

551.483  
SE474  
000931



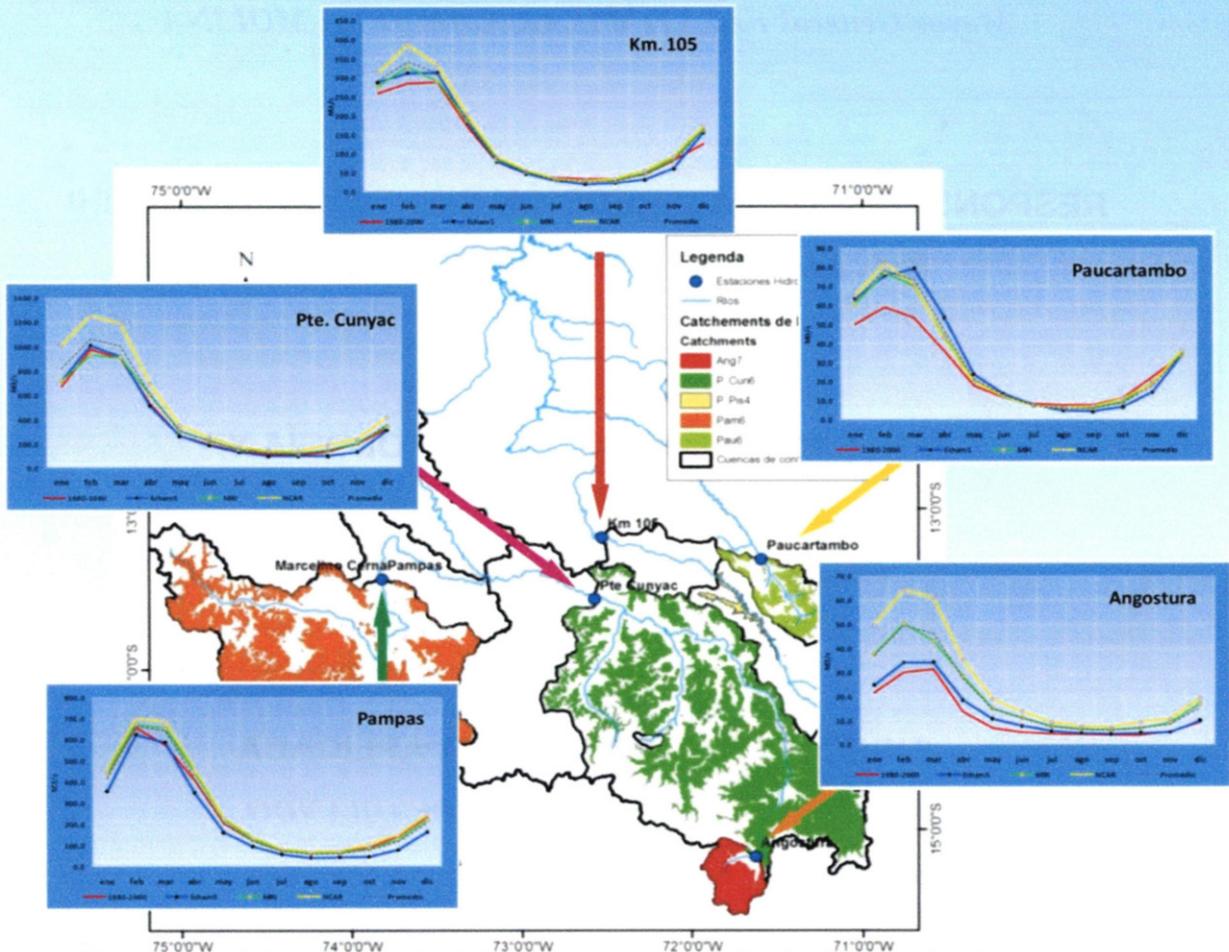
PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

# SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL FUTURA

## CUENCAS PAMPAS, APURÍMAC Y URUBAMBA



Comparación de los caudales simulados para las cuencas de los ríos Pampas, Apurímac y Urubamba para los horizontes 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.

inter cooperation

Lima - Perú  
2011





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

**MINISTRO DEL AMBIENTE**

*Sr. RICARDO GIESECKE SARA LAFOSE*

**PRESIDENTE EJECUTIVO - SENAMHI**

*Mayor General FAP (r) WILAR GAMARRA MOLINA*

**RESPONSABLE DE LA DIRECCIÓN CIENTÍFICA - SENAMHI**

*PhD. ELIZABETH SILVESTRE ESPINOZA*

**DIRECTOR GENERAL DE HIDROLOGÍA Y**

**RECURSOS HÍDRICOS**

*Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GALVEZ*

**DIRECTOR DE HIDROLOGÍA APLICADA**

*Ing. OSCAR GUSTAVO FELIPE OBANDO*



*Servicio Nacional de Meteorología e  
Hidrología*



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

**COORDINADORA NACIONAL DEL PROYECTO PACC**

*Arq. LENKIZA ÁNGULO VILLAREAL*

**COORDINADORA DEL PROYECTO PACC - SENAMHI**

*PhD. ELIZABETH SILVESTRE ESPINOZA*

**RESPONSABLE COMPONENTE HIDROLÓGICA**

*Ing. OSCAR GUSTAVO FELIPE OBANDO*

**EQUIPO TÉCNICO**

*Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez*

*Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando*

*Dr. Wilson Alfredo Suarez Alayza*

*Ing. Héctor Alberto Vera Arévalo*

*Ing. Zenón Huamán Gutierrez.*

*Bach. Miriam Rocío Casaverde Riveros*

*Bach. Tannia Minnela Sánchez Bernardo*

*Téc. Luis Monge*

**REVISIÓN Y EDICIÓN DEL ESTUDIO**

*Dr. Juan Julio Ordoñez Gálvez*

*Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando*

*Bach. Miriam Rocío Casaverde Riveros*

**PERSONAL DE APOYO**

*Sra. Dula Cruzate García*



*Dirección General de Hidrología y  
Recursos Hídricos*

## INDICE

I.	Introducción.....	06
II.	Marco Teórico.....	07
	2.1 Modelo Atmosférico MRI/JMA.....	07
	2.2 Modelo ECHAM5-WRF .....	11
	2.3 Modelo NCAR .....	11
III.	Información Utilizada.....	13
	3.1 Información climática.....	13
IV.	Aspectos metodológicos.....	14
	4.1 Modelización con modelo WEAP.....	14
	4.2 Modelización de subcuencas con modelo GR2m.....	16
	4.3 Simulación de sequías bajo escenarios de Cambio Climático.....	17
	4.4 Mapas climáticos.....	18
V.	Resultados.....	20
	5.1 Análisis de la Precipitación proyectada por los modelos de downscaling.....	20
	5.2 Análisis de la Temperatura proyectada por los modelos de downscaling .....	25
	5.3 Oferta Hídrica para el horizonte 2030-39 (Modelo WEAP).....	27
	5.4 Disponibilidad Hídrica futura en subcuencas – Modelo GR2M.....	33
	5.4.1 Cuenca del río Apurímac.....	33
	5.4.1.1 Subcuenca Alto Apurímac.....	33
	5.4.1.2 Subcuenca Velille.....	34
	5.4.1.3 Subcuenca Santo Tomás.....	35
	5.4.1.4 Subcuenca Oropesa.....	36
	5.4.1.5 Subcuenca Pachachaca.....	37
	5.4.2 Cuenca del río Pampas.....	39
	5.4.2.1 Subcuenca Alto Pampas.....	39
	5.4.2.2 Subcuenca Caracha.....	40
	5.4.2.3 Subcuenca Chicha.....	41
	5.4.2.4 Subcuenca Jatunmayo.....	42
	5.4.2.5 Subcuenca Torobamba.....	43
	5.5 Simulación de sequías.....	44
	5.5.1 Caracterización regional.....	44
	5.5.2 Tiempo de retorno y severidad de Sequías.....	48
VI.	Conclusiones .....	53
VII.	Discusiones y Recomendaciones.....	58
VIII.	Bibliografía.....	59
	Anexos (Mapas de escenarios anual (2015-2039) Modelos MRI, ECHAM5-WRF...)	60

## FIGURAS

Figura 1. Esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km.....	10
Figura 2. Red de estaciones utilizadas y límites de las subcuencas .....	14
Figura 3. Mapa de ubicación de los catchement usados como referencia para el análisis de la precipitación y puntos hidrológicos de control.....	15
Figura 4. Ubicación de los puntos en subcuencas donde se realizó la simulación de los caudales. ....	16
Figura 5. Ubicación de estaciones para el análisis se sequías del horizonte 2012-2059 .....	17
Figura 6. Propiedades de la sequía basado en el SPI.....	18
Figura 7. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Angostura).....	21
Figura 8. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.....	22
Figura 9. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Pampas.....	23
Figura 10. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Urubamba (Km 105).....	24
Figura 11. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.....	25
Figura 12. Comparación gráfica de los datos de referencia de la temperatura. (1971-2000) en la estación de Sicuani y los datos del horizonte 2030-39 del modelo ECHAM5-WRF.....	26
Figura 13. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Paucartambo en el punto de control "Paucartambo" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	28
Figura 14. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Urubamba en el punto de control "Km 105" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	29
Figura 15. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Angostura" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	30
Figura 16. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Pte Cunyac" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	31
Figura 17. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Pampas en el punto de control "Pampas – Marcelino Cerna" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	32

Figura 18. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada). Subcuenca Alto Apurímac. ....	34
Figura 19. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Velille.....	35
Figura 20. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Santo Tomás.....	36
Figura 21. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Oropesa.....	37
Figura 22. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Pachachaca.....	38
Figura 23. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Alto Pampas.....	39
Figura 24. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Caracha.....	40
Figura 25. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Chicha.....	41
Figura 26. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Jatunmayo. ....	42
Figura 27. Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Torobamba. ....	43
Figura 28. Gráfico de barras de duración promedio de la sequía para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling.....	47
Figura 29. Gráfico de barras de la intensidad de la sequía para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling.....	47
Figura 30. Gráfico de barras del área afectada por sequías para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling.....	48
Figura 31. Curvas Duración-Severidad-Tiempo de retorno de sequías Estación Acomayo.. En línea sólida sequía histórica, en líneas punteadas sequías del periodo 2012-2059.....	49
Figura 32. Curvas Duración-Severidad-Tiempo de retorno de sequías Estación Abancay. En línea sólida sequía histórica, en líneas punteadas sequías del periodo 2012-2059.....	50

- Figura 33. Simulaciones del SPI para escala de 12 meses para los tres modelos de dowscalling, en estaciones representativas de la cuenca Vilcanota..... 50
- Figura 34. Simulaciones del SPI para escala de 12 meses para los tres modelos de dowscalling, en estaciones representativas de la cuenca Apurímac..... 51

### TABLAS

Tabla 1. Variables del Modelo.....	12
Tabla 2. Modelos Globales.....	12
Tabla 3. Modelo Global de Alta Resolución.....	13
Tabla 4. Modelo Regional simulado en SENAMHI.....	13
Tabla 5. Catchements de referencia para el análisis de los datos de precipitación.....	20
Tabla 6. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Angostura).....	21
Tabla 7. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Pte Cunyac).....	22
Tabla 8. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Pampas.....	23
Tabla 9. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca de Apurímac (Km 105).....	24
Tabla 10. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.....	25
Tabla 11. Datos de Temperatura del Periodo de referencia y el horizonte 2030-39 del modelo ECHAM5-WRF.....	26
Tabla 12. Variación de la temperatura del horizonte 2030-39 del modelo ECHAM5-WRF respecto al periodo de referencia.....	26
Tabla 13. Caudales Simulados para la cuenca del río Paucartambo en el punto de control "Paucartambo" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	28
Tabla 14. Caudales Simulados para la cuenca del río Urubamba en el punto de control "Km 105" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	29
Tabla 15. Caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Angostura" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	30
Tabla 16. Caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Pte. Cunyac" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	31

Tabla 17. Caudales Simulados para la cuenca del río Pampas en el punto de control “Pampas – Marcelino Cerna” para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5-WRF, MRI, NCAR.....	32
Tabla 18. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Alto Apurímac.....	34
Tabla 19. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Vatile.....	35
Tabla 20. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Santo Tomas.....	36
Tabla 21. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Oropesa.....	37
Tabla 22. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Pachachaca.....	38
Tabla 23. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Alto Pampas.....	39
Tabla 24. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Caracha.....	40
Tabla 25. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Chicha.....	41
Tabla 26. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Jatunmayo.....	42
Tabla 27. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Torobamba.....	43
Tabla 28. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 3 meses.....	44
Tabla 29. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 6 meses.....	45
Tabla 30. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 9 meses.....	45
Tabla 31. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 12 meses.....	46
Tabla 32. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 24 meses.....	46

## I. INTRODUCCIÓN

Estos últimos 35 años han sido marcados por una serie de eventos climáticos de carácter global, que van desde la variación de la temperatura, regímenes pluviométricos, radiación incidente, etc. Los gobiernos del planeta han comenzado a tomar conciencia de estos cambios y su consecuencia a partir de los años 80, la Organización Mundial de Meteorología (OMM) a la solicitud de la ONU ha convocado a un grupo de expertos para analizar los cambios y sus repercusiones. Este grupo se ha constituido como el “Panel Intergubernamental para el Cambio Climático” (IPCC), que desde su creación ha producido numerosos reportes, documentos técnicos, metodologías, etc.; relativos a los cambios que se han producido hasta la situación actual y generación de escenarios que podrían venir en el futuro.

Estos escenarios se basan en la utilización de “Modelos Globales Acoplados de Circulación General Atmósfera-Océano” (AOCGM) que permiten simular las reacciones del sistema climático y prevenir su evolución hacia el futuro.

Definiremos como « cambio climático » todo cambio dentro del clima al curso de los tiempos, que se ha inducido por la variabilidad natural o debido a la actividad humana (IPCC, 2007).

Los resultados de las simulaciones de la oferta hídrica superficial expuestos en el presente informe está estructurado en dos partes; en una primera se analiza las simulaciones de la oferta hídrica superficial futura con el modelo WEAP para el horizonte temporal 2030-2039, el cual ha utilizado como variables de entrada la precipitación y temperatura de los modelos globales (MRI/JMA), ECHAM5-WRF y NCAR para el escenario (A1B) definido por el IPCC. Los modelos de downscaling dinámico fueron procesados por la Dirección General de Meteorología del SENAMHI. En una segunda parte son presentadas las simulaciones de la disponibilidad hídrica superficial a nivel de subcuencas para el horizonte temporal 2016-2044, utilizando como variables de entrada las simulaciones de la temperatura y precipitación del modelo ECHAM5-WRF.

El análisis de las dos principales variables climáticas (precipitación y temperatura) generadas por los tres modelos para la precipitación y ECHAM5-WRF solo para la temperatura, estos son comparados con la serie de referencia (1971-2000) para la temperatura y en el caso de la precipitación con la climatología usada para la elaboración de cada uno de ellos visto para la generación de escenarios futuros de disponibilidad hídrica en las cuencas de los ríos Urubamba, Pampas y Apurímac.

Se incluye en los resultados la simulación de la sequía utilizando las proyecciones de los modelos de downscaling estadístico de NCAR, NHADCM3 y NMPEH5.

Finalmente se presenta los mapas climáticos anuales de precipitación, temperatura, evapotranspiración y escorrentía para el periodo de referencia (1970-2008) y para el horizonte 2015-2044 del modelo de ECHAM5-WRF.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Modelo atmosférico MRI/JMA

El Instituto de Investigación Meteorológica (MRI), La Agencia Meteorológica de Japón y la Organización Tecnológica de Ciencias Avanzadas de la Tierra (AESTO), condujeron un proyecto de investigación denominado "Desarrollo de modelos globales climáticos de alta resolución y modelos regionales de clima", proyecto financiado por el ministerio de educación, cultura, deportes, ciencias y tecnología de Japón. El propósito de este proyecto fue desarrollar un modelo atmosférico global de la circulación general (AGCM), con una resolución horizontal de 20 km. con la finalidad de estudiar los efectos del calentamiento global y eventos meteorológicos de meso escala tales como nevadas, precipitaciones intensas, vientos fuertes, heladas intensas, etc.

La simulación del modelo de circulación general de la atmosfera fue haciendo uso del Earth Simulator (ES). El ES es un sistema de supercomputador en vector-paralelo que consiste de 512 procesadores, el

cual estuvo posicionado como el computador más rápido del mundo en 2004 para realizar cálculos. El modelo como tal fue desarrollado para simular el clima real con alta exactitud a través de mejoras en los esquemas de parametrización y procesos físicos. Esta tecnología trabaja con un sistema de memoria distribuida en paralelo, el cual consiste de 640 nodos de procesadores, cada nodo es un sistema de memoria compartida que contiene 8 microprocesadores. La librería MPI fue usada para la paralelización entre nodos y microprocesadores tareas las cuales están programadas en memoria compartida en paralelo. La eficiencia de cálculo es más del 30% del pico de rendimiento. El supercomputador toma 4 horas para ejecutar un mes de integración de TL959L60 (grillas horizontales de 20 kilómetros y 60 niveles en la vertical) usando 30 nodos (240 CPU's) (Mizuta et al., 2006).

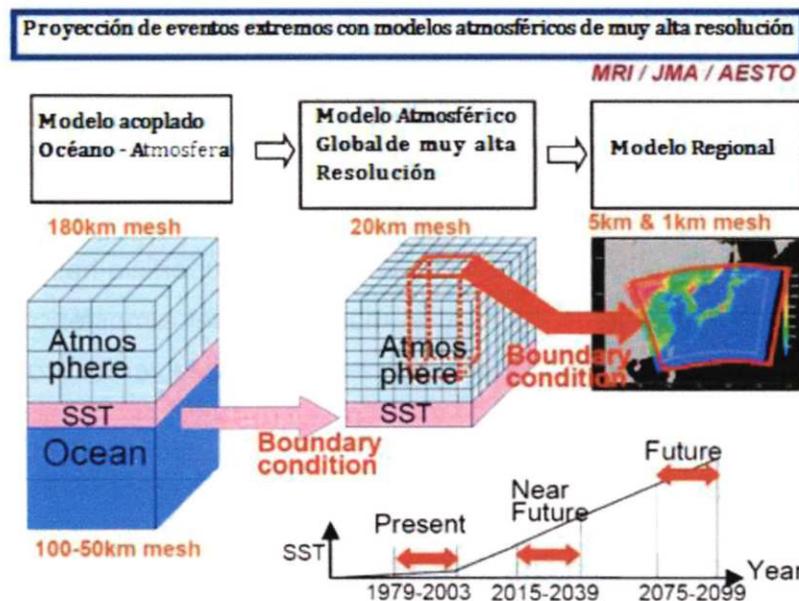
El sistema dinámico, es un sistema de ecuaciones primitivas originalmente diseñado por Kanamitsu. Este usa un método de transformada espectral de armónicos esféricos y coordenada vertical híbrida (sigma – presión). El esquema de parametrización de cúmulos implementado fue el de Ararakawa – Schubert. El perfil vertical de masa ascendente era función lineal con la altura. El flujo másico en la base de la nube fue calculado para resolver la ecuación de pronóstico. Para las nubes pronosticadas utilizaron un método similar al de Smith y para calcular la cantidad de nube y su contenido de agua utilizaron una aproximación estadística propuesta por Sommeria y Deardorff. La parametrización de Sundqvist se usó para determinar la tasa de cambio, de contenido de agua a precipitación. Un esquema cerrado de turbulencia de nivel 2 de Mellor y Yamada fue implementado para representar la difusión vertical de momento, calor y humedad. El arrastre por ondas de gravedad esta particionado en ondas largas (longitudes de ondas mayor a 100 kilómetros) y ondas cortas (longitudes de ondas ~ 10 kilómetros). Las ondas largas se propagan hacia arriba y depositan momento en niveles medios de la atmósfera, mientras que las ondas cortas son atrapadas en la troposfera y arrastrada ahí (Mizuta et al., 2006). Modificaciones al modelo descrito anteriormente fueron implementadas para construir el modelo de alta resolución de la siguiente manera:

Primero, se desarrolló un nuevo esquema semi-lagrangiano cuasi-conservativo y se introdujo para integraciones de tiempo rápidas y estables, en reemplazo del esquema Euleriano. Las advecciones horizontales y verticales son calculadas por separado en este esquema. La advección horizontal fue calculada con esquema semi-lagrangiano estándar, pero la masa, el vapor de agua y el agua en la nube son conservadas usando una corrección similar al método de Priestley, Gravel y Staniforth. Las variables pronosticadas han sido cambiadas desde la vorticidad y divergencia a componentes zonales y meridionales del viento con la introducción del esquema semi-lagrangiano. Además, un esquema semi – lagrangiano de doble nivel ha sido introducido en vez de un esquema de tercer nivel, lo cual suministra una doble eficiencia en principio. Esas mejoras de eficiencias disponibles permiten ejecutar integraciones de alta resolución en el corto plazo.

Segundo, algunos esquemas de procesos físicos fueron mejorados. El esquema de parametrización de cúmulos incluye efectos de intercambio (enrainment/detrainment) de masa entre el tope y la base de la nube; esto reduce el remanente de enfriamiento en la baja troposfera tropical y reduce el enfriamiento por evaporación. El esquema de caída de hielo desde las nubes fue basado sobre una solución analítica integrada por Rotstayn en vez de una simple parametrización en la cual el hielo cae hacia el siguiente estrato o al suelo. El esquema de pronóstico de nubes se modificó para reducir la dependencia de la lluvia sobre los pasos de integración. Con el fin de representar estratocúmulos marinos subtropicales fuera de las costas oeste de los continentes, una nueva parametrización de estratocúmulos fue introducida siguiendo el modelo propuesto por Singo. La nube es formada por el modelo cuando hay inversión al tope del estrato alto y la razón de mezcla se forma cerca de la superficie del mar.

Los esquemas de radiación y suelo desarrollados en el modelo JMA-GSM98 GCM fueron introducidos al modelo de alta resolución con modificaciones. En la construcción del modelo de alta resolución usaron estos esquemas detallados en vez de simplificarlos. Un modelo aleatorio multiparámetro de

Shibata y Aoki fue usado para radiación terrestre. Absorción debido a CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O fue tratada en esta versión además del H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. El modelo calcula la radiación solar formulada por Shibata y Uchiyama. Un tratamiento del efecto directo de aerosoles sulfatados es considerado en dicho esquema. El tratamiento del suelo ha sido mejorado del SiB (Modelo Simple de Biosfera), especialmente en esquemas de suelo y nieve. En el esquema de suelo, tres espesores para la ecuación de agua contenida en él, esta compartida con la ecuación de cantidad de calor donde los cambios de fase del agua son incluidos de manera que la energía y el agua puedan ser conservadas en los espesores del suelo. En el esquema de hielo, el número de espesores de hielo varía hasta en tres, dependiendo de la cantidad de hielo; además son calculados el contenido de calor y los flujos de agua. El albedo del hielo depende de la edad del mismo (Mizuta *et al.*, 2006).



**Figura 1.** Esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km.  
Fuente: DGM SENAMHI.

La **Figura 1** muestra un esquema de las condiciones de contorno usados para la simulación del modelo atmosférico MRI/JMA 20 km a la izquierda se ve el modelo acoplado océano – atmósfera, la parte atmosférica tiene una resolución de 180 km de grilla, mientras que la parte oceánica está entre 100

– 50 km de grilla, una de las forzantes usadas para el modelo de alta resolución es la temperatura en la superficie del mar (SST), a la vez las salidas del modelo MRI/JMA de 20 Km se adecuan como las condiciones de entrada para un modelo regional de una resolución espacial de 5 km y 1 km de grilla horizontal.

## **2.2 MODELO ECHAM5-WRF**

El modelo ECHAM5 fue desarrollado en cooperación entre el Instituto de Meteorología Max Planck (MPI) y Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) en Hamburgo, Alemania. El modelo MPI ECHAM4 (T42 L19) puesto en funcionamiento desde el año 1996 es el quinto de una serie de los modelos desarrollados en MPI que originalmente derivaron del modelo de rango medio para Europa (ECMWF).

En la representación horizontal utiliza el modo espectral (funciones armónicas esféricas) con transformaciones a la grilla gauseana para el cálculo de cantidades no lineales y de alguna variable física. Usa la truncación triangular 42 (T42) o equivalente a 2.8 x 2.8 grados latitud-longitud. En el dominio vertical, va desde la superficie hasta los 10 hPa. Para una superficie de 1000 hPa, el más bajo nivel atmosférico es en 996 hPa. Utiliza la coordenada híbrida sigma-presión en la vertical con 19 niveles.

## **2.3 NCAR**

El esquema de parametrización de subgrilla orográfica (Leung and Ghan 1998) ha sido aplicado al Modelo CAM3 (Community Atmosphere Model) y al Modelo CLM3 (Common Land Model) del NCAR, quienes son los dos componentes del modelo CCSM3. En este estudio CAM3 y CLM3 son corridos en modo fuera de línea, es decir, conducido por condiciones superficiales oceánicas tomadas desde la simulación climática del CCSM3 del escenario de emisión A1B del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). Este esquema se aplica a toda la columna física del modelo para cada una de las once clases de elevación dentro de cada celda.

La distribución del número de clases de elevación en cada grilla es altamente heterogénea. Los pasos en la aplicación del esquema de subgrilla consisten en tener un conjunto de elevaciones de superficie, los cuales son usados para determinar la distribución de frecuencias y la elevación media del conjunto de clases de elevación dentro de una celda. Un modelo de flujo de montaña es usado para diagnosticar el desplazamiento de las parcelas de aire con respecto a la elevación media. La conservación de energía y humedad son usados para determinar los perfiles de humedad y temperatura para cada clase de elevación. Toda la física del modelo es aplicada a estos perfiles y escritos para la climatología del modelo. La climatología por cada clase de elevación es interpolada de acuerdo al conjunto de superficies de elevación de alta resolución, generando una distribución de alta resolución (5 Km) del clima.

Las variables obtenidas del modelo usando este esquema de parametrización, finalmente son:

**Tabla1. Variables del Modelo**

Variables	Resolución (grad)	Dominio
RAIN atmospheric rain [mm/s]	0.041664	X=480
SNOW atmospheric snow [mm/s]		
TBOT atmospheric air temperature [K]	0.041666	Y=480
QBOT atmospheric specific humidity [kg/kg]		
WIND atmospheric wind velocity magnitude [m/s]		
FSDS atmospheric incident solar radiation [watt/m <sup>2</sup> ]		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2: Modelos Globales**

Centro	Acrónimo del Centro	Modelo	ESCENARIO	RESOLUCION (°)
Instituto Meteorológico de Alemania Max-Planck	<b>MPI-M</b>	<b>ECHAM5-OM</b>	<b>A1B</b>	<b>1.9x1.9, L31</b>
Centro Nacional de Investigación Atmosférica (Estados Unidos)	<b>NCAR</b>	<b>CCSM3</b> Community Climate System Model 3	<b>A1B</b>	<b>1.4x1.4, L26</b>
Oficina Meteorológica del Reyno Unido	<b>UKMO</b>	<b>HadCM3</b>	<b>A1B</b>	<b>2.5x3.75, L19</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3: Modelo Global de Alta Resolución**

Centro	Acrónimo del Centro	Modelo	ESCENARIO	RESOLUCION
Instituto de Investigación y Agencia Meteorológica de Japón	<b>MRI/JMA</b>	<b>TL959L60</b>	<b>A1B</b>	<b>20 Km, L60</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4: Modelo Regional simulado en SENAMHI**

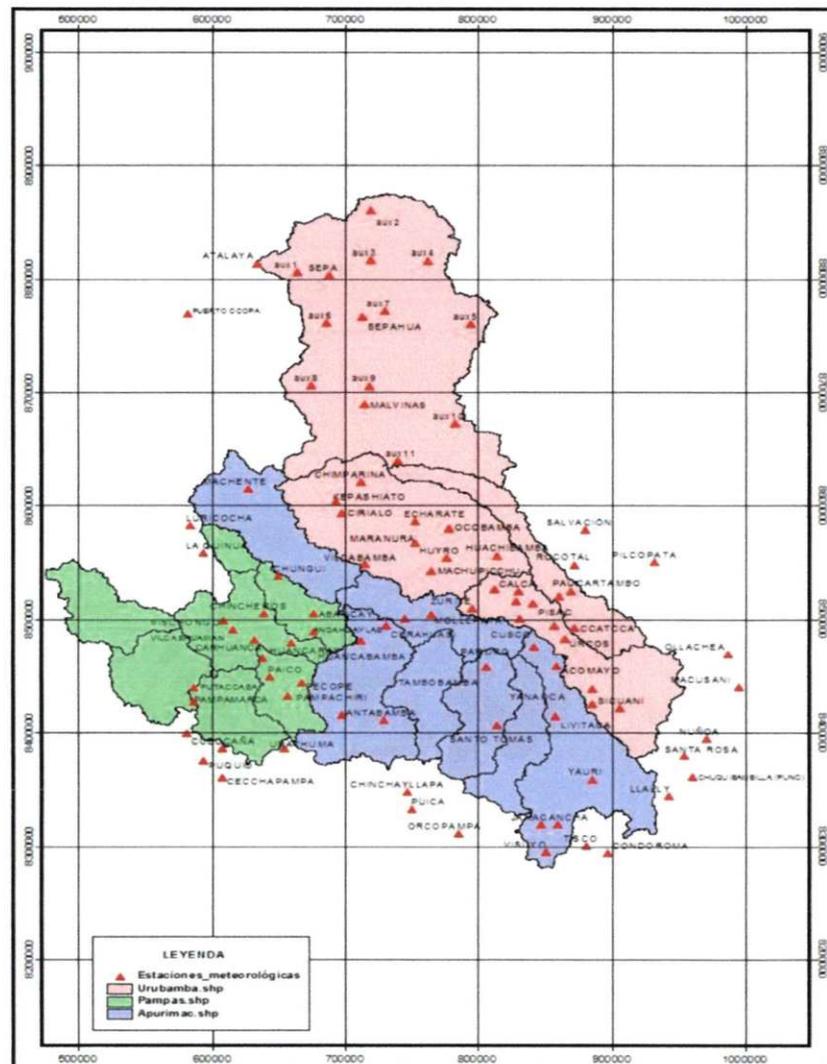
Centro	Acrónimo del Centro	Modelo	ESCENARIO	RESOLUCION
National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)	<b>NCAR</b>	<b>WRF3.2</b> Weather Research and Forecast	<b>A1B</b>	<b>20 Km, L18</b>

Fuente: Elaboración propia

### III. INFORMACIÓN UTILIZADA

#### 3.1 Información climática

- Series mensuales de precipitación del periodo 1970-2008. (Ver Mapa de ubicación de estaciones en la **Figura 2**).
- Series mensuales de la Temperatura máxima y mínima del periodo 1970-2008
- Series mensuales de precipitación de los modelos de downscaling dinámico MRI y ECHAM5 para el horizonte 2015-2044 y NCAR para el horizonte 2030-39, a puntos de estación y de centroides de catchmen. En ambos casos el escenario climático es el A1B.
- Series mensuales de precipitación de los modelos de downscaling estadístico NCAR, NHADCM3 y NMPEH5, a punto de estación, para el horizonte 2012-2059, escenario A1B.
- Series mensuales de temperatura máxima y mínima de los modelos de downscaling MRI y ECHAM5 para el horizonte 2015-2044 a puntos de estación y de centroides de catchment. En ambos casos el escenario climático es el A1B.
- Climatología de precipitación y temperatura de la base de datos global del Worldclim en estaciones auxiliares. <http://www.worldclim.org/>



**Figura 2.** Red de estaciones utilizadas y límites de las subcuencas  
Fuente: Elaboración propia

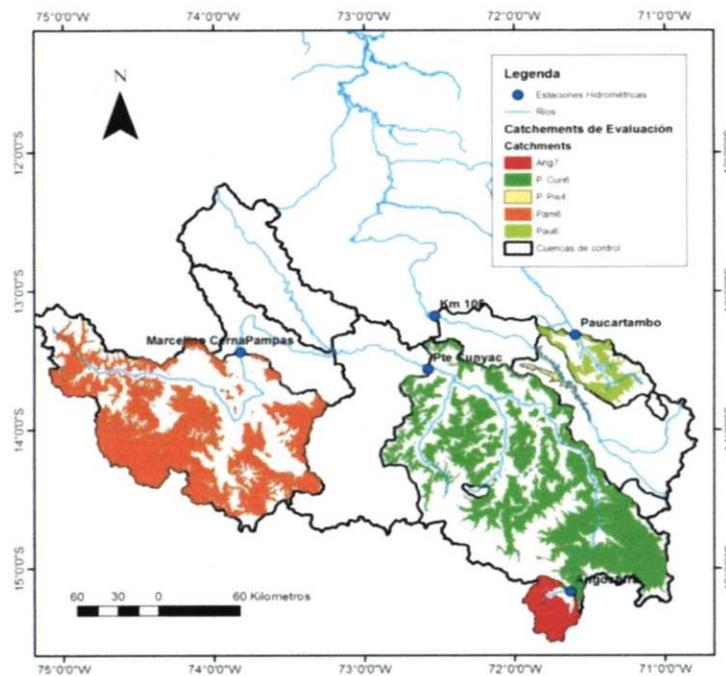
#### IV. ASPECTOS METODOLÓGICOS

##### 4.1 Modelización con modelo WEAP

La metodología utilizada para la simulación de la oferta hídrica futura se fundamenta en lo siguiente:

El modelo hidrológico WEAP fue calibrado y validado con información histórica en los puntos de control hidrológico de las estaciones de Pte.

Pampas (cuena Pampas), Puente Cunyac (cuena Apurímac), Km-105 (cuena Vilcanota-Urubamba) y Puente Paucartambo (cuena Paucartambo). Los resultados de la calibración y validación fueron reportados en el informe correspondiente. En la **Figura 3** se ilustra la ubicación de los puntos de control hidrológico utilizados en la modelización de los caudales medios mensuales.



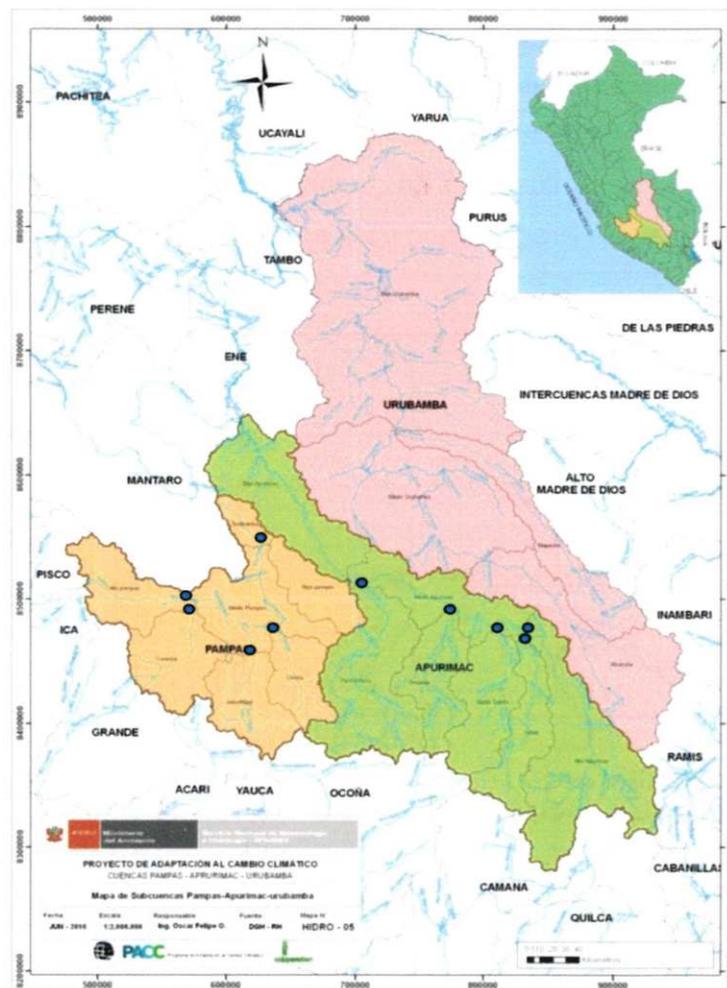
**Figura 3.** Mapa de ubicación de los catchment usados como referencia para el análisis de la precipitación y puntos hidrológicos de control.

Fuente: Elaboración propia

Para la simulación de los caudales medios mensuales se ingresó la información climática mensual de precipitación y temperatura generados por los modelos de downscaling a nivel de cachetment para el horizonte temporal 2030-39. Los modelos utilizados fueron ECHAM5, NCAR y MRI, cuya información de downscaling fue procesada por la Dirección de Meteorología del SENAMHI. La climatología de referencia para cada modelo corresponde ECHAM5 (1971-2000), NCAR (1990-1999) y MRI (1979-2003). Las simulaciones de caudal se hacen para cada modelo climático.

#### 4.2 Modelización de subcuencas con modelo GR2m

Se utilizó el modelo GR2m para hacer las simulaciones de la disponibilidad hídrica futura a diferentes niveles de persistencia para el periodo 2016-2044 en las principales subcuencas de Pampas y Apurímac. Los datos de entrada fueron las variables de precipitación y temperatura mensual del periodo 2016-2044 correspondientes al modelo ECHAM5 para el escenario A1B. En la **Figura 4** se ilustra la ubicación de los puntos donde se generaron los caudales históricos y a futuro.

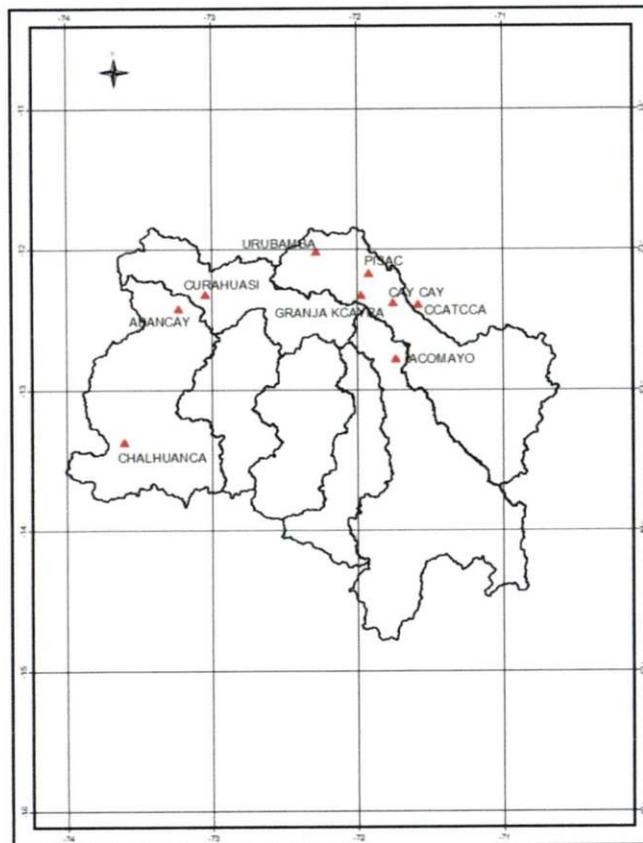


**Figura 4.** Ubicación de los puntos en subcuencas donde se realizó la simulación de los caudales.

Fuente: Elaboración propia

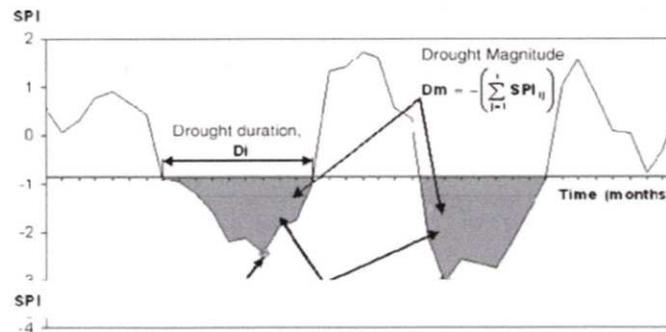
### 4.3 Simulación de sequías bajo escenarios de Cambio Climático

A fin de identificar eventos de sequía en las series de precipitación mensual proyectadas por los modelos climáticos utilizados para las cuencas de estudio, se ha realizado simulaciones de la sequía aplicado a 9 estaciones donde se dispone de series de precipitación mensual para el horizonte 2012-2059 obtenidos por downscaling estadístico de los escenarios de precipitación (A1B) de los modelos NCAR, NHADCM3 y NMPEH5. Las sequías son identificadas regionalmente mediante la metodología del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), haciendo uso del programa REDIM, el cual determina la duración promedio de la sequía, los valores extremos del SPI a diferentes escalas temporales y el porcentaje de área afectada por sequía, conocida el área de influencia de las estaciones de precipitación. En la **Figura 5** se ilustra la ubicación de las estaciones donde se dispone de escenarios de Precipitación para el horizonte 2012-2059.



**Figura 5.** Ubicación de estaciones para el análisis se sequías del horizonte 2012-2059.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.** Propiedades de la sequía basado en el SPI

Fuente: <http://www.uhu.es/apmn/pdfs/WRM2011.pdf>

Un análisis complementario, implementado en Excel ha permitido encontrar los tiempos de retorno de sequías asociados a diferentes niveles de magnitud o severidad.

La relación entre la severidad, Duración y Tiempo de retorno de la sequía viene definida por la ecuación propuesta por Loukas y Valisiades (2008):

$$\sum \text{SPI} = \lambda T^k (D)^{1-\eta}$$

Donde

$\sum \text{SPI}$  = Es la severidad acumulada anual de los meses de sequía.

T: tiempo de retorno

D: escala de tiempo del SPI

$\lambda$ , K y  $\eta$ : son los parámetros ajustados por curvas empíricas

#### 4.4 Mapas climáticos

Se elaboraron los mapas temáticos anuales de las variables de Precipitación, Temperatura máxima, mínima y media, Evapotranspiración Real y Escorrentía. En cada caso son presentados los mapas de la climatología de referencia (1970-2008) y los horizontes 2016-2044; así mismo se incluye los mapas de anomalías para cada variable, en el caso de

la Temperatura, se considera anomalía absoluta ( $^{\circ}\text{C}$ ) y para las otras variables anomalías relativas (%) en relación a la climatología de referencia.

Los mapas de temperatura son interpolados mediante modelos de regresión múltiple que incluyen el DEM de la cuenca.

Para la estimación de la Evapotranspiración Real (ETR), conocida también como déficit de escurrimiento (D), se ha aplicado el método de Turc, el cual utiliza como variables de entrada la temperatura media anual y la precipitación acumulada anual, en la estimación de la evapotranspiración real acumulada anual

La ecuación de Turc para la estimación del déficit de escurrimiento anual, es de la forma:

$$D = P \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)}} \quad L = 300 + 25 \left(\frac{P}{T}\right) + 0.05(T)^3$$

Dónde:

P = Precipitación anual

L = Coeficiente de Temperatura

T = Temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ )

D = déficit de escurrimiento anual (mm)

Los mapas de escorrentía superficial se obtienen por la ecuación del balance hídrico simplificado de largo plazo.

$$\text{Escorrentia} = \text{PP} - \text{ETR}$$

## V. RESULTADOS

### 5.1 Análisis de la Precipitación proyectada por los modelos de downscaling

La precipitación es considerada como la variable más importante dentro de los estudios hidrológicos, los tres modelos generaron datos para toda la zona de estudio pero usando diferentes climatologías de referencia ECHAM5 (1971-2000), NCAR (1990-1999) y MRI (1979-2003). Realizar un análisis de todo estos puntos sería un trabajo tedioso e innecesario. En su remplazo se analizó la precipitación de un área representativa de cada cuenca (en base a un punto de control hidrológico), tomando como áreas los catchements.

En la **Tabla 5** se ve la relación de catchements comparados y sobre la **Figura 2** se puede ver el mapa de ubicación de los diferentes catchements de referencia y los puntos de control hidrológicos utilizados.

**Tabla 5. Catchements de referencia para el análisis de los datos de precipitación**

Cuenca	Pto de control hidrológico	Catchement	Altura Mínima (m)	Altura Máxima (m)
Angostura	Angostura	Ang7	4400	6200
Apurímac	Puente Cunyac	P. Cuba7	4400	6200
Pampas	Pampas (Marcelino Cerna)	Pam6	3900	4400
Urubamba	Km 105	P. Pis4	2600	3300
Paucartambo	Paucartambo	Pau6	3900	4400

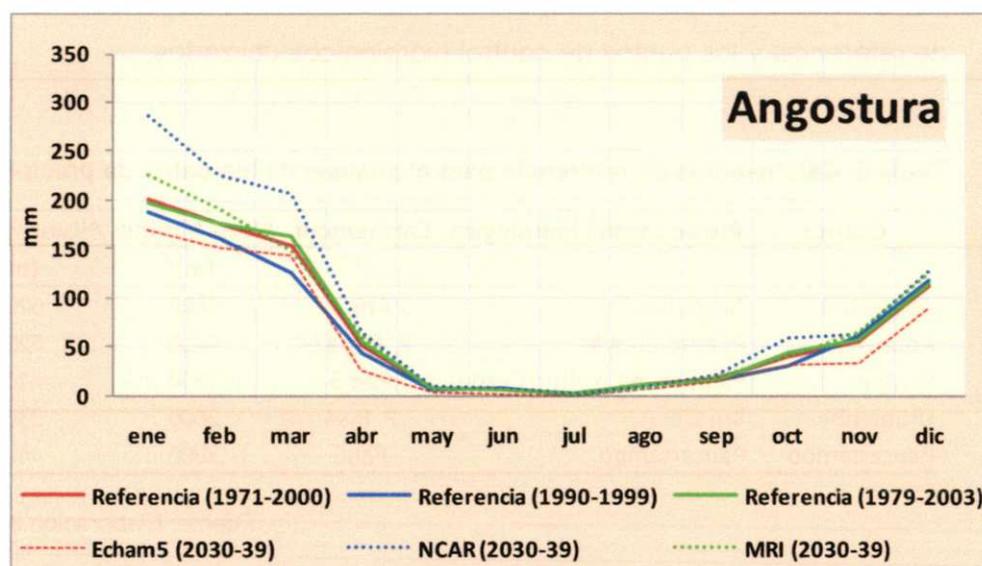
Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 6** se muestran los datos de la precipitación de referencia y los del escenario 2030-39 para la cuenca de Angostura y sobre la **Figura 7** se muestran estos datos de manera gráfica.

De esta tabla y figura se observa que el modelo NCAR es el que genera más precipitación en relación a su climatología observada, el modelo ECHAM5 muestra que la precipitación disminuye respecto a su periodo de referencia y el MRI es el que tiene la menor diferencia respecto a su climatología.

**Tabla 6. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Angostura).**

Angostura (mm)						
Mes	Referencia (1971-00)	Echam5 (2030-39)	Referencia (1990-99)	NCAR (2030-39)	Referencia (1979-03)	MRI (2030-39)
ene	187.66	169.9	187.7	285.9	197.1	224.9
feb	160.44	149.9	160.4	226.0	176.7	191.3
mar	124.51	142.1	124.5	206.0	162.7	148.0
abr	43.67	26.1	43.7	64.7	54.8	60.3
may	5.79	3.7	5.8	9.7	7.4	5.4
jun	7.7	1.5	7.7	7.5	5.6	5.9
jul	0.34	0.1	0.3	1.3	2.2	0.8
ago	11.98	6.4	12.0	10.0	10.7	8.3
sep	14.74	13.6	14.7	21.3	16.1	19.0
oct	30.56	30.9	30.6	59.3	44.2	40.5
nov	61.03	33.7	61.0	62.3	57.4	65.3
dic	117.97	90.8	118.0	127.1	114.0	124.6



**Figura 7. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Angostura).**

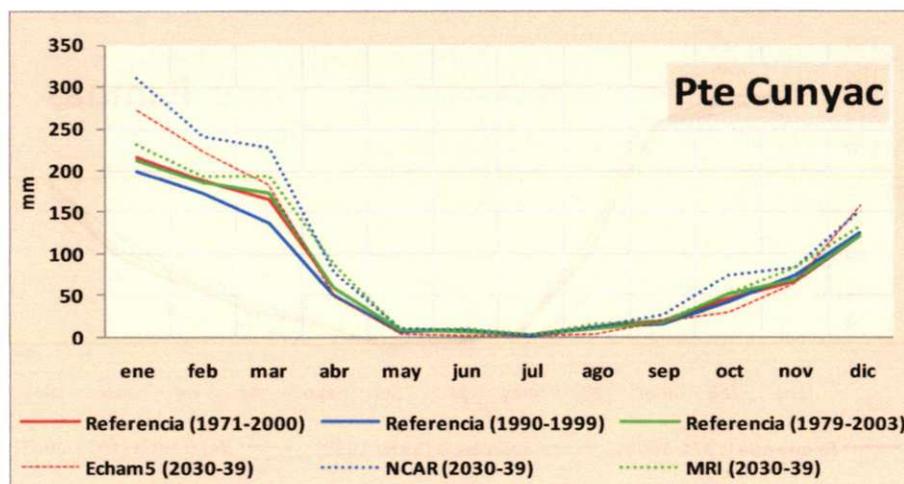
Fuente: Elaboración propia

Para la cuenca del río Apurímac (Pte cunyac), se presenta sobre la **Tabla 7** y **Figura 8** la comparación de los datos climáticos respecto a los del escenario (2030-39) para cada modelo, de esta Tabla y Figura se observa que el modelo de NCAR es el que genera más precipitación respecto a su climatología seguido por el Echam5 y posteriormente el MRI. Casi en general los modelos muestran un aumento de la precipitación durante los

meses húmedos y en algunos casos (NCAR) presenta menores precipitaciones durante los meses secos.

**Tabla 7. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Apurímac (Pte Cunyac).**

Pte Cunyac (mm)						
Mes	Referencia (1971-00)	Echam5 (2030-39)	Referencia (1990-99)	NCAR (2030-39)	Referencia (1979-03)	MRI (2030-39)
ene	215.4	271.4	200.0	311.2	212.3	231.7
feb	187.7	223.0	171.7	240.8	186.6	192.6
mar	164.9	183.2	136.1	227.6	172.1	193.0
abr	58.8	48.0	49.1	78.8	58.9	87.5
may	7.8	4.2	5.7	10.0	7.6	9.0
jun	5.7	0.8	7.8	8.0	6.1	9.3
jul	2.5	1.2	0.9	2.4	3.2	2.8
ago	11.6	2.7	11.6	11.1	10.7	16.4
sep	19.2	18.5	15.9	26.9	17.6	19.0
oct	45.5	30.5	42.2	73.4	51.0	51.1
nov	66.7	63.1	73.9	84.0	67.9	83.8
dic	122.2	158.6	126.2	151.6	121.9	132.0



**Figura 8. Comparación grafica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.**

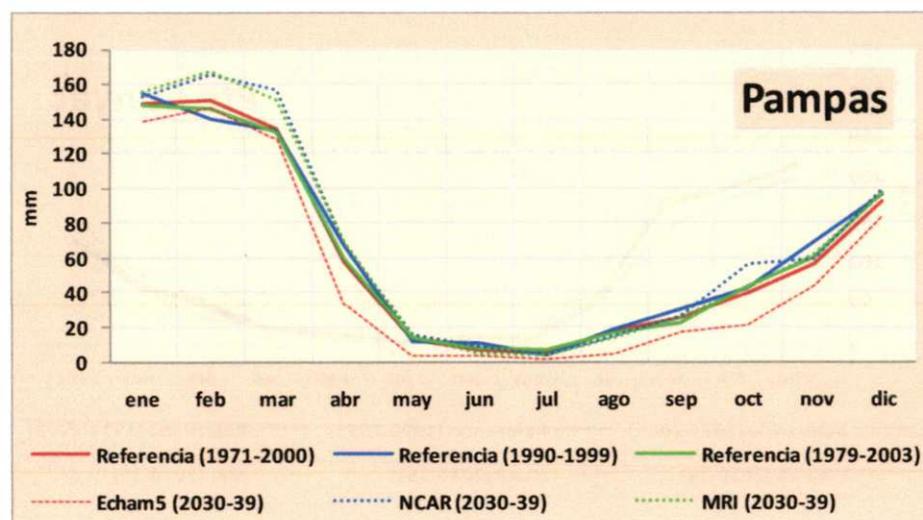
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la cuenca del río Pampas, la **Tabla 8** y **Figura 9** muestran la comparación de los datos pluviométricos del horizonte respecto al periodo de climatología de cada modelo, para este caso el modelo Echam5 muestra una disminución general de la precipitación, el NCAR presenta un aumento de la precipitación durante casi todos los meses (excepto enero, junio y setiembre)

y por último el MRI muestra un aumento de la precipitación excepto durante los meses del periodo seco.

**Tabla 8. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Pampas.**

Pampas (mm)						
Mes	Referencia (1971-00)	Echam5 (2030-39)	Referencia (1990-99)	NCAR (2030-39)	Referencia (1979-03)	MRI (2030-39)
ene	149.3	139.1	154.3	153.2	148.2	155.3
feb	150.4	146.7	140.5	165.8	146.2	167.8
mar	133.9	128.0	133.5	156.8	132.5	151.1
abr	57.6	34.1	67.4	68.4	59.9	68.9
may	13.1	3.9	11.9	15.8	13.4	14.6
jun	7.1	3.9	10.5	8.6	7.7	5.0
jul	5.0	2.0	3.6	4.3	6.8	3.6
ago	17.1	4.6	18.7	14.6	16.9	13.4
sep	25.7	16.7	29.9	26.6	22.9	25.8
oct	39.6	21.4	43.3	56.4	43.5	42.6
nov	56.8	44.8	68.8	59.3	60.4	62.2
dic	92.4	83.4	96.0	99.4	97.0	96.6



**Figura 9. Comparación gráfica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Pampas.**

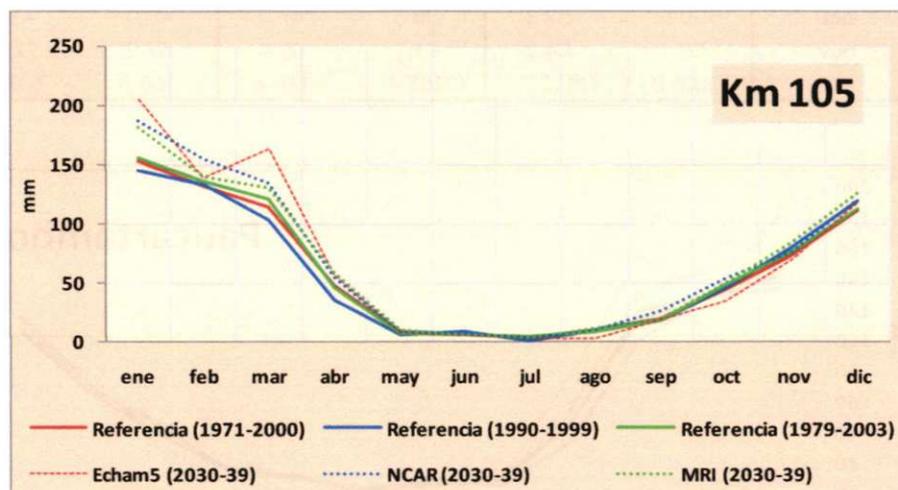
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Urubamba (Km 105), la comparación de los datos pluviométricos con los datos del escenario del modelo son presentados en la **Tabla 9** y **Figura 10**. El modelo ECHAM5 muestra un aumento de las precipitaciones solamente para la primera parte del año, muestra un aumento de la precipitación en casi todo el año con excepción de junio y

noviembre; por último el modelo MRI muestra un aumento de la precipitación en todo el año excepto el mes de junio.

**Tabla 9. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca de Apurímac (Km 105).**

Km 105 (mm)						
Mes	Referencia (1971-00)	Echam5 (2030-39)	Referencia (1990-99)	NCAR (2030-39)	Referencia (1979-03)	MRI (2030-39)
ene	153.1	205.5	144.6	186.7	155.9	182.0
feb	131.4	139.6	133.4	155.0	134.9	139.2
mar	114.0	163.2	103.0	134.7	120.1	130.7
abr	47.5	57.5	36.2	54.8	45.7	58.2
may	8.4	7.8	5.9	8.6	7.8	9.4
jun	5.6	5.1	8.5	7.8	6.0	6.4
jul	3.1	1.9	1.0	3.1	4.3	3.0
ago	9.6	2.1	9.7	9.9	9.2	11.4
sep	19.2	18.9	18.6	25.9	18.1	19.8
oct	44.5	35.2	45.8	54.2	49.6	50.4
nov	73.1	69.4	80.5	75.6	75.8	84.4
dic	111.4	116.7	119.9	120.7	113.0	126.6



**Figura 10.** Comparación grafica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Urubamba (Km 105).

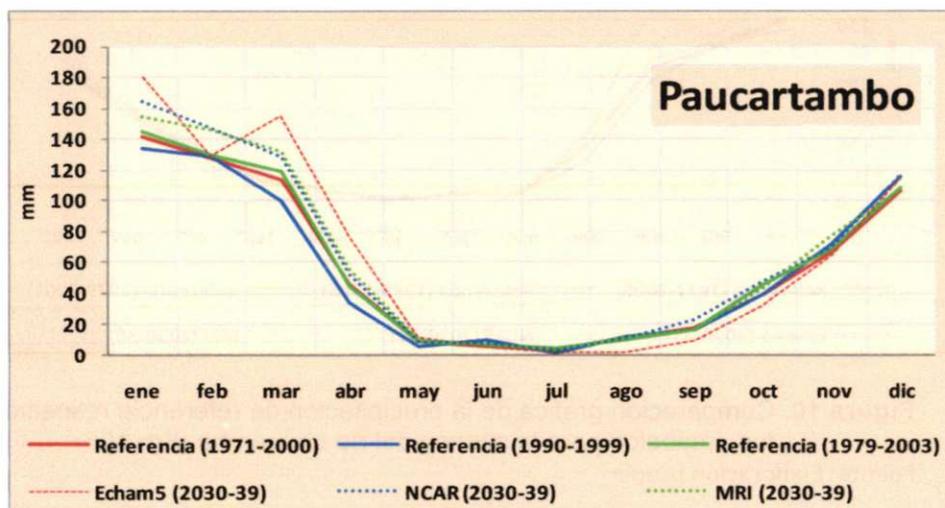
Fuente: Elaboración propia

En el caso de la cuenca de Paucartambo, sobre la **Tabla 7** y **Figura 11** muestran la comparación entre los datos pluviométricos de los diferentes modelos climáticos y periodo de referencia de su climatología, El modelo ECHAM5 muestra un aumento de la precipitación los primeros 5 meses del año para posteriormente mostrar una disminución (excepto diciembre), el

modelo NCAR muestra un aumento de la precipitación en casi todo los meses (excepto junio, agosto, setiembre y noviembre) y por último el modelo MRI muestra también un ligero aumento de la precipitación en todos los meses excepto julio y octubre que disminuye ligeramente.

**Tabla 10. Comparación de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.**

paucartambo (mm)						
Mes	Referencia (1971-00)	Echam5 (2030-39)	Referencia (1990-99)	NCAR (2030-39)	Referencia (1979-03)	MRI (2030-39)
ene	141.8	180.4	134.3	164.3	144.6	155.1
feb	127.3	129.3	128.3	146.7	129.4	145.9
mar	113.6	154.8	99.3	128.6	118.8	132.2
abr	45.9	74.9	33.2	51.7	44.8	55.4
may	8.7	11.1	5.3	9.2	8.5	9.3
jun	5.7	5.1	10.3	7.9	6.4	6.6
jul	3.3	1.9	0.9	3.5	4.6	2.9
ago	10.4	1.5	11.7	10.7	10.2	12.3
sep	17.7	9.4	16.2	22.9	16.4	16.6
oct	39.5	32.3	39.5	47.9	46.0	43.0
nov	66.1	64.2	71.1	69.6	67.9	77.3
dic	106.0	113.7	115.4	116.8	108.0	107.0



**Figura 11. Comparación grafica de la precipitación de referencia respecto a los modelos para la cuenca del río Paucartambo.**

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Análisis de la Temperatura proyectada por los modelos de downscaling

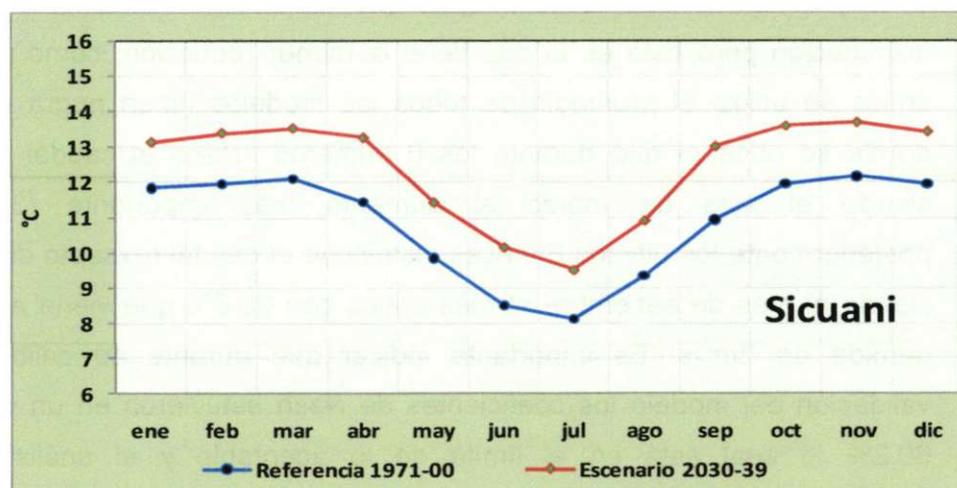
La temperatura es importante dentro del cálculo de la evapotranspiración, sobre la **Tabla 11** se ve la salida para el escenario 2030-39 además del periodo de referencia (1971-2000), esta variable fue generada solamente con el uso del modelo ECHAM5 y fue utilizada como dato único para la simulación hidrológica; y sobre la **Tabla 12** se ve la variación en grados centígrados. El periodo de referencia corresponde a los datos tomados de la estación de Sicuani, la cual fue utilizado como referente de la zona de estudio (gradiente 0.6 °C/100 metros) durante la formulación del modelo hidrológico (WEAP-Reporte 7).

**Tabla 11. Datos de Temperatura del Periodo de referencia y el horizonte 2030-39 del modelo ECHAM 5.**

	Temperatura °C												
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Promedio
Referencia 1971-00	11.8	12.0	12.1	11.4	9.8	8.5	8.1	9.3	10.9	12.0	12.2	11.9	10.8
Escenario 2030-39	13.1	13.4	13.5	13.3	11.4	10.2	9.5	10.9	13.0	13.6	13.7	13.4	12.4

**Tabla 12. Variación de la temperatura del horizonte 2030-39 del modelo ECHAM 5 respecto al periodo de referencia.**

Δ (Escenario-referencia)	Temperatura °C												
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Promedio
	1.3	1.4	1.4	1.8	1.6	1.7	1.4	1.6	2.1	1.6	1.5	1.5	1.6



**Figura 12.** Comparación grafica de los datos de referencia de la temperatura (1971-2000) en la estación de Sicuani y los datos del horizonte 2030-39 del modelo ECHAM5.

Fuente: Elaboración propia

De las **Tablas 11 y 12** se observa que los datos de temperatura sufren un incremento de 1.6°C para el escenario 2030-39. Los meses del periodo seco presentan las variaciones más importantes a nivel anual siendo 1.7 °C en junio para el segundo escenario (a pesar que abril tiene 1.8 °C).

En la **Figura 12** se puede ver de manera gráfica la comparación entre el periodo de referencia (estación Sicuani) respecto al escenarios 2030-39.

### **5.3 Oferta Hídrica para el horizonte 2030-39 (Modelo WEAP)**

La disponibilidad hídrica es presentada para el horizonte 2030-2039, el periodo de referencia considera los años 1981-2000, en algunos casos no se tienen datos completos de los puntos de análisis, pero se tomó como referencia los datos utilizados para la calibración y validación del modelo (Suarez, 2011; reporte 07).

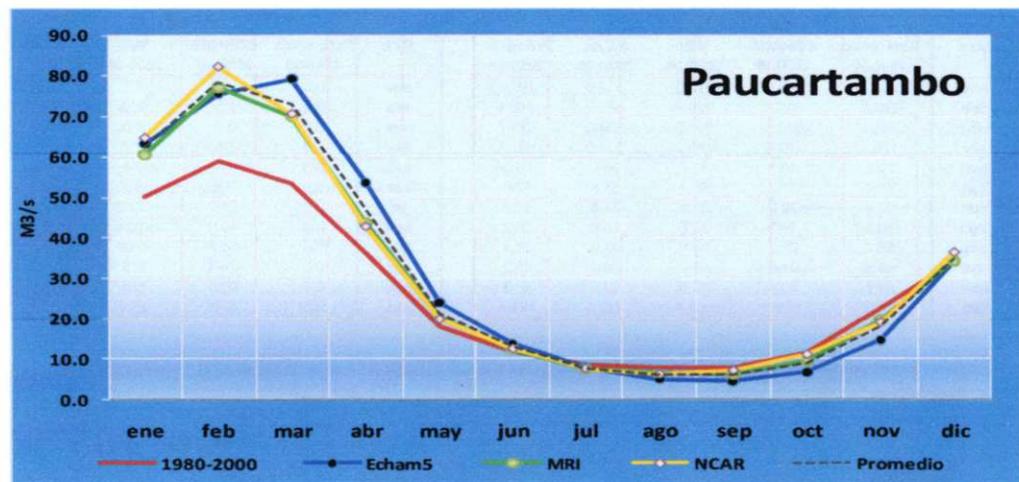
Para el caso del río Paucartambo sobre la **Tabla 13** se presentan los caudales esperados y la comparación porcentual de esta respecto al periodo de referencia; y sobre la **Figura 13** se muestra las salidas graficas de estas comparaciones.

De estas tablas y figuras se observa que el modelo más optimista es el NCAR que es el que presenta los mejores caudales durante el periodo de lluvia y en los meses secos al igual que los otros modelos presenta una disminución pero esta es la que tiene la menor reducción, como punto de crítica se utiliza el promedio de todos los modelos (línea negra cortada), donde se observa que durante los 6 primeros meses el caudal aumenta siendo el mes de marzo el aumento más importante (37.5 %), posteriormente los últimos 6 meses disminuye el caudal (excepto diciembre) siendo el mes de setiembre el más crítico con 25.6% que viene a ser una pérdida de 2m<sup>3</sup>/s. Es importante indicar que durante de calibración y validación del modelo los coeficientes de Nash estuvieron en un orden de 60.2% lo cual está en el límite de lo aceptable y el análisis de la estacionalidad mostro que el modelo tiende a sobre estimar de manera ligera los caudales (ver reporte 07 de Suarez 2011), esto podría explicarse debido a que el modelo utiliza los parámetros de calibración de Km 105 además que

la serie observada presenta serias dudas sobre su calidad.

**Tabla 13. Caudales Simulados para la cuenca del río Paucartambo en el punto de control "Paucartambo" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Paucartambo (m <sup>3</sup> /s)						Paucartambo (Δ%)					
Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39	Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	50.1	63.3	60.5	64.7	62.9	ene	0.0	26.4	20.9	29.3	25.5
feb	58.8	75.7	77.1	82.1	78.3	feb	0.0	28.7	31.0	39.6	33.1
mar	53.3	79.3	70.0	70.6	73.3	mar	0.0	48.7	31.3	32.5	37.5
abr	36.3	53.7	43.7	42.7	46.7	abr	0.0	47.8	20.4	17.6	28.6
may	17.8	23.9	20.1	19.8	21.3	may	0.0	34.0	12.7	11.0	19.2
jun	11.9	13.6	12.2	12.4	12.8	jun	0.0	14.3	2.6	4.4	7.1
jul	8.6	7.9	7.5	7.7	7.7	jul	0.0	-7.6	-12.7	-10.7	-10.3
ago	7.8	5.1	6.4	6.3	5.9	ago	0.0	-35.2	-18.3	-19.5	-24.3
sep	8.0	4.5	6.2	7.1	6.0	sep	0.0	-43.7	-22.3	-11.0	-25.6
oct	11.5	6.7	9.4	11.1	9.1	oct	0.0	-41.3	-18.4	-3.6	-21.1
nov	22.6	14.6	19.7	19.0	17.8	nov	0.0	-35.3	-12.6	-15.8	-21.2
dic	34.0	34.0	34.3	36.3	34.9	dic	0.0	-0.1	0.8	6.8	2.5



**Figura 13.** Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Paucartambo en el punto de control "Paucartambo" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del río Urubamba (Km 105) sobre la **Tabla 14** y **Figura 14** se muestran las salidas de los tres escenarios además de la variación porcentual respecto al periodo de referencia. De la **Tabla 14** se observa que todos los modelos presentan un aumento de los caudales para el periodo de lluvias, posteriormente para el periodo seco y lo que resta del año tienen diferentes comportamientos los modelos. El modelo ECHAM5 presenta una disminución en todos los meses excepto diciembre, el modelo MRI durante los últimos tres meses aumenta el caudal respecto al periodo de referencia, en el caso del NCAR también los últimos tres meses aumenta su caudal, este último modelo es el que representa el modelo más optimista en

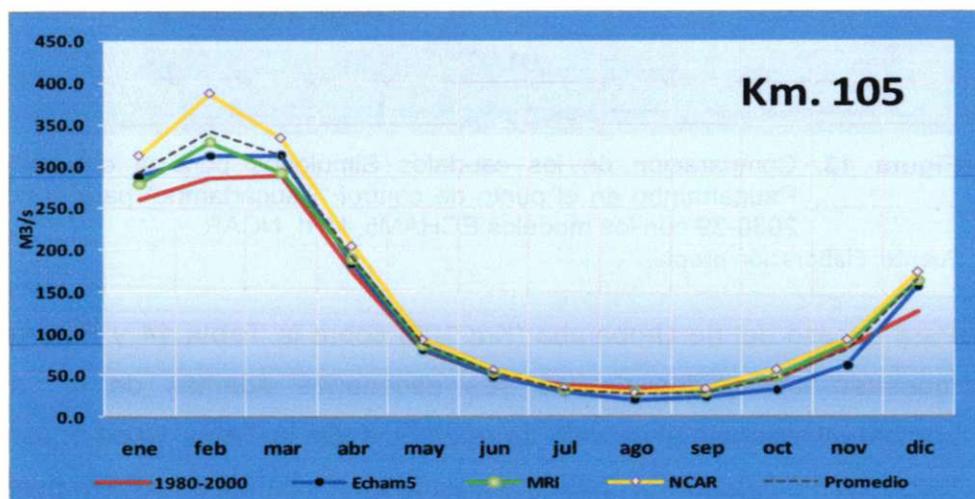
términos de recursos hídricos. Respecto al análisis del promedio de los modelos se observa que la primera mitad del año los caudales aumentan donde el mes de febrero con un 20.6% es el mayor, para la segunda mitad del año julio, agosto, setiembre y noviembre están por debajo del valor de referencia siendo agosto el más importante con una disminución de 22.8% que vienen a ser una pérdida de 7.6 m<sup>3</sup>/s, el mes de diciembre tiene un aumento de caudal que en términos de porcentaje es el mayor con un 30.5% que viene a ser 38.2 de caudal.

**Tabla 14. Caudales Simulados para la cuenca del río Urubamba en el punto de control "Km 105" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Mes	Km 105 (m <sup>3</sup> /s)				
	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	259.5	288.0	277.9	312.6	292.9
feb	284.5	312.8	329.4	387.2	343.1
mar	288.1	313.0	291.0	334.0	312.7
abr	173.1	182.8	188.2	204.0	191.7
may	79.0	80.1	85.7	93.0	86.3
jun	48.4	47.7	52.4	55.8	52.0
jul	37.4	29.5	32.3	34.4	32.1
ago	33.6	19.9	29.5	28.6	26.0
sep	33.7	23.2	28.8	33.2	28.4
oct	44.8	31.6	47.7	56.4	45.2
nov	82.7	60.7	87.6	92.6	80.3
dic	125.2	155.6	162.1	172.5	163.4

Mes	Km 105 (Δ%)				
	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	0.0	11.0	7.1	20.5	12.9
feb	0.0	9.9	15.8	36.1	20.6
mar	0.0	8.7	1.0	15.9	8.5
abr	0.0	5.6	8.7	17.9	10.7
may	0.0	1.3	8.4	17.6	9.1
jun	0.0	-1.6	8.2	15.2	7.3
jul	0.0	-21.2	-13.6	-7.9	-14.3
ago	0.0	-40.9	-12.4	-15.0	-22.8
sep	0.0	-31.3	-14.6	-1.6	-15.8
oct	0.0	-29.5	6.5	25.8	0.9
nov	0.0	-26.6	5.9	12.0	-2.9
dic	0.0	24.2	29.4	37.8	30.5



**Figura 14. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Urubamba en el punto de control "Km 105" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Angostura (naciente del río Apurímac), sobre la **Tabla 15** y **Figura 15** se muestran las salidas de los tres modelos y su variación

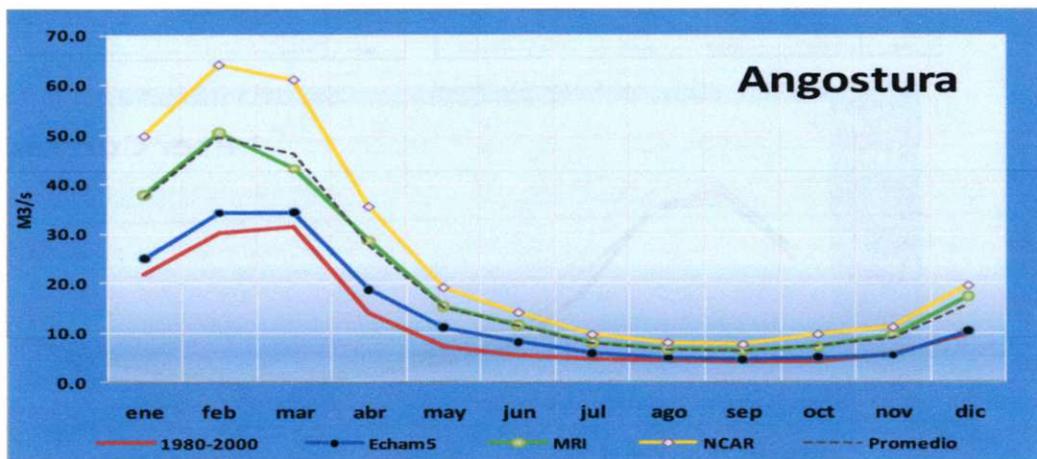
porcentual respecto a su periodo de referencia, En este caso el modelo de NCAR sobre estima de manera significativa los caudales siendo el mes de mayo el aumento más importante con un 166% que en términos de caudal representa  $11.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , el modelo de MRI se encuentra próximo al promedio de todos los modelos, pero respecto al valor de referencia muestra un aumento de su caudal para todos los meses, siendo el más importante el mes de mayo con 111.9% que viene a ser un aumento de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ , respecto al modelo del ECHAM5 presenta también un aumento en casi todos los meses pero es el menos importante (noviembre se muestra disminución de sus caudales en 5.2%). El promedio de todos los modelos muestra un aumento de todos los meses del caudal siendo como en los modelos anteriores el mes de mayo el que tiene el aumento más importante.

**Tabla 15. Caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Angostura" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Mes	Angostura ( $\text{m}^3/\text{s}$ )				
	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	21.8	24.9	37.8	49.8	37.5
feb	30.2	34.2	50.4	64.1	49.6
mar	31.6	34.3	43.3	61.1	46.2
abr	14.1	18.7	28.6	35.5	27.6
may	7.2	11.0	15.2	19.1	15.1
jun	5.4	8.1	11.5	14.1	11.2
jul	4.5	5.8	8.0	9.6	7.8
ago	4.3	4.9	6.6	8.0	6.5
sep	4.2	4.5	6.3	7.6	6.1
oct	4.1	4.9	7.0	9.7	7.2
nov	5.7	5.4	9.5	11.1	8.7
dic	9.7	10.2	17.2	19.5	15.7

Mes	Angostura ( $\Delta\%$ )				
	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	0.0	14.4	73.3	128.9	72.2
feb	0.0	13.3	67.0	112.4	64.3
mar	0.0	8.8	37.1	93.8	46.6
abr	0.0	32.8	103.0	152.6	96.1
may	0.0	52.7	111.9	166.0	110.2
jun	0.0	49.1	111.3	158.7	106.4
jul	0.0	28.4	76.5	113.1	72.7
ago	0.0	14.3	54.9	86.3	51.9
sep	0.0	8.8	52.1	82.1	47.6
oct	0.0	20.8	71.8	136.8	76.5
nov	0.0	-5.4	68.4	96.2	53.1
dic	0.0	5.4	77.4	101.0	61.3



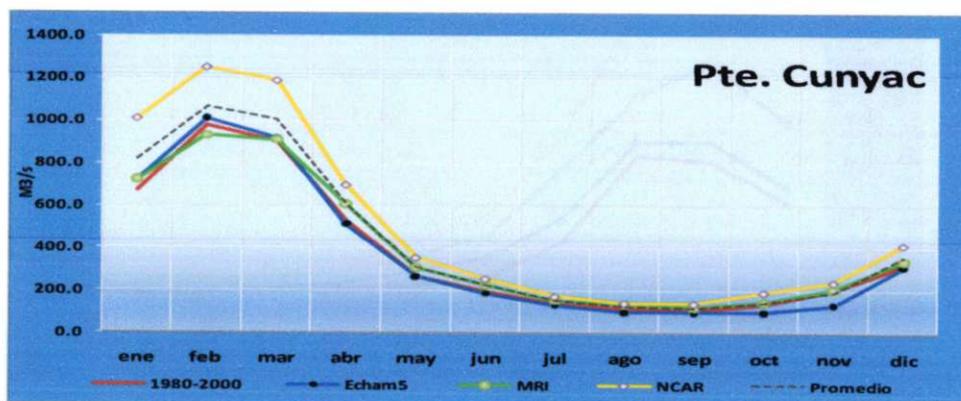
**Figura 15. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Angostura" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de Pte Cunyac (parte media del río Apurímac), sobre la **Tabla 16** y **Figura 16** se presentan los resultados de los tres modelos y u variación porcentual respecto al periodo de referencia. Se puede observar que el modelo ECHAM5 muestra un aumento de los caudales durante los primeros 3 meses del año para posteriormente presentar disminuciones, para el caso del modelo MRI solo el mes de febrero presenta una disminución en los caudales, esta disminución es de 4.6% respecto al periodo de referencia que viene a ser una pérdida de 44.9 m<sup>3</sup>/s; En el caso del modelo NCAR se observa un aumento general de los caudales (mayor de todos los modelos) siendo el más importante en enero con 49.8% que viene a ser 336.4 m<sup>3</sup>/s de más. Respecto al promedio de todos los escenarios, los caudales aumentan todos los meses excepto noviembre que tiene una pérdida de 2.4% que viene a ser 4.8 m<sup>3</sup>/s menos de agua, a pesar que se observa un aumento el análisis de los promedios indica que este aumento se encuentra dentro del 21.2% (enero) y 5.2% (octubre) lo que indica que la variación no es importante.

**Tabla 16. Caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Pte Cunyac" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Pte Cunyac (m <sup>3</sup> /s)						Pte Cunyac (Δ%)					
Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39	Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	675.1	720.9	722.5	1011.5	818.3	ene	0.0	6.8	7.0	49.8	21.2
feb	976.2	1010.2	931.3	1254.7	1065.4	feb	0.0	3.5	-4.6	28.5	9.1
mar	905.6	917.4	910.6	1189.8	1005.9	mar	0.0	1.3	0.6	31.4	11.1
abr	531.0	513.5	608.5	698.7	606.9	abr	0.0	-3.3	14.6	31.6	14.3
may	268.6	265.7	306.2	354.6	308.8	may	0.0	-1.1	14.0	32.0	15.0
jun	196.6	187.4	224.9	256.5	223.0	jun	0.0	-4.7	14.4	30.5	13.4
jul	137.4	130.8	153.3	174.1	152.7	jul	0.0	-4.8	11.5	26.7	11.2
ago	117.9	99.0	135.3	142.8	125.7	ago	0.0	-16.1	14.7	21.1	6.6
sep	106.1	99.9	120.3	140.3	120.2	sep	0.0	-5.8	13.4	32.2	13.2
oct	138.9	100.3	145.2	192.9	146.1	oct	0.0	-27.8	4.5	38.9	5.2
nov	199.2	133.8	207.7	241.6	194.4	nov	0.0	-32.8	4.3	21.3	-2.4
dic	319.7	313.7	342.2	417.8	357.9	dic	0.0	-1.9	7.0	30.7	12.0



**Figura 16.** Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Apurímac en el punto de control "Pte Cunyac" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.

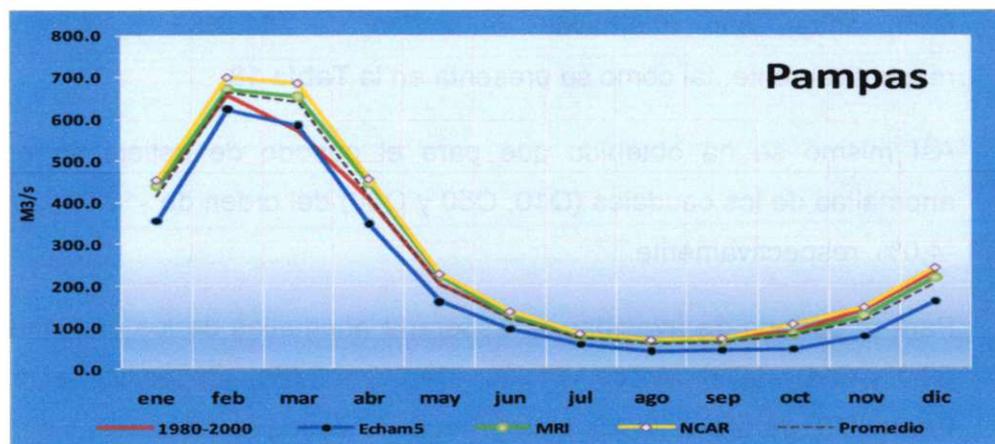
Fuente: Elaboración propia

Para el caso del río Pampas sus resultados son presentados en la **Tabla 17** y **Figura 17**, de estos se observa que no existe mucha diferencia entre los modelos (así sea aumento o disminución de caudal) respecto a la serie de referencia, El modelo muestra una disminución de caudales en todos los meses excepto marzo donde el aumento es de 2.4%, el modelo MRI muestra aumento o descensos en los caudales pero no son importantes en relación a la serie de referencia, el modelo NCAR muestra solo en el mes de agosto una disminución de caudal que viene a ser 1.9% (insignificante) y el máximo aumento de caudal se espera para el mes de marzo con un 20% que viene a ser 114.5 m<sup>3</sup>/s; para el caso de los caudales promedio de todos los modelos se espera que de febrero a mayo aumenten los caudales, pero en el mejor de los casos este aumento será de 12.2 % (marzo), para los otros meses se espera que los caudales bajen siendo agosto la disminución más importante con 16.5% (11;7 m<sup>3</sup>/s).

**Tabla 17. Caudales Simulados para la cuenca del río Pampas en el punto de control "Pampas – Marcelino Cerna" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Pampas (m <sup>3</sup> /s)					
Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	441.1	356.1	439.7	454.6	416.8
feb	657.4	623.7	672.7	700.3	665.6
mar	572.4	586.3	653.5	686.9	642.2
abr	407.2	348.7	445.0	457.2	417.0
may	203.0	161.4	222.0	228.5	204.0
jun	124.0	95.7	128.7	138.3	120.9
jul	77.0	58.7	78.8	85.2	74.2
ago	70.7	42.4	65.1	69.3	59.0
sep	73.5	44.0	67.5	73.6	61.7
oct	89.4	46.4	83.6	108.9	79.7
nov	141.3	78.3	128.4	148.9	118.5
dic	235.4	162.2	219.1	243.6	208.3

Pampas (Δ%)					
Mes	Referencia 1980-00	ECHAM5 2030-39	MRI 2030-39	NCAR 2030-39	Promedio 2030-39
ene	0.0	-19.3	-0.3	3.0	-5.5
feb	0.0	-5.1	2.3	6.5	1.2
mar	0.0	2.4	14.2	20.0	12.2
abr	0.0	-14.4	9.3	12.3	2.4
may	0.0	-20.5	9.4	12.5	0.5
jun	0.0	-22.9	3.8	11.5	-2.5
jul	0.0	-23.7	2.4	10.7	-3.5
ago	0.0	-39.9	-7.8	-1.9	-16.5
sep	0.0	-40.1	-8.2	0.1	-16.1
oct	0.0	-48.0	-6.4	21.8	-10.9
nov	0.0	-44.6	-9.1	5.4	-16.1
dic	0.0	-31.1	-6.9	3.5	-11.5



**Figura 17. Comparación de los caudales Simulados para la cuenca del río Pampas en el punto de control "Pampas – Marcelino Cerna" para el horizonte 2030-39 con los modelos ECHAM5, MRI, NCAR.**

Fuente: Elaboración propia

## 5.4 Disponibilidad Hídrica futura en subcuencas – Modelo GR2M

Para el análisis de los caudales se ha considerado las series mensuales del horizonte 2016-2044 simuladas con el modelo GR2m a nivel de subcuencas, utilizando como variable de entrada las proyecciones de precipitación y temperatura del modelo ECHAM5. Para este modelo de tipo dinámico se tienen escenarios climáticos en un mayor número de estaciones que permite la espacialización de la precipitación a nivel de cuencas; por otro lado las series disponibles para los escenarios de Precipitación tienen una mayor longitud de registro, apropiado para el análisis probabilístico de los caudales simulados hacia el futuro.

Las series de caudal utilizados corresponden a sus valores probabilísticos al 10%, 50% y 90% de persistencia mensual y anual, simbolizados como Q10, Q50 y Q90 respectivamente. Las comparaciones que se establecen entre la disponibilidad futura y la actual son representadas por las anomalías de caudal proyectada hacia el 2016-2044 con respecto a los caudales del periodo de referencia 1970-2008.

### 5.4.1 Cuenca del río Apurímac

#### 5.4.1.1 Subcuenca Alto Apurímac

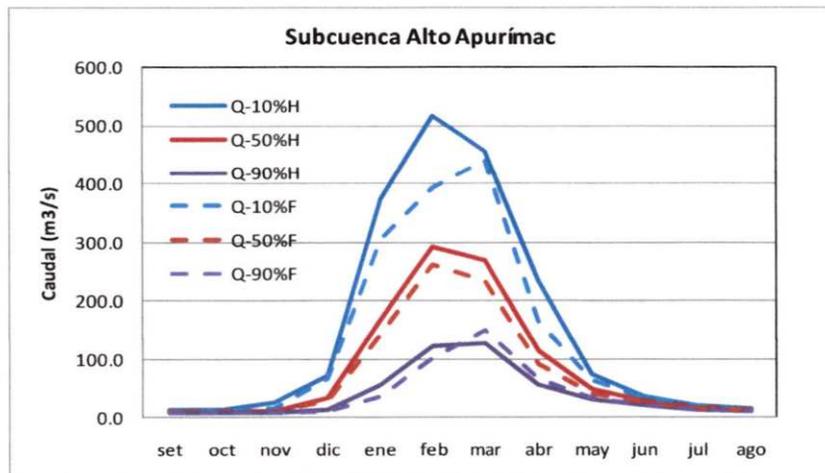
Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -11,0%, -5,0% y -15,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 18**.

Así mismo se ha obtenido que para el periodo de estiaje se esperara anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -12,0%, -11,0% y -4,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -18,0%, -14,0% y 2,0%, respectivamente. En la **Figura 18**, se presenta los hidrogramas de caudales históricos y simulados al futuro.

**Tabla 18: Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Alto Apurímac**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Alto Apurímac - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	13.2	13.4	26.1	69.7	371.3	515.7	456.6	232.9	73.9	36.0	21.1	15.2	139.5
Q_50	10.5	9.4	10.2	32.0	168.3	290.2	269.0	113.0	47.8	27.0	16.9	12.4	81.9
Q-90	8.7	7.4	7.4	11.6	55.1	122.3	126.7	56.9	30.7	20.2	13.7	10.3	53.4
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Alto Apurímac - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	12.1	11.1	14.5	66.4	302.9	391.8	439.6	164.0	62.3	32.6	19.8	14.1	124.3
Q_50	9.6	8.5	9.1	27.5	141.7	260.1	232.1	91.9	41.1	24.4	15.7	11.6	78.2
Q-90	8.7	7.0	6.7	9.2	36.6	101.0	150.5	66.9	32.6	20.7	13.9	10.5	45.5
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-8	-17	-44	-5	-18	-24	-4	-30	-16	-9	-6	-7	-11
Q_50	-8	-10	-10	-14	-16	-10	-14	-19	-14	-10	-7	-7	-5
Q-90	0	-5	-9	-21	-34	-17	19	18	6	2	1	3	-15



**Figura 18.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada). Subcuenca Alto Apurímac.

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.1.2 Subcuenca Veille

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -8,0%, -9,0% y -2,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 19**.

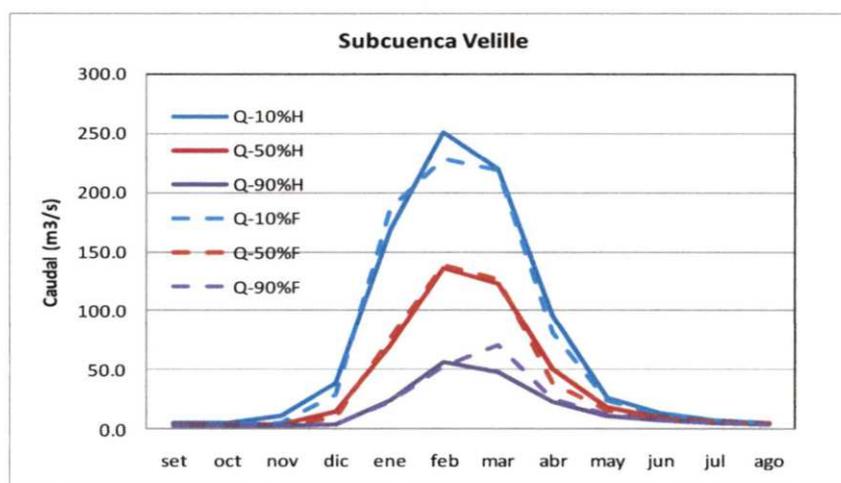
Para el periodo de estiaje, en esta subcuenca, se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -8,0%, -13,0% y 5,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10,

Q50 y Q90) del orden de -5,0%, -2,0% y 13,0%, respectivamente. En la **Figura 19**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

**Tabla 19. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Velille**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Velille - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	5.0	4.6	11.5	39.0	168.9	250.5	220.2	96.1	27.1	13.6	7.9	5.6	66.7
Q_50	4.0	3.5	3.7	14.7	71.2	136.9	123.5	50.4	18.8	10.4	6.4	4.8	38.7
Q_90	3.2	2.7	2.7	3.8	24.1	56.0	48.4	22.7	11.4	7.5	5.0	3.8	21.9
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Velille - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	4.4	3.8	5.2	28.5	186.5	227.8	218.9	81.0	24.4	12.4	7.4	5.3	61.4
Q_50	3.5	3.1	3.2	9.6	77.0	138.9	126.4	38.3	15.7	9.2	5.9	4.3	35.2
Q_90	3.2	2.5	2.4	3.8	23.1	52.9	71.0	25.1	12.4	7.7	5.1	3.8	21.5
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-12.8	-17.2	-54.9	-26.9	10.4	-9.1	-0.6	-15.7	-9.7	-8.2	-6.2	-6.8	-8.0
Q_50	-11.6	-12.8	-14.2	-34.4	8.1	1.5	2.4	-24.1	-16.4	-12.2	-9.0	-9.3	-8.9
Q_90	-1.8	-6.3	-11.9	-1.4	-4.1	-5.5	46.7	10.6	9.0	3.0	2.1	1.4	-2.0



**Figura 19.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Velille.

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.1.3 Subcuenca Santo Tomás

Para esta subcuenca se observa un incremento del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 20,0%, 18,0% y 24,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 20**.

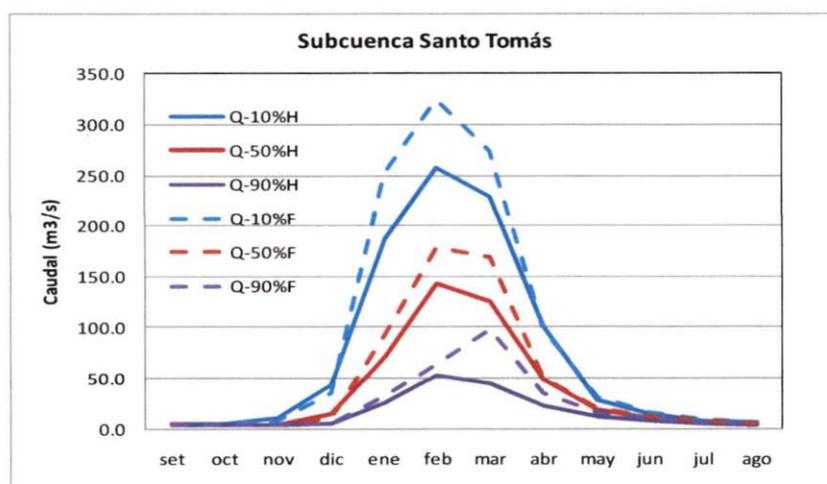
Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50

y Q90) del orden de 9,0%, 8,0% y 32,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 20,0%, 24,0% y 56,0%, respectivamente. En la **Figura 20**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

**Tabla 20. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Santo Tomás**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Santo Tomás - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	5.3	5.1	10.6	42.8	186.3	257.9	228.9	101.2	28.3	13.9	8.2	5.9	67.1
Q_50	4.1	3.8	4.1	14.0	70.8	143.0	125.0	48.7	18.8	10.6	6.6	4.9	40.0
Q-90	3.3	2.8	2.9	4.2	25.7	52.1	44.9	22.9	11.4	7.7	5.2	3.9	21.1
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Santo Tomás - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	5.5	5.3	7.1	35.6	252.3	324.8	273.6	97.1	30.5	15.5	9.3	6.5	80.2
Q_50	4.4	3.9	4.1	10.9	92.1	178.3	169.2	49.8	19.9	11.5	7.4	5.4	47.0
Q-90	4.0	3.2	3.1	4.6	32.4	64.2	98.4	34.7	16.0	9.9	6.5	4.9	26.3
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	2.9	3.7	-33.4	-16.8	35.4	26.0	19.5	-4.0	8.1	11.1	12.8	9.5	19.5
Q_50	8.4	4.1	1.2	-22.2	30.2	24.7	35.4	2.3	5.6	9.0	11.8	9.9	17.7
Q-90	20.4	15.9	7.6	10.3	26.4	23.2	119.0	51.4	40.3	28.3	26.1	24.9	24.4



**Figura 20.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Santo Tomás.

Fuente: Elaboración propia

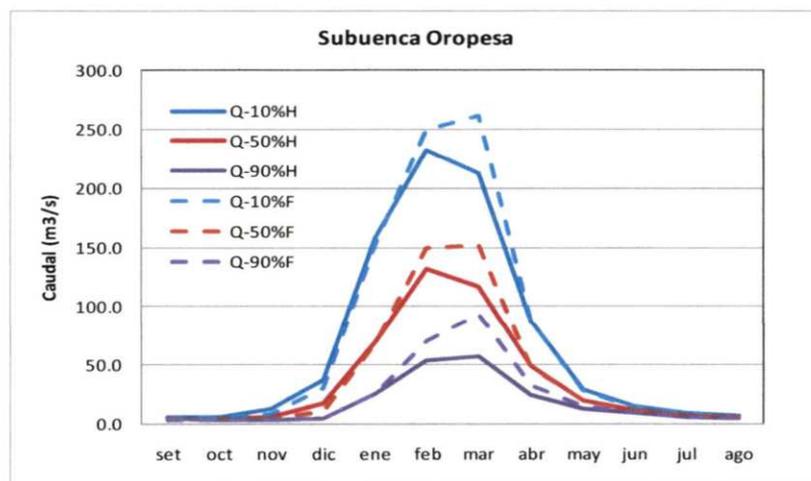
#### 5.4.1.4 Subcuenca Oropesa

Para esta subcuenca se observa un incremento del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 12,0%, 16,0% y 17,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 21**.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -4,0%, -3,0% y 10,0%, respectivamente.

**Tabla 21. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Oropesa**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Oropesa - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	5.7	5.8	11.9	37.2	159.1	232.1	212.1	87.8	28.3	14.3	8.7	6.4	62.6
Q_50	4.1	3.9	4.8	16.8	70.1	131.8	117.0	48.7	19.5	10.9	6.8	5.1	37.0
Q_90	3.6	3.0	3.1	4.6	25.1	53.7	57.1	24.6	12.5	8.4	5.6	4.1	22.3
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Oropesa - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	4.9	5.1	7.5	30.2	153.0	249.6	261.3	87.5	27.4	14.1	8.3	5.8	70.3
Q_50	3.9	3.5	3.8	10.4	69.0	149.4	152.2	47.5	18.8	10.8	6.7	4.8	42.7
Q_90	3.5	2.9	2.8	4.5	24.8	69.6	92.8	32.8	14.7	8.9	5.8	4.3	26.0
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-14.2	-13.1	-36.8	-18.9	-3.8	7.6	23.2	-0.3	-2.9	-1.3	-5.2	-9.2	12.3
Q_50	-4.4	-11.1	-20.8	-38.0	-1.6	13.3	30.0	-2.3	-3.4	-1.2	-1.0	-4.3	15.6
Q_90	-1.9	-5.2	-7.8	-1.5	-1.0	29.7	62.5	33.3	18.0	6.1	4.3	4.5	16.6



**Figura 21.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Oropesa.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 7,0%, 11,0% y 35,0%, respectivamente. En la **Figura 21**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

#### 5.4.1.5 Subcuenca Pachachaca

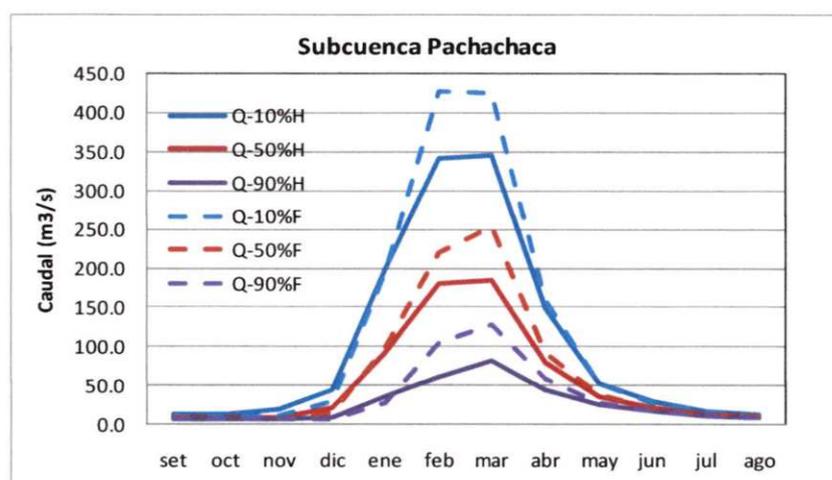
Para esta subcuenca se observa un incremento del caudal (Q10, Q50 y

Q90) anual, con anomalías del orden de 26,0%, 18,0% y 22,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 22**.

**Tabla 22. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Pachachaca**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Pachachaca - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	12.3	12.1	18.8	43.8	199.1	342.5	346.8	149.3	51.8	28.5	16.9	12.6	92.4
Q_50	8.4	7.3	8.7	20.7	91.2	180.1	184.8	79.3	35.6	21.2	13.5	10.1	56.1
Q-90	7.0	6.3	6.2	8.7	35.1	61.3	81.3	44.5	24.4	15.8	10.7	8.1	33.3
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Pachachaca - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	9.9	9.0	11.0	28.4	194.6	426.7	425.1	160.0	52.7	27.8	17.2	12.1	117.3
Q_50	8.0	7.0	6.8	15.0	97.9	219.5	254.4	93.0	38.0	21.6	13.6	10.0	65.9
Q-90	7.1	5.7	5.6	7.2	27.5	104.9	128.4	58.5	27.4	17.2	11.4	8.6	40.5
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-19.5	-25.6	-41.2	-35.0	-2.3	24.6	22.6	7.2	1.7	-2.5	2.2	-4.0	26.9
Q_50	-3.9	-4.3	-21.1	-27.6	7.4	21.9	37.7	17.2	6.8	1.8	0.6	-0.7	17.6
Q-90	1.3	-8.7	-9.6	-17.4	-21.6	71.2	57.9	31.3	12.1	9.0	6.9	5.9	21.5

Para el periodo de estiaje se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 0,0%, 4,0% y 10,0%, respectivamente.



**Figura 22.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Pachachaca.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de avenidas se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 13,0%, 22,0% y 40,0%, respectivamente. En la **Figura 22**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

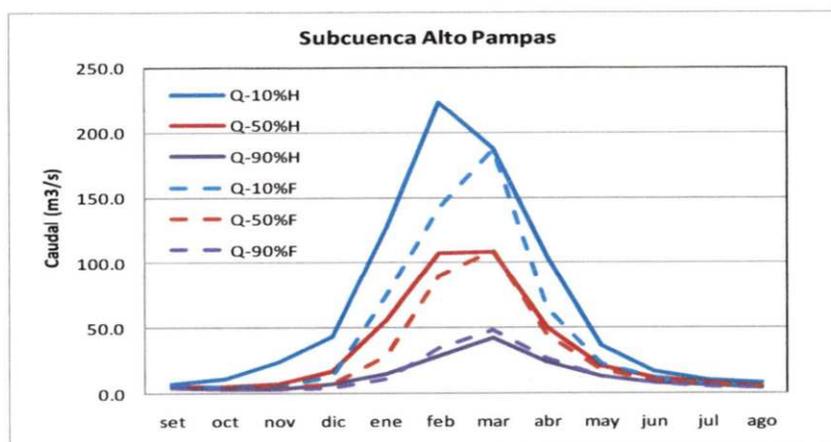
## 5.4.2 Cuenca del río Pampas

### 5.4.2.1 Subcuenca Alto Pampas

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -36,0%, -15,0% y -23,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 23**.

**Tabla 23. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Alto Pampas**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Alto Pampas - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	6.6	10.4	23.6	43.7	126.6	223.1	188.4	104.4	35.9	16.4	10.1	7.6	64.5
Q_50	4.7	4.8	6.4	17.0	55.7	107.3	108.6	49.8	20.7	11.7	7.4	5.2	36.1
Q-90	3.6	3.2	3.1	6.4	14.4	28.9	42.3	23.6	12.7	8.2	5.5	4.2	18.0
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Alto Pampas - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	5.3	4.4	4.9	12.7	74.7	141.7	186.8	65.1	22.9	12.1	7.3	5.3	41.4
Q_50	3.9	3.4	3.5	6.5	28.8	89.8	109.0	44.6	17.9	10.2	6.5	4.8	30.7
Q-90	3.4	2.7	2.7	3.5	10.9	34.9	48.1	26.5	12.5	7.8	5.2	3.9	13.9
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-20	-58	-79	-71	-41	-36	-1	-38	-36	-26	-28	-30	-36
Q_50	-16	-30	-46	-62	-48	-16	0	-10	-14	-12	-12	-7	-15
Q-90	-7	-16	-14	-45	-25	21	14	12	-1	-5	-6	-5	-23



**Figura 23.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Alto Pampas.

Fuente. Elaboración propia.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -32,0%, -12,0% y 15,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -32%, -18,0% y 7,0%, respectivamente. En la

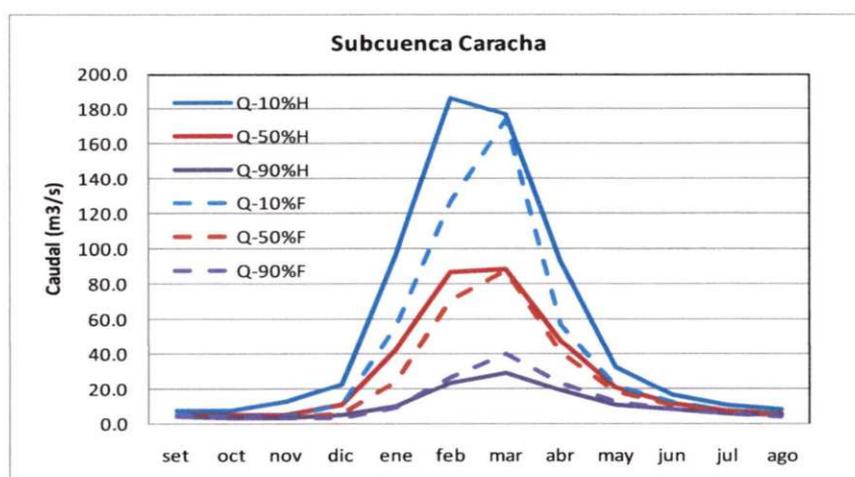
**Figura 23**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

#### 5.4.2.2 Subcuenca Caracha

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -35,0%, -20,0% y -9,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 24**.

**Tabla 24. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Caracha**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Caracha - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	7.1	6.8	12.2	22.5	97.0	185.9	177.2	92.3	32.4	16.3	10.3	7.7	55.5
Q_50	4.5	4.3	4.7	10.8	42.3	86.9	88.4	47.1	20.2	11.4	7.4	5.4	31.1
Q-90	3.6	3.2	2.9	4.6	9.6	23.5	29.0	19.2	10.9	7.9	5.6	4.3	13.2
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Caracha - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	4.9	4.1	4.2	10.9	55.6	127.1	173.8	56.2	21.1	11.9	7.4	5.6	36.1
Q_50	4.1	3.4	3.2	5.1	23.7	71.2	87.9	40.4	17.8	10.7	6.9	5.1	25.0
Q-90	3.6	2.9	2.7	3.3	9.1	26.4	40.2	23.3	12.0	8.0	5.5	4.2	12.0
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-31	-41	-65	-52	-43	-32	-2	-39	-35	-27	-28	-28	-35
Q_50	-9	-20	-31	-53	-44	-18	-1	-14	-12	-6	-7	-6	-20
Q-90	-2	-10	-7	-28	-5	12	39	21	10	1	-2	-1	-9



**Figura 24.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Caracha.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de estiaje se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -31,0%, -9,0% y 4,0%, respectivamente.

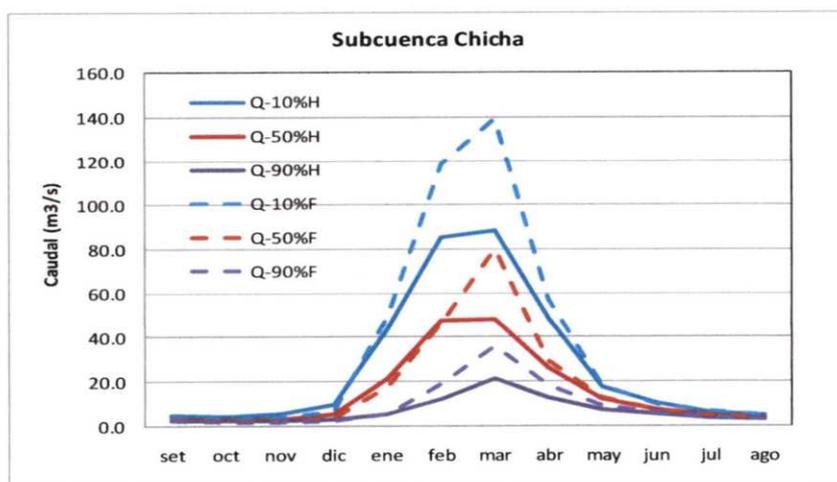
Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -27%, -17,0% y 18,0%, respectivamente. En la **Figura 24**, se presenta los hidrogramas de caudal histórico y simulado al futuro.

#### 5.4.2.3 Subcuenca Chicha

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 39,0%, 7,0% y 35,0% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 25**.

**Tabla 25. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Chicha**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Chicha - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	4.6	4.2	5.0	9.3	43.9	85.3	88.7	48.5	17.5	9.9	6.0	4.6	24.8
Q_50	2.9	2.6	2.8	5.2	21.0	47.5	48.2	26.0	12.2	7.2	4.7	3.4	15.9
Q-90	2.4	2.1	2.1	3.1	5.5	12.3	21.4	12.5	7.4	5.0	3.5	2.7	7.6
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Chicha - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	3.5	2.8	3.2	6.5	49.6	118.3	139.6	57.6	18.3	9.8	6.2	4.4	34.4
Q_50	2.8	2.3	2.3	3.2	17.4	46.2	80.2	29.0	12.7	7.4	4.7	3.4	17.0
Q-90	2.4	1.9	1.8	2.1	5.5	18.9	36.1	17.9	8.8	5.6	3.8	2.8	10.2
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-24	-34	-37	-31	13	39	57	19	4	-1	4	-5	39
Q_50	-5	-10	-17	-39	-17	-3	66	12	4	2	0	1	7
Q-90	-1	-8	-11	-30	0	54	69	43	19	11	8	4	35



**Figura 25.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Chicha.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 2,0%, 2,0% y 12,0%, respectivamente.

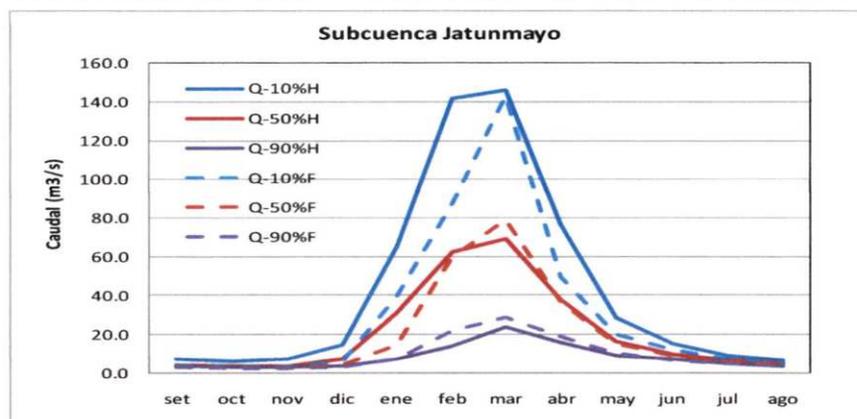
Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 34%, 18,0% y 45,0%, respectivamente. En la **Figura 25**, se presenta los hidrogramas de caudales históricos y simulados al futuro.

#### 5.4.2.4 Subcuenca Jatunmayo

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -30%, -6% y 6% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 26**.

**Tabla 26. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Jatunmayo**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Jatunmayo -Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	6.9	5.9	7.1	14.7	65.1	141.6	146.3	76.3	28.4	15.2	8.9	6.6	43.5
Q_50	3.9	3.4	3.7	7.0	31.1	62.2	69.2	37.4	16.4	9.5	6.3	4.7	23.5
Q-90	3.2	2.7	2.6	3.2	6.9	13.5	23.8	15.9	9.1	6.9	4.8	3.6	9.4
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Jatunmayo - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	4.2	3.6	3.7	6.1	39.8	87.2	143.1	49.4	20.1	11.9	7.2	5.2	30.6
Q_50	3.6	3.0	2.7	3.8	14.6	59.8	78.8	36.5	15.4	9.1	5.9	4.4	22.2
Q-90	2.9	2.4	2.4	2.5	6.8	21.9	28.3	19.0	10.0	6.6	4.6	3.5	10.0
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-39	-39	-48	-58	-39	-38	-2	-35	-29	-22	-18	-21	-30
Q_50	-8	-13	-27	-46	-53	-4	14	-2	-6	-4	-7	-7	-6
Q-90	-8	-11	-10	-22	0	61	19	20	10	-4	-4	-3	6



**Figura 26.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Jatunmayo.

Fuente. Elaboración propia

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -25,0%, -6,0% y 1,0%, respectivamente.

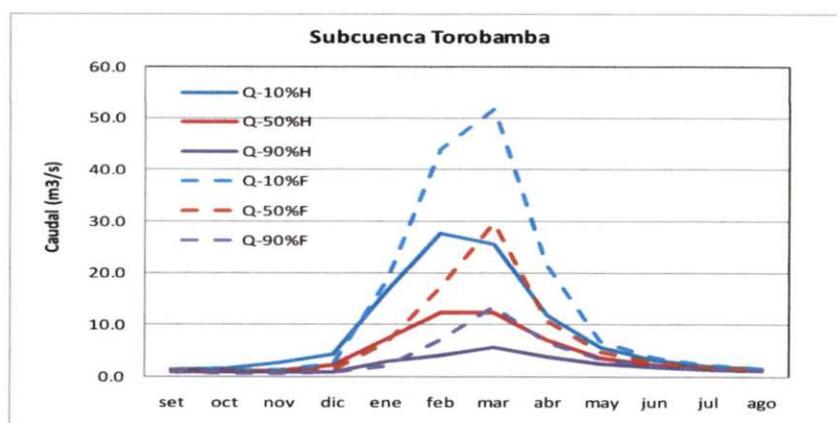
Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -27%, -7,0% y 23,0%, respectivamente. En la **Figura 26**, se presenta los hidrogramas de caudales históricos y simulados al futuro.

#### 5.4.2.5 Subcuenca Torobamba

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 67%, 39% y 59% respectivamente, tal como se presenta en la **Tabla 27**.

**Tabla 27. Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca Torobamba**

Periodo de referencia 1970-2008. Subcuenca Torobamba - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Q_10	1.3	1.5	2.6	4.4	16.3	27.7	25.5	11.8	5.7	3.2	1.9	1.4	7.6
Q_50	1.1	1.0	1.1	2.1	7.2	12.3	12.3	7.0	3.6	2.3	1.6	1.2	4.5
Q-90	0.8	0.8	0.8	0.9	2.8	3.9	5.6	3.9	2.3	1.7	1.2	1.0	2.4
Horizonte simulado 2016-2044. Subcuenca Torobamba - Caudales en m <sup>3</sup> /s													
Q_10	1.3	1.0	1.2	2.4	18.4	43.9	51.8	21.4	6.8	3.6	2.3	1.6	12.8
Q_50	1.0	0.9	0.9	1.2	6.5	17.1	29.8	10.8	4.7	2.7	1.7	1.3	6.3
Q-90	0.9	0.7	0.7	0.8	2.0	7.0	13.4	6.7	3.3	2.1	1.4	1.1	3.8
Anomalías de los caudales (%)													
Q_10	-2	-32	-54	-45	13	58	103	81	19	14	18	12	67
Q_50	-1	-10	-24	-44	-10	39	142	54	31	21	9	3	39
Q-90	7	-6	-14	-8	-28	79	141	72	39	25	16	11	59



**Figura 27.** Caudales probabilísticos Q10, Q50 y Q90 del periodo de referencia 1970-2008 (en línea sólida) y del horizonte 2016-39 (en línea punteada), subcuenca Torobamba.

Fuente. Elaboración propia.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 17,0%, 21,0% y 26,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 57%, 57,0% y 71,0%, respectivamente. En la **Figura 27**, se presenta los hidrogramas de caudales históricos y simulados al futuro.

## 5.5 Simulación de sequías

### 5.5.1 Caracterización regional

Las simulaciones de la sequía fueron realizadas en base a los 03 modelos de downscaling estadístico con información disponible de precipitación en 9 estaciones para el horizonte 2012 - 2059 del escenario A1B. Las estaciones utilizadas y la metodología propuesta fueron expuestas en el ítem 4.3.

En las **Tablas del 25 al 29** se presenta los resultados de las simulaciones de la sequía obtenidos por los tres modelos climáticos para las escalas de 3, 6,9, 12 y 24 meses, comparados en todos los casos con las sequías históricas del periodo de referencia 1970-2008.

**Tabla 28. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 3 meses**

Precipitación observada (1970-2008)			
	Promedio	Mín	Máx
Duración promedio (meses)	2.1	1.0	6.0
SPI-3	-2.2	-4.2	-1.5
Estaciones afectadas (%)	68	50	96
Modelo NCAR (2012-2059)			
	Promedio	Mín	Máx
Duración promedio (meses)	1.6	1.0	4.0
SPI-3	-2.4	-3.3	-1.5
Estaciones afectadas (%)	62	50	92
Modelo NHADCM3 (2012-59)			
	Promedio	Mín	Máx
Duración promedio (meses)	1.5	1.0	5.0
SPI-3	-2.1	-3.5	-1.4
Area afectada (%)	60	50	84
Modelo NMPEH5 (2012-59)			
	Promedio	Mín	Máx
Duración promedio (meses)	2.0	1.0	8.0
SPI-3	-1.9	-3.2	-1.3
Estaciones afectadas (%)	64	50	88

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 29. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 6 meses**

<b>Precipitación observada (1970-2008)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	2.2	1.0	8.0
SPI-6	-2.2	-3.9	-1.3
Estaciones afectadas (%)	66	50	96
<b>Modelo NCAR (2012-2059)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	1.9	1.0	8.0
SPI-6	-2.1	-3.3	-1.3
Estaciones afectadas (%)	62	50	80
<b>Modelo NHADCM3 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	1.6	1.0	5.0
SPI-6	-1.9	-3.5	-1.4
Estaciones afectadas (%)	60	50	84
<b>Modelo NMPEH5 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	2.6	1.0	9.0
SPI-6	-1.8	-2.9	-1.3
Estaciones afectadas (%)	63	50	100

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 30. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 9 meses**

<b>Precipitación observada (1970-2008)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	3.4	1.0	12.0
SPI-9	-2.1	-3.9	-1.4
Estaciones afectadas (%)	65	51	100
<b>Modelo NCAR (2012-2059)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	2.3	1.0	8.0
SPI-9	-1.9	-2.9	-1.3
Estaciones afectadas (%)	61	50	95
<b>Modelo NHADCM3 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	2.4	1.0	7.0
SPI-9	-1.9	-3.3	-1.4
Estaciones afectadas (%)	60	50	79
<b>Modelo NMPEH5 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	4.2	1.0	12.0
SPI-9	-1.9	-3.1	-1.3
Estaciones afectadas (%)	64	50	88

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 31. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 12 meses**

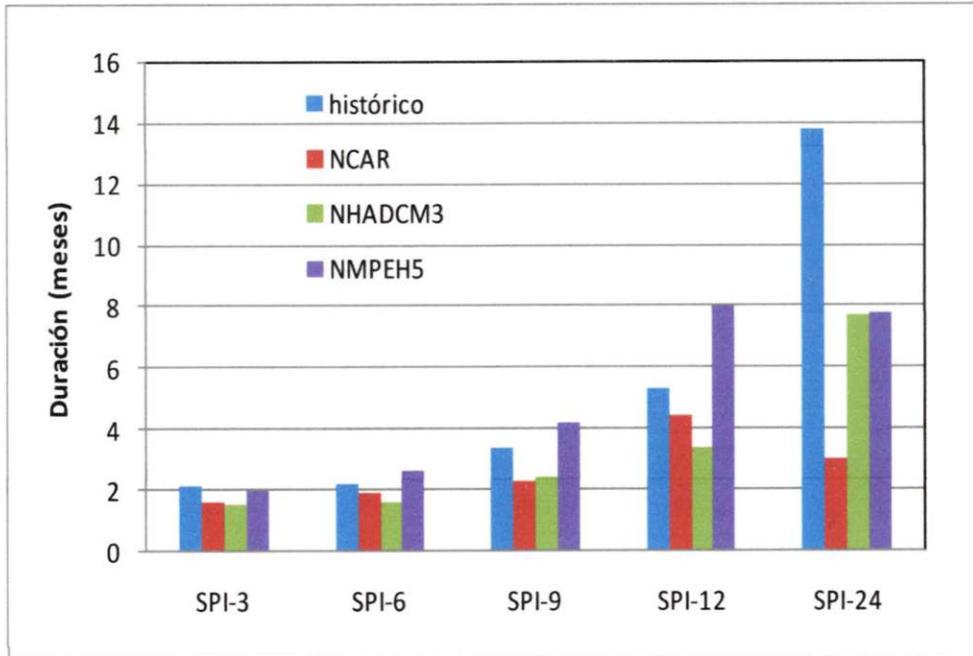
<b>Precipitación observada (1970-2008)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	5.3	1.0	13.0
SPI-12	-2.2	-4.1	-1.3
Estaciones afectadas (%)	69	50	92
<b>Modelo NCAR (2012-2059)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	4.4	1.0	11.0
SPI-12	-2	-3.3	-1.6
Estaciones afectadas (%)	58	50	75
<b>Modelo NHADCM3 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	3.4	1.0	12.0
SPI-12	-1.8	-2.9	-1.4
Estaciones afectadas (%)	59	50	75
<b>Modelo NMPEH5 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	8.0	1.0	16.0
SPI-12	-2.1	-3.2	-1.6
Estaciones afectadas (%)	65	50	88

Fuente. Elaboración propia

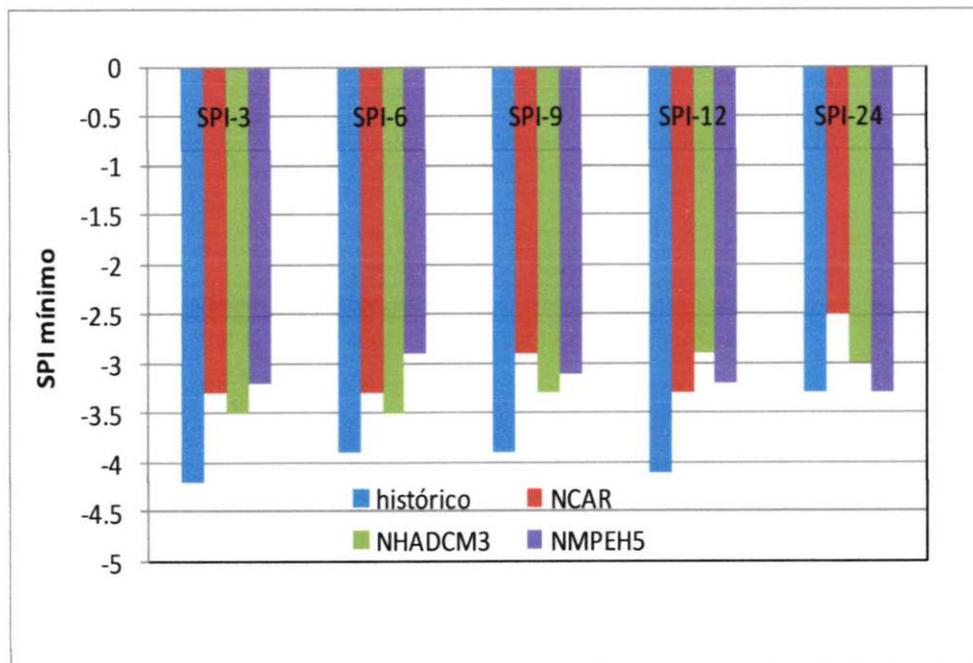
**Tabla 32. Características de la sequía regional histórica y futura por diferentes modelos climáticos. Escala 24 meses**

<b>Precipitación observada (1970-2008)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	13.8	1.0	35.0
SPI-24	-1.8	-3.3	-1.1
Estaciones afectadas (%)	61	50	95
<b>Modelo NCAR (2012-2059)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	3.0	1.0	13.0
SPI-24	-1.6	-2.5	-1.3
Estaciones afectadas (%)	52	50	72
<b>Modelo NHADCM3 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	7.7	1.0	24.0
SPI-24	-1.6	-3.0	-1.5
Estaciones afectadas (%)	54	53	84
<b>Modelo NMPEH5 (2012-59)</b>			
	<b>Promedio</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
Duración promedio (meses)	7.8	1.0	21.0
SPI-24	-1.8	-3.3	-1.6
Estaciones afectadas (%)	62	50	80

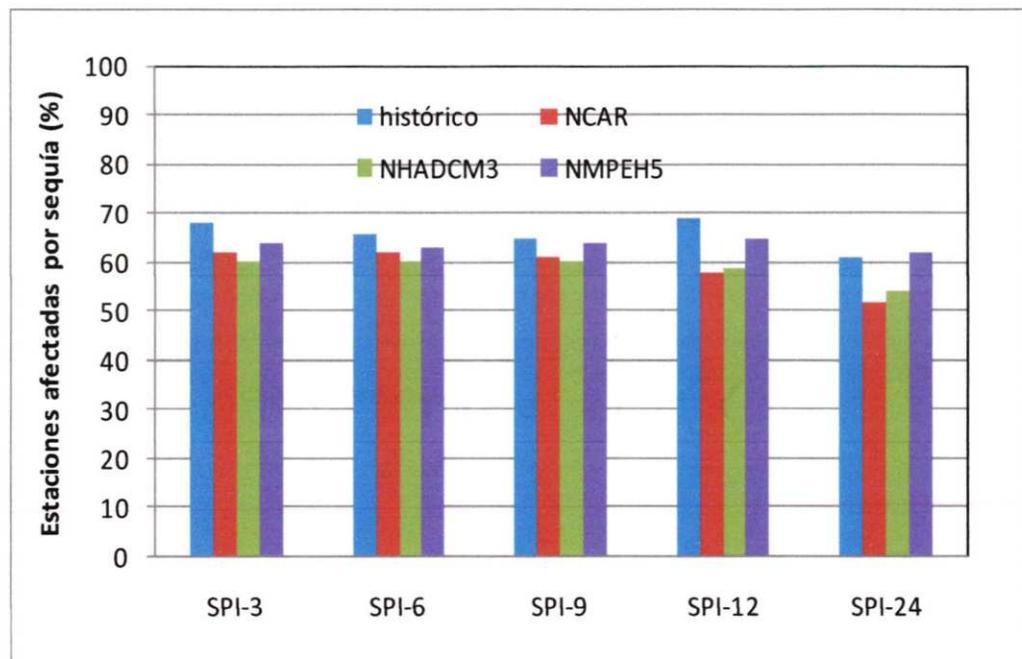
Fuente. Elaboración propia



**Figura 28.** Gráfico de barras de duración promedio de la sequía para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling  
Fuente. Elaboración propia



**Figura 29.** Gráfico de barras de duración promedio de la de la sequía para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling.  
Fuente. Elaboración propia



**Figura 30.** Gráfico de barras del área afectada por sequías para los datos históricos y las simulaciones de los 3 modelos de downscaling.

Fuente. Elaboración propia

Las simulaciones de los tres modelos analizados indican la ocurrencia de eventos de sequías para el horizonte 2012-59, pero éstas a lo más tendrán las mismas características climáticas de las sequías históricas del periodo 1970-2008. Para el horizonte simulado se esperaría una reducción en la duración, magnitud y extensión espacial de las sequías

### 5.5.2 Tiempo de retorno y severidad de Sequías

La relación entre la severidad, Duración de la sequía viene definida por la relación propuesta por Loukas y Valisiades (2008):

$$\sum \text{SPI} = \lambda T^k (D)^{1-\eta}$$

Se ha realizado el análisis para las estaciones de Abancay y Acomayo, obteniéndose las relaciones siguientes:

- Curva de Severidad-Duración-Tiempo de retorno para la estación Acomayo, con información del periodo de referencia (1970-2008)

$$\sum \text{SPI} = 4.95 * (T)^{0.226} * (D)^{0.2905}$$

b) Curva de Severidad-Duración-Tiempo de retorno para la estación Acomayo, con información del horizonte (2012-2059)

$$\sum \text{SPI} = 5.31 * T^{0.204} * D^{0.254}$$

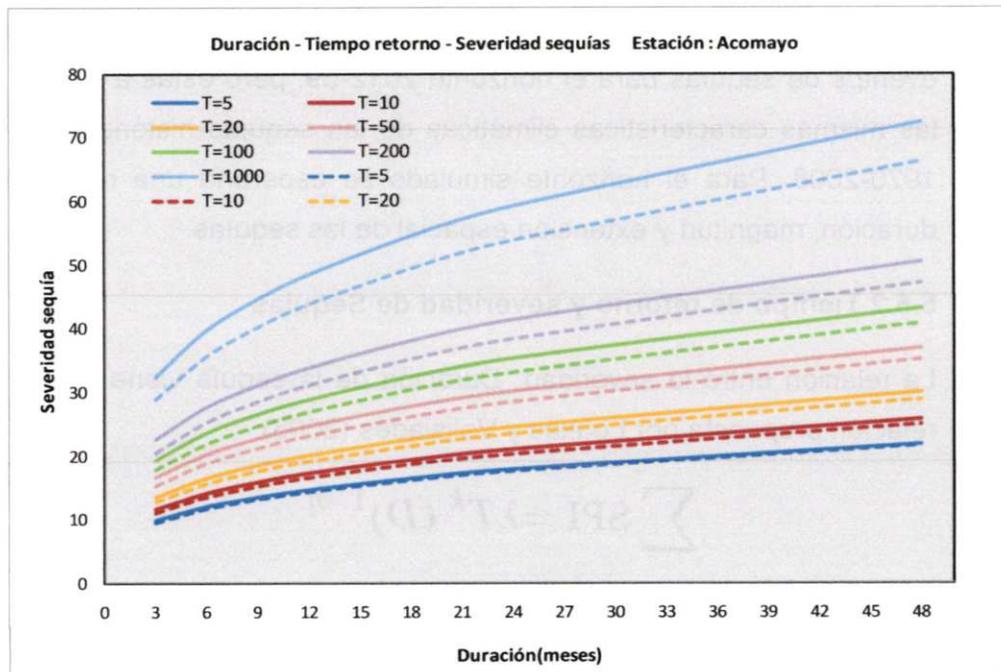
Donde:

$\sum \text{SPI}$  = Es la severidad acumulada anual de los meses de sequía.

T : tiempo de retorno

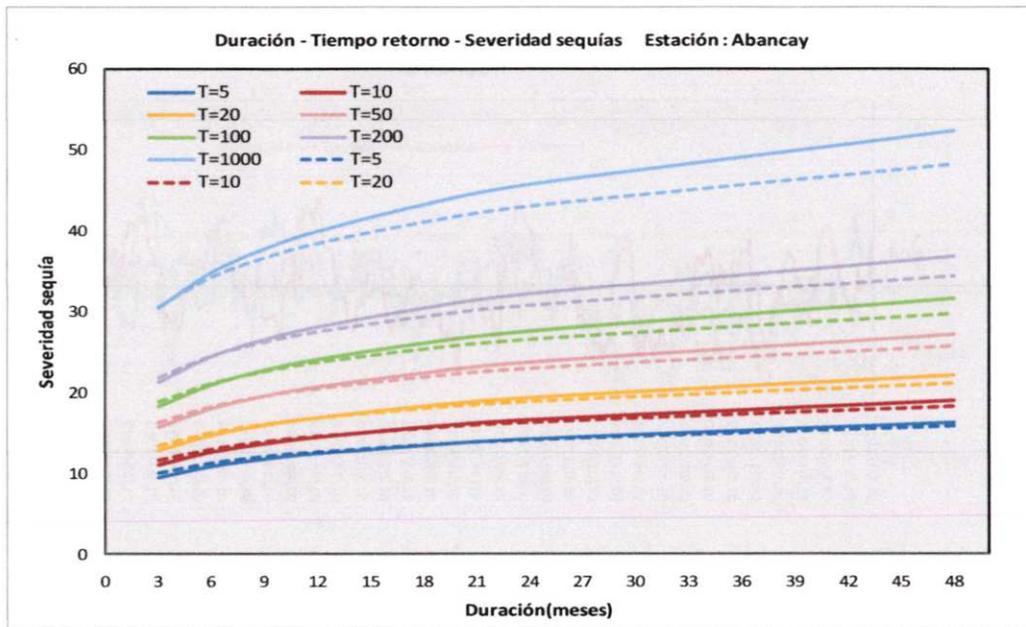
D : escala de tiempo del SPI

$\Lambda$ , K y  $\eta$  : son los parámetros ajustados por curvas empíricas



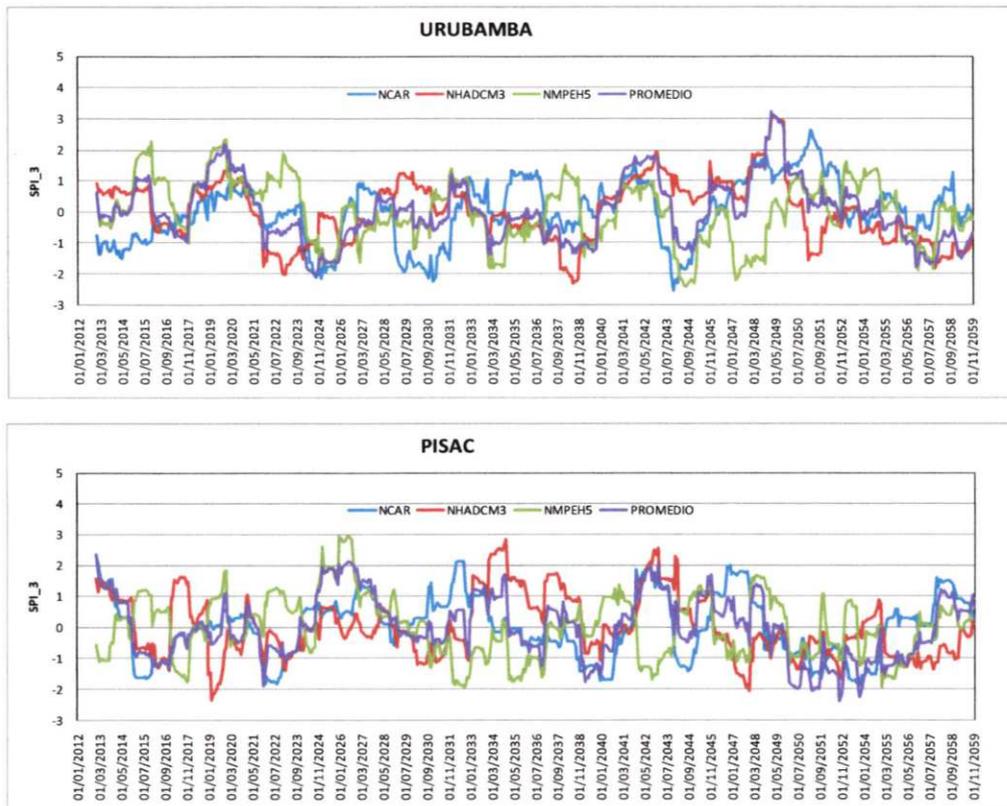
**Figura 31.** Curvas Duración-Severidad-Tiempo de retorno de sequías Estación Acomayo. En línea sólida sequía histórica, en líneas punteadas sequías del periodo 2012-2059

Fuente. Elaboración propia



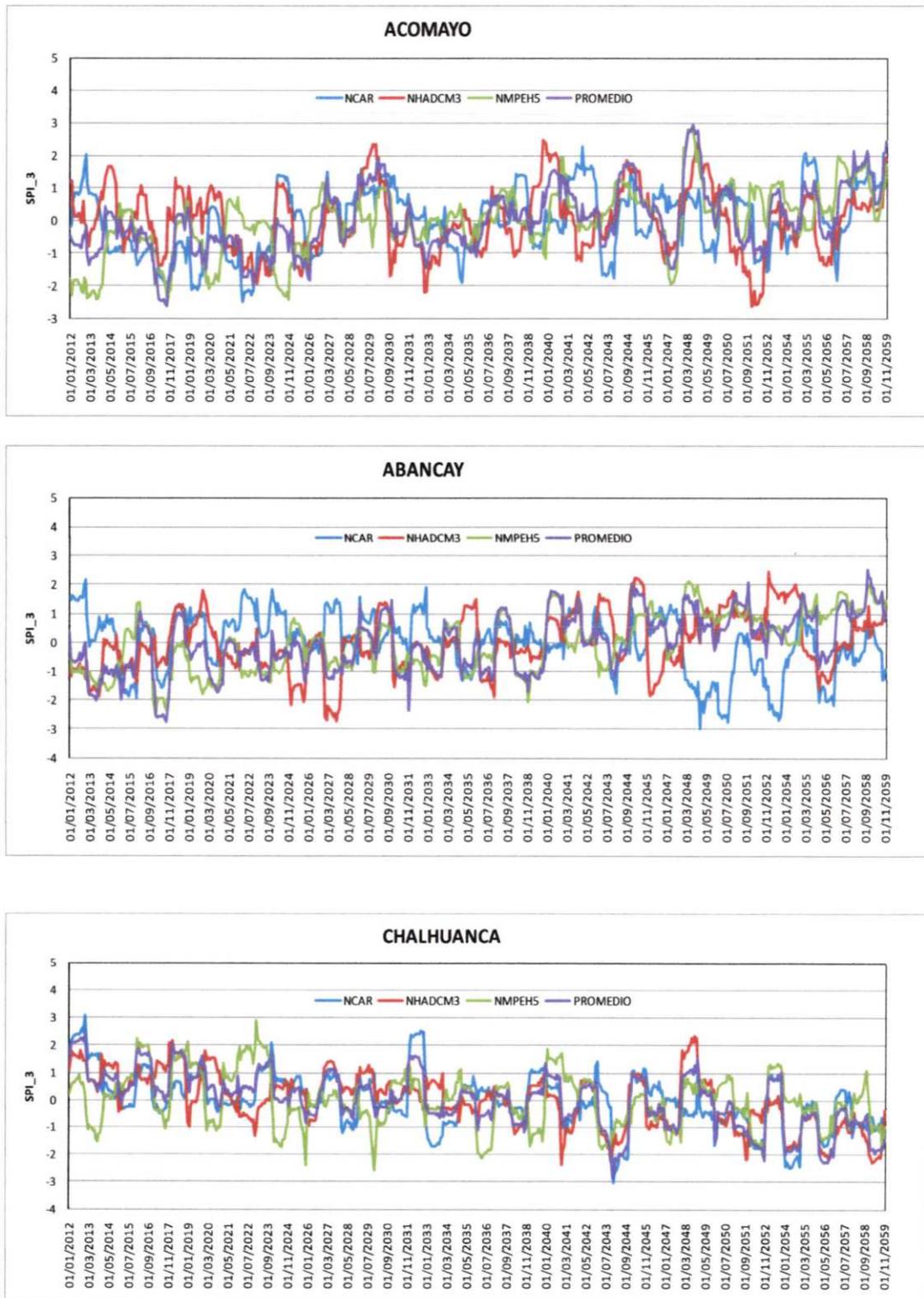
**Figura 32.** Curvas Duración-Severidad-Tiempo de retorno de sequías Estación Abancay. En línea sólida sequía histórica, en líneas punteadas sequías del periodo 2012-2059.

Fuente. Elaboración propia



**Figura 33.** Simulaciones del SPI para escala de 12 meses para los tres modelos de downscaling, en estaciones representativas de la cuenca Vilcanota.

Fuente. Elaboración propia



**Figura 34.** Simulaciones del SPI para escala de 12 meses para los tres modelos de downscaling, en estaciones representativas de la cuenca Apurímac.

Fuente. Elaboración propia

Las simulaciones de las sequías obtenidos con los 03 modelos de downscaling para el horizonte 2012-2059, en todos los casos analizados indican un comportamiento pluviométrico en relación a las sequías muy similar a las sequías históricas e cuanto a magnitud, intensidad y extensión espacial.

En relación a su probabilidad de ocurrencia para tiempos de retorno entre 5 a 20 años las sequías se presentarían con unan severidad equivalente a las presentadas en el pasado (1970-2008). Para tiempo de retornos mayores a 20 años, para el periodo 2012-2059 se esperaría una desertificación de la severidad de las sequías tal como se presenta en los resultados de las estaciones de Acomayo y Abancay.

## VI. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los modelos climáticos se espera que la precipitación en el horizonte 2030-39 aumente durante los meses de verano y disminuya para los meses secos, todo esto en relación a series de referencia utilizadas para la construcción de cada modelo.
- La temperatura para toda la zona de estudio tendrá un aumento anual de 1.6 °C en promedio para el horizonte 2030-39, siendo los meses de abril y junio los que tendrán las variaciones más importantes.
- En la cuenca del Urubamba (punto de control Km 105) se espera que los caudales aumenten durante todo el horizonte excepto los meses de junio, julio, agosto y noviembre. Este aumento está comprendido entre 30.5% para el mes de diciembre y 1% para octubre, se espera que el periodo seco tenga disminuciones que van del orden del 22.8% hasta 14.3% en relación a su periodo de referencia (1980-2000).
- Para la cuenca de Paucartambo se espera también que los caudales aumenten los seis primeros meses y luego disminuyan (excepto diciembre) siendo agosto y setiembre los meses más críticos, es importante indicar que en los meses de lluvia 25.5% y 35.5% y la disminución más importante se da durante el mes de setiembre donde se pierde el 25% del caudal (reducción de 2 m<sup>3</sup>/s); se recomienda leer las discusiones.
- Para el caso de Angostura (cabecera del río Apurímac), se tiene un aumento general de los caudales, siendo el NCAR quien da los máximos, el análisis del promedio de todos los modelos muestra que estos aumentos serán mayores al 46.6% (marzo tiene el incremento más bajo), estos valores son cuestionables desde el punto de concepción del modelo que puede arrojar un error, se recomienda leer las discusiones.
- En Pte. Cunyac (parte media del río Apurímac), en base al promedio de todos los modelos se espera que los caudales aumenten todos los meses excepto noviembre con una disminución de 2.4% respecto a su periodo de

referencia (1980-2000), dicha disminución no viene a ser importante por los volúmenes implicados, el aumento más importante se tendrá 21.2% en el mes de enero.

- Para el río Pampas en su punto de control ubicado casi en la parte media, se espera en base al promedio de los caudales de los modelos un aumento del caudal entre los meses de febrero a mayo, dicho aumento será máximo en el mes de marzo con un 12.2%; posteriormente los otros meses del año (disminución de caudal).

En general se podría atribuir al modelo NCAR como un modelo optimista (desde el punto de vista de recursos hídricos) y al modelo ECHAM5 como un pesimista (no necesariamente implica fuertes disminuciones) y el modelo MRI como uno intermedio y tal vez el más próximo al generado con el promedio de los otros modelos.

Bajo esta premisa, y considerando una posible situación pesimista en las proyecciones de precipitación del modelo ECHAM5, se hizo la simulación hidrológica de los caudales medios mensuales de las subcuencas para el horizonte 2016-2044, con los resultados siguientes:

- **Subcuenca Alto Apurímac:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -11,0%, -5,0% y -15,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -12,0%, -11,0% y -4,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -18,0%, -14,0% y 2,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Velille:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -8,0%, -9,0% y -2,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -8,0%, -13,0% y 5,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -5,0%, -2,0% y 13,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Santo Tomás:**

Para esta subcuenca se esperarían un incremento del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 20,0%, 18,0% y 24,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 9,0%, 8,0% y 32,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 20,0%, 24,0% y 56,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Oropesa:**

Para esta subcuenca se observa un incremento del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 12,0%, 16,0% y 17,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -4,0%, -3,0% y 10,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 7,0%, 11,0% y 35,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Pachachaca:**

Para esta subcuenca se observa un incremento del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 26,0%, 18,0% y 22,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 0,0%, 4,0% y 10,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 13,0%, 22,0% y 40,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Alto Pampas:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -36,0%, -15,0% y -23,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -32,0%, -12,0% y 15,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -32%, -18,0% y 7,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Caracha:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -35,0%, -20,0% y -9,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -31,0%, -9,0% y 4,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -27%, -17,0% y 18,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Chicha:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 39,0%, 7,0% y 35,0% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 2,0%, 2,0% y 12,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperarían anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 34%, 18,0% y 45,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Jatunmayo:**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de -30%, -6% y 6% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -25,0%, -6,0% y 1,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de -27%, -7,0% y 23,0%, respectivamente.

- **Subcuenca Torobamba**

Para esta subcuenca se observa una disminución del caudal (Q10, Q50 y Q90) anual, con anomalías del orden de 67%, 39% y 59% respectivamente.

Para el periodo de estiaje se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 17,0%, 21,0% y 26,0%, respectivamente.

Para el periodo de avenidas se esperaría anomalías de los caudales (Q10, Q50 y Q90) del orden de 57%, 57,0% y 71,0%, respectivamente.

- Las simulaciones de los tres modelos analizados NCAR, NHADCM3 y NMPEH5, indican la ocurrencia de eventos de sequías para el horizonte 2012-59, pero éstas a lo más tendrán las mismas características climáticas de las sequías históricas del periodo 1970-2008. Para el horizonte simulado se esperaría una reducción en la duración, magnitud y extensión espacial de las sequías.
- En relación a la probabilidad de ocurrencia de sequías para tiempos de retorno entre 5 a 20 años las sequías se presentarían con una severidad equivalente a las presentadas en el pasado (1970-2008). Para tiempo de retorno mayor a 20 años, para el periodo 2012-2059 se esperaría una desertificación de la severidad de las sequías tal como se presenta en los resultados de las estaciones de Acomayo y Abancay.

## VII. DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

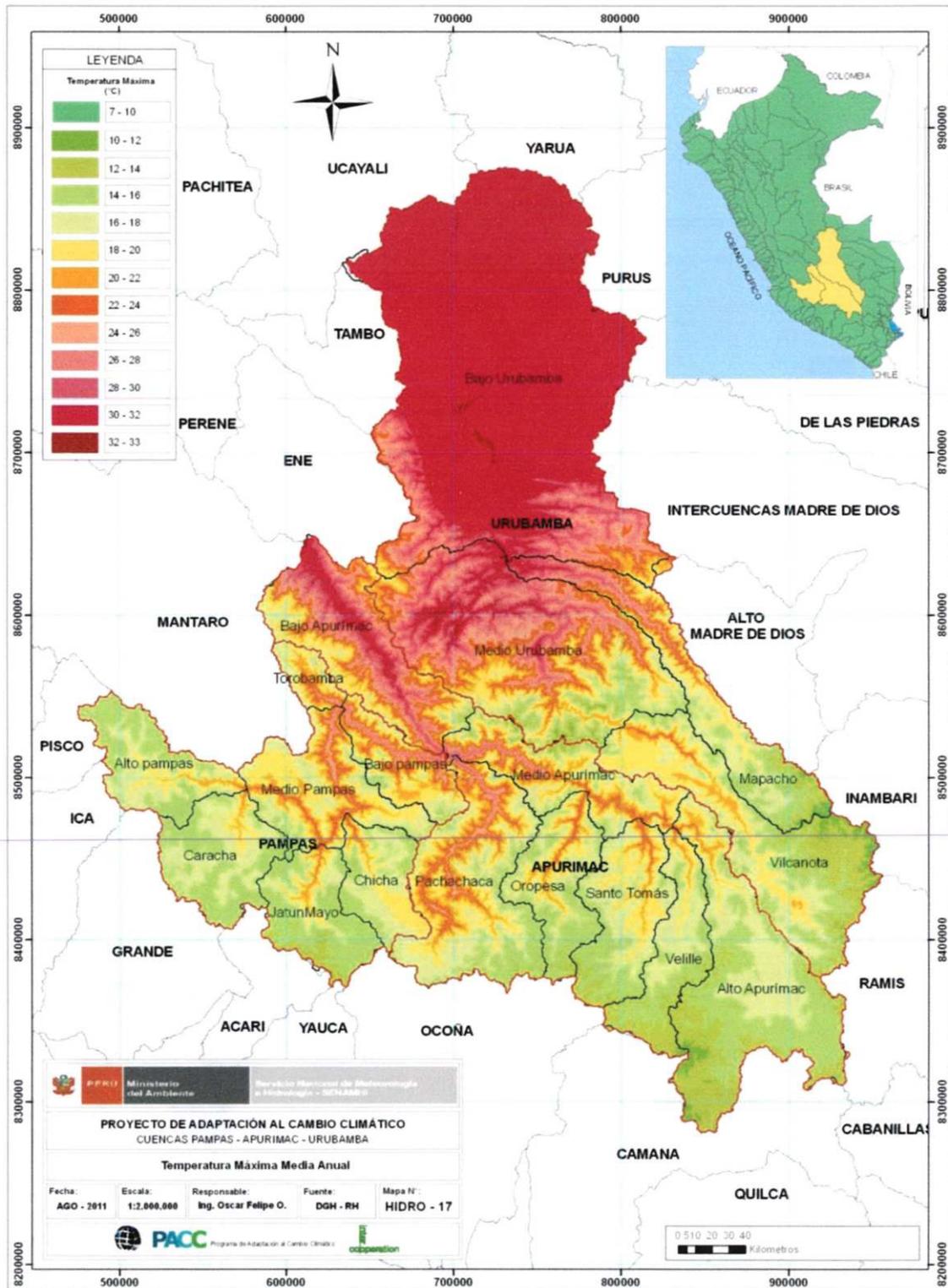
- Las salidas para el escenario 2030-39 del río Paucartambo trabajan en base a un modelo calibrado y validado en base a una serie no constante (ver información de calibración del modelo), además este fue calibrado con parámetros de KM 105 debido a su proximidad, de un análisis simple de correlación entre los caudales de KM 105 y Paucartambo haría aparentar que los datos observados en este último no son buenos y que la sobre estimación del modelo durante la estacionalidad (calibración y validación), se recomendaría revisar los caudales observados del río Paucartambo para un trabajo más al detalle.
- Para el caso de Angostura se tienen caudales muy elevados para el horizonte 2030-39, esto es debido que la prioridad de simulación en el río Apurímac fue el punto de Pte. Cunyac y Angostura fue calibrado y validado con los valores de los parámetros encontrados en Pte. Cunyac donde las condiciones climáticas son diferentes a la de Angostura; además la zona de Angostura solo considera dos catchements (ver calibración y validación de Angostura) que vienen a ser muy poco para un modelo semi - distribuido, se recomienda replantear el modelo en Angostura (modelo con más sub divisiones espaciales) y tomar con mucha precaución sus resultados por el momento hasta replantearlo nuevamente.
- Para los puntos de Km 105, Pte. Cayac y Pampas se tiene buenos resultados y se recomendaría mejorar los cálculos considerando la inclusión de la demanda en una etapa posterior.

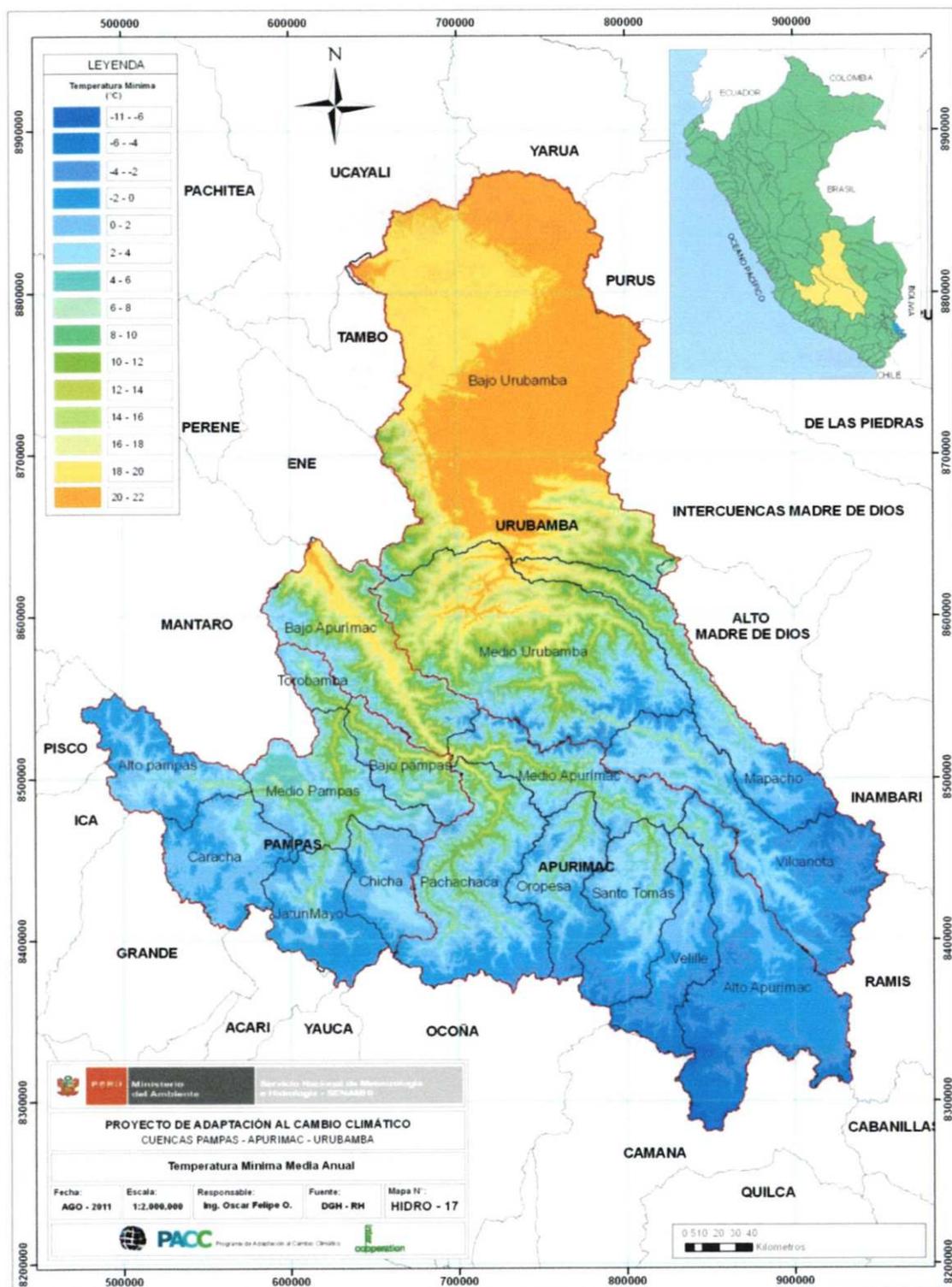
## VIII. BIBLIOGRAFÍA

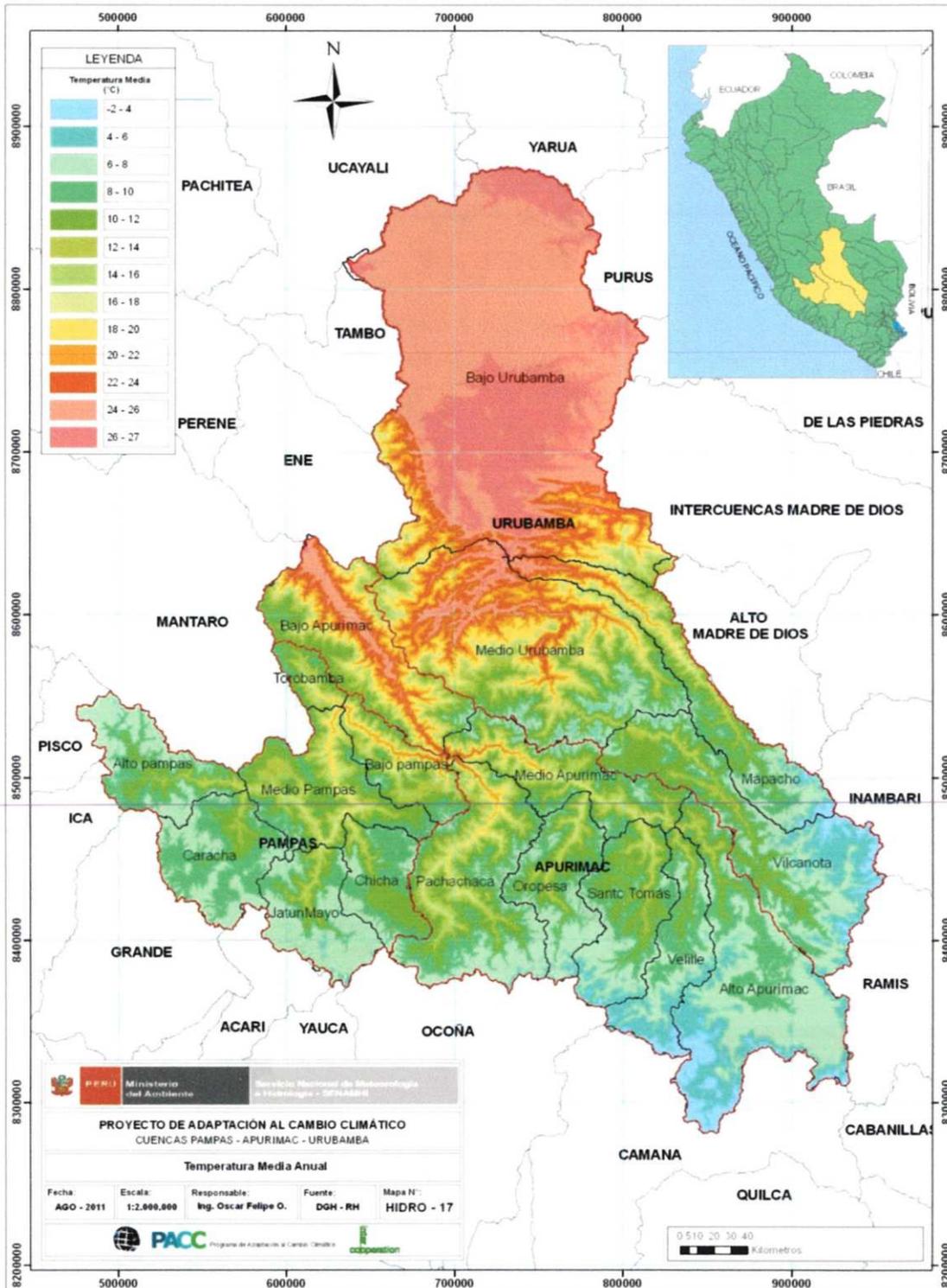
- **Loukas, L. Vasiliades, and J. Tzabiras.** "Climate change effects on drought severity". *Advances In Geosciences* (2008)
- **AGRIMET. 2008.** "Análisis de la vulnerabilidad de los Recursos Hídricos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático". Universidad de Chile.
- **IPCC, (2007):** Cambio 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. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- **Cancelliere J, Bonaccorso B, Cavallaro, L and Rossi G.** "Regional Drought Identification Module REDIM. Reference Guide. Department of Civil and Environmental Engineering University of Catania Catania, Italy
- **Mizuta,R; Oouchi, K; Yoshimura, H; Noda,A; Katayama,K; Yukimoto,S; Hosaka, M; Kusunoki, S; Kawai, H; and Nakagawa, M;** (2006): "20-km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model —Mean Climate States—". *J.Meteor.Soc.Japan*, Vol. **84**, 165-185.
- **Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe** (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *journal of hydrology* 10: 282-290.

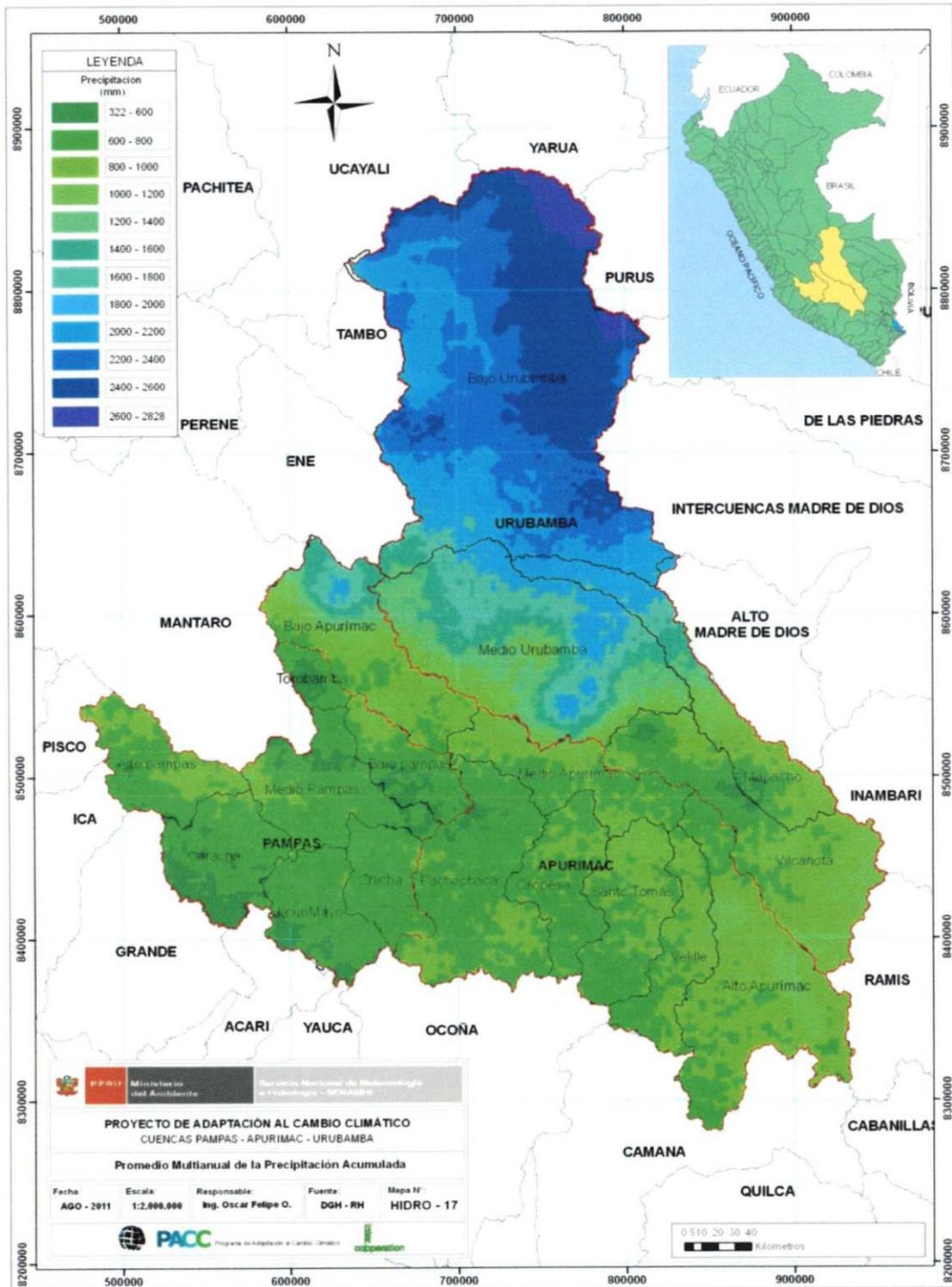
## ANEXOS

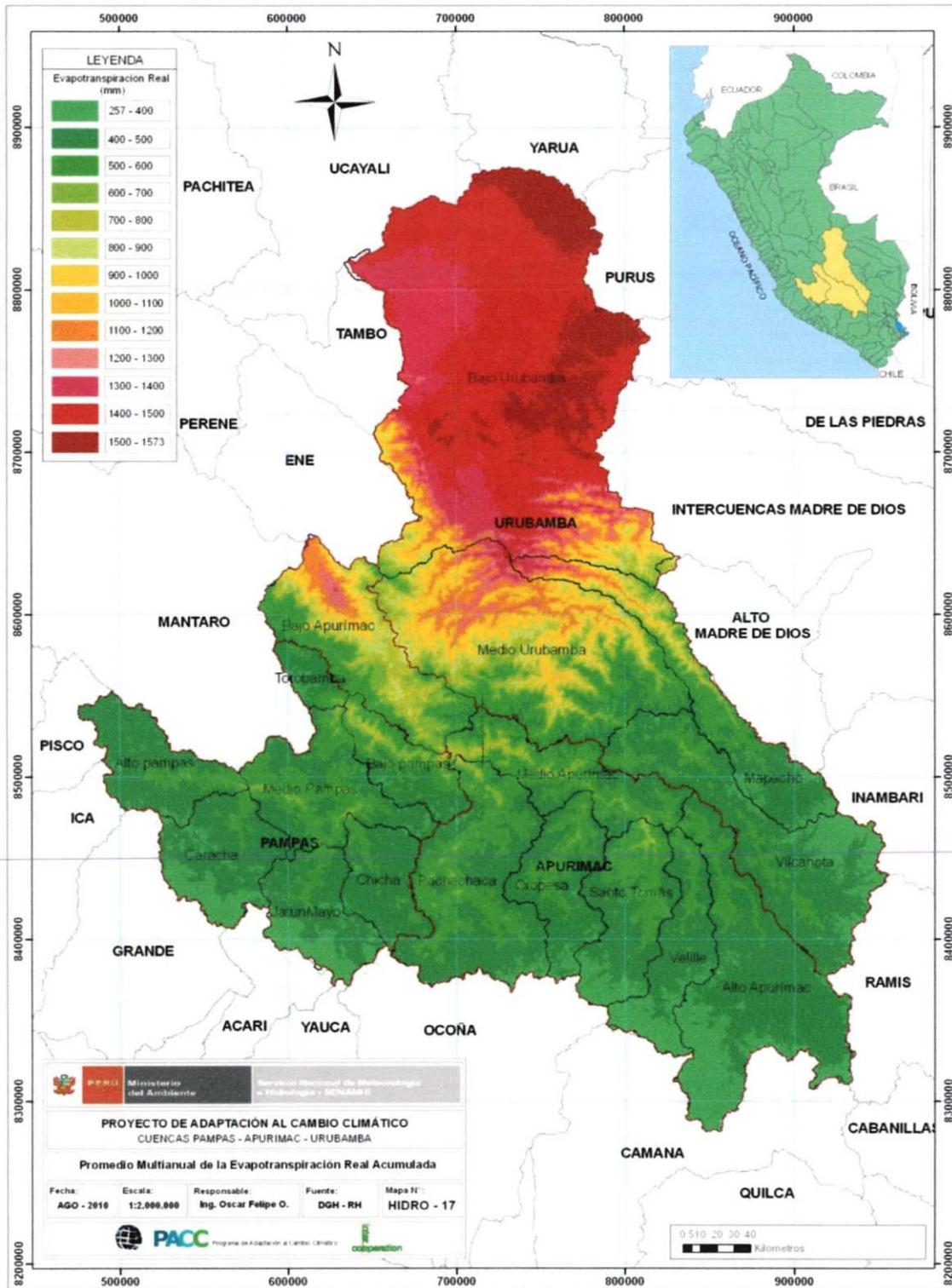
**MAPAS CLIMATOLOGIA DE REFERENCIA**  
**ANUAL**  
**(1970-2008)**

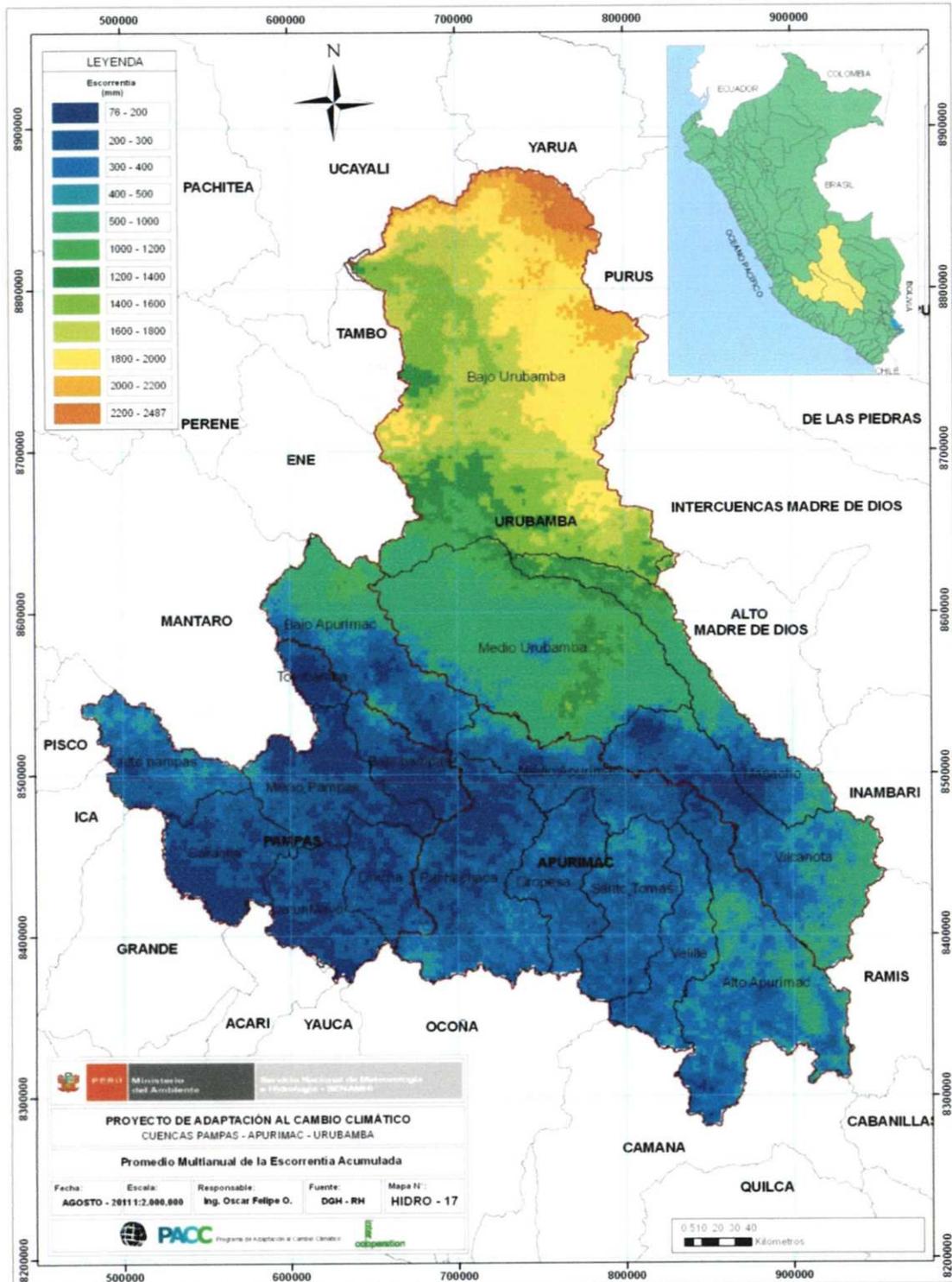




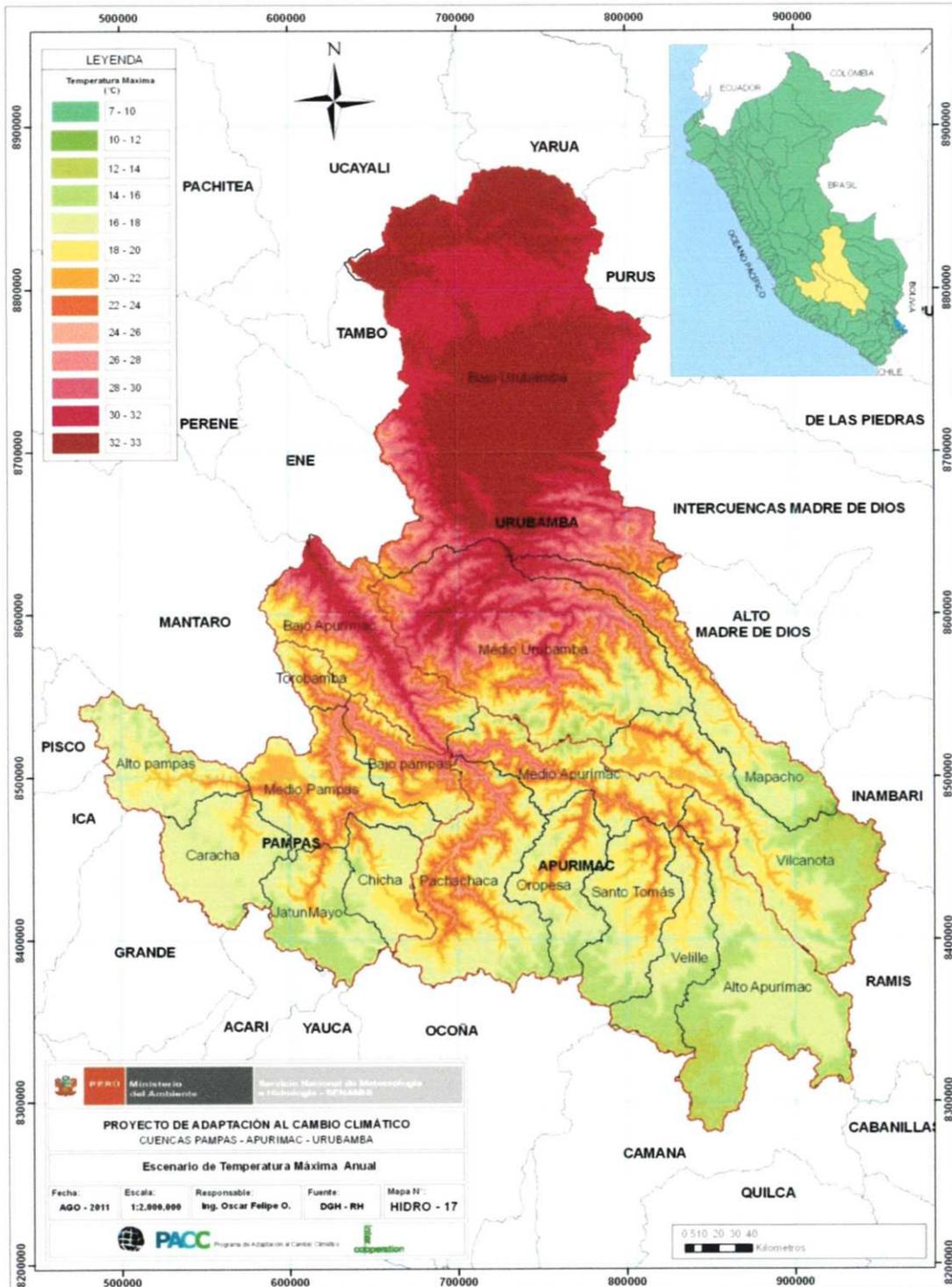


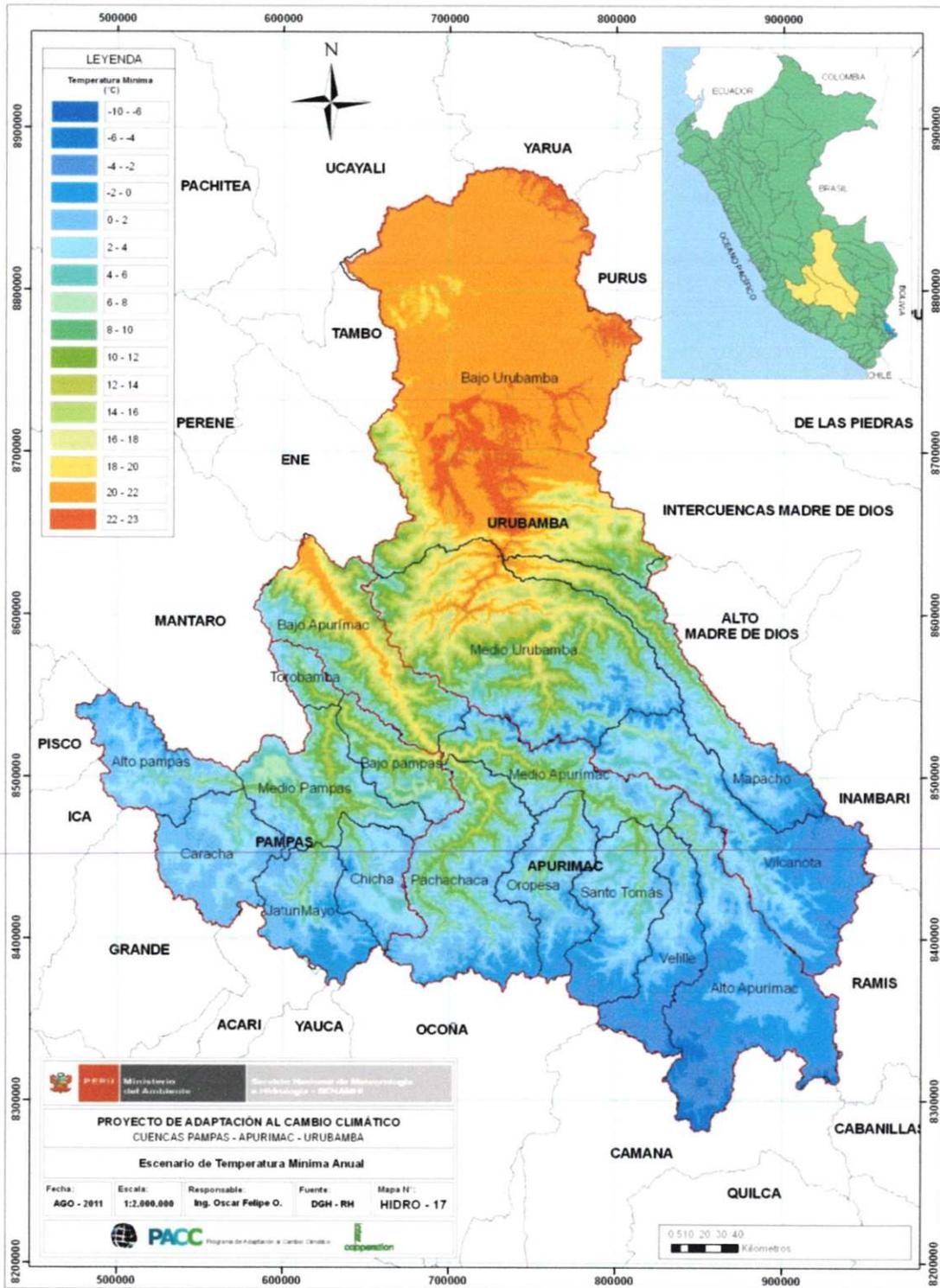


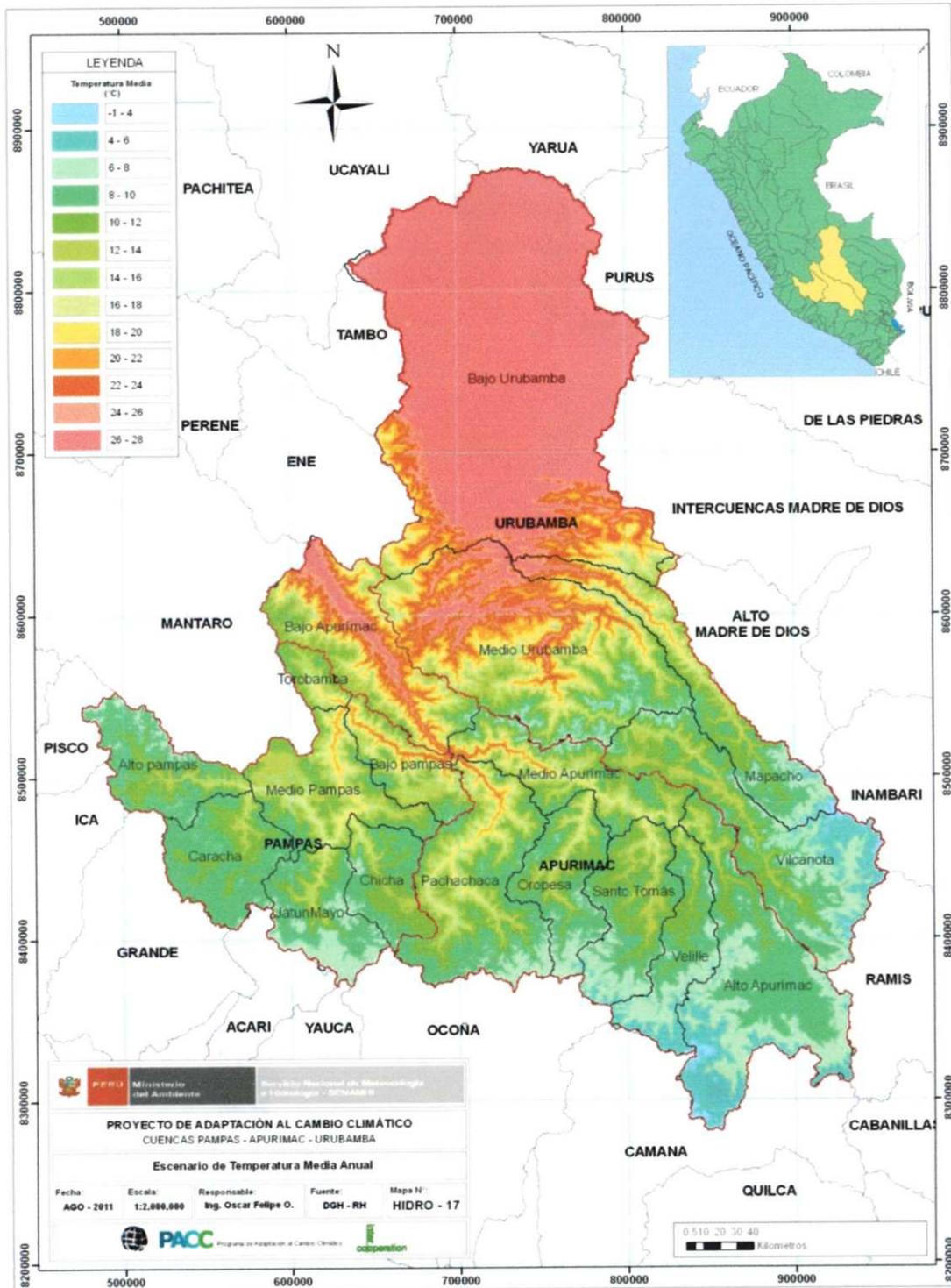


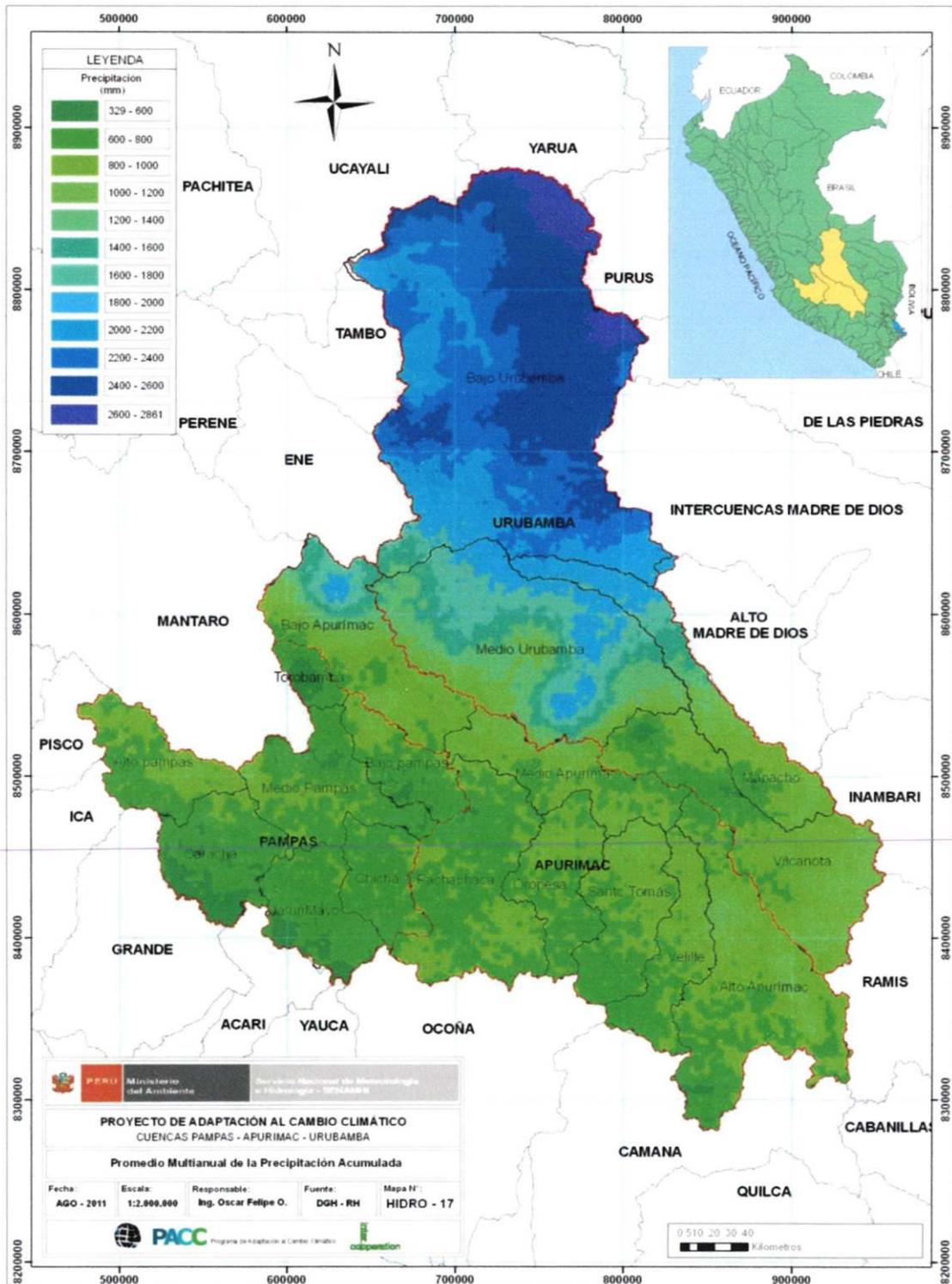


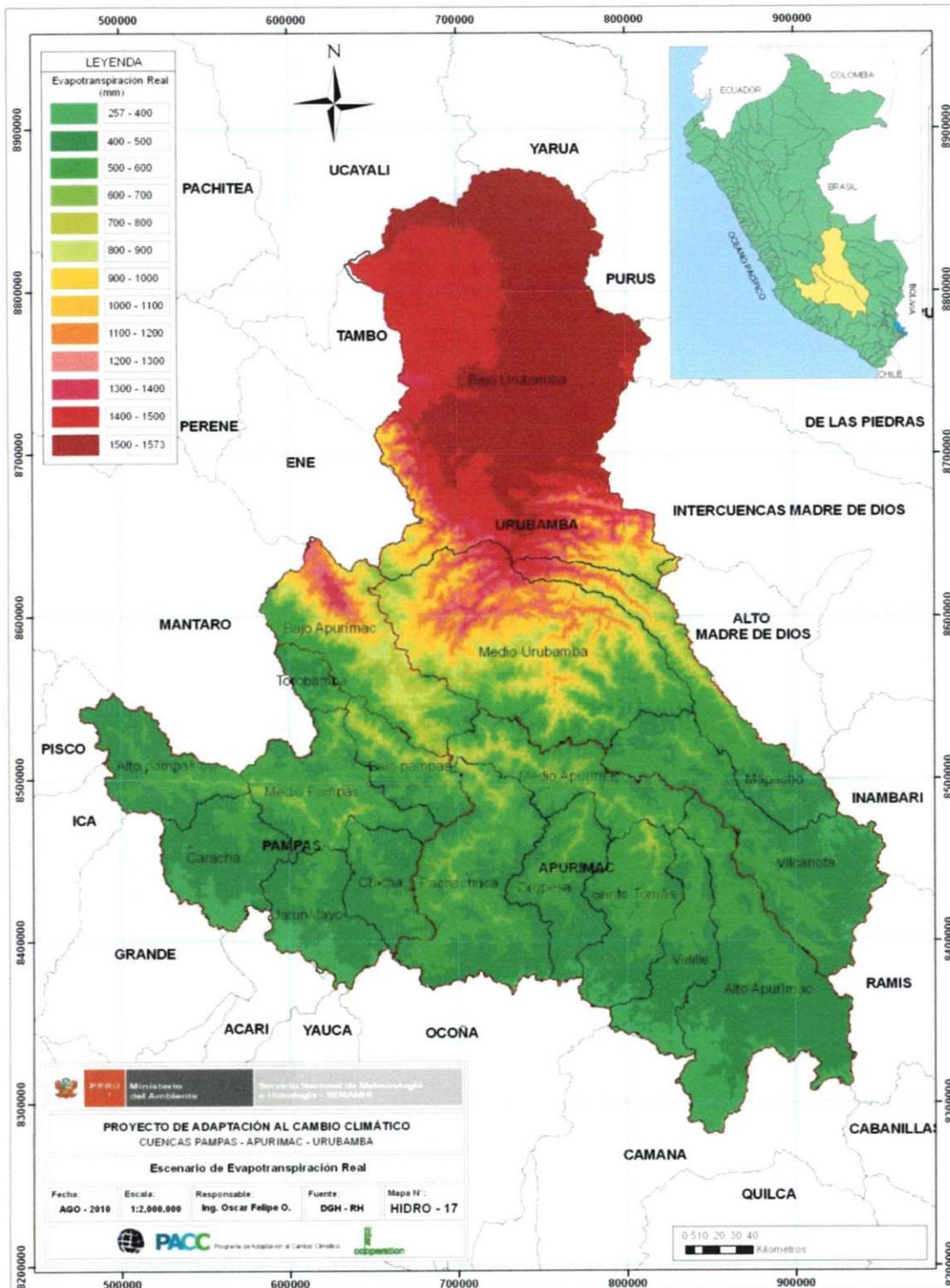
**MAPAS DE ESCENARIOS  
ANUAL (2015-2039)  
MODELOS MRI – ECHAM5**

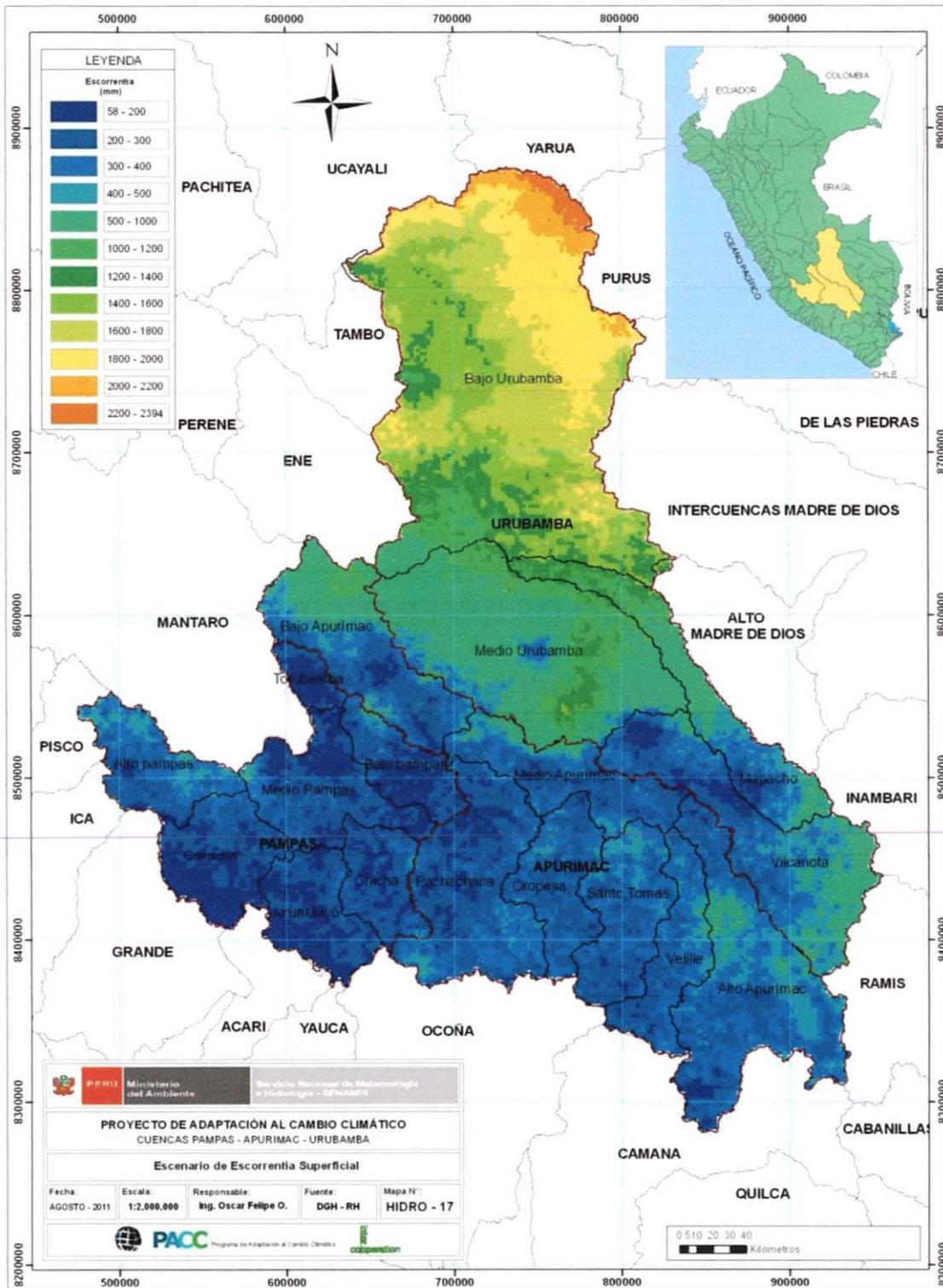












**MAPAS DE ANOMALIAS  
DEL HORIZONTE 2015-2039 CON RESPECTO AL  
PERIODO DE REFERENCIA 1970-2008  
MODELOS MRI – ECHAM5**

