayor sistema regulado de la Región Puno (INRENA, 2007).

El desarrollo del estudio se basó en el uso de las proyecciones de 6 (MCG), para el escenario de forzamiento radiativo RCP8.5 analizado para un futuro a mediano plazo 2050-2075. La corrección de la escala temporales de los MCG se basó en la metodología utilizada por Watanabe et al. (2012), la cual conserva la señal climática de los MCG y corrige el error sistemático mediante la técnica de quantile-mapping (Panofsky and Brier, 1968). Para la generación de escenarios hídricos se utilizó el modelo hidrológico GR2M, a paso mensual, que permita acoplar las salidas de los MCG y así evaluar los posibles efectos que ocasionaría el Cambio Climático en la disponibilidad hídrica futura del río Coata.

### 1.2. Justificación

Sobre la parte baja de la cuenca del río Coata está ubicado la ciudad de Juliaca considerada la decimotercera ciudad más poblada del país y una de las más importantes del departamento de Puno, que albergaba en el 2007, una población de 216,716 habitantes (INEI, 2011). Esta ciudad ha sido escenario en épocas pasadas de eventos extremos, como lo suscitado en 1982-1983 donde la población específicamente rural, sufrió los estragos de la escasez de precipitaciones y en épocas donde las precipitaciones han sido intensas, han ocasionado inundaciones de áreas agrícolas y pastoreo como lo sucedido en 1984 y 1986, esto debido en gran parte a que los lechos de los ríos presentan riberas bajas (Océano, 2009).

Todos estos fenómenos se vienen incrementando con el "Cambio Climático" que hoy en día es uno de las preocupaciones más álgidas de la humanidad. Actualmente el indicador más conocido de cambio climático es el incremento de la temperatura global, que en el Perú está asociado al retroceso glaciar considerado un excelente indicador de la evolución del clima (Thompson, 2010). Además, según el Congreso Nacional del Medio Ambiente en los últimos 22 a 35 años, el Perú ha perdido el 22 por ciento

de la superficie glaciaria, lo que es equivalente a 10 años de consumo de agua en Lima (Vargas, 2009). Por otra parte este incremento de temperatura, aumentaría la evapotranspiración, afectando seriamente las componentes del ciclo hidrológico, repercutiendo potencialmente en el contenido de vapor de agua atmosférica causando cambios en los patrones de precipitación a gran escala y la frecuencia de eventos extremos (Buytaert, 2011).

Es por ello que en las últimas décadas la comunidad científica ha dedicado un gran esfuerzo en tratar de explicar las posibles razones de este cambio y tratar de predecir las tendencias futuras. Para ello se han desarrollado herramientas como los MCG, que permite simular la dinámica del sistema climático e investigar las causas del cambio y predecir sus efectos (Gutiérrez, 2006). Sin embargo, es una labor compleja y las proyecciones climáticas no son fáciles de incorporar en los estudios hidrológicos debido a su baja resolución espacial sin mencionar que las proyecciones de los MCG muestran una marcada diferencias entre ellos. Sin embargo, aunque estos MCG son imperfectos, son las únicas herramientas eficaces que representan el complejo conjunto de procesos que producirán el cambio climático futuro (Ardoin et al., 2009).

Ante este contexto, es necesario generar información importante de los posibles efectos del cambio climático en la escorrentía superficial de la cuenca del río Coata. Cuyos resultados a mediano plazo serán un complemento a los tomadores de decisiones en lo que respecta a la planificación de la disponibilidad hídrica futura y una guía para la evaluación de la incertidumbre de los MCG en la hidrología.

### **1.3. Objetivos**

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

Determinar la oferta hídrica superficial mensual del río Coata para futuros escenarios de cambio climático en el horizonte 2050-2075.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Validar el escenario climático actual y corregir los escenarios climáticos futuros para la simulación hidrológica.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M del tipo precipitación - escorrentía para futuros escenarios climáticos en la cuenca del río Coata.
- Simular la disponibilidad hídrica para el horizonte a mediano plazo (2050-2075)

## **2. EL MARCO TEÓRICO**

### **2.1. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**

Con el objetivo de analizar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias tanto medioambientales como socioeconómicas, y de formular estrategias de respuesta realistas, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), fundaron en 1988 el grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), siendo el principal organismo internacional que se encarga de coordinar todos los estudios sobre cambio climático y que está organizado en tres grupos; el Grupo I, trabaja sobre los aspectos científicos; el Grupo II, sobre los impactos; y, el Grupo III, sobre las posibles opciones de mitigar este cambio (IPCC, 2007a). Hasta la fecha el IPCC ha publicado cinco informes generales, en 1990, 1995, 2001, 2007, y un 5to informe finalizado en el 2014 que constituyen recopilaciones actualizadas sobre el sistema climático y su variabilidad.

## 2.2. El Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUCC), describe a este proceso como la variación climática atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante periodos comparables (García, 2014).

Para el IPCC (2007a), el término "cambio climático" denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadístico) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos; indica todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana.

### 2.2.1. Factores causantes del Cambio Climático

Nuestro planeta absorbe la energía de la radiación del Sol, esta energía es redistribuida luego por las circulaciones atmosférica y oceánica, y es irradiada nuevamente al espacio en longitudes de onda largas (infrarrojas). En promedio, la energía de la radiación solar que ingresa con la radiación terrestre saliente se equilibra, y, cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o perdida en el espacio, o que altere la redistribución de energía dentro de la atmósfera y entre atmósfera, tierra y océano, puede afectar el clima. Entonces, un cambio en la energía radiativa neta disponible para el sistema mundial de Tierra-atmósfera se denomina forzamiento radiativos y si son positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior y negativos tienden a enfriarlas (IPCC-GTI, 2001).

Uno de estos factores causante del cambio climático son las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles, que alteran el balance de energía del sistema climático y afectan la absorción, dispersión y la emisión de la radiación en la atmósfera y en la superficie de la Tierra. Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarbonos que son grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo (IPCC, 2007b). Por ejemplo, en la Figura 2-1 se observa que los GEI por efecto de la actividad humana han aumentado desde la era preindustrial, en un 70 por ciento entre 1970 y 2004.

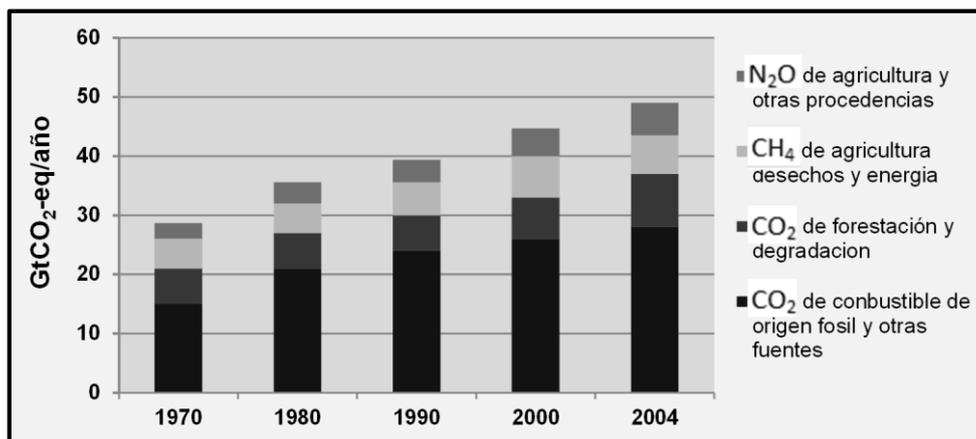


Figura 2-1 Emisiones anuales mundiales de GEI antropogénicos, entre 1970-2004

Fuente: IPCC-2013 Cambio climático 2007 Informe de síntesis

### 2.2.2. Los Modelos Climáticos Globales

Para modelizar la evolución del sistema climático ha sido necesario desarrollar complejos modelos numéricos, denominados modelos climáticos globales que permiten simular la respuesta del clima a diferentes escenarios futuros de emisión y así estimar el cambio futuro del sistema con cierta confianza (Gutiérrez, 2006).

Según el IPCC-GTI (2001), un modelo climático es una representación matemática simplificada del sistema climático (la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criósfera y la biósfera) de la Tierra y se basan en las leyes de la física tales como la conservación de energía y masa, que son representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven en modelos tridimensional sobre el globo terráqueo. Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: la dinámica del sistema del clima, que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; la física del sistema climático, tal como la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y, otros factores, tales como la interacción océano-atmosfera, topografía, y parámetros de la vegetación. Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO).

La fiabilidad de los modelos climáticos se suele valorar analizando: su destreza para reproducir el clima actual, su habilidad para simular los cambios climáticos observados en las últimas décadas y el grado de acuerdo entre las proyecciones de cambio climático futuro que ofrecen (De Castro, 2007).

Existen muchos procesos físicos, que al tener una escala espacial menor que la celda, como por ejemplo, los que están relacionados con las nubes o la convección oceánica, no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala. Esta técnica se conoce con el nombre de parametrización y todos los modelos dependen de un conjunto de parametrizaciones que pueden ajustarse para afinar la influencia de los distintos fenómenos (Gutiérrez, 2006).

Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino, que luego se fueron integrando gradualmente. En la Figura 2-2 se observa la evolución de los modelos climáticos en el pasado, presente, y su posible evolución en el futuro, la cual se caracterizó en un principio por el desarrollo separado de los distintos componentes, que luego se fueron acoplando en modelos climáticos integrales. El acoplamiento de los distintos componentes es un proceso difícil. Recientemente se han incorporado componentes del ciclo del azufre para representar las emisiones de azufre y la forma en que éstas se oxidan para formar partículas de aerosoles (IPCC-GTI, 2001).

El objetivo final es, por supuesto, incluir en el modelo la mayor parte posible del sistema climático de la Tierra, lo cual es desarrollado por grandes centros de investigación que ponen sus resultados a disposición de la comunidad científica para su estudio.



Figura 2-2 Evolución de los modelos climáticos globales  
Fuente IPCC-2001 Cambio climático 2001: La base científica

### 2.2.3. Predicciones, proyecciones y escenarios climáticos

El término predicción se suele emplear referido a la evolución determinista del estado futuro de la atmósfera, una vez conocidas las condiciones iniciales, que se fija en alrededor de dos semanas,

entonces en predicciones a corto plazo (hasta 2, 3 días) del estado de la atmósfera se realizan con modelos numéricos basados en la discretización de las ecuaciones termo-hidrodinámicas. Si se extiende la predicción determinista hasta el mediano plazo (4-10 días), la calidad de las predicciones cae drásticamente y en plazos más largos el comportamiento caótico de la atmósfera hace que sea necesario ensayar las predicciones de tipo probabilístico basadas en multitud de realizaciones de la predicción por conjunto o mediante poblaciones (ensemble prediction).

En los plazos temporales más largos, (predicciones estacionales, anuales, decadales o seculares) carece de sentido la predicción determinista. En este caso la predicibilidad viene asociada a los componentes del sistema climático que evolucionan más lentamente, como es el caso de los océanos, los hielos marinos etc., lo cual está referido a sus valores promedio, es decir a su climatología. En el caso de predicciones seculares, hay un elemento adicional de incertidumbre que es la composición atmosférica futura, como consecuencia de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) y de aerosoles sulfurosos. Para que quede patente el carácter no determinista de las predicciones seculares y por el hecho de que las predicciones están fuertemente condicionadas por elementos adicionales de incertidumbre, asociado al desarrollo socio-económico, es más razonable hablar de proyecciones climáticas. La principal herramienta generalmente admitida para realizar dichas proyecciones son los modelos de circulación general acoplados de atmósfera y océano (Rodríguez, 2006).

Entonces, para conocer la evolución futura del clima terrestre es necesario conocer primero cuál será la evolución de los distintos forzamiento radiativos del sistema en el futuro (emisiones de gases, etc.), (Gutiérrez, 2006). Y como esta evolución está relacionada con los distintos factores socio-económicos futuros de desarrollo global en función de las variables: estado, crecimiento poblacional y economía para distinto periodo de tiempo (Palma, 2009). Entonces un escenario de emisión, es un resultado plausible y consistente, construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima (IPCC, 2007). Dichos escenarios están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas, incorporando una serie de factores demográficos, económicos y tecnológicos, junto con las emisiones de GEI resultantes. La descripción de los escenarios perteneciente al 4to informe (AR4) se detallan en el (IPCC, 2007).

Después del último informe del IPCC (AR4, 2007) se hizo clara la necesidad de nuevos escenarios de emisiones, pasando así de los escenarios del "Special Report on Emission Scenarios" (SRES) (Nakicenovic et al., 2000) a los "Representative Concentration Pathways" (RCPs) o "vías de concentraciones representativas".

Para los tomadores de decisiones y científicos, había un interés creciente en tener escenarios que explícitamente evaluaran distintas estrategias y políticas climáticas de investigación y de adaptación. De esta manera, se puede ligar directamente una cierta respuesta climática a una cierta estrategia de mitigación y así evaluar los costos y beneficios de distintas estrategias.

Los nuevos escenarios fueron desarrollados por la "Integrated Assessment Modelling Community" (IAMC). Representantes de las comunidades de desarrolladores de escenarios socio-económicos,

modeladores climáticos, mitigación y adaptación, se juntaron, para, de manera colaborativa, desarrollar estos nuevos escenarios, que es descrito en Moss et al (2010).

En base a características acordadas para la definición inicial de los nuevos escenarios de emisiones descritas en Rojas (2012), se desarrollaron 4 posibles “vías representativas de concentraciones” de gases invernaderos, que tienen su nombre de acuerdo al forzamiento radiativo que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>, RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>, RCP 6.0 W/m<sup>2</sup> y RCP 8.5 W/m<sup>2</sup> y que son mostradas en la Figura 2-3, en conjunto con los antiguos escenarios SRES.

Además, en la Figura 2-3, se observa que el nuevo escenario RCP2.6 tiene concentraciones mucho más bajas que cualquiera de los escenarios SRES, y que el escenario RCP8.5 llega a fines de siglo con concentraciones de CO<sub>2</sub> más altas que el escenario SRES A<sub>2</sub>.

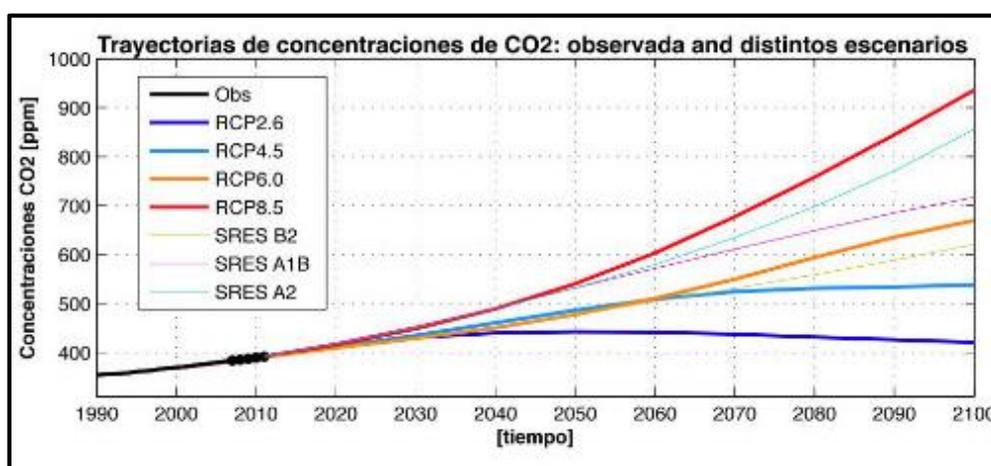


Figura 2-3 Trayectoria de concentraciones de CO<sub>2</sub> de los distintos escenarios

Fuente Rojas, 2012

Según Rojas (2012), se describen brevemente los principales supuestos y características de los 4 nuevos escenarios.

#### a. RCP 2.6

Esta vía o ruta de emisiones y concentraciones es representativo sobre escenarios de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C a fin de siglo. Esto se logra limitando el forzamiento radiativo a valores menores 3W/m<sup>2</sup>, por esto la meta de este RCP es de 2.6W/m<sup>2</sup>.

Los supuestos para lograr este objetivo incluyen: crecimiento de población mundial medio, crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB), como de la intensidad de emisiones medias también (emisiones/PIB). Requiere de tecnologías de almacenamiento y captura de carbono y disminución de emisiones de bio-energías, gas natural, petróleo y carbono a partir del año 2020. Se debe destacar que este escenario requiere de la participación y compromiso de todos los países para llegar a la meta de forzamiento radiativo 2.6W/m<sup>2</sup>.

#### **b. RCP 4.5**

Este es un escenario de estabilización, que llega a un forzamiento radiativo de  $4.5 \text{ W/m}^2$  al 2100. Esto requiere de políticas climáticas, que incluye imponer precios al uso de carbono. La población mundial llega a 9 billones en 2065 y se reduce a 8.7 billones en 2100. El PIB mundial crece en un orden de magnitud, y la necesidad energética en 3 órdenes de magnitud. Además, de imponer precios al carbón, la tecnología de captura y almacenamiento, se desarrolla de manera que la industria eléctrica llega a ser un sumidero neto de carbón. En este escenario las emisiones de GEI llegan a su máximo alrededor del 2040, de ahí comienzan a bajar hasta el 2080, donde se estabilizan.

#### **c. RCP 6.0**

Esta vía representa emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y cambio de uso de suelo que se traducen en un forzamiento radiativo de  $6 \text{ W/m}^2$  al 2100. Esto requiere disminuciones significativas a partir del 2060 que se logran a través de la imposición de políticas climáticas, es decir, que limiten las emisiones vía precios y tecnología de captura de carbón. La población mundial crece hasta 9.8 billones al 2100. Por ejemplo, el promedio global de cambio de PIB per cápita varía 1.6% anualmente durante 2000–2060 y 1.3–1.4% durante 2060–2100. La intensidad energética disminuye de -1.2%/año antes de 2060 a - 1.5%/año, entre 2060-2100.

#### **d. RCP 8.5**

El escenario RCP8.5 representa una vía de emisiones y concertaciones relativamente altas. Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a importantes demandas energéticas y consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático.

### **2.2.4. Corrección de la distribución temporal de las variables**

Las variables climáticas simuladas por los modelos de circulación global (MCG) con frecuencia muestran errores sistemáticos con respecto a las observaciones, lo que limita el uso en estudios de impacto en los recursos hídricos, lo que hace necesario realizar un post-proceso a la salida de los MCG (Ayala, 2011). Los métodos de corrección del error sistemático (sesgo) lo cual se suele denominar en la literatura (bias-correction), consiste en sustraer la diferencia entre las climatologías de los modelos y las observadas. El método quantile-mapping o método de mapeo de cuantiles (Panofsky et al, 1968) es un método más robusto, en el que se corrigen las desviaciones en cada cuantil. Una alternativa es ajustar, por medio de un análisis de frecuencia, una distribución de probabilidades ya conocida y corregir en base a ella. El objetivo final de esta corrección es lograr una semejanza aceptable entre la curva de duración observada y modelada. La principal desventaja es el supuesto de estacionariedad de los modelos, es decir, que las relaciones o distribuciones entre pequeña y gran escala establecidas en el período histórico no cambiarán en el futuro (Hamlet et al., 2010).

### 2.3. Modelo hidrológico

Un sistema es un conjunto de elementos en interacción dinámica organizados en función de un objetivo. Un modelo es una representación simplificada de un sistema real (Gustavo, 2009).

Entonces, un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representa a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar las respuesta de la unidad hidrológica, bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas (Weber et al., 2010). Y son importantes en la gestión de recursos hídricos ya que permiten la simulación y predicción de fenómenos físicos de un sistema a corto, mediano y a largo plazo. Además, permiten analizar relaciones causa-efecto, sin realizar cambios en sistemas reales (Chávarri, 2009). Un ejemplo de sistema es lo que presenta la naturaleza, el ciclo hidrológico (Figura 2-4), la cual constituye un sistema de tipo no lineal, distribuido, continuo y casual (Gustavo, 2009). Lo cual las limitaciones inherentes al hombre obligan a representar el alto grado de complejidad que propone la naturaleza, mediante un modelo lineal, concentrado y discreto.

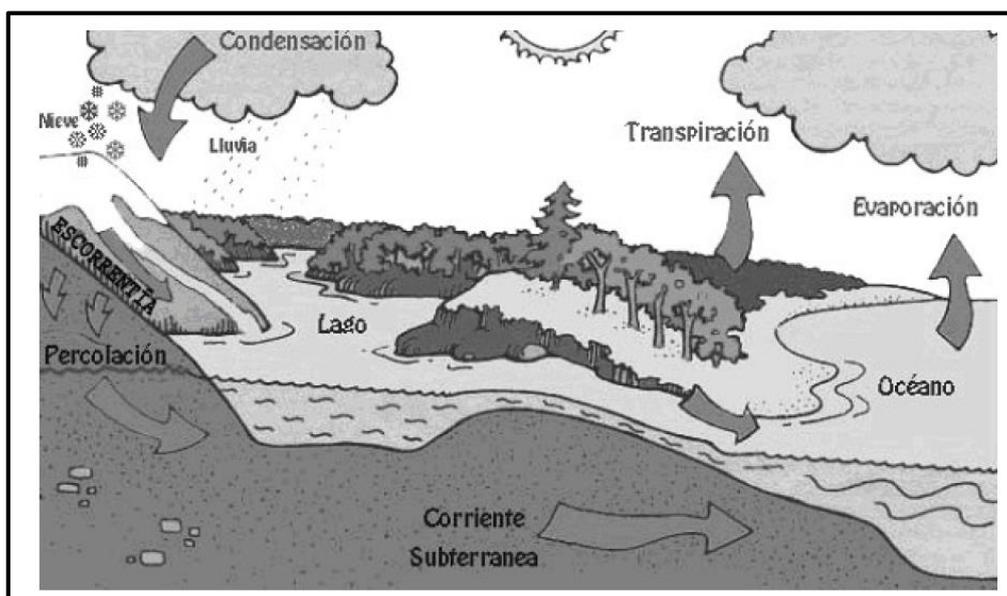


Figura 2-4 El ciclo hidrológico, evaporación, transpiración y precipitación

Fuente Gustavo (2009)

#### 2.3.1. El proceso de transformación lluvia - escorrentía

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1992). La transformación lluvia-escurrimiento es el más complejo de los procesos del ciclo hidrológico, debido a la dinámica de los diferentes procesos físicos y la gran variedad de escalas espaciales y temporales que intervienen en una cuenca, para lo cual se requiere de una abstracción a través de un modelo que simplifique suficientemente el sistema como para poder simular conceptualmente sus partes. En forma más detallada se observa en la Figura 2-5.

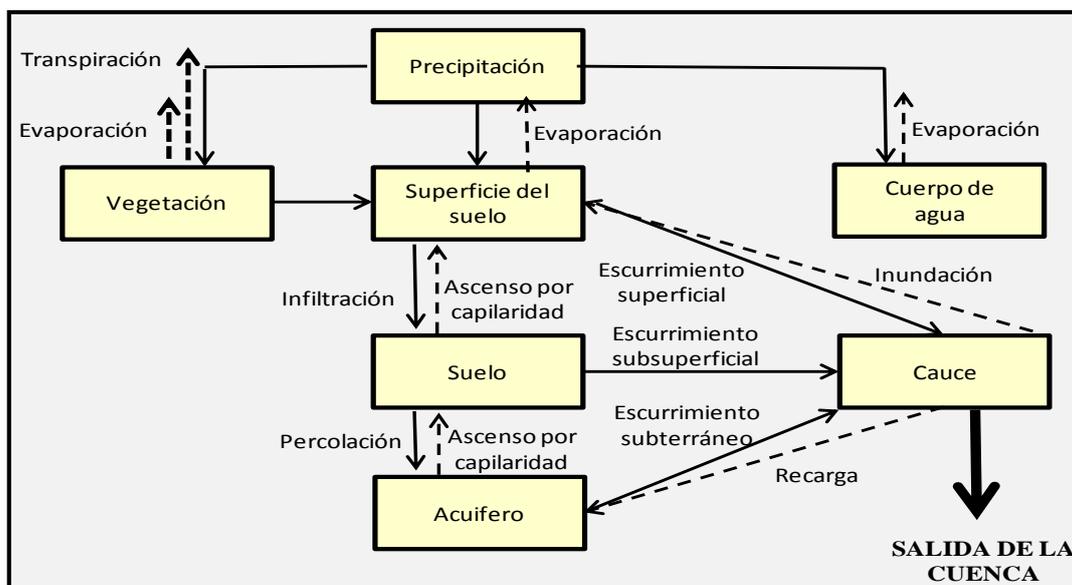


Figura 2-5 El proceso lluvia - escorrentía  
Fuente Replicado de Gustavo (2009)

Teniendo como referencia la Figura 2-5, puede mencionarse que el agua, sigue diversos caminos (escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo). Los flujos sobre el terreno, forman el escurrimiento superficial y es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca, por ello, está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo. Una parte del agua de precipitación que se infiltra, escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él, denominándose escurrimiento subsuperficial, cuya rapidez va a depender de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo. La otra parte que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo, y es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), y es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base. Lo importante, en realidad, es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes avenidas (Aparicio, 1992).

### 2.3.2. Clasificación de los modelos hidrológicos

Existe numerosas clasificaciones de los modelos hidrológicos, según Weber et al. (2010), pueden dividirse en dos grandes grupos: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema. Según Mediero (2007), los modelos hidrológicos se clasifican desde tres puntos de vistas:

*a. En función de la representación espacial.*

**Modelos agregados:** Son aquellos que consideran una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca utilizando como variable la precipitación media (Figura 2-6a). No considera la variabilidad espacial. La ventaja de estos modelos es que no necesitan de la calibración de demasiados parámetros y una expresión matemática más sencilla, pero por el contrario dan valores medios (Fernández et al., 1997).

**Modelos semidistribuidos:** Son aquellos que permiten una cierta variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros a través de los submodelos que los componen (Figura 2-6b), mediante la división de la cuenca en multitud de pequeñas subcuencas con lluvias y parámetros constante en cada uno de ellos.

**Modelos distribuidos:** Son aquellos que permiten la variabilidad de la lluvia y de los parámetros, mediante la división de la cuenca en celdas (Figura 2-6c), en las que simulan los diferentes procesos hidrológicos. Este tipo de modelo es más versátil y recoge mejor la heterogeneidad del medio natural, y por el contrario necesitan un aporte de datos mucho mayor y calibrar muchos parámetros, procesos que de no ser realizados correctamente pueden llevar a resultados aparentemente muy exactos pero muy alejados de la realidad.

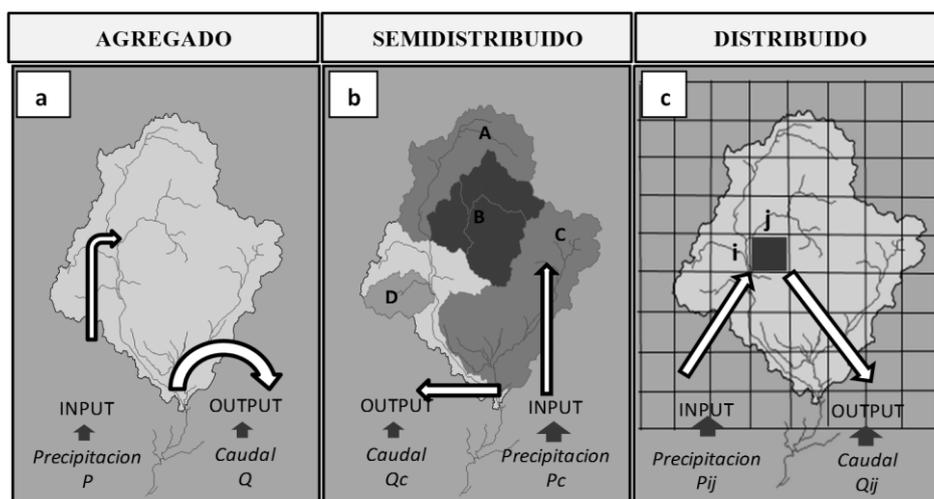


Figura 2-6 Clasificación de los modelos hidrológicos según la representación espacial  
Fuente Replicado de Fernández (2009)

*b. En función del tipo de representación de los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca.*

**Modelos métricos:** son los que tienen una gran dependencia respecto de los datos observados, realizando una búsqueda sobre los mismos para caracterizar la respuesta del sistema, mediante un método de extracción de información a partir de los datos existentes, es por ello que estos se construyen con una consideración pequeña o nula de los procesos físicos que ocurren en el sistema hidrológico.

El ejemplo más común de este tipo de modelos son los basados en el concepto de hidrograma unitario, que simulan la respuesta de caudal a un episodio de lluvia mediante una función de pérdidas no lineal y una función de transferencia lineal. La gran ventaja de estos modelos es que requieren de una cantidad mínima de información, pero tienen un rango de aplicación limitado por la variabilidad de los datos observados y no son capaces de tener en cuenta los cambios producidos en la cuenca, por ejemplo la expansión urbana, sin realizar modificaciones en el modelo.

**Modelos conceptuales:** Son los que representan los procesos hidrológicos más importantes mediante una base de conocimiento inicial, y se inicia con la mejora de la capacidad computacional, en la cual la representación hidrológica se realiza mediante relaciones simplificadas con parámetros que no se pueden medir físicamente en la realidad. Por tanto, para aplicar estos modelos a una cuenca determinada deben ser calibrados con los datos observados en la misma.

La principal desventaja de estos modelos estriba en el concepto de "equifinalidad" es decir, la existencia de diferentes valores de los parámetros del modelo con los que se obtienen similares medidas de ajuste. Por tanto, si los valores de los parámetros no pueden ser definidos de manera única, los parámetros no pueden asociarse directamente a las características de las cuencas, y por tanto el modelo no puede aplicarse a nuevas cuencas sin observaciones, e incluso a la misma cuenca después de haberse producido cambios en la misma.

**Modelos físicamente basados:** Estos modelos utilizan los conocimientos más recientes del comportamiento físico de los procesos hidrológicos, realizando la simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca mediante la utilización de las ecuaciones de continuidad clásicas, resolviendo las ecuaciones diferenciales de forma numérica mediante la aplicación de métodos de diferencias finitas o elementos finitos. Estos modelos son necesariamente de tipo distribuido, y por tanto, permiten la descripción de los fenómenos en cada una de las celdas del sistema, tanto desde el punto de vista de los parámetros como de la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales, por tanto el sistema físico se representa mediante un sistema de ecuaciones diferenciales que expresan la masa, el momento y el balance de energías.

La gran ventaja de los modelos físicamente basados utilizan parámetros que en principio pueden ser medidos directamente en el campo y tienen un sentido físico directo, por tanto, si los valores de estos parámetros se pueden determinar a priori, estos modelos pueden ser aplicados a cuencas sin datos observados, lo cual estaría ante una representación matemáticamente ideal de un fenómeno real, la cual depende de una gran cantidad de información y un nivel de elevado tiempo computacional.

### c. En función de la extensión temporal en la que se puede aplicar el modelo hidrológico

**Modelos de episodio o eventos aislados:** diseñados para simular eventos de cortos intervalos de tiempo, normalmente de un único episodio de lluvia. Estos modelos simulan los procesos infiltración y escorrentía superficial teniendo una aplicación fundamental para simular caudales de avenida en el caso de que la escorrentía directa es la principal fuente de la escorrentía total, sin embargo no deben ser aplicables a la simulación de caudales de estiaje ni caudales diarios.

**Modelos de procesos continuos:** permiten la simulación de caudales diarios, mensuales o estacionales, es decir permiten simulaciones de intervalos de tiempo mayores a un episodio de lluvia; entonces toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. El objetivo de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca, por lo que se aplican fundamentalmente para el pronóstico de volúmenes de escorrentía a largo plazo y estimación de la reserva de agua.

**Modelos de simulación mixta:** intentan representar ambas escalas temporales en forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad (Weber et al., 2010).

### 2.3.3. Fuentes de incertidumbre

Según Cabrera (2012), en general, existen cuatro fuentes principales de incertidumbre:

- a. Errores (sistemáticos o aleatorios) en los datos de ingreso  
Son errores propios de los datos de ingreso, los cuales no necesariamente son datos de campo. Por ejemplo, si se ingresa la precipitación media de una cuenca y esta serie se obtiene utilizando polígonos de Thiessen, la aplicación de este método produce errores.
- b. Errores (sistemáticos o aleatorios) en los datos observados  
Son errores propios de la medición en campo de las diferentes variables hidro-meteorológicas que se consideran en el modelo.
- c. Errores debidos a valores no óptimos de parámetros  
Referido a los errores ocasionados por la asunción de valores de los parámetros del modelo que no son la consecuencia de un proceso de optimización.
- d. Errores debidos a la estructura del modelo  
Errores propios del modelo y que no pueden ser eliminados sin modificar la estructura del mismo. El proceso de calibración no los afecta.

Las diferencias entre el modelo y la realidad se deben a la combinación de todas estas fuentes. El proceso de calibración puede minimizar las tres primeras; sin embargo, no altera la cuarta, por este motivo es importante discriminar los efectos de cada fuente de error.

### 2.3.4. Medidas de bondad de ajuste

Según Cabrera (2012), la función objetivo es usualmente una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash-Sutcliffe, etc), pero también puede ser una combinación de éstas (dependiendo de la importancia que el investigador asigne a las

diferentes medidas de bondad de ajuste) recibiendo entonces el nombre de función “multiobjetivo”. Usualmente, una función multiobjetivo (G) asume las siguientes formas:

$$G = \sum_{i=1}^n w_i F_i \quad G = \sum_{i=1}^n w_i |F_i| \quad G = \sum_{i=1}^n w_i F_i^2 \quad (1)$$

Donde  $F_i$  son las medidas de bondad de ajuste consideradas dentro de la función multiobjetivo, mientras que  $w_i$  son los pesos asignados a cada una de dichas medidas. Usualmente, no se hace distinción y se hace uso del término “función objetivo” para referirse a una función objetivo simple o a una multiobjetivo.

Un ejemplo de uso de la función objetivo se muestra en la Figura 2-7. La serie de datos simulada no se ajusta perfectamente con la serie observada; para mejorar el ajuste se propone utilizar el criterio de Nash (escalar o logarítmico) y el error de volumen. El efecto que tiene el criterio de Nash sobre la simulación es de “desplazar verticalmente” hacia arriba o hacia abajo toda la serie, mientras que el error de volumen permite desplazar horizontalmente la serie. Para el ejemplo mostrado, la combinación de estos dos criterios dentro de la función objetivo permitirá controlar mejor el proceso de calibración del modelo. El uso de las funciones objetivo brinda un criterio analítico y objetivo para definir la calidad de ajuste del modelo; sin embargo, este análisis debe ser complementado con un análisis visual.

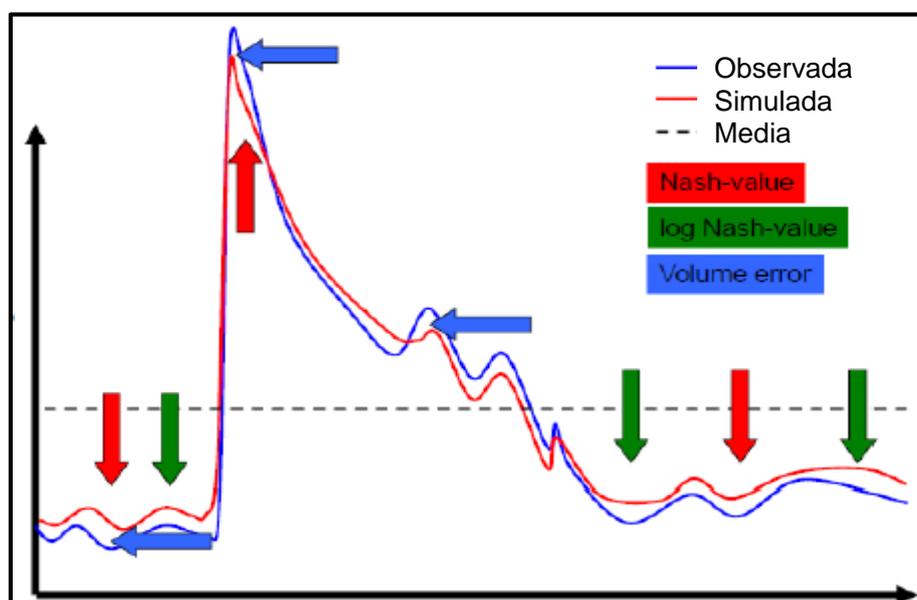


Figura 2-7 Efectos de la medida de ajuste sobre la calibración de un modelo  
Fuente Cabrera (2012)

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para evaluar el comportamiento y ajuste del modelo empleado conviene utilizar los siguientes indicadores:

### a. Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>)

El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> varía entre 0 y 1, es mejor mientras está más cercano a 1. Se usa como una medida de dispersión del modelo. Este coeficiente puede interpretarse como la proporción de varianza representada por los datos observados que puedan ser explicados por el modelo. Cov (Q<sub>o</sub>, Q<sub>s</sub>) es la covarianza entre los valores observados y los calculados, Sd(Q<sub>o</sub>) es la desviación típica de valores observados y Sd (Q<sub>s</sub>) es la desviación típica de los valores calculados (Mena, 2010).

$$R^2 = \frac{COV(Q_o, Q_s)}{Sd(Q_o) \times Sd(Q_s)} \quad (2)$$

### b. Error cuadrático medio (RMSE)

Este indicador opera en función de errores o diferencias simples. Como desventaja se tiene que al no considerar valores relativos o porcentuales, el valor del error depende del orden de magnitud de los valores comparados, y por lo tanto sirve más como un método comparativo para evaluar modelos, que para evaluar el nivel de ajuste (Muñoz, 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}} \quad (3)$$

### c. Eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE)

El criterio propuesto por Nash-Sutcliffe (1970), es un indicador desarrollado para cuantificar el poder predictivo de un modelo hidrológico. Se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

Tabla 2-1 Valores referenciales del criterio de NSE

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

Fuente: Cabrera (2012)

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 (Cabrera, 2012). Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 2-1.

#### d. Porcentaje de desviación respecto de caudales observados (PBIAS)

Este indicador es una medida de la tendencia media de los caudales simulados a ser mayores o menores que los observados. Un valor óptimo del indicador es 0. Un valor positivo indica que el modelo tiende a subestimar los caudales y un valor negativo indica sobreestimación de los caudales simulados. Se definió como criterio del comportamiento del modelo que un valor absoluto del PBIAS menor al 20% se considera como un “buen” nivel de ajuste, un valor entre 20% y 40% se considera “satisfactorio” y un indicador mayor a 40% se considera “no satisfactorio” (Muñoz, 2010).

$$PBIAS = \frac{\sum_{j=1}^n (Q_j - S_j)}{\sum_{j=1}^n Q_j} * 100 \quad (5)$$

De esta manera para evaluar la seguridad predictiva de un modelo se pasa por dos etapas diferentes: calibración y validación. El primer grupo busca mejorar el ajuste entre los valores observados y los valores modelados de la variable de salida de interés, al variar reiterativamente los parámetros del modelo; proporciona confianza en que el modelo pueda reproducir para el periodo calibrado el registro histórico (Ocampo, 2012), mientras que el segundo grupo es usado en la validación del modelo, como una medida de seguridad de la calibración, permitiendo ser utilizado en la etapa predictiva de la modelación. Normalmente, el modelo es menos robusto en la verificación debido a la utilización de un periodo en el que no se realiza optimización de parámetros.

#### 2.3.5. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad mide cuánto puede llegar a afectar a los resultados de un modelo, variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros”. Este análisis permite definir la importancia de cada parámetro, comprobar la lógica interna de un modelo (entender cómo funciona el modelo o por qué no funciona correctamente y aprender más acerca de su funcionamiento) y detectar si el modelo está sobreparametrizado, es decir si existen parámetros a los que el modelo resulta insensible Mena (2010).

#### 2.4. Modelo GR2M

La unidad de investigación en hidrología CEMAGREF (Centro de Investigación Agrícola e Ingeniería Ambiental de Francia) ha desarrollado una serie de modelos precipitación – escorrentía llamados modelos “GR” (Génie Rural, Ingeniería Rural por sus siglas en francés). 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 evapotranspiración) (Mouelhi, 2003). De esta manera el modelo GR ha ido evolucionado presentando diferentes versiones como el GR1A, para caudales anuales; GR2M, para caudales mensuales; GR3J y GR4J, para caudales diarios. El número indica el número de parámetros a modelar.

##### 2.4.1. Descripción

El modelo hidrológico GR2M, es un modelo global (considera a la cuenca como una unidad) que simula la variable hidrológica a paso mensual y que depende de dos parámetros: X1 (corresponde a la máxima

capacidad de almacenamiento del reservorio en mm) y X2: (coeficiente de intercambio de agua subterránea, sin unidades).

La estructura del modelo GR2M consta de dos reservorios (Figura 2-8), y transforma la precipitación en escurrimiento a través de dos funciones; la función de producción, se desarrolla en el reservorio llamado reservorio-suelo y la función de transferencia, se desarrolla en 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, así el nivel de este reservorio determina el caudal que puede liberar (Mouelhi et al., 2006). El modelo utiliza solamente un reservorio de producción, debido al uso de una escala de tiempo amplia (mensual), ya que se pretende analizar el régimen del río y los procesos más importantes en la generación de escurrimiento, de lo contrario un evento a escala temporal breve (diaria), se necesitaría más reservorios de producción si el análisis es más detallado (Mena, 2010).

La versión utilizada en este estudio corresponde al modelo hidrológico GR2M mejorado (Mouelhi et al., 2006). La Figura 2-9 muestra la arquitectura del modelo GR2M con los principales procesos hidrológicos que producen escurrimiento y que son tomados en cuenta por el modelo. De acuerdo a este esquema, P y E representa la precipitación y la evaporación potencial promediada sobre la cuenca; P1 es la escurrimiento superficial; P2, la percolación profunda; S, el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis; R, el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis; y, Q, el caudal a la salida de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo es  $X_1$  y la del reservorio gravitacional es asumida como 60 mm.

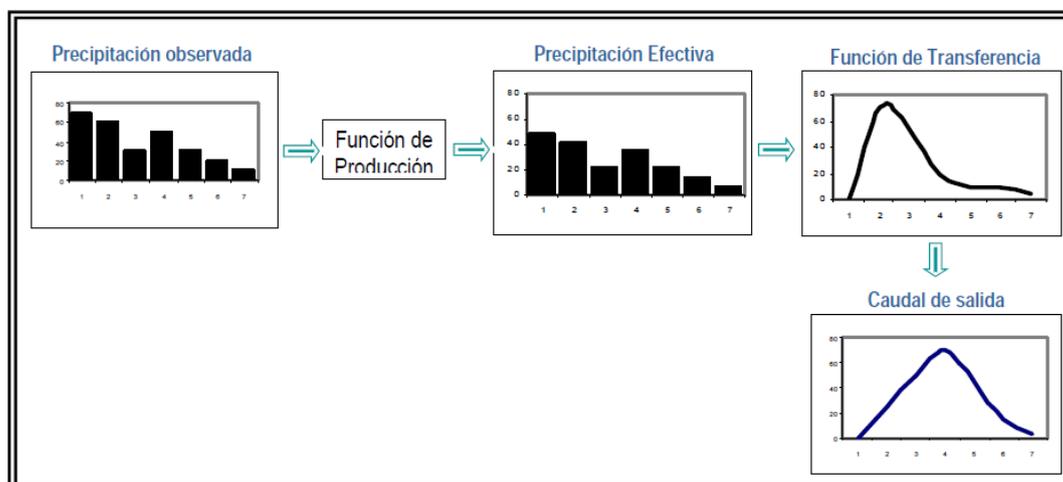


Figura 2-8 Esquema de la precipitación de transformación a caudal  
Fuente MINAG (2007)

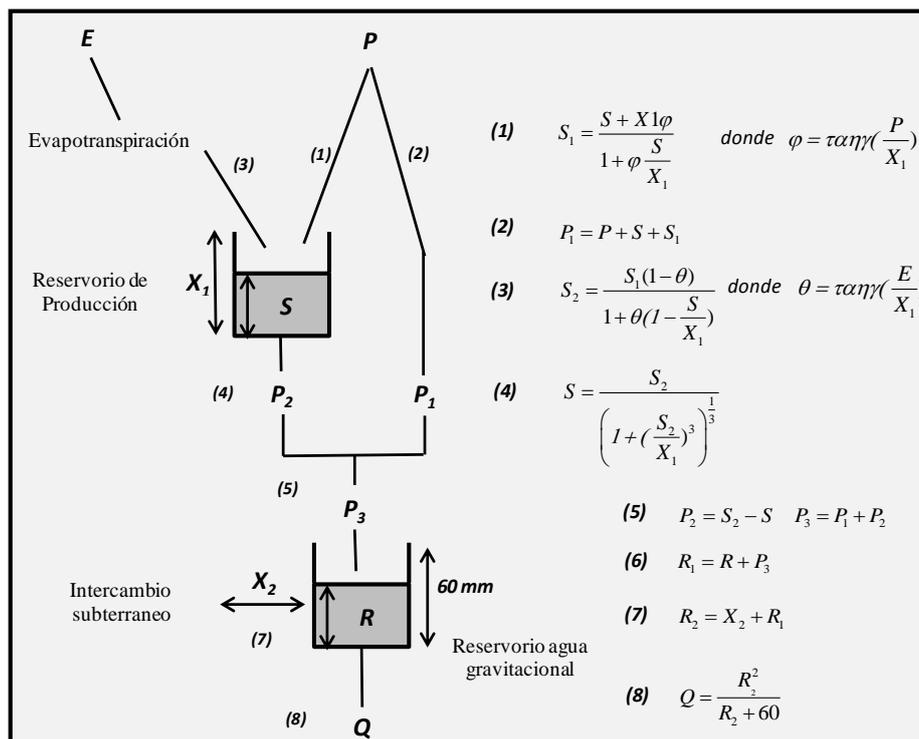


Figura 2-9 Esquema conceptual y ecuaciones del modelo GR2M

Fuente: CEMAGREF ([www.cenagref.fr](http://www.cenagref.fr))

La información de (ingreso y salida) está expresada en mm. Según Mena (2010), el modelo consta de dos reservorios y se describe a continuación:

#### a. Reservorio de producción (suelo)

El almacenamiento en el tanque de producción representa el contenido de humedad en el suelo. Este reservorio tiene una máxima capacidad de almacenamiento que en la estructura del modelo (Figura 2-9) se denomina  $X_1$ , (positivo y se expresa en mm). Como el reservorio no está en su máxima capacidad, existe un nivel menor a  $X_1$  que se denomina  $S$ , expresado en mm, que no es constante pues el reservorio es dinámico y existen entradas (precipitación) y salidas de agua (percolación, E). El nivel inicial  $S$  para el primer mes de cálculo se denomina en el modelo  $S_0$ , y se asume un valor equivalente al 50 por ciento de la capacidad máxima de retención, para los meses posteriores sigue denominándose  $S$ .

El nivel inicial  $S$  pasa a ser  $S_1$  para un mes, cuando parte de la precipitación total es usada para llenar el reservorio. El valor de  $S_1 > S$ , excepto cuando la precipitación es 0, en este caso  $S_1 = S$ .

$$S_1 = \frac{S + X_1 \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \operatorname{Tanh}\left(\frac{P}{X_1}\right)} \quad (6)$$

Entonces el escurrimiento superficial directo ( $P_1$ ) está dado por:

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (7)$$

El reservorio del suelo presenta una sustracción de agua debido a la E, ocasionando que el nivel  $S_1$  pase a  $S_2$  en el mismo mes. El nivel  $S_1 > S_2$ , exceptuando el caso en el que la E sea cero, en este caso  $S_2 = S_1$ .

$$S_2 = \frac{S_1 \left( 1 - \operatorname{Tanh} \left( \frac{E}{X_1} \right) \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_1}{X_1} \right) \operatorname{Tanh} \left( \frac{E}{X_1} \right)} \quad (8)$$

Dónde: E es la evapotranspiración media mensual.

El siguiente paso en el reservorio de suelo es la percolación, el nivel  $S_2$  pasa a ser S, cuando hay una descarga hacia el reservorio de transferencia, entonces  $S_2 > S$  y representa el nivel de agua disponible para el siguiente mes, este nivel permite definir la fracción de precipitación que llegará al reservorio de “transito” ( $P_2$ ).

$$S = \frac{S_2}{\left( 1 + \left( \frac{S_2}{X_1} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

Ahora el valor de percolación es siempre menor que  $S_2$ , y está definido por:

$$P_2 = S_2 - S \quad (10)$$

#### ***b. Reservorio de transferencia (agua gravitacional)***

El reservorio recibe el flujo proveniente de la percolación del reservorio suelo ( $P_2$ ) y del exceso de precipitación que no ingresa al reservorio suelo ( $P_1$ ), conocido en su conjunto como precipitación efectiva ( $P_3$ ).

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (11)$$

Al igual que en el reservorio suelo, se parte de un nivel inicial R que se denomina  $R_0$  para el primer mes de cálculo y es igual al 50 por ciento de la capacidad máxima del reservorio, que es 60 mm.

La entrada de agua  $P_3$  ocasiona que el nivel inicial R de valor positivo expresado en mm, se incremente llegando hasta  $R_1$ .

$$R_1 = R + P_3 \quad (12)$$

Posteriormente,  $R_1$  se convierte en  $R_2$  en el mismo mes, debido al intercambio de agua subterránea con cuencas vecinas, este intercambio está definido por el coeficiente  $X_2$ , valor positivo y adimensional, al existir un aporte de aguas vecinas hacia la cuenca,  $R_2 > R_1$ , caso contrario  $R_1 > R_2$ .

$$R_2 = X_2 * R_1 \quad (13)$$

Finalmente, el reservorio se vacía siguiendo una función cuadrática, basada en el nivel  $R_2$ , el cual regula el caudal de salida, dado por:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (14)$$

El nivel inicial  $R$  para los cálculos en los siguientes meses está definido por:

$$R = R_2 \quad (15)$$

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en la cuenca del río Coata (4951,6 Km<sup>2</sup>), localizada en la región Oeste del departamento de Puno, Perú (Figura 3-1). Con coordenadas geográficas extremas de: Latitud Sur 15°06'36" a 15°55'12" y Longitud Oeste 69°55'12" a 71°12'00". Con una variación altitudinal de 3800 – 5600 msnm. Presentando límites hidrográficos: por el Norte con la Cuenca del río Pucará y la Intercuenca Ramis; por el Sur con la cuenca del río Tambo y la Cuenca del río Ilpa, al Este con el Lago Titicaca y al Oeste con la cuenca del río Chili y la Cuenca del río Camaná.

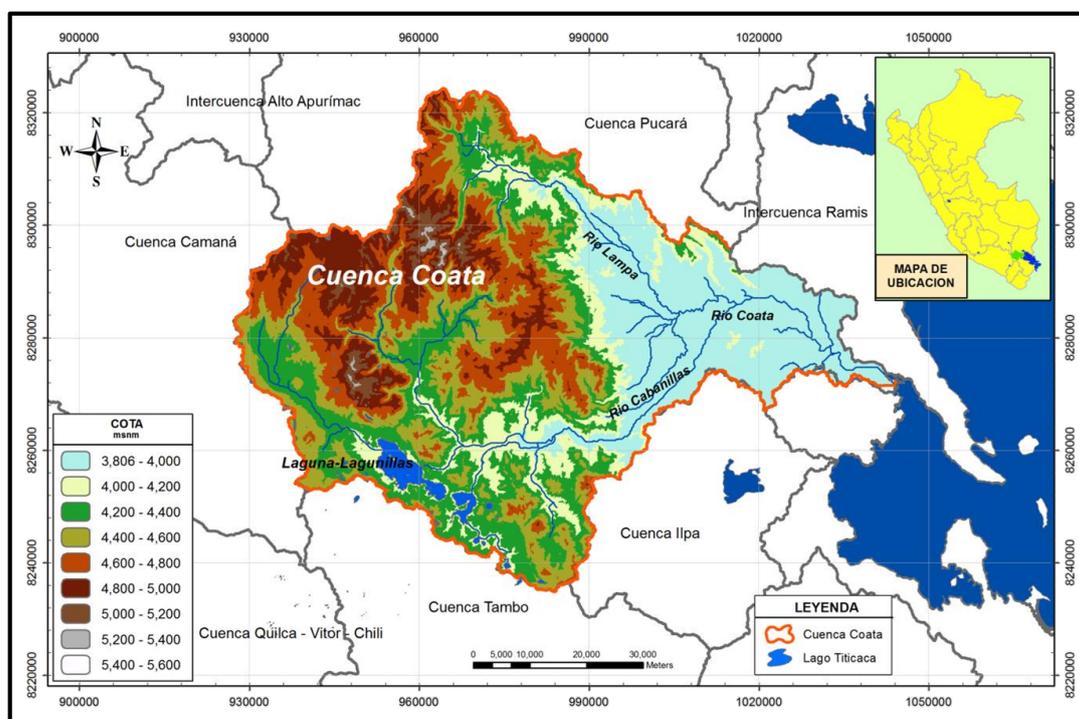


Figura 3-1 Ubicación geográfica de la cuenca del río Coata  
Fuente Elaboración propia

Políticamente, la cuenca del río Coata se encuentra ubicada íntegramente dentro del departamento de Puno (Figura 3-2), ocupa las superficies de las provincias de San Román, Lampa y parte de Puno y Huancané. El 24.30 por ciento de área de la cuenca se ubica en la provincia de San Román, el 74.98 por ciento en Lampa, el 0.52 por ciento en Puno y el 0.20 por ciento en Huancané (INRENA, 2007).

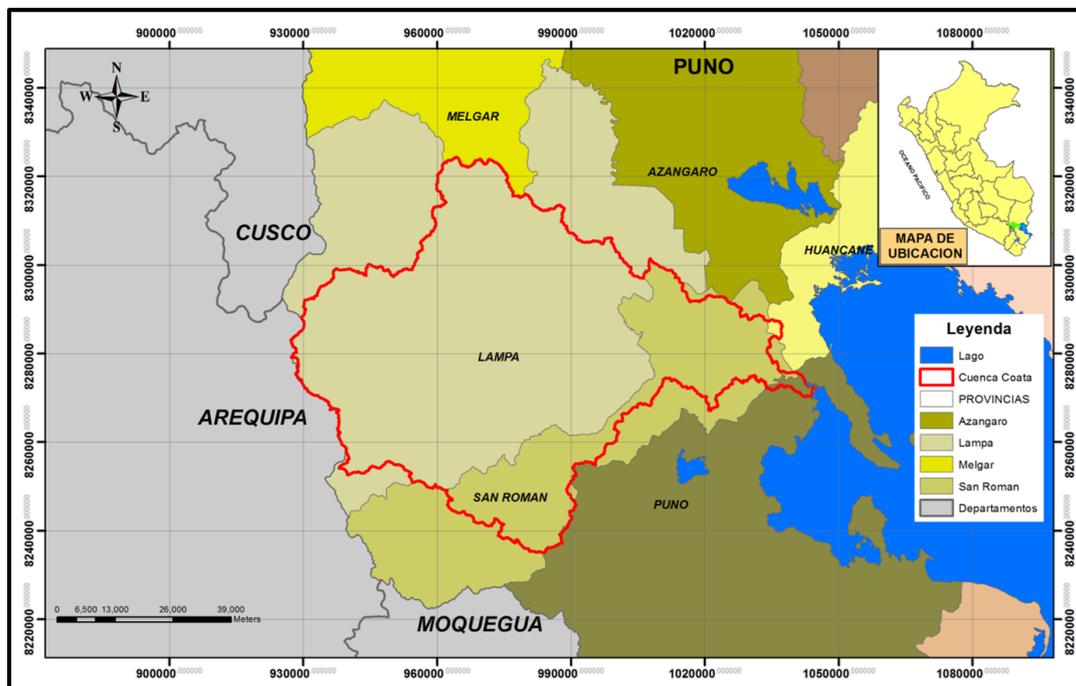


Figura 3-2 Ubicación política de la cuenca del río Coata  
Fuente Elaboración propia

### 3.2. Aspectos socio-económicos

En este capítulo se presenta las características socioeconómicas generales existentes del departamento de Puno y la cuenca Coata.

#### 3.2.1. Densidad de la población

La población de la región Puno presenta variaciones asociadas al proceso de migración de las zonas rurales a las zonas urbanas, al proceso acelerado de urbanización de las zonas rurales y a los cambios en la variable de fecundidad, ocupando el quinto lugar entre los departamentos más poblados del Perú. Para tener una idea de la evolución demográfica, en la Figura 3-3, se observa el incremento de la población medida por la tasa de crecimiento promedio anual, lo que indica que la población del departamento de Puno ha presentado un crecimiento promedio anual, para el periodo 1993-2007 de 1.3 por ciento.

Considerando este índice constante, como ejemplo, para el 2039 se estaría hablando de una población cercana a 1'869,220 habitantes, este aumento generaría una mayor presión sobre la demanda del recurso hídrico para consumo humano y usos productivos; sector agropecuario, minero, industrial y otros.

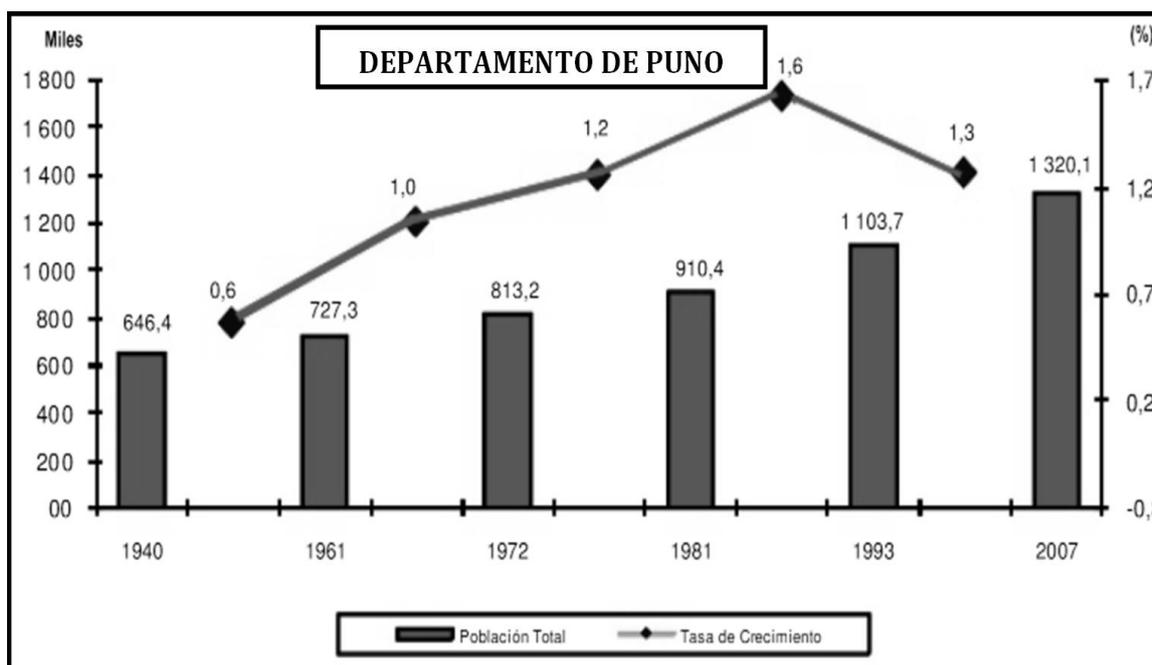


Figura 3-3 Tasa de crecimiento promedio anual de la población total, 1940-2007

Fuente Elaboración propia

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI, (2009), la cuenca del río Coata presenta una población de 288,999 habitantes, el 83.8 por ciento de la población total se ubica dentro del área urbana y el 17.2 por ciento, en la zona rural. En la Tabla 3-1, se presenta la tasa de crecimiento intercensal de las provincias de Lampa y San Román, que son resultados del Censo Nacional de población efectuada en 1993 y de 2007.

Tabla 3-1 Tasa de crecimiento intercensal de 1993 y del 2007

Provincia	Superficie Km <sup>2</sup>	Población		Densidad Poblacional		Tasa de Crecimiento	
		1993	2007	1993	2007	Intercensal	Anual
Lampa	5791.73	43,461	48,223	7.5	8.3	11.0%	0.7%
San Román	2277.63	168,534	240,776	74.0	105.7	42.9%	2.6%

Fuente INEI (2009), elaboración propia

### 3.2.2. Dinámica de la estructura económica

El Valor Agregado Bruto (VAB) departamental, al 2011, representó el 2,1 por ciento del VAB del país, ubicándose en el undécimo lugar en el contexto nacional. En el 2011 el sector económico más relevante resultó la agricultura, caza y silvicultura con una contribución de 16.6 por ciento de las actividades que se desarrollan en la región Puno según el (INEI-SIRTOD, 2011).

### **a. Actividad agrícola**

Es una de las actividades más importantes de la región Puno, porque representa el 11.86% de la superficie agrícola total regional. El 95 por ciento de la superficie es cultivada bajo el régimen de secano, es decir, que depende de las lluvias, las que son irregulares en cantidad y distribución; y el 5 por ciento es bajo riego (INRENA, 2007). Como especies cultivables en esta región se tiene: cebada, alfalfa, pastos cultivados, avena grano, cañihua, cebada grano, maíz amiláceo, quinua, trigo, cebolla, arveja, habas, mashua, oca, olluco, papa, avena, y cebada forrajera.

### **b. Actividad pecuaria**

La existencia de pastos naturales, cultivo de forrajes y pastos cultivados favorecen la crianza del ganado, siendo los vacunos de doble propósito para carne y leche, los ovinos para carne y los camélidos carne y fibra, y en mayor magnitud se tiene la crianza de porcinos y aves. Especies que aportan la mayor producción pecuaria del ámbito de la Agencia Agraria de San Román que constituyen fuente de ocupación e ingreso para el productor rural, que representa aproximadamente el 8.62% de la ganadería departamental. Sin embargo, el problema que afronta el productor pecuario es la escasez de alimentos para animales en ciertas épocas del año, dada, las característica del espacio andino es de ser una zona que se ve limitada por las variaciones climáticas. Los meses de invierno y transitorios, corresponde al periodo más crítico para el ganado, debido a las bajas temperaturas, afectando la disponibilidad de alimento y consecuentemente la producción en peso de carne y de leche.

## **3.3. Aspecto físico ambiental**

### **3.3.1. Clima**

El clima de la cuenca del Lago Titicaca, es templado en el día y frío en las noches debido a la altitud que es característico de los climas de montaña sometida por su situación geográfica a un régimen tropical, principalmente por la relativa estabilidad de iluminación durante el año. La región Puno presenta un comportamiento térmico que varía de  $-6^{\circ}\text{C}$  y  $14^{\circ}\text{C}$  en su media mensual (SENAMHI-DGH, 2009), donde la presencia de la masa de agua del Lago Titicaca permite regular la temperatura de la zona circunlacustre, impidiendo que sus valores desciendan a valores extremos.

Según UNESCO-WWAP (2003), las precipitaciones son más abundantes en el centro del lago (800 - 1400) mm por año que en sus riberas a causa de una mayor temperatura del agua con respecto al aire, debido a esto el lago recibe una radiación solar fuerte de 533 calorías por centímetro cuadrado ( $\text{cm}^2$ ) por día: esta alta radiación explica la intensa evaporación en el Lago Titicaca, la cual se estima según SENAMHI-DGH (2009) que la pérdida de agua por efecto de la evapotranspiración a nivel promedio en la vertiente del Titicaca es de 589,94 mm.

En términos generales, la precipitación, temperatura, humedad relativa y evaporación son los principales parámetros que caracterizan a la cuenca del río Coata, de régimen estacional, presenta dos estaciones marcadas, una estación húmeda (noviembre a marzo), otra seca (junio a agosto) y dos periodos de transición (septiembre – octubre y abril – mayo).

Según INRENA (2007), el clima en la cuenca Coata presenta:

### a. *Clima frío*

Comprende los valles meso andinos y se extiende entre los 3 000 y 4 000 msnm y se caracteriza por presentar precipitaciones anuales en promedio de 700 mm, temperaturas medias anuales de 12°C y con veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas.

### b. *Clima frígido*

Conocido como clima de Puna (INRENA, 2007)), comprendido entre los 4 000 y 5 000 msnm. Se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm anuales y temperaturas también promedio anuales de 6°C. Comprende las colinas, mesetas y cumbres andinas. Los veranos son siempre lluviosos y nubosos; y los inviernos (junio-agosto), son muy fríos y secos.

### c. *Clima de nieve*

Este clima corresponde al de nieve perpetua, de muy alta montaña, con temperaturas medias durante todos los meses del año por debajo del punto de congelación (0°C). Se distribuye en los sectores altitudinales que sobrepasan los 5 000 msnm y que están representados mayormente por las grandes masas de nieve y hielo de las altas cumbres de los andes peruanos.

La Tabla 3-2, muestra los principales aspectos que intervienen en la formación y modificación del clima, visualizándose algunos de estos aspectos en la Figura 3-4.

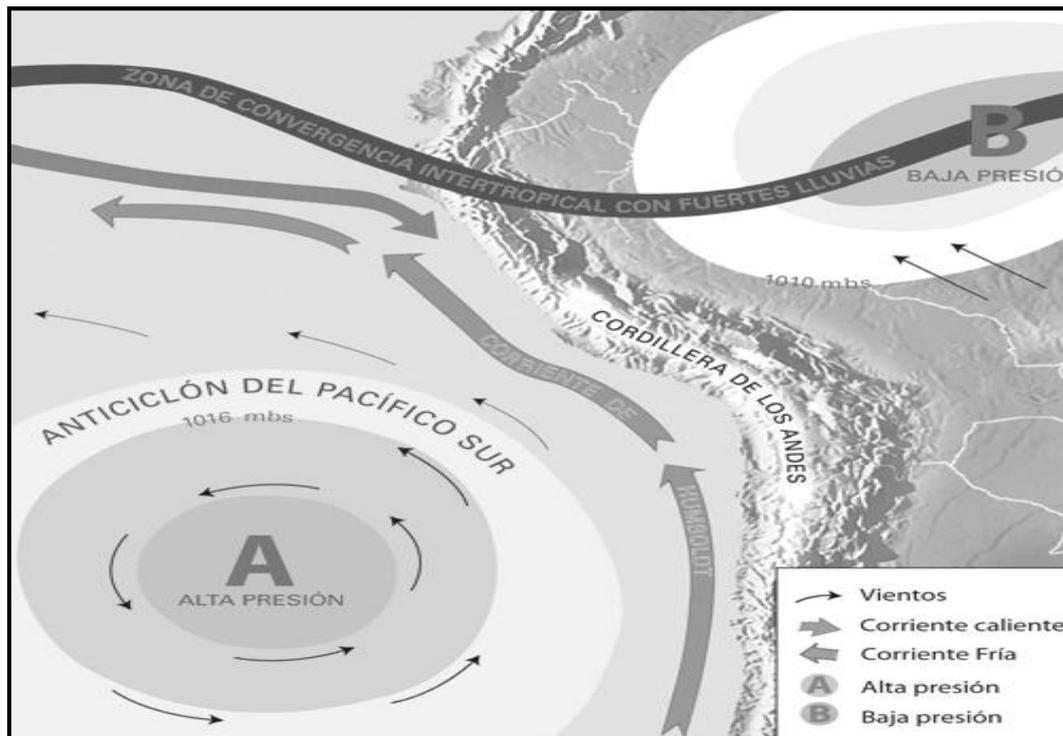


Figura 3-4 Factores que intervienen en la formación y modificación de los clima  
Fuente [http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio\\_clim%C3](http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_clim%C3)

Tabla 3-2 Factores que intervienen en la formación y modificación de los climas

FACTORES CONDICIONANTES DEL CLIMA	BREVE DESCRIPCIÓN	FENÓMENO QUE OCASIONAN O PUEDEN OCASIONAR
<b>LATITUD</b>	Ubicación respecto al Ecuador, forma de incidencia del sol, movimiento de rotación y traslación, inclinación del eje terrestre.	-Distribución desigual de luz y calor por cada región en el tiempo (estaciones). -Diferente duración del día y la noche en las diferentes épocas del año.
<b>ALTITUD</b>	Cordillera de los Andes, cadena de montañas de altitud considerable.	-Es una barrera natural que impide el paso de humedad del Atlántico al Pacífico. -El frío de las montañas motiva condensación y genera precipitación.
<b>OCEANO PACÍFICO Y ATLÁNTICO</b>	Grandes masas de agua que circundan el subcontinente.	-Permite la evaporación de grandes cantidades de agua hacia la atmósfera.
<b>BOSQUE AMAZÓNICO</b>	Inmensas extensiones de bosques húmedos y tropicales.	-La fuente evapotranspiración incrementa la humedad de la atmósfera.
<b>CORRIENTE PERUANA DE HUMBOLT</b>	Corriente fría que circula de sur a norte hasta Cabo Blanco (Piura), paralela al litoral peruano.	Evaporación restringida en el Pacífico. -Gran estabilidad atmosférica. -Persistente inversión térmica todo el año. -Ausencia casi total de lluvias en la costa.
<b>CONTRACORRIENTE ECUATORIAL O DEL NIÑO</b>	Corriente de agua cálida de NO a SE, llega hasta Cabo Blanco donde deriva hacia el Oeste, eventualmente avanza más hacia el Sur generando cambios en el clima.	-Lluvias intensas en la costa norte. -La presencia del fenómeno del Niño. *reemplaza los vientos alisios del SE por vientos sofocantes del NO. *Cese de la anomalía térmica refrescante de la costa. *Las aguas superficiales adquieren temperaturas elevadas. *Mortalidad de peces de agua fría y reemplazo por otra de agua caliente. Alteran el hábitat de islas y puntas, motivando mortalidad de aves guaneras.
<b>VIENTOS ALISIOS</b>	Masas de aire frío que soplan del SE hacia el Ecuador desde zonas de alta presión.	-Transporta la humedad atmosférica hacia zonas de baja presión.
<b>ANTICLÓN DEL PACÍFICO SUR</b>	Masa de aire de alta presión que circula de S a N en el invierno no Austral, sobre el trópico de Capricornio desplazándose al Sur (28°S) en el verano austral.	-De mayo a octubre recoge la humedad del mar y la eleva, quedando detenida por el efecto de los vientos Alisios, que favorece la ocurrencia de inversión térmica. -En invierno las nubes bajas de la costa, producen una ligera oscilación de la temperatura y la garúa. -En verano la humedad se condensa y pueden ser la causa de las lluvias en la vertiente occidental (no confirmado).
<b>ANTICLÓN DEL ATLÁNTICO SUR</b>	Masas de aire húmedo de alta presión procedente del polo Sur, llegan al Perú por el SE (Madre de Dios).	-Genera precipitaciones a lo largo de su recorrido hasta los flancos orientales. -El descenso de la temperatura en el SE que ocurre entre mayo y setiembre (Friaje o Suraje).
<b>CICLÓN ECUATORIAL</b>	Masa de aire de baja presión tibia y húmedo cuyos efectos se aprecia en el NE de la selva.	-Temperaturas más altas de la región -Mayor intensidad de la precipitación a lo largo del año.
<b>LAGO TITICACA</b>	Gran masa de agua entre Perú y Bolivia	-Regula la temperatura de la zona circunlacustre.

Fuente: Mendoza (1994)

### 3.3.2. Suelo

La superficie de la región hidrográfica del Titicaca, se extiende desde la parte limítrofe del lago peruano hasta la cordillera Oriental y Occidental, de amplias pampas, demarcadas con cadenas de cerros que nacen en los estribos internos de ambas cordilleras. Según Mendoza (1994), en el Altiplano se puede diferenciar dos grupos de suelos:

#### *a. Grupo Altiplánico*

Conformado por suelos de origen Aluvio-Fluvial y Aluvio-Lacustre, comprende todas las áreas de relieve suave o casi plano, a su vez se divide en:

*Sub Grupo Ribereño:* Son las áreas termorreguladas, ubicadas próximas al lago Titicaca, con pendientes inferiores a 1 por ciento, hidromórficas e inundables, presentan un drenaje pobre. Son las tierras más apropiadas para la producción de los cultivos, debido a la acción termorreguladora del lago.

*Sub Grupo Altiplano:* Comprende casi la integridad de las áreas casi planas, que se extiende más allá del sub Grupo Ribereño, se pueden observar epipedones con buen contenido de materia orgánica, horizontes arcillosos, suelos bien a moderadamente desarrollados, en las zonas más abrigadas se pueden sembrar cultivos propios del lugar.

#### *b. Grupo de Lomas y Cerros*

Son suelos mayormente de origen residual, y en menor grado de origen coluvial y coluvio aluvial, forman parte de las laderas, flancos y lomas de cerros y colinas, cuyas pendientes varían de ligeramente inclinadas a empinadas, pueden presentar un horizonte superficial con buen contenido de materia orgánica: suelos medianamente profundos y poco desarrollados, cubiertos por pastos naturales.

### 3.3.3. Hidrografía

El sistema hidrográfico de la cuenca del río Coata se compone básicamente de los ríos Cabanillas y Lampa, los cuales a su vez se forman por la confluencia de los ríos Verde - Cerrillos y Vila Vila – Palca, respectivamente; esta confluencia de los ríos Cabanillas y Lampa se encuentra a 57.20 Km del Lago Titicaca. La cuenca posee una superficie total de 4,908.44 Km<sup>2</sup>, correspondiéndole 1,559.87 Km<sup>2</sup> (31.78 por ciento) a la cuenca del río Lampa y una superficie de 2,888.61Km<sup>2</sup> (58.85 por ciento) a la cuenca del río Cabanillas y 459.96 Km<sup>2</sup> (9.37 por ciento) a la Cuenca del Bajo Coata (INRENA, 2007).

## 3.4. Materiales

### 3.4.1. Información utilizada

Para el desarrollo de la investigación se utilizó información cartográfica, información de los modelos climáticos del IPCC e información hidrometeorológica que se detalla a continuación:

#### *a. Información cartográfica*

- Mapa de la red de estaciones hidrometeorológica observacional del SENAMHI a escala gráfica 1/250000.

- Modelo de elevación de terreno (DEM) de 90 m derivados de los datos del (Shuttle Radar Topography Mission) SRTM.
- Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional a escala 1:100 000
- Shape de la delimitación y codificación de las unidades hidrográficas del Perú a escala 1/100 000 elaborada por la Ex Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA (2007). Disponibles desde el 2009.

### b. Información de los modelos climáticos globales (MCG)

Para analizar las proyecciones climáticas futuras, se utilizó las salidas de 6 modelos climáticos globales seleccionados de un conjunto de modelos, disponibles a través del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, Fase 5 (por sus siglas en Inglés, CMIP5). Enfocados en estudios hidrológicos, se seleccionaron los MCG que presentan la mayor resolución atmosférica.

El periodo utilizado para la validación del "clima actual" comprendió entre 1964 – 1989. En el caso de los modelos CMIP5 los experimentos utilizados fueron "historical" para el clima actual y el escenario "RCP8.5", considerado el escenario más pesimista para el futuro. Las características de los modelos CMIP5 se describen en la Tabla 3-3, las cuales fueron descargados del link: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>

Tabla 3-3 Descripción de los modelos climáticos globales seleccionados

Modelo	CCSM4	CESM1-CAM5	CMCC-CM	CNRM-CM5	MIROC5	MRI-CGCM3
País	USA		ITALIA		JAPON	
Institución	NCAR - National Center for Atmospheric Research	Community Earth System Model Contributors	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici.	Centre National de Recherches Meteorologiques	Atmosphere and Ocean Research Institute	Meteorological Research Institute
Variables	Precipitación total (Pr) y Temperatura aire (Ta) Serie mensual					
Resolución Atmosférica (lat * lon)	0.9°*1.25°	0.9°*1.25°	0.75°*0.75°	0.9°*1.25°	1.40625°*1.40625°	1.121°*1.125°
Escenario	RCP8.5					
Forzamiento Radiativa y concentración	>8.5 w/m <sup>2</sup> en 2100 > 1370 CO <sub>2</sub> -eq en 2100					

Fuente: Elaboración propia

### c. Información hidrológica y meteorológica

Para el análisis de las variables seleccionadas en el desarrollo del estudio, la OMM (Organización Meteorológica Mundial) aconseja trabajar con series de 30 años de datos. Para ello se ha requerido una red de estaciones con información de precipitación total mensual, temperatura media y caudal a nivel medio mensual.

Se trabajó con la información de la estación hidrológica Puente Unocolla, ubicada en la parte baja de la cuenca del río Coata, después de la unión de los ríos Lampa y Cabanillas que registra información de niveles de agua, la cual es administrada y almacenada en el banco de datos del SENAMHI-Puno. La

estación hidrológica cuenta con una regla limnométrica y un limnógrafo, que registraba la escorrentía natural hasta 1999, en que entró en operación la Presa Lagunillas (subcuenca del río Cabanillas), la cual condicionaría la información que se registraba en la estación hidrológica, de un caudal natural a regulado. De esta manera para el desarrollo de la investigación se trabajó con una serie climatológica comprendida de 1964 a 2015 y de 1964 A 1999 se utilizó en la información hidrológica de las cuencas de los ríos Huancané, Ramis e llave, con la finalidad de consistenciar y completar la información del río Coata. Una descripción detallada se presenta en el Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Red de estaciones hidrológicas para el estudio

Estación hidrológica	Unidad hidrográfica	Tipo Estación	Periodo Información	Ubica. Geográfica		Altitud	Fuente
				Latitud	Longitud		
Coata-Uncolla	Coata	HLG	1964-1999	15°27'05"	70°11'31"	3835	SENAMHI
Puente Carretera Huancané	Huancané	HLG	1964-1999	15°13'00"	69°47'34"	3830	SENAMHI
Puente Carretera. Ramis	Ramis	HLG	1964-1999	15°15'16"	69°52'19"	3850	SENAMHI
Puente Carretera llave	llave	HLG	1964-1999	16°05'19"	69°37'34"	3850	SENAMHI

Fuente SENAMHI

Tabla 3-5 Red de estaciones meteorológicas para el estudio

Estación	Unidades hidrográficas	Tipo estación	Periodo información		Ubica. geográfica		Altitud
			Precipitación	Temperatura	Latitud	Longitud	
Pampahuta	Coata	CO	1964-2015	1964-2015	15°29'02"	70°40'34"	4329
Lagunillas	Coata	CO	1964-2001	1962-2011	15°46'00"	70°39'00"	4200
Santa Lucia	Coata	PLU/CO	2001-1999	-----	15°42'00"	70°36'00"	4050
Cabanillas	Coata	CO	1964-2015	1964-2015	15°38'22"	70°20'47"	3890
Lampa	Coata	CO	1964-2015	1964-2015	15°21'25"	70°22'15"	3892
Juliaca	Coata	CO	1964-2015	1964-2015	15°28'00"	70°10'00"	3820
Quillisani	Coata	PLU	1964-1988	-----	15°23'00"	70°45'00"	4600
Llalli	Pucara	CO	1964-2015	1964-2015	14°56'12"	70°53'10"	4190
Ayaviri	Pucara	CO	1964-2015	1965-2015	14°52'23"	70°35'35"	3918
Pucara	Pucara	CO	1964-2015	-----	15°02'33"	70°22'02"	3910
Taraco	Inter. Ramis	CO	1964-2015	-----	15°10'13"	69°58'31"	3850
Capachica	Inter. Ramis	CO	1964-2015	1964-2015	15°36'57"	69°50'39"	3850
Ichuña	Tambo	CO	1965-2014	-----	16°07'58"	70°33'08"	3900
Mañazo	Ilpa	CO	1964-2015	-----	14°48'0.2"	70°0.3'59.7"	3938
Puno	Intercuenca 0173	CP	1964-2015	1964-2015	15°49'24"	70°01'05"	3850
Crucero Alto	Colca	CO	1964-2015	-----	15°45'51.12"	70°54'58.4"	4508
Imata	Chili	CO	1964-2015	1964-2015	15°50'32.3"	71°05'29.8"	4474

Fuente: SENAMHI

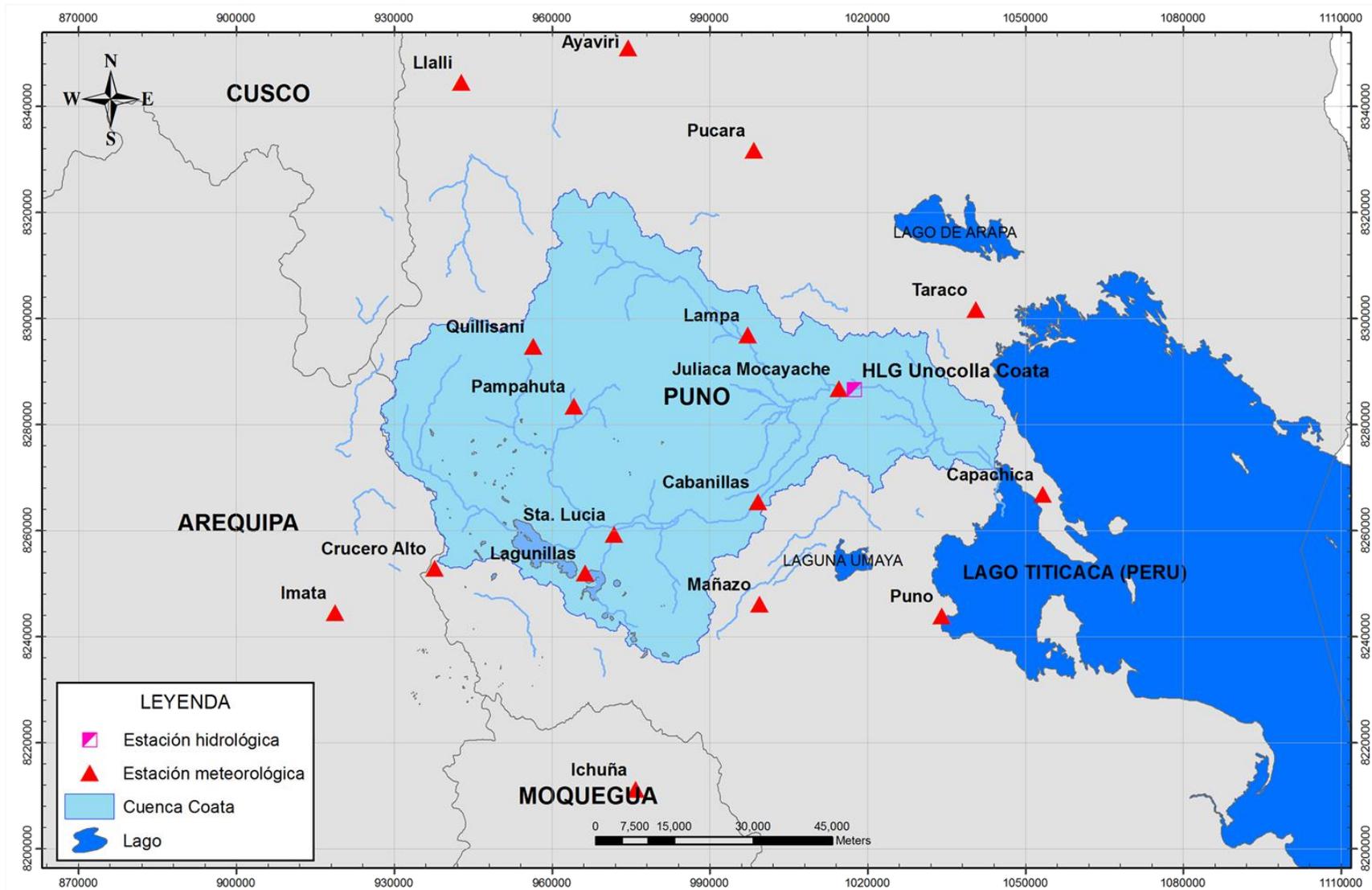


Figura 3-5 Red hidrometeorológica de la cuenca del río Coata  
Fuente Elaboración propia

La información meteorológica utilizada (precipitación total mensual y temperatura media mensual) se recopiló del banco de datos del SENAMHI. La Tabla 3-5, muestra la red meteorológica usada en la investigación, que comprende la ubicación geográfica, periodo de operación, altitud; así, como, la unidad hidrográfica al que corresponde cada estación. La Figura 3-5 muestra la distribución espacial de la red hidrometeorológica sobre la cuenca del río Coata.

### 3.4.2. Programas utilizados

Se detalla a continuación los programas utilizados en la elaboración de la tesis:

- Minitab (versión 16), software de herramienta estadística que permitió el desarrollo de los test estadísticos, para las series de datos observados y de los GCM. Versión prueba de 30 días, en <http://www.minitab.com/es-US/products/minitab/>.
- Hydraccess (versión 4.2), herramienta para la generación de precipitación y temperatura media areal de la cuenca de estudio, así como la consistencia de la información mediante el vector regional. Descargable de [http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/ha\\_sp\\_dn.php](http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/ha_sp_dn.php).
- Arcgis 10, herramienta que permitió la generación de mapas de ubicación (red hidrográfica, modelo de elevación de altura) así como la red de estaciones hidrometeorológicas.
- XLSTAT, software de herramienta estadística que permitió el desarrollo de gráficas de diagrama de caja para mostrar la variabilidad de la información.
- MATLAB, software de herramienta estadística que permitió también descomprimir los archivos más pesados con información de los modelos climáticos descargados del IPCC, que se encuentra en formato netcdf.
- GR2M, modelo hidrológico en versión Excel para el desarrollo de la simulación y proyección de los escenarios. <http://www.cemagref.fr/>.

### 3.5. Metodología

Para el desarrollo del estudio, se seleccionaron 6 MCG considerados los de mayor resolución espacial atmosférica, lo que permite dar una mejor confiabilidad a la información utilizada. Analizado bajo el escenario de emisión de mayor forzamiento radiativo RCP8.5, con el objetivo de establecer los mayores cambios posibles que se puedan esperar en el recurso hídrico para el horizonte 2050-2075. La razón de proyectarse a un horizonte a mediano plazo es la de establecer una clara señal del cambio climático debido al aumento en el forzamiento de GEI. Una vez obtenidos estos límites de cambio climático, cualquier escenario de menor emisión inducirá a una respuesta menor al clima.

Para la simulación de caudales se seleccionó un modelo hidrológico de categoría mensual, que necesite poco requerimientos de entrada de datos y presente un buen ajuste en las simulaciones. Seleccionándose el modelo GR2M, ya que según Lavado (2010), el modelo GR2M resultó ser el mejor en las cualidades mencionadas al ser comparado con los modelos ABCD y Vandewiele.

El desarrollo del proceso metodológico del estudio se muestra en la Figura 3-6 y comprende cinco etapas que se describen en los ítems más adelante:

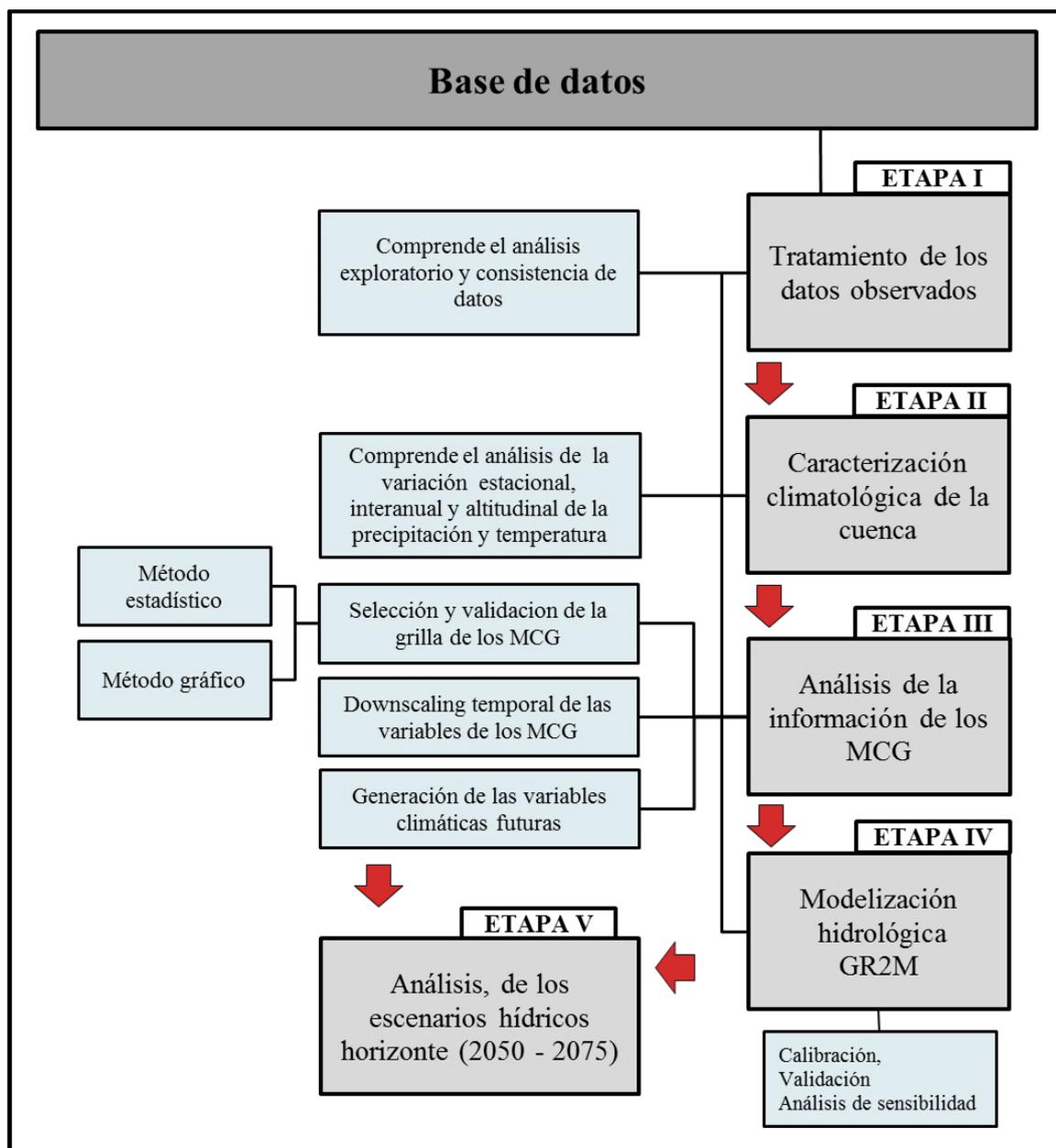


Figura 3-6 Esquema metodológico para el desarrollo de los escenarios hídricos

Fuente Elaboración propia

### 3.5.1. Etapa I: Tratamiento de la información observada

Comprendió el análisis exploratorio y consistencia de datos para la precipitación y temperatura, para el periodo de análisis (1964-2015) y para el caudal (1964-1999), desarrollando los siguientes ítems:

- En todo estudio, es necesario realizar un análisis exploratorio (gráfico y estadístico) de la información antes de ser aplicado a cualquier técnica estadística. Lo que permite conseguir un entendimiento básico de la información, así como detectar valores erróneos y la posible existencia de datos atípicos de la información, que puede ser excluida, si se comprueba que no pertenece a la muestra analizada. El análisis se apoyó con los programas Minitab y Excel.

- Una vez realizado el filtrado de la información, un requisito importante en la modelización hidrológica es la confiabilidad de los datos, para ello se utilizó la metodología del Vector Regional de Índices Pluviométricos (MVR), incorporado en el programa HYDRACCES, metodología que nos permite realizar una homogenización y crítica de datos.

Esta metodología se aplicó en los caudales medios anuales de los ríos Coata, Huancané, Rámis e llave, previa transformación de unidades de  $m^3/s$  a  $Hm^3$  (hectómetro cúbico), el análisis se basó considerando que las cuencas pertenecen a un comportamiento climatológico homogéneo, ya que dichas cuencas corresponden a una misma región hidrográfica. El vector regional a la vez, fue apoyado por un análisis gráfico de serie mensual, la importancia de este análisis radica en que se aprovecha toda la información recolectada de caudales medios, mas no en un análisis anual ya que necesita los 12 meses completos.

De la misma manera, se analizó la precipitación total anual en (mm), para ello se formaron grupos de estaciones homogéneas tomando en cuenta la ubicación geográfica y estaciones vecinas. La formación de los grupos se apoyó mediante el desarrollo de una matriz de correlación.

### 3.5.2. Etapa II: Caracterización climatológica

El régimen hidrológico, se encuentra en estrecha dependencia de las características fisiográficas y climáticas de una cuenca, es por ello, la importancia del estudio de las variables climáticas (Almeida, 2010). El análisis de las variables climatológicas se realizó a escala mensual y anual. El periodo base utilizado para el desarrollo del estudio fue de (1964-1989) que comprende una serie de 26 años.

La precipitación fue analizada según; **la variación estacional**, mediante un gráfico lineal, permite visualizar lo que ocurre a lo largo del año, en este caso representaría el régimen pluviométrico de la zona; **la variación interanual**, permite identificar la inclinación que sigue la precipitación en el transcurso de los años (línea de tendencia); **la variación altitudinal**, permite analizar las variaciones de la distribución espacial de la variable considerando factores orográficos que se presentan en la cuenca, para esto se gráfica una línea de tendencia, donde se relaciona la media de las precipitaciones interanuales con la altitud de las estaciones meteorológicas.

De la misma manera para la variable temperatura, se analizó: **la temperatura media mensual**, calculando el promedio de las medias mensuales; **la variación de la temperatura media anual**, que mediante un gráfico se observa la tendencia de la temperatura en los años en consideración; **la variación altitudinal y espacial de la temperatura**, que es una variable que es influenciada por la altitud, por ello es necesario representar esta variación a través de un gráfico de dispersión para cada estación. El resultado es una serie de puntos con lo cual se debe establecer una tendencia.

### 3.5.3. Etapa III: Análisis de la información de los MCG

#### a. Selección y validación de la grilla de los MCG

La información climática generada y proyectada a futuro por los MCG es difícil de analizar, pues se tendrá que esperar años para contrastar en qué medida se vienen desarrollando los escenarios construidos, bajo diversas suposiciones, pero por otro lado se puede analizar las condiciones iniciales

de los resultados de las simulaciones del clima actual, en este caso los escenarios “historical” del CMIP5, periodo base 1964-1989.

Se seleccionó 6 modelos climáticos, que corresponde a los MCG de mayor resolución espacial lo cual permite dar una mejor confiabilidad de la información utilizada sobre el área de estudio. El primer paso en el uso de los MCG, es la reducción de escala o “downscaling” espacial; una forma es interpolar los valores de los centros de las grillas más próximos al área de interés, pero, según Barros (2006), el problema con este método de interpolación es que introduce una falsa precisión geográfica.

Entonces, el criterio optado para el estudio como un supuesto “downscaling” espacial, fue la de seleccionar mediante métodos estadísticos la grilla próxima que mejor represente la climatología de la cuenca para cada modelo, y, mediante métodos gráficos validar la capacidad de los modelos en simular la estacionalidad y la variabilidad observada de la variable en estudio. El desarrollo de los métodos de análisis mencionados se describe a continuación.

- **Método estadístico**

Para la selección de la grilla que almacena las variables de precipitación y temperatura, se comparó la serie mensual areal observada con la serie mensual de las 4 grillas de cada MCG, utilizando dos indicadores estadísticas; el coeficiente de correlación (R), que mide el grado de asociación entre dos variables y el menor sesgo (S) entre la media anual observada y simulada

- **Método gráfico**

La validación del modelo de la grilla seleccionada comprendió dos puntos; el primero, analizar la capacidad de los modelos en simular las estaciones lluviosas con las series observadas; segundo, se comparó los índices de precipitación anual observados y simulados para el periodo establecido, con la finalidad de observar si además de simular en parte el régimen de las variables, simula los cambios extremos suscitados en la cuenca de estudio (superávit o déficit de precipitación).

**b. Corrección temporal de los MCG**

Los resultados de la información temporal de los MCG presentan errores sistemáticos (sesgo) en las salidas de las variables climáticas, que no son acorde a la realidad de una cuenca hidrográfica, y por consiguiente para ser utilizada directamente en modelos hidrológicos y así poder evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica.

Para el estudio los errores sistemáticos de los MCG a escala mensual se corrigieron utilizando la técnica quantile-mapping, basado en una función de distribución teórica. Este método de corrección asume que las distribuciones de probabilidad de los conjuntos de datos observados y simulados de los MCG para un determinado periodo, pueden aproximarse utilizando una distribución paramétrica (Lafon, 2012). Por otro lado, para mantener la tendencia o signo climático de las variables desde el periodo de referencia al periodo proyectado se utilizó la metodología propuesta por (Watanabe et al., 2012), la cual preserva los cambios (por ejemplo en la media y desviación estándar) de los MCG antes y después de la corrección del sesgo.

Entonces, los datos de precipitación y temperatura del aire mensual simulado por los MCG en la serie histórica, se dividieron en dos periodos: El periodo base (1964-1989) y el periodo de validación (1990-2015). Entonces, se corrigió los parámetros estadísticos del periodo base y proyectado, y luego la precipitación o temperatura del aire mensual son corregidas utilizando en el método mapping-quantile. El procedimiento para corregir los parámetros estadísticos en cada variable se describe a continuación;

- **La Temperatura del aire ( $T_a$ )**

La distribución Gaussiana o Normal se usa frecuentemente para representar la temperatura media mensual (Wilks 1995, p 88). Donde la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) de la distribución Gaussiana es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \infty < x < \infty \quad (16)$$

Los dos parámetros de la distribución son la media ( $\mu$ ), y la desviación estándar ( $\delta$ ). Entonces, el procedimiento propuesto Watanabe et al, (2012) para corregir los parámetros estadísticos de la  $T_a$  es la siguiente:

$$u_{cor} = u_o + u_p - u_b \quad (17)$$

$$\sigma_{cor} = \frac{\sigma_p * \sigma_o}{\sigma_b} \quad (18)$$

Donde, *cor* denota el parámetro corregido y los índices *b*, *p* y *o* corresponden a las iniciales de datos simulados en el periodo base, proyectado y observado respectivamente. Después que los parámetros son corregidos, los datos de la  $T_a$  son corregidos de la siguiente manera:

$$x_{cor,i} = F^{-1}(F(x_{p,i}; u_p, \sigma_p); u_{cor}, \sigma_{cor}) \quad (19)$$

Donde F es la función de distribución acumulada (FDA) de la distribución estadística asumida.

- **La precipitación ( $Pr$ )**

Una elección usual para representar la  $Pr$  es la distribución gamma (Wilks 1995, p 95). La distribución gamma está definida por la siguiente FDP.

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta\Gamma(\alpha)}, x, \alpha, \beta > 0 \quad (20)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de forma y  $\beta$  el parámetro de escala. Donde la media ( $\mu$ ) es  $\alpha\beta$  y su varianza  $\delta^2$  es  $\alpha\beta^2$ . Según el método de los momentos  $\alpha, \beta$  es determinada de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\mu^2}{\delta^2}, \beta = \frac{\delta^2}{\mu} \quad (21)$$

Para la Pr, en los meses donde la Pr = 0.0 mm es cambiado por Pr\* = 0.01 mm. Después de cambiar los valores donde la Pr = 0.0 mm, la u y el CV se corrigen de la siguiente manera:

$$u_{cor} = \frac{u_p * u_o}{u_b} \quad (22)$$

$$CV_{cor} = \frac{CV_p * CV_o}{CV_b} \quad (23)$$

Luego, dos parámetros estadísticos  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados a partir de la u y CV corregidos. Después que los parámetros de la distribución estadísticas de los datos de la corrección de sesgo son obtenidos, la Pr corregida se estima a partir de la distribución obtenida de la siguiente manera;

$$x_{cor,i} = F^{-1}(F(x_{p,i}; k_p, \Theta_p); k_{cor}, \Theta_{cor}) \quad (24)$$

Donde F es la FDA de la distribución Gamma de dos parámetros. Finalmente, el método se aplicó a las simulaciones climáticas futuras de los MCG (2050-2075)

#### 3.5.4. Etapa IV: Modelización hidrológica del modelo GR2M

Esta etapa comparó la validación, calibración y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico GR2M. Se utilizó como variable de ingreso al modelo la Pr y la evapotranspiración potencial (EP) mensual en mm. Para el cálculo de la EP, se utilizó la formulación propuesta por Oudin et al. (2005), la cual utiliza la radiación global (que depende de la latitud y el día juliano) y la temperatura media diaria. Como en el estudio se trabajó con la Ta mensual, para el cálculo de la EP se tuvo en cuenta los siguientes aspectos: Primero, que la radiación global entre uno y otro día dentro de un mes estacional no varía significativamente; segundo, que la Ta mensual es un valor representativo del promedio de la Ta diaria. Con lo mencionado, se comparó el cálculo de la EP mensual, obtenida de la Ta diario (acumulado de 31 días) y con la Ta mensual, calculada para el día central (15) del mes analizado. Los resultados mostraron valores de EP casi cercanos, lo cual permitió generar los escenarios de EP mensual para el estudio de manera confiable, utilizando la metodología propuesta por Oudin (Anexo Figura 8-4).

**a. *Uso de la herramienta del modelo***

Para la modelización hidrológica de los escenarios se utilizó como herramienta el modelo GR2M, desarrollado en Excel. Herramienta que describe los parámetros del modelo, valores iniciales de producción y transferencia, periodo de análisis y criterio de eficiencia, que están describen en la Tabla 3-6.

**b. *Calibración y validación del modelo***

En el desarrollo del modelo, se tomó un año como periodo de inicialización, (1964) ya que es una práctica común excluir el primer año en la evaluación de los caudales estimados, por las discrepancias que puedan presentarse al comienzo de un período de simulación debido a la selección de las condiciones iniciales (Perrin et al., 2003; Mouelhi et al., 2006).

Para el periodo de calibración del modelo, se tomó 2/3 de la serie hidrológica, que fue adicionada a la herramienta Solver del programa Excel, permitiendo encontrar los valores de los parámetros ( $X_1$ ;  $X_2$ ), que mejor desempeño el modelo, maximizando una función objetivo en este caso el Nash-Sutcliffe descrita en el ítem 3.2.4 de la revisión literaria. El uso del coeficiente de determinación  $R^2$ , la raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE y el porcentaje de desviación respecto al caudal observado PBIAS permitió confirmar la calidad de los resultados.

La validación en el modelo GR2M se realizó para el periodo restante, siendo evaluado gráfica y estadísticamente (Nash,  $R^2$ , RSME y PBIAS) su desempeño.

Tabla 3-6 Hoja de cálculo del modelo GR2M

Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )		4380	Descripción
Parámetros del modelo	Transformado	Real	Según Perrin et al. (2006), recomienda iniciar con los parámetros $X_1=6$ y $X_2= 1$ , valores que se ingresan en la columna "transformado". Los valores transformados se usan para la optimización de parámetros, mientras que los valores reales se usan en el modelo para los cálculos del escurrimiento.
X1: Capacidad de producción suelo (mm)	6	315.91	
X2: Coeficiente de intercambio (mm)	1	1.07	
Valores iniciales			$S_0$ y $R_0$ corresponden al 50% del nivel máximo de los reservorios.
Nivel inicial $S_0$ producción Suelo (max: $X_1$ mm)		157.95	
Nivel inicial $R_0$ transferencia Suelo (max:60 mm)		30	
Periodo			En el período de análisis se debe incluir: (1) el periodo de inicialización (recomendable 12 meses) que permite atenuar totalmente los efectos de los primeros cálculos, que permite al modelo tomar un funcionamiento normal, y (2) el periodo de duración de la prueba.
Longitud del período de iniciación (mensual)		12	
Longitud del periodo de calibración (mensual)		351	
Inicio de información mensual		09/1970	
Fin información mensual		12/1999	
Precipitación media observada (mm/mensual)		61.1	Las series mensuales de precipitación y de evapotranspiración (en mm) no deben tener datos faltantes. Las series mensuales de caudal (en mm) no son datos de entrada del modelo pero se utilizan para la calibración y evaluación del modelo.
Evaporación potencial media observada (mm/mensual)		53.3	
Caudal medio observado (mm/mensual)		139.8	
Raíz cuadrada de la media de caudal simulado		2.4	
Logaritmo de la media		2.1	
Criterio de eficiencia (%)			Cuando existan datos faltantes deben ser reemplazados con -1 para que sean excluidos de los cálculos de calibración del modelo permitiendo la secuencia de la serie.
Nash (Q)		88.1	
Nash (VQ)		92.2	
Nash (ln(Q))		87.2	
Bias		103.3	

Fuente: Elaboración propia

### c. Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad del modelo hidrológico consistió en la modificación de los parámetros, variando en ( $\pm 10$ ) por ciento de su valor, en respuesta a su eficiencia NSE, manteniendo el otro parámetro fijo y viceversa. Con la finalidad de ver la respuesta a la variación porcentual ( $\Delta\%$ ) que sufren los caudales medio mensuales simulados, identificando, qué parámetros tienen mayor influencia en los resultados del modelo.

### 3.5.5. Etapa V: Generación de escenarios hídricos futuros

Una vez desarrollado la etapa III de escenarios climáticos se procede a determinar el régimen de caudales para el horizonte 2050-2075 mediante el modelo hidrológico GR2M calibrado y validado. El análisis de caudales se basó mediante la curva de duración y análisis estacional mensual.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. ETAPA I

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

El AED comprendió el análisis gráfico y estadístico de la información mensual y anual de las variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio, en la que el símbolo de color rojo representa la media y el símbolo de color azul; los valores atípicos y la línea horizontal de la caja es la mediana (Figura 4-1).

Los caudales medios mensuales para la estación hidrológica Unocolla, analizados mediante el diagrama de cajas, presenta un régimen de caudales mínimos de junio a noviembre, periodo en que se presentan los mínimos o nulos aportes de precipitación; por el contrario, de enero a marzo el régimen de caudales es mayor, presentando la mayor variabilidad el mes de febrero que está definido por la amplitud en su caja y con valores extremos muy marcados (bigotes) que muestran los eventos (avenidas y sequías).

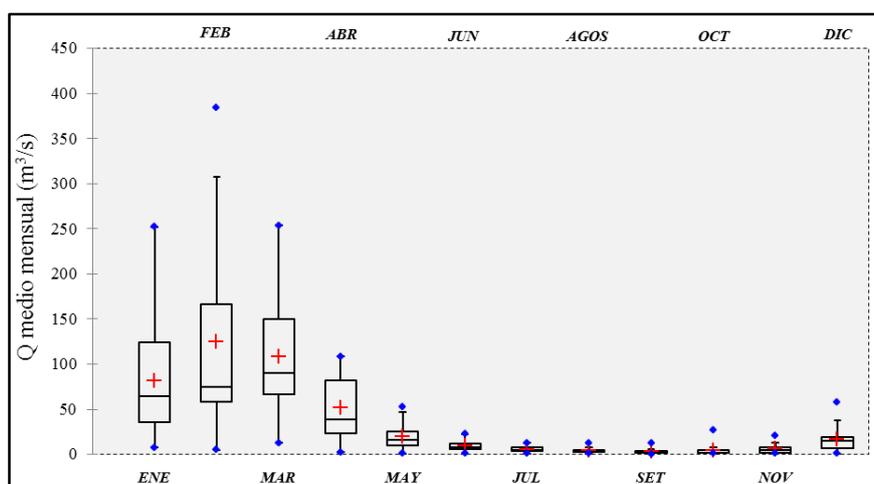


Figura 4-1 Régimen y variabilidad de caudales medios mensuales registrados en la estación hidrológica - Unocolla, periodo (1964-1999)

La Figura 4-2 muestra el diagrama de cajas a escala anual en las estaciones emplazadas próximas al área de estudio.

Las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca de estudio (Quillasani, Pampahuta, Lampa, Cabanillas y Lagunillas) presentan similar variabilidad con respecto a la precipitación media multianual (Figura 4-2a). La estación pluviométrica Sta. Lucia fue descartada por presentar datos dudosos e inconsistentes. La información de la estación Lampa y Juliaca (cuenca Coata), Llalli, Pucara y Taraco (cuenca Ramis) y Puno (Intercuenca 0173), presentaron valores atípicos, que fueron comparados con estaciones vecinas para su validez. Por ejemplo, la estación pluviométrica Ayaviri presentó errores de digitación que fue corregida.

La variabilidad de la temperatura media multianual de cada estación es mostrada mediante el diagrama de cajas de la Figura 4-2b. Las estaciones de Pampahuta y Lagunillas, ubicadas en la parte media alta de la cuenca, registran valores de temperatura menores a la registrada en las estaciones de Lampa, Cabanillas y Juliaca (ubicadas en la parte media y baja de la cuenca). Esta diferencia de temperaturas es debido al efecto termorregulador del lago. El descenso en la temperatura media, entre las estaciones ubicadas en la parte media- baja y alta de la cuenca, se estima en 3°C. En el Anexo IX, se describe la variabilidad de la temperatura y la precipitación mensual por estación mediante el uso del diagrama de cajas.

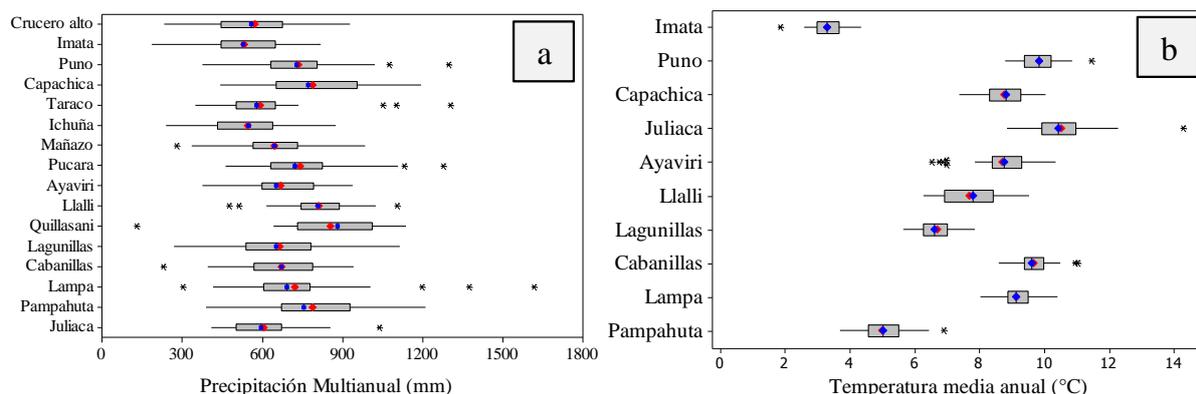


Figura 4-2 a) Diagrama de cajas de la serie de precipitación total anual por estación y b) Diagrama de cajas de la serie de temperatura media anual por estación. (Símbolo: azul la mediana y rojo la media)

La estadística descriptiva, permite complementar el análisis visual del diagrama de cajas, por ejemplo; valores de caudales mínimos, registrado en la estación hidrológica Unocolla en enero, febrero o marzo indica que hubo una sequía intensa, al ser comparado con su régimen de caudales tal como se muestra en la Tabla 4-1.

Así, en el estadístico de máximos valores de precipitación total mensual, registrado en la estación climatológica ordinaria “Lagunilla”, permite separar láminas de lluvias significativas en periodos que no corresponde (por ejemplo, periodo de estiaje). Y respecto a la temperatura media mensual que es registrado en la misma estación “Lagunillas”, permite observar la fluctuación de la temperatura mediante el estadístico “Rango”.

En el Anexo se presenta las estadísticas descriptivas de cada estación, para las variables de precipitación total mensual y temperatura media mensual.

Tabla 4-1 Estadística descriptiva de variables hidroclimáticas

		<b>Caudal medio (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>Estación hidroclimática Unocolla</b>	Media	81.4	125.1	107.9	51.7	19.4	9.7	5.5	3.7	3.1	4.0	6.4	16.3	
	Error típico	12.9	19.9	12.0	6.3	2.6	1.2	0.6	0.6	0.6	1.2	1.2	2.7	
	Mediana	64.7	75.1	90.5	38.6	16.3	8.2	4.6	2.7	2.0	1.8	4.5	15.0	
	Desviación estándar	64.6	101.4	61.4	31.7	12.9	5.8	3.0	2.8	2.9	5.8	6.0	13.4	
	Varianza de la muestra	4179.5	10284.7	3770.1	1004.1	166.6	34.2	9.3	7.6	8.2	33.2	35.6	179.0	
	Curtosis	0.7	0.3	-0.2	-1.2	0.7	0.0	0.2	3.5	4.3	10.5	1.1	2.8	
	Coef. de asimetría	1.1	1.1	0.6	0.3	1.0	0.8	0.8	1.7	2.1	3.1	1.4	1.5	
	Rango	244.2	379.0	241.1	106.1	51.3	21.2	11.6	11.9	12.0	26.1	19.8	56.9	
	Mínimo	7.7	5.2	12.6	2.3	0.9	1.0	0.9	0.8	0.4	0.6	1.2	0.7	
	Máximo	252.0	384.1	253.7	108.4	52.1	22.2	12.5	12.7	12.4	26.7	20.9	57.5	
	Numero de valores	25	26	26	25	25	25	25	25	25	26	25	25	24
		<b>Precipitación media</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>Estación Lagunillas</b>	Media	165.8	139.0	109.8	39.7	8.2	3.5	1.7	9.2	10.8	28.5	51.0	96.0	
	Error típico	11.2	10.9	8.3	4.7	1.7	1.6	0.5	2.7	2.4	5.0	6.6	6.8	
	Mediana	163.4	132.8	115.4	29.8	5.7	0.0	0.0	2.7	5.8	18.8	37.0	92.2	
	Desviación estándar	69.2	67.3	51.3	29.0	10.6	9.9	3.1	16.4	14.5	30.6	40.7	42.0	
	Varianza de la muestra	4791.2	4531.7	2631.6	838.1	113.3	98.3	9.3	270.1	211.3	935.7	1658.2	1763.6	
	Curtosis	-0.6	-1.3	-0.3	-0.7	7.0	20.4	7.6	7.6	5.6	1.1	-0.6	-0.7	
	Coef. de asimetría	0.0	0.2	0.4	0.7	2.4	4.3	2.6	2.7	2.3	1.4	0.7	0.1	
	Rango	276.9	214.3	219.1	91.2	50.8	54.6	14.4	76.8	66.7	111.8	140.5	167.7	
	Mínimo	36.6	32.2	18.8	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	16.1	
	Máximo	313.5	246.5	237.9	95.9	50.8	54.6	14.4	76.8	66.7	111.8	141.5	183.8	
	Numero de valores	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
		<b>Temperatura media</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>Estación Lagunillas</b>	Media	7.6	7.6	7.5	7.2	6.0	4.5	4.2	5.1	6.5	7.7	8.3	8.2	
	Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
	Mediana	7.4	7.6	7.3	7.1	6.1	4.4	4.1	5.0	6.5	7.6	8.2	8.1	
	Desviación estándar	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	1.0	1.0	
	Varianza de la muestra	1.1	1.0	0.9	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.9	0.9	
	Curtosis	-0.5	-0.5	0.5	0.3	-0.5	-1.1	-0.4	0.9	-0.4	0.0	1.2	0.3	
	Coef. de asimetría	0.6	0.1	0.8	0.2	0.0	0.2	0.2	-0.1	-0.2	0.1	0.6	0.7	
	Rango	4.1	4.3	4.2	3.0	3.1	2.4	2.9	3.9	2.6	3.2	4.4	4.1	
	Mínimo	6.1	5.4	5.9	5.8	4.6	3.4	2.9	3.0	5.0	6.2	6.3	6.7	
	Máximo	10.2	9.8	10.1	8.9	7.6	5.8	5.8	6.9	7.6	9.4	10.7	10.9	
	Numero de valores	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Análisis de consistencia y homogeneidad

##### a. Caudal

Respecto a la ciclicidad de los fenómenos de estiaje y avenidas de caudales (Q) medios mensuales ocurridos en la cuenca del río Coata, se relacionan en mayor parte a los eventos ocurridos en la cuenca del río Ramis como se observa en la Figura 4-3, teniendo para este primer análisis visual una buena calidad de la información mensual de caudales.

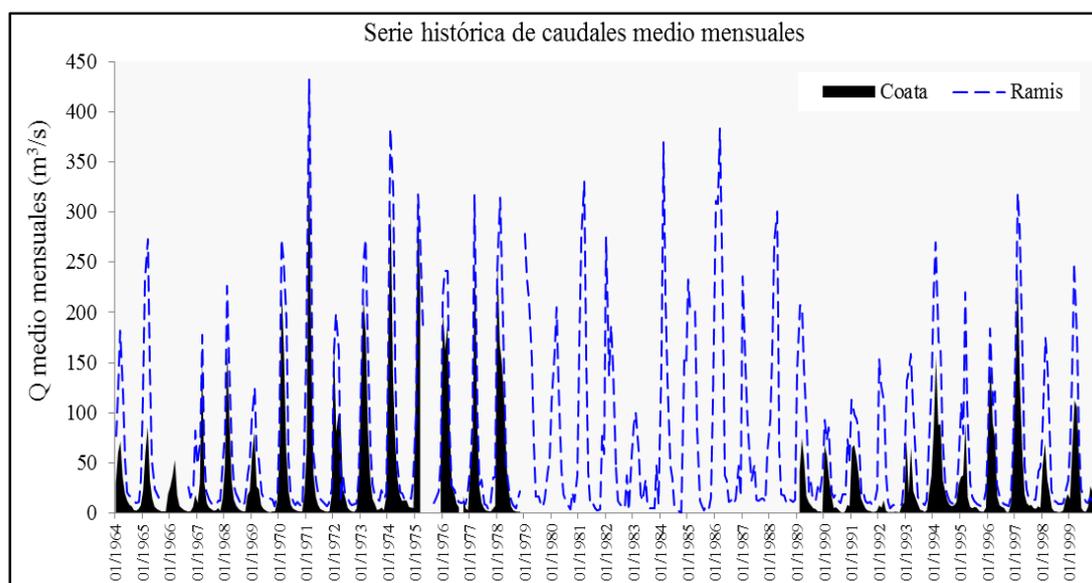


Figura 4-3 Comparación de los hidrogramas de los ríos Coata y Ramis

La Figura 4-4a, muestra el análisis de consistencia generados en base a 4 estaciones hidrométricas perteneciente a la región hidrográfica del Titicaca, mediante el uso del método del vector regional. Los resultados muestran similar variabilidad entre las estaciones hidrológicas. El vector fue formado con 3 datos mínimos por año y debido a esta restricción se ajustó al periodo eliminándose 4 años; 1975, 1980, 1981 y 1982.

La Figura 4-4b, muestra los índices anuales acumulados de las estaciones hidrométricas. Se observa que la estación hidrológica Ramis y Coata, para el periodo de análisis, presentó un comportamiento casi lineal con respecto al vector regional (color amarillo), la cual da una confiabilidad de la información registrada.

En relación a la crítica de datos hidrológicos, mediante el análisis de diferentes parámetros estadísticos (Tabla 4-2), los resultados muestran que la estación hidrométrica Coata presentó un valor de 0.18 en la Desviación Standard de los Desvíos (DED) y una correlación de 0.94 con respecto al vector regional, resultados aceptables para el análisis de consistencias siendo estos los parámetros más importantes.

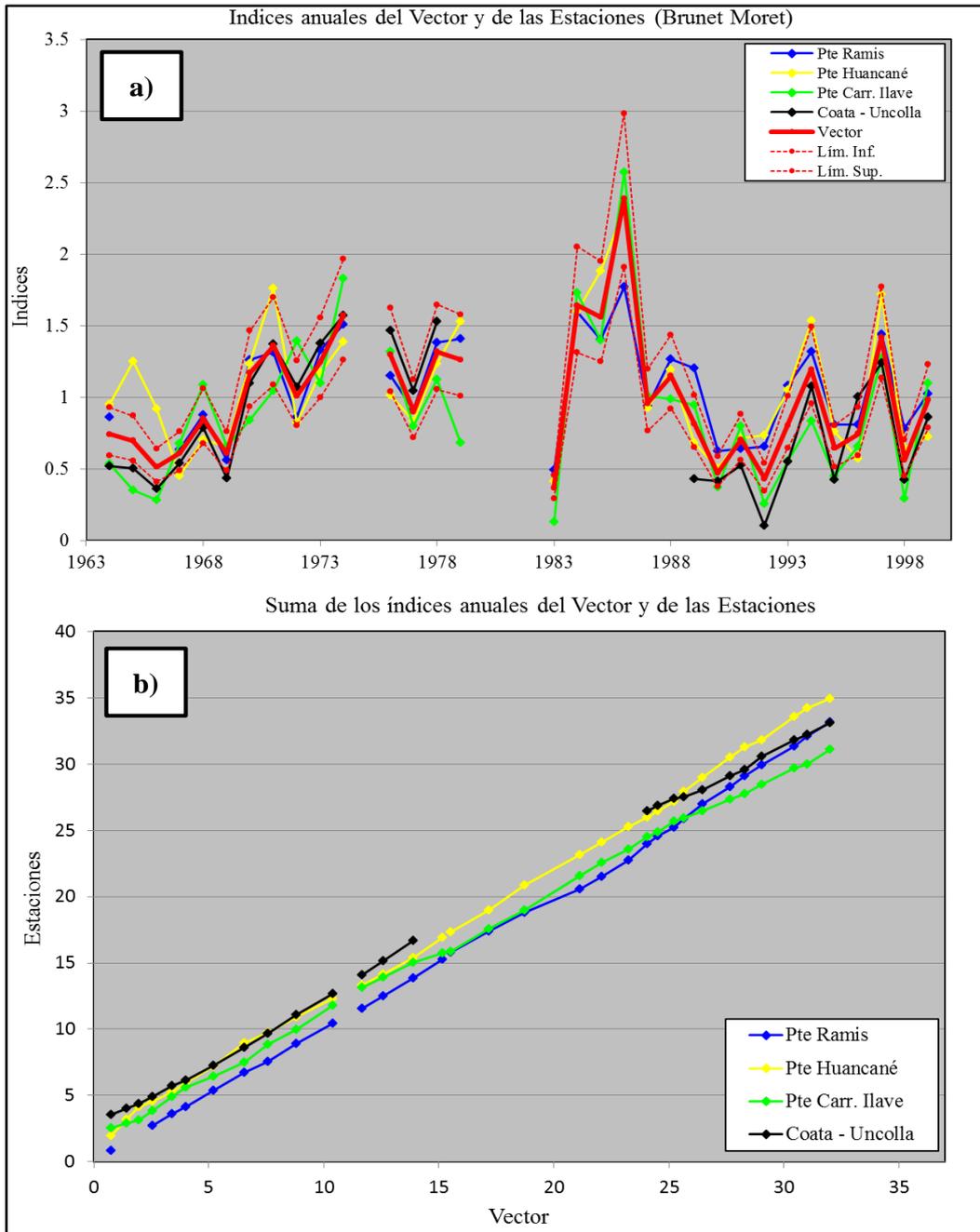


Figura 4-4 a) Índices anuales y b) Suma de índices anuales del vector regional de las estaciones hidrométricas pertenecientes a la región Titicaca

Tabla 4-2 Características de la información de las estaciones hidrométricas

Estación	N° (Años)	Coefficiente de variación	DED	Correlación / Vector	Calidad (/10)	Evaluación (/10)
Pte Ramis	30	0.323	0.178	0.928	8.6	7.5
Pte Huancané	32	0.438	0.222	0.886	7.3	7.2
Pte Carr. Ilave	32	0.573	0.228	0.915	5.0	5.0
Coata - Uncolla	25	0.522	0.180	0.940	6.0	6.0

Fuente: Elaboración propia

**b. Precipitación**

La precipitación total mensual, después de haber sido examinado en la fase de análisis exploratorio, se analizó su consistencia e homogeneidad mediante el método del vector regional de Índice Pluviométrico anual.

Para el análisis de consistencia, mediante el vector regional, se formaron grupos de estaciones pluviométricas, seleccionados bajo el criterio de ubicación geográfica (estaciones vecinas) y apoyados mediante una matriz de correlación (Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Matriz de correlación de las estaciones pluviométricas.

Grupos	Estaciones	Lampa	Juliaca	Taraco	Ayaviri	Llalli	Pucara	Puno	Mañazo	Capachica	Cabanillas	Crucero Alto	Imata	Ichuña	Pampahuta	Lagunillas	Quillisaní
I	Lampa	1.0															
	Juliaca	0.8	1.0														
	Taraco	0.7	0.6	1.0													
	Ayaviri	0.7	0.7	0.6	1.0												
	Llalli (25*)	0.6	0.4	0.6	0.5	1.0											
	Pucara	0.8	0.7	0.7	0.7	0.4	1.0										
II	Puno	0.8	0.8	0.6	0.6	0.5	0.6	1.0									
	Mañazo (23*)	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.3	0.8	1.0								
	Capachica	0.1	0.4	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.2	1.0							
	Cabanillas	0.5	0.6	0.6	0.5	0.8	0.6	0.8	0.7	0.5	1.0						
III	Crucero Alto	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.5	0.5	0.5	1.0					
	Imata	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.7	0.6	0.3	0.6	0.7	1.0				
	Ichuña	0.3	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.7	0.4	0.2	0.4	0.7	0.7	1.0			
IV	Pampahuta	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.8	0.6	0.4	0.7	0.8	0.8	0.8	1.0		
	Lagunillas (27*)	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.8	0.6	0.5	0.7	0.8	0.8	0.6	0.9	1.0	
	Quillisaní (52*)	0.4	0.3	0.5	0.3	0.5	0.5	0.4	0.7	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6	0.9	0.8	1.0

Fuente: Elaboración propia.

Los índices anuales del vector regional analizados en 4 grupos de estaciones pluviométricas presentaron similar variabilidad. Además, los índices anuales se encontraban ubicados dentro de los límites de confianza del vector regional (Figura 4-5), dando una confiabilidad a la información utilizada para este primer análisis. Los grupos generados son: a) Grupo I, generado en base a 6 estaciones pluviométricas, el vector fue formado con 3 datos mínimo por año; b) Grupo II, generado en base a 4 estaciones pluviométricas, el vector fue formado con 3 datos mínimo por año y por causa de datos insuficientes se eliminaron 4 años, 1981 a 1984; c) Grupo III, generado en base a 3 estaciones pluviométricas, el vector fue formado con 3 datos mínimo por año; d) Grupo IV, generado en base a 3 estaciones pluviométricas, el vector fue formado con 3 datos mínimo por año y por causa de datos insuficientes se eliminaron 27 años de 1989 a 2015.

La Figura 4-6, complementa la consistencia de la información, al presentar una tendencia casi lineal en sus índices acumulados de cada estación.

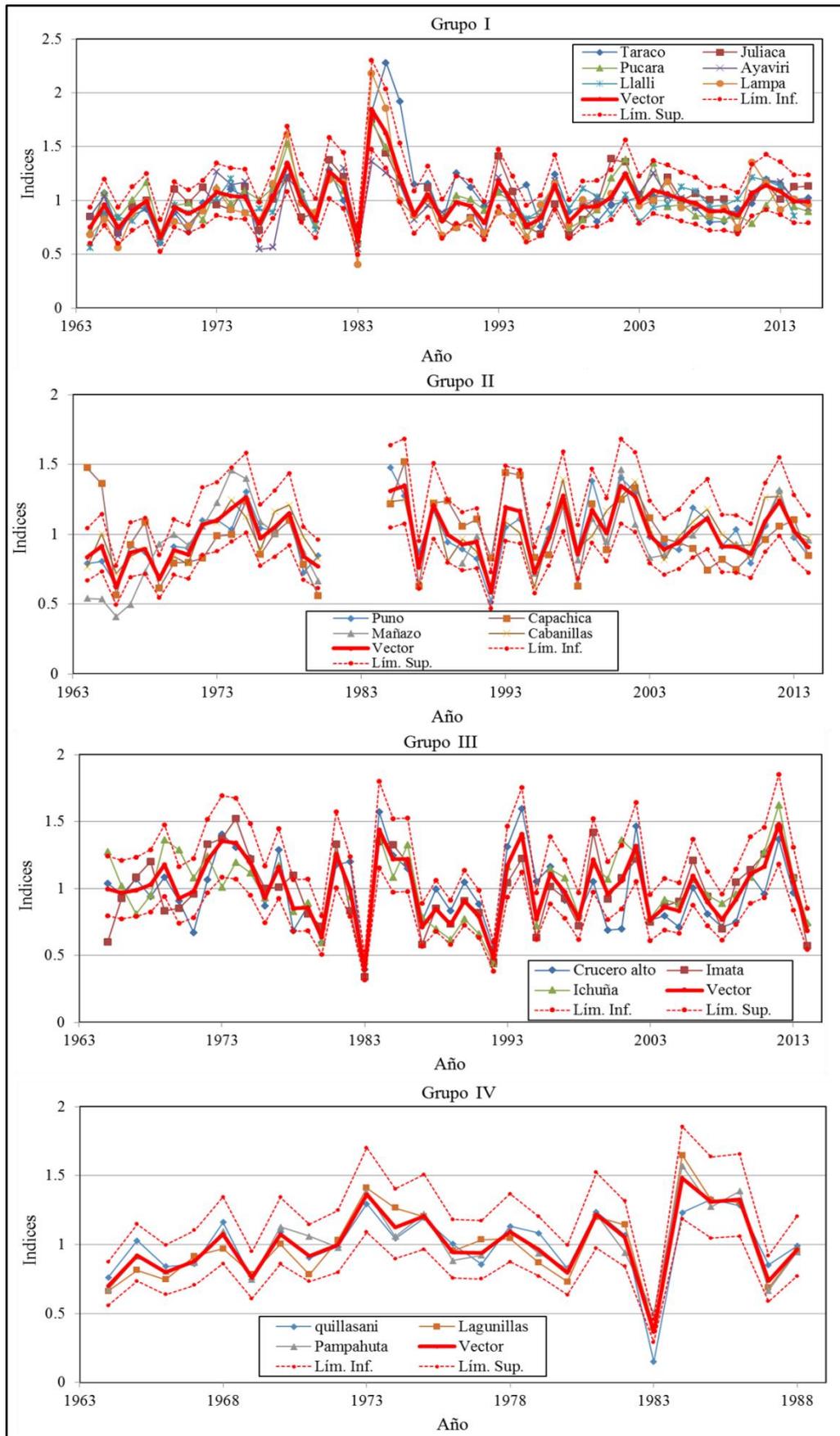


Figura 4-5 Grupos de índices anuales del vector regional y de las estaciones pluviométricas (Brunet Moret)

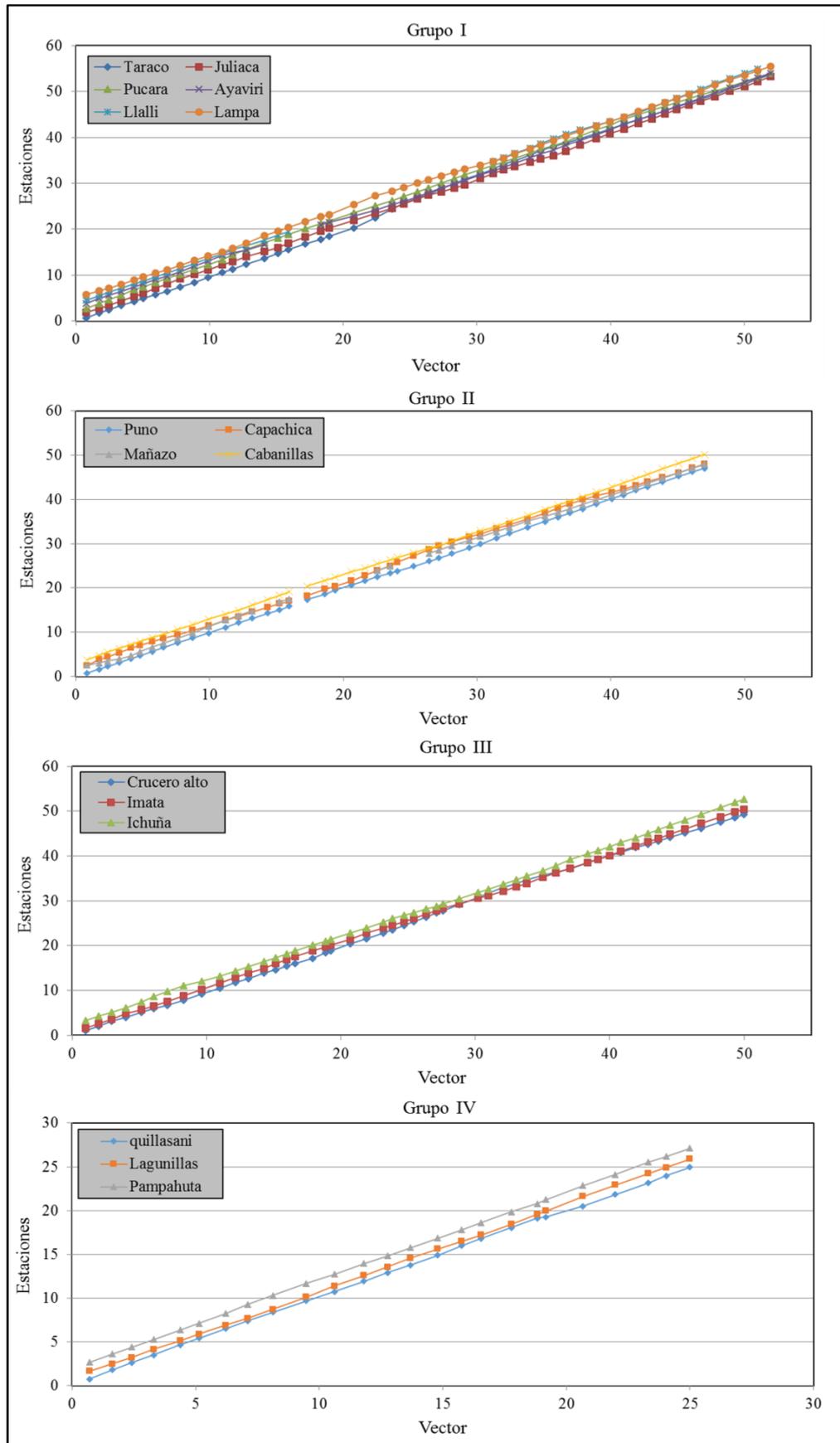


Figura 4-6 Suma de los índices anuales del vector regional y de las estaciones pluviométricas de cada grupo

En relación a la crítica de datos (Tabla 4-4), los 4 grupos de estaciones pluviométricas presentaron un calificativo aprobatorio con rangos de DED de 0.08 – 0.138 y correlaciones de 0.83 - 0.91 respecto al vector regional, siendo estos dos parámetros los más importantes que dan una idea del comportamiento de una estación (Espinoza, 2005).

Tabla 4-4 Características de la información de las estaciones pluviométricas

Grupo	Estación	Nº (Años)	Coefficiente de variación	D.E. Desvíos	Correlación /Vector	Calidad (/10)	Evaluación (/10)
I	Lampa	52	0.303	0.13	0.921	9.1	9.1
	Juliaca	52	0.228	0.12	0.852	9.1	9.1
	Taraco	52	0.289	0.175	0.82	9.2	9.0
	Ayaviri	49	0.205	0.136	0.789	9.3	9.3
	Llalli	38	0.164	0.11	0.729	9.0	9.0
	Pucara	52	0.22	0.105	0.882	9.5	9.5
II	Puno	47	0.21	0.077	0.929	9.5	9.2
	Mañazo	39	0.255	0.142	0.827	9.5	9.5
	Capachica	47	0.248	0.183	0.675	8.7	8.7
	Cabanillas	47	0.196	0.088	0.895	9.5	9.5
III	Crucero Alto	50	0.271	0.131	0.870	9.2	8.9
	Imata	50	0.274	0.121	0.893	9.1	9.1
	Ichuña	50	0.255	0.122	0.881	9.3	9.3
IV	Pampahuta	25	0.248	0.058	0.971	9.7	9.7
	Lagunillas	25	0.278	0.075	0.965	9.7	9.4
	Quillisani	25	0.247	0.087	0.935	9.5	7.8

Fuente: Elaboración propia

## 4.2. ETAPA II

Para el análisis climático, se trabajó con la precipitación y temperatura promediada sobre la cuenca del río Coata. El **“periodo base de análisis”** comprendió de **1964 a 1989**, que corresponde a una serie de 26 años de información consistenciado y completado.

### 4.2.1. Precipitación

La característica de la precipitación total mensual sobre la cuenca del río Coata es mostrada en la Figura 4-7 a, b y c. La Figura 4-7a, muestra la variación estacional de la precipitación total mensual (máxima, mínima y media) areal de la cuenca, donde el mínimo o nulo aporte pluviométrico se registra en junio y julio, y, de diciembre a marzo presentan una marcada temporada de lluvias. La Figura 4-7b, muestra la variación interanual de la precipitación media areal de la cuenca, en cuyo caso la tendencia de la lluvia es a ascender, presentando en los últimos 26 años un aumento del 19% del promedio multianual. La Figura 4-7c, destaca la relación de la precipitación media anual con la altitud, donde se estima un gradiente de 32 mm por cada 100 metros sobre los 3800 m.s.n.m., aproximadamente.

#### 4.2.2. Temperatura

La característica de la temperatura media mensual sobre la cuenca del río Coata es mostrada en la Figura 4-7 d, e y f. La Figura 4-7d, muestra la variación estacional de la temperatura (máxima, mínima y media) areal de la cuenca, observando una marcada diferencia de valores en los periodos de estiaje y avenida. Las máximas temperaturas medias mensuales a lo largo del ciclo anual, fluctúan entre los 5.1 °C y 10.2 °C, en tanto que las mínimas están en el rango de 2.4 °C y 7.0 °C, con una temperatura media mensual de la cuenca que oscila de 3.8 °C a 8.3 °C. La Figura 4-7e, muestra la distribución interanual de la temperatura media areal de la cuenca del río Coata con tendencia ascendente, llegando a presentar un incremento de 1 °C. La Figura 4-7f, muestra la gradiente de temperatura respecto a la altitud en términos de 1 °C de disminución por cada 100 m de incremento de altitud.

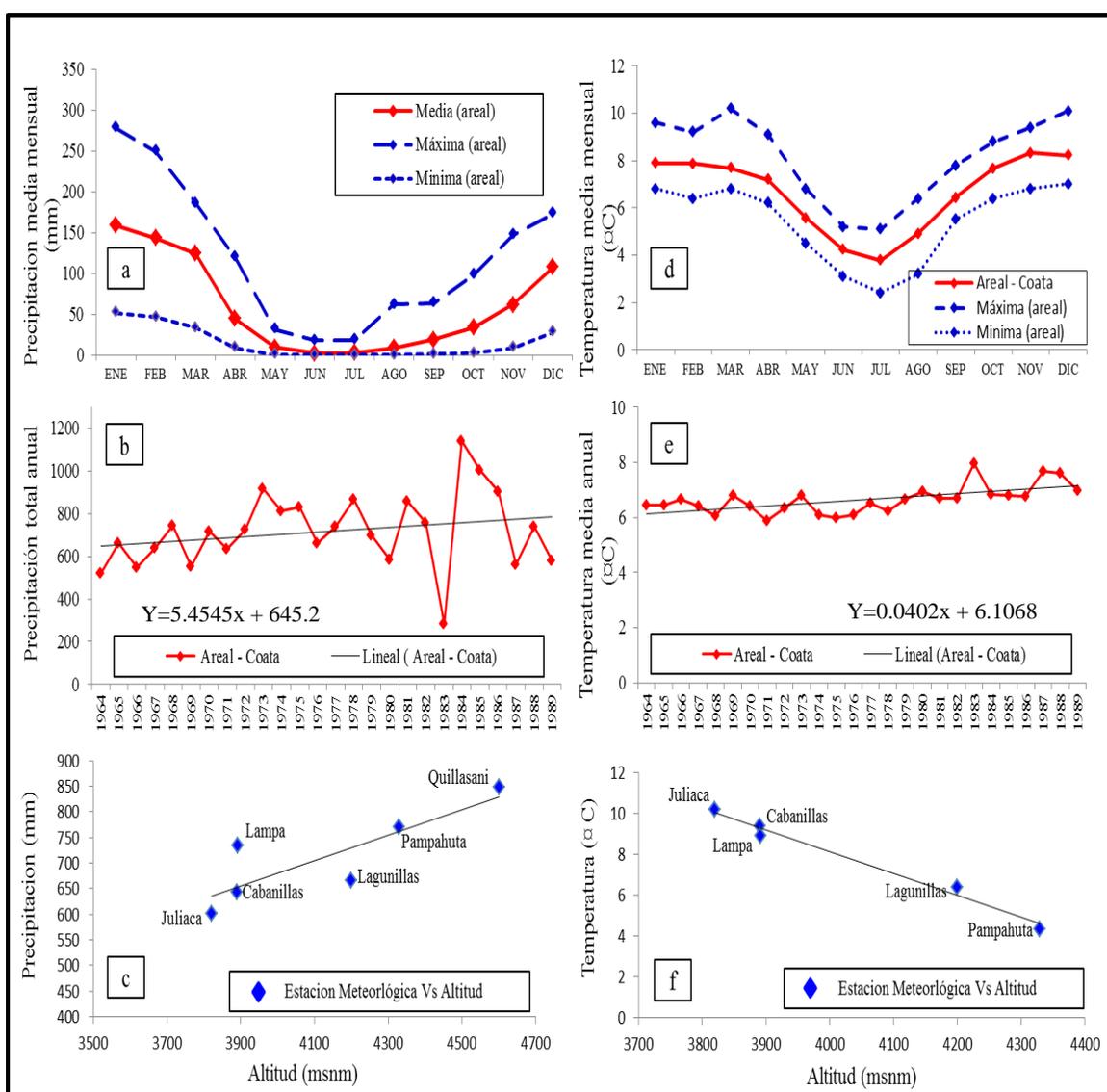


Figura 4-7 Variación estacional (a, d); interanual (b,e) y altitudinal (c, f) de la precipitación y temperatura areal promediada sobre la cuenca del río Coata

### 4.3. ETAPA III

#### 4.3.1. Selección y validación de la grilla de los MCG para el periodo actual

Para la selección de la grilla en la cual se almacena las variables de precipitación total mensual y temperatura media mensual se utilizó indicadores estadísticos y para la validación de los MCG, métodos gráficos. En la Figura 4-8, como ejemplo se muestran el mapa de ubicación de los centroides de las grillas del modelo CCSM4 a ser seleccionado y el centroide de la cuenca del río Coata.

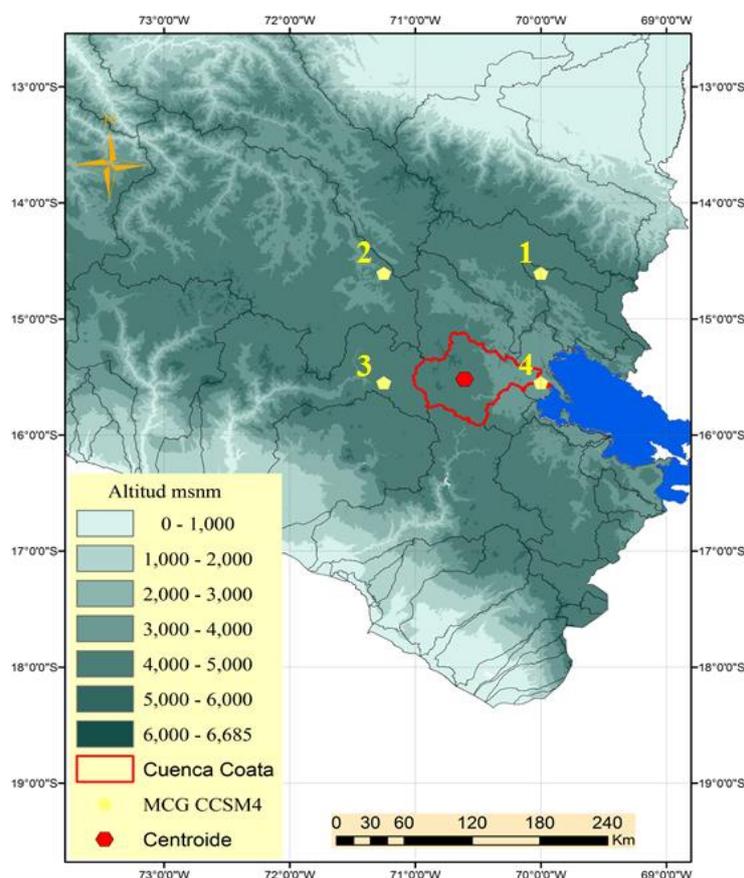


Figura 4-8 Ubicación de los centroides de las grillas del MCG-CCSM4 y observado

- **Método estadístico**

Se comparó la información de la precipitación total mensual y temperatura media mensual areal observada, con la información del periodo base de los MCG. La selección de la grilla se obtuvo mediante el coeficiente de correlación (R) y el menor sesgo anual (SA) entre la media anual observada y simulada del MCG.

Para la precipitación, los resultados del análisis de la selección de la grilla se observa en la Tabla 4-5. Todos los modelos muestran una buena R en las grillas, con un rango que varía de 0.60 a 0.77 de correlación. Respecto a los resultados del menor SA, son variables, y el modelo sobrestima al observado con un rango que varía de 236 a 3839 mm.

Similar comportamiento se tuvo con la variable de la temperatura media mensual (Tabla 4-6). Todos los modelos presentaron una buena R con valores que van de 0.53 a 0.87. Respecto al menor SA de la

temperatura, los modelos sub-sobrestiman en mayor parte al observado con diferencias que están entre los -11 °C y 7 °C respectivamente.

Finalmente, se seleccionó la grilla del modelo que presentó en ambas variables (precipitación y temperatura) un buen desempeño estadístico (valores resaltados en color rojo). La Tabla 4-7 muestra un resumen estadísticos de las grillas de los MCG seleccionados. Hay que tener presente, que no necesariamente un modelo que simule bien el clima actual, simulara correctamente el futuro. Es así, que para evaluar los escenarios hídricos futuros, algunos autores seleccionan los mejores modelos, otros, reducen la incertidumbre de los MCG utilizando el promedio de ellos, o si no, utilizan el promedio de los modelos seleccionados.

Tabla 4-5 Selección de las grillas de los MCG - precipitación

MCG	(simulado – observado) (R)				(simulado – observado) (SA)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
CCSM4	0.67	<b>0.73</b>	0.70	0.67	1354	<b>1361</b>	1942	2827
CESM1-CAM5	0.68	<b>0.72</b>	0.71	0.65	1599	<b>1702</b>	1968	3160
CMCC-CM	0.77	0.75	<b>0.68</b>	0.72	671	522	<b>302</b>	353
CNRM-CM5	0.73	<b>0.66</b>	0.67	0.73	1098	<b>236</b>	1634	2870
MIROC5	<b>0.71</b>	0.60	0.70	0.70	<b>1414</b>	732	2253	3383
MRI-CGCM3	0.75	0.70	0.76	<b>0.75</b>	3063	3839	1897	<b>1061</b>

Tabla 4-6 Selección de las grillas de los MCG - temperatura

MCG	(simulado – observado) (R)				(simulado – observado) (SA)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
CCSM4	0.87	<b>0.88</b>	0.86	0.87	-3.6	<b>-1.9</b>	-3.8	-2.5
CESM1-CAM5	0.85	<b>0.86</b>	0.85	0.77	-4.3	<b>-3.0</b>	-4.6	-3.1
CMCC-CM	0.75	0.76	<b>0.84</b>	0.84	-4.5	-3.8	<b>0.0</b>	-3.0
CNRM-CM5	0.79	<b>0.84</b>	0.85	0.87	-11.1	<b>1.5</b>	-10.2	-10.0
MIROC5	<b>0.71</b>	0.50	0.70	0.77	<b>3.7</b>	6.8	2.4	3.4
MRI-CGCM3	0.82	0.80	0.83	<b>0.79</b>	-4.2	-1.6	-2.4	<b>0.0</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-7 Estadísticos de validación entre la información de los MCG y la información observada areal

MCG	Precipitación (mm)			Temperatura (° C)		
	R	Ds	RMSE	R	Ds	RMSE
CCSM4	0.73	119.3	141.5	0.87	2.1	2.2
CESM1-CAM5	0.74	141.7	175.7	0.74	1.9	3.3
CMCC-CM	0.68	86.0	67.7	0.85	1.6	0.9
CNRM-CM5	0.67	87.6	67.2	0.85	1.9	1.8
MIROC5	0.71	142.1	157.6	0.73	1.4	3.7
MRI-CGCM3	0.74	135.4	306.3	0.80	1.2	1.0
Observado	-	65.8	-	-	1.7	-

Fuente: Elaboración propia

- **Método gráfico**

Para complementar la evaluación estadística de los modelos. La validación se desarrolló a través del análisis gráfico.

Se comparó la estacionalidad de las precipitaciones de los MCG con el observado (Figura 4-9). Los MCG del grupo CMCC-CM, CNRM-CM5 reproducen mejor la estacionalidad de las precipitaciones, tanto en términos de la dinámica, como en volumen sobre la zona subtropical que presenta temporadas de lluvias (diciembre a abril), a excepción de los modelos CCSM4, CESM1-CAM5, MIROC5 y MRI-CGCM3 que tienen la particularidad de sobrestimar considerablemente la precipitación estacional, pudiendo alcanzar una anomalía de más del 100% del régimen observado en el periodo de avenidas. Aunque los modelos climáticos globales logran reproducir en parte la dinámica estacional, no reproducen con precisión los volúmenes de precipitación como se muestra en el diagrama de caja (Figura 4-9).

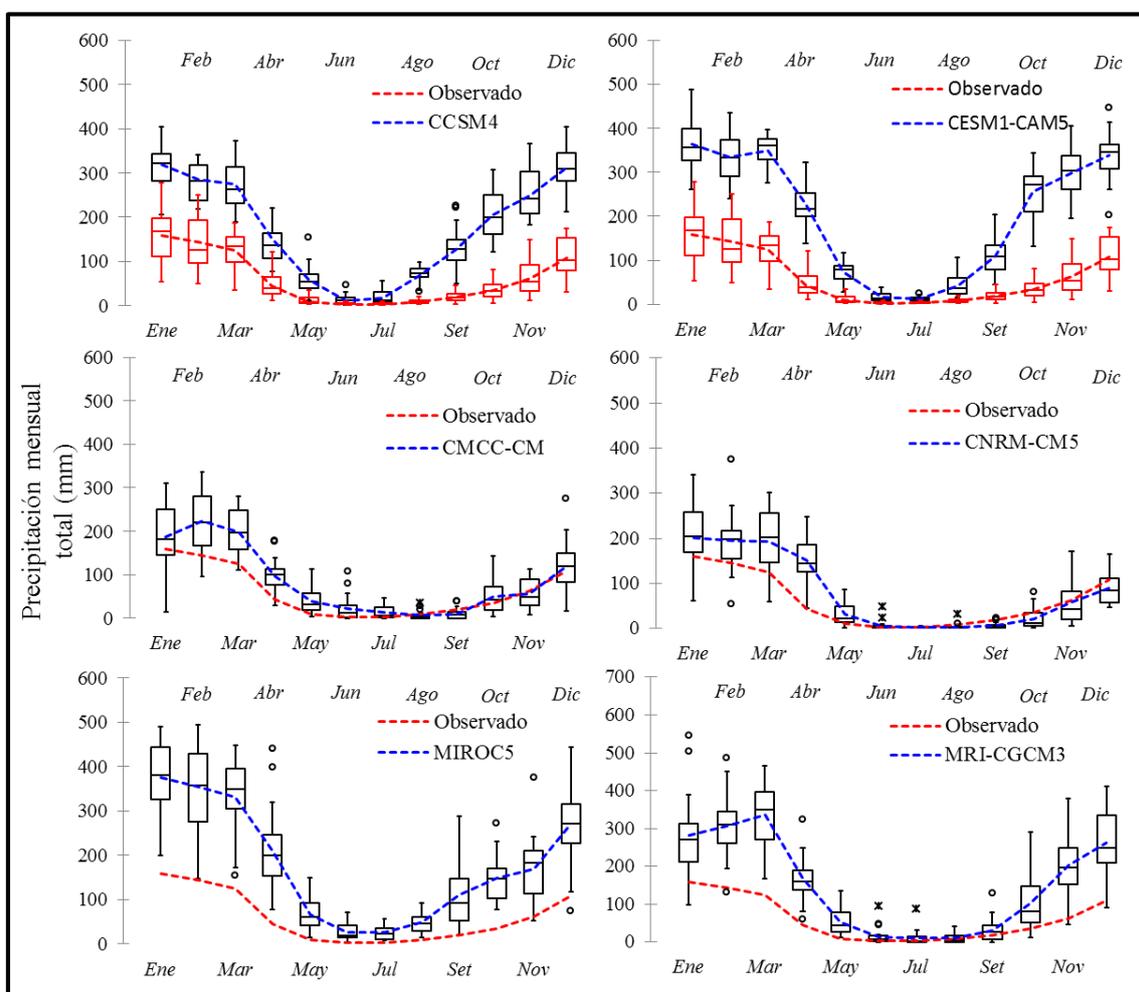


Figura 4-9 Comparación de la variabilidad y régimen pluviométrico de los MCG y la información observado, periodo 1964-1989

Un segundo análisis gráfico es observar si los MCG simulan los eventos ocurridos en la cuenca, y una forma de comparar datos de diferente población es mediante la estandarización, aplicada a la precipitación a escala anual (índice de precipitación anual). La cuenca del río Coata, ha experimentado periodos secos (1983) y húmedos (1984 y 1985), sin embargo, ninguno de los modelos de circulación general estudiadas reproduce la alternancia en general entre años húmedos (índices > 0) y años secos (índices < 0) correctamente. Por ejemplo, los MCG MIROC5 y CMCC-CM simulan solo correctamente el periodo húmedo (1985-1986) más no los periodos secos mostrados. Los demás modelos no presentaron una concordancia entre sus índices de precipitación anual como se observa en la Figura 4-10.

Los MCG, del grupo CMIP5, simulan bien la dinámica del régimen mensual de la temperatura media; el modelo CCSM4 y CESM1-CAM5 subestiman a la temperatura media observada, por el contrario los modelos MIROC5 y CNRM-CM5 sobreestiman al observado. Los modelos CMCC-CM y MRI-CGCM3, son los que representan mejor la estacionalidad, tanto en términos de la dinámica como en modulo (°C) respecto a la temperatura observada, como se observa en la Figura 4-11.

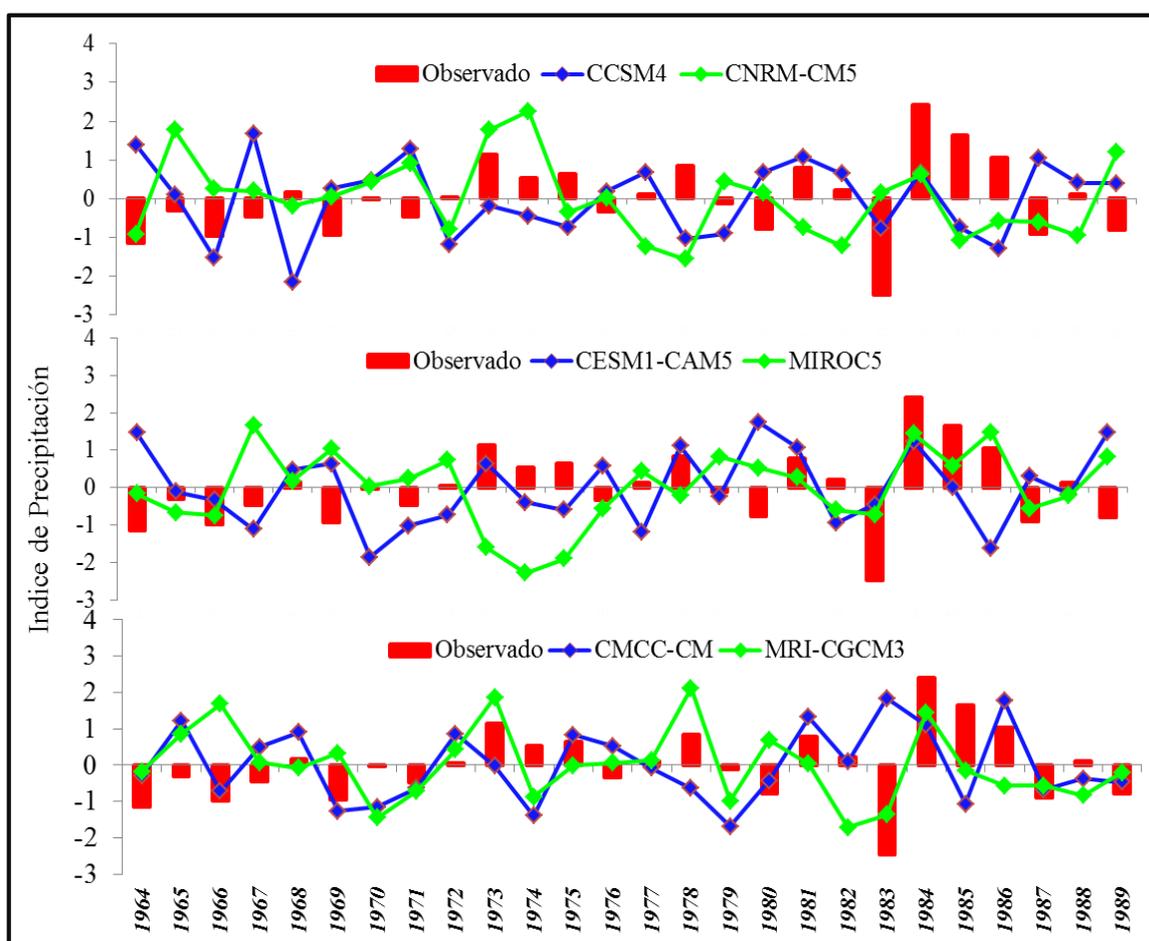


Figura 4-10 Comparación de índices de precipitación anual observados (rojo) y simulados (verde y azul) del clima actual, periodo 1964-1989

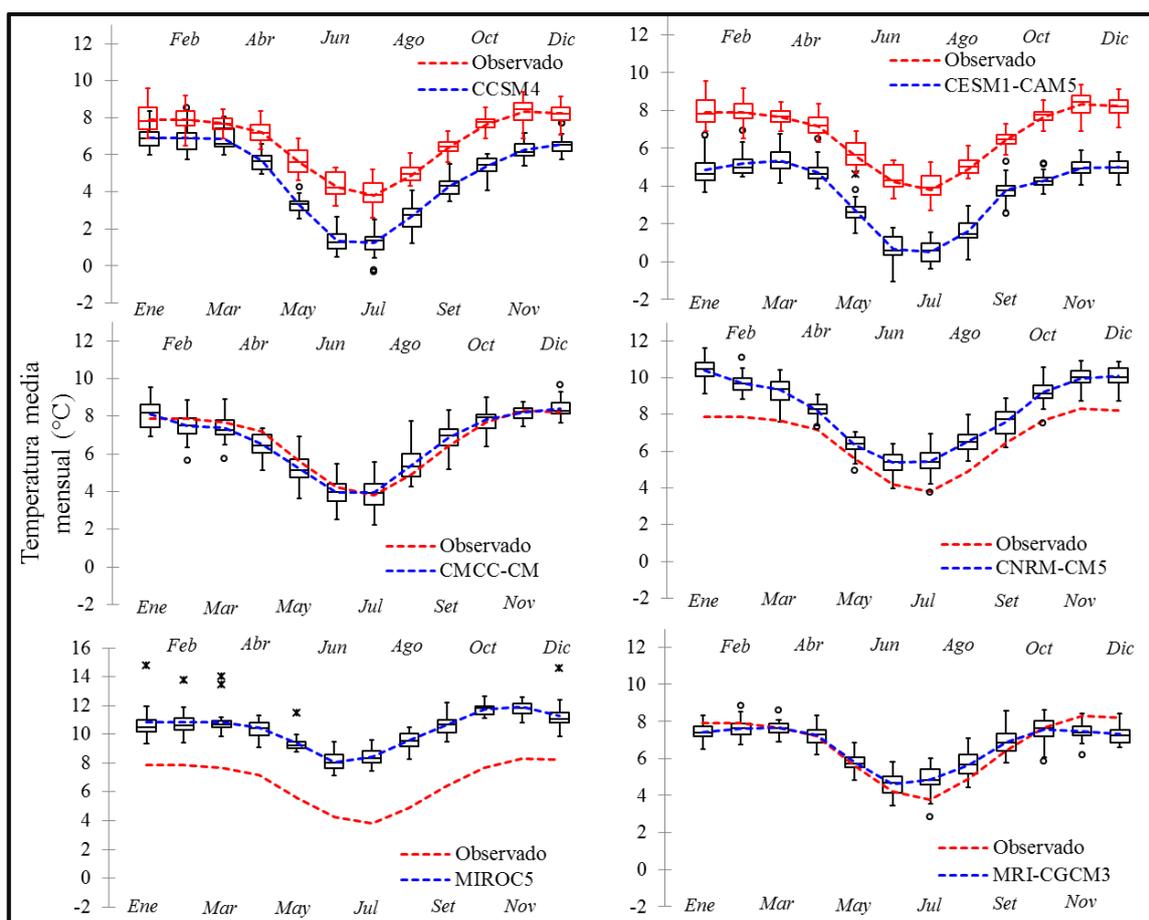


Figura 4-11 Comparación de la variabilidad y régimen térmico de los MCG y la información observada actual, periodo 1964-1989

### 4.3.2. Escenarios climáticos

Los resultados de la validación de los MCG, muestran una clara necesidad de corregir la escala temporal de las variables. Este capítulo muestra los resultados obtenidos en la corrección de los modelos, desarrollados en tres etapas: Calibración de parámetros periodo base (1964-1989), validación (1990-2015) y corrección del escenario futuro 2050-2075.

#### a) Calibración de los parámetros estadísticos de los MCG

Tabla 4-8 Calibración de parámetros estadísticos del mes de enero del modelo MRI-CGCM3

Variable Climática	(1964-1989)		(1990-2015)		(1964-1989) - (1990-2015)			
	Observada	MCG	MCG	MCG	Calibración de parámetros			
Precipitación (mm)	U	CV	U	CV	U	CV	$u_{corr}$	$CV_{corr}$
	159.20	0.41	282.7	0.35	294.18	0.32	165.7	0.4
Temperatura (°C)	U	Ds	U	Ds	U	Ds	$u_{corr}$	$Ds_{corr}$
	7.9	0.63	7.4	0.44	7.83	0.48	8.33	0.69

Fuente: Elaboración propia;  $X_{corr}$ ; indica parámetro corregido

Siguiendo la metodología propuesta por Watanabe, la Tabla 4-8 muestran los parámetros estadísticos calibrados correspondiente al mes de enero entre la variable observada y simulada del modelo MRI-CGCM3. Los cambios en los parámetros observados corregidos no son tan significativos por el corto horizonte escogido para validar del modelo. Una vez calibrado los parámetros, los datos de precipitación y temperatura son corregidos por el método “quantil mapping”.

La Figura 4-12a y 4-12b, muestran el ajuste del MCG MRI-CGCM3 en el periodo base (símbolo verde) y futuro (símbolo azul) a una FDA para el mes de enero. Es así, que una vez que se obtuvo la señal climática (cambios en los parámetros estadísticos) los parámetros observados son corregidos (1964-1989), para luego mediante una función de transferencia ajustar al modelo del periodo futuro (símbolo azul), obteniendo una nueva FDA (símbolo rojo) corregida, la cual presenta similar ajuste al periodo observado (símbolo negro). Tener en cuenta que la metodología solo corrige los parámetros estadísticos de la variable, más no las escalas temporales.

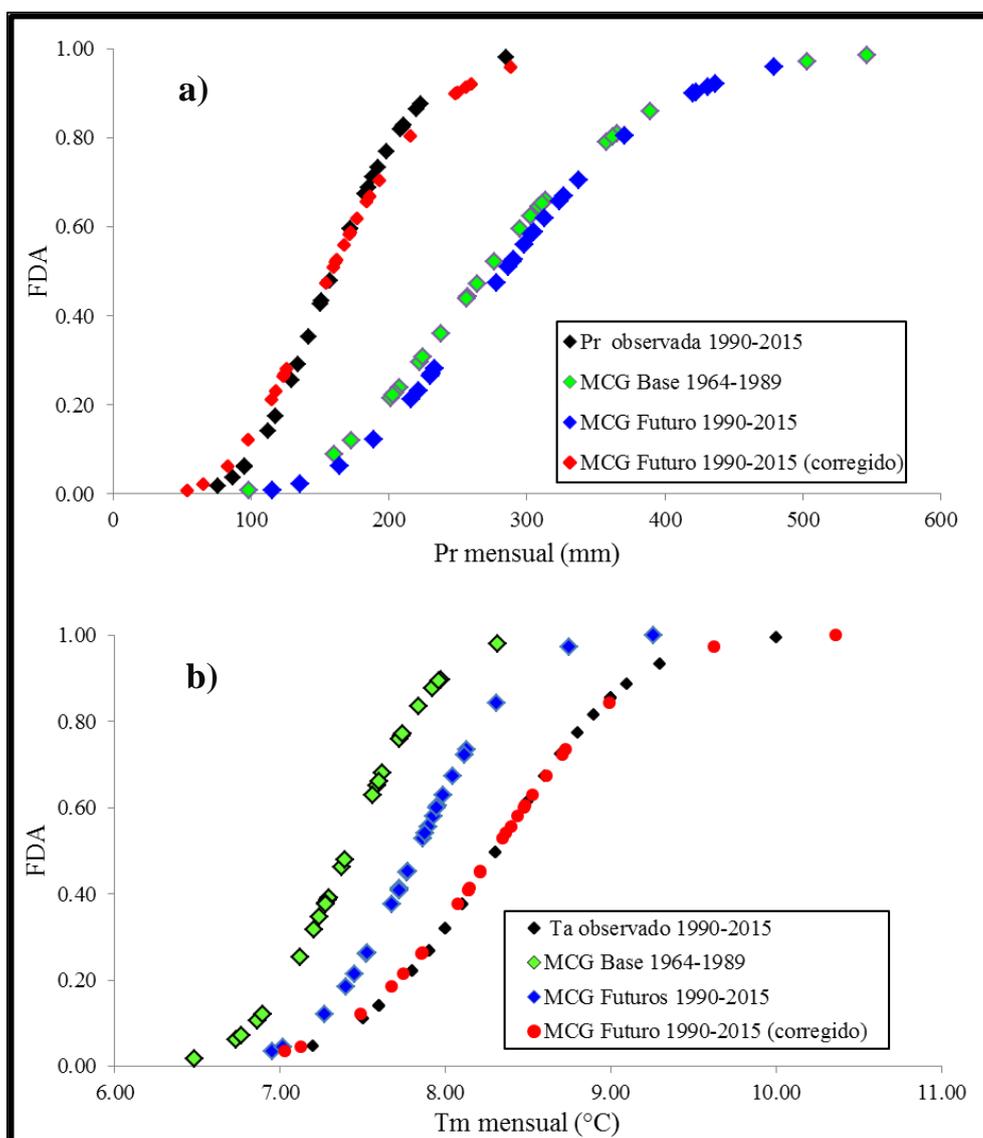


Figura 4-12 Ajuste probabilísticos de la precipitación y temperatura mensual de los datos observados y simulados por el MCG

**b) Validación de los MCG – periodo 1990-2015**

• **Precipitación**

Los resultados de la validación de la precipitación en las correcciones de los MCG para el periodo 1990-2015, se muestra en la Figura 4-13 y 4-14. De los 6 MCG, el modelo CCSM4 es el que presentó el mayor sesgo relativo (-7%) respecto a la precipitación media multianual observada. Los modelos CNRM-CM y MIROC5 son los que presentaron un error relativo menor al 1%, y en base al promedio de los 6 MCG (barra roja), el error relativo fue de -2.2% (Figura 4-13). Respecto a la estacionalidad de la precipitación (Figura 14), en el periodo de estiaje los MCG se ajustan mejor que en el periodo de avenidas.

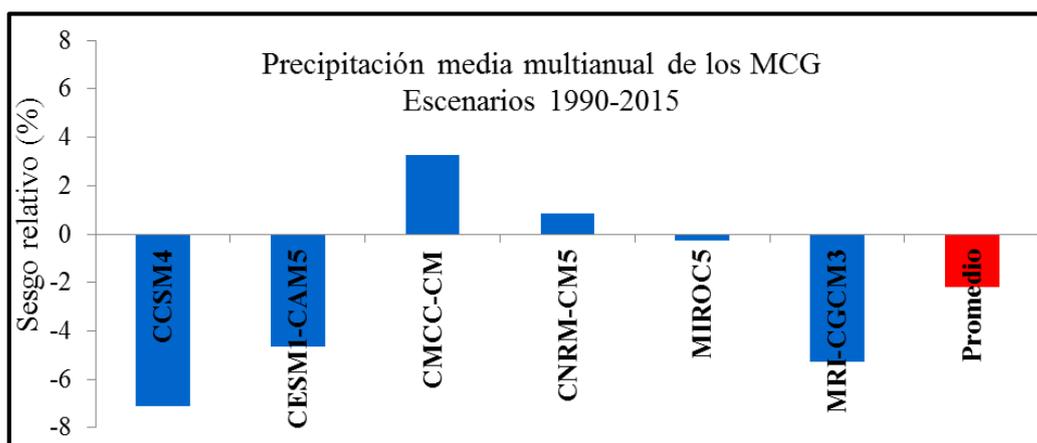


Figura 4-13 Sesgo en (%) de la precipitación media multianual de los MCG respecto a la observada. MCG (barra azul) y su promedio (barra roja)

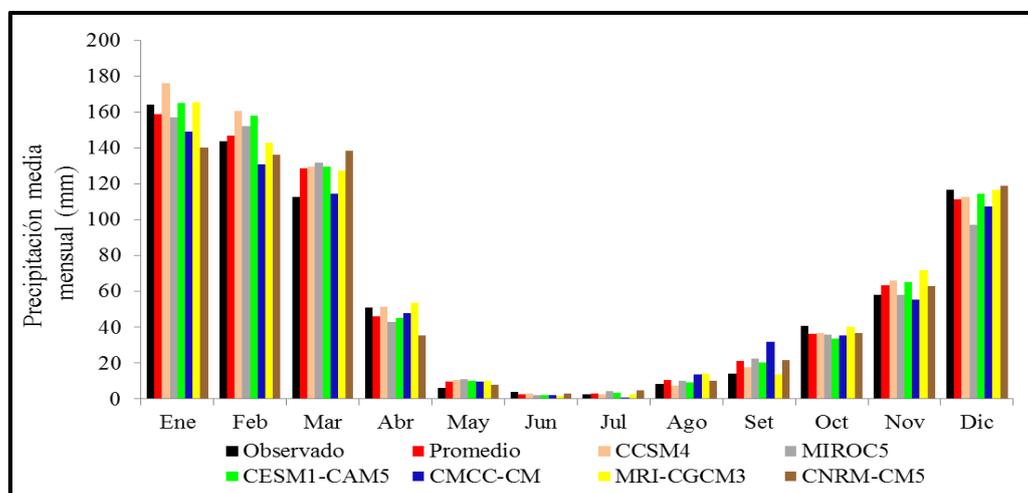


Figura 4-14 Comparación del régimen pluviométrico observado con los MCG

La Tabla 4-9 muestran los sesgos en valor absoluto entre el régimen pluviométrico observado y modelado. El mejor ajuste se presenta en los meses de estiaje, entre abril y diciembre que corresponde a los cuadros de color verde (sesgo < 10 mm). Y valores de sesgo, > 10 mm, se presentan en el periodo de avenidas alcanzando el mayor valor el modelo CNRM-CM5; con 25.8 mm en el mes de marzo. En general, ya que los sesgos encontrados no son significativos, los modelos presentaron un buen ajuste tanto a escala anual como estacional.

Tabla 4-9 Sesgo en valor absoluto entre el régimen pluviométrico observado y de los MCG

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
<i>CCSM4</i>	11.7	17.0	16.7	0.2	4.3	0.9	0.1	0.6	3.2	4.0	7.9	4.0
<i>CESMI-CAM5</i>	0.9	14.3	17.0	6.0	3.8	1.8	0.8	0.9	6.2	7.4	7.1	2.2
<i>CMCC-CM</i>	15.2	12.7	1.6	3.0	3.3	1.8	1.8	5.5	17.7	5.6	2.5	9.0
<i>CNRM-CM5</i>	24.3	7.5	25.8	15.5	1.7	1.1	2.1	1.8	7.3	3.9	4.8	2.4
<i>MIROC5</i>	7.5	8.4	19.0	7.9	4.8	2.1	1.5	1.8	8.1	5.1	0.2	19.5
<i>MRI-CGCM3</i>	1.1	1.1	14.8	2.6	4.0	2.3	0.2	5.9	0.8	0.5	14.0	0.2
<i>Promedio</i>	5.6	3.1	15.8	4.9	3.6	1.7	0.4	2.5	7.0	4.4	5.3	5.3

Fuente: Elaboración propia

• **Temperatura**

Los resultados de la validación de las correcciones de los MCG de la temperatura media para el periodo 1990-2015, se muestran en la Figura 4-15 y 4-16. Respecto a la temperatura media multianual de los modelos, los sesgos fueron menores a 0.3 °C (Figura 4-15). De la misma forma, se presentó un buen ajuste en la estacionalidad de la temperatura media, con sesgos menores también a 0.3 °C (Figura 4-16), lo que indica un buen ajuste a escala anual y estacional.

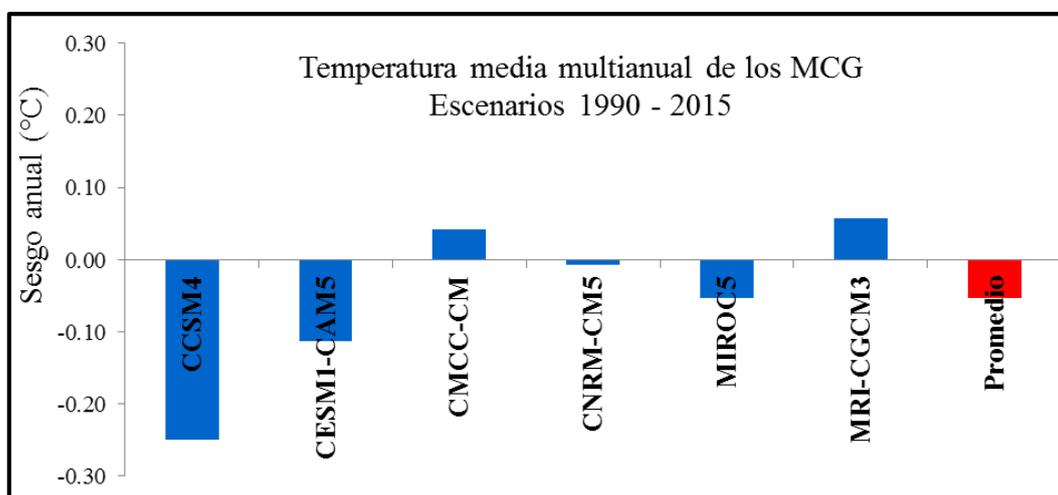


Figura 4-15 Sesgo anual de la temperatura media multianual de los MCG (barra azul) y su promedio (barra roja) respecto a la observada

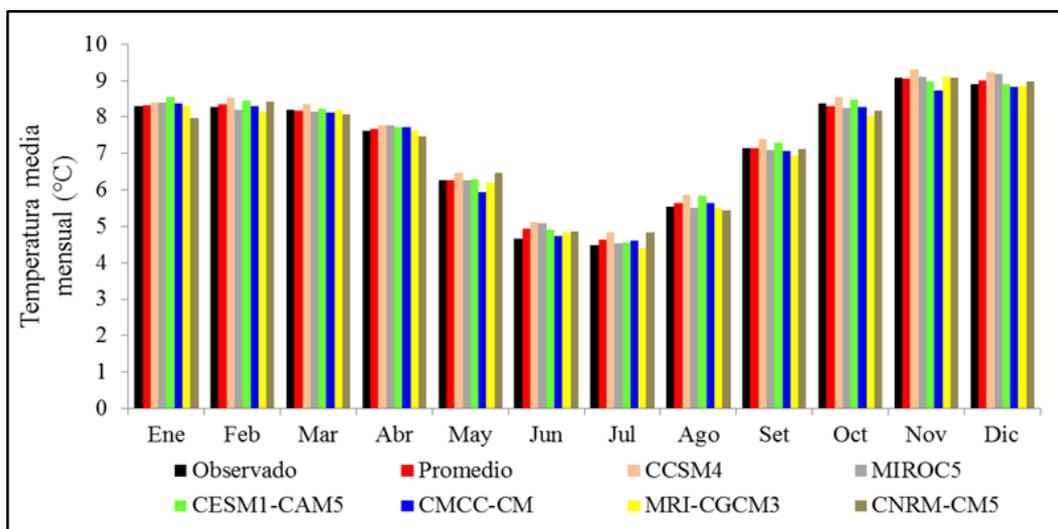


Figura 4-16 Comparación de la media mensual de la precipitación observada, de los MCG y su promedio

**c) Escenarios climáticos - Horizonte 2050 - 2075**

Las proyecciones de la precipitación media multianual para el horizonte 2050-2075, describe un aumento de esta variable en la mayoría de los modelos, con anomalías positivas que varían de 7.8% (MIROC5) a 25.8% (CCSM4); solo el modelo CMCC-CM presentó anomalías deficitarias (-13.5%). En promedio, los modelos presentaron una anomalía de +15.6% (Figura 4-17). Así mismo, la Figura 4-17 nos muestra que todos los modelos proyectan una tendencia ascendente en la temperatura media multianual. Con anomalías térmicas de +2.60 °C que describe el modelo CNRM-CM5 a +3.8 °C en el modelo CMCC-CM.

A pesar de presentar un incremento en la precipitación media multianual en la mayoría de los modelos, estacionalmente las proyecciones de los modelos son variables respecto al periodo base (observado) presentando un rango de incertidumbre (anomalías positivas y/o negativas). Pero, comparado al promedio de los modelos se tiene un incremento en el periodo húmedo (Figure 4-18). Respecto a la temperatura, estacionalmente todos los modelos presentan una anomalía positiva diferenciándose en su magnitud, con incrementos que van desde los 2 °C hasta los 4.2 °C. Comparado al promedio de los modelos se esperan que los incrementos fluctúen de 2.8 °C a 3.5 °C (Figura 4-19).

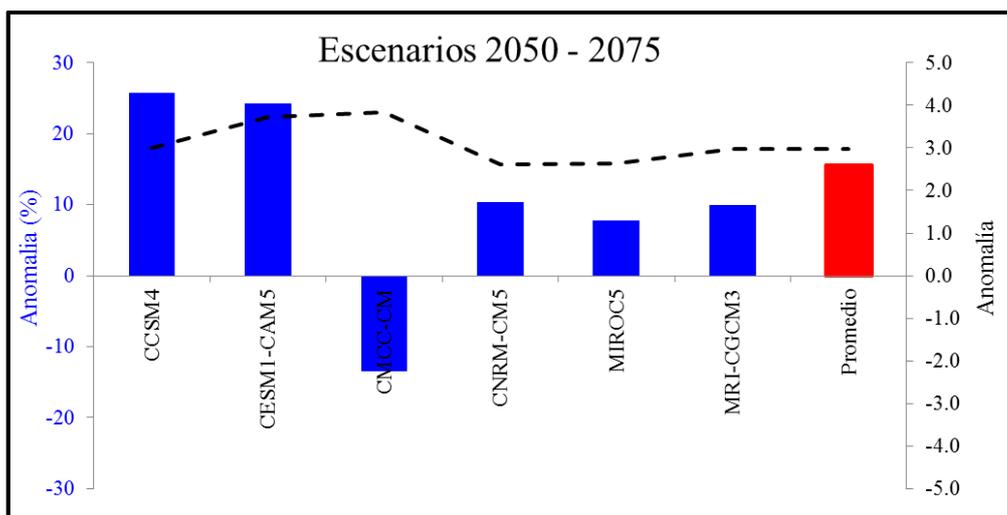


Figura 4-17 Anomalia de la precipitación y temperatura media multianual

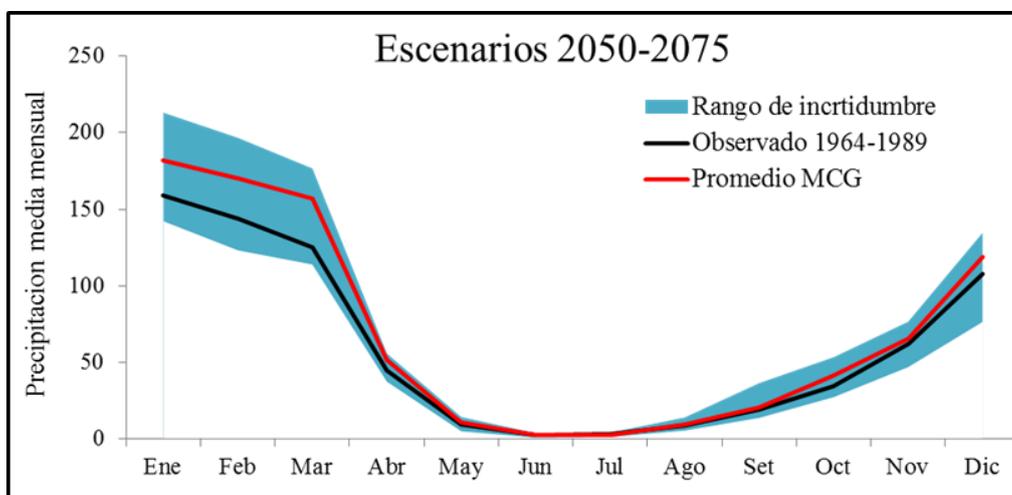


Figura 4-18 Régimen mensual de la precipitación observada y simulada

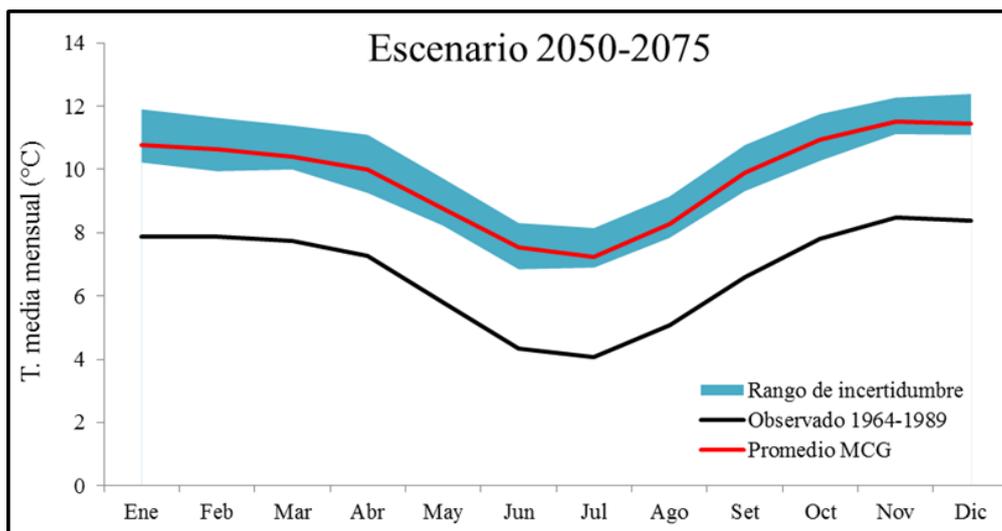


Figura 4-19 Régimen mensual de la temperatura observada y simulada

#### 4.4. ETAPA IV

##### 4.4.1. Calibración y validación del modelo GR2M

El hidrograma simulado o generado por el modelo GR2M (Figura 4-20a), representó en forma similar los periodos de estiaje y avenida. En el caso de eventos extremos el modelo subestimaba los valores altos y en algunos casos en periodos de estiaje el modelo sobreestima. El diagrama de dispersión de los caudales (Q) observado y simulado se muestra en la Figura 4-20b, tanto la calibración como la validación presentaron un  $R^2$  aceptables de 0.83 y 0.83 respectivamente. Indicándonos que si existe validez en el modelo.

En base al régimen observado de caudales se consideró para el periodo de avenida, de enero a abril y de estiaje, de mayo a diciembre. La Figura 4-21 muestra los diagramas de dispersión (avenida y estiaje) de los caudales simulados y observados (periodo 1964-1999). En el periodo de estiaje presentó una  $R^2=0.55$ , valor no alto pero aceptable, considerando que es un periodo donde la cuenca no presenta aporte pluviométrico y los caudales generados es producto del drenaje de la parte húmeda de la cuenca. En el periodo de avenidas la dispersión de los datos son más uniformes y lineal presentando un  $R^2=0.60$  muy bueno.

La cuantificación de los criterios estadísticos aplicados al modelo hidrológico se muestran en la Tabla 4-10, en donde se obtuvo parámetros  $X_1=5.85$  (interpretado como el nivel máximo que alcanza el reservorio suelo) y  $X_2=1.11$  (indicando que la cuenca podría presentar un aporte de agua subterráneas las cuencas vecinas) en la calibración. Tanto la calibración y la validación del modelo presentaron un Nash considerado "muy bueno" (Cabrera, 2012). Los indicadores de evaluación del modelo, el  $R^2$  resultaron altos en ambos casos, el RMSE, presentó valores cercano a 16, y el PBIAS obtuvo en la calibración -3.7% y en la validación -32%, indicando que el modelo tiende a sobreestimar o es mayor la cantidad de valores que sobreestiman a los observados, según Ortiz (2010), para los resultado obtenidos del PBIAS en valor absoluto presento un buen nivel de ajuste. En general la calibración y validación presentaron una evaluación estadística aceptable.

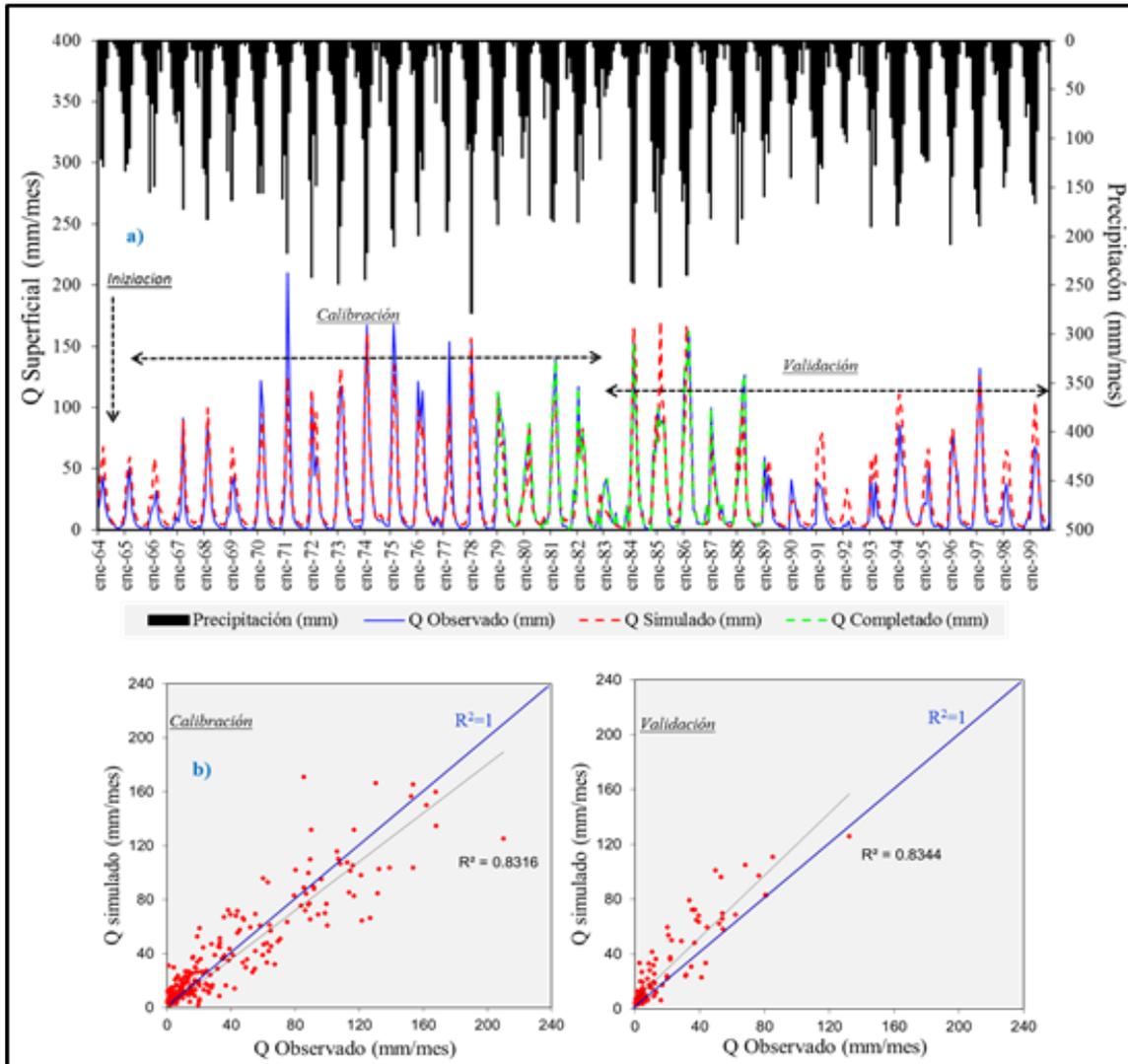


Figura 4-20 a) Modelamiento hidrológico del río Coata b) Diagramas de dispersión de caudales observados y simulados

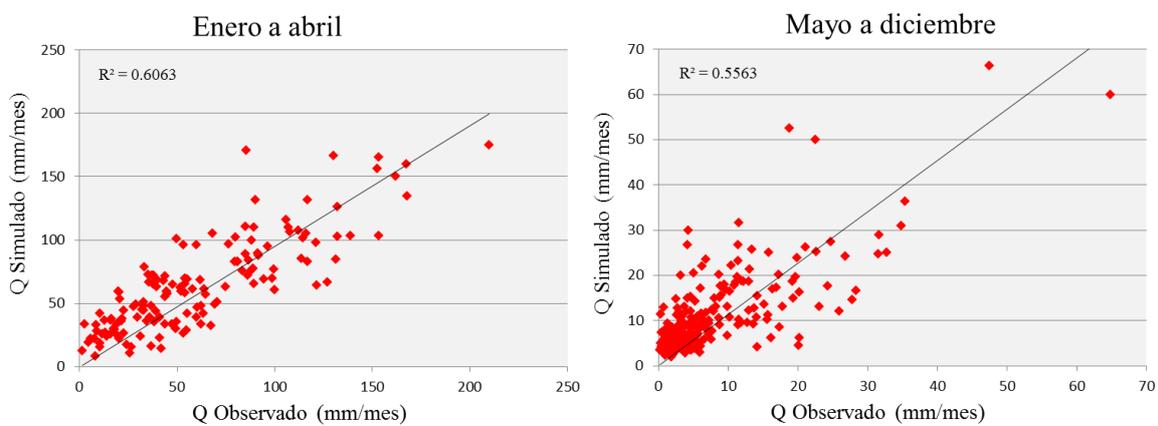


Figura 4-21 Dispersión de caudales observados y simulados para el periodo de avenidas diciembre-abril y estiaje mayo-noviembre

Tabla 4-10 Estadísticas de la calibración y validación del modelo hidrológico

Periodo		N° Meses	Parámetro		Método de Bondad de Ajuste - Nash (%)	Indicadores de la evaluación del modelo		
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>		R <sup>2</sup> (%)	RMSE	PBIAS (%)
INIALIZACIÓN	1964	12	-		-	-	-	-
CALIBRACIÓN	1965-1989	300	5.84	1.09	84.9	83	15.5	-3.7
VALIDACIÓN	1990-1999	120	-		64.4	79	14.6	-32

Fuente: Elaboración propia

Según Perrín et al, (2007), menciona que si se escoge cuidadosamente los datos representativos de un periodo se puede usar simplemente 10 datos. Ante dicha incertidumbre la calibración del modelo minimiza los errores maximizando el Nash a través de los parámetros pero no la serie de validación, esto define la importancia de obtener una serie lo posiblemente larga y consistente, permitiendo obtener un modelo eficiente.

#### 4.4.2. Análisis de sensibilidad del modelo GR2M

En la Figura 4-22 se observa el análisis de sensibilidad de los parámetros X<sub>1</sub> (color azul) y X<sub>2</sub> (color rojo), donde el eje Y, está representado por la variación porcentual del caudal, y para el eje X, está representado por el incremento en % a la derecha y descenso a la izquierda. Los círculos enmarcados en la gráfica nos da una idea de cómo los parámetros para un mismo incremento % (derecha) presentan cambios porcentual en su caudal simulado, determinando que el parámetro X<sub>2</sub> resulta ser el más sensible a cambios.

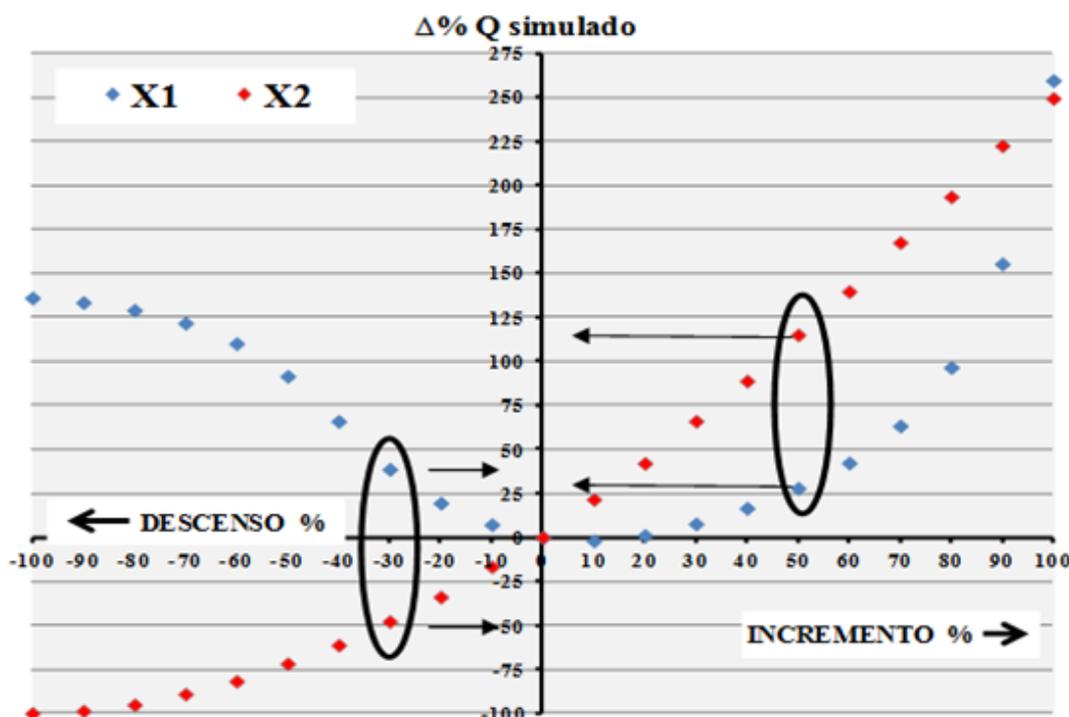


Figura 4-22 Sensibilidad de los parámetros X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>

#### 4.5. ETAPA V

El efecto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura (2050-2075) en la cuenca del río Coata fue analizado en base a los siguientes análisis:

##### 4.5.1. Mediante la curva de duración mensual

Con los resultados obtenidos en la modelización se construyeron las curvas de duración para cada MCG con su respectivo periodo de referencia y se analizaron los caudales mensuales proyectadas por los MCG, considerados los de mayor resolución y mejor representatividad del climática actual (Figura 4-23). La Figura 4-23a, 23b y 23d corresponden a las curvas de duración de los modelos CCSM4, CNRM-CM5 y CESM1-CAM5, que muestran importantes cambios ocurridos en las componentes de flujos altos de la FDC, presentando incrementos en la probabilidad de excedencia para caudales mayores a 25 m<sup>3</sup>/s en el primer modelo y caudales mayores a 30 m<sup>3</sup>/s el tercer modelo. La Figura 4-23c corresponde a la curva de duración del modelo CMCC-CM, la cual presentó el escenario de caudales más pesimista entre todos los modelos, con una disminución en la probabilidad de excedencia (toda la serie) respecto al periodo actual, tal es el caso que para un caudal de 96 m<sup>3</sup>/s hay un 20% de probabilidad de que sea igualado o superado, en tanto el mismo valor en el futuro probabilidad es menor (8%). Y respecto a las frecuencia de caudales de los modelos MIROC5 y MRI-CGCM3, estas permanecen cerca de las condiciones históricas de flujo observadas (Figura 4-23e y 4-23f). La ventaja de utilizar una serie de proyecciones de modelos, es que permite proporcionar una base para medidas adecuadas de adaptación que tengan en cuenta diferentes fuentes de incertidumbre.

Por otro lado, una forma de disminuir la incertidumbre de los MCG es promediando el conjunto de modelos que muestren la misma concordancia (Pierce et al., 2009). Siendo el modelo CMCC retirado del grupo. La Figura 4-23g muestra la curva de duración promedio de los MCG (línea roja) y el rango de incertidumbre del conjunto de modelos (verde), en la cual se manifiesta que para el horizonte 2050-2075, los caudales mantendrán un incremento en los flujos altos. Como en el gráfico de la Figura 4-23g no permite hacer lecturas aceptables mayores al 15% de probabilidad, las probabilidades de excedencia mayores a este valor se analizó mediante un gráfico semilogarítmico (Figura 4-23h), observándose que el efecto del cambio climático finalmente que el efecto del cambio climático además de incrementar la probabilidad de excedencia de picos altos, en los flujos bajos, los caudales son menos afectados.

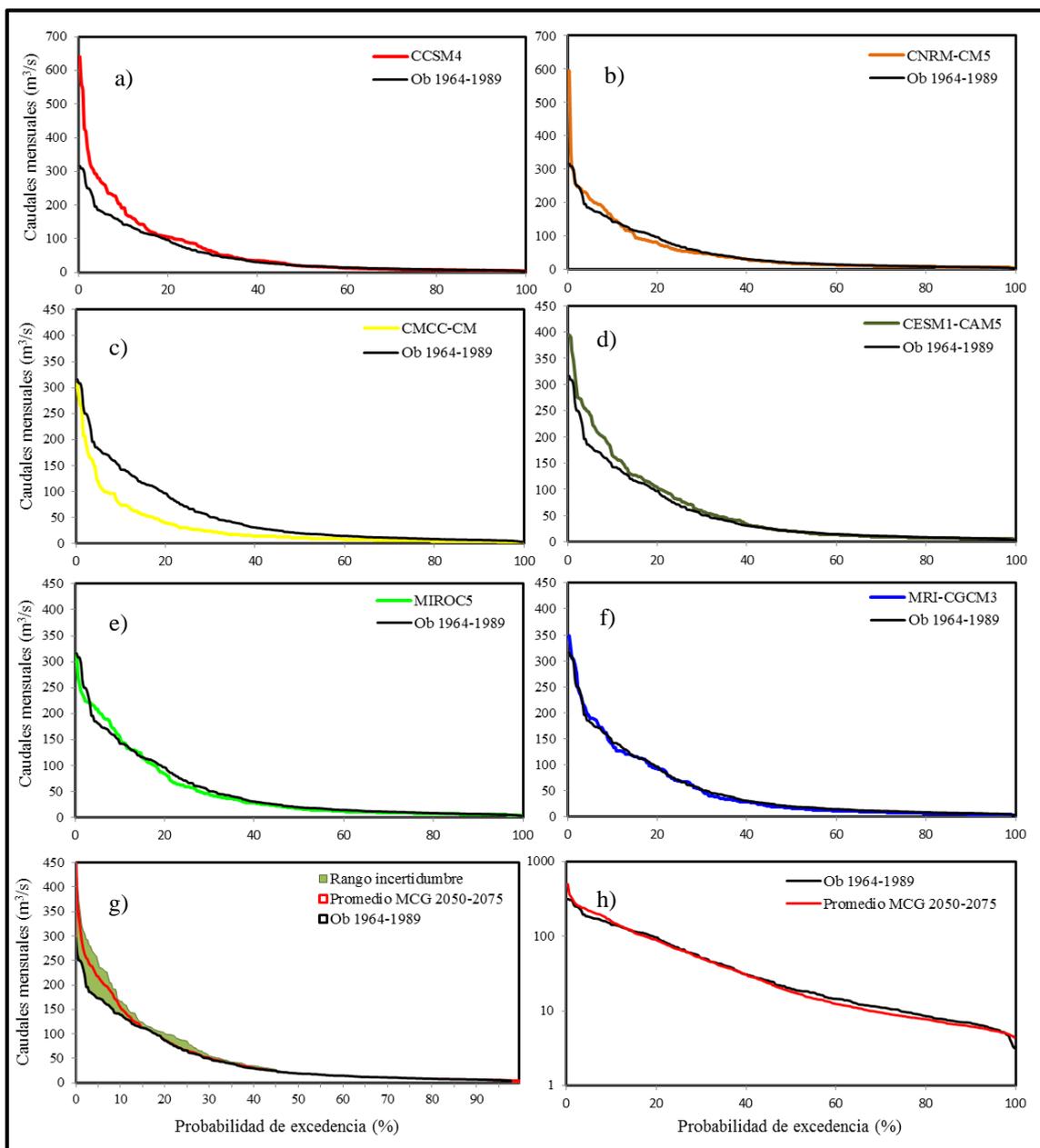


Figura 4-23 Cambio en magnitud, frecuencia y duración de la respuesta hidrológica debido al cambio climático para la cuenca del río Coata

#### 4.5.2. Mediante el análisis estacional

Una vez analizado el comportamiento de los caudales en el tiempo, se analizaron a nivel mensual, ya que una desventaja de la curva de duración, es que no representa los caudales según su secuencia natural, por lo que no se conoce si los eventos ocurridos en la cuenca ocurren en forma consecutiva o si son distribuidos a lo largo del periodo de tiempo.

Respecto a los MCG que presentaron escenarios de altos flujos en las gráficas de curva de duración: El modelo CCSM4 (Figura 4-24a), es el que predice un escenario de mayor incremento de caudales en el periodo húmedo especialmente en febrero con una anomalía hídrica de (+51%); el modelo CNRM-CM5 presentaría una disminución en los regímenes de caudales de enero y febrero con anomalías hídricas

de -19.5% y -14.9% respectivamente, presentándose solo en marzo y abril un incremento de caudal de +29.3% y +11.7% respectivamente; así, el modelo CESM1-CAM5, muestra condiciones de aumento de caudales en forma homogénea en el periodo de avenidas. El modelo CMCC-CM presentó un escenario pesimista de condiciones hidrológicas deficitarias sobre la cuenca del río Coata en todo el ciclo anual. En tanto los modelos MIROC5 y MRI-CGCM3 proyectan condiciones cercanas a las actuales.

En respuestas al promedio de los modelos, indican un aumento en su régimen de caudales para febrero y marzo, y, un déficit en noviembre (Figura 4-24g), que corresponden a anomalías hídricas de 9.9%, 19.2% y -27.4% respectivamente (Figura 4-24h).

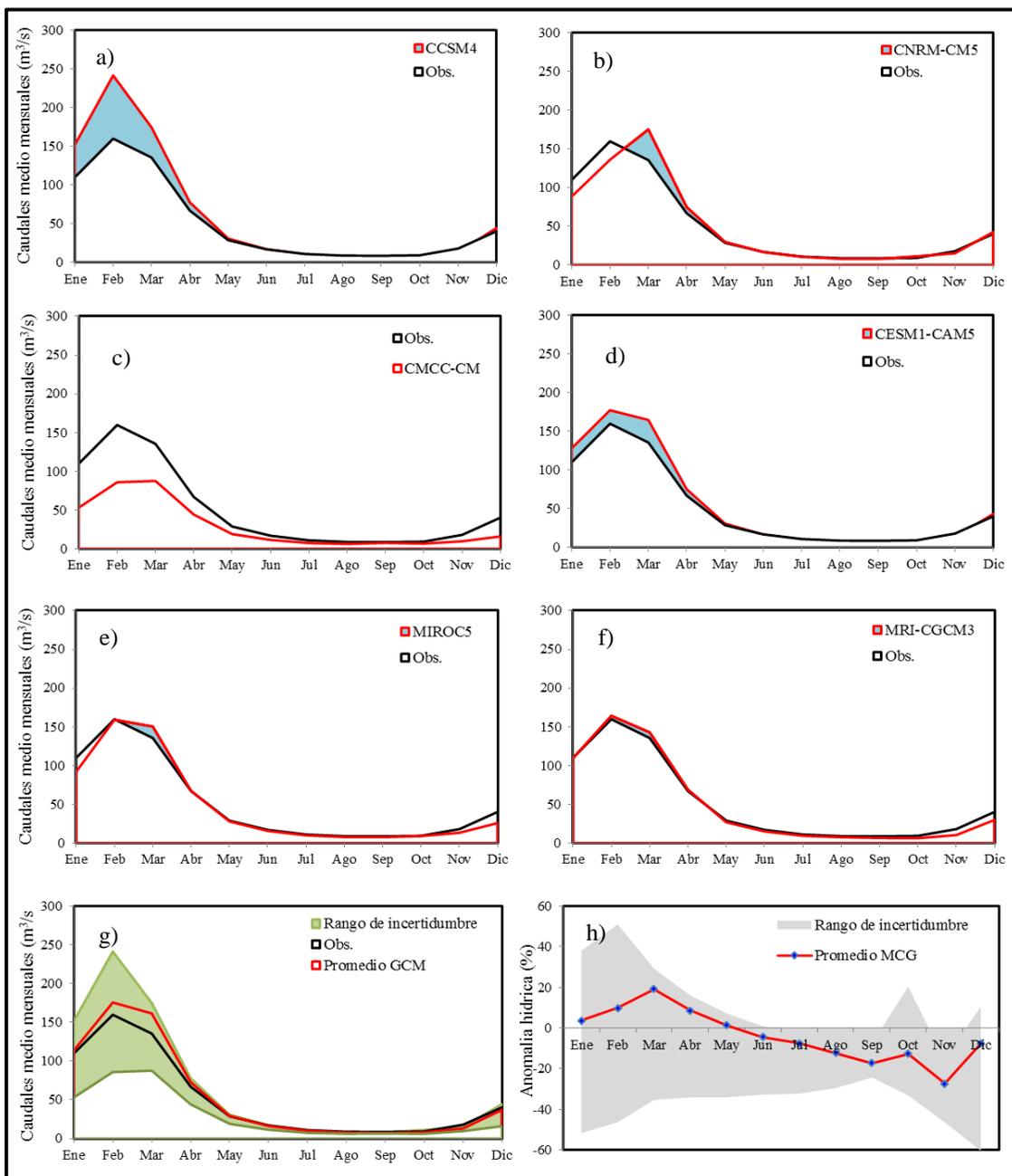


Figura 4-24 Régimen estacional de los caudales medios simulados y las proyecciones de los 6 modelos climáticos de la cuenca del río Coata

#### 4.5.3. Respuesta hidrológica ante los cambios de precipitación y evapotranspiración

La Figura 4-25 muestra las anomalías media multianual de las variables (caudal, precipitación y evapotranspiración) respecto al periodo base actual, obtenidas en cada MCG. Se puede observar que para el horizonte a mediano plazo 2050-2075, los impactos del cambio climático en la escorrentía superficial varían según el MCG, manteniendo una relación directa con los cambios de precipitación a pesar del aumento de la evapotranspiración potencial durante el siglo XXI. A nivel anual se espera que la cuenca de río Coata para el horizonte 2050-2075 presente en promedio un incremento no significativo del 6.3% en la oferta hídrica.

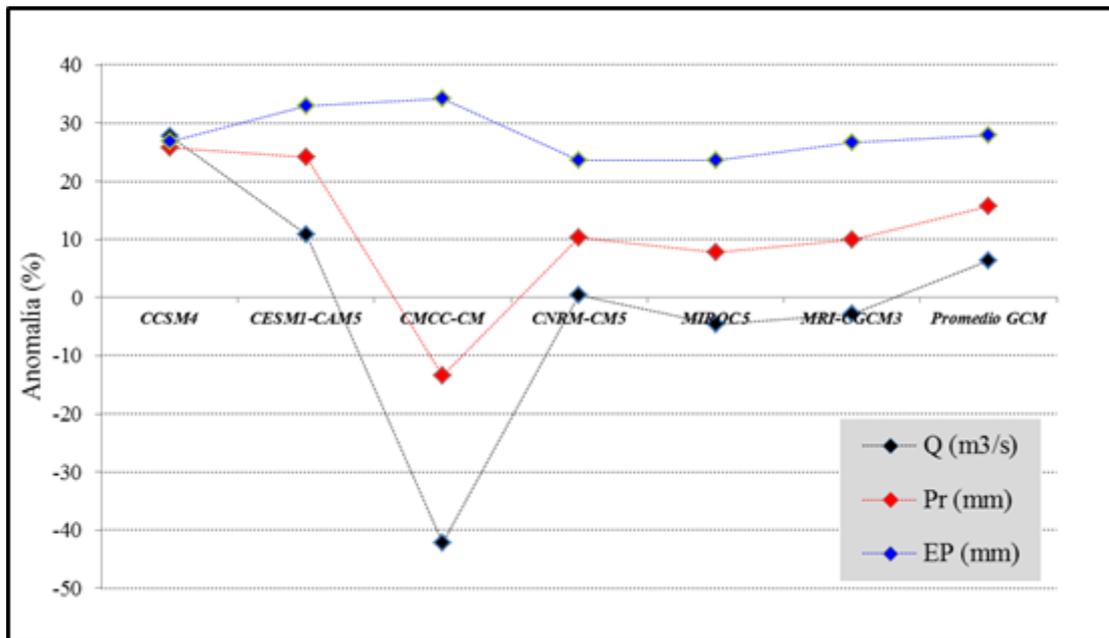


Figura 4-25 Anomalías, de las variables media multianual de la precipitación, evapotranspiración y caudal

## 5. CONCLUSIONES

Se determinó la disponibilidad hídrica futura del río Coata basados en 6 modelos climáticos globales (MCG), los resultados obtenidos proporcionarán información útil sobre la evaluación de la incertidumbre de los MCG en la hidrología analizado con el modelo GR2M.

### 5.1. Sobre modelos climáticos globales

- Los MCG CMCC-CM, CNRM-CM5 y MRI-CGCM3 del CMIP5 simulan mejor la estacionalidad del clima en la cuenca del río Coata, observado tanto en términos de la dinámica, como en volumen.
- Se realizó de manera aceptable la corrección de sesgo de las proyecciones de los MCG; logrando simular con la información de los 6 MCG, la distribución y estacionalidad de la precipitación y temperatura para el periodo de validación 1990-2015.
- Las proyecciones de precipitación y temperatura para el horizonte 2050-2075, en su media multianual presentaron un incremento de 15.6% y 3 °C respectivamente.

### 5.2. Sobre el modelo hidrológico

- El modelo hidrológico GR2M simuló de forma eficiente los eventos de avenida y estiaje del caudal observado, obteniéndose un Nash 84.9% para la etapa de calibración y 64.4% para la etapa de validación del modelo.

### 5.3. Sobre Escenarios hídricos

- Un escenario hipotético donde se espera que disminuya la escorrentía lo plantean el modelo CMCC-CM-RCP8.5, mientras un escenario en condiciones de equilibrio al régimen hidrológico observado lo plantean los modelos MIRC5-RCP8.5 y MRI-CGCM3- RCP8.5 y los efectos e incrementos en el régimen hídrico lo presentan los modelos CNRM-CM5-RCP8.5 y CESM1-CAM5-RCP8.5 y en mayor magnitud el modelo CCSM4- RCP8.5 en la cuenca del río Coata.
- Los impactos del cambio climático en la escorrentía varían según el MCG, los cambios de escorrentía mantienen una relación directa a los cambios de precipitación, a pesar del aumento de Evapotranspiración potencial durante todo el siglo 21.
- En promedio los escenarios hídricos, indican un aumento del 6.3% de la oferta hídrica anual; este porcentaje no significativo indicaría la necesidad de planificar a futuro un adecuado manejo y gestión de los recursos hídricos.

## 6. RECOMENDACIONES

- Elaborar más estudios hidrológicos que permitan analizar otros escenarios de emisión, con modelos hidrológicos que incorporen otras variables cambiantes en el tiempo, como es el uso de suelo. Esto permitiría generar nuevos resultados para la investigación en lo que respecta al impacto del cambio climático en la escorrentía.
- Según los escenarios de los MCG, la temperatura tienden a ascender significativamente sobre la cuenca del río Coata, lo cual repercutiría en alta tasas de evaporación sobre los espejos de

agua como por ejemplo en el Reservorio Lagunillas. Esto exhorta a buscar mejores métodos de corrección y modelos que permitan afianzar los resultados obtenidos. Tal es el caso de los modelos climáticos regionales, que pueden ser considerados en el futuro como los más fiables.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airdon-Bardin, S., Dezzeter, A., Servat, E., Paturel, J.E., Mahé, G., Niel, H., Dieulin, C., 2009. Using general circulation model output to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in west Africa. *Hydrological Sciences Journal.*, 54:1, 77-89
- Aparicio, F. 1992. *Fundamentos de hidrología de superficie*. EDITORIAL LIMUSA. Grupo Noriega Editores. México.
- Ayala, R. 2011. Impactos del cambio climático sobre la operación del sistema hídrico de la laguna Laja. Disponible [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-ayala\\_ar/html/index-frames.html](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-ayala_ar/html/index-frames.html)
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., Roy, A.G., 2010. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology.* 384, 65-83
- Buytaert, W. 2011. Impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos del Perú. Imperial College London.
- Cabrera. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Chávarri, E. 2009. El Ciclo hidrológico e introducción a modelos hidrológicos. Universidad Agraria la Molina (UNALM) [http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase\\_ij\\_met\\_el\\_ciclo\\_hidrologico\\_y\\_modelos\\_def.pdf](http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/clase_ij_met_el_ciclo_hidrologico_y_modelos_def.pdf)
- De Castro, M. 2007; Modelos climáticos globales y su fiabilidad. Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España.
- Fernández, M; Vela, M; Castaño, F. 1997. La utilización de modelos en hidrología. Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla La Mancha.
- Gustavo, P. 2009. Implementación de algoritmo de Metrópolis Monte Carlo para el ajuste automático de un modelo hidrológico: ensayos con datos sintéticos y reales. Tesis de Maestría. Mención en Recursos Hídricos. Facultad Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible <http://www.efn.uncor.edu/posgrado/rrhh/assignaturaspdf/Tesis/Del%20Prete.pdf>
- Gutiérrez, J; Pons, M. 2006. Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la península Ibérica. *Rev. C&G.*, 20 (3-4)
- Hamlet, A.F., Salathé, E.P., Carrasco, P. 2010. Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies. Chapter 4 in *Final Report for the Columbia Basin Climate Change Scenarios Project*, Climate Impacts Group, Center for Science in the Earth System, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, University of Washington, Seattle.
- INEI. 2011. Estudio; migración interna reciente y el sistema de ciudades, 2002-2007. Disponible <http://www.inei.gov.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0950/>
- INEI-SIRTOD. 2011. Disponible <http://www.inei.gov.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0950/>
- INEI. 2009. Perfil sociodemográfico del departamento de Puno. Disponible <http://www.inei.gov.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0838/libro27/index.htm>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales, Perú. (INRENA). 2007. Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa. Inventario de fuentes de agua superficial Perú. p 1 - 159. Disponible en [http://www.ana.gov.pe/media/293379/fuentes\\_agua\\_superficial\\_cabanillas\\_lampa.pdf](http://www.ana.gov.pe/media/293379/fuentes_agua_superficial_cabanillas_lampa.pdf). Consultado noviembre 12 de 2011.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático, Grupo de trabajo I. (IPCC-GTI). 2001. Tercer informe

- de evaluación. Cambio climático 2001: La base científica. resumen para responsables de políticas y resumen técnico, 1-20 pp. Disponible [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml#21](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#21)
- IPCC. 2007a: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p. OMM. Disponible [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the IPCC (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalipedia (Editorial Santillana, Prisa) [http://pe.kalipedia.com/geografia-peru/tema/climas-peru-costa.html?x=20080606klpgeogpe\\_1.Kes](http://pe.kalipedia.com/geografia-peru/tema/climas-peru-costa.html?x=20080606klpgeogpe_1.Kes)
- Lieke, V, Roosmalen; Jens H, Christensen; Michael B, Butts; Karsten H, Jensen; Jens C, Refsgaard. 2009. "An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark". Journal of Hydrology. Disponible en journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol). Consultado octubre 10 de 2011.
- Mendoza, A. 1994; ALTIPLANO (Marco Problemas Recursos Propuestos)
- Mena, C. 2010. Evolución de la dinámica de los escurrimientos en zonas de alta montaña: Caso del volcán Antisana. Ecuador. Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Disponible en <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2503/1/CD-3253.pdf>
- Mediero, L. 2007. Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido. España. Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. Universidad Politécnica de Madrid.
- Moss, R. H. et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Volumen 463:747-756.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. y V. Andréassian. 2006. "Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model". Journal of Hydrology 318. pp. 200-214.
- Muñoz, O. 2010. Procesos y parámetros hidrológicos para la representación conceptual de una cuenca. Disponible <http://es.scribd.com/doc/98873934/Procesos-Hidrologicos-y-La-Representacion-Conceptual-de-Estos>
- Nakicenovic *et al.*, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 pp.
- Ocampo, O. 2012. Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería; Departamento de Ingeniería Química.
- Océano. 2009. Enciclopedia del Perú.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology. 303, 290-306
- Palma, B. 2009. Escenarios climáticos. Programa de estudios sobre cambio climático de la Universidad Veracruzana. Disponible [http://www.peccuv.mx/descargas/pdf/reportes\\_investigacion/Capítulo%203%203%20Escenarios%20Climáticos.pdf](http://www.peccuv.mx/descargas/pdf/reportes_investigacion/Capítulo%203%203%20Escenarios%20Climáticos.pdf)

- Panofsky, H. A. and Brier, G. W. : Some Applications of Statistics to Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 224 pp., 1968.
- Perrín, Ch., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas, C., Michel, C. y T. Mathevet. 2007. Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (1).pp- 131-151
- Rojas, M. 2012. Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global. Disponible <ftp://ftp.dgf.uchile.cl/pub/maisa/MAPS/>
- Rodríguez, E. 2006. Escenarios de cambio climático regionalizados. Artículo de revistas. Disponible [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_AM%2FA\\_M\\_2006\\_55\\_63\\_67.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM%2FA_M_2006_55_63_67.pdf)
- SENAMHI-DGH 2009. Balance hídrico superficial del Perú a nivel multianual.[http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro\\_ArtiBHSMultianual.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro_ArtiBHSMultianual.pdf)
- Tejero, (Geología Ed, Laberinto 1997).[http://legado.inea.org/web/materiales/web//riego/panuncios/trabajos/webs/lv%C3%A1n%20Gonzalo%20Tejero/los\\_acu%C3%ADferos\\_de\\_la\\_provincia\\_de.htm](http://legado.inea.org/web/materiales/web//riego/panuncios/trabajos/webs/lv%C3%A1n%20Gonzalo%20Tejero/los_acu%C3%ADferos_de_la_provincia_de.htm)
- Thompson, L. G. 2012. Climate Change: The Evidence and Our Options. *World Future Review*. Vol. 4 N°2 114-122.
- UNESCO-WWAP. 2003. Agua para todos. Programa mundial de los recursos hídricos. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001494/149406s.pdf>
- Vargas, P. 2009. El cambio climático y sus efectos en el Perú. Disponible en <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-de-Trabajo-14-2009.pdf>.
- Weber, JF; Dassom, CM; Jorquera, E. 2010. Desarrollo y Calibración de un Modelo Hidrológico de Simulación Mixta. *Mecánica Computacional Vol XXIX*, págs. 4013-4037
- Wikipedia. Enciclopedia Libre. [http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio\\_clim%C3%A1tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_clim%C3%A1tico)
- Wilks, D. S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, San Diego

## 8. ANEXO

### 8.1. Análisis exploratorio de datos

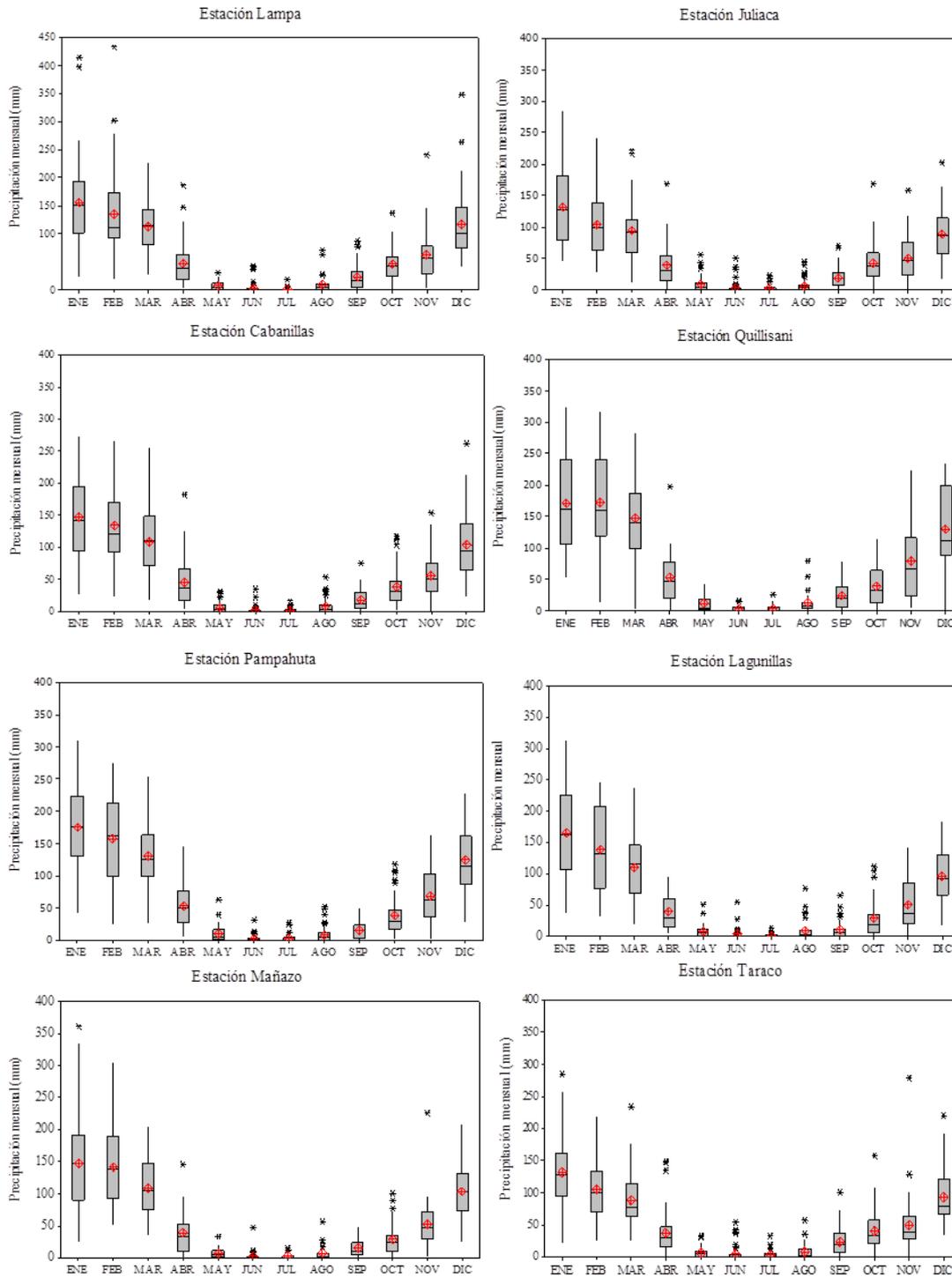


Figura 8-1 Diagrama de cajas de la precipitación total mensual. Estación Lampa a Estación Taraco

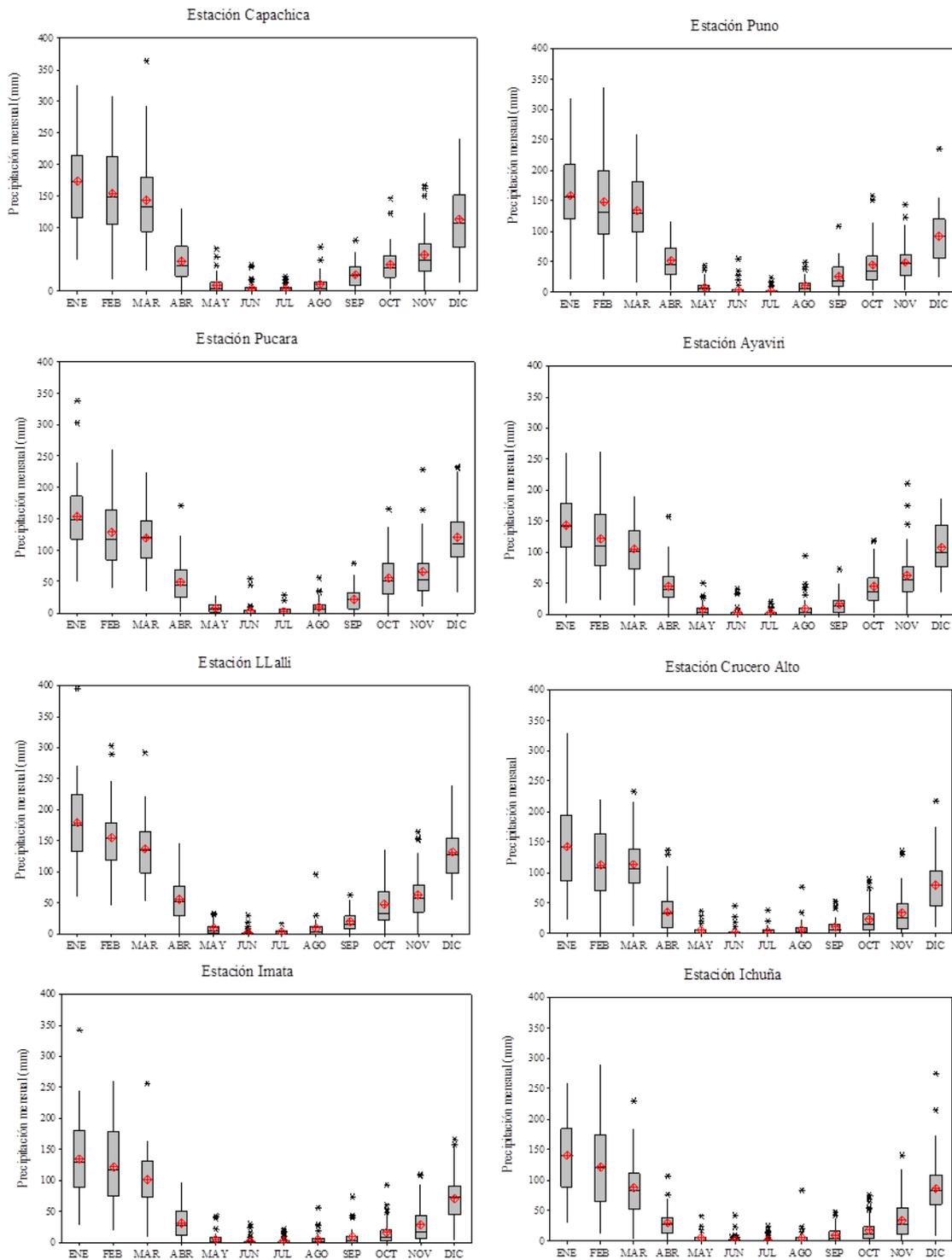


Figura 8-2 Diagrama de cajas de la precipitación total mensual. Estación Capachica a Estación Ichuña

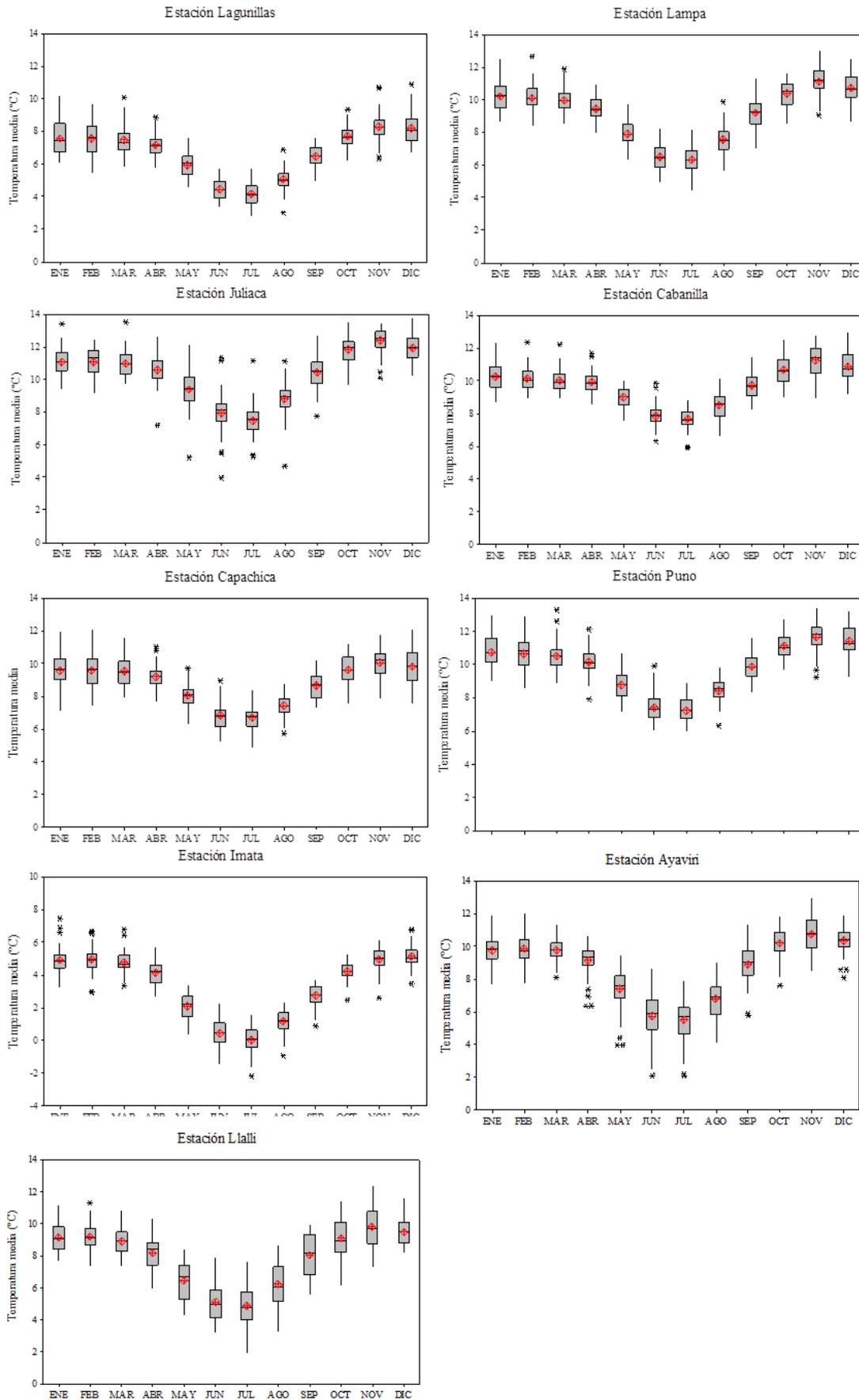


Figura 8-3 Diagrama de cajas de la temperatura media mensual. Estación Lagunillas a Estación Llalli

Tabla 8-1 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Lagunillas a Pucara

<b>Estación Lagunillas</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	165.8	139.0	109.8	39.7	8.2	3.5	1.7	9.2	10.8	28.5	51.0	96.0
Error típico	11.2	10.9	8.3	4.7	1.7	1.6	0.5	2.7	2.4	5.0	6.6	6.8
Mediana	163.4	132.8	115.4	29.8	5.7	0.0	0.0	2.7	5.8	18.8	37.0	92.2
Desviación estándar	69.2	67.3	51.3	29.0	10.6	9.9	3.1	16.4	14.5	30.6	40.7	42.0
Varianza de la muestra	4791.2	4531.7	2631.6	838.1	113.3	98.3	9.3	270.1	211.3	935.7	1658.2	1763.6
Curtosis	-0.6	-1.3	-0.3	-0.7	7.0	20.4	7.6	7.6	5.6	1.1	-0.6	-0.7
Coef. de asimetría	0.0	0.2	0.4	0.7	2.4	4.3	2.6	2.7	2.3	1.4	0.7	0.1
Rango	276.9	214.3	219.1	91.2	50.8	54.6	14.4	76.8	66.7	111.8	140.5	167.7
Mínimo	36.6	32.2	18.8	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	16.1
Máximo	313.5	246.5	237.9	95.9	50.8	54.6	14.4	76.8	66.7	111.8	141.5	183.8
Numero de datos	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0

<b>Estación Sta. Lucia</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	19.78	33.88	61.18	129.3	203.4	167.5	139.4	46.4	7.392	5.265	2.944	13.3
Error típico	6.253	5.303	12.82	18.47	27.91	27.56	16.95	11.19	3.02	3.192	1.539	6.4
Mediana	6.9	28.4	54.6	138.1	164.5	127.3	127.9	26.8	1.2	0	0	0.9
Desviación estándar	27.25	24.3	55.89	80.49	124.8	123.2	73.87	48.79	12.45	13.16	6.53	27.1
Varianza de la muestra	742.8	590.5	3123	6478	15578	15189	5456	2380	155	173.2	42.64	736.8
Curtosis	4.008	1.785	0.306	-0.663	-0.03	-0.392	-1.067	10.97	5.032	9.816	8.5	5.1
Coef. de asimetría	1.955	1.118	0.985	0.438	0.842	0.903	0.083	3.019	2.251	3.092	2.8	2.4
Rango	102.6	101.3	183.2	262.3	423.3	376.2	239.2	221.6	45.2	50.8	25.4	93.1
Mínimo	0	0.9	0	13.7	38.9	41.8	19.1	4.9	0	0	0	0
Máximo	102.6	102.2	183.2	276	462.2	418	258.3	226.5	45.2	50.8	25.4	93.1
Numero de datos	19	21	19	19	20	20	19	19	17	17	18	18

<b>Estación Llalli</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	180.2	156.6	137.7	56.0	9.2	2.6	3.1	9.5	20.1	48.5	63.0	130.7
Error típico	11.4	8.3	7.5	5.7	1.6	1.0	0.7	2.6	2.4	5.7	6.6	6.9
Mediana	176.6	156.0	135.3	51.0	5.0	0.0	0.5	5.0	15.5	33.5	57.6	127.5
Desviación estándar	71.0	51.9	46.6	35.5	10.1	6.1	4.4	16.2	14.9	35.7	41.1	43.2
Varianza de la muestra	5036.8	2694.0	2172.5	1258.4	102.5	37.0	19.4	262.2	221.1	1271.6	1686.4	1862.8
Curtosis	0.7	1.5	1.9	0.4	0.2	12.3	1.0	22.6	0.8	0.1	0.3	0.4
Coef. de asimetría	0.5	0.8	0.8	0.9	1.2	3.3	1.4	4.3	1.1	1.0	0.8	0.6
Rango	334.3	257.9	238.9	145.8	32.3	30.3	16.0	96.5	62.9	136.1	164.2	184.9
Mínimo	60.4	44.7	53.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.2
Máximo	394.7	302.6	292.4	146.1	32.3	30.3	16.0	96.5	62.9	136.1	164.2	239.1
Numero de datos	39	39	39	39	38	38	38	39	39	39	39	39

<b>Estación Ayaviri</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	144.3	122.3	105.4	45.0	7.8	3.7	2.1	9.4	15.8	45.3	62.4	108.9
Error típico	7.6	7.6	6.0	4.4	1.4	1.3	0.6	2.4	2.2	4.5	5.9	6.1
Mediana	143.1	109.8	101.2	39.6	4.7	0.0	0.0	3.0	13.6	34.5	52.9	100.9
Desviación estándar	52.9	54.1	42.4	31.3	9.9	8.9	4.5	16.8	15.1	31.2	40.5	42.2
Varianza de la muestra	2797.2	2925.3	1799.8	979.6	97.4	79.8	20.7	283.4	228.8	971.3	1643.9	1778.0
Curtosis	-0.1	-0.3	-0.7	2.5	6.5	10.5	7.5	13.4	3.0	-0.1	3.9	-1.1
Coef. de asimetría	-0.1	0.6	0.1	1.2	2.2	3.3	2.7	3.3	1.5	0.9	1.6	0.2
Rango	243.4	240.2	176.2	158.1	50.5	40.5	20.4	94.5	72.6	117.2	211.5	150.6
Mínimo	17.2	23.3	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	35.7
Máximo	260.6	263.5	190.1	158.1	50.5	40.5	20.4	94.5	72.6	119.8	211.5	186.3
Numero de datos	48	50	50	50	49	49	49	50	49	48	47	48

<b>Estación Pucara</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	153.1	129.2	119.9	49.4	8.4	3.9	2.9	9.2	22.4	56.0	65.2	121.1
Error típico	8.6	7.4	6.0	4.6	1.1	1.4	0.7	1.6	2.4	4.9	5.7	6.8
Mediana	149.4	118.2	120.0	45.6	7.0	0.0	0.2	5.7	21.6	50.1	53.6	110.7
Desviación estándar	62.3	53.0	43.5	33.0	8.1	9.9	5.3	11.5	17.4	35.6	41.3	49.4
Varianza de la muestra	3877.4	2812.0	1891.0	1087.2	65.3	97.5	28.6	131.7	301.7	1266.6	1703.9	2436.9
Curtosis	1.0	-0.1	-0.3	2.6	-0.3	18.5	11.8	4.4	0.9	0.7	4.0	0.0
Coef. de asimetría	0.7	0.7	0.2	1.2	0.8	4.2	3.1	1.9	0.9	0.8	1.7	0.7
Rango	287.8	222.0	190.8	170.6	28.7	54.2	28.7	55.5	79.1	166.3	218.2	201.3
Mínimo	50.4	39.6	34.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	9.9	31.6
Máximo	338.2	261.6	224.9	171.5	28.7	54.2	28.7	55.5	79.2	166.3	228.1	232.9
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-2 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Mañazo a Capachica

<b>Estación Mañazo</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	147.5	141.6	109.0	38.0	6.9	2.3	2.1	6.4	14.9	29.1	52.9	103.0
Error típico	12.5	10.5	7.4	5.0	1.2	1.2	0.6	1.8	2.2	4.0	6.1	7.2
Mediana	148.3	137.3	104.5	33.5	4.5	0.0	0.0	1.9	9.7	23.4	46.8	103.5
Desviación estándar	77.0	65.7	46.0	31.4	7.8	7.8	3.7	11.1	13.9	25.4	38.9	45.3
Varianza de la muestra	5927.7	4318.0	2115.0	984.1	61.4	60.4	14.0	124.1	192.0	646.9	1509.8	2053.1
Curtosis	0.8	-0.2	-0.9	2.3	1.8	30.8	4.4	10.9	0.1	0.9	9.2	-0.1
Coef. de asimetría	0.6	0.6	0.2	1.3	1.4	5.3	2.2	3.0	1.0	1.2	2.2	0.2
Rango	336.6	253.8	171.6	145.9	32.8	47.4	15.4	57.2	48.7	100.2	225.5	183.4
Mínimo	24.5	51.3	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	25.4
Máximo	361.1	305.1	205.6	145.9	32.8	47.4	15.4	57.2	48.7	100.2	226.2	208.8
Numero de datos	38	39	39	39	40	40	40	39	39	40	40	40

<b>Estación Lampa</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	155.0	135.3	112.1	47.2	7.1	3.8	1.7	8.5	22.5	45.9	63.6	117.2
Error típico	10.6	9.7	6.3	5.2	1.1	1.3	0.5	1.9	3.1	3.8	6.3	8.1
Mediana	151.1	110.6	115.6	38.6	4.2	0.7	0.0	4.7	17.3	43.8	57.2	100.7
Desviación estándar	76.2	70.1	45.3	37.7	8.1	9.4	3.9	13.7	22.0	27.2	45.2	58.7
Varianza de la muestra	5810.7	4910.6	2047.8	1424.5	65.0	89.2	14.9	186.6	484.6	741.6	2045.3	3440.5
Curtosis	2.9	5.7	0.0	3.2	0.4	11.8	14.4	12.5	1.4	1.3	3.4	3.8
Coef. de asimetría	1.2	1.9	-0.1	1.7	1.2	3.5	3.7	3.3	1.4	0.9	1.5	1.5
Rango	391.2	415.1	200.9	182.8	30.4	43.1	19.2	71.1	88.2	137.3	237.4	308.7
Mínimo	23.0	18.2	27.1	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	39.5
Máximo	414.2	433.3	228.0	186.2	30.4	43.1	19.2	71.1	88.2	137.3	240.3	348.2
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

<b>Estación Juliaca</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	132.9	105.7	94.7	40.2	9.2	4.1	2.6	7.4	20.1	43.3	51.4	90.2
Error típico	8.4	7.0	6.4	4.6	1.8	1.4	0.7	1.5	2.4	4.3	5.1	6.1
Mediana	127.3	98.0	93.0	31.0	3.9	0.2	0.0	4.0	18.1	38.8	47.3	88.1
Desviación estándar	59.2	49.7	45.4	32.8	12.5	10.1	4.9	10.4	17.1	30.6	35.8	42.9
Varianza de la muestra	3508.4	2470.8	2058.4	1076.3	157.1	102.1	23.9	108.6	293.1	935.9	1283.8	1844.1
Curtosis	-0.6	-0.2	1.0	3.5	3.9	11.8	9.1	3.9	1.2	4.6	0.4	-0.2
Coef. de asimetría	0.4	0.6	0.8	1.5	2.0	3.4	2.9	2.0	1.1	1.6	0.8	0.5
Rango	237.6	215.2	210.2	168.9	55.7	51.0	23.6	44.8	71.5	169.0	158.1	185.7
Mínimo	47.2	27.7	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	17.5
Máximo	284.8	242.9	222.2	168.9	55.7	51.0	23.6	44.8	71.5	169.0	159.5	203.2
Numero de datos	50	50	50	50	50	50	49	49	50	50	50	50

<b>Estación Taraco</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	132.4	104.9	87.9	37.2	6.4	4.9	2.7	7.6	23.3	40.7	50.0	93.1
Error típico	7.5	6.4	5.5	4.7	1.1	1.7	0.8	1.6	3.0	4.0	5.9	5.8
Mediana	128.4	99.4	77.9	29.6	4.0	0.0	0.0	2.3	18.2	33.1	39.4	79.4
Desviación estándar	53.8	46.3	39.6	33.6	7.8	11.9	5.8	11.3	21.8	28.8	42.4	41.6
Varianza de la muestra	2894.8	2139.8	1570.9	1129.3	61.2	142.5	33.6	127.7	473.3	826.6	1798.1	1733.4
Curtosis	0.5	-0.1	2.4	4.1	3.1	8.5	12.9	7.1	2.0	4.4	16.1	0.9
Coef. de asimetría	0.4	0.7	1.1	1.9	1.7	3.0	3.2	2.3	1.3	1.7	3.3	1.0
Rango	264.3	192.5	209.0	148.9	33.1	55.0	32.0	58.1	100.7	158.6	278.7	187.3
Mínimo	21.1	25.4	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.5
Máximo	285.4	217.9	233.8	148.9	33.1	55.0	32.0	58.1	100.7	158.6	278.7	220.8
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

<b>Estación Capachica</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	21.5	38.1	65.4	109.9	193.5	154.5	135.7	50.9	8.3	6.7	2.7	11.9
Error típico	3.6	5.5	8.1	12.4	12.9	14.4	13.1	7.3	2.3	2.3	0.9	3.6
Mediana	17.9	32.7	57.4	111.8	191.6	143.4	129.5	45.6	2.5	0.4	0.2	4.5
Desviación estándar	17.4	27.1	40.6	61.9	64.4	73.5	66.9	36.4	11.5	11.4	5	17.9
Varianza de la muestra	302.3	732.6	1646	3826	4142	5405	4481	1328	131.3	129.4	25	319.4
Curtosis	-0.7	3.2	1.3	-0.5	-0.7	-0.2	-0.2	-0.4	1.9	4.5	5.2	3.9
Coef. de asimetría	0.5	1.6	1.1	0.4	0.2	0.4	0.5	0.6	1.6	2.2	2.3	2.0
Rango	59.3	120.3	166.7	230	242.4	289.4	260.5	129.2	41	40.8	19.4	70
Mínimo	0	3.3	0	12.1	83.7	18.9	32.5	1.8	0	0	0	0
Máximo	59.3	123.6	166.7	242.1	326.1	308.3	293	131	41	40.8	19.4	70
Numero de datos	24	24	25	25	25	26	26	25	25	24	26	25

Fuente Elaboración propia

Tabla 8-3 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Puno a Imata

<b>Estación Puno</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	159.5	148.9	134.5	51.5	8.9	4.0	2.4	10.7	25.8	45.0	49.6	91.9
Error típico	9.3	10.0	8.2	4.2	1.5	1.4	0.6	1.9	3.1	4.7	4.2	6.0
Mediana	154.0	130.9	129.3	44.6	6.4	0.1	0.6	5.6	18.3	35.5	46.2	90.6
Desviación estándar	66.1	71.6	58.8	30.0	10.8	10.0	4.4	13.3	22.0	33.8	30.4	42.6
Varianza de la muestra	4363.8	5132.5	3458.7	901.8	117.1	101.0	19.1	176.5	482.0	1143.7	927.0	1811.5
Curtosis	-0.3	0.3	-0.7	-0.6	2.5	14.3	10.7	1.1	2.5	2.7	1.0	1.0
Coef. de asimetría	0.1	0.7	0.1	0.5	1.7	3.6	3.1	1.4	1.3	1.6	1.0	0.7
Rango	298.2	315.2	242.7	114.1	43.7	54.7	22.7	49.2	108.3	153.3	139.7	210.7
Mínimo	20.7	22.4	15.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	4.0	24.5
Máximo	318.9	337.6	258.4	116.2	43.7	54.7	22.7	49.2	108.3	157.5	143.7	235.2
Numero de datos	51	51	52	51	52	50	52	51	51	52	52	51

<b>Estación Quillisani</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	171.3	173.2	147.3	54.1	11.9	3.7	4.3	13.8	24.5	40.4	79.1	130.4
Error típico	14.5	15.0	12.5	8.7	2.8	1.1	1.3	3.6	4.6	6.3	12.1	13.6
Mediana	161.7	160.8	141.6	47.3	4.3	1.0	1.4	8.1	20.2	32.9	66.8	111.3
Desviación estándar	72.6	75.2	62.5	43.3	14.0	5.3	6.3	18.1	22.9	31.5	60.7	67.8
Varianza de la muestra	5271.7	5662.1	3904.4	1876.6	194.7	28.5	39.8	328.1	525.5	991.5	3690.2	4592.3
Curtosis	-0.9	-0.6	0.4	3.5	0.0	1.3	5.1	7.4	0.4	-0.2	-0.1	-0.9
Coef. de asimetría	0.2	0.0	0.1	1.5	1.2	1.6	2.1	2.6	1.1	0.7	0.7	0.0
Rango	270.9	302.7	281.4	195.1	44.4	16.9	26.0	79.4	78.8	112.0	219.1	233.8
Mínimo	53.2	13.7	2.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	4.9	1.5
Máximo	324.1	316.4	283.5	196.6	44.4	16.9	26.0	79.4	78.8	113.8	224.0	235.3
Numero de datos	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

<b>Estación Ichuña</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	141.5	121.4	87.9	30.2	5.1	2.7	2.6	5.4	10.1	18.5	34.5	86.4
Error típico	8.3	9.8	6.7	3.2	1.1	1.0	0.9	1.9	1.9	2.8	4.6	7.2
Mediana	141.7	118.3	81.0	27.1	1.5	0.0	0.0	0.4	3.8	10.6	26.9	81.1
Desviación estándar	58.8	68.4	46.4	22.5	7.7	7.2	6.1	12.9	13.3	20.0	32.8	51.1
Varianza de la muestra	3453.5	4683.4	2157.5	507.9	59.7	52.4	37.3	167.0	176.0	401.8	1077.7	2612.7
Curtosis	-0.8	-0.8	0.8	1.5	9.3	20.9	6.5	30.0	1.4	0.9	1.7	3.1
Coef. de asimetría	0.0	0.3	0.9	1.1	2.7	4.3	2.7	5.1	1.5	1.4	1.3	1.3
Rango	230.6	276.2	227.2	106.4	41.0	42.9	25.3	84.0	47.3	74.7	141.3	266.8
Mínimo	29.7	12.5	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3
Máximo	260.3	288.7	229.7	106.4	41.0	42.9	25.3	84.0	47.3	74.7	141.3	275.1
Numero de datos	50	49	48	49	49	49	50	48	50	50	50	50

<b>Estación Crucero Alto</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	142.0	112.7	112.9	36.3	4.9	3.2	4.6	7.6	10.7	23.3	33.7	79.5
Error típico	9.5	8.3	7.0	4.7	1.1	1.2	1.1	1.9	2.1	3.5	4.8	6.3
Mediana	140.8	107.3	104.9	32.6	1.1	0.0	0.6	2.7	3.4	13.9	24.7	81.4
Desviación estándar	67.8	59.4	49.3	33.1	7.9	8.3	7.6	12.8	14.6	24.6	33.0	43.8
Varianza de la muestra	4600.5	3532.6	2427.2	1095.3	62.0	69.7	57.3	165.1	213.3	602.8	1087.8	1916.4
Curtosis	-0.2	-0.9	-0.1	1.5	6.0	15.5	7.1	18.0	2.1	0.6	1.6	1.0
Coef. de asimetría	0.3	0.1	0.5	1.2	2.3	3.7	2.4	3.7	1.7	1.3	1.4	0.9
Rango	307.8	220.0	220.5	136.9	36.8	45.6	38.0	77.0	53.7	89.5	135.7	208.1
Mínimo	22.7	0.0	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7
Máximo	330.5	220.0	233.4	136.9	36.8	45.6	38.0	77.0	53.7	89.5	135.7	217.8
Numero de datos	51	51	50	50	50	47	49	48	47	48	48	48

<b>Estación Imata</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	134.5	122.3	102.0	31.8	5.5	2.2	2.7	5.1	9.0	15.9	28.5	71.0
Error típico	8.7	8.5	5.9	3.4	1.2	0.8	0.8	1.4	2.0	2.7	4.1	5.2
Mediana	129.9	117.2	101.1	27.1	1.3	0.0	0.1	1.1	2.8	8.5	17.5	74.6
Desviación estándar	62.8	61.3	42.7	24.8	8.8	5.8	5.5	10.0	14.8	19.3	29.3	37.3
Varianza de la muestra	3948.4	3760.9	1822.4	616.4	78.3	33.5	30.3	99.2	217.8	370.8	860.4	1394.2
Curtosis	1.1	-1.1	2.2	0.0	8.9	13.9	5.3	13.9	7.2	4.3	0.8	0.3
Coef. de asimetría	0.6	0.1	0.6	0.8	2.8	3.7	2.4	3.4	2.5	1.9	1.3	0.5
Rango	316.0	239.7	247.4	97.4	42.1	29.7	22.4	56.6	73.7	93.5	109.3	161.3
Mínimo	26.8	21.2	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8
Máximo	342.8	260.9	255.7	97.4	42.1	29.7	22.4	56.6	73.7	93.5	109.3	165.1
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Fuente Elaboración propia

Tabla 8-4 Estadística descriptiva de la precipitación mensual Estación Pampahuta a Cabanillas

<b>Estación Pampahuta</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	14.2	35.7	75.0	122.1	186.3	148.1	133.3	54.1	10.3	4.2	1.9	10.9
Error típico	2.5	5.3	8.0	9.8	10.8	12.8	9.5	6.4	2.4	1.5	0.9	2.7
Mediana	14.7	29.2	73.0	108.1	187.2	146.9	135.0	50.5	5.1	1.3	0.0	4.9
Desviación estándar	13.6	29.1	43.6	53.8	58.9	70.3	51.9	35.2	13.1	8.1	5.1	14.8
Varianza de la muestra	185.4	844.1	1903.4	2894.6	3473.2	4938.8	2697.9	1237.8	171.9	64.9	25.5	220.2
Curtosis	1.1	1.2	-0.7	-0.9	-0.6	-1.0	-0.2	0.2	7.7	7.7	16.7	1.8
Coef. de asimetría	1.1	1.5	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.8	2.4	2.8	3.9	1.6
Rango	51.2	106.0	160.0	199.6	228.7	251.0	219.3	136.7	62.5	31.5	25.2	51.5
Mínimo	0.0	2.2	2.9	28.7	81.8	25.0	26.2	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	51.2	108.2	162.9	228.3	310.5	276.0	245.5	145.3	62.5	31.5	25.2	51.5
Numero de datos	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0

<b>Estación Cabanillas</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	17.2	32.4	53.5	96.1	150.5	131.3	110.4	45.9	5.0	3.4	1.2	8.8
Error típico	2.8	4.9	6.2	8.4	11.1	11.2	8.5	5.9	1.2	1.7	0.4	2.4
Mediana	10.2	26.5	45.3	90.7	140.8	123.2	112.3	37.4	3.3	0.0	0.0	3.0
Desviación estándar	15.5	26.8	34.0	45.8	61.0	61.4	46.8	32.5	6.3	9.5	2.4	13.0
Varianza de la muestra	239.0	717.2	1158.0	2099.7	3723.4	3770.9	2191.3	1053.6	40.1	89.6	5.9	168.3
Curtosis	-0.5	4.0	-0.3	-0.1	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	2.6	7.8	9.8	3.7
Coef. de asimetría	0.8	1.9	0.7	0.6	0.2	0.3	-0.3	0.5	1.8	3.0	3.0	1.9
Rango	50.2	110.1	130.0	189.8	247.6	219.4	164.4	105.2	23.5	35.6	11.0	53.2
Mínimo	0.0	3.3	0.0	23.0	26.0	23.4	17.5	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	50.2	113.4	130.0	212.8	273.6	242.8	181.9	110.2	23.5	35.6	11.0	53.2
Numero de datos	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-5 Estadística descriptiva de la temperatura media mensual Estación Lagunillas a Cabanillas

<b>Estación Lagunillas</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	7.6	7.6	7.5	7.2	6.0	4.5	4.2	5.1	6.5	7.7	8.3	8.2
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mediana	7.4	7.6	7.3	7.1	6.1	4.4	4.1	5.0	6.5	7.6	8.2	8.1
Desviación estándar	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	1.0	1.0
Varianza de la muestra	1.1	1.0	0.9	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.9	0.9
Curtosis	-0.5	-0.5	0.5	0.3	-0.5	-1.1	-0.4	0.9	-0.4	0.0	1.2	0.3
Coef. de asimetría	0.6	0.1	0.8	0.2	0.0	0.2	0.2	-0.1	-0.2	0.1	0.6	0.7
Rango	4.1	4.3	4.2	3.0	3.1	2.4	2.9	3.9	2.6	3.2	4.4	4.1
Mínimo	6.1	5.4	5.9	5.8	4.6	3.4	2.9	3.0	5.0	6.2	6.3	6.7
Máximo	10.2	9.8	10.1	8.9	7.6	5.8	5.8	6.9	7.6	9.4	10.7	10.9
Numero de datos	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48

<b>Estación Pampahuta</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	6.4	6.4	6.2	5.3	3.2	1.4	0.9	2.0	3.6	5.0	5.8	6.3
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Mediana	6.4	6.4	6.3	5.4	3.2	1.4	0.8	1.8	3.6	4.9	5.8	6.4
Desviación estándar	0.7	0.6	0.6	0.8	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	0.7
Varianza de la muestra	0.5	0.4	0.4	0.6	1.2	1.4	1.2	1.5	1.3	1.4	1.3	0.5
Curtosis	0.0	-0.4	-0.6	-0.6	-0.4	0.4	0.7	1.2	0.0	-0.5	-1.0	-0.6
Coef. de asimetría	0.3	0.2	0.2	0.0	-0.1	0.4	0.7	0.1	0.1	0.2	-0.1	0.1
Rango	3.5	2.6	2.7	3.4	4.4	5.5	5.0	6.6	5.2	5.0	4.2	3.1
Mínimo	4.8	5.4	5.1	3.6	0.8	-1.1	-1.1	-1.6	0.9	2.7	3.8	4.9
Máximo	8.3	8.0	7.8	7.0	5.2	4.4	3.9	5.0	6.1	7.7	8.0	8.0
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

<b>Estación Lampa</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	10.2	10.1	10.0	9.5	7.9	6.5	6.3	7.6	9.2	10.4	11.1	10.8
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mediana	10.3	10.1	10.0	9.4	7.9	6.4	6.3	7.5	9.3	10.5	11.2	10.7
Desviación estándar	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
Varianza de la muestra	0.8	0.7	0.5	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8
Curtosis	-0.3	0.8	0.3	-0.4	-0.1	-0.7	-0.2	0.4	0.5	-0.6	0.2	-0.5
Coef. de asimetría	0.2	0.2	0.5	-0.1	0.3	0.3	0.0	0.5	-0.2	-0.5	-0.6	-0.2
Rango	3.8	4.2	3.3	3.0	3.4	3.3	3.8	4.3	4.3	3.1	4.0	3.8
Mínimo	8.7	8.4	8.6	8.0	6.4	4.9	4.5	5.6	7.0	8.6	9.0	8.7
Máximo	12.5	12.6	11.9	10.9	9.8	8.3	8.2	9.9	11.3	11.7	13.0	12.5
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

<b>Estación Juliaca</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	11.2	11.2	11.1	10.7	9.5	8.1	7.7	9.0	10.6	12.0	12.5	12.0
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Mediana	11.1	11.4	11.0	10.6	9.5	8.2	7.6	9.0	10.7	12.0	12.6	12.0
Desviación estándar	1.0	1.0	0.8	1.1	1.3	1.5	1.4	1.4	1.1	1.0	1.0	0.9
Varianza de la muestra	1.0	0.9	0.7	1.2	1.7	2.3	1.9	1.9	1.3	0.9	1.0	0.8
Curtosis	0.8	0.0	0.4	3.2	3.4	4.1	11.2	6.3	2.9	2.0	3.6	-0.1
Coef. de asimetría	0.5	0.2	0.8	0.2	0.1	0.7	2.5	0.8	0.7	0.6	0.6	0.2
Rango	4.8	4.6	3.8	7.1	8.5	9.7	8.9	9.9	6.9	5.6	6.0	3.9
Mínimo	9.4	9.1	9.7	7.2	5.2	4.0	5.3	4.7	7.8	9.7	10.1	10.2
Máximo	14.2	13.7	13.5	14.3	13.7	13.7	14.2	14.6	14.7	15.2	16.2	14.1
Numero de datos	47	47	47	47	47	47	47	47	48	48	48	48

<b>Estación Cabanillas</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	10.3	10.1	10.0	9.9	9.0	7.9	7.6	8.5	9.7	10.7	11.3	10.9
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mediana	10.3	10.1	9.9	9.9	9.0	7.9	7.6	8.6	9.7	10.6	11.4	10.8
Desviación estándar	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
Varianza de la muestra	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.8	0.8	0.7
Curtosis	-0.3	1.0	0.6	1.3	0.0	0.8	0.2	0.0	-0.5	-0.8	-0.4	-0.3
Coef. de asimetría	0.1	0.6	0.8	0.5	-0.4	0.4	-0.4	-0.1	0.2	0.0	-0.3	0.3
Rango	3.6	3.5	3.3	3.1	2.5	3.6	2.9	3.5	3.3	3.6	3.9	3.8
Mínimo	8.7	8.9	8.9	8.6	7.5	6.4	5.9	6.6	8.2	9.0	8.9	9.2
Máximo	12.3	12.4	12.2	11.7	10.0	9.9	8.8	10.2	11.5	12.6	12.8	13.0
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-6 Estadística descriptiva de la temperatura media mensual Estación Puno a Imata

<b>Estación Puno</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	10.7	10.7	10.5	10.1	8.8	7.4	7.2	8.4	9.9	11.1	11.7	11.4
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mediana	10.7	10.8	10.5	10.1	8.8	7.3	7.2	8.5	9.9	11.0	11.8	11.3
Desviación estándar	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9
Varianza de la muestra	0.9	0.8	0.7	0.5	0.6	0.7	0.5	0.4	0.5	0.5	0.8	0.8
Curtosis	-0.6	-0.3	1.6	1.6	-0.4	0.9	-0.4	1.0	-0.2	-0.3	0.5	-0.5
Coef. de asimetría	0.2	-0.1	0.8	0.0	0.0	0.9	0.2	-0.5	0.1	0.1	-0.7	-0.1
Rango	4.0	4.3	4.4	4.2	3.6	3.8	2.9	3.5	3.3	3.1	4.1	3.9
Mínimo	9.0	8.6	8.9	7.9	7.1	6.1	6.0	6.3	8.3	9.7	9.2	9.2
Máximo	13.0	12.9	13.3	12.1	10.7	9.9	8.9	9.8	11.6	12.8	13.4	13.2
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

<b>Estación Capachica</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	9.6	9.6	9.6	9.2	8.1	6.9	6.7	7.5	8.7	9.7	10.1	9.9
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Mediana	9.7	9.7	9.5	9.2	8.1	6.8	6.8	7.4	8.8	9.7	10.2	9.9
Desviación estándar	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.1
Varianza de la muestra	1.1	1.0	0.8	0.6	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2
Curtosis	0.0	-0.3	-0.6	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.5	-1.1	-0.7	-0.3	-0.7
Coef. de asimetría	-0.4	-0.1	0.1	0.3	0.1	0.6	0.1	-0.2	0.0	-0.3	-0.3	-0.2
Rango	4.9	4.7	3.7	3.4	3.4	3.7	3.6	3.0	3.0	3.7	4.0	4.5
Mínimo	7.1	7.4	7.9	7.7	6.3	5.2	4.8	5.7	7.3	7.5	7.8	7.6
Máximo	12.0	12.1	11.6	11.0	9.8	9.0	8.4	8.8	10.3	11.2	11.8	12.1
Numero de datos	47	47	47	47	47	47	47	47	45	45	45	47

<b>Estación Ayaviri</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	9.8	9.9	9.8	9.2	7.5	5.8	5.5	6.9	9.0	10.2	10.8	10.4
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Mediana	9.8	9.8	9.8	9.4	7.6	5.9	5.8	6.9	9.0	10.3	10.8	10.5
Desviación estándar	0.9	0.8	0.6	0.9	1.2	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	1.0	0.7
Varianza de la muestra	0.7	0.7	0.4	0.8	1.4	1.9	1.7	1.5	1.3	0.9	1.0	0.6
Curtosis	0.4	0.4	0.4	2.5	1.1	0.4	0.5	-0.3	0.8	0.7	-0.6	1.2
Coef. de asimetría	0.1	0.1	-0.2	-1.5	-0.8	-0.5	-0.7	-0.3	-0.6	-0.5	0.0	-0.7
Rango	4.2	4.3	3.3	4.3	5.5	6.5	5.8	4.9	5.6	4.2	4.4	3.8
Mínimo	7.7	7.8	8.1	6.4	4.0	2.1	2.1	4.1	5.8	7.6	8.5	8.1
Máximo	11.9	12.1	11.4	10.7	9.5	8.6	7.9	9.0	11.4	11.8	12.9	11.9
Numero de datos	50	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51

<b>Estación Llalli</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	9.1	9.2	8.9	8.2	6.5	5.1	4.9	6.2	8.1	9.1	9.8	9.5
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Mediana	9.1	9.1	8.9	8.5	6.7	5.1	4.9	6.1	8.2	9.0	9.8	9.6
Desviación estándar	0.8	0.8	0.8	1.0	1.3	1.1	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	0.8
Varianza de la muestra	0.6	0.7	0.7	1.0	1.7	1.3	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7	0.7
Curtosis	-0.5	0.2	-0.4	-0.2	-1.2	-0.6	-0.3	-0.6	-1.2	-0.4	-0.8	-0.4
Coef. de asimetría	0.2	0.2	0.1	-0.4	-0.2	0.2	-0.3	-0.4	-0.2	-0.3	-0.1	0.1
Rango	3.5	4.0	3.5	4.3	4.1	4.7	5.8	5.4	4.4	5.3	5.1	3.4
Mínimo	7.7	7.4	7.4	6.0	4.3	3.2	1.9	3.3	5.6	6.2	7.3	8.2
Máximo	11.2	11.3	10.8	10.3	8.4	7.9	7.7	8.7	10.0	11.5	12.4	11.6
Numero de datos	41	41	41	41	41	40	40	40	40	40	40	40

<b>Estación Imata</b>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>
Media	4.9	4.9	4.8	4.1	2.1	0.4	0.0	1.2	2.8	4.3	5.0	5.2
Error típico	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mediana	4.9	4.9	4.7	4.3	2.2	0.5	0.1	1.2	2.8	4.3	5.0	5.1
Desviación estándar	0.8	0.8	0.6	0.7	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7
Varianza de la muestra	0.6	0.6	0.4	0.5	0.7	0.8	0.5	0.5	0.4	0.3	0.5	0.5
Curtosis	2.3	1.0	1.8	-0.4	-0.7	-0.3	1.0	0.2	0.5	0.8	1.1	0.0
Coef. de asimetría	0.9	-0.1	0.5	-0.2	-0.5	-0.1	-0.6	-0.7	-0.8	-0.6	-0.9	0.3
Rango	4.2	3.7	3.4	3.0	3.0	3.8	3.8	3.3	2.9	2.9	3.5	3.3
Mínimo	3.3	3.0	3.3	2.7	0.4	-1.5	-2.2	-0.9	0.9	2.5	2.6	3.5
Máximo	7.5	6.7	6.8	5.7	3.4	2.3	1.6	2.3	3.7	5.3	6.2	6.8
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

Fuente: Elaboración propia

## 8.2. Análisis comparativo del cálculo de la Evapotranspiración potencial mensual

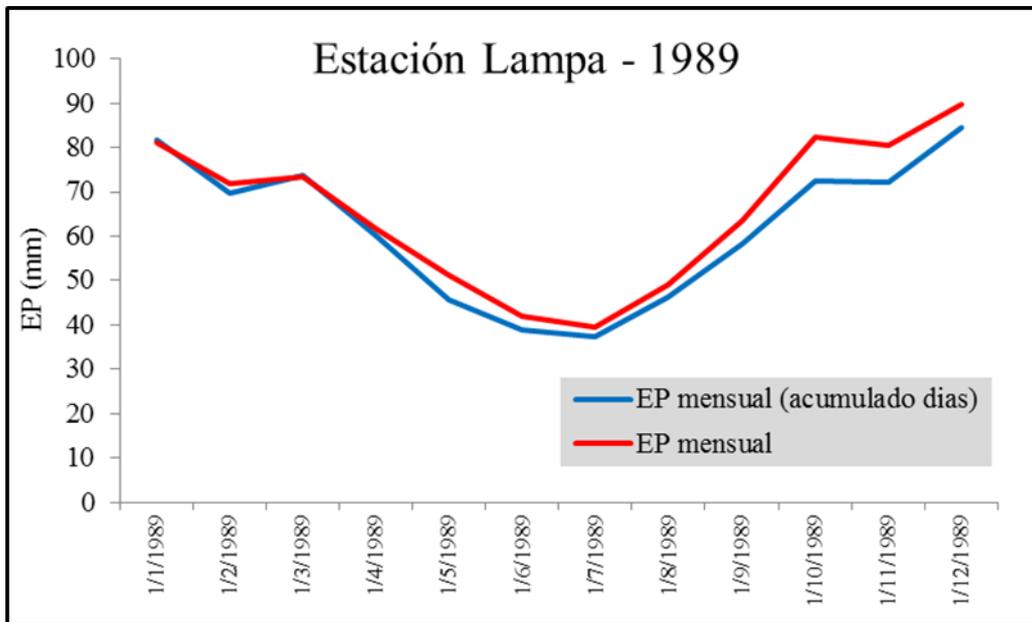


Figura 8-4 Comparación de la EP mensual calculado a partir de la temperatura diaria y la temperatura mensual, utilizando la metodología de Oudin