

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD CLIMÁTICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS CHILLÓN, RÍMAC, LURÍN Y PARTE ALTA DEL MANTARO

RESUMEN EJECUTIVO

Amelia Y. Díaz Pabló, Presidente Ejecutiva - SENAMHI
Ramón A. Huapaya Raygada, Gerente General - SEDAPAL

COORDINADORES DEL PROYECTO

Oscar G. Felipe Obando - SENAMHI
Walter Molina Peralta - SEDAPAL

EQUIPO TÉCNICO

Dirección de Hidrología – DHI, SENAMHI

Ing. Oscar Felipe Obando
Director de Hidrología.

Mg. Sc. Julia Acuña Azarte
Sub director de Estudios e investigaciones hidrológicas.
Especialista en sequías y regionalización hidrológica.

Ing. Fernando Arboleda Orozco
Sub director de predicción hidrológica.
Especialista en hidrometría e instrumentación hidrometeorológica.

Dr. Waldo Lavado Casimiro
Especialista en hidroclimatología y cambio climático.

Dr. Wilson Suarez Alayza
Especialista en glaciología e hidrología de montaña.

Mg. Sc. Carlos Fernández Palomino
Especialista en geoestadística y regionalización hidrológica.

Ing. Jorge Carranza Valle
Especialista en hidrometría.

Bach. Tannia Sánchez Bernardo
Especialista en SIG.

Bach. Miriam Casaverde Riveros
Especialista en hidrología.

Bach. Sofía Endara Huanca
Especialista en teledetección.

Personal de apoyo:

Mg. Sc Eber Risco Sense
Especialista en hidroinformática.

Mg. Sc. Ruth Preciado Jerónimo
Especialista en gestión de recursos hídricos y cambio climático.

Ing. Sayuri Ramirez Vílca
Especialista en SIG y teledetección.

Bac. Jose Zevallos Ruiz
Especialista en programación.

Bach. Miguel Astorayme Valenzuela
Especialista en hidrología.

Bach. Henry Asencios Astorayme
Especialista en hidrología e hidráulica.

Bach. César Aybar Camacho
Especialista en riesgo hidroclimático.

Corrección de estilo y diseño

Lic. Morayma Sayán Vizcaro
Edición y corrección de estilo

Lic. Rosa Bermúdez Talavera
Diseño y diagramación

Apoyo administrativo

Téc. Dula Cruzate García
Lic. Jhakori Villar Soberón

Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental – DMA, SENAMHI

Lic. Luis Alfaro Lozano
Director de meteorología y evaluación ambiental atmosférica.

Ing. Gabriela Rosas Benancio
Sub directora de modelamiento numérico de la atmósfera modelamiento numérico.
Especialista en cambio climático.

Ing. Grinia Ávalos Roldán
Sub directora de predicción climática.
Especialista en caracterización y variabilidad climática.

Ing. Clara Oria Rojas
Subdirectora de gestión de datos.
Especialista en detección de cambios del clima.

Dr. Juan Bazo Zambrano
Especialista en variabilidad climática – ENOS.

Mg. Sc. Delia Acuña Azarte
Especialista en variabilidad climática, regionalización estadística y escenarios de cambio climático.

Ing. Félix Cubas Saucedo
Especialista circulación atmosférica.

Ing. Weidi Flores Villanueva
Especialista circulación atmosférica.

Ing. Miguel Vara Quispe
Especialista en climatología sinóptica – heladas meteorológicas.

Ing. Lourdes Menis Álvarez
Especialista en variabilidad climática – heladas.

Ing. Yuri Escajadillo Fernández
Especialista en variabilidad climática – Periodos secos y húmedos.

Ing. Kris Correa Marrou
Especialista en control de calidad de datos y homogenización de series climáticas – Periodos secos y húmedos.

Ing. Gustavo De La Cruz Montalvo
Especialista en variabilidad climática y regionalización estadística.

Lic. Marti Bonshoms Calvelo
Especialista circulación atmosférica.

Fis. Alan Llacza Rodriguez
Especialista en Modelamiento de cambio climático.

Fis. Gerardo Jácome Vergaray
Especialista en Modelamiento de cambio climático.

Lic. Miguel Saavedra Juan de Dios
Especialista en modelamiento climático-oceánico.

Lic. Jorge Llamoca Huamaní
Especialista en circulación atmosférica superficial

Ing. Vania Aliaga Nestares
Especialista en circulación atmosférica.

Personal de Apoyo

Ing. Arturo Chía Reynaga
Especialista en computación de alto rendimiento.

Bach. Fis. Guillermo Vílchez Shapiama
Especialista en modelamiento del tiempo

Bach. Fis. Edita Talledo Flores
Especialista en modelamiento del tiempo

CITA SUGERIDA:

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (2016), Vulnerabilidad Climática De Los Recursos Hídricos En Las Cuencas De Los Ríos Chillón, Rímac, Lurín Y Parte Alta Del Mantaro / Resumen Ejecutivo, Ediciones SENAMHI, Lima, Perú, 250 pp.

PRESENTACIÓN

En el marco del Convenio de Cooperación Técnica Interinstitucional celebrado entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - SEDAPAL se ha elaborado el "Estudio de Vulnerabilidad Climática de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro", el cual se planteó como objetivo realizar simulaciones hidrológicas de largo plazo para evaluar los potenciales impactos del Cambio Climático sobre la oferta y reserva del recurso hídrico en estas cuencas.

Así, describir la relación entre la variabilidad del clima y los recursos hídricos es sin duda un tema complejo de investigación, y más aún cuando se quiere determinar una proyección a futuro; en esta oportunidad el SENAMHI ha logrado este objetivo utilizando escenarios climáticos del CMIP5 (5to reporte del IPCC), procesar esta información a escala de cuenca, utilizando técnicas avanzadas de modelamiento numérico obteniendo de esta manera simulaciones de la oferta hídrica hasta el nivel de subcuencas.

Dentro de la ejecución del estudio se ha desarrollado una extensa información y metodologías sobre la caracterización hidroclimática actual y las proyecciones de la oferta hídrica en las cuencas de estudio con alcance hasta el año 2045. En base a los resultados obtenidos el estudio logra identificar las zonas que serán más afectadas por déficit o superávit hídrico, proponiendo para cada caso prácticas adaptativas para mejorar la capacidad de resiliencia frente a la variabilidad y el cambio climático.

Se espera que los resultados del estudio sean aprovechados para una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos, que garantice la sostenibilidad de las reservas de agua para la ciudad de Lima en las próximas décadas.

Contenido

1	Capítulo I: Introducción, Objetivos y Antecedentes	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Estructura del documento y alcances del estudio	2
1.4	Antecedentes.....	3
2	Capítulo II: Las bases teóricas y metodológicas del estudio	5
2.1	El marco teórico y conceptual	5
2.1.1	Variabilidad climática y cambio climático	5
2.1.1.1	Escenarios de emisiones	7
2.1.2	Modelos de circulación general de la atmósfera	9
2.2	El Marco Metodológico.....	11
2.2.1	Técnicas de downscaling.....	11
2.2.2	Análisis y crítica de datos hidrometeorológicos	14
2.2.2.1	Análisis exploratorio y detección de datos atípicos.....	14
2.2.2.2	Homogenización de series climáticas	15
2.2.3	Índices climáticos de eventos extremos	19
2.2.4	Validación de la precipitación estimada por satélite	19
2.2.5	Interpolación espacial.....	21
3	Capítulo III: Características físicas, registro de datos y procesamiento de la información, para el sistema de cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro	23
3.1	Entorno atmosférico	23
3.1.1	Circulación atmosférica regional.....	23
3.1.1.1	A nivel superficial.....	23
3.1.1.2	En atmósfera media	24
3.1.1.3	En alta atmósfera	25
3.1.2	Circulación atmosférica local	25
3.2	Entorno físico.....	26
3.2.1	Cuenca del río Rímac.....	26
3.2.1.1	Infraestructura	28
3.2.1.2	Lagunas represadas	30
3.2.2	Cuenca del río Chillón	31
3.2.2.1	Infraestructura	34
3.2.2.2	Fuentes de agua natural y artificial.....	35
3.2.2.3	Obras de regulación del río chillón	37
3.2.3	Cuenca del río Lurín	38
3.2.3.1	Fuentes de agua natural y artificial.....	41
3.2.3.2	El valle Lurín y la demanda de recurso hídrico.....	41
3.2.3.3	Obras de regulación del río Lurín	41
3.2.4	Cuenca alta del Mantaro.....	42
3.2.4.1	Proyectos de trasvases de agua hacia la cuenca del río Rímac.....	42

3.3	Información utilizada	52
3.3.1	Información cartográfica.....	52
3.3.2	Información climática e hidrológica.....	53
4	Capítulo IV: Variabilidad climática y caracterización hidroclimática de cuencas	56
4.1	Tendencias históricas de precipitación y temperatura.....	56
4.1.1	Temperatura media del aire	56
4.1.2	Precipitación	64
4.2	Caracterización y clasificación climática	75
4.2.1	Climatología de la precipitación y temperatura.....	79
4.2.1.1	Precipitación	79
4.2.1.2	Temperatura del aire	81
4.3	Régimen de caudales	88
4.3.1	Cuenca del río Rímac.....	88
4.3.2	Cuenca del río Chillón	89
4.3.3	Cuenca del río Lurín	90
4.3.4	Cuenca del río Mantaro	91
4.4	Análisis de periodos secos y húmedos.....	93
5	Capítulo V: La oferta hídrica superficial en el sistema de cuencas de los ríos Chillón, Rimac, Lurín y Alto Mantaro	104
5.1	La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Chillón	104
5.2	La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Rímac.....	107
5.3	La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Lurín	111
5.4	La oferta hídrica superficial en la cuenca del Alto Mantaro	112
6	Capítulo VI: Escenarios de cambio climático para el sistema de cuencas de los ríos Chillón-Rimac-Lurín y Alto Mantaro considerando, las salidas de los modelos climáticos globales	114
6.1	Anomalías y cambios proyectados de temperatura máxima promedio en las cuencas.....	116
6.2	Anomalías y cambios proyectados de temperatura mínima promedio en las cuencas	119
6.3	Anomalías y cambios estandarizados de precipitación promedio en las cuencas	121
7	Capítulo VII: Modelamiento climático regional	123
7.1	Comportamiento espacial de la precipitación anual y estacional según escenarios de 16 km	123
7.1.1	Análisis anual	123
7.1.2	Análisis estacional	124
8	Capítulo VIII: Modelamiento climático de alta resolución, en el dominio del sistema de cuencas	128
8.1	Cambios en la precipitación.....	129
8.2	Cambios en la temperatura máxima.....	131
8.3	Cambios en la temperatura mínima	134
8.4	La incertidumbre de los escenarios de precipitación de alta resolución	136
9	Capítulo IX: Resultados de la modelamiento de la disponibilidad hídrica, en el sistema de cuencas, basados en proyecciones del clima de alta resolución espacial.....	141
9.1	Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Chillón	142
9.2	Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac.....	144

9.3	Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lurín	145
10	Capítulo X: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo hidroclimático. Determinación y aplicación de índices para su evaluación, en el sistema de cuencas.....	147
10.1	Peligro a Sequías	148
10.2	Índice de riesgo de sequía (irs o dhi)	149
10.3	Peligro a erosión hídrica	150
10.4	Peligro a Inundaciones fluviales.....	150
10.4.1	Índice Topográfico de Humedad (ITH)	150
10.4.2	Índice Topográfico Modificado (ITM)	151
10.5	Vulnerabilidad.....	152
10.5.1	Índices de vulnerabilidad	153
10.5.1.1	Índice de Vulnerabilidad del Sistema Social (IVSS)	153
10.5.1.2	Índice de Vulnerabilidad del Sistema Productivo (IVSP)	153
10.5.1.3	Índice de Desarrollo tecnológico (IDT).....	154
10.5.1.4	Índice de Vulnerabilidad del Sistema Económico (IVSE).....	154
10.5.2	Estratificación de la vulnerabilidad.....	154
10.6	Estimación del Riesgo	154
10.7	Mapa de riesgos.....	156
11	Capítulo XI: Las propuestas de medidas de adaptación.....	172
11.1	Revisión de prácticas adaptativas recomendadas en la zona de estudio	173
11.1.1	Cercado de pastos naturales:.....	176
11.1.2	Pastoreo rotativo en pastos naturales.....	176
11.1.3	Restauración de humedales.....	177
11.1.4	Forestación y/o reforestación.....	177
11.1.5	Construcción de microreservorios	178
11.1.6	Reutilización de amunas	179
11.1.7	Zanjas de infiltración.....	179
11.1.8	Recuperación de andenes o terrazas.....	180
11.2	Evaluando intervenciones verde para abastecer de agua a Lima.....	181
11.3	Implementación de proyectos de infraestructura verde.....	181
11.4	Elaboración de las propuestas de adaptación	182
11.4.1	Propuestas globales	182
11.4.1.1	Infraestructura verde e infraestructura gris para la adaptación al cambio climático.....	182
11.4.2	Gobernabilidad	194
11.4.3	Propuesta Sector Agua Potable	197
12	Conclusiones y recomendaciones del estudio.....	199
12.1	Cuenca del río Rímac	199
12.2	Cuenca del río Chillón	200
12.3	Cuenca del río Lurín	200
12.4	Cuenca del río Mantaro	201
12.5	Recomendaciones.....	203

Lista de Figuras

Figura 2-1 Evolución anual de las emisiones de CO ₂ según los escenarios de GEI SRES de los reportes AR3 y AR4 del Special Report on Emission Scenarios del IPCC 2007 (izquierda), y en AR5 (derecha) son los nuevos escenarios Representative Concentration Pathways (RCPs) que han remplazado los escenarios de emisiones GEI SRES.....	8
Figura 2-2 Discretización horizontal y vertical de un Modelo de Circulación General (GCM) atmosférico y oceánico	10
Figura 2-3 Esquema de regionalización dinámica tomada del estudio de Escenarios Climáticos para el Perú para el año 2030.....	13
Figura 2-4 Esquema del procedimiento para la homogenización	17
Figura 2-5 Diagrama de flujo de la metodología para la interpolación espacial.....	22
Figura 3-1 De izquierda a derecha: Centrales Hidroeléctricas de Matucana, Huinco, Callahuanca, Moyopampa, Huampaní y Huanchor	29
Figura 3-2 Casa de máquinas y bocatomas: (a) Casa de máquinas de la C.H Canta, (b) Bocatoma de la C.H Canta, (c) Casa de máquinas de la C.H Yaso y (d) Bocatoma de la C.H Yaso.	35
Figura 3-3 Principales lagunas reguladas: (a) Laguna Chuchón con una capacidad de 9.36 MMC, (b) Laguna Azulcocha con una capacidad de 7.38 MMC, (c) Laguna Leoncocha con una capacidad de 3.04 MMC. y (d) Laguna Yanacocha con una capacidad de 1.23 MMC.	37
Figura 3-4 Cuenca Alta del Mantaro y sistema de regulación Marcapomacocha	42
Figura 3-5 Principales lagunas en el sistema de Marca: (a) Laguna Marcapomacocha, (b) Laguna Antacoto y (c) Laguna Marcacocha	42
Figura 3-6 Presa embalse Pomacocha y represa Huallacocha	43
Figura 3-7 Presa embalse Pomacocha y represa Huallacocha	44
Figura 3-8 Esquema hidráulico de la cuenca del río Rímac	46
Figura 3-9 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Chillón	47
Figura 3-10 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Rímac	48
Figura 3-11 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Lurín	49
Figura 3-12 Mapas hidrográfico de la cuenca del Alto Mantaro.....	50
Figura 3-13 Mapa de zonas de vida de la cuenca Alto Mantaro	51
Figura 3-14 Cartas del IGN para la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4-1 Señal de tendencia de la temperatura media del aire en las cuencas de interés de SEDAPAL, 1965-2015.	58
Figura 4-2 Señal de tendencia actual de la temperatura media del aire en estaciones convencionales 1965-2015	59
Figura 4-3 Tendencias actuales de la temperatura en la columna atmosférica entre 1.5 -5 Km y 5 - 12 Km, atmosfera superior adyacente a las cuencas media-alta y baja. Fuente: Elaboración autores. Datos: Reanalysis Era Interin 0.75°x0.75° de resolución espacial.....	60
Figura 4-4 Señal de tendencia de la precipitación en las cuencas de interés de SEDAPAL, 1965-2015.....	66
Figura 4-5 Señal de tendencia actual de la precipitación en estaciones convencionales en el área de influencia de las Cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro. 1965-2015.	70
Figura 4-6 Tendencias actuales de la humedad específica en la columna atmosférica entre 1.5 -5 Km y 5 - 12 Km, atmósfera adyacente a las cuencas media-alta y baja. Fuente: Autores. Datos: Reanalysis Era Interin 0.75°x0.75° de resolución espacial. La humedad específica mide la masa de agua que se encuentra en estado gaseoso en un kilogramo de aire húmedo, y se expresa en gramos por kilogramo de aire (g/kg).....	71
Figura 4-7 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones Yantac y Marcapomacocha.	72

Figura 4-8 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones Pariacancha y San Lázaro de Escamarca.	73
Figura 4-9 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones meteorológicas Ñaña y Von Humboldt.	74
Figura 4-10 Circulación atmosférica de verano e invierno sobre Sudamérica.	78
Figura 4-11 Mapa de clasificación climática de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y parte alta de la cuenca del río Mantaro.	79
Figura 4-12 Valores medios ponderados de la precipitación total anual y estacional en la parte Alta de las cuencas de los ríos R-Ch-L-M.	80
Figura 4-13 Climatología de la Precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Rímac	83
Figura 4-14 Climatología de la precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Chillón	84
Figura 4-15 Climatología de la precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Lurín	85
Figura 4-16 Climatología de la precipitación media en subcuencas del Alto mantaro	86
Figura 4-17 Mapa de temperatura máxima promedio anual del periodo 1981-2015	87
Figura 4-18 Mapa de la temperatura mínima promedio anual del período 1981-2015	87
Figura 4-19 SPI 3 -Febrero de 1965 al 2016 de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las cuencas en estudio y sus alrededores	94
Figura 4-20 SPI 3-Marzo de 1965 al 2016 de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las cuencas en estudio y sus alrededores	95
Figura 4-21 Patrón espacial del SPI-3 en feb-1992 y feb - 1984.....	97
Figura 4-22 Patrón espacial del SPI-3 feb-1968 y feb-2000	98
Figura 4-23 Patrón espacial del SPI-3 Feb-1990 y Feb-1998	99
Figura 4-24 Patrón espacial del SPI-3 Mar-1992 y Mar-1984	100
Figura 4-25 Patrón espacial del SPI-3 mar 1990 y mar-1967	101
Figura 4-26 Patrón espacial del SPI-3 mar 1968 y mar-1973	102
Figura 4-27 Patrón espacial del SPI-3 mar 1981 y mar-2001	103
Figura 5-1 Caudal promedio anual por subcuencas	105
Figura 5-2 Ubicación y Caracterización anual de los caudales de microcuencas del Sc-Alto Chillón	106
Figura 5-3 Ubicación y Caracterización anual de los caudales en microcuencas	107
Figura 5-4 Caudal promedio anual por subcuencas	108
Figura 5-5 Ubicación y caracterización anual de los caudales de microcuencas del Medio Rímac.	109
Figura 5-6 Ubicación y caracterización anual de los caudales de microcuencas	110
Figura 5-7 Caudal promedio anual por subcuencas	111
Figura 5-8 Ubicación y Caracterización anual de los caudales en microcuencas	112
Figura 5-9 Caudal promedio anual por subcuencas	113
Figura 6-1 Dispersión de las anomalías de temperatura máxima (°C) período 1981-2014 (reanálisis Era Interim en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo), de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores; y el promedio de estos, en línea negra gruesa. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5.	118
Figura 6-2 Dispersión de las anomalías de temperatura mínima (°C) en el período 1981-2014 (reanálisis Era Interim en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo), de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores; y el promedio de estos, en línea negra gruesa. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5.	120
Figura 6-3 Dispersión de las anomalías precipitación estandarizada del período 1981-2014 (reanálisis CRU en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo),	

de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5. 122

Figura 7-1 Mapa de precipitación MAM (marzo-abril-mayo) del periodo 2016 – 2045 125

Figura 7-2 Mapa de precipitación JJA (junio-julio-agosto) del periodo 2016 – 2045 126

Figura 7-3 Mapa de precipitación MAM (marzo-abril-mayo) del periodo 2016 – 2045 126

Figura 7-4 Mapa de precipitación JJA (junio-julio-agosto) del periodo 2016 – 2045 127

Figura 8-1 Cambios en la precipitación anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8.5 131

Figura 8-2 Cambios en la temperatura máxima anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8. 133

Figura 8-3 Cambios en la temperatura mínima anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8.5 135

Figura 8-4 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca alta del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 136

Figura 8-5 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 137

Figura 8-6 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 138

Figura 8-7 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca alta del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 139

Figura 8-8 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 139

Figura 8-9 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca baja del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual. 140

Figura 9-1 Ciclo anual de los caudales del río Chillón para diferentes quinquenios. 143

Figura 9-2 Ciclo anual de los caudales del río Rímac para diferentes quinquenios. 145

Figura 9-3 Ciclo anual de los caudales del río Lurín para diferentes quinquenios. 146

Figura 10-1 Modelo conceptual para el análisis del Peligro y Vulnerabilidad 147

Figura 10-2 Modelo Conceptual para el cálculo de la vulnerabilidad 153

Figura 10-3 Metodología para la Estimación del Riesgo hidroclimático	155
Figura 10-4 Matriz de Vulnerabilidad.....	156
Figura 10-5 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Rímac	164
Figura 10-6 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Chillón	165
Figura 10-7 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Lurín	166
Figura 10-8 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Alto Mantaro	167
Figura 10-9 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Rímac	168
Figura 10-10 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Chillón	169
Figura 10-11 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Lurín	170
Figura 10-12 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Lurín	171
Figura 11-1 Mapa de calificación del Rendimiento hídrico de la zona de estudio.....	173
Figura 11-2 Zonas de intervención en la cuenca del río Rímac	182
Figura 11-3 Ubicación de microcuencas Acocancha y Sorau	184
Figura 11-4 Mapa de ubicación de las microcuencas Naciente y Patarhuanca	185
Figura 11-5 Mapa de ubicación de las microcuencas de Santa Eulalia	187
Figura 11-6 Mapa de ubicación de la microcuenca Alto Rímac	188
Figura 11-7 Mapa de ubicación microcuenca Rímac.....	189
Figura 11-8 Mapa de ubicación de microcuencas Pancha y Canchacalla.....	190
Figura 11-9 Mapa de ubicación de microcuenca San José de Parac	191
Figura 11-10 Mapa de ubicación de microcuenca Canchahuara	192
Figura 11-11 Mapas de ubicación subcuenca Medio Alto Lurín	193
Figura 11-12 Mapa de ubicación subcuenca 499695.....	194
Figura 11-13 Principios base para una efectiva planificación en cambio climático	196

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Características principales de Representative Concentration Pathways (RCPs)	9
Tabla 2-2 Escalas temporales y espaciales de los modelos numéricos	10
Tabla 3-1 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Rímac	27
Tabla 3-2 Cuadro resumen, centrales hidroeléctricas en la cuenca del río Rímac.....	30
Tabla 3-3 Aportes de recurso hídrico a la cuenca del río Rímac	30
Tabla 3-4 Resumen de las 15 lagunas represadas en la cuenca del río Rímac	30
Tabla 3-5 Provincias y sus distritos en la cuenca del río Chillón	31
Tabla 3-6 Unidades hidrográficas del río Chillón	31
Tabla 3-7 Centrales Hidroeléctricas en la cuenca del Chillón	34
Tabla 3-8 Principales lagunas reguladas en la cuenca del río Chillón	36
Tabla 3-9 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Lurín	38
Tabla 3-10 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Lurín	40
Tabla 3-11 Registros de áreas agrícolas en las cuencas de Rímac-Chillón-Lurín	41
Tabla 3-12 Cuadro resumen de los proyecto Marcapomacocha	45
Tabla 3-13 Estaciones meteorológicas utilizadas y ubicadas en el entorno regional de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro	55
Tabla 4-1 Tendencia de la temperatura media del aire en °C/década.....	61
Tabla 4-2 Tendencia de la temperatura máxima del aire en °C/década	62
Tabla 4-3 Tendencia de la temperatura mínima del aire en °C/década	63
Tabla 4-4 a) Tendencia de la precipitación en porcentaje (%)	67
Tabla 4-5 b) Tendencia de la precipitación en porcentaje (%).....	68
Tabla 4-6 Caracterización anual de los caudales del río Rímac en régimen natural	88
Tabla 4-7 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Rímac	88
Tabla 4-8 Comportamiento de los caudales del río Rímac en años normales, secos y húmedos	88
Tabla 4-9 Caudales característicos del río Rímac para diferentes niveles de persistencia	89
Tabla 4-10 Caracterización anual de los caudales del río Chillón	90
Tabla 4-11 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Chillón	90
Tabla 4-12 Comportamiento de los caudales del río Chillón en años normales, secos y húmedos.....	90
Tabla 4-13 Caudales característicos del río Chillón para diferentes niveles de persistencia	90
Tabla 4-14 Caracterización anual de los caudales del río Lurín	91
Tabla 4-15 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Lurín	91
Tabla 4-16 Comportamiento de los caudales del río Lurín en años normales, secos y húmedos.....	91
Tabla 4-17 Caudales característicos del río Lurín para diferentes niveles de persistencia	91
Tabla 4-18 Caracterización anual de los caudales del río Mantaro	92
Tabla 4-19 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Mantaro	92
Tabla 4-20 Comportamiento de los caudales del río Mantaro en años normales, secos y húmedos.....	92
Tabla 4-21 Caudales característicos del río Mantaro para diferentes niveles de persistencia	92
Tabla 6-1 Datos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de escala global provenientes de modelos climáticos pertenecientes al CMIP5 en sus experimentos historial 1981-2005, escenarios de emisión de GEI RCP4.5 y RCP8.5 período 2016-2045 y de reanálisis Era-Interim para las temperaturas y CRU para precipitación	115
Tabla 6-2 Modelos con mejor representación de los patrones atmosféricos sobre Sudamérica	116
Tabla 9-1 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca del Chillón.....	143
Tabla 9-2 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca del Rímac	144
Tabla 9-3 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca Lurín.....	146

Tabla 10-1 Peso y peso de frecuencia asignado a cada clase de sequía en función de los porcentajes de Frecuencias.	148
Tabla 10-2 Clasificación de sequías.	149
Tabla 10-3 Niveles de Peligro a erosión hídrica por distrito	157
Tabla 10-4 Niveles de Peligro a Inundación fluvial por distrito.....	158
Tabla 10-5 Niveles de Peligro a Sequía (SPI-6) por distrito	159
Tabla 10-6 Niveles de Peligro a Sequía (SPI-12) por distrito	160
Tabla 10-7 Niveles de Peligro a Sequía (DHI-6 Y DHI-12) por distrito	161
Tabla 11-1 Beneficios de proyectos adaptativos	174

1 Capítulo I: Introducción, Objetivos y Antecedentes

1.1 Introducción

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi y el Servicio de Agua Potable y alcantarillado de Lima - Sedapal, suscribieron en el 2014 un convenio de cooperación técnica para ejecutar el estudio de Vulnerabilidad Climática de los Recursos Hídricos de las cuencas Rímac, Chillón, Lurín y parte Alta del Mantaro. Dicho estudio se proyectó culminar en 27 meses dada la diversidad de la temática demandada en los Términos de referencia del convenio con mayor énfasis en la simulación de escenarios climáticos de alta resolución. Durante este periodo se elaboraron 10 informes temáticos de avance y el informe consolidado final materia de esta presentación. Para la entrega de dichos informes se tuvo una programación y los contenidos temáticos de dichos informes se ajustaron a los términos de referencia del convenio específico de cooperación técnica antes aludido. El Senamhi aportó en este trabajo toda su experiencia en los temas desarrollados convocando sus recursos humanos calificados del área de meteorología e hidrología, al cual se sumaron luego un equipo de jóvenes profesionales que brindaron el soporte y asistencia necesarios para el desarrollo de tareas específicas, como modelamiento numérico, crítica y control de datos, programación, soporte SIG y teledetección.

El estudio culminado cubre un amplio espectro de la hidroclimatología de dichas cuencas, como son la caracterización física, climática e hidrológica; el análisis de la variabilidad climática e hidrológica; la evaluación de los impactos de los Eventos El Niño y la Niña; el análisis de los eventos extremos; la caracterización del riesgo de sequías e inundaciones; la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica; la determinación de índices de alteración hidrológica y Cambio climático. Esta copiosa información generada ha sido sintetizada en Atlas hidrológicos de cuencas y fichas técnicas climáticas e hidrológicas en formato de mapas, gráficos y tablas de fácil lectura e interpretación. Una plataforma web con los principales resultados del estudio también ha sido disponibilizada para Sedapal.

El soporte e infraestructura computacional del Senamhi puesta al servicio de este estudio fue fundamental para la corrida de los modelos climáticos de alta resolución, las primeras salidas dinámicas a 16 km y las salidas finales a 5km. La etapa del modelamiento numérico de alta resolución fue la más extensa en todo el estudio lo cual demandó una inversión de tiempo de casi 12 meses para realizar las simulaciones dinámicas del clima futuro proyectada a escala de cuenca. Este tipo de simulación de alta resolución se implementa por primera vez en el Perú y los resultados obtenidos, en cierta medida tienen menor rango de incertidumbre, tal como es explicado en el capítulo correspondiente de modelamiento climático de alta resolución.

Finalmente el estudio aporta información actualizada sobre el estado de la disponibilidad hídrica en estas cuencas y su proyección futura centrada al año 2030 (2016-2045), basado en Escenarios climáticos de alta resolución. Esta información servirá de base para el planeamiento y gestión de la oferta hídrica superficial en estas cuencas para un mediano y largo plazo. A diferencia de otros estudios realizados sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, en esta oportunidad se ha utilizado los escenarios del CMIP5 (5to reporte del IPCC) y las proyecciones climáticas y de disponibilidad hídrica han sido agrupados en quinquenios con una mejora sustancial de la resolución

espacial de estas proyecciones, compatibles con las escalas hidrológicas de cuenca y subcuencas para un mejor análisis de su vulnerabilidad y consistencia de las propuestas de prácticas adaptativas frente a la variabilidad y el cambio climático.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la vulnerabilidad climática de las aguas superficiales de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y alto Mantaro para sistematizar la afectación sobre su disponibilidad y reserva frente a la aceleración del cambio climático.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Desarrollar una base de datos consistenciada de las variables climáticas e hidrológicas
- b) Realizar el diagnóstico físico de las cuencas de estudio
- c) Determinar la caracterización climática de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro
- d) Caracterizar la disponibilidad hídrica presente y proyectar la disponibilidad hídrica superficial para el horizonte centrado al 2030 (considerando el período 2016-2045)
- e) Evaluar en forma integral los impactos del cambio climático en el sistema de recursos hídricos superficiales
- f) Identificar y evaluar las microcuencas, subcuencas y cuencas vulnerables al cambio climático.
- g) Elaborar indicadores de vulnerabilidad ante eventos extremos : sequías e inundaciones
- h) Proponer medidas estratégicas de adaptación al cambio climático en cuencas más vulnerables

1.3 Estructura del documento y alcances del estudio

El documento final ha sido organizado en III volúmenes constituidos por Capítulos I al XI. En el Volumen I se integra toda la información base que sustenta todo el análisis y resultados obtenidos. En el Volumen II se integra la información que representa el diagnóstico de las condiciones del clima y la disponibilidad hídrica presente. Finalmente en el Volumen III se consolida todos los resultados obtenidos respecto a las condiciones del clima y disponibilidad hídrica proyectados para el período 2016-2045.

Volumen I: Antecedentes, bases teóricas, descripción, delimitación y caracterización climática e hidroclimática para el dominio del sistema de cuencas de los ríos Chillón-Rímac-Lurín-Parte alta del Mantaro, de interés para Sedapal. Este volumen I, incluye los siguientes capítulos:

Capítulo I: Introducción, Objetivos y Antecedentes.

Capítulo II: Las Bases teóricas y metodológicas.

Capítulo III: Características físicas, registro de datos y procesamiento de la información, para el sistema de cuencas de los ríos chillón, rímac, lurín y parte alta del Mantaro.

Volumen II: Análisis de la variabilidad climática, caracterización hidroclimática, resultados del estudio de la oferta hídrica superficial. Este volumen II incluye los siguientes capítulos:

Capítulo IV: Variabilidad climática y caracterización hidroclimática de cuencas

Capítulo V: Oferta hídrica superficial en el sistema de cuencas de los ríos chillón, rímac, lurín y alto Mantaro

Volumen III: Resultados obtenidos en base a escenarios de cambio climático, considerando modelos globales, regionales y de alta resolución, estudio del peligro, vulnerabilidad, riesgo hidroclimático y aplicación de índices para su evaluación en el sistema de cuencas. Propuestas de adaptación frente al cambio climático. Este volumen III incluye los siguientes capítulos:

Capítulo VI: Escenarios de cambio climático para el sistema de cuencas de los ríos chillón-rímac-lurín y alto mantaro considerando, las salidas de los modelos climáticos globales

Capítulo VII: Modelamiento climático regional

Capítulo VIII: Modelamiento climático de alta resolución en el dominio del sistema de cuencas

Capítulo IX: Resultados de la modelamiento de la disponibilidad hídrica, en el sistema de cuencas, basados en proyecciones del clima a alta resolución espacial

Capítulo X: Peligro, vulnerabilidad y riesgo hidroclimático

Capítulo XI: Propuestas de medidas de adaptación al cambio climático en el dominio del sistema de cuencas

1.4 Antecedentes

En este apartado de los antecedentes, el equipo de trabajo consideró conveniente incluir una revisión general del estado del arte del modelamiento climático e hidrológico en el Perú centrados en los principales estudios relacionados a la temática del cambio climático y sus impactos en los recursos hídricos; en cada caso se describe sus alcances, metodología y principales resultados. De esta revisión se destaca los pioneros trabajos que se realizó con la ex oficina del Consejo Nacional del Ambiente-CONAM hasta la tercera comunicación nacional de cambio climático, culminado el 2015 bajo el auspicio del Ministerio del Ambiente-MINAM.

En el año 2003 se inicia el primer estudio de cambio climático en el Perú en el marco del Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire – PROCLIM del CONAM y donde el Senamhi a través de su Dirección General de Meteorología realiza un esfuerzo interinstitucional, con el auspicio del gobierno holandés desarrollando el estudio Escenarios del Cambio Climático en el Perú al 2050 - Cuenca del Río Piura. Este estudio es el primer trabajo científico a nivel de cuenca basado en simulaciones numéricas. En el 2009, el MINAM publica los resultados de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático con proyecciones del clima y de la disponibilidad de agua para los años 2020 y 2030, elaborados por el Senamhi. Al año siguiente se publica los escenarios climáticos en las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba. En esta línea merece mencionar dos proyectos emblemáticos para Perú que fueron el Proyecto de Adaptación al impacto del retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA el cual se gestó el año 2008 y culminó el 2011, siendo su área de intervención las subcuencas glaciares de Shullcas (Junín) y Santa Teresa (Cusco); el 2009 se gesta el Programa de Adaptación al Cambio Climático en las regiones de Cusco y Apurímac-PACC, en el cual se aborda una extensa investigación multidisciplinaria sobre el clima, la Gestión del Agua, Seguridad Alimentaria y la Gestión de Riesgos.

En el 2015, se concluye la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. El componente hidrológico fue elaborado por el Senamhi, y tuvo como objetivo principal la actualización de los escenarios nacionales de disponibilidad hídrica, para lo cual se tomó como base las proyecciones del clima del quinto informe del IPCC CMIP5 que incluye los nuevos escenarios de emisiones, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). En la evaluación del clima y la disponibilidad de agua presente, se aborda desde la caracterización de las variables hidroclimáticas como la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, evapotranspiración potencial y escorrentía superficial, correspondiente a dos períodos de referencia 1970-1999 y 1980-2009. En la evaluación del clima y la disponibilidad de agua futura, se hace las proyecciones de estas variables hidroclimáticas hacia el año 2050, teniendo en cuenta las proyecciones de dos modelos climáticos CNRM (Centro Europeo) y MPI (Instituto Max Plank de Alemania) para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

2 Capítulo II: Las bases teóricas y metodológicas del estudio

En este capítulo se aborda una amplia revisión sobre el marco teórico-conceptual y metodológico que sustenta el estudio. Aspectos conceptuales y definiciones básicas sobre la variabilidad y el cambio climático, los escenarios de emisiones, los modelos de circulación general de la atmósfera, los modelos hidrológicos para la simulación de la disponibilidad hídrica, entre otros, son presentados como marco teórico introductorio obligado para conectar al lector con los demás capítulos del estudio. Con respecto al marco metodológico, en éste se describe los diversos procedimientos, técnicas numéricas y modelos matemáticos utilizados en el análisis, control de calidad, homogenización de los datos hidrometeorológicos; la regionalización de las variables hidroclimáticas, las técnicas de interpolación espacial, las aplicaciones del sensoramiento remoto; las técnicas de reducción escala de los modelos climáticos y las simulaciones hidrológicas de la disponibilidad hídrica. A continuación se describe una síntesis del marco teórico y metodológico antes aludido.

2.1 El marco teórico y conceptual

2.1.1 Variabilidad climática y cambio climático

De acuerdo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC), el cambio climático se define como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada en el largo plazo.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima que persiste durante un periodo largo de tiempo (normalmente decenios o incluso más), debido a su variabilidad natural o como resultado de actividades humanas, que comparado con el estado medio del clima se refiere a una importante variación estadística que persiste en el largo plazo.

Mientras que la variabilidad climática se refiere a las variaciones en el estado medio del clima en todas las escalas temporales y espaciales más allá de fenómenos meteorológicos determinados (olas de calor, frío, friajes, veranillos, lluvias intensas) o climáticas (El Niño Oscilación del Sur, heladas, períodos secos y húmedos) que pueden deberse a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en forzamientos antropogénicos (variabilidad externa). Si esta variabilidad se exagera (aumentos en frecuencia e intensidad en el tiempo) puede ocasionar cambios en el clima.

La diferencia entre la variabilidad climática y cambio climático radica en la escala temporal del comportamiento anormal del clima, el primero es transitorio y el segundo perdura en el tiempo o es observado en una escala mayor de tiempo.

En el Perú, los estudios de variabilidad y escenarios de cambio climático vienen siendo desarrollados desde el 2003 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Estos se han realizado a nivel

nacional y por cuencas y microcuencas priorizadas para el desarrollo de evaluaciones integradas de vulnerabilidad y adaptación. Estudios relevantes como escenarios en la cuenca del río Piura en el marco del Proyecto PROCLIM (SENAMHI, 2005), Mantaro (CONAM-IGP, 2005a), Santa (SENAMHI, 2005 a y b) fueron realizados. En el 2007, Urubamba en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales - PRAA (SENAMHI, 2007 a) y Mantaro (SENAMHI, 2007 b). En el 2009 la segunda fase del Proyecto PRAA con el atlas climático y la generación de escenarios en las cuencas de los ríos Urubamba y Mantaro a horizonte cercano 2030 (SENAMHI, 2012 a, b). Los escenarios nacionales de cambio climático (MINAM, 2010), y en el marco del Programa de Adaptación al Cambio Climático – PACC (SENAMHI, 2012) se genera el estudio de variabilidad climática y escenarios de cambio climático 2030 y 2050 para las Regiones Cusco y Apurímac. En el 2013 escenarios para las microcuencas de Santo Tomás y Challhuahuacho (SENAMHI, 2013).

Existen pocos estudios sobre la variabilidad climática en las cuencas del Rímac y Mantaro, entre los cuales se encuentra el estudio de variabilidad climática y eventos extremos de Ibáñez M. & Gómez (1990) y Martínez A. (1991), quienes dan un detallado informe sobre los desastres ocurridos en la cuenca del río Rímac.

Silva et al. (2006), muestran que las temperaturas extremas del aire en la cuenca del río Mantaro, están teniendo una tendencia positiva de aumento en los últimos 50 años con valores de (+0,24 °C/década) y (+0.28 °C/década) para la temperatura máxima y mínima respectivamente. En tanto que las precipitaciones muestran que está teniendo una ligera tendencia negativa o de disminución de 3% por década. Asimismo nos muestra que la frecuencia de heladas en la zona ha tenido una tendencia de incremento en los últimos 40 años.

Silva et al. (2008), realiza una clasificación de años secos y húmedos en la estación lluviosa, en la cuenca del río Mantaro, esta clasificación determinan a partir del índice estandarizado de precipitación (SPI) y datos de mensuales de precipitación de 38 estaciones meteorológicas, desde 1970 – 2004. Los resultados muestran que los períodos húmedos se presentaron desde inicios de los 70's, hasta la primera mitad de los 80's. En tanto que los períodos secos fueron más frecuentes entre la segunda mitad de los 80's hasta los 90's.

Lagos et al. (2008). Analiza la relación de las precipitaciones con índices oceánicos del ENSO para 44 estaciones a nivel nacional, los resultados muestran una alta correlación de la índices Niño1+2, 3.4, en tanto que con el niño 4 se tiene una débil señal en las estaciones del norte del país, en tanto que en la zona de las cuenca de los ríos Rímac y Mantaro, para los meses de febrero-marzo-abril (FMA) se tiene una modera correlación negativa con los índices 3.4 y 4.

SENAMHI (2009), elabora un informe técnico “Escenarios climáticos en la cuenca del río Mantaro para el año 2100”, en este estudio se muestra detalladamente la climatología de temporal y espacial de la cuenca del río Mantaro, para las variables precipitación y temperaturas extremas del aire. Asimismo muestra un amplio estudio de eventos extremos en la zona, así como tendencias climáticas y escenarios futuros para la cuenca de las variables antes mencionadas.

Silva et al. (2010), hace un estudio sobre la variabilidad de las precipitaciones a escala de tiempo que abarca, la variabilidad estacional, interanual y decadal, así como las tendencias climáticas.

IGP (2012), cuenta con estudios realizados en la cuenca del río Mantaro, como parte del proyecto MAREMEX, incluye los resultados vinculados al análisis físico de los eventos meteorológicos extremos y el clima en el valle del Mantaro.

SENAMHI (2012), elabora un informe técnico “Altas climático para cuenca del río Mantaro”, en este estudio se muestra detalladamente la climatología temporal y espacial de temperatura y precipitación.

Lavado et al. (2013) analiza el impacto de las descargas de ríos a nivel nacional y su relación con el ENSO, clasificando este mediante el índice de oscilación del sur, los resultados de este artículo nos muestra un incremento de los caudales en los ríos Rímac y Mantaro, durante los eventos La Niña moderada y fuerte.

Escenarios de emisiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de los sistemas dinámicos muy complejos determinados por fuerzas impulsoras como el desarrollo demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta.

En este contexto, los escenarios de emisiones de GEI son imágenes alternativas de cómo podría desarrollarse en el futuro, y son instrumentos apropiados para analizar cómo las fuerzas impulsoras pueden influir en las emisiones futuras y evaluar las incertidumbres asociadas. Estos escenarios ayudan en el análisis del cambio climático, incluyendo la modelización del clima, la evaluación de los impactos, la adaptación y la mitigación (IPCC, 2000).

Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro nuevos escenarios denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total, para el año 2100 relativo a 1750, esto es, 2,6 W/m² en el escenario RCP2,6; 4,5 W/m² en el escenario RCP4,5; 6,0 W/m² en el escenario RCP6,0, y 8,5 W/m², en el caso del escenario RCP8,5.

Estos valores son indicativos, según el Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, el forzamiento climático resultante de todos los impulsores del cambio climático (las sustancias y los procesos naturales y antropogénicos que alteran el balance energético de la Tierra) varía entre los distintos modelos, debido a las características propias del modelo y al modo específico en que se consideran los elementos de forzamiento climático de corta vida.

Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación de emisiones de GEI conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de GEI (RCP8,5). Estos escenarios pueden representar una variedad de

políticas climáticas del siglo XXI, frente Informe Especial de Escenarios de Emisiones (IEEE) del IPCC (Nakicenovic et al., 2000), que no contemplaban políticas climáticas, y que fueron utilizados en el Tercer y Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR3 y AR4), ver Figura 2-1.

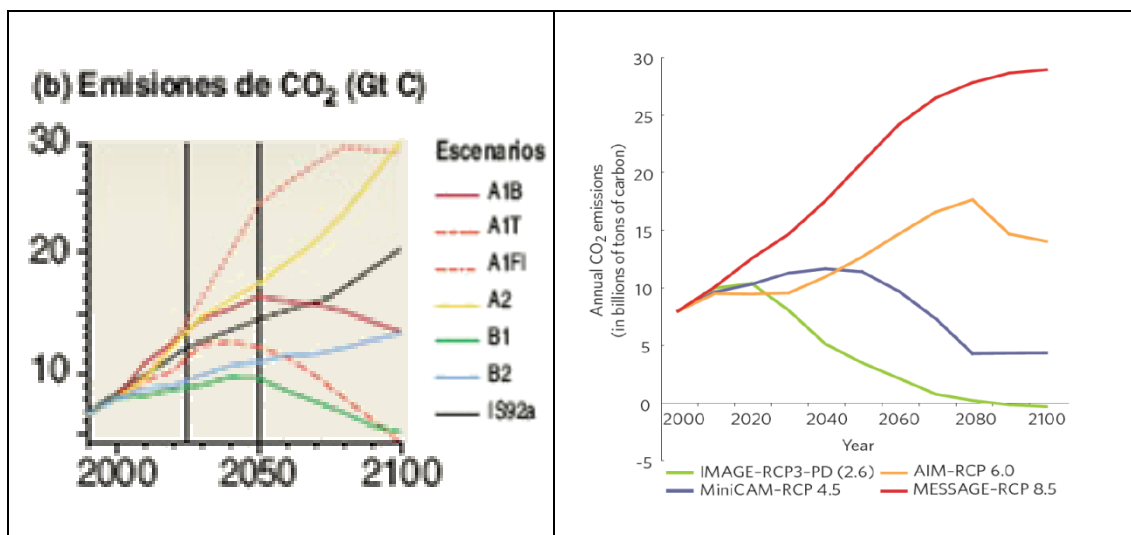


Figura 2-1 Evolución anual de las emisiones de CO₂ según los escenarios de GEI SRES de los reportes AR3 y AR4 del Special Report on Emission Scenarios del IPCC 2007 (izquierda), y en AR5 (derecha) son los nuevos escenarios Representative Concentration Pathways (RCPs) que han reemplazado los escenarios de emisiones GEI SRES

Fuente: IPCC 2007 (Izq.),

Los escenarios de RCPs se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono. Si bien los escenarios de RCPs abarcan una amplia gama de valores de forzamiento radiativo total, en ellos no se considera todo el abanico de emisiones, especialmente los aerosoles. La mayoría de las simulaciones de la CMIP5 y de los modelos del sistema Tierra se han llevado a cabo con concentraciones definidas de CO₂ que, para el año 2100, alcanzarán 421 ppm (RCP2,6), 538 ppm (RCP4,5), 670 ppm (RCP6,0) y 936 ppm (RCP8,5). Teniendo también en cuenta las concentraciones definidas de CH₄ y N₂O, las concentraciones de CO₂ equivalente combinadas corresponden a 475 ppm (RCP2,6), 630 ppm (RCP4,5), 800 ppm (RCP6,0) y 1 313 ppm (RCP8,5).

En lo que respecta al escenario RCP8.5, se han llevado a cabo simulaciones adicionales, integrando los CMIP5 y modelos del sistema Tierra con las emisiones definidas de CO₂ proporcionadas por los modelos de evaluación integrados (IPCC, 2013).

Tabla 2-1. Características principales de Representative Concentration Pathways (RCPs)

Características de los RCPs	Escenario			
	RCP 2.6 W/m ² ~490 CO ₂ -equiv antes del 2100, después desciende	RCP 4.5 W/m ² ~650 CO ₂ -equiv con estabilización después del 2100	RCP 6.0 W/m ² ~850 CO ₂ -equiv con estabilización después del 2100	RCP 8.5 W/m ² >1370 CO ₂ -equiv en el 2100.
Emisión de GEI	Muy baja	Mitigación media-baja	Mitigación alta	Mitigación muy alta
Área de agricultura	Medio para cultivo y pastos	Muy bajo para ambos	Medio para cultivo, pero bajo para pastos	Medio para cultivo y pastos
Contaminación del aire	Media-baja	Media	Media	Media-alta
Otras características	Crecimiento de población mundial medio, crecimiento medio de PBI, tecnologías de almacenamiento de carbono y disminución de emisiones a partir del 2020.	Crecimiento de población hasta el 2065. Crecimiento de PBI en una orden magnitud y el uso de energía en 3 órdenes. Uso de políticas climáticas para fijar el precio de uso de carbono.	Crecimiento de la población hasta el 2100. Un crecimiento del PBI hasta el 2060. Las políticas climáticas inician en el 2060.	Altas emisiones de gases invernaderos. Crecimiento alto de población bajo crecimiento de PBI. Modestos cambios tecnológicos y deficiente uso de la energía.
Centro Internacional de Desarrollo	IMAGE (Holanda)	GCAM (USA)	AIM (Japón)	MESSAGE (Austria)

Fuente: Elaboración propia

En resumen, los cuatro RCPs deben sus nombres al forzamiento radiativo que producen al 2100, y son las condiciones de borde de los GCMs que son la respuesta climática a estos forzantes. Sin embargo, algunos de los GCMs no incluyen un ciclo de carbono completo, las emisiones deben pasar por modelos biogeoquímicos para calcular las emisiones y la trayectoria de las “concentraciones” de GEI.

Las concentraciones atmosféricas de GEI y los cambios en el uso de suelo producen un forzamiento radiativo con el cual los modelos simulan los procesos del sistema climático y obtienen una señal de respuesta medida en una gran cantidad de variables, como por ejemplo el cambio en la temperatura o la precipitación (Rojas, 2012).

2.1.2 Modelos de circulación general de la atmósfera

Los modelos de Circulación General (GCMs, siglas en inglés) son una herramienta útil en el estudio de los patrones y evolución de las condiciones atmosféricas. Los patrones de circulación atmosférica, tienen diferentes aspectos, dependiendo de la escala espacial y temporal que se quiera estudiar. Para cada escala espacial o temporal, es recomendable el uso de un determinado modelo, que es el óptimo para la resolución de un problema en particular.

En la Tabla 2-2, se han clasificado las escalas temporales y espaciales de los GCMs, mostrándose que para períodos mayores a 3 días de pronóstico es recomendable el uso de modelos globales.

Tabla 2-2 Escalas temporales y espaciales de los modelos numéricos

Tiempo de previsión	Escala temporal	Modelo numérico	Resolución espacial
Nowcasting	0 – 2 h	Descripción del tiempo presente y previsión.	Observaciones, radar y satélite.
Cortísimo plazo	0 – 12 h	Modelos de mesoescala	10 Km
Corto plazo	< 72 h	Modelos de mesoescala y regionales	~ 10 – 50 Km
Mediano plazo	3 – 10 días	Modelos globales	~ 50 – 200 Km
Plazo extendido	10 – 30 días	Modelos globales, Modelos Acoplados Océano Atmósfera	~ 100 – 200 Km
Climático	> 2 años	Modelos Globales, Modelos Acoplados Océano Atmósfera	~ 100 – 200 Km

Fuente: Elaboración propia

En la línea de tiempo, los modelos GCMs se han ido desarrollando para cada uno de los componentes del sistema climático: atmósfera, superficie terrestre, océano y el hielo marino, que fueron integrándose progresivamente.

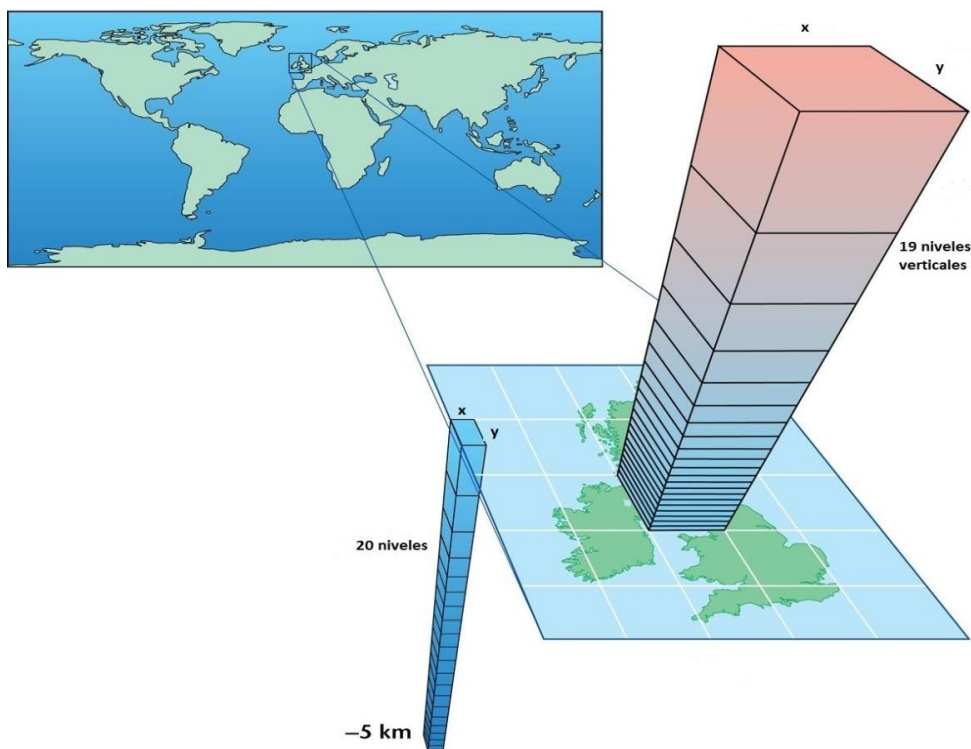


Figura 2-2 Discretización horizontal y vertical de un Modelo de Circulación General (GCM) atmosférico y oceánico

2.2 El Marco Metodológico

2.2.1 Técnicas de downscaling

Hemos visto en el ítem anterior que muchos de los AOGCMs globales presentan baja resolución espacial (110 - 280 Km), proporcionando información climática a escala gruesa sobre una región determinada, en ese sentido el uso de Modelos Climáticos Regionales (RCM, siglas en inglés) pueden tomar mayores resoluciones y mostrar mayor habilidad en la proyección del clima en una región específica. En consecuencia, los AOGCMs constituyen herramientas potenciales para la proyección del clima en alta resolución espacial, ya sea como forzantes de un RCM o como predictores de gran escala de las técnicas estadísticas.

A pesar de la limitación de los AOGCMs es en cuanto a resolución espacial, Brunet, et al., 2009 señala que “la comparación de simulaciones globales con observaciones sugieren que los modelos son bastante fiables en la reproducción de las características del clima a gran escala”.

Asimismo, para que las proyecciones de los AOGCM de baja resolución sean más realistas y puedan ser utilizadas para inicializar modelos de impactos hidrológicos, hidráulicos, de rendimiento de cultivos, entre otros; se mejora la resolución con la aplicación de técnicas de reducción de escala (downscaling o regionalización). Estas técnicas adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región con una resolución apropiada para ser directamente utilizadas en modelos de impactos (Acuña et al., 2012).

Las técnicas de downscaling o regionalización se pueden agrupar en dinámicas o estadísticas.

Las técnicas dinámicas de reducción de escala, se basan en el uso de Modelos Regionales de área limitada (RCM, siglas en inglés) y tienen característica de ser físicamente consistentes y demandan mayor capacidad y tiempo de procesamiento. Esta técnica permite capturar los efectos orográficos, eventos climáticos extremos y efectos no lineales como aquellos relacionados con El Niño (Fowler et al., 2007). Sus proyecciones pueden ser significativamente diferentes a los GCMs dando así un “valor añadido” y puede considerar cambios no observados en registros históricos. Sin embargo, este método requiere de un alto costo en cuanto a procesamiento computacional y depende de las parametrizaciones físicas por lo que da una incertidumbre adicional a los resultados (Cañón, 2009).

Existen tres esquemas de downscaling dinámico dependiendo de la herramienta a utilizar: modelos de área limitada o RCMs, modelos de grilla estiradas y modelos globales de alta resolución (Bader et al. 2008). Entre estos esquemas los RCMs son los modelos mayormente utilizados operativamente en pronóstico de corto y mediano plazo.

En un RCM el modelo global provee las salidas o las condiciones iniciales y de contorno lateral para simulación a alta resolución (Giorgi. 1990). La temperatura del mar (TSM), el hielo marino, los GEI y el forzamiento de aerosoles son también provistas por el modelo global.

Los RCMs, también incluyen como condición de borde los datos de topografía, tipo de suelo, albedo, entre los principales; que permiten resolver los efectos de los procesos de turbulencia, interacción con la capa límite planetaria, entre otros. Sin embargo, debido al conocimiento incompleto del sistema climático, como las limitaciones en el aspecto de configuración del modelo en algunos de estos procesos, no pueden ser resueltos dinámicamente, por tanto es necesario recurrir a aproximaciones matemáticas (parametrizaciones) principalmente de los procesos de escalas menores o relacionados con la subgrilla como la generación de convección, interacción suelo-atmósfera, interacción de la capa límite, entre otros.

En la aplicación de los RCMs para regionalización dinámica, se debe considerar también el tamaño del dominio del modelo, el cual es afectado por las condiciones de borde, las condiciones iniciales, las parametrizaciones físicas, la resolución espacial y temporal, la técnica de asimilación de datos, la infraestructura y costo computacional.

Se conoce que los errores introducidos por la representación de las condiciones de gran escala de los GCMs son transmitidos a los RCMs (Noguer et al. 1998). Además, el uso de distintas parametrizaciones pueden dar lugar a resultados muy diferentes en variables como la precipitación y/o el viento en superficie.

Los RCMs han ido mejorando en el tiempo, implementándose nuevas técnicas para la mejora de la condición inicial como las técnicas de asimilación de datos, nuevas parametrizaciones, nuevos tipos de grilla (Williamson D. 2007).

En la Figura 2-3, se muestra el esquema de regionalización dinámica tomada del estudio de Escenarios Climáticos para el Perú para el año 2030 (SENAMHI, 2009).

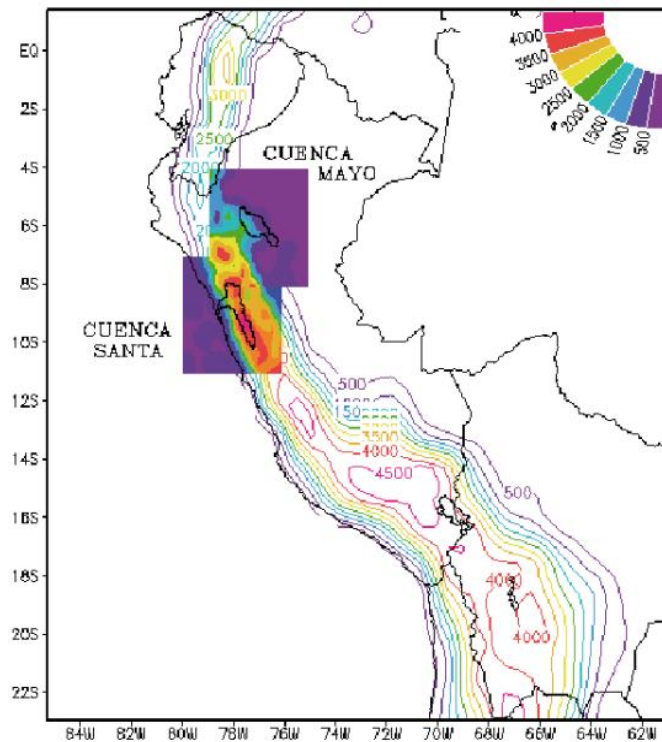


Figura 2-3 Esquema de regionalización dinámica tomada del estudio de Escenarios Climáticos para el Perú para el año 2030

Fuente: SENAMHI 2009

Las técnicas estadísticas de downscaling se basan en hipótesis establecidas donde las relaciones lineales y no lineales cuantitativas entre predictores (de gran escala) y predictandos (de escala local) son invariables frente al cambio climático. Esta técnica por lo general demanda menor tiempo computacional; aunque los métodos no lineales desarrollados recientemente se basan en complejos algoritmos de optimización no lineal y requieren un mayor tiempo de procesamiento.

El downscaling estadístico (DE) se basa en el uso de registros históricos de la variable que se desea predecir en la malla de alta resolución, o en los puntos locales de interés. En este caso, se puede emplear distintas metodologías estadísticas que permitan combinar las salidas de los modelos numéricos con la información observada, para desarrollar modelos de predicción que relacionen las salidas de los modelos numéricos con las observaciones locales (Gutiérrez et al., 2004). Estos modelos estadísticos son usados posteriormente para estimar las características locales o regionales del clima. Por lo tanto, la principal premisa del método de downscaling estadístico es que existe una relación estocástica o determinística entre un predictor (por ejemplo, temperatura superficial del mar, flujo de humedad, altura geopotencial, etc) y un predictando local o regional (usualmente temperatura o precipitación) (Fowler et al., 2007).

Una de las principales ventajas de esta técnica es que no es costoso en cuanto a procesamiento computacional y, por lo tanto, puede aplicarse fácilmente con las salidas de diferentes experimentos con GCMs, Además es usado para proveer información local o específica, lo cual podría ser crítico para diferentes estudios de impacto de cambio climático (Wilby et al., 2004).

El DE es conveniente su uso en ambientes heterogéneos con una fisiografía compleja o con gradientes bien empinados donde existe una fuerte relación con los forzamientos de escala sinóptica (Wilby et al. 2004).

La desventaja del DE es que asume estacionariedad en la relación predictor-predictando, lo cual se traduce en que esta relación obtenida durante el período de ajuste o calibración es aplicada durante el período de predicción (Wilby et al. 2004) o proyección, a pesar de que los forzamientos puedan ser diferentes en ambos períodos.

De acuerdo con Cano et al. (2001) la aplicación del downscaling estadístico ha sido impulsada por la disponibilidad de bases de datos de predicciones desarrolladas en diversos proyectos de reanálisis y que sirven de puente entre las salidas de los modelos numéricos y los registros históricos locales, permitiendo aplicar la técnicas de regresión, correlación, entre otros.

2.2.2 Análisis y crítica de datos hidrometeorológicos

El análisis y crítica de los datos hidrometeorológicos es uno de los aspectos más importantes que se tiene que realizar en los estudios climáticos e hidrológicos, ya que el uso directo de los datos sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre variables, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos.

Para los fines del presente estudio se utilizará diferentes enfoques en el tratamiento de datos; el climático basado en la utilización del programa HOMER y el hidrológico basado en el análisis clásico de saltos y tendencias y la homogenización espacial basado en el “Vector regional de índices pluviométricos” incluido en el software Hydraccess.

Análisis exploratorio y detección de datos atípicos

El Análisis exploratorio de datos (AED) surge de los trabajos realizados por Tukey (1977), desde entonces su uso se ha venido incrementando, ya que se ha comprobado que el examen previo de los datos es un paso necesario.

El AED consiste en el análisis de los datos empleando una variedad de técnicas (en su mayoría gráficas) para incrementar nuestro entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas. El AED proporciona métodos gráficos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallas en el diseño y muestreo para recolectar los datos, tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de valores atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas

A1. Las técnicas gráficas del análisis exploratorio se pueden agrupar en:

- Gráficos de datos crudos (histogramas, gráficos de probabilidad, gráficos de bloques, gráficos de intervalos).
- Mediante el análisis de los histogramas es posible detectar saltos y/o tendencias en la información histórica. Se debe aclarar que este análisis es únicamente con fines de identificación de las posibles inconsistencias, las mismas que deberán ser evaluadas estadísticamente mediante el test respectivo.
- Gráficos de estadísticos simples como la media y desviación estándar, gráficas de caja (box plot) y gráficos de los efectos principales de los datos crudos.
- Posicionar los gráficos anteriores a objeto de incrementar la habilidad de reconocimiento de patrones, mediante la utilización de varios gráficos por página.
- Gráficos de posicionamiento de los datos para reconocimiento de patrones y/o relaciones espaciales o temporales.

A2. Técnicas estadísticas tenemos:

El análisis de la información se realiza en las componentes determinísticas transitorias de la serie que son:

- Análisis de Saltos
- Análisis de Tendencia

En cada uno de los cuales se analiza la consistencia en los dos primeros parámetros estadísticos: media y desviación estándar.

Homogenización de series climáticas

Una serie climática homogénea se define como aquella cuyas variaciones están causadas únicamente por variaciones del clima, mientras que una serie inhomogénea es aquella que contiene variaciones (sesgos) causados por factores distintos al clima. La importancia de la homogenización radica en que si queremos obtener buenos productos de investigación climática, o utilizar datos para validar modelos climáticos, estimaciones satelitales o evaluar el cambio climático, necesitamos que las fluctuaciones de las variables meteorológicas sean lo más reales posible, es decir eliminar sesgos no climáticos para representar la variación del clima.

La precisión de las observaciones climáticas es afectada frecuentemente por inhomogeneidades debido al cambio en las condiciones técnicas y ambientales de las mediciones (reubicaciones de las estaciones, cambios en el tipo, altitud o refugio de los instrumentos, entre otros., Aguilar et al., 2003, Auer et al., 2005). Muchos de estos cambios inducen a la aparición de puntos de cambio (change-points) en las series de datos climáticos locales, mientras otras se ven afectadas por incremento en el sesgo de las características macroclimáticas reales, particularmente por el desarrollo urbano.

Para la corrección de inhomogeneidades de las series climáticas, en las últimas décadas se vienen desarrollando un gran número de métodos de homogenización, entre los cuales podemos citar uno de los más actuales y robustos, denominado HOMER, otro como el Vector Regional y también existe la homogenización con Hydracces.

a. Método HOMER

HOMER es un método de homogenización, elaborado mediante el proyecto COST (European Cooperation in Science and Technology, por sus siglas en inglés) ES0601 (COST HOME), entre los años 2007 y 2011, donde se evaluó el desarrollo de los métodos de homogenización utilizados en climatología y producir un software que sería una síntesis de las mejores características de los métodos más eficientes. HOMER (HOMogenization software in R, por sus siglas en inglés) es un software para la homogenización de variables climáticas esenciales a escala de tiempo mensual y anual para datos de temperatura y precipitación. HOMER se ha elaborado considerando las mejores características de algunas técnicas como PRODIGE (Caussinus and Mestre, 2004), ACMANT en diferentes escalas de tiempo (Domonkos, 2011), CLIMATOL para un control de calidad básico (Guijarro, 2011) y el método de JOIN-SEGMENTATION cghsegrecientemente desarrollado ((Picard et al., 2011)).

HOMER se basa en una metodología de programación dinámica (DP), con la aplicación de un modelo de dos factores para toda la red de estaciones, la detección y corrección. Además, es un método interactivo semi-automático, que permite a los usuarios escoger entre los resultados detectados por cghseg cuya generación es totalmente automática, y una parte subjetiva de una técnica de comparación por parejas (pairwise) de estaciones meteorológicas adaptada de PRODIGE, esta facilidad permite a los usuarios tomar decisiones subjetivas basadas en la meta-data (todos los cambios por los que ha pasado una estación durante su vida útil, es decir la historia de la estación) o experiencias de investigación.

El proceso y método matemático del programa HOMER se encuentra explicado en la publicación HOMER a homogenization software (Mestre O., et al. 2012), cada uno de los pasos principales para homogenizar las series climáticas se indican en la Figura 2-4.

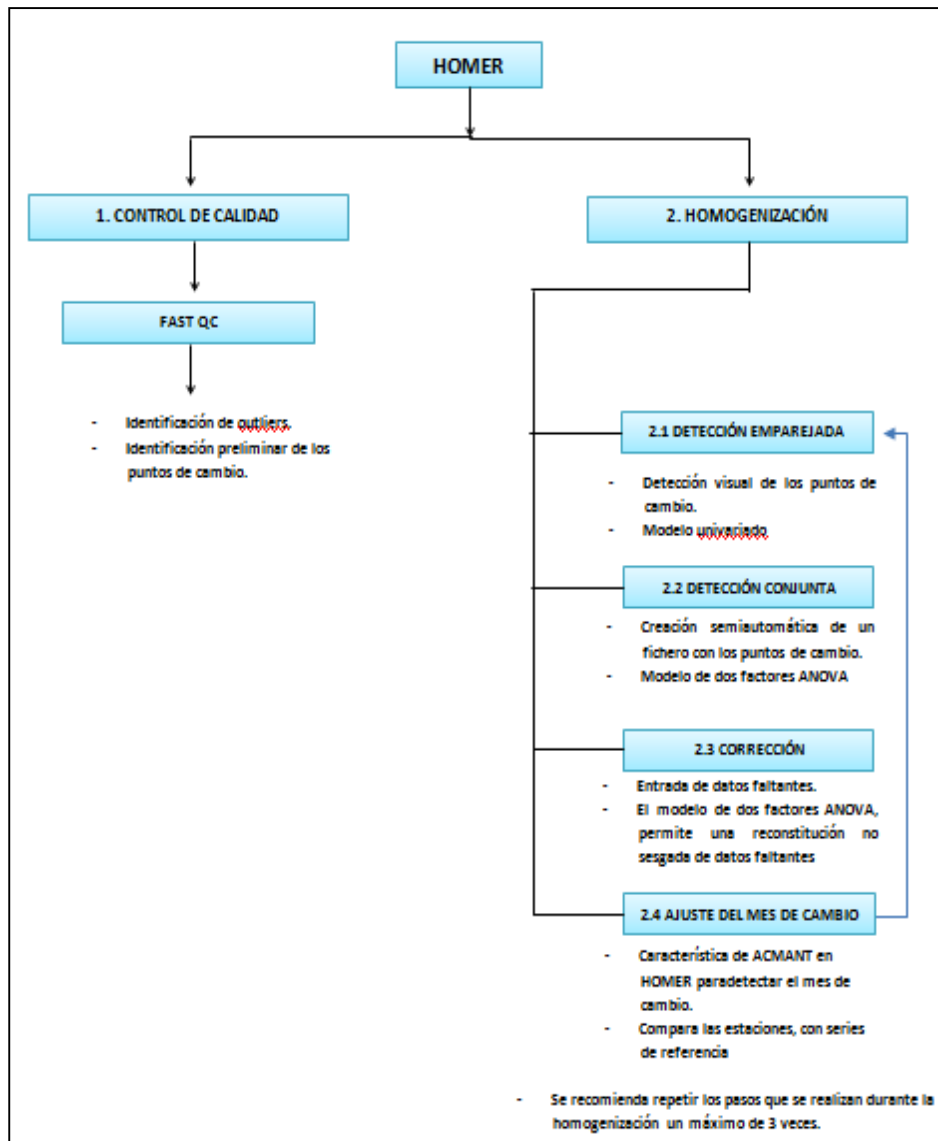


Figura 2-4 Esquema del procedimiento para la homogenización
Fuente: Software HOMER

b. Método de vector regional

El Método de Vector Regional (MVR) es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: La crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación. La hipótesis fundamental en la que se basa, consiste en asumir que para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con una pequeña variación aleatoria cada año debido a la repartición de las lluvias dentro de la zona.

La idea básica del MVR, es que en lugar de comparar dos por dos estaciones por correlación o doble masa, como se hace en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones.

El MVR emplea entonces, para el cálculo de esta estación “Vector” el concepto de Precipitación Media Extendida al periodo de trabajo, salvando los problemas del peso de estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas (como ocurriría con un promedio simple) y la existencia de datos faltantes o diferentes periodos de funcionamiento (que calcularían promedios alterados en caso de tener solamente años húmedos o solamente años secos de determinada estación) como ocurriría al obtener valores estandarizados o centrados reducidos de lluvia. Bajo estos conceptos, se emplea el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “Zi” y la Precipitación Media Extendida “Pj”. Esto se logra al minimizar la sumatoria de la expresión (1).

$$\sum_{i=1}^N = \sum_{j=1}^M \frac{P_{ij}}{p_i} - Z_i \quad \dots \quad (1)$$

Dónde: i es el índice de año, j el índice de estación, N el número de años y M el número de estaciones. Pij es la precipitación anual en la estación j el año i, Pj es la precipitación media extendida al período de N años y finalmente Zi es el índice pluviométrico regional del año i.

La resolución del problema es dificultosa, debido al hecho que ciertos Pij no fueron observados y faltan. Sin embargo, es posible mediante el uso de un computador, por descomposición en un sistema de (M-1) ecuaciones lineales a (M-1) desconocidas.

c. Homogenización con Hydraccess

El programa HYDRACCESS (IRD, P. Vauchel, 2005), ejecuta el MVR de manera automática y proporciona información diversa en hojas de cálculo Microsoft Excel. La determinación de la calidad de una estación, es función de diferentes parámetros calculados; los parámetros más importantes, que dan una buena idea del comportamiento de una estación son:

- (a) La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor fuerte indica desviaciones fuertes.
- (b) Correlación entre la estación y el vector, si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona.

Con estos conceptos, es posible realizar la crítica de datos siguiendo un proceso iterativo de cálculo del vector, inspección de resultados separación de estaciones desaprobadas, recalcado del vector, etc. Al término del proceso de crítica, y según el nivel de precisión que se requiera, se obtienen regiones de estaciones con semejante comportamiento multianual. Cada una de estas regiones obtenidas, presentan un “Vector Regional” que muestra la variabilidad pluviométrica multianual en la zona que lo define y es además semejante al comportamiento de todas las estaciones constituyentes de esa región. Este Vector es, en consecuencia, un buen indicador de la variabilidad hidroclimática de la región.

Cabe señalar que la filosofía de la homogenización del Vector Regional tiene un sustento regional; es decir la determinación de zonas o regiones que muestran un comportamiento espacial homogéneo de la precipitación.

2.2.3 Índices climáticos de eventos extremos

Para el análisis de los eventos extremos (2.2) y para los ítems 2.13, 2.11 y 2.6, es importante contar con series de registro largo y continuo, que hayan pasado por un debido control de calidad; bajo estas características, en nuestro país se hace difícil tener una red densa que permita un análisis a nivel areal. Sin embargo, nos permite tener una idea a nivel local de su comportamiento.

Entre muchos métodos estadísticos usados para el diagnóstico de eventos extremos tanto de precipitación como de temperatura, se tiene el que se basa en los “índices extremos”, a través del análisis de tendencias y niveles de significancia, propuesto por Frich et al., 2002, metodología que ha sido utilizada por el IPCC en su Cuarto Reporte de Evaluación (AR4).

En la etapa de control de calidad y cálculo de índices extremos de cambio climático será aplicado el software Rclimdex, desarrollado por Environment Canadá para el Grupo Experto sobre Detección de Cambio Climático e Índices, con la finalidad de monitorear la evolución de los valores extremos de la precipitación y temperatura. Dentro del control de calidad será aplicada la subrutina rclimdex_extraqc.r, la cual representa una modificación de la versión oficial, e incluye un conjunto de rutinas adicionales para un control de calidad más preciso e intensivo desarrollada por Enric Aguilar del Centre of Climate Change y Marc Prohom del Servicio Meteorológico de Catalunya – España, en años recientes. El cálculo de 27 índices básicos están recomendados por el Equipo de expertos del CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (ETCCDMI), para el cual se utilizará la información a escala diaria de la precipitación, temperatura máxima y mínima, para el periodo 1965 - 2012, considerando las tendencias con un nivel de significancia de 99 %.

2.2.4 Validación de la precipitación estimada por satélite

Para la evaluación de la precipitación estimada por satélite TRMM con respecto a la precipitación observada se utiliza Bias relativo para evaluar el sesgo sistemático de la precipitación de satélite. El error absoluto promedio (MAE, por sus siglas en inglés) medido como la magnitud promedio del error. La RMSE medida también la magnitud del error promedio pero dado a grandes pesos para errores grandes. El coeficiente de correlación (CC) es usado para evaluar la concordancia entre la precipitación de TRMM y precipitación observada.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{P}(i) - \sum_{i=1}^N P(i)}{\sum_{i=1}^N P(i)} \times 100\%$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{P}(i) - P(i)|}{N}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\hat{P}(i) - P(i)|^2}{N}}$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (P(i) - \bar{P}) \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{P}(i) - \bar{\hat{P}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P(i) - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{P}(i) - \bar{\hat{P}})^2}}$$

Donde \hat{P} es la precipitación estimada del satélite TRMM y P es la precipitación observada; \bar{P} y $\bar{\hat{P}}$ son promedios de precipitación observada y precipitación de satélite, respectivamente.

La verificación estadística tiene varias categorías, las cuales corresponden entre la estimación y la ocurrencia de eventos de precipitación, son también usados en este estudio. Estos son, la probabilidad de detección (POD, por sus siglas en inglés), proporción de falsa alarma (FAR, por sus siglas en inglés) y el índice de suceso crítico (CSI, por sus siglas en inglés).

$$POD = \frac{hits}{hits + misses}$$

$$FAR = \frac{false\ alarms}{hits + false\ alarms}$$

$$CSI = \frac{hits}{hits + misses + false\ alarms}$$

Donde “misses” el número de veces de las muestras de la medición que clasifica como lluvia pero la TRMM como no lluvia, “hits” indica por ambos algoritmos y el detector de eventos de precipitación, y “false alarms” significa el algoritmo mostrado de señales de lluvia pero no ocurridos en concordancia con las observadas. POD mide la fracción de eventos observados que fueron correctamente diagnosticados, y algunas veces llamados “hit rate”. FAR la fracción de los diagnósticos de los eventos que fueron actualmente no eventos. CSI proporciona la fracción global de los eventos correctamente diagnosticados por TRMM. Los valores perfectos para estos índices son $POD=1$, $FAR=0$, y $CSI=1$.

2.2.5 Interpolación espacial

Técnicas geoestadísticas multivariadas son ampliamente utilizados para la predicción de cantidades de precipitación sobre un área determinada por la contabilidad de información secundaria muestreado sobre la misma área para mejorar la calidad de los mapas (Feki et al., 2013).

En algunos estudios, los datos de radar de precipitación se han utilizado en conjunción con mediciones en pluviómetros para mapear la precipitación (Creutin et al. 1988).

Sin embargo, la mayoría de los estudios han hecho uso de una fuente más barata de datos ampliamente disponible como el modelo digital de elevación (DEM), aprovechando la relación entre la cantidad de precipitación y la elevación. De hecho, el relieve topográfico ha marcado efectos sobre la precipitación, que en general aumenta con la elevación. Este aumento se debe al hecho de que las colinas son las barreras a las corrientes de aire húmedas, forzando el aire a subir, y ellos actúan como fuentes de calor de alto nivel en los días soleados. Las últimas provocan que se formen nubes convectivas sobre las colinas de preferencia, lo que resulta en chubascos de la precipitación.

Estaciones meteorológicas tienden a estar situados a baja altitud (valles) y por lo tanto pueden subestimar la precipitación regional. Por estas razones, en especial, en áreas de alto relieve topográfico, con frecuencia será insuficiente utilizar los datos de la estación meteorológica más cercana para caracterizar la cantidad y la distribución espacial de la precipitación sobre un área de estudio a gran escala.

Goovaerts (2000) reporta que las técnicas que utilizan generalmente los datos de elevación realizada fuera de Kriging ordinario (KO). Es decir, cuando la cantidad de precipitación y la elevación se correlacionan linealmente, las estimaciones informadas por datos de elevación a menudo son más precisas que los obtenidos utilizando solamente los datos de precipitación. Se han realizado estudios en una gama de diferentes ubicaciones y ambientes en todo el mundo y sugieren que la incorporación de la elevación en el procedimiento de interpolación con frecuencia será beneficiosa.

En este estudio se analizará el uso de métodos geoestadísticos multivariados para evaluar el impacto de la incorporación de la elevación en la predicción de la precipitación media mensual histórica, en las cuencas del Rímac, Chillón, Lurín y parte alta de Mantaro mediante la comparación de dos técnicas de interpolación: kriging con deriva externa (KED) y co-kriging (Co-KO). Se realizará la comparación de las mismas con la técnica de interpolación geoestadística kriging ordinario (KO) y la técnica determinística de la distancia inversa ponderada (Inverse Distance Weighting – IDW) las cuales hacen uso solamente de las observaciones.

a) Análisis exploratorio de datos

Cabe señalar que en esta etapa se trabaja con datos con que pasaran un control de calidad en la etapa de homogenización, por lo que este análisis consiste en un conjunto de técnicas estadísticas y gráficas que servirán para tener un entendimiento básico de los datos, ver si la distribución de la información

presenta normalidad o al menos simetría (histogramas), ver si existe o no tendencia en los datos o relaciones entre variables (gráficos de dispersión), estos pasos son necesarios para tener una buena estimación

b) Análisis estructural

El análisis estructural es una de la etapas fundamentales de todo estudio geoestadístico. Tiene como objetivo la caracterización de la estructura espacial del fenómeno estudiado.

El enfoque geoestadística se basa en la teoría de las variables regionalizadas (Matheron 1970). Se supone que las muestras espaciales se consideran como la realización de un proceso espacial aleatoria. Esto permite el uso de un poderoso instrumento estadístico para la estimación espacial: la semivariograma (Feki y Slimani 2006).

c) Estimación Espacial

La estimación espacial se realiza por las técnicas de interpolación DIW, KO, Co-KO y KDE. Cabe señalar, todo los procesos se implementaran en el programa R (lenguaje de programación), es un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico de libre distribución. Se hará principalmente uso del paquete Gstat (Paquete de análisis estadístico), que es un paquete para el modelado geoestadístico espacial y espacio-temporal, la predicción y simulación (Pebesma, 2004).

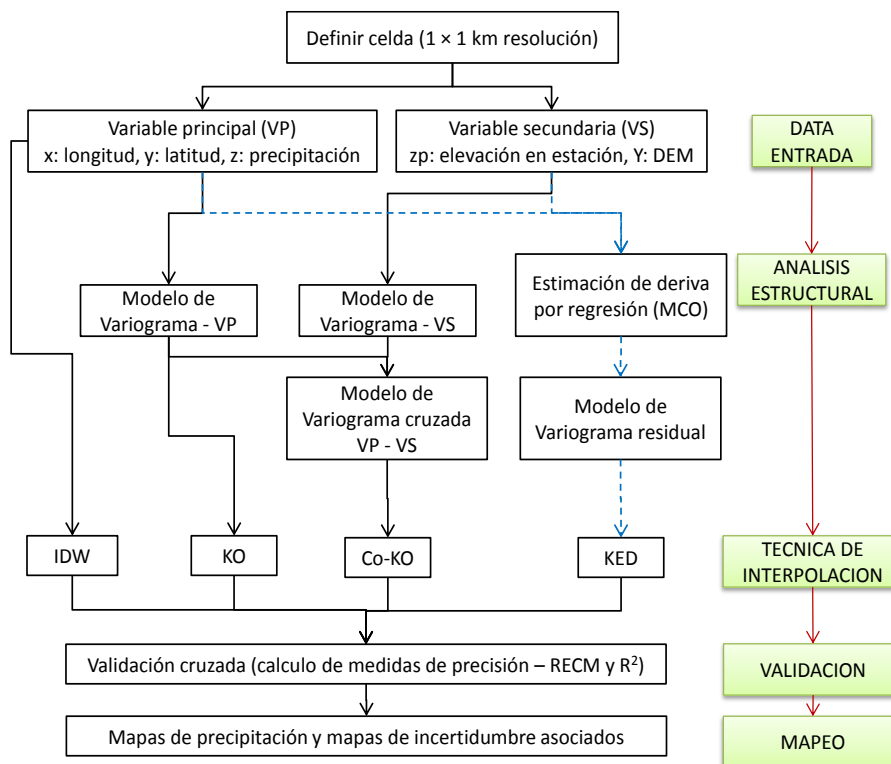


Figura 2-5 Diagrama de flujo de la metodología para la interpolación espacial.

Fuente: Elaboración propia

3 Capítulo III: Características físicas, registro de datos y procesamiento de la información, para el sistema de cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro

Características físicas, registro de datos y procesamiento de la información, para el sistema de cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro

En este capítulo se muestra el marco general de las características del entorno atmosférico y físico del ámbito geográfico de las cuencas de estudio; así como las fuentes de datos utilizadas tanto cartográficas como datos hidrometeorológicos incluyendo los productos satelitales de estimación de lluvias y del producto MODIS para la obtención de índices de vegetación. Se describe en cada caso el procedimiento seguido para el análisis y tratamiento de la información así como los principales productos derivados.

3.1 Entorno atmosférico

3.1.1 Circulación atmosférica regional

La circulación atmosférica regional sobre Sudamérica presenta sistemas sinópticos claramente identificables en los diferentes niveles atmosféricos que influyen en el tiempo y clima del país y en el área de influencia del estudio. Estos sistemas sufren variaciones estacionales producto de la fluctuación anual del flujo radiativo sobre la superficie del planeta y a los cambios interanuales en las corrientes oceánicas. Desde el punto de vista puramente atmosférico, podemos clasificar estos sistemas en función del nivel de la tropósfera en el que se desarrollan:

A nivel superficial

Altas presiones subtropicales.- Sudamérica se caracteriza por poseer dos anticiclones sobre los océanos que lo bordean, estos son: Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y Anticiclón del Atlántico Sur (AAS). De acuerdo con Gilford, et al, 1992, el primero se encuentra muy bien definido en el Pacífico Suroriental y tiene limitado su movimiento hacia el este por la cordillera de los Andes. Esta posición, junto con su flujo superficial divergente, tiene un gran efecto sobre las costas de Perú y Chile y canaliza los flujos superficiales (Vientos alisios) que, entre los 10 y 30 °S son predominantemente de componente sur-sureste, remontando la costa oeste de Sudamérica y ejerciendo una gran influencia en el transporte de aire frío hacia latitudes más bajas. En el invierno, el APS se desplaza hacia el norte, predominando las bajas polares entre los 30 °S hasta los 45 °S condicionando el flujo con componente oeste y permitiendo que los frentes alcancen latitudes, en ocasiones, inferiores a los 30°S. Por un lado, el APS se aproxima a las costas de Perú contribuyendo en el fortalecimiento de la inversión térmica de capas bajas y la formación de una extensa área de nubosidad estratiforme característica de la costa Pacífica del continente; por otro lado, el AAS, en su desplazamiento al noroeste modifica la incidencia y trayectoria de los Alisios sobre el Atlántico y favorece el desarrollo de actividad ciclogénica en la costa de Argentina y Uruguay. En verano, el AAS alcanza la cuenca del Amazonas y ocasionalmente se divide en otro núcleo secundario de alta presión sobre Brasil, posiblemente en respuesta a perturbaciones extratropicales. Cuando existe ésta división, la mayor convergencia en niveles bajos ocurre entre los dos centros, incrementándose la nubosidad y la precipitación en la costa brasileña.

La zona de convergencia intertropical (ZCIT).- Gilford, et al, 1992, también la denomina “Vaguada Ecuatorial”, se forma como resultado de la convergencia de los vientos alisios del Hemisferio Norte y Hemisferio Sur, producto de las altas subtropicales. La nubosidad convectiva asociada a la ZCIT, ocurre a lo largo del eje donde se produce la convergencia de estos vientos alisios.

Las fluctuaciones de la ZCIT son influenciadas por la variación estacional de la incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre y oceánica y su efecto en el movimiento de los sistemas atmosféricos de presión. En el invierno austral, el APS se intensifica favoreciendo que los vientos alisios del sureste incrementen su intensidad y la ZCIT migre al norte, alejándose de la línea ecuatorial; contrariamente, en los meses del verano, el APS migra ligeramente hacia el sur, en consecuencia la ZCIT se aproxima hacia la línea ecuatorial, favoreciendo el incremento de las precipitaciones en el norte del territorio peruano. Ávalos, et al, 2010, menciona que el comportamiento estacional de la ZCIT constituye un factor de suma importancia para el período de lluvias en el continente. Es en otoño cuando la ZCIT alcanza su posición más meridional, ubicándose sobre los Andes de Ecuador y el norte de Perú y generando precipitaciones más concentradas e intensas (Garreaud 2009).

La ZCIT puede ser identificada fácilmente sobre la superficie oceánica, mientras que en superficie continental su localización se hace difícil debido al relieve y las convergencias locales que ejerce sobre los flujos de superficie. Además, en continente la ZCIT se ondula hacia el sur debido al mayor calentamiento del continente, convirtiéndose, en la Vaguada Ecuatorial.

La baja amazónica.- Es una zona de bajas presiones semipermanentes sobre la cuenca amazónica que incrementa la actividad convectiva. Se manifiesta con bajas presiones relativas (menores o iguales a 1008 hPa) generadas por el calor latente de condensación y el calentamiento del centro del continente. El aire cálido asciende generando una disminución del peso de la columna atmosférica y por consiguiente de la presión. Se constituye como un sistema térmico, más frecuente e intenso durante los meses de verano, que contribuye en gran medida a la formación de sistemas convectivos y precipitaciones en la Amazonía.

Jet de niveles bajos al este de los andes (LLJ).- La presencia de un flujo del norte-noreste denominado Low Level Jet (LLJ, por sus siglas en inglés), ubicado al este de los Andes, se configura como el principal mecanismo de transporte meridional de humedad del sector amazónico hacia el centro del continente. El LLJ se inicia con la presencia de vientos del este ingresando al continente por la desembocadura de los ríos Orinoco y Amazonas, impactan con la Cordillera andina y se desvían al sur. La máxima precipitación asociada al LLJ, se presenta en la zona de máxima velocidad del jet así como en la parte delantera, donde se desacelera el flujo generándose fuerte convergencia y ascensos de aire.

En atmósfera media

En el verano austral, en la región tropical y por lo tanto en el Perú, los vientos predominantes en atmósfera media son del este-noreste (cargados de humedad por la elevada evapotranspiración de la cuenca amazónica). Estos vientos al llegar a la Cordillera andina favorecen la formación de nubosidad y precipitaciones. Estos son permanentes durante todo el verano y primavera, asegurando un buen

año hidrológico en Perú cuando son persistentes, sin embargo, si no se presentan frecuentemente, disminuyen las lluvias y por lo tanto la disponibilidad hídrica.

Durante el invierno y el otoño existe predominancia de vientos del oeste (secos) y por ello, la ausencia de precipitaciones en el territorio peruano y la disminución de temperaturas favoreciendo la ocurrencia de heladas meteorológicas (Acuña et al, 2012).

En alta atmósfera

Alta de Bolivia (AB).- Es un sistema de circulación antihorario en alta atmósfera (mayor a 10 Km sobre el nivel del mar), cuyo centro se ubica predominantemente sobre Bolivia. Se forma debido al calor sensible emitido por el altiplano y los Andes centrales, y se mantiene por la liberación del calor latente (energía liberada por el cambio de estado del agua) en la atmósfera media y alta (sobre los 1500 msnm). La mejor configuración que presenta la AB se da en los meses de verano, cuando condiciona flujos del este sobre los Andes tropicales y la divergencia de aire en la zona central del continente.

Vaguada del noreste de Brasil (VNEB).- Es un sistema de circulación ciclónica (horaria) en alta atmósfera, cuyo centro se ubica predominantemente sobre el noreste de Brasil. Es de característica fría y seca que favorece subsidencia (descenso de aire) y a su vez condiciona sequedad en la costa noreste de Brasil.

Ocasionalmente, se intensifica la vaguada y segrega un sistema de baja presión conocida como vórtice ciclónico de niveles altos (VCAN), el cual, viaja al oeste generando eventos severos como la ocurrencia de fuertes precipitaciones y tormentas eléctricas violentas en el trópico y la zona ecuatorial (Ávalos et al, 2010). La configuración y engranaje de la Alta de Bolivia y la Vaguada del Noreste de Brasil forma un sistema conjunto cuyo desplazamiento condiciona la actividad convectiva en el continente (Ferreira et al, 2003).

3.1.2 Circulación atmosférica local

Entre los mecanismos responsables de la circulación local principalmente tenemos la presión a nivel del mar, la inversión térmica, la brisa marina y la brisa de valle.

- **Presión a nivel del mar.**- En los trópicos, y en el territorio peruano, las variaciones de la presión a lo largo del año, son pequeñas. En la región costera se ven influenciadas por el desplazamiento meridional del APS, es así que en la ciudad de Lima (12 °S) la presión atmosférica a nivel del mar fluctúa entre 1014.4 en Septiembre (finales del invierno) y 1010.9 en Marzo (finales del verano).

- **Inversión térmica.**- Normalmente las temperaturas del aire disminuyen con la altura, sin embargo, en la costa peruana y chilena, debido a las aguas frías resultado de la Corriente de Humboldt y a la influencia de la subsidencia (movimientos descendentes del aire) generada por el Anticiclón del Pacífico Sur, existe una capa localizada entre 980 y 930 hPa (Albrecht, 1981) donde la temperatura, en lugar de disminuir, incrementa con la altura, de ahí el nombre de inversión. Esta característica condiciona una atmósfera muy estable que a su vez configura uno de los climas más secos del mundo (Goodman, 1980) caracterizado por la aridez (ausencia de lluvias) y la elevada humedad. En la región costera peruana, la subsidencia y la elevada humedad de la Capa Límite Marítima (CLM), favorecen la formación de nubes bajas de tipo estratiforme, las cuales pueden originar lloviznas cuando las nubes tienen un espesor cercano a 500 metros.
- **Brisa marina.**- Es una circulación producto del calentamiento diferencial de la superficie del mar y del continente. De día el aire cálido sobre el continente asciende, succionando aire más frío de la superficie marítima, por lo que se generan vientos de mar hacia tierra. De noche, se invierte la circulación debido a que el continente se enfría más rápido que el mar. En la costa peruana se presenta con mayor intensidad en la estación de verano, y durante las horas centrales del día, cuando hay un mayor calentamiento. Esto limita el incremento de las temperaturas diurnas y a su vez, dependiendo de su intensidad y profundidad, puede favorecer la ocurrencia de precipitaciones en las zonas bajas y medias de las cuencas de estudio (Chillón, Rímac y Lurín).
- **Brisa del valle.**- Es una característica de la circulación local que se genera por el calentamiento diurno de las laderas de los valles, que a su vez calientan el aire sobre ellos tornándolo más liviano y permitiendo que remonte los valles. Si este aire tiene la suficiente humedad formará nubes y/o lluvia en la zona media y alta de las cuencas analizadas. Si se acoplan la brisa marina profunda y la brisa de valle, favorecerá la ocurrencia de lluvias más intensas. Este acoplamiento es común en los meses de verano, cuando la inversión térmica es débil o no existe, los vientos alisios se desintensifican y la atmósfera es inestable.

3.2 Entorno físico

3.2.1 Cuenca del río Rímac

Se ubica políticamente en la jurisdicción del departamento de Lima y en menor proporción en el departamento de Junín, enmarcándose en las provincias de Lima, Huarochirí y Yauli, frente a la costa del Perú; Se origina en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes a una altitud máxima de aproximadamente 5508 msnm en el nevado Pacay aproximadamente a 132 km al nor-este de la ciudad de Lima desembocando por el Callao, en el Océano Pacífico. La cuenca se encuentra inscrita entre los paralelos 11° 27' y 12° 11' de latitud sur y 76° 06' y 77° 11' de longitud oeste.

Tabla 3-1 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Rímac

UNIDAD HIDROGRÁ.	UNIDAD HIDROGRÁ.	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE	
			(km ²)	(%)
RÍMAC	Bajo río Rímac	Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de Rímac, con una longitud de cauce principal de 22.92 km.	441.03	12.59
	Quebrada Jicamarca	hidrográficamente se localiza en la parte baja del río Rímac, con una longitud de cauce principal de 44.15 km.	492.31	14.05
	Jicamarca-Santa Eulalia	Políticamente se encuentra ubicada en los distritos de: Ate Vitarte, Chaclacayo y Chosica, con una longitud de cauce principal de 34.81 km.	267.6	7.64
	Río Santa Eulalia	Políticamente se encuentra ubicada en los distritos de Santa Eulalia, Cayahuanca, San Pedro de Casta, Chicla, San Lorenzo de Huachupampa, San Juan de Iris, Laraos, Carampoma y Huanza.	1077.38	30.75
	Santa Eulalia-Párcac	Políticamente se encuentra ubicada en los distritos de Ricardo Palma, Cocachacra, San Bartolomé, San Juan de Lanca, Surco y Matucana, con una longitud de cauce principal de 48.39 km. hidrográficamente se localiza en la parte media del río Rímac.	633.71	18.09
	Quebrada Párcac	Hidrográficamente se localiza en la quebrada. Parac-Pachachaca-Tonsuyoc, con una longitud de cauce principal es 20.55 km.	130.43	3.72
	Párcac-Alto río Rímac	Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de San Mateo, con una longitud de cauce principal de 7.89 km, hidrográficamente se localiza en el tramo río Rímac parte alta	55.93	1.60
	Alto río Rímac	Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de Chicla, con una longitud de cauce principal es 18.18 km, hidrográficamente se localiza en la parte alta del río Rímac.	169.81	4.85
	Río Blanco	Presenta una longitud de cauce principal de 32.0 km	235.75	6.73
TOTAL			3503.95	100.00

Fuente: Inventario de fuentes de aguas superficiales en la cuenca del río Rímac

Infraestructura

a) Centrales hidroeléctricas

La cuenca del río Rímac es una de las cuencas más explotadas de la costa peruana, en ella se tienen actualmente funcionando 6 centrales hidroeléctricas.

- **C.H Matucana**

Se encuentra ubicada en la provincia de Huarochirí, distrito de Surco; utiliza las aguas del río Rímac valiéndose de las aguas del embalse Yuracmayo, mediante la captación Tamboraque. Las aguas captadas son derivadas mediante un túnel a la cámara de carga con una capacidad de 60 000 m³, y conducidas a la casa de máquinas mediante una tubería forzada de 1834 m, para producir energía eléctrica a través de las dos unidades de generación con turbinas tipo Pelton.

- **C.H. Huinco**

Se encuentra ubicada en la subcuenca del río Santa Eulalia en el kilómetro 25 de la carretera central. La casa de máquinas cuenta con cuatro turbinas tipo Pelton de eje horizontal. La central usa las aguas provenientes del embalse Sheque que tiene una capacidad de almacenamiento de 430 000 m³ el cual es abastecido por el mega-proyectos Marcapomacocha.

- **C.H Callahuanca**

Se encuentra ubicada a 52 km al este de Lima, en la provincia de Huarochirí, lleva el nombre del distrito al cual pertenece; la central se abastece de las aguas turbinadas de provenientes de las centrales hidroeléctricas Huinco y Matucana, las cuales son conducidas a la cámara de carga, y luego a una tubería forzada de 1100 m. Cuenta con cuatro unidades de generación con turbinas tipo Pelton de eje horizontal.

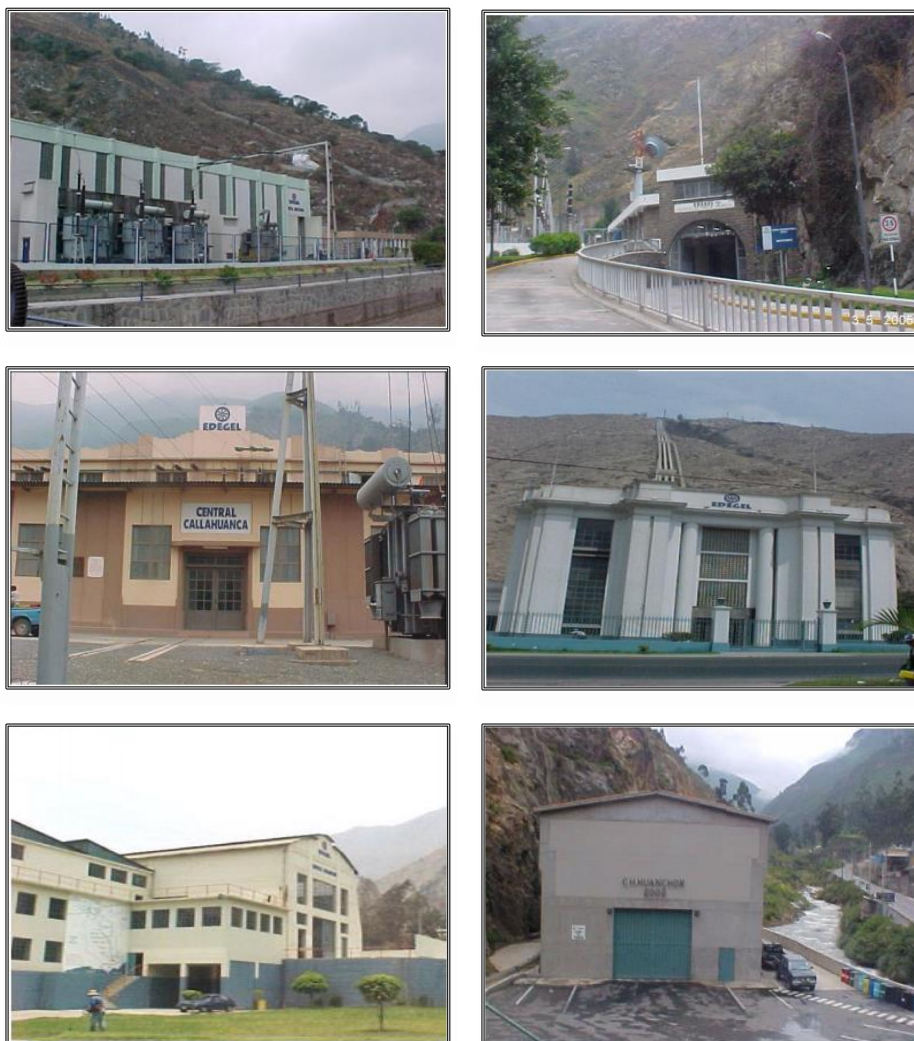


Figura 3-1 De izquierda a derecha: Centrales Hidroeléctricas de Matucana, Huinco, Callahuanca, Moyopampa, Huampaní y Huanchor

Fuente: Compendio de centrales de generación eléctrica del sistema interconectado nacional despachado por el comité de operación económica del sistema, OSINERGMIN

- **C.H. Moyopampa**

Se encuentra ubicada en Chosica a la altura del kilómetro 36 de la carretera central en la cuenca del río Rímac. Utiliza las aguas turbinadas de la central hidroeléctrica Callahuanca, así como de las aguas de las cuenca del río Santa Eulalia, las aguas son conducidas mediante un túnel de 12 km a su cámara de carga de 38 000 m³, para ser derivadas luego a la casa de máquinas a través de 3 tuberías forzadas de 780 m, produciendo electricidad mediante 3 unidades de generación con turbinas tipo Pelton.

- **C.H. Huampaní**

Se encuentra ubicada en el kilómetro 26 de la carretera central, en Chosica, cuenta con dos unidades de generación con turbinas tipo Francis cada una, las cuales turbinan las aguas que provienen de un túnel que capta las aguas del río Rímac luego de la descarga de la central hidroeléctrica Moyopampa.

- **C.H. Huanchor**

Se encuentra ubicada en la provincia de Huarochirí, distrito de Matucana; la central aprovecha las aguas del río Rímac, las aguas son captadas directamente mediante una bocatoma de aproximadamente 2 km hacia la cámara de carga de 5000 m³, para ser derivadas a una tubería forzada de 314 m con un desnivel de 211 m, la casa de máquinas presenta turbinas tipo Francis; posteriormente las aguas turbinadas son devueltas al cauce del río Rímac.

Tabla 3-2 Cuadro resumen, centrales hidroeléctricas en la cuenca del río Rímac

CENTRAL	EMPRESA	DEP.	PROV.	DISTRITO	LOCALIDAD	ALT. (msnm)	POT. (MW)	AÑO DE INICIO
Matucana	Edegel	Lima	Huarochirí	San Jerónimo de Surco	San Jerónimo de Surco	1886	128.6	1972
Huinco	Edegel	Lima	Huarochirí	San Pedro de Casta	San Pedro de Casta	1878	247.3	1964
Callahuanca	Edegel	Lima	Huarochirí	Callahuanca	Callahuanca	1327	80.4	1938
Moyopampa	Edegel	Lima	Lima	San Juan de Lurigancho	Chosica	889	66.1	1951
Huampaní	Edegel	Lima	Lima	Chaclacayo	Chaclacayo	645	30.1	1960
Huanchor	Minera Corona	Lima	Huarochirí	San Mateo	San Mateo	3200	19.6	2002

Fuente: Elaboración Propia.

Lagunas represadas

Los cuerpos de agua natural (lagunas) pueden considerarse como fuentes casi inexistentes, esto es debido a la demanda creciente del recurso hídrico en la zona, por otro lado como cuerpos de agua artificiales destacan 15 lagunas represadas en la parte alta de la subcuenca del río Santa Eulalia, con un volumen total de 77 MMC (algunas de estas obras de represamiento fueron construidas a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX), y la presa embalse Yuracmayo en la sub-cuenca de San Mateo en el río Blanco con una capacidad de 48.03 MMC, ambas recursos son de la cuenca propia del río Rímac, además se tiene los trasvases y regulaciones del sistema Marcapomacocha con 157.05 MMC ubicados en la cuenca del río Mantaro, cuyo recurso hídrico es aportado a la cuenca del río Rímac, (Ver Tabla 3-3 y Tabla 3-4).

Tabla 3-3 Aportes de recurso hídrico a la cuenca del río Rímac

SISTEMA DE REGULACIÓN	VOLUMEN DE REGULACIÓN (MMC)
Embalse Yuracmayo	48.30
Lagunas Santa Eulalia (15 en total)	77.00
Sistema Marcapomacocha (Marca I, Marca III)	157.05
Huascacocha	67.00
TOTAL	349.35

Fuente: EDEGEL

Tabla 3-4 Resumen de las 15 lagunas represadas en la cuenca del río Rímac.

LAGUNA	ALTITUD msnm	VOL. ÚTIL MMC	PRESA TIPO	ESTRUCTURAS
Quisha	4650	8.67	Mampostería (Piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta
Carpa	4500	17.80	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta
Huasca	440	6.20	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta + canal
Quiula		2.33	Mampostería (piedra c/ mortero)	
Sacsá	4400	14.89	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta + canal
Piti	4620	6.50	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta + canal
Huampar	4630	3.33	Mampostería (piedra c/ mortero)	Compuerta + canal
Huachuacocha	4570	4.98	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta
Chichis	4490	2.22	Mampostería (piedra c/ mortero)	Compuerta + canal
Pucro	4435	1.96	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta + canal
Misha	4650	0.65	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviadero + compuerta
Canchis	4420	2.08	Mampostería (piedra c/ mortero)	Aliviaderos (2) + compuerta + túnel salida
Huallunke	4510	1.60	De tierra y roca	Aliviadero + compuerta + canal
Rondán	4740	0.95	Mampostería (piedra c/ mortero)	Compuerta + canal
Manca	4530	1.57		Aliviadero + compuerta

Fuente: Manejo integrado de recursos hídricos para el abastecimiento de agua potable de Lima Metropolitana.

3.2.2 Cuenca del río Chillón

Se ubica políticamente en la jurisdicción del departamento de Lima y en la provincia constitucional del Callao (abarcando 2 distritos), enmarcándose en las provincias de Lima (abarcando 8 distritos) y Canta (abarcando 7 distritos) frente a la costa del Perú, ver Tabla 3-5. La cuenca se origina en las inmediaciones del flanco occidental de la cordillera Viuda recibiendo sus deshielos. En la cabecera del río Chillón, cuyas aguas desembocan por el Callao al Océano Pacífico, encontramos por el norte a las lagunas Aguascocha, Verde Cocha, Chuchón, Torococha, León Cocha; por el sur a las lagunas Azulcocha, Pucrococha, Vanauilla y Aguas cocha. La cuenca se encuentra inscrita entre los paralelos 11° 20' y 12° 00' latitud sur y 76° 20' y 77° 10' de longitud oeste.

Tabla 3-5 Provincias y sus distritos en la cuenca del río Chillón

CUENCA	PROVINCIA	DISTRITOS INCLUIDOS
CHILLÓN	Lima Metropolitana	San Martín de Porres, Los Olivos, Puente Piedra, Santa Rosa, Ancón, Comas, Independencia y Carabaylo.
	Prov. Const. del Callao	Ventanilla, Callao.
	Canta	Santa Rosa de Quives, Arahua, Tachaquí, Carhua, San Buenaventura, Canta y Huaros.

Tabla 3-6 Unidades hidrográficas del río Chillón

UNIDAD HIDROGRA:	SUB-CUENCA	DESCRIPCIÓN DE LA SUB-CUENCA	SUPERFICIE	
			(km ²)	(%)
CHILLÓN	Cueva	Políticamente se encuentra ubicado en los distritos de Santa Rosa de Quives y Huamantanga, con una longitud de cauce principal de 12.544 km.	68.14	2.97
	Ucañan	Políticamente ubicado en el distrito de Huamantanga, esta subcuenta es alimentada por quebradas que luego forman el cauce principal presentando un comportamiento intermitente.	57.51	2.50
	Quiruana	Políticamente se encuentra ubicado (en gran parte) por los distritos de Huamantanga, Santa Rosa de Quives y Lachaqui, con una longitud de cauce principal de 20.367 km.	215.43	9.38
	Yanacocha	Políticamente se encuentra ubicado (en gran parte) por los distritos de Buenaventura y Huamantanga, sus aguas tienen salida al río Chillón por la Quebrada Huancho.	60.95	2.65
	Mayru	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) por los distritos San Buenaventura y Canta, con una longitud de cauce principal de 7.491 km.	56.13	2.44
	Yanacoto	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de San Buenaventura y Huaros, en su extensión se ubican las lagunas Chahualcocha y Usurcocha.	50.09	2.18
	Huaypian	Políticamente ubicada (en gran medida) por los distritos de San Buenaventura y Huaros, con una longitud de cauce principal de 4.590.	19.38	0.84
	MincancanCHA	Políticamente se encuentra en el distrito de Huaros, en su extensión se encuentra la laguna Yanauya la cual se encuentra regulada, su cauce principal presenta un comportamiento intermitente.	49.83	2.17
	Chillón Alto	Políticamente ubicada por los distritos de Huaros y Canta, con una longitud de cauce principal de 4.590. En ella están ubicadas la mayoría de lagunas.	220.05	9.58
	Chacramito	Políticamente ubicada por los distritos de Canta y Lachaqui, su cauce principal es el río Arahúay con una longitud del 19.732 km	54.05	2.35
	Yaurimama	Políticamente se encuentra ubicada (en mayor medida) en el distrito de Arahúay, la fuente principal de recurso hídrico lo constituyen las quebradas.	40.41	1.76
	Potaca	Políticamente ubicada (en mayor medida) en el distrito de Santa Rosa de Quives, su cauce principal es el río Arahúay con una longitud de 4.258 km.	13.66	0.59
	Cotabamba	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en el distrito de Arahúay. En su extensión se encuentra las lagunas de Yarcán y Huayhuinca.	33.93	1.48
	Sacayhuanca	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en los distritos de Arahúay y Santa Rosa de Quives, su cauce principal es el río Arahúay con una longitud de 9.593 km.	36.19	1.57
Chacalla	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en el distrito de Arahúay, las quebradas son su principal fuente hídrica.	46.27	2.01	

UNIDAD HIDROGRA:	SUB-CUENCA	DESCRIPCIÓN DE LA SUB-CUENCA	SUPERFICIE	
			(km ²)	(%)
	Carhuane	Políticamente está ubicada en el distrito de Arahua, su cauce principal es el río Arahua con una longitud de 3 346 km.	9.91	0.43
	Jicamarca	Políticamente está ubicada en el distrito de Arahua y en menor medida en el centro poblado de Orobel en San Antonio, Huarochiri.	68.33	2.97
	Posanca	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en los distritos de Arahua y Santa Rosa de Quives, su cauce principal es el río Arahua con una longitud de 5.413 km.	22.54	0.98
	Orobel	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en el distrito de Santa Rosa de Quives, su principal centro poblado es la Cabaña, su cauce principal es el río Arahua con una longitud de 5.413 km.	19.59	0.85
	Río Seco	Políticamente está ubicada en el distrito de Santa Rosa de Quives, su principal centro poblado es Santa Toribio.	19.96	0.87
	Huerta Vieja	Políticamente está ubicada en el distrito de Santa Rosa de Quives, su principal centro poblado es Huerta vieja. Dentro de su extensión se ubica la carretera Lima - Callao.	9.43	0.41
	Chillón Bajo	Políticamente está ubicada (en mayor medida) en los departamentos de Canta (Huamantanga Santa Rosa de Quives) y en el departamento de Lima (Carabaylo), su cauce principal lo constituye el río Chillón con una longitud de 58.62 km.	1126.14	49.01
TOTAL			100.00	

Fuente: Elaboración propia.

El río Chillón recibe los aportes de agua principalmente de los ríos Yamacoto, Huancho, Ucaña y Quisquichaca; la cuenca tiene una extensión aproximada de 2300 km² del cual 966 km² corresponden a la cuenca húmeda, que representa el 42 % aproximadamente a los 2500 msnm del total. Altitudinalmente se desarrolla desde los 0 msnm hasta los 5000 msnm, limitando por el sur con la cuenca de río Rímac, por el este con la cuenca del río Mantaro, por norte con la cuenca del río Chancay y por el Oeste con el Océano Pacífico, como es común en las cuencas de la costa, la cuenca del río Chillón presenta un relieve alargado con fondo profundo y pendiente pronunciada; la zona alta de la cuenca (4000 a 5000 msnm) se caracteriza por presentar temperaturas por debajo de los 6 °C con precipitaciones medias de 700 mm/año; la zona media de la cuenca (3000 a 4000 msnm) se caracteriza por presentar temperaturas en un rango de 6 °C a 12 °C con precipitaciones medias de 500 mm/año; la zona baja (3000 a 1000 msnm) junto con la Planicie Costera (0 a 1000 msnm) presentan temperaturas en un rango de 18 °C a 24 °C con una precipitación en el rango de 100 a 200 mm/año.

La cuenca del río Chillón está conformada por 22 subcuencas siendo la subcuenca del Chillón bajo la de mayor extensión de terreno (1 126.14 km²) y la subcuenca Huerta Vieja la de menor extensión (9.43 km²), ver Tabla 3-6).

Infraestructura

a) Centrales hidroeléctricas

- **C.H Canta**

Se encuentra ubicada en la provincia de Canta, distrito del mismo nombre, en la localidad de Obrajillo, a una altitud de 2819 msnm, la central que está administrada por EDELNOR inició sus operaciones en 1986. Las aguas del río Chillón son captadas aguas arriba por la represa Chunchun ubicada en el río Huara (tributario del río Chillón), las aguas tienen una caída neta de 120 m hasta la casa de máquinas en donde sus dos turbinas Pelton de eje horizontal generan una potencia de 0.9 MW.

- **C.H. Yaso**

Se encuentra ubicada en la provincia de Canta, distrito de Santa Rosa de Quives, en la localidad de Yaso a una altitud de 1150 msnm, la central es administrada por la empresa EDELNOR iniciando sus operaciones en 1989. Las aguas del río Chillón son tomadas aguas arriba por medio de una bocatoma el cual conecta al canal de conducción entregando un caudal de diseño de 1.2 m³/s, las aguas tienen una caída de 25 m hasta la casa de máquinas en donde sus dos turbinas (Francis y tipo Bomba Reversible) de eje horizontal generan un potencia de 0.171 MW.

Cabe resaltar la existencia de la central hidroeléctrica de Huaros la cual producía una potencia de 80 kW, sin embargo esta central está desactivada actualmente.

Tabla 3-7 Centrales Hidroeléctricas en la cuenca del Chillón

CENTRAL	EMPRESA	DEP	PROV.	DISTRITO	LOCALIDAD	ALT. (msn m)	POT. (MW)	AÑO DE INICIO
Canta	Edelnor	Lima	Canta	Canta	Obrajillo	2819	0.900	1986
Yaso	Edelnor	Lima	Canta	Santa Rosa de Quives	Yaso	1150	0.171	1989
Huaros (*)	--	Lima	Canta	Huaros	---	---	0.800	--

(*) Central hidroeléctrica desactivada

Fuente: Elaboración propia

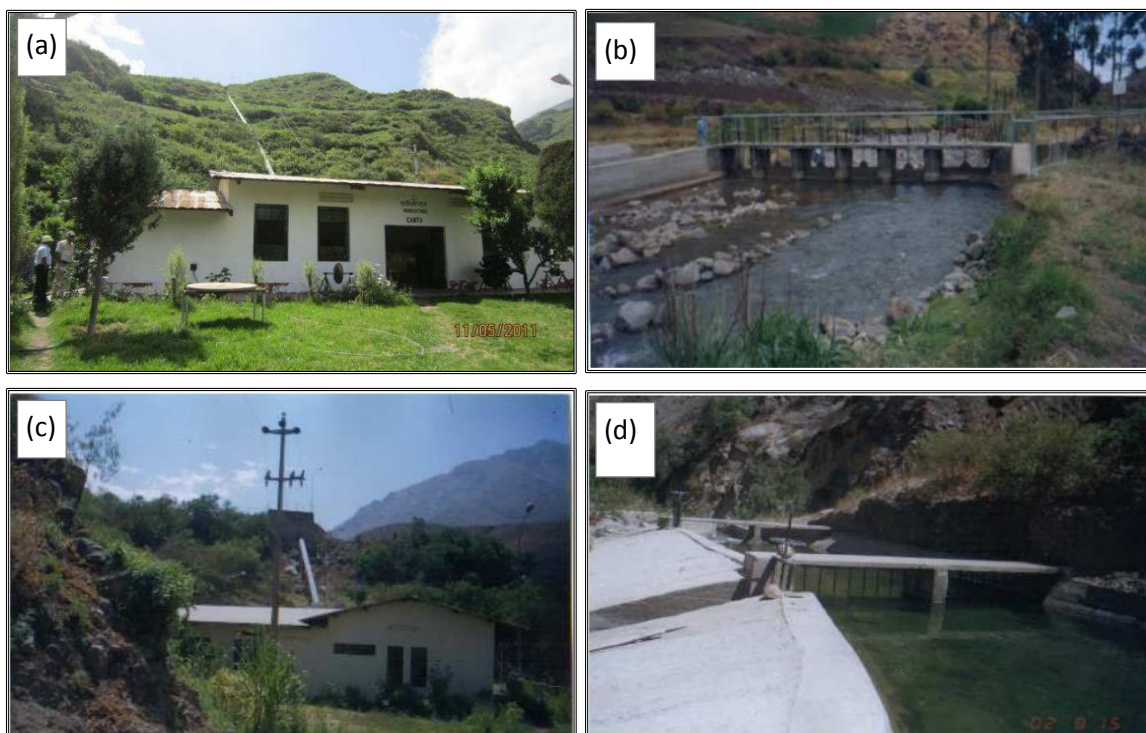


Figura 3-2 Casa de máquinas y bocatomas: (a) Casa de máquinas de la C.H Canta, (b) Bocatoma de la C.H Canta, (c) Casa de máquinas de la C.H Yaso y (d) Bocatoma de la C.H Yaso.

Fuente: OSINERGMIN, 2011

Fuentes de agua natural y artificial

Los cuerpos de agua natural presentes en la cuenca del río Chillón en su gran mayoría presentan un bajo potencial hídrico, dentro de la cuenca alta del Chillón se conocen 75 lagunas (ONER 1980) de los cuales 59 pertenecen a la parte alta de la cuenca, en esta área se concentran la mayor cantidad de lagunas naturales y reguladas. Los cuerpos de agua artificial en la cuenca del río Chillón según el inventario nacional de aguas son alrededor de 16 lagunas (ver Tabla 3.8), los más resaltantes por su capacidad se encuentran ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Chillón, conformada por 10 lagunas, estas brindan un volumen anual de 22.228 MMC (según inventario nacional de aguas) ubicadas en su gran mayoría en la cabecera de la cuenca del río Chillón, entre las más importantes se tiene a las lagunas, Chuchón, Azulcocha, Leoncocha y Yanacochoa, sus aguas tienen por finalidad cubrir las demandas agrícolas en el valle soltando sus aguas en épocas de estiaje, mientras que las 5 lagunas restantes (Yanauilla baja, Chahulcocha, Acomachay, Urcuncocha y Usurcocha) sirven para afianzar el riego de los cultivos en la parte media de la cuenca. Estas regulaciones junto con la presencia de nevados que conforman la Cordillera viuda permiten regular el caudal del río Chillón.

Tabla 3-8 Principales lagunas reguladas en la cuenca del río Chillón

LAGUNA	DEP.	PROV.	DISTRITO	ALT. (msn m)	ESTADO	AÑO DE OPERACIÓN	VOL. MMC
Chuchón	Lima	Canta	Huaros	4500	Regular	1938	9.362
Azulcocha	Lima	Canta	Huaros	4600	Bueno	1941	7.377
Leoncocha	Lima	Canta	Huaros	4462	Regular	1941	3.042
Yanacocha	Lima	Canta	San Buenaventura	4390	Malo	1940	1.228
Yanaulla Baja	Lima	Canta	Huaros	4820	Regular	---	0.350
Chahualcocha	Lima	Canta	Huaros	---	---	---	0.295
Acomachay	Lima	Canta	Huaros	4700	Bueno	2000	0.227
Urcuncocha	Lima	Canta	San Buenaventura	4460	Malo	1940	0.207
Chaucay 1	Lima	Canta	Huamantanga	4610	Regular	1986	0.119
Usurcocha	Lima	Canta	San Buenaventura	4470	Malo	1969	0.021
Azulcocha - Carhua	Lima	Canta	Canta	---	Regular		0.169
Chupacocha	Lima	Canta	Arahuay	---			1.433
Turmanyacocha	Lima	Canta	Arahuay	---	Malo	1958	0.634
Huicso	Lima	Canta	Arahuay	---	Malo	---	0.559
Tambillo	Lima	Canta	Arahuay	---	Regular	----	0.418
Quinan	Lima	Canta	Lachaqui	---	Malo	1967	0.048
TOTAL							25.489

Fuente: Elaboración propia.

Existen algunos proyectos futuros (cuyos estudios datan de los años 30) para la regulación de lagunas naturales en la cuenca alta y media del río Chillón, por citar algunas podemos mencionar el represamiento de la laguna Chonta y Tuctucocha con una capacidad de almacenamiento de 2.5 MMC y 2.0 MMC respectivamente.

Es preciso mencionar la futura regulación de la laguna Artificial Jacaybamba ubicada en la cuenca alta del río Chillón a una altitud de 3 600 msnm, se estima que el espejo de agua tendría un área de 110 km² con una capacidad estimada en 44 MMC; este proyecto permitiría cubrir la demanda agua en la zona baja de la cuenca.

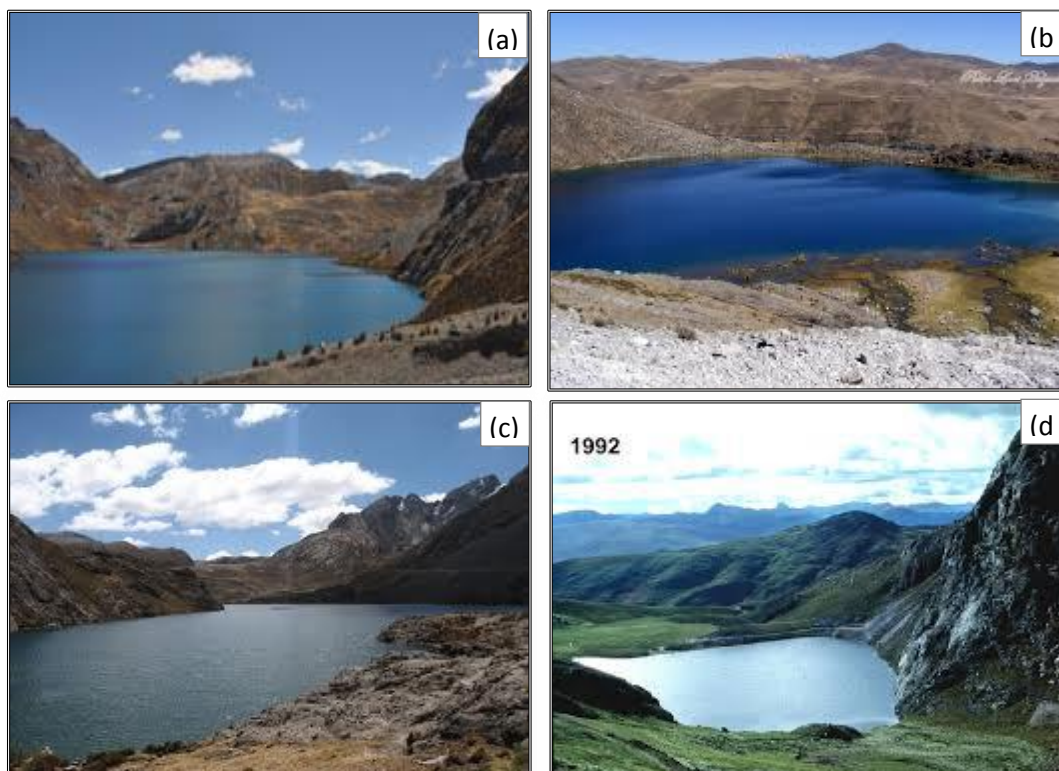


Figura 3-3 Principales lagunas reguladas: (a) Laguna Chuchón con una capacidad de 9.36 MMC, (b) Laguna Azulcocha con una capacidad de 7.38 MMC, (c) Laguna Leoncocha con una capacidad de 3.04 MMC. y (d) Laguna Yanacocha con una capacidad de 1.23 MMC.

Fuente: Elaboración propia

Obras de regulación del río chillón

Las regulaciones de estas lagunas y los proyectos futuros responden a la demanda creciente del recurso hídrico concentrado en gran medida en la parte baja de la cuenca, sin embargo la regulación de estas aguas junto con los aportes de los deshielos en la cabecera de la cuenca no han sido suficientes para abastecer a la población en las últimas décadas (sobre todo en épocas de estiaje), por lo que en el marco del Proyecto “Aprovechamiento óptimo de las aguas superficiales y subterráneas del río Chillón” se planteó la construcción de una planta de tratamiento ubicada en el distrito de Carabayllo en la zona de Punchauca, esta planta fue concesionada en el año 2000 al consorcio Agua Azul mediante la modalidad BOT (construcción, operar y transferir) con la finalidad de explotar y tratar las aguas superficiales y subterráneas para luego ser vendidas a la empresa de servicio de agua y alcantarillado SEDAPAL; un segundo proyecto denominado Jacaybamba, que estaría ubicado aguas arriba de la planta de tratamiento, tiene por finalidad regular las aguas del río Chillón con la construcción de un embalse de 44 MMC entregando un caudal en épocas de estiaje de 2.0 m³/s abasteciendo a la planta de tratamiento Agua Azul y a la demanda agrícola en la zona.

3.2.3 Cuenca del río Lurín

Se ubica políticamente en la jurisdicción del departamento de Lima enmarcándose en las provincias de Lima y Huarochirí (abarcando cuatro y diez distritos respectivamente) frente a la costa del Perú.

La cuenca se origina en los deshielos del nevado Surococha a una altitud de 5300 msnm, recibiendo sus aguas, recorriendo una longitud de su cauce principal de 111.24 km hasta desembocar al Océano Pacífico. En la cabecera de la cuenca el río Lurín se encuentran las lagunas Huasca, Atococha, Azulcocha y Suerococha, por el norte y las lagunas Chanape, Negra y Compunco, por el sur; las cuales aportan al caudal base del río Chillón. La cuenca se encuentra inscrita entre los paralelos 11° 50' 31" y 12° 16' 34" de latitud sur y 76° 17' 11" y 76° 54' 33" de longitud Oeste.

La cuenca del río Lurín está conformada por numerosos ríos y quebradas siendo las más importantes Taquia, Lahuay, Lahuaytambo, Langa, Sunicancha y Tinajas, por la margen izquierda y Chamacha, por la margen derecha. La cuenca tiene una extensión 1 658.19 km² con un área de cuenca húmeda (que va desde la cabecera de la cuenca hasta los 2500 msnm.) de 791.89 km² que representa el 48 % del total; la cuenca del río Lurín presenta una pendiente promedio de 4.76 % (INRENA 2004).

La cuenca del río Lurín limita por el norte con la cuenca del río Rímac, por el sur este con la cuenca del río Chilca y Mala; y por el Oeste con el Océano Pacífico. Al igual que la cuenca del Chillón y Rímac, la cuenca del río Lurín presenta un relieve alargado con fondo profundo y pendiente pronunciada presentando una fisiografía escarpada cortada por quebradas y estrechas gargantas las cuales son limitadas por cadenas de cerros.

Tabla 3-9 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Lurín

CUENCA	PROVINCIA	DISTRITOS INCLUIDOS
LURÍN	Lima Metropolitana	Lurín, Villa María del Triunfo y Pachacamac y Cieneguilla
	Huarochirí	Santo Domingo de los Olleros, Antioquia, Lahuaytambo, Santiago de Tuna, San Andres de Tupicocha, Cuenca, Huarochirí, Lahuaytambo, Langa, San Damian,

Fuente: Elaboración propia.

Según el informe final sobre estudio hidrológico de la cuenca del río Lurín, realizado por INRENA en agosto del 2004, se ha delimitado 10 subcuencas de acuerdo a sus características fisiográficas e hidrológicas, ver Tabla 3-10.

Respecto a esta división podemos mencionar a la subcuenca media 3 del río Lurín que con un área de 257.94 km² es la subcuenta más grande representado el 15.53% del total del área de la cuenca. La subcuenca Quebrada Chacna con área de 88.94 km² presenta, al contrario de la anterior, la menor extensión de terreno abarcando solo el 5.36 % del total.

La precipitación en la cuenca del río Lurín está fuertemente correlacionada con la altitud, (existe una dependencia orográfica) encontrándose valores promedios de precipitación multianual que van desde los 250 mm hasta los 650 mm, para la cuenca Húmeda (cuyo límite inferior presenta una altitud de 2 500 msnm); y con valores promedios de precipitación multianual que van desde los 0 mm hasta los 250 mm para la cuenca seca.

Los registros de caudales están limitados, pues solo existe una estación hidrométrica dentro de la cuenca del río Lurín, La estación está ubicada en el puente Manchay (nombre de la estación), en el distrito de Pachacamac. Según registros el río Lurín descarga 68.3 % de su volumen promedio anual durante la época de avenidas, con valores mensuales de 2.24, 5.83 y 7.54 m³/s de caudal para los meses de enero, febrero y Marzo respectivamente y para épocas de estiaje se tiene en promedio un caudal de 1.38 m³/s, siendo abril y diciembre los meses de mayor valor. Para ambas estaciones se ha tenido en cuenta un nivel de persistencia de 90 % (INRENA-MINAG, 2004).

Tabla 3-10 Unidades hidrográficas de la cuenca del río Lurín

UNIDAD HIDRO.	SUB-CUENCA	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE	
			(km ²)	(%)
LURÍN	Quebrada Pachachaca	Hidrográficamente se localiza en la parte alta de la cuenca del río Chillón, en su territorio se ubican las lagunas Huasca Suerococha, Azulcocha, entre otras. Políticamente ubicado en el distrito de San Damián en la provincia de Huarochiri, con una longitud de cauce principal de 24.54 km.	125.14	7.55%
	Quebrada Taquia	Hidrográficamente se localiza en la parte alta de la cuenca del río Lurín, en su territorio se ubican las lagunas Negra Chanape Compunco entre otras. Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de San Damián, en la provincia de Huarochirí, con una longitud de cauce principal de 22.49 km.	126.60	7.63%
	Alto Río Lurín	Hidrográficamente se localiza en la parte alta de la cuenca del río Lurín entre las cotas 4700 y 1790 msnm. Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en el distrito de San Damián, en la provincia de Huarochirí.	182.51	11.01%
	Río Canchahuara	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en el distrito de San Andres de Tupococha, en la provincia de Huarochirí. Presenta una longitud de cauce principal de 38.80 km.	173.55	10.47%
	Quebrada Chamacna	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Langa y Huarochirí, en la provincia de Huarochirí. Presenta una longitud de cauce principal de 19.18 km.	88.94	5.36%
	Media 1 Río Lurín	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Antioquia y Cuenca en la provincia de Huarochirí, entre las cotas 3750 y 1546 msnm.	92.02	5.55%
	Media 2 Lurín	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Antioquia y Santiago de Tuna en la provincia de Huarochirí, entre las cotas 4100 y 1000 msnm.	233.04	14.05%
	Media 3 Río Lurín	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Cieneguilla y Antioquia en la provincia de Lima y Huarochirí respectivamente, entre las cotas 2450 y 200 msnm.	257.94	15.53%
	Quebrada Tinajas	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Pachacamac (provincia de Lima), Santo Domingo de los Olleros y Antioquia (en la provincia de Huarochirí). Su cauce principal es la Quebrada Tinajas con una longitud de 29.59 km.	164.25	9.91%
	Baja Río Lurín	Políticamente se encuentra ubicada (en gran medida) en los distritos de Villa María del Triunfo, Lurín y Pachacamac en la provincia de Lima.	214.65	12.94%
TOTAL			100.00	

Fuente: Elaboración propia

Fuentes de agua natural y artificial

Los cuerpos de agua naturales conformada por las lagunas en la parte alta de la cuenca conforman el caudal base del río Lurín junto con los manantiales y quebradas a lo largo esta. Según inventario de Lagunas y Represamientos (ONERN-1980) las lagunas más importantes son: Huasca, Atococha, Azulcocha, Suercocha Chanape. Negra y Conpunco, Tres Lagunas, Culco, Puchis, Naña y Paullacocha; aunque la mayoría de ellas no presentan un gran volumen en su vaso.

Debido a la necesidad de recurso hídrico en la cuenca, en las zonas aledañas a algunas lagunas se han realizado minirepresamientos financiados en algunos casos por los mismos pobladores, con el fin exclusivo de cubrir la demanda agrícola en la zona, por ejemplo se tiene el represamiento de las lagunas Ururi, Catajaiqui, Yansiri I y II, Hueccho y Pato Negro ubicado en la zona alta y media de la cuenca, en el distrito de San Andrés de Tupicocha.

El valle Lurín y la demanda de recurso hídrico

La cuenca del río Lurín en la actualidad presenta déficit de recurso hídrico en épocas de estiaje (sobre todo en los meses de agosto a diciembre), las demandas se concentran en la parte baja de la cuenca debido a que más del 85.6 % (INEI - Censos Nacionales 2007) de la población está situada en ella, además de esto la práctica de la agricultura es uno de los principales ocupaciones de la población rural, lo que implica una creciente demanda de recurso hídrico; la zona agrícola es gobernada por el valle Lurín el cual va desde los 0 hasta los 800 msnm, este valle es denominado el último valle verde de la ciudad capital, pues los registros de hectáreas agrícolas, que datan de 1935, arrojan una pérdida del 70 % de zonas agrícola, siendo el valle Lurín el que menos perdida ha tenido. En el valle Lurín se destacan los cultivos de camote, cebolla, Alfalfa, membrillo, maíz, chala y ají.

Tabla 3-11 Registros de áreas agrícolas en las cuencas de Rímac-Chillón-Lurín

CUENCA	REGISTRO DE HECTAREAS		PERDIDAS	% PERDIDAS
	1935	2001		
RÍMAC	15 500	1 500	14 000	90
CHILLÓN	11 500	5 000	6 500	47
LURÍN	6 000	5 000	1 000	17

Fuente: Elaboración propia.

Obras de regulación del río Lurín

En este contexto en donde el recurso hídrico es cada vez más insuficiente la regulación de aguas superficiales en la cuenca se convierte en una de las principales preocupaciones, para esto se ha previsto el represamiento de la quebrada Tinajas ubicada aguas arriba del puente Manchay, el cual es un vaso natural. El represamiento de los excedentes de los recurso hídrico en épocas de avenidas junto con la creación de una futura planta de agua Potable-PTAP permitirán regular las aguas de río Lurín abasteciendo la creciente demanda de Lima sur así como cubrir la demanda agrícola en el valle.

3.2.4 Cuenca alta del Mantaro

Esta cuenca políticamente comprende parte de la provincia de Pasco de la región Pasco y las provincias de Junín, Tarma y Yauli de la región Junín.

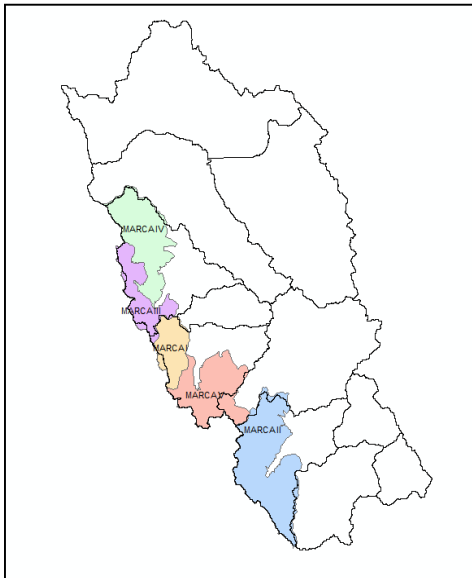


Figura 3-4 Cuenca Alta del Mantaro y sistema de regulación Marcapomacocha
Fuente: Elaboración propia

Sobre esta cuenca se encuentra el principal sistema de almacenamiento y trasvases para la cuenca del Rímac constituido por los Sistemas de Marca I, II, III, IV y V.

Proyectos de trasvases de agua hacia la cuenca del río Rímac

El caudal en época de estiaje del río Rímac ha sido regulado y aumentado gradualmente por los trasvases de cuencas en la vertiente del Atlántico. Los hitos más importantes para afianzar los caudales del Rímac en época de estiaje tuvieron inicio en la década de los 30, iniciándose con el trasvase de las aguas del río Mantaro hacia la subcuenta del río Santa Eulalia (Marca I), luego de esta seguiría las obras de Marca III, el embalse de Yuracmayo y en fechas recientes el proyecto Marca IV.

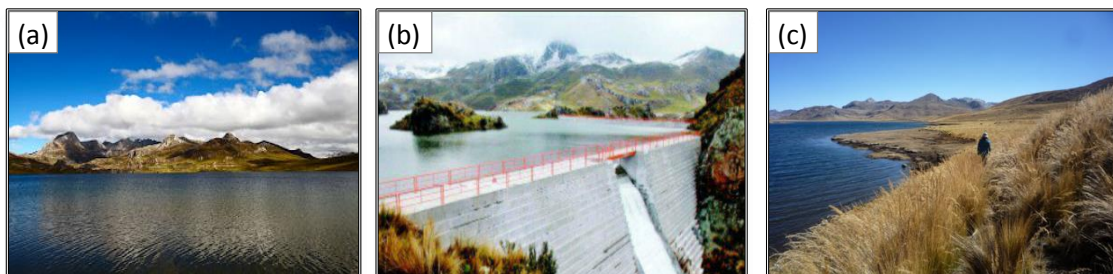


Figura 3-5 Principales lagunas en el sistema de Marca: (a) Laguna Marcapomacocha, (b) Laguna Antacoto y (c) Laguna Marcacocha

Fuente: (a) www.bullard.com.pe, (b) SEDAPAL, 2008, (c) www.worldisround.com

PROYECTO MARCAPOMACOCHA-MILLOC (MARCA I)

- La obra que para la época fue considerada una proeza de ingeniería fue dividida en dos etapas, la primera fue ejecutada entre los años 1958 y 1962, tiempo en el cual se construyó el túnel trasandino (Cuevas - Milloc) de 10 km de longitud, canales de aducción y presas; la segunda etapa se ejecutó entre los años 1964 y 1966 y permitió incrementar el caudal al doble (en total **6 m³/s**), la obra fue denominada Marcapomacocha "A". El proyecto consistió en el trasvase de las aguas de cinco **lagunas: Marcapomacocha, Antacoto, Marcacocha, Pucrococha** (también conocido como Sangrar) y **Tucto**; (pertenecientes a la cuenca del río Mantaro); hacia el río Santa Eulalia (tributario del río Rímac) en épocas de estiaje, a través de la construcción de un canal denominado canal Cuevas (el cual lleva las aguas de las lagunas), este conecta al túnel trasandino, hacia la laguna **Milloc** el cual aporta sus aguas al **río Pillica** tributario del río Santa Eulalia.
- La finalidad del proyecto fue cubrir la demanda del servicio eléctrico en la ciudad de Lima, pues con el aporte del trasvase junto con el caudal propio del Santa Eulalia y aguas abajo regulados por la presa Sheque, cubren la demanda de agua de la Central Hidroeléctrica Huinco cuya potencia es de 247.3 Mw. (OSINERGMING 2012), además de afianzar el caudal de río Rímac aguas abajo.

Fuente: Adaptado de SEDAPAL.



Figura 3-6 Presa embalse Pomacocha y represa Huallacocho

Fuente: SEDAPAL

PROYECTO DERIVACIÓN POMACOCCHA -RIO BLANCO (MARCA II)

- La Obra que hasta la actualidad no se ejecuta tiene una inversión estimada de US\$ 400 millones (Diario GESTION, Febrero-2014), el estudio definitivo estuvo a cargo del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado (SEDAPAL), el cual fue ejecutado en 1996. El proyecto consiste en el afianzamiento de las **lagunas Pomacocha y Huallacocha** ubicada en la cuenca del Mantaro, provincia de Yauli, departamento de Junín; cuyo volumen será elevado gracias a los excedentes en época de avenida del río Yauli, sus aguas serán llevadas a través de sistemas de canales y túneles, esto permitirá un mayor volumen útil en el embalse de Pomacocha para luego llevar estas aguas a la **quebrada Pucullo** (tributario del río Blanco) perteneciente a la cuenca del río Rímac, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, por medio de un nuevo túnel trasandino denominado Pomacocha – río Blanco, que tendrá una longitud de 10 km de largo. Se estima que el aporte de recurso hídrico a la cuenca del río Rímac será de **4 m³/s** pudiendo llegar ocasionalmente hasta 6.5 m³/s (Leonor Méndez, 2001).
- La finalidad del proyecto es cubrir la creciente demanda de agua en la ciudad Lima así como el aporte de agua a la futura ampliación de la planta de tratamiento Huachipa.

Fuente: Adaptado de SEDAPAL

PROYECTO AFIANZAMIENTO DEL SISTEMA MARCAPOMACOCCHA (MARCA III)

- Las obras se iniciaron en agosto de 1997 terminando dos años después, el proyecto que fue denominado Marcapomacocha "B" consistió en la captación de las aguas de las **quebradas Cusurcocha y Casacancha** tributarios del río Carhuacayán (efluente del río Mantaro), estas fueron llevadas a la laguna Antacoto por medio de dos túneles consecutivos el primero denominado **Pallanga - Tuctococha** y el segundo **Patahuay - Sapicancha**, separados por un sistema de canales; las aguas descargan por gravedad a la laguna Sapicancha para ser llevados por medio del río que lleva el mismo nombre hacia los sistemas de canales pertenecientes al proyecto marcapomacocha I, el cual conecta con la laguna Antacoto, para luego ser transportadas por el túnel trasandino Cuevas - Milloc (Marcal).
- La finalidad del proyecto fue afianzar el caudal de Marcapomacocha I (6 m³/s) aportando un promedio de **3 m³/s** en épocas de estiaje.

Fuente: Adaptado de SEDAPAL

El Proyecto comprende:

- 17 Bocatomas recolectoras.
- 40.1 km de Canales.
- 2 918 m Túnel Río Pallanga.
- 5,511 m Túnel Sapicancha.
- Presa Principal.
- Presa Vertedero.
- Dique Intermedio.
- Dique Norte A y B.

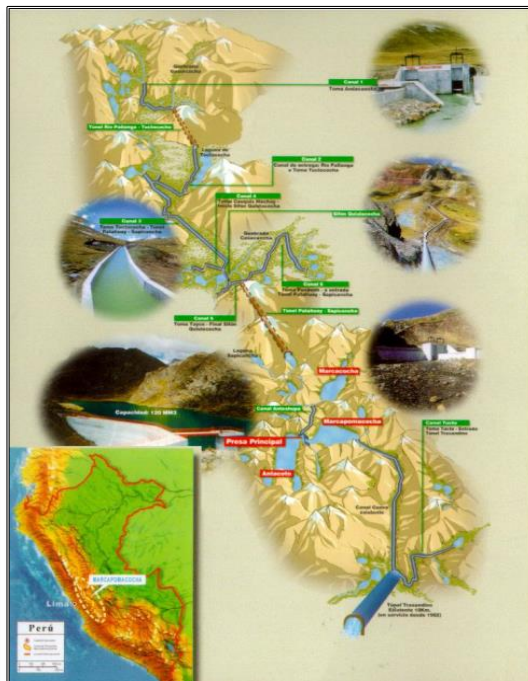


Figura 3-7 Presa embalse Pomacocha y represa Huallacocha

Fuente: Céspedes Josué, Nuevas Fuentes para el abastecimiento en Lima

PROYECTO HUASCACOCHA RÍMAC (MARCA IV)

- El EIA (Estudio de Impacto Ambiental) preliminar, que generó controversia en la zona de estudio (provincia de Pasco), fue aprobado en el 2008, comenzando las obras a finales del año 2009 a cargo de la firma OAS-España, no fue hasta el año 2010 que debido a los problemas sociales y legales que acontecieron en aquel entonces por no informar a la población; se aprobó un nuevo EIA incluyendo la participación de la población afectada directamente con el proyecto, finalizando las obras el año 2012.
- La obra que tuvo un costo de US\$ 345 millones consistió en el represamineto de la **laguna Huascacocha** ubicada en la provincia de Pasco, en la cuenca alta y media del río Mantaro, al norte de los sistemas de Marca I-III, el cual es alimentado por otras lagunas en su cabecera (**Sheque, Huaronconcha, Quimacocha, Naticocha, Yanamachay**), las aguas de la laguna Huascacocha son bombeadas por medio de canales, tuneles y sifones, hacia los sistemas de canales de Marca III, para luego ser llevadas a la cuenca del río Rímac por medio del túnel Trasandino Cuevas - Milloc (construido 1962, Proyecto Marca I).
- La finalidad del proyecto fue **augmentar el caudal de trasvase de 9 m³/s (Marca I-III) a 12 m³/s** en épocas de estiaje, favoreciendo a más 2.4 millones de Habitantes de la ciudad de Lima y el Callao (SEDAPAL, 2010), entregando mayor caudal a las plantas de tratamiento Huachipa y la Atarjea.

Fuente: Adaptado de SEDAPAL

PROYECTO EMBALSE CASACANCHA (MARCA V)

- El proyecto que está destinado para el año 2030, consiste en la captación de las aguas del **rio Carispaccha**, tributario del río Mantaro, estas aguas serán llevadas por medio de canales a la **presa-embalse Casacancha** el cual estará ubicado en la quebrada del mismo nombre que la futura presa, aguas abajo de la bocatoma Tucto, la presa-embalse está inscrita en el valle glaciar del Casacancha.
- El proyecto, que tendrá un costo de US\$ 45.49 millones (SEDAPAL), podría entenderse como una ampliación del proyecto Marcapomacocha I, pues las aguas captadas en épocas de lluvia por la presa Casacancha, serán llevadas por medio del túnel Tucto (Marca I) para luego ser mezcladas con las aguas trasvasadas de Marca I-III-IV en el túnel trasandino Cuevas - Milloc (Marca I).
- El embalse Casacancha almacenará un volumen de 33 MMC por año y está destinado a aportar en épocas de estiaje **1.8 m³/s** a la cuenca del Rímac, estas aguas abastecerán a las plantas de la Atarjea y Huachipa.

Fuente: Adaptado de SEDAPAL

Tabla 3-12 Cuadro resumen de los proyectos Marcapomacocha

PROYECTO	NOMBRE	LAGUNAS O RÍOS APORTANTES	CAUDAL (m ³ /s)	ESTADO
Marca I	Marcapomacocha - Milloc	Lagunas: Marcapomacocha, Antacoto, Marcacocha, Pucrococha, Tucto y Milloc.	6.0	Obras terminadas en 1966
Marca II	Derivación Pomacocha - Río Blanco	Lagunas: Pomacocha y Huallacocha. Quebrada Pucullo.	4.0	No construido
Marca III	Afianzamiento del sistema Marcapomacocha	Quebradas Cusurcocha y Casacancha	3.0	Obras terminadas en 1999
Marca IV	Huascacocha - Rímac	Lagunas: Huascacocha, Sheque, Huaronconcha, Quimacocha, Naticocha, Yanamachay.	2.4	Obras terminadas en 2012
Marca V	Embalse Casacancha.	Río Carispaccha	1.8	No construido
TOTAL			17.2	

Fuente: Elaboración propia

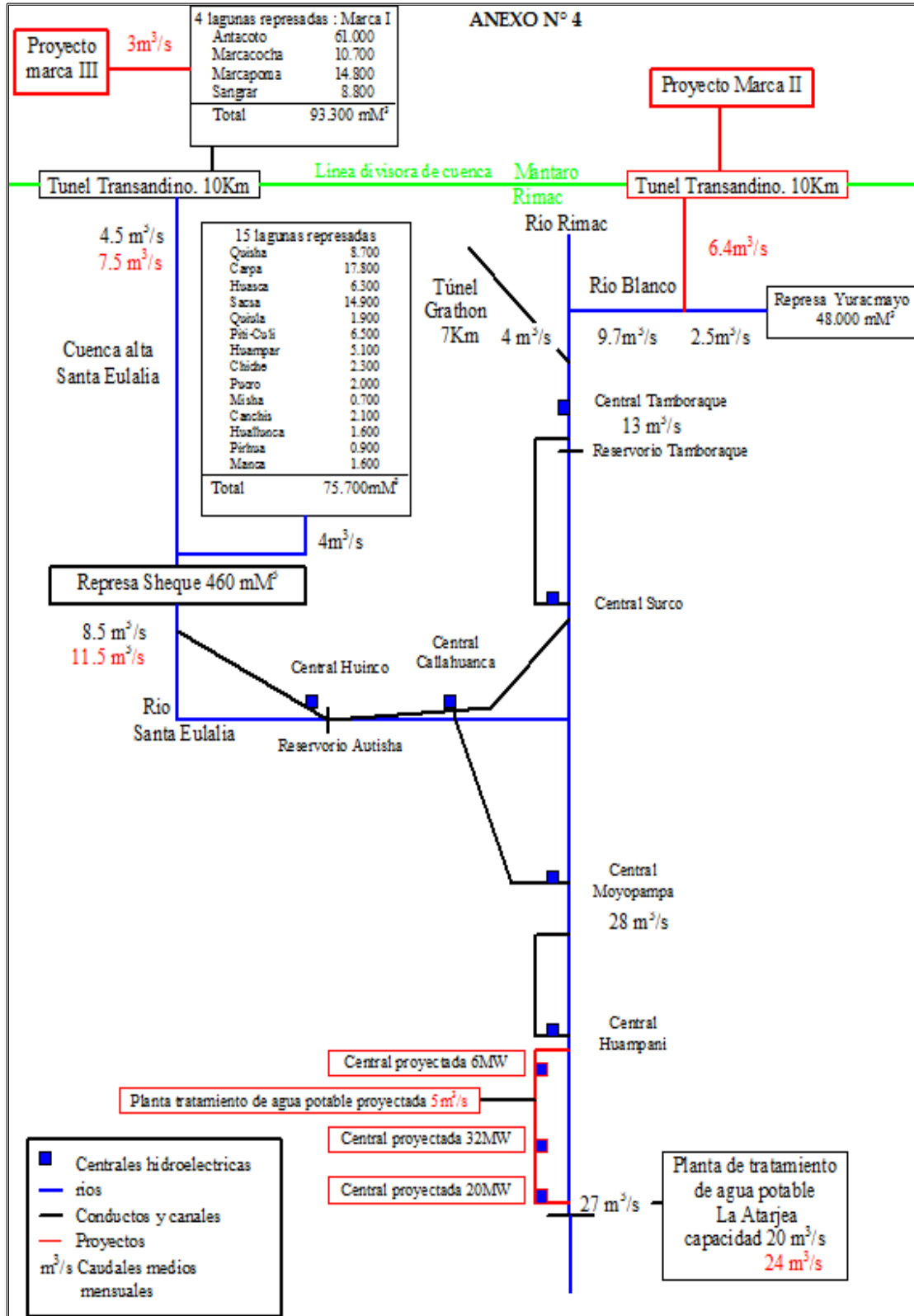


Figura 3-8 Esquema hidráulico de la cuenca del río Rímac
Fuente: Fondo controlador Perú Francia, Agencia DESAIX

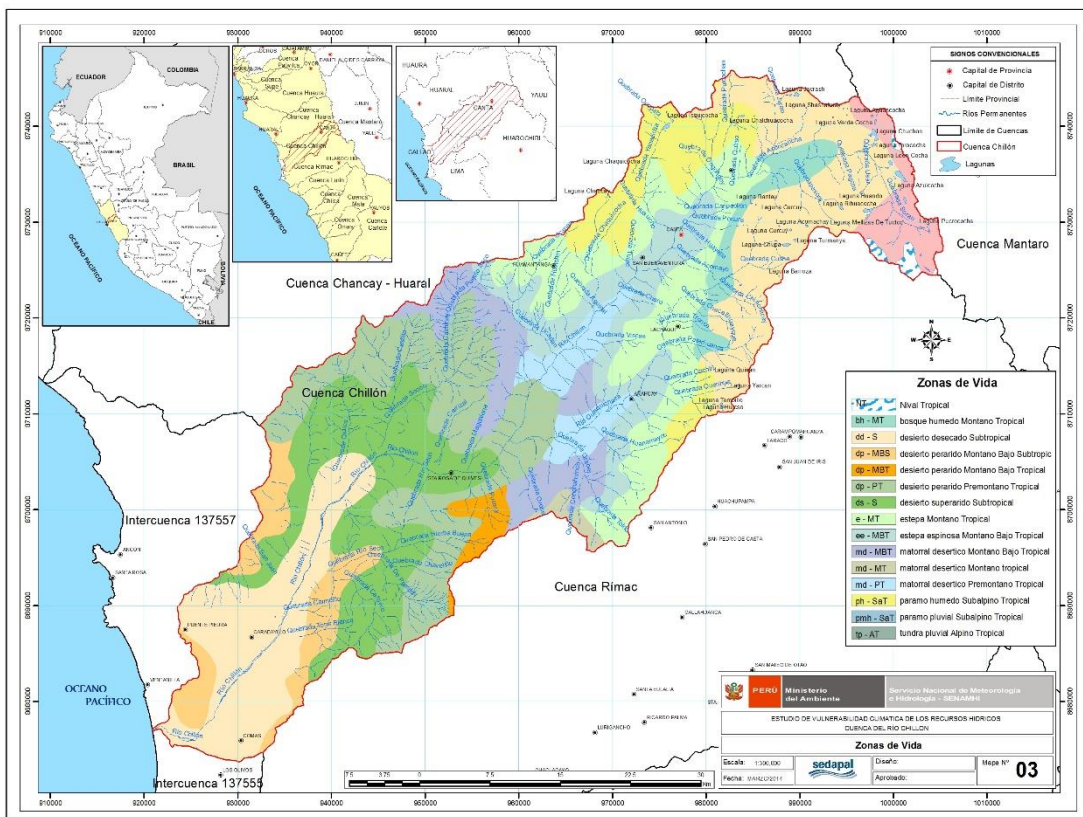
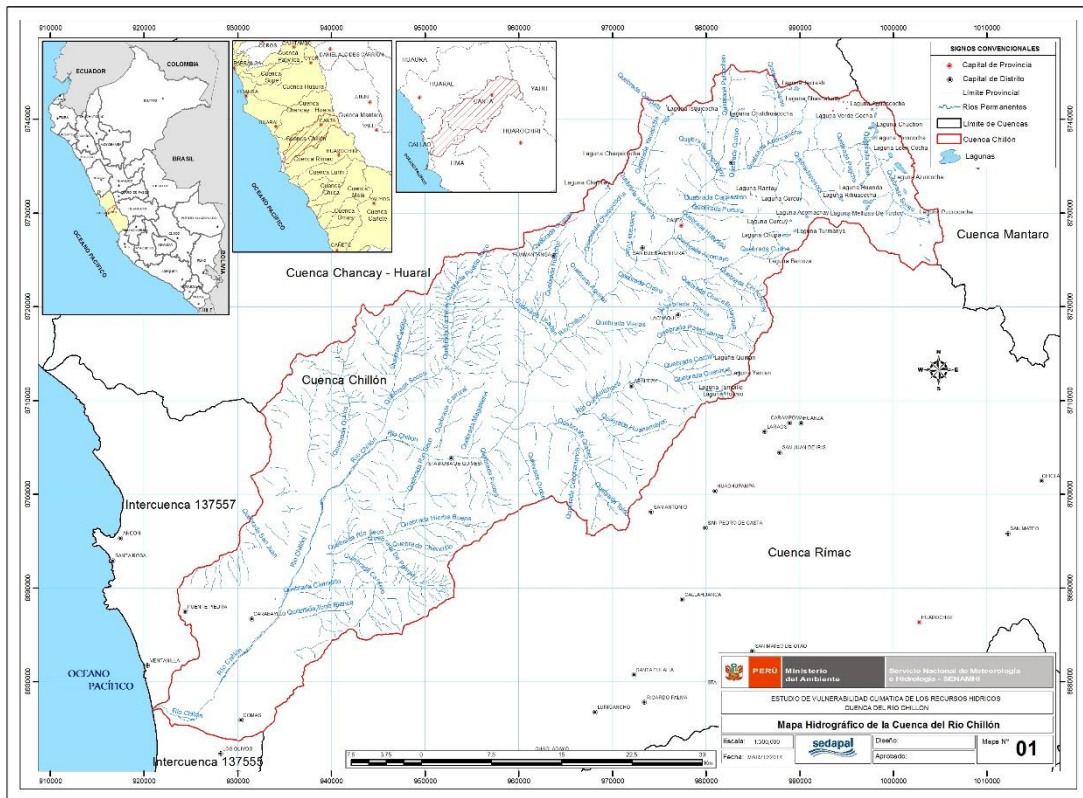


Figura 3-9 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Chillón

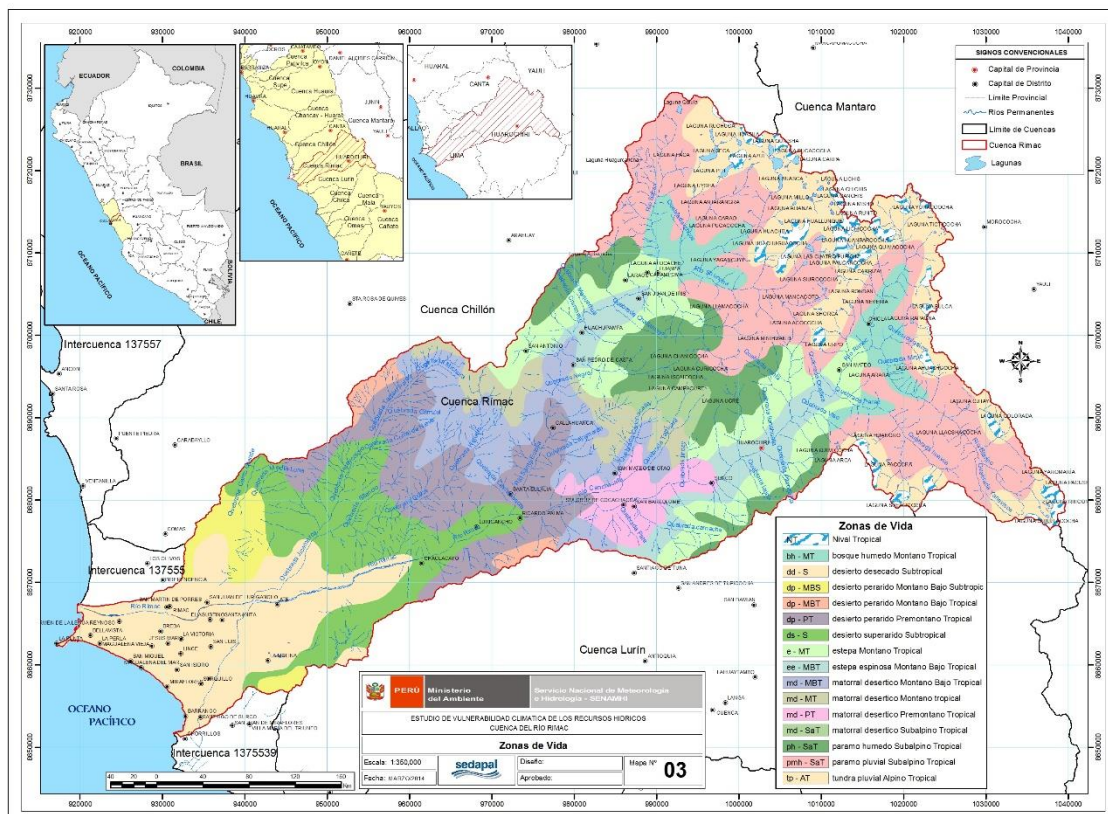
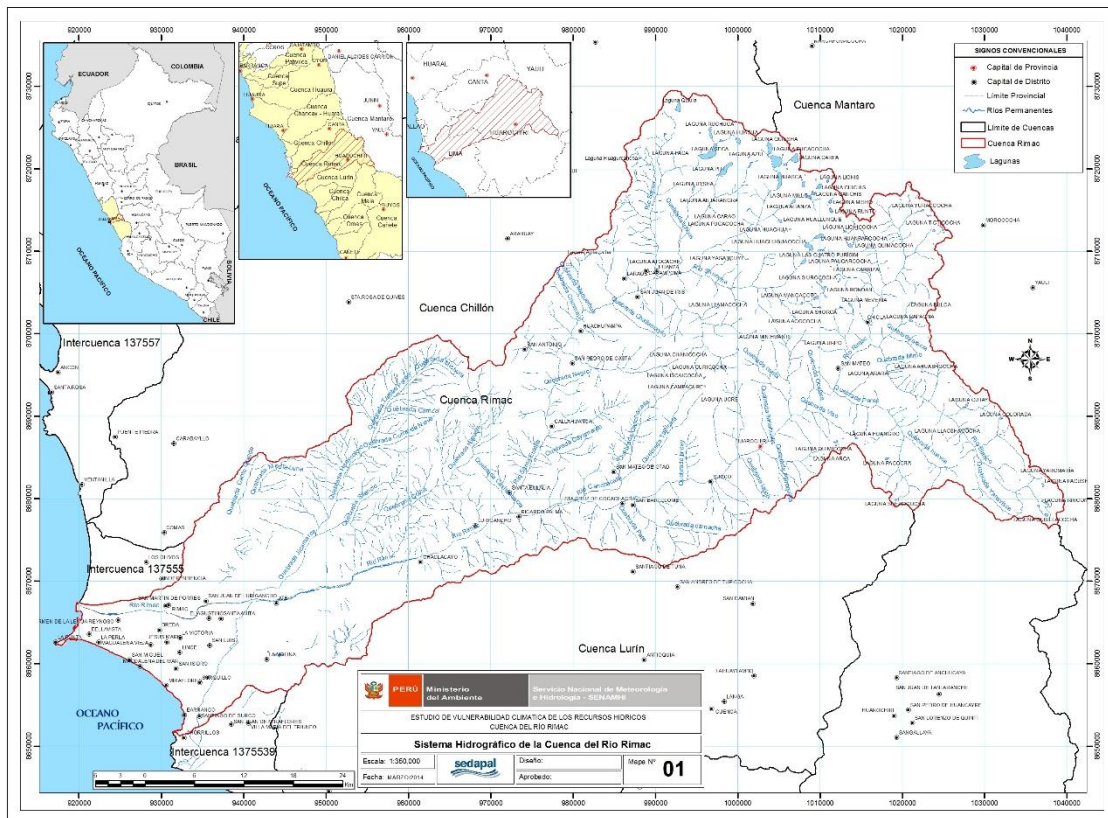


Figura 3-10 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Rímac

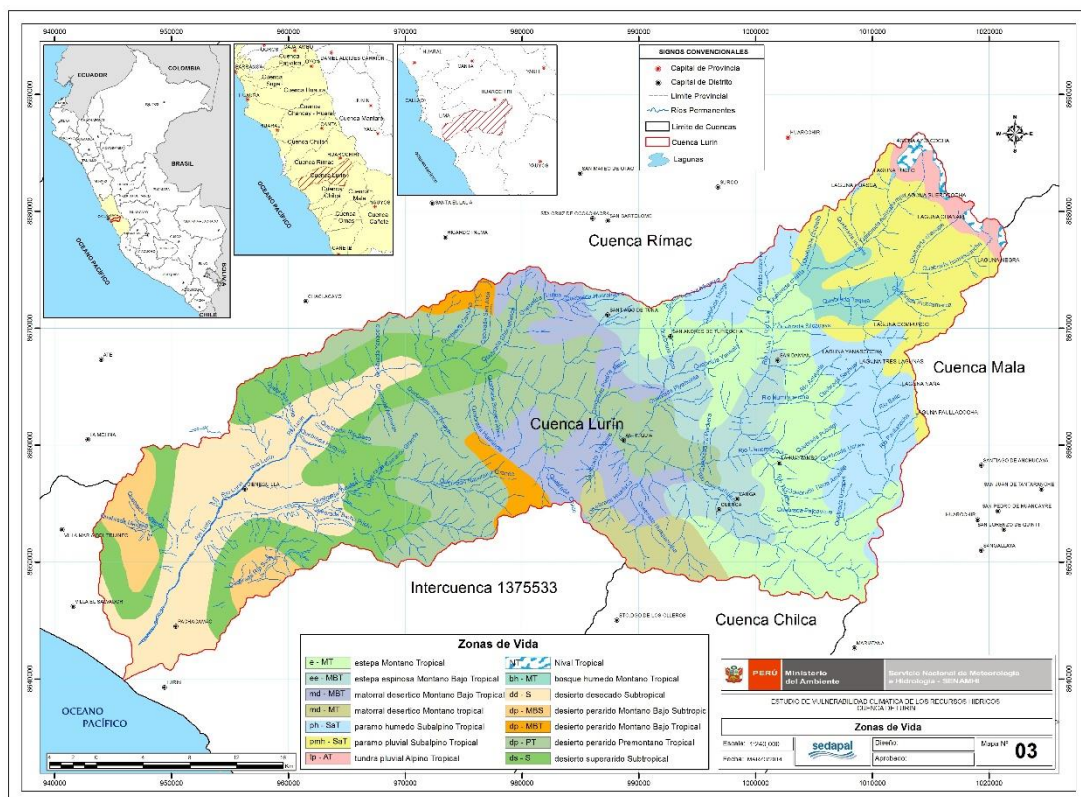
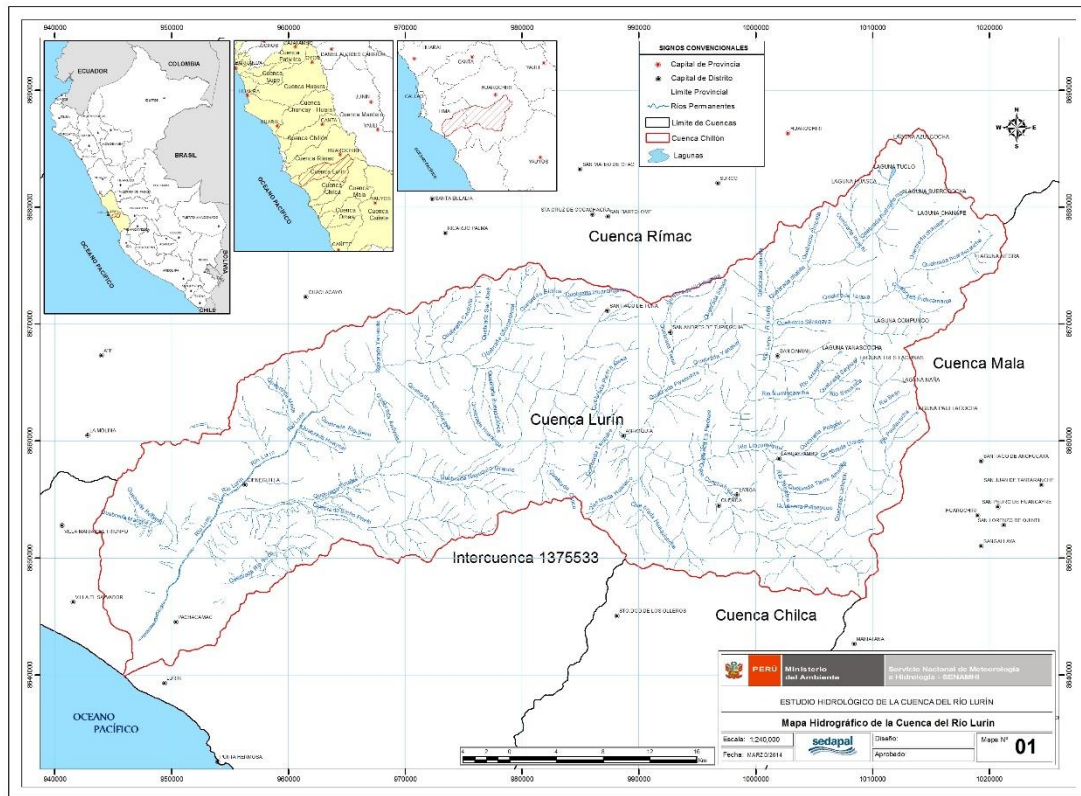


Figura 3-11 Mapas hidrográfico y de Zonas de Vida de la cuenca del río Lurín

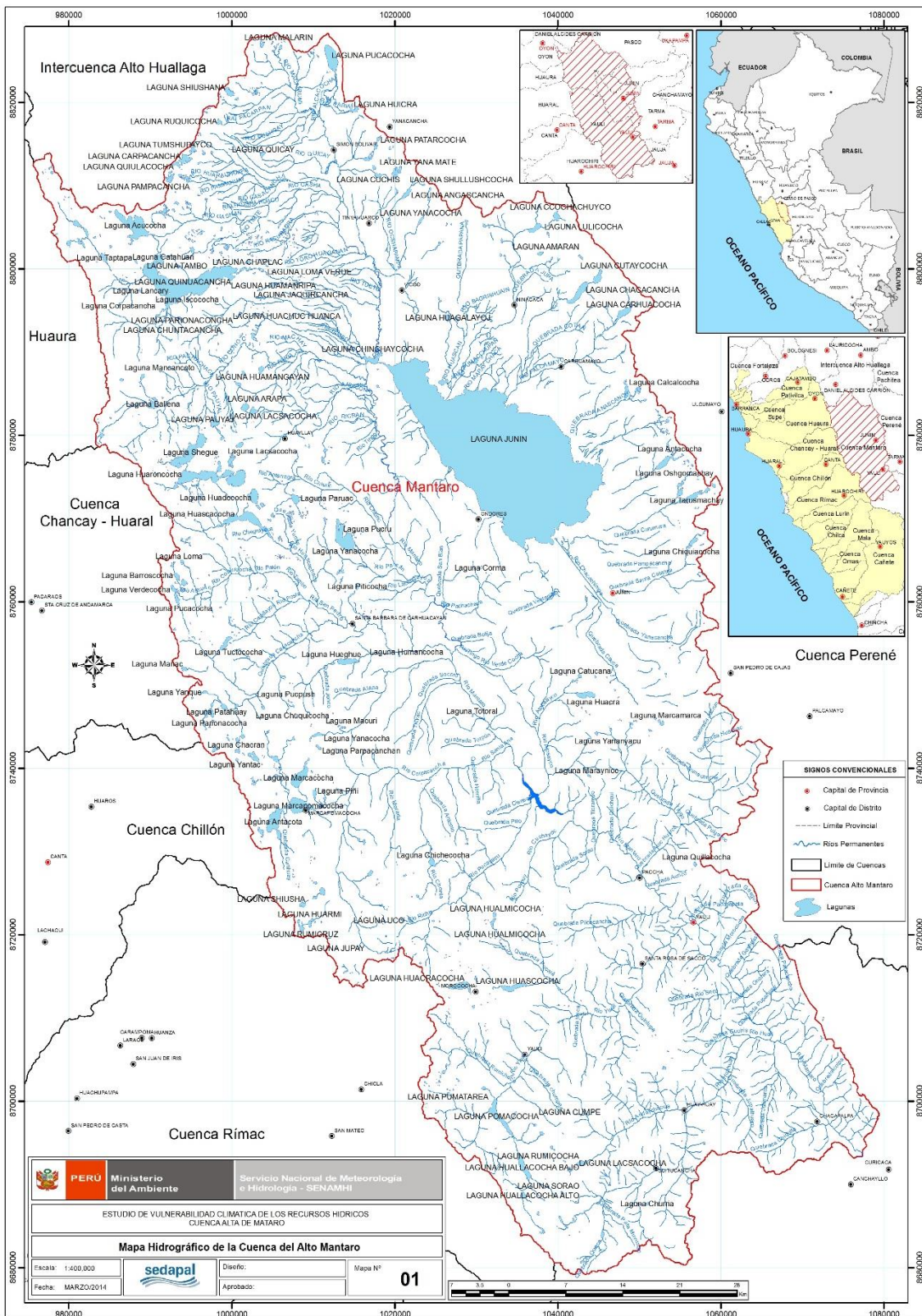


Figura 3-12 Mapas hidrográfico de la cuenca del Alto Mantaro

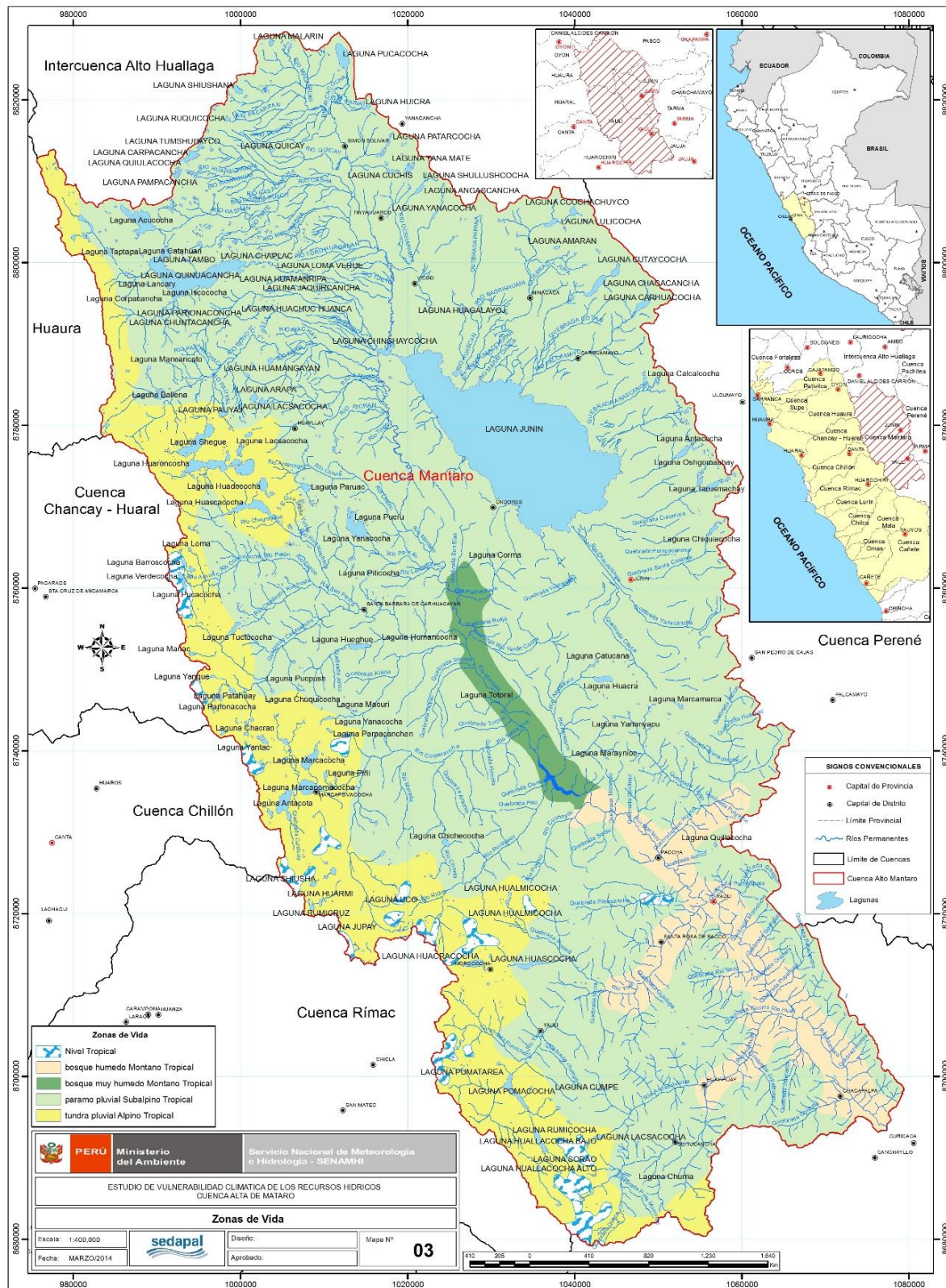


Figura 3-13 Mapa de zonas de vida de la cuenca Alto Mantaro

3.3 Información utilizada

3.3.1 Información cartográfica

- Cartas Nacionales del Instituto Geográfico del Perú escala 1/100000. Hojas 22j, 22k, 22l, 23j, 23k, 23l, 24i, 24j, 24k, 24l, 25i, 25j, 25l.

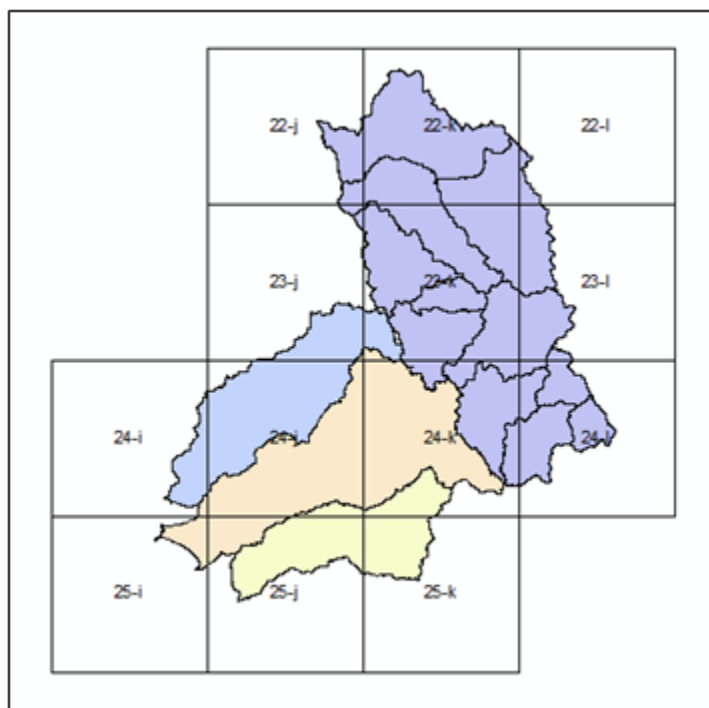


Figura 3-14 Cartas del IGN para la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

- Productos satelitales de imágenes del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la Nasa, DEM-90 m
- Productos satelitales del AsterGDem de 30m

Sobre la base de esta información cartográfica se ha elaborado el modelo de elevación del terreno de cada cuenca con el cual se ha procedido a la delimitación de las unidades hidrográficas de menor orden de corriente como subcuencas y microcuencas.

A. Base cartográfica

En el proyecto se pretende contar con la base cartográfica SIG actualizada y corregida del ámbito de la zona de estudio. Para la ubicación del ámbito de estudio a nivel de cuencas se utilizó la base digital del Perú desarrollada automatizados en el año 2002 por el Ministerio de Educación y el Instituto Nacional de Recursos Naturales – Perú a escala 1/10000.

A partir de esta base se seleccionaron los cuadrantes a trabajar (Figura 3-34). Se utilizó también la cartografía del modelo de elevación digital de 90 m de resolución.

El límite de cuencas se tomó de la “Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú” elaborado por la ex Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA, en el 2007, aplicando la metodología de Pfafstetter.

B. Implementación de la base de datos geográfica

Con la información obtenida del IGN se revisaron los empalmes de los trece cuadrantes del ámbito de estudio.

Se utilizaron las coberturas de curvas, nevados, ríos, lagos y lagunas de los cuadrantes.

C. Delimitación de cuencas

Se ha utilizado la extensión para ArcGisArchydro que es una herramienta de análisis hidrológico desarrollado por Centro de Investigaciones en Recursos de Agua (CRWR) de la Universidad de Texas, de los EE.UU. Su distribución es gratuita. <http://www.cwrw.utexas.edu/archydrotools/tools.html>.

Archydro utiliza un modelo numérico del terreno para la delimitación automática de cuencas hidrográficas y red de drenaje. Además esta herramienta posee la capacidad de administrar una base de datos geográfica (Geodatabase) que permite integrar los diferentes elementos del sistema hidrológico de la cuenca, que lo diferencia de otros modelos que realizan similares tareas como HecGeoHms o Taudem muy utilizados en el análisis hidrológico en entorno SIG.

3.3.2 Información climática e hidrológica

En la Tabla 3-13, se presenta la relación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio. Cabe señalar que en el estudio se ha utilizado fuentes de información hidrometeorológica de estaciones operadas por SENAMHI, EDEGEL, ELECTROANDES y ELECTROPERU.

En el caso de la información hidrológica, de la misma manera se ha utilizado información de estaciones del SENAMHI y EDEGEL para el caso del rímac y estaciones hidrométricas de ELECTROPERU operadas en el Mantaro, principalmente. En el caso del Rímac se ha utilizado información de las estaciones hidrométricas de Chosica R-2, Sheque y Tamboraque; en el río Chillón, estación de Puente Magdalena y Obrajillo; en la cuenca del río Lurín, estación Antapucro; en el Alto Mantaro, estaciones de San Juan, Pachacayo y Pte Stuart. Se ha llevado a cabo un proceso de naturalización de los caudales en el Rímac a efecto de anular la influencia de los caudales regulados de estiaje en el modelamiento matemático de la cuenca, para que el modelo pueda realizar las simulaciones de los caudales en régimen natural.

Una de las principales ventajas de esta técnica es que no es costoso en cuanto a procesamiento computacional y, por lo tanto, puede aplicarse fácilmente con las salidas de diferentes experimentos con GCMs, Además es usado para proveer información local o específica, lo cual podría ser crítico para diferentes estudios de impacto de cambio climático (Wilby et al., 2004). El DE es conveniente su uso

en ambientes heterogéneos con una fisiografía compleja o con gradientes bien empinados donde existe una fuerte relación con los forzamientos de escala sinóptica (Wilby et al. 2004).

La desventaja del DE es que asume estacionariedad en la relación predictor-predictando, lo cual se traduce en que esta relación obtenida durante el período de ajuste o calibración es aplicada durante el período de predicción (Wilby et al. 2004) o proyección, a pesar de que los forzamientos puedan ser diferentes en ambos períodos.

De acuerdo con Cano et al. (2001) la aplicación del downscaling estadístico ha sido impulsada por la disponibilidad de bases de datos de predicciones desarrolladas en diversos proyectos de reanálisis y que sirven de puente entre las salidas de los modelos numéricos y los registros históricos locales, permitiendo aplicar la técnicas de regresión, correlación, entre otros.

Tabla 3-13 Estaciones meteorológicas utilizadas y ubicadas en el entorno regional de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro

ID	ESTACION	LATITUD			LONGITUD			ALTITUD msnm
		Grad	min	seg	Grad	min	seg	
1	Donoso	11.00	28.00	12.00	77.00	13.00	48.00	158.0
2	Huayán	11.00	27.00	0.00	77.00	7.00	0.01	351.0
3	Modelo Campo de Marte	12.00	4.00	48.00	77.00	1.00	48.00	131.0
4	Von Humboldt	12.00	4.00	59.99	76.00	56.00	60.00	234.0
5	Pallac	11.00	21.00	0.00	76.00	47.00	60.00	2601.0
6	Huamantanga	11.00	29.00	60.00	76.00	44.00	60.00	3363.0
7	Chosica	11.00	55.00	59.99	76.00	43.00	59.99	1220.0
8	Picoy	10.00	52.00	59.99	76.00	43.00	0.01	4026.0
9	Parquin	10.00	58.00	0.01	76.00	43.00	0.01	3589.0
10	Arahuay	11.00	37.00	0.98	76.00	42.00	1.01	2733.0
11	Santa Eulalia	11.00	55.00	4.91	76.00	40.00	0.41	959.0
12	Tupe	11.00	0.00	0.00	76.00	38.00	60.00	4583.0
13	Pirca	11.00	13.00	59.99	76.00	38.00	60.00	3414.0
14	Santa Cruz	11.00	12.00	0.00	76.00	37.00	59.99	3581.0
15	Canta	11.00	28.00	16.00	76.00	37.00	32.99	2735.0
16	Obrajillo	11.00	27.00	9.50	76.00	37.00	19.42	2758.0
17	Lachaqui	11.00	33.00	1.01	76.00	37.00	0.98	3870.0
18	Autisha	11.00	44.00	6.61	76.00	36.00	23.51	2164.0
19	Huaros	11.00	24.00	0.00	76.00	34.00	0.01	3825.0
20	Canchacalla	11.00	50.00	41.32	76.00	31.00	52.90	2523.0
21	Carampoma	11.00	39.00	18.11	76.00	30.00	54.97	3440.0
22	Santiago de Tuna	11.00	58.00	59.99	76.00	31.00	0.01	3198.0
23	Pariacancha	11.00	22.00	59.99	76.00	29.00	60.00	4188.0
24	Sheque	11.00	39.00	59.80	76.00	29.00	55.32	3555.0
25	Antioquia	12.00	4.00	59.99	76.00	29.00	60.00	1881.0
26	Mina Colqui	11.00	34.00	59.99	76.00	28.00	59.99	4614.0
27	Tingo	11.00	37.00	0.01	76.00	28.00	59.99	4044.0
28	Yantac	11.00	19.00	59.99	76.00	23.00	60.00	4680.0
29	Langa	12.00	5.00	60.00	76.00	23.00	60.00	3034.0
30	Matucana	11.00	50.00	20.80	76.00	22.00	40.80	2442.0
31	Milloc	11.00	34.00	12.00	76.00	20.00	60.00	4386.0
32	San lázaro de escoma	12.00	10.00	59.99	76.00	20.00	60.00	3799.0
33	Chalilla	11.00	55.00	59.99	76.00	20.00	0.02	3985.0
34	Marcapomacocha	11.00	24.00	15.98	76.00	19.00	30.11	4436.0
35	Carhuacayan	11.00	12.00	1.01	76.00	17.00	1.00	4144.0
36	Hueghue	11.00	14.00	13.99	76.00	16.00	50.99	4193.0
37	Upamayo	10.00	55.00	30.00	76.00	16.00	40.01	4080.0
38	Rio blanco	11.00	44.00	4.31	76.00	15.00	32.00	3503.0
39	San José de parac	11.00	48.00	1.91	76.00	15.00	29.20	3806.0
40	Casapalca	11.00	38.00	52.01	76.00	14.00	0.28	4243.0
41	Huarocharí	12.00	7.00	59.99	76.00	13.00	59.99	3181.0
42	Morococha	11.00	36.00	5.00	76.00	8.00	4.99	4500.0
43	Yauli	11.00	40.00	0.01	76.00	5.00	0.02	4090.0
44	Atocsaico	11.00	17.00	55.00	76.00	4.00	39.97	4195.0
45	Carhuamayó	10.00	55.00	25.00	76.00	3.00	25.02	4126.0
46	Malpaso	11.00	24.00	34.99	76.00	2.00	29.98	3848.0
47	Junín	11.00	9.00	15.98	75.00	59.00	16.98	4120.0
48	La.roya	11.00	34.00	34.00	75.00	57.00	56.02	4051.0
49	Oroya Fundición	11.00	31.00	0.98	75.00	54.00	1.01	3757.0
50	Pachacayo	11.00	48.00	18.00	75.00	43.00	9.01	3621.0

4 Capítulo IV: Variabilidad climática y caracterización hidroclimática de cuencas

En el presente Capítulo se describe los resultados obtenidos, respecto al comportamiento de las variables climáticas e hidrológicas en las cuencas de estudio, visto desde una perspectiva temporal y espacial así como la descripción de los procesos de circulación atmosférica que influyen sobre el clima de la zona de estudio. El análisis realizado en el presente capítulo tiene como objetivo determinar las tendencias históricas del clima presente en las cuencas de estudio, asociado a la variabilidad climática; por otro lado se caracteriza en detalle la hidroclimatología mensual de cuencas y subcuencas, con énfasis en los eventos extremos de precipitación y caudal; así como el análisis de los impactos de los Eventos El Niño y La Niña. La caracterización hidroclimática de cuencas se sintetiza gráficamente en los Atlas hidrológicos elaborados por cada una de las 4 cuencas de estudio.

4.1 Tendencias históricas de precipitación y temperatura

4.1.1 Temperatura media del aire

La desventaja del DE es que asume estacionariedad en la relación predictor-predictando, lo cual se traduce en que esta relación obtenida durante el período de ajuste o calibración es aplicada durante el período de predicción (Wilby et al. 2004) o proyección, a pesar de que los forzamientos puedan ser diferentes en ambos períodos.

De acuerdo con Cano et al. (2001) la aplicación del downscaling estadístico ha sido impulsada por la disponibilidad de bases de datos de predicciones desarrolladas en diversos proyectos de reanálisis y que sirven de puente entre las salidas de los modelos numéricos y los registros históricos locales, permitiendo aplicar la técnicas de regresión, correlación, entre otros.

Cinco estaciones meteorológicas convencionales en superficie que registran temperatura máxima y mínima del aire, cumplen con la característica de ser largas, continuas, de buena calidad y que han sido homogenizadas para el cálculo de la señal de las tendencias recientes de la temperatura media. Debido a este número escaso de estaciones en el área de influencia del estudio, la señal climática espacial de la temperatura media del aire se pierde, identificándose un comportamiento de alta variabilidad determinada por esta carencia, pero con el apoyo de estaciones vecinas en las cuencas de los ríos Chancay-Huaral y Mala, se ha encontrado los siguientes resultados en las diferentes escalas temporales de análisis.

En general, en el período hidrológico 1965-2013, en la cuenca Alto Mantaro, la estación Marcapomacocha presenta una señal de aumento significativo de la temperatura a razón de 0.18 °C/década es decir 0.9 °C en 49 años. Esta señal de aumento de la temperatura también es observado en altura entre 5 - 12 Km sobre las cuencas altas del área de estudio, a razón de 0.223 °C/década que explicaría entre otras causas la desaparición y/o retroceso de algunos nevados y glaciares en la zona de estudio. Este comportamiento aparentemente también estaría relacionado con el calentamiento de la temperatura a escala global.

En contraste, la cuenca media del río Chillón y Rímac presenta disminución de la temperatura media, siendo en la estación Canta de carácter significativa a razón de -0.12 °C/década es decir una disminución de 0.6 °C en 49 años, y en la estación Matucana no significativa.

En contraste, en la cuenca baja del Rímac, predomina la señal de aumento marcadamente significativo en las estaciones Ñaña y Von Humboldt de 0.35 °C/década es decir de 1.75 °C en los últimos 49 años que aparentemente estarían afectadas por el efecto urbano. Sin embargo, entre $1.5 - 5$ Km existe una tendencia de disminución gradual ligera y no significativa de la temperatura a razón de -0.042 °C/década, que podría estar explicada aparentemente por otros modos de variabilidad climática que no han sido experimentados en este artículo y que amerita un estudio más profundo en una segunda fase.

En general, las tendencias de la temperatura media en el período avenidas presentan un patrón aproximado al comportamiento de la señal climática espacial de tendencias del periodo hidrológico. No obstante, al norte de la Cuenca Chillón y sur este de las cuencas Lurín y Alto Mantaro, se observa un patrón regional de aumento no significativo de la temperatura, que guarda coherencia con el comportamiento de la tendencia entre $5 - 12$ km y la estación en superficie de Marcapomacocha, más no en las estaciones Canta y Matucana que muestran un tendencia de disminución no significativa.

En el período estiaje, se observa un patrón similar al comportamiento de la señal espacial de tendencia de la temperatura media del período hidrológico. No obstante al sur este y este de las cuencas Lurín y Chillón, muestra señal de disminución.

En las Figuras 4-1 – 4-3, la leyenda de los mapas de la señal espacial de tendencia es expresada en símbolos, cuya interpretación es la siguiente:

- Tendencia positiva sin significancia (+),
- Tendencia positiva con significancia (+),
- Tendencia negativa sin significancia (O),
- Tendencia negativa con significancia (O),
- Sin tendencia (O).

En las Tablas 4-1 al 4-3, las celda de 0 indica sin significancia estadística y 1 significancia estadística.

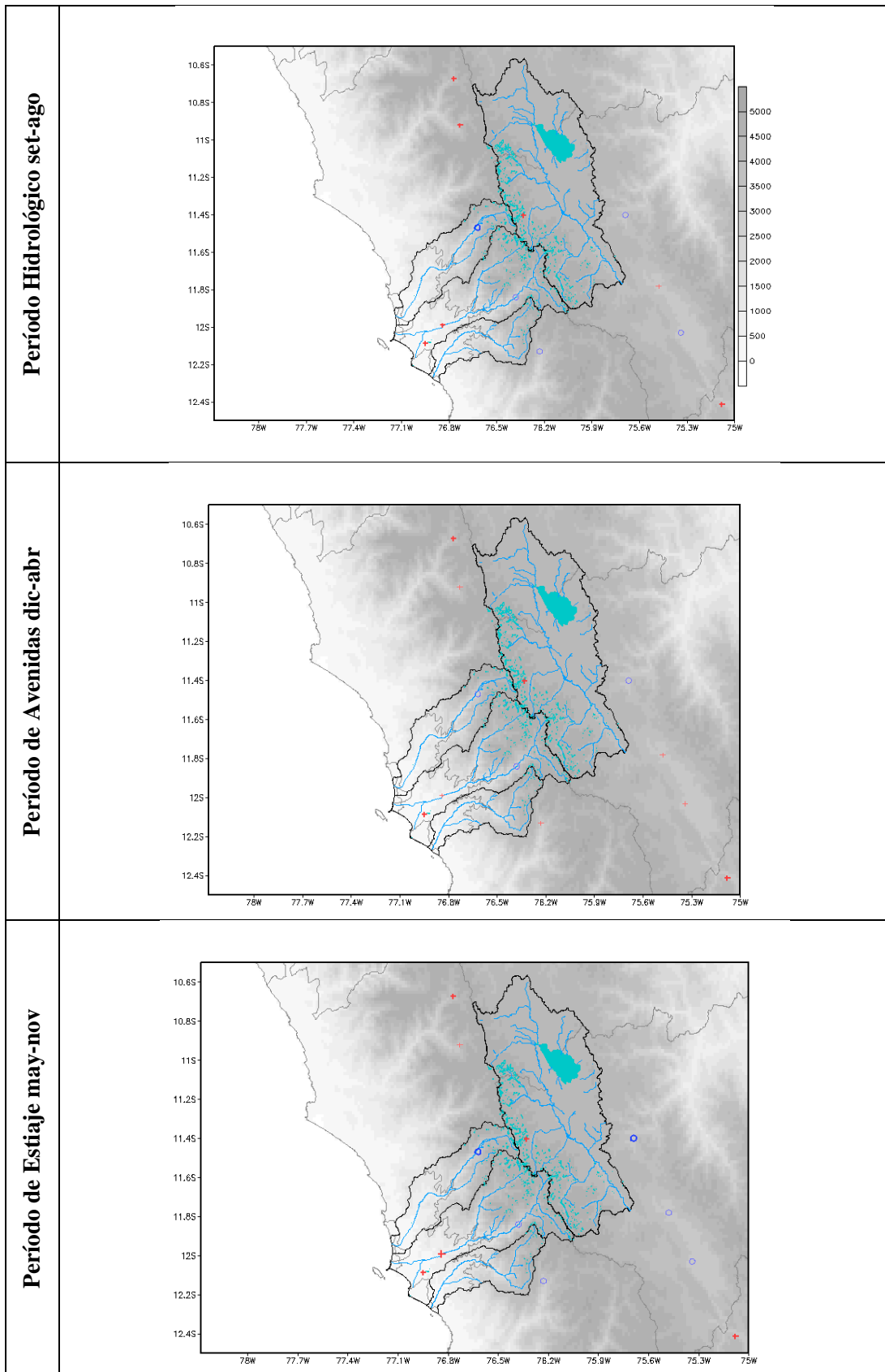


Figura 4-1 Señal de tendencia de la temperatura media del aire en las cuencas de interés de SEDAPAL, 1965-2015.

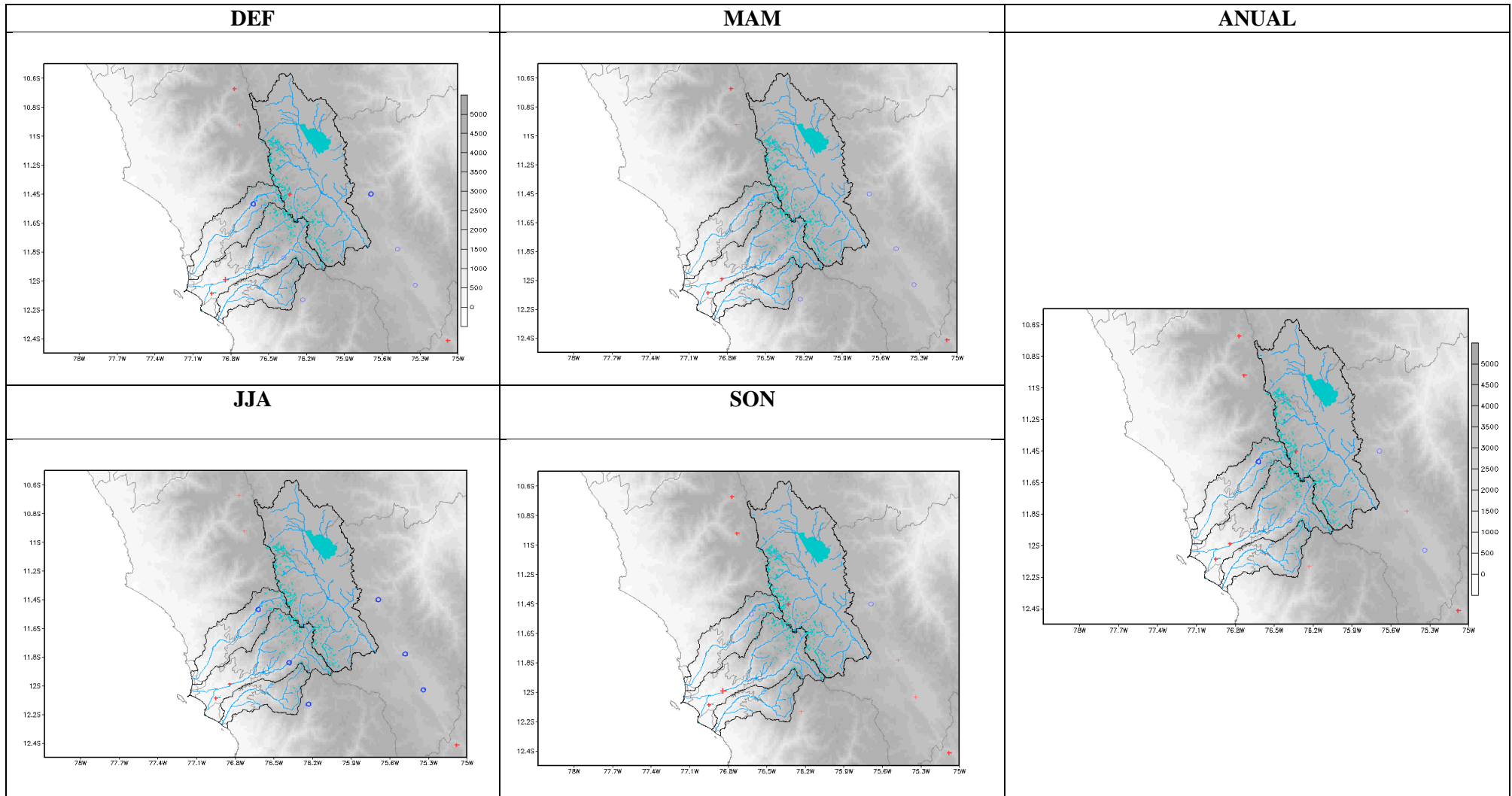


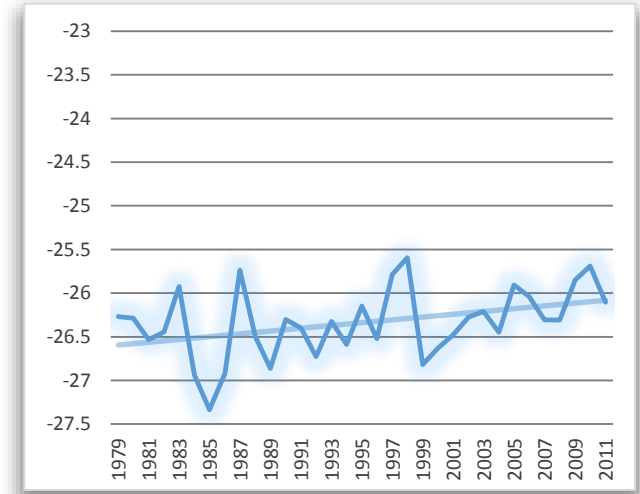
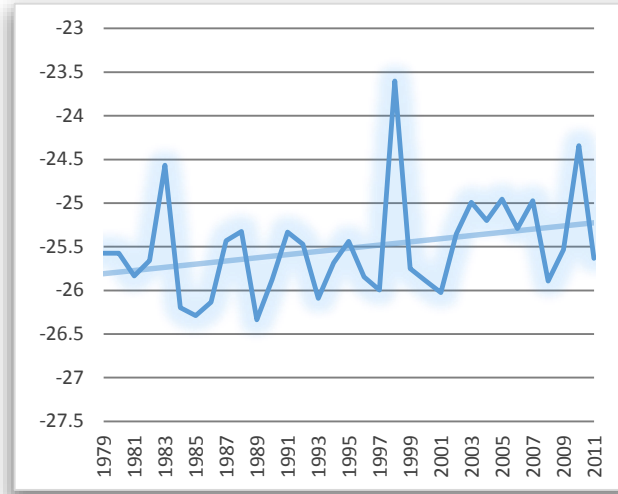
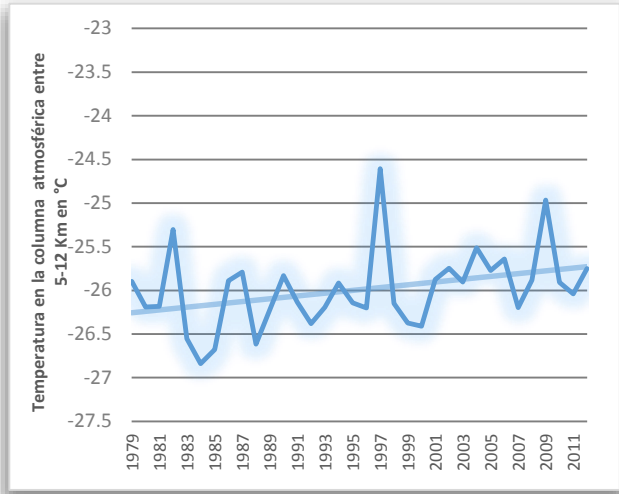
Figura 4-2 Señal de tendencia actual de la temperatura media del aire en estaciones convencionales 1965-2015

Año hidrológico

Período de avenidas

Período de estiaje

Cuenca media-alta



Cuenca baja

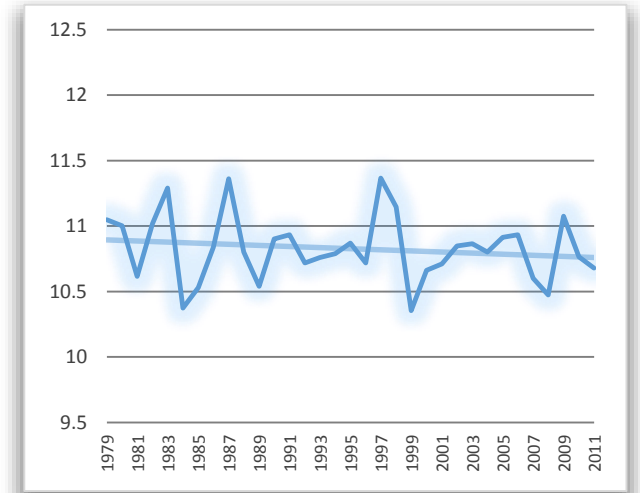
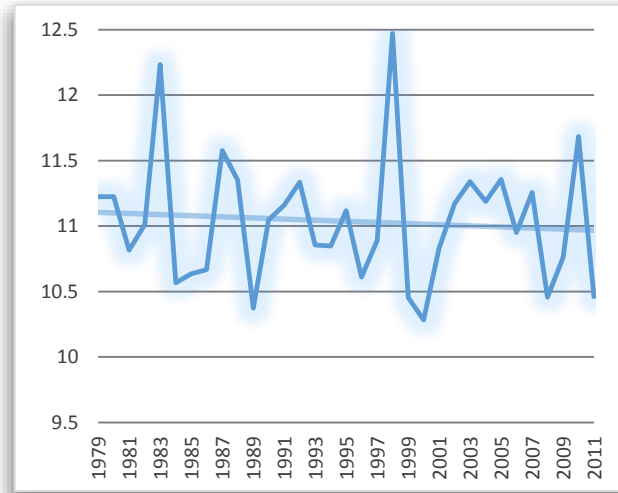
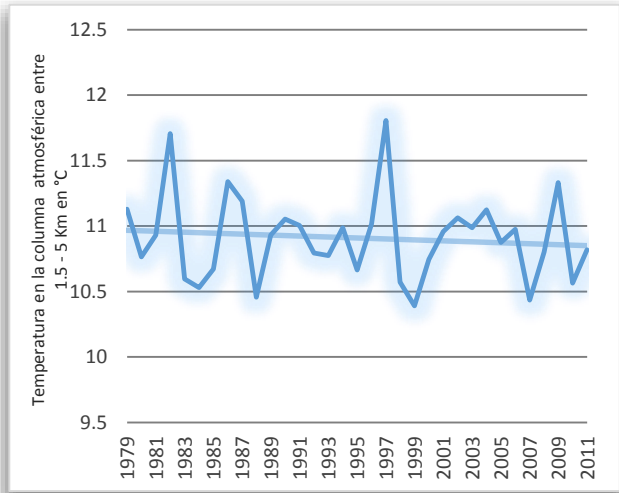


Figura 4-3 Tendencias actuales de la temperatura en la columna atmosférica entre 1.5 -5 Km y 5 - 12 Km, atmosfera superior adyacente a las cuencas media-alta y baja. Fuente: Elaboración autores. Datos: Reanalysis Era Interin 0.75°x0.75° de resolución espacial.

Tabla 4-1 Tendencia de la temperatura media del aire en °C/década

				P Hidrol.	P Aven.	P estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON								
MARCAPOMACOCHA	-11.4	-76.33	4479	0.1786	1	0.16154	1	0.1276	1	0.1599	1	0.1808	1	0.1236	0	0.0861	0	0.1909	1
CAJATAMBO	-10.47	-76.98	4040	0.125	1	0.1701	1	0.0599	1	0.1141	1	0.1958	1	0.026	0	0.0085	0	0.1667	1
OYON	-10.67	-76.77	3676	0.1829	1	0.20345	1	0.1594	1	0.1667	1	0.218	1	0.153	1	0.0806	0	0.2222	1
PILCHACA	-12.41	-75.08	3650	0.1684	1	0.2	1	0.1239	1	0.1547	1	0.2216	1	0.1384	1	0.113	1	0.1333	1
LIRCA Y	-12.98	-74.73	3513	0.1354	1	0.16537	1	0.0843	1	0.112	1	0.1908	1	0.1111	1	0.013	0	0.1812	1
RECUAY	-9.73	-77.45	3444	0.1345	1	0.14781	1	0.134	1	0.1341	1	0.1667	1	0.0871	0	0.119	1	0.1944	1
CHIQUIAN	-10.15	-77.15	3382	0.1364	1	0.2247	1	0.0374	0	0.1255	0	0.25	1	0.1333	0	-0.0299	0	0.1467	1
JAUJA	-11.78	-75.48	3360	0.039	0	0.12183	0	-0.0203	0	0.0351	0	0.1561	1	-0.0024	0	-0.1515	1	0.0932	0
HUAYAO	-12.03	-75.34	3360	-0.0045	0	0.03964	0	-0.06	0	-0.0128	0	0.0541	0	-0.0167	0	-0.1	1	0.0215	0
ACOBAMBA	-12.86	-74.56	3356	0.0291	0	0.12457	1	-0.0197	0	0.0492	0	0.1377	1	0.0777	0	-0.1013	1	0.0623	0
LA QUINUA	-13.03	-74.14	3316	0.0972	0	0.09718	0	0.0778	0	0.0833	0	0.1126	1	0.0676	0	-0.0165	0	0.1583	1
TARMA	-11.4	-75.69	3200	-0.0395	0	-0.0151	0	-0.0878	1	-0.0462	0	-0.0098	0	-0.0223	0	-0.1165	1	-0.0339	0
HUAROCHIRI	-12.13	-76.23	3182	-0.0047	0	0.0456	0	-0.0442	0	0.0147	0	0.0646	0	-0.0483	0	-0.097	1	0.051	0
PICOY	-10.92	-76.73	3075	0.0833	1	0.084	0	0.0612	0	0.0672	1	0.0942	0	0.0744	0	0.0494	0	0.0714	1
SAN RAFAEL	-10.32	-76.17	3060	0.0934	1	0.149	1	0.0533	0	0.0871	1	0.2003	1	0.0534	0	-0.0476	0	0.1667	1
CANTA	-11.47	-76.62	2974	-0.1226	1	-0.1	0	-0.1239	1	-0.1129	1	-0.1038	0	-0.0995	0	-0.1893	1	-0.0685	0
MATUCANA	-11.84	-76.38	2431	-0.0175	0	-0.0059	0	-0.0342	0	-0.0205	0	0.0189	0	-0.0176	0	-0.0945	1	0.0495	0
HUANUCO	-9.97	-76.24	2090	0.0006	0	0.01667	0	-0.0209	0	0.0114	0	0.0305	0	0.004	0	-0.0808	0	0.0229	0
PACARAN	-12.86	-76.06	721	-0.1294	1	-0.1033	1	-0.1792	1	-0.1409	1	-0.1013	0	-0.1022	0	-0.215	1	-0.157	1
ÑAÑA	-11.99	-76.84		0.349	1	0.1093	0	0.5159	1	0.3558	1	0.1171	0	0.2037	1	0.4646	1	0.5198	1
VON HUMBOLDT	-12.08	-76.95		0.3455	1	0.4892	1	0.3542	1	0.4034	1	0.5	1	0.4688	1	0.3056	1	0.3641	1

Tabla 4-2 Tendencia de la temperatura máxima del aire en °C/década

	LAT	LON	ALT	P Hidrol.	P Aven.	P estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON								
MARCAPOMACOCHA	-11.4	-76.33	4479	0.0927	0	0.0322	0	0.0952	0	0.0824	0	0.0563	0	0.0342	0	0.1111	0	0.0932	0
CAJATAMBO	-10.47	-76.98	4040	0.0071	0	-0.0395	0	0.0370	0	-0.0130	0	-0.0191	0	0.0000	0	0.0080	0	0.0675	0
OYON	-10.67	-76.77	3676	0.3855	1	0.3370	1	0.4104	1	0.3745	1	0.3556	1	0.3000	1	0.3453	1	0.5140	1
PILCHACA	-12.41	-75.08	3650	0.1345	1	0.1389	1	0.1384	1	0.1155	1	0.1475	0	0.1212	1	0.1755	1	0.0943	1
LIRCAY	-12.98	-74.73	3513	0.2189	1	0.2091	1	0.2457	1	0.2185	1	0.2394	1	0.1667	1	0.2009	1	0.3333	1
RECUAY	-9.73	-77.45	3444	0.2669	1	0.1879	1	0.3372	1	0.2870	1	0.2121	1	0.2083	1	0.3709	1	0.3162	1
CHIQUIAN	-10.15	-77.15	3382	0.4092	1	0.5511	1	0.3284	1	0.4167	1	0.6208	1	0.4045	1	0.2020	1	0.4866	1
JAUJA	-11.78	-75.48	3360	0.2039	1	0.1714	1	0.2610	1	0.2238	1	0.2157	1	0.0951	0	0.2442	1	0.3333	1
HUAYAO	-12.03	-75.34	3360	0.0787	0	0.0586	0	0.0894	1	0.0833	1	0.0978	0	0.0000	0	0.0667	0	0.1667	1
ACOBAMBA	-12.86	-74.56	3356	0.2112	1	0.2415	1	0.2330	1	0.2355	1	0.2756	1	0.2382	1	0.1667	1	0.2625	1
LA QUINUA	-13.03	-74.14	3316	0.2033	1	0.2276	1	0.2286	1	0.2178	1	0.2718	1	0.1429	0	0.1429	1	0.3103	1
TARMA	-11.4	-75.69	3200	0.0399	0	-0.0168	0	0.0849	0	0.0417	0	-0.0144	0	0.0000	0	0.1075	0	0.0659	0
HUAROCHIRI	-12.13	-76.23	3182	0.1258	1	0.0714	0	0.1519	1	0.1491	1	0.0779	0	0.0909	0	0.0862	0	0.2544	1
PICOY	-10.92	-76.73	3075	0.1413	1	0.0812	0	0.1685	1	0.1554	1	0.1091	0	0.0871	0	0.1724	1	0.2162	1
SAN RAFAEL	-10.32	-76.17	3060	0.2813	1	0.3037	1	0.3052	1	0.3003	1	0.3667	1	0.1771	1	0.2147	1	0.5140	1
CANTA	-11.47	-76.62	2974	-0.1021	0	-0.1333	0	-0.0537	0	-0.0737	0	-0.1333	0	-0.0693	0	-0.0990	0	-0.0333	0
MATUCANA	-11.84	-76.38	2431	0.1092	1	0.0129	0	0.1735	1	0.1028	1	0.0364	0	0.0593	0	0.1333	1	0.2392	1
HUANUCO	-9.97	-76.24	2090	0.0173	0	0.0261	0	0.0804	0	0.0563	0	0.0521	0	-0.0328	0	0.0562	0	0.1278	1
PACARAN	-12.86	-76.06	721	-0.0453	0	-0.0333	0	-0.0402	0	-0.0478	0	-0.0806	0	0.0000	0	-0.1096	0	-0.0178	0
ÑAÑA	-11.99	-76.84		0.4372	1	0.0093	0	0.6723	1	0.4767	1	0.0667	0	0.1260	0	0.7220	1	0.6569	1
VON HUMBOLTD	-12.08	-76.95		0.0431	1	0.4880	1	0.4074	1	0.4688	1	0.4603	1	0.5490	1	0.3235	1	0.5111	1

Tabla 4-3 Tendencia de la temperatura mínima del aire en °C/década

	LAT	LON	ALT	Año Hidrológico.	Epoca Avenidas	Epoca Estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON								
MARCAPOMACOCHA	-11.4	-76.33	4479	-0.0396	0	0.0327	0	-0.0959	0	-0.0466	0	0.0385	0	0.0000	0	-0.2271	1	-0.0444	0
CAJATAMBO	-10.47	-76.98	4040	0.1833	1	0.2364	1	0.1016	0	0.1619	1	0.3118	1	0.1547	0	0.0488	0	0.2161	1
OYON	-10.67	-76.77	3676	0.2095	1	0.3600	1	0.0801	0	0.1496	1	0.4157	1	0.1047	0	-0.0404	0	0.2500	1
PILCHACA	-12.41	-75.08	3650	0.0000	0	0.0833	0	-0.1190	0	-0.0349	0	0.0946	0	0.0498	0	-0.2000	1	-0.0392	0
LIRCAY	-12.98	-74.73	3513	0.2108	1	0.2870	1	0.1248	1	0.1960	1	0.3333	1	0.1732	1	0.0690	0	0.1977	1
RECUAY	-9.73	-77.45	3444	0.0000	0	0.1000	0	-0.0929	0	-0.0106	0	0.1078	1	0.0038	0	-0.1784	1	0.0149	0
CHIQUEAN	-10.15	-77.15	3382	-0.0069	0	0.1070	0	-0.0849	0	-0.0175	0	0.1333	1	-0.0387	0	-0.1667	1	0.0630	0
JAUJA	-11.78	-75.48	3360	-0.1250	0	-0.1273	0	-0.2381	0	-0.1259	0	-0.1556	0	-0.2000	0	-0.2356	0	-0.1925	0
HUAYAO	-12.03	-75.34	3360	-0.1685	1	0.0365	0	-0.3641	0	-0.2020	1	0.0612	0	-0.1333	1	-0.5752	1	-0.1942	1
ACOBAMBA	-12.86	-74.56	3356	-0.0907	1	0.0476	0	-0.2109	1	-0.1141	1	0.0541	0	-0.0247	0	-0.3091	1	-0.1342	1
LA QUINUA	-13.03	-74.14	3316	0.0000	0	0.1000	0	-0.0929	0	-0.0106	0	0.1078	1	0.0038	0	-0.1784	1	0.0149	0
TARMA	-11.4	-75.69	3200	-0.0723	0	-0.0728	0	-0.1213	0	-0.0895	0	-0.0792	0	-0.0680	0	-0.2365	0	-0.0408	0
HUAROCHIRI	-12.13	-76.23	3182	-0.1356	1	-0.0320	0	-0.2181	1	-0.1326	1	-0.0334	0	-0.0267	0	-0.3159	1	-0.1250	1
PICOY	-10.92	-76.73	3075	-0.0541	0	0.1041	0	-0.1965	1	-0.0646	0	0.1583	0	-0.0337	0	-0.2863	1	-0.1190	0
SAN RAFAEL	-10.32	-76.17	3060	0.0337	0	0.0800	0	-0.0544	0	0.0057	0	0.0804	0	0.0633	0	-0.0781	0	-0.0889	0
CANTA	-11.47	-76.62	2974	-0.0975	0	0.0000	0	-0.1786	1	-0.1082	1	0.0338	0	-0.0601	0	-0.3134	1	-0.1333	1
MATUCANA	-11.84	-76.38	2431	-0.1389	1	-0.0720	0	-0.2154	1	-0.1495	1	-0.0789	0	-0.1304	1	-0.3013	1	-0.1250	1
HUANUCO	-9.97	-76.24	2090	-0.1490	1	-0.0228	0	-0.2396	1	-0.1455	1	0.0000	0	-0.1194	1	-0.3333	1	-0.1283	0
PACARAN	-12.86	-76.06	721	-0.1950	1	-0.1052	0	-0.3061	1	-0.2155	1	-0.0758	0	-0.1703	1	-0.3460	1	-0.3008	1
ÑAÑA	-11.99	-76.84		0.2222	1	0.2000	1	0.2204	1	0.2025	1	0.1500	0	0.2917	1	0.0926	0	0.2857	1
VON HUMBOLTD	-12.08	-76.95		0.2760	1	0.5000	1	0.2500	1	0.3452	1	0.5161	1	0.3764	1	0.2485	0	0.2067	1

4.1.2 Precipitación

La tendencia de la precipitación en el periodo hidrológico de los últimos 49 años, en la cuenca Alto Mantaro, indica en general, una señal climática regional de reducción no significativa, y de carácter significativa en las estaciones Morococha de 16 % y Malpaso de 12%, ubicadas al suroeste de la cuenca en la Figura 4-4 y Tabla 4-4 a y Tabla 4-5 b. Esta señal climática de reducción de la precipitación es debida a la dinámica de la circulación regional que determina en gran medida su régimen pluviométrico asociada a su menor gradiente altitudinal y topografía menos compleja.

En contraste, en las cuencas altas y medias de los ríos Chillón y Rímac la tendencia es de aumento significativo, que prevalece sobre la señal de reducción no significativa, principalmente en la zona noroeste de cuenca del río Chillón. Esta variabilidad de la señal de tendencias que predomina en mayor medida sobre estas cuencas, es principalmente debida a los efectos de la circulación local sobre la regional, al mayor gradiente altitudinal y topografía compleja que contribuyen a su variabilidad espacial, que hace que se pierda la señal regional de las tendencias, reflejada además en su régimen temporal y en cantidad de la precipitación, en la Figura 4-4 y Tabla 4-4. En tanto, las estaciones de apoyo ubicadas al sur-este y este de la cuenca Lurín se han presentado aumentos regionales significativos de la precipitación y que guardan coherencia con el aumento significativo de la humedad específica entre 5 – 12 km de altura de 0.45 gr/kg por década.

En el periodo de avenidas, la señal de tendencias en general se muestra aproximada al comportamiento del periodo hidrológico, debido a que es la época de mayores precipitaciones que prevalece sobre la época de menores precipitaciones, modulando la tendencia del periodo hidrológico. En la cuenca Alto Mantaro predominan las reducciones y aumentos de precipitación, sin embargo son de carácter no significativo. Asimismo, en la cuenca alta - media de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, predominan la señal de aumento de la precipitación, y de característica significativa en las estaciones Huamantanga de 34 %, Carampoma de 41 % y Matucana de 38 %, que se extiende hasta la cuenca baja del Rímac en las estaciones Von Humboldt y Ñaña pero de carácter no significativa. Asimismo, en las estaciones de apoyo al sureste y este de la cuenca Lurín y Alto Mantaro, se han presentado aumentos significativos de la precipitación en los últimos 49 años con una señal clara regional. Así como también en la cuenca alta del río Chancay Huaral ubicada al noreste de la cuenca alta del río Chillón, tanto en el periodo hidrológico y de avenidas. Este comportamiento en general de aumento observado de las precipitaciones en las cuencas media-alta guarda correspondencia con el aumento de humedad específica en altura entre 5 – 12 km, siendo esta de aumento significativo a razón de 0.49 gr/Kg década.

Si bien es conocido que el periodo de estiaje es la época de menores a escasas lluvias en las cuencas de interés, es necesario conocer que tan secas o húmedas se han presentado en los últimos 49 años, esto está relacionado también con la tendencia de temperatura, la humedad de la atmósfera y la evaporación. En general, en la cuenca del Alto Mantaro predominaron reducciones no significativas de la precipitación, es decir que la cuenca estuvo cada vez más seca en las últimas cinco décadas. A diferencia de las cuencas altas de los ríos Chillón, Rímac y Lurín donde presentó aumentos no significativos, y de carácter significativo en las estaciones Huamantanga de 61 % y Huaros de 50 %

ubicados en la cuenca alta del río Chillón, y en la estación Langa de 71 % ubicada en la cuenca del río Lurín. En la cuenca alta-media del río Rímac se identificó también el aumento no significativo de la precipitación. En las estaciones de apoyo ubicadas al sureste y este de la cuenca Lurín una condición de alta variabilidad de las tendencias es observada en los últimos 49 años. Cabe resaltar, que es la época de escasas lluvias a nulas en las cuencas.

En contraste, en la cuenca baja del río Rímac, la tendencia reciente de precipitación es de reducción significativa como en la estación de Von Humboldt de 47 % por año. Cabe resaltar, en los meses de abril-noviembre se presentan las mayores precipitaciones del año y son de tipo llovizna, generados por efectos de la dinámica de la circulación atmosférica de escala regional, la contribución de los efectos del pacífico y la forma de la costa, que han determinado su régimen de los últimos 49 años. Este comportamiento guarda relación directa con la tendencia de disminución de humedad específica, siendo de 0.28 gr/Kg por década.

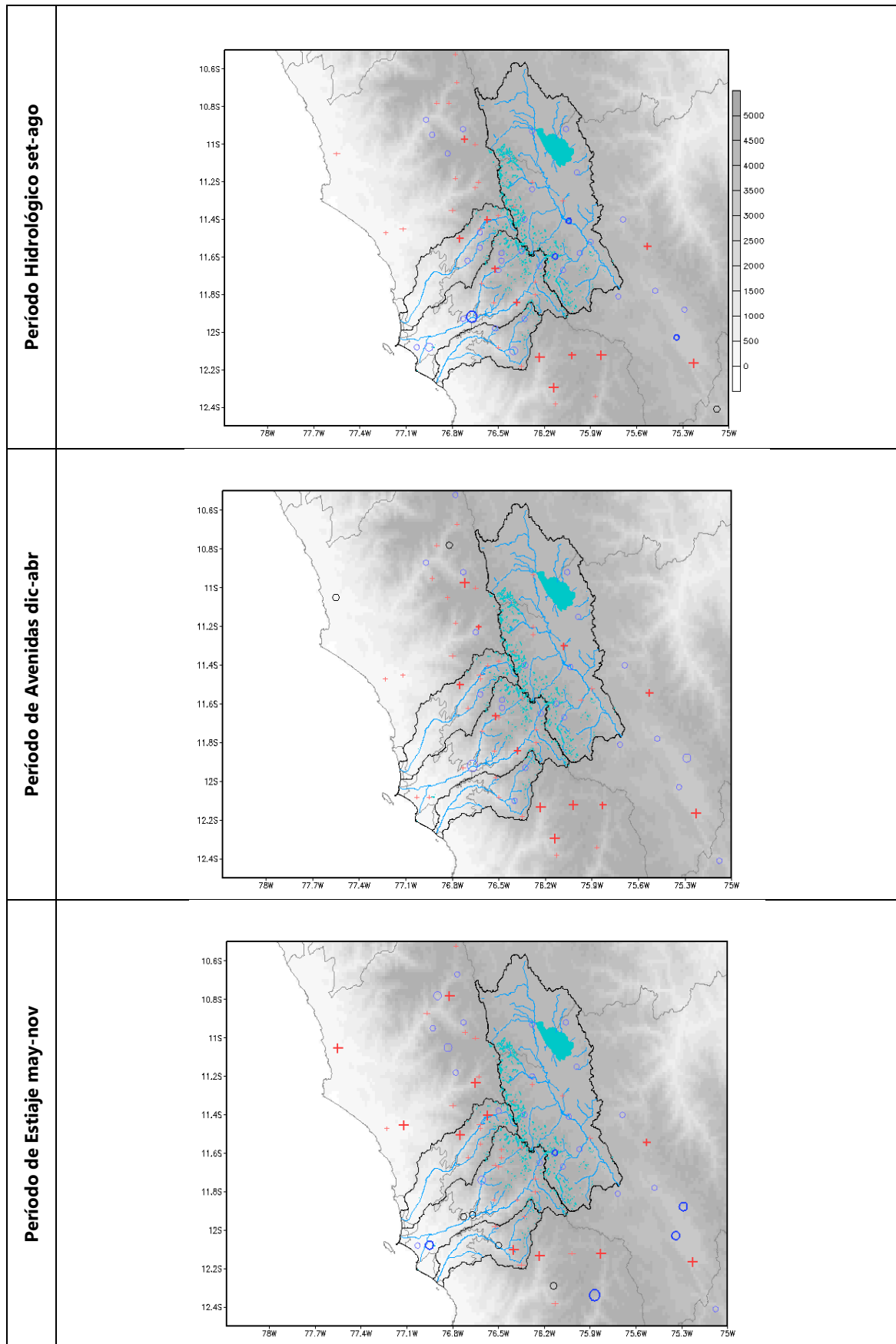


Figura 4-4 Señal de tendencia de la precipitación en las cuencas de interés de SEDAPAL, 1965-2015.

Tabla 4-4 a) Tendencia de la precipitación en porcentaje (%)

	LAT	LON	Año hidrológico	Época avenidas	Especa estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON	
ACOBAMBA	-12.86	-74.56	-13	0 4	0 -44	1 -14	0 12	0 -37	1 -36	0 -41	1
ALCANTARILLA	-11.05	-77.55	48	0 0	0 97	1 47	1 0	0 25	0 50	1 57	0
ANAJES	-10.78	-76.9	5	0 10	0 -31	0 7	0 4	0 6	0 -50	1 -9	0
ANTIOQUIA	-12.08	-76.5	4	0 7	0 0	0 10	0 31	0 11	0 0	0 0	0
ARAHUAY	-11.62	-76.7	-9	0 2	0 11	0 3	0 15	0 -11	0 0	0 14	0
ATOCOSAICO	-11.3	-76.08	12	0 28	1 20	0 29	1 29	1 18	0 5	0 37	0
AUTISHA	-11.74	-76.61	1	0 10	0 -48	0 4	0 15	0 -14	0 0	0 -29	0
AYAVIRI	-12.38	-76.13	16	0 20	0 33	0 17	0 29	0 14	0 0	0 37	0
CACHICADAN	-8.1	-78.15	15	0 24	0 -30	0 16	0 23	0 20	0 -50	1 -21	0
CAJAMARQUILLA	-9.63	-77.74	52	1 64	1 44	0 49	1 62	1 53	1 0	0 51	1
CAJATAMBO	-10.47	-76.98	36	0 38	1 14	0 33	0 50	1 29	0 0	0 20	0
CALLANCAS	-7.78	-78.49	39	1 44	1 16	0 36	1 37	0 49	1 -59	0 28	0
CANCHACALLA	-11.84	-76.53	14	0 7	0 23	0 18	0 -5	0 20	0 0	0 25	0
CANTA	-11.47	-76.62	-1	0 3	0 5	0 5	0 3	0 1	0 0	0 15	0
CARAC	-11.18	-76.78	17	0 21	0 -6	0 18	0 33	0 14	0 -80	1 8	0
CARAMPOMA	-11.66	-76.52	44	1 41	1 44	0 44	0 30	0 55	1 0	0 48	0
CARANIA	-12.34	-75.87	13	0 23	0 -83	1 7	0 24	0 18	0 -50	1 -35	0
CARHUACAYAN	-11.2	-76.28	14	0 18	0 -2	0 10	0 15	0 26	1 -56	0 8	0
CARHUAMAYO	-10.92	-76.06	-10	0 -2	0 -5	0 -2	0 -6	0 10	0 -63	1 1	0
CASAPALCA	-11.65	-76.23	-11	0 -3	0 -6	0 -3	0 -6	0 21	0 -69	1 6	0
CHACCHAN	-9.54	-77.78	64	1 80	1 38	0 71	1 79	1 87	1 0	0 34	0
CHALILLA	-11.93	-76.33	-17	0 -21	0 3	0 -21	0 -20	0 -34	0 0	0 2	0
CHIQUIAN	-10.15	-77.15	1	0 15	0 -29	0 9	0 12	0 16	0 -50	1 -11	0
CHOCLOCOCHA	-13.1	-75.03	66	1 71	1 51	1 62	1 62	1 65	1 57	1 63	1
CHOSICA	-11.93	-76.73	-17	0 5	0 0	0 20	0 65	0 -31	0 0	0 0	0
DONOSO	-11.47	-77.23	6	0 17	0 7	0 7	0 41	0 7	0 13	0 43	0
HUACAMARCANGA	-8.1	-78.29	26	0 34	0 0	0 26	0 36	0 39	0 -68	1 5	0
HUAMANTANGA	-11.5	-76.75	33	1 34	1 61	1 37	1 44	1 21	0 0	0 78	1
HUANCALPI	-12.54	-75.24	8	0 18	0 2	0 15	0 26	0 2	0 -20	0 21	0
HUANEC	-12.29	-76.14	34	1 18	1 0	0 50	1 50	1 50	1 0	0 0	0
HUANGASCAR	-12.9	-75.83	-29	0 -22	0 -5	0 -27	0 -7	0 -24	0 0	0 0	0
HUANUCO	-9.97	-76.24	15	0 13	0 17	0 11	0 3	0 15	0 -9	0 26	0
HUAROCHIRI	-12.13	-76.23	92	1 96	1 92	1 94	1 50	1 75	1 0	0 98	1
HUAROS	-11.4	-76.57	42	1 23	0 50	1 39	0 37	1 19	0 0	0 50	1
HUAYAN	-11.45	-77.12	50	0 23	0 50	1 91	1 0	0 68	0 50	1 50	1
HUAYAO	-12.03	-75.34	-13	1 -9	0 -27	1 -12	0 0	0 -20	0 -42	0 -17	0
HUEGHUE	-11.24	-76.28	-4	0 13	0 16	0 15	0 11	0 12	0 -31	0 27	0
INGENIO	-11.88	-75.29	-24	0 -28	0 -31	1 -26	1 -27	0 -20	0 -70	1 -20	0
JACASCHICO	-9.88	-76.5	32	1 32	1 15	0 32	1 27	1 37	1 0	0 14	0
JAUJA	-11.78	-75.48	-13	0 -14	0 -18	0 -13	0 -20	0 7	0 -73	1 -14	0
JULCAN	-8.05	-78.49	47	1 49	1 24	0 35	1 50	1 55	1 0	0 33	0
JUNIN	-11.15	-75.99	-9	0 -12	0 -3	0 -11	0 -14	0 -11	0 -46	0 6	0
LACHAQUI	-11.55	-76.62	-6	0 -1	0 10	0 -1	0 -9	0 25	0 0	0 14	0
LAGUNASURASACA	-10.52	-76.78	3	0 -4	0 18	0 1	0 -7	0 4	0 7	0 29	0

	LAT	LON	Año hidrológico	Época avenidas	Especa estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON	
LANGA	-12.1	-76.4	-28	0 -10	0 71	1 -8	0 -17	0 3	0 0	0 74	1
LAOROYA	-11.58	-75.97	-8	0 18	0 -9	0 9	0 22	1 4	0 3	0 3	0
LAQUINUA	-13.03	-74.14	-14	0 -10	0 4	0 -6	0 -9	0 -9	0 -21	0 16	0
LIRCAY	-12.98	-74.73	-2	0 13	0 -43	1 -3	0 21	0 -13	0 -21	0 -44	1
MALPASO	-11.41	-76.04	-12	1 -5	0 -7	0 -1	0 -8	0 3	0 -19	0 0	0
MARCAPOMACocha	-11.4	-76.33	-19	0 -20	0 -7	0 -13	0 -23	0 -12	0 -27	0 3	0
MATUCANA	-11.84	-76.38	38	1 38	1 10	0 36	1 33	0 40	1 0	0 13	0
MILLOC	-11.57	-76.35	-13	0 1	0 31	0 7	0 1	0 3	0 0	0 33	1
MINACOLQUI	-11.58	-76.48	-16	0 -14	0 21	0 1	0 -18	0 7	0 -64	0 31	0
MODELOCAMPODEMART	-12.08	-77.03	-3	0 13	0 -23	0 -23	0 0	0 77	0 -48	1 0	0
MOLLEPATA	-8.19	-77.96	28	0 29	1 17	0 27	0 38	1 28	0 0	0 20	0
MOROCOCHA	-11.6	-76.13	-16	1 -4	0 -25	1 -9	0 -3	0 -6	0 -88	1 -10	0
OBRAJILLO	-11.45	-76.62	22	0 28	0 41	0 25	0 23	0 29	0 0	0 88	1
OCROS	-10.4	-77.4	35	0 50	1 50	0 46	0 49	1 49	0 0	0 62	1
OROYAFUNDICION	-11.52	-75.9	-5	0 7	0 8	0 11	0 13	0 10	0 -1	0 8	0
OYON	-10.67	-76.77	7	0 17	0 -6	0 10	0 17	0 19	0 -50	1 7	0
PACARAN	-12.86	-76.06	50	0 52	0 0	0 50	0 68	1 39	0 0	0 0	0
PACCHO	-10.95	-76.93	-2	0 10	0 -1	0 6	0 10	0 26	0 0	0 34	0
PACHACAYO	-11.81	-75.72	-18	0 -17	0 -1	0 -18	0 -15	0 -23	0 -25	0 2	0
PACHAMACHAY	-11.05	-76.83	-13	0 4	0 -41	0 -7	0 -5	0 40	0 0	0 -47	0
PACHANGARA	-10.78	-76.82	6	0 0	0 78	1 20	0 6	0 -31	0 15	0 76	1
PALLAC	-11.35	-76.8	30	0 34	0 41	0 38	0 48	1 11	0 0	0 41	0
PAMPALIBRE	-10.87	-76.97	-20	0 -13	0 40	0 -11	0 -6	0 -23	0 0	0 34	0

Tabla 4-5 b) Tendencia de la precipitación en porcentaje (%)

	LAT	LON	Año hidrológico	Época avenidas	Época estiaje	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON	
PARIACANCHA	-11.38	-76.50	4	0 5	0 -12	0 1	0 -3	0 13	0 -50	1 12	0
PARQUIN	-10.97	-76.72	42	1 51	1 20	0 38	1 50	1 44	1 -79	1 54	0
PICOY	-10.92	-76.73	-11	0 -2	0 -24	0 -12	0 -3	0 -1	0 -50	1 -14	0
PILCHACA	-12.41	-75.08	0	0 -5	0 -3	0 -3	0 -4	0 -5	0 -27	0 9	0
PIRA	-9.58	-77.71	-23	0 -16	0 -55	1 -29	0 -16	0 -21	0 -50	1 -34	0
PIRCA	-11.23	-76.65	9	0 -1	0 72	1 5	0 6	0 -12	0 0	0 80	1
QUIRUVILCA	-8.00	-78.32	40	1 45	1 29	0 37	1 47	1 44	1 -3	0 35	0
RECUJAY	-9.73	-77.45	30	1 36	1 16	0 29	1 30	1 47	1 2	0 15	0
RICRAN	-11.54	-75.53	35	1 34	1 31	1 35	1 35	1 33	1 0	0 42	1
RIOBLANCO	-11.73	-76.26	15	0 24	0 50	0 34	1 32	1 16	0 -13	0 73	1
SALCABAMBA	-12.20	-74.79	-10	0 5	0 -24	0 -3	0 3	0 13	0 -36	0 -9	0
SANBENITO	-7.41	-78.93	49	1 43	1 -10	0 38	1 40	0 43	1 -89	1 -3	0
SANJOSEDEPARAC	-11.80	-76.26	3	0 9	0 28	0 10	0 5	0 4	0 -31	0 40	1
SANJUANDECASTROVIRREYNA	-13.20	-75.64	16	0 16	0 7	0 19	0 13	0 6	0 0	0 14	0
SANJUANDEYANAC	-13.22	-75.80	32	0 43	0 47	1 44	0 74	1 -9	0 0	0 38	1
SANLAZARODEESCOMARCA	-12.18	-76.35	23	0 18	0 55	0 22	0 20	0 10	0 0	0 59	0
SANRAFAEL	-10.32	-76.17	26	1 27	1 35	1 22	1 27	0 27	0 12	0 46	1
SANTACRUZ	-11.20	-76.63	16	0 25	1 3	0 19	1 22	0 24	0 -57	0 16	0
SANTAELIALIA	-11.92	-76.67	-71	0 -59	0 0	0 -64	1 -14	0 -50	1 0	0 0	0
SANTIAGODETUNA	-11.98	-76.52	-8	0 1	0 26	0 -3	0 8	0 -7	0 0	0 24	0
SHEQUE	-11.67	-76.50	-3	0 1	0 38	0 6	0 16	0 -26	0 5	0 38	0
SIHUAS	-8.57	-77.65	40	1 42	1 30	0 37	1 38	1 48	1 22	0 35	0
SINSICAP	-7.85	-78.76	25	0 34	0 23	0 30	0 38	0 32	0 -24	0 24	0
TANTA	-12.12	-76.02	49	1 55	1 33	0 43	1 65	1 36	0 -55	1 50	1
TARMA	-11.40	-75.69	-1	0 -2	0 -12	0 -2	0 -1	0 10	0 -23	0 -8	0
TINGO	-11.62	-76.48	-9	0 -14	0 24	0 -4	0 -2	0 -7	0 25	0 22	0

	LAT	LON	Año hidrológico	Época avenidas		Época estiaje		ANUAL	DEF			MAM		JJA		SON		
TUPE	-11.00	-76.65	5	0	14	0	32	0	24	1	9	0	10	0	-8	0	43	1
UPAMAYO	-10.93	-76.28	-12	0	2	0	-2	0	-2	0	-4	0	14	0	-23	0	-2	0
VILCA	-12.12	-75.83	57	1	47	1	75	1	53	1	44	1	51	1	79	1	80	1
VIQUES	-12.16	-75.23	80	1	58	1	50	1	71	1	62	1	79	1	50	1	50	1
VONHUMBOLDT	-12.08	-76.95	-28	0	10	0	-47	1	-33	0	20	0	-48	0	-34	0	-48	1
YANTAC	-11.33	-76.40	15	0	16	0	12	0	9	0	15	0	7	0	-2	0	29	0
YAULI	-11.67	-76.08	-23	0	-6	0	-13	0	-11	0	-1	0	-5	0	13	0	-12	0

A escala estacional, en general, la señal de tendencia de la precipitación muestra dos comportamientos, en los últimos 49 años.

En JJA de 1965-2013, la precipitación tendió a ser cada vez más de reducción en el ámbito de estudio, es decir disminuyó significativamente, principalmente en las cuencas altas y cuencas aledañas al área de influencia de estudio. Cabe resaltar que JJA es la época de escasas precipitaciones, y durante los últimos 49 años éstas han sido cada vez más secas.

En el resto de las estaciones del año DEF, MAM, SON y en el período anual, no hay muchas variaciones significativas de la señal espacial de tendencia de precipitación entre ellas, un comportamiento de aumento general de la precipitación es determinada, reflejada en su señal climática espacial, principalmente en las cuencas media - alta y en las cuencas vecinas. Cabe resaltar que DEF, MAM y SON, son las estaciones del año donde ocurren las precipitaciones en la zona de estudio.

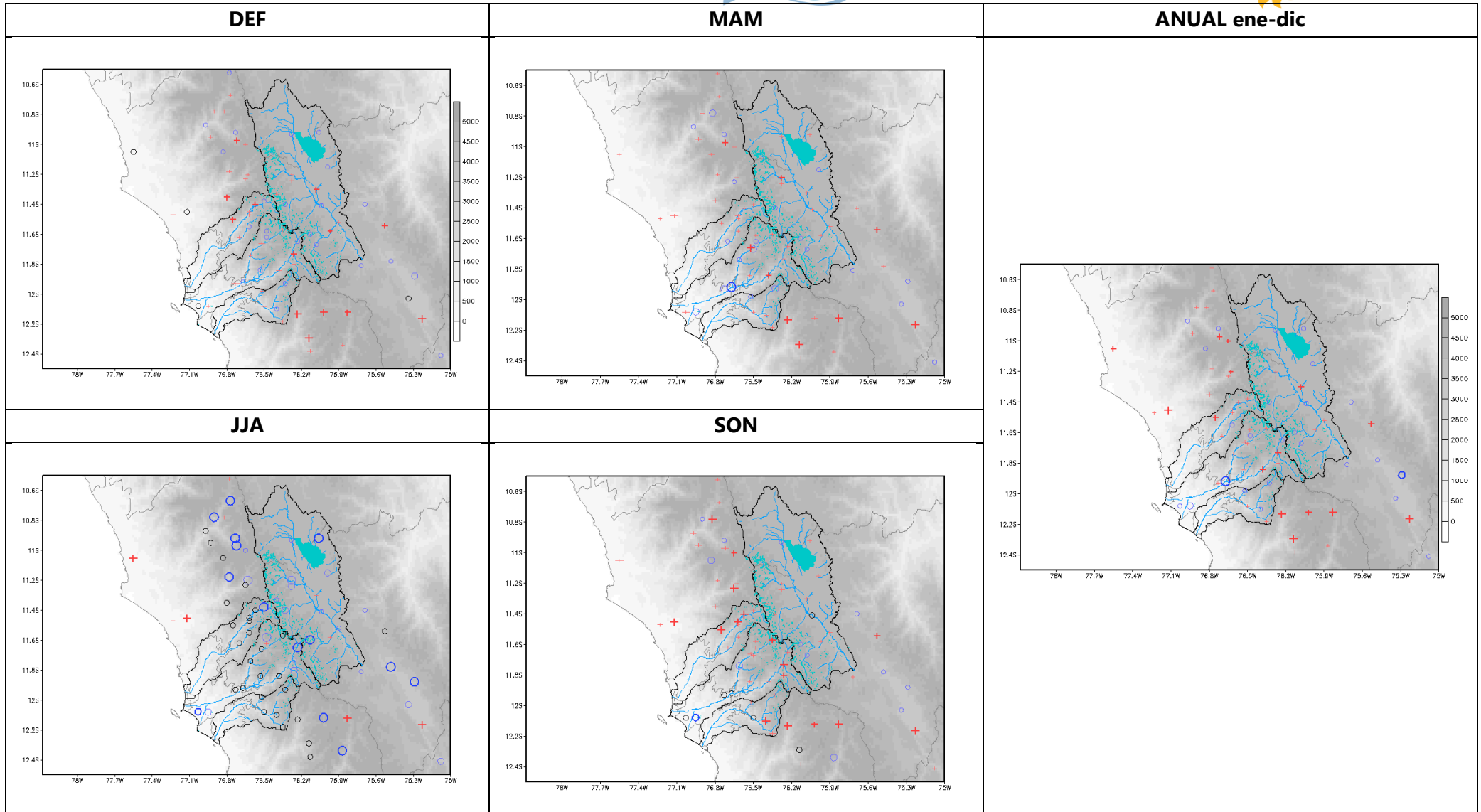


Figura 4-5 Señal de tendencia actual de la precipitación en estaciones convencionales en el área de influencia de las Cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro. 1965-2015.

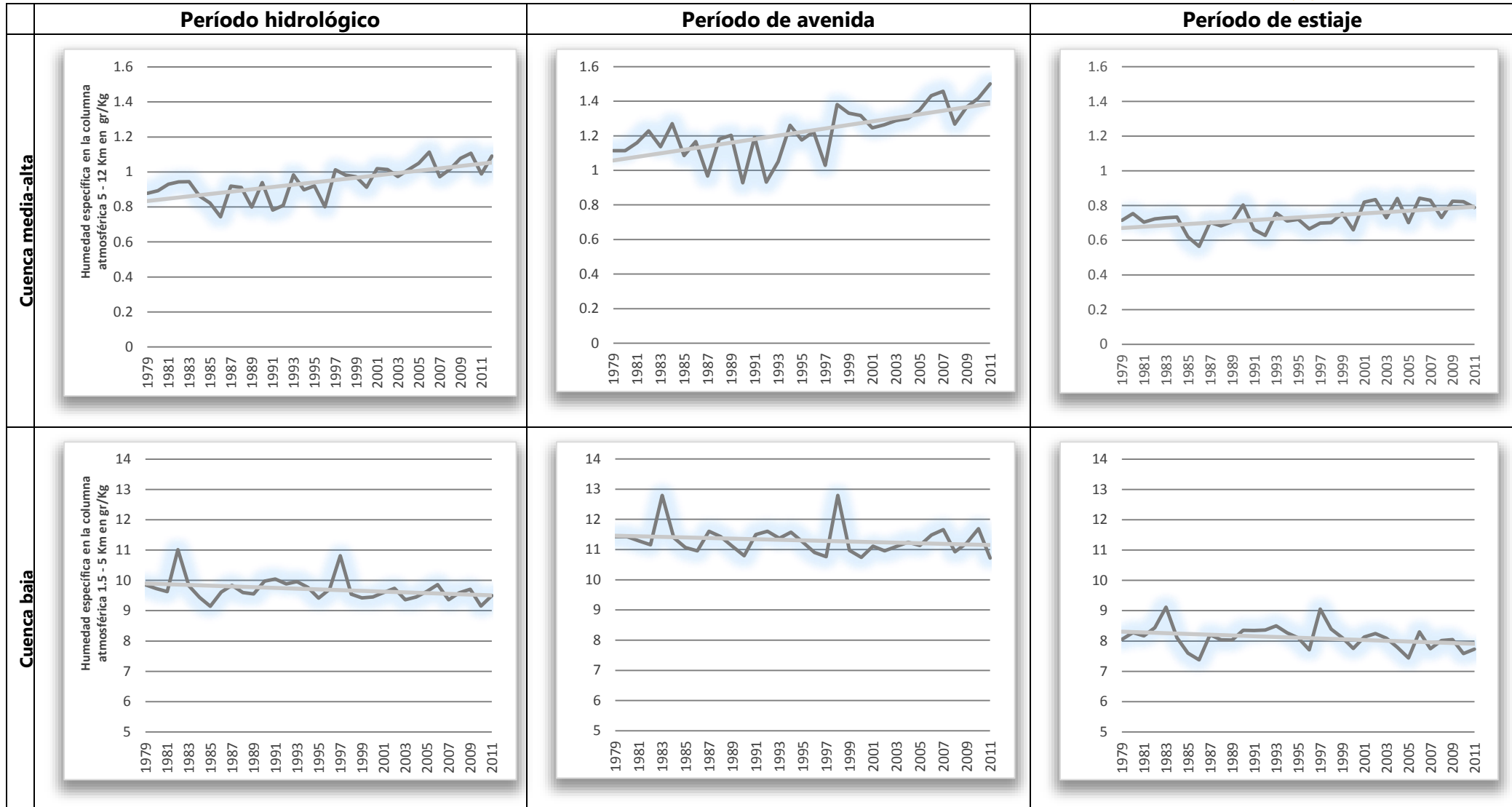


Figura 4-6 Tendencias actuales de la humedad específica en la columna atmosférica entre 1.5 - 5 Km y 5 - 12 Km, atmósfera adyacente a las cuencas media-alta y baja. Fuente: Autores. Datos: Reanalysis Era Interin 0.75°x0.75° de resolución espacial. La humedad específica mide la masa de agua que se encuentra en estado gaseoso en un kilogramo de aire húmedo, y se expresa en gramos por kilogramo de aire (g/kg).

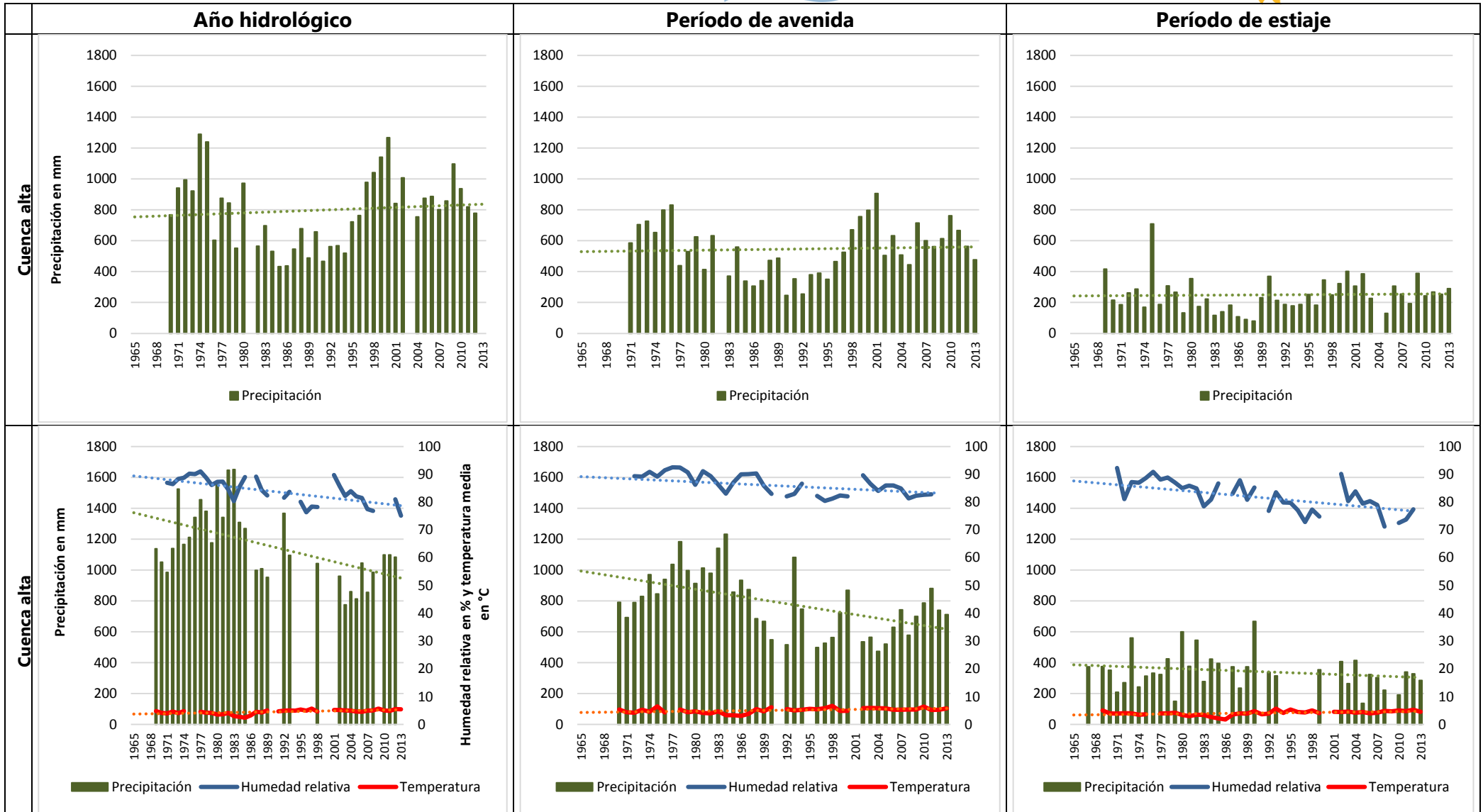


Figura 4-7 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones Yantac y Marcapomacocha.

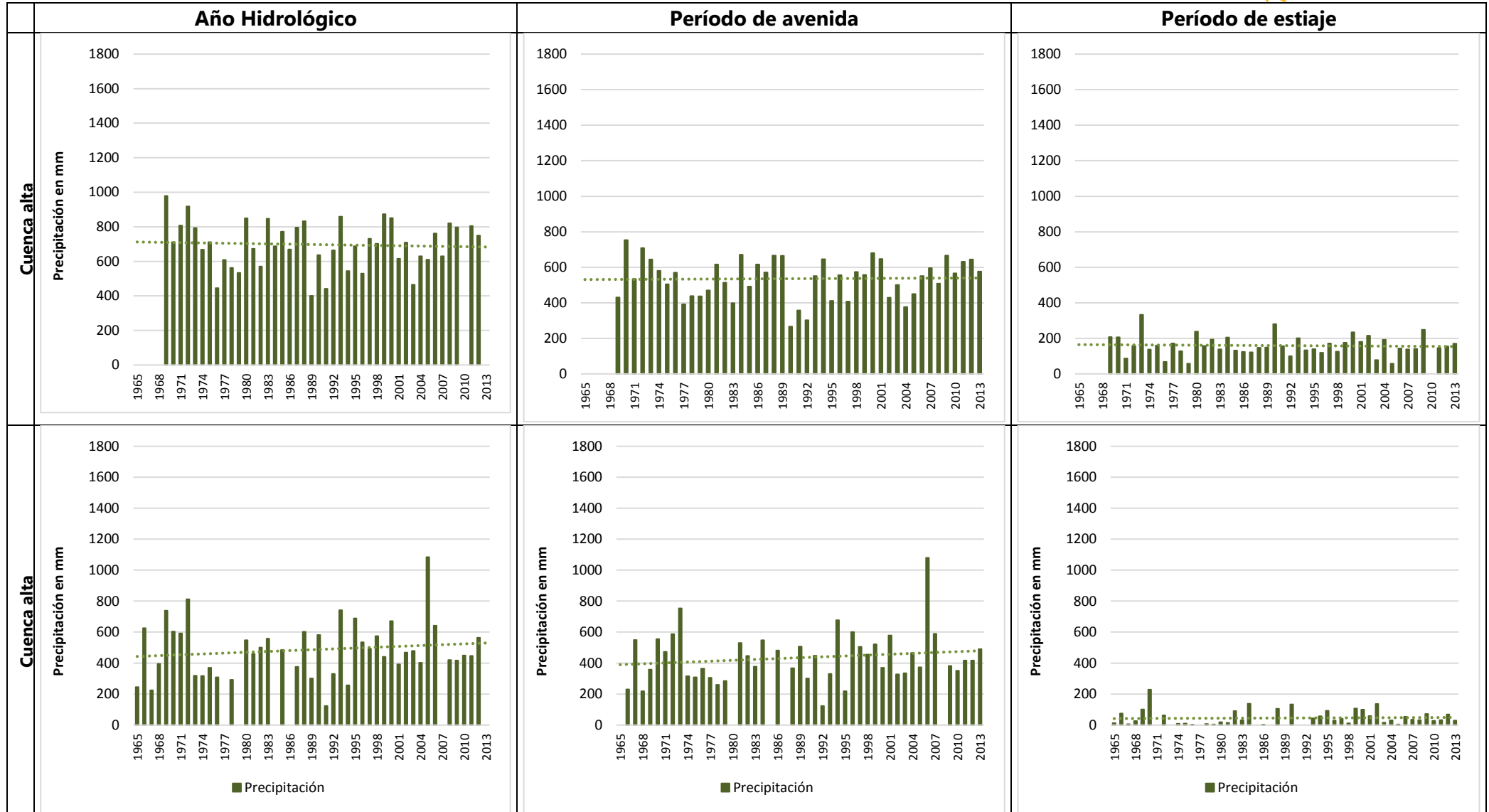


Figura 4-8 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones Pariacancha y San Lázaro de Escamarca.

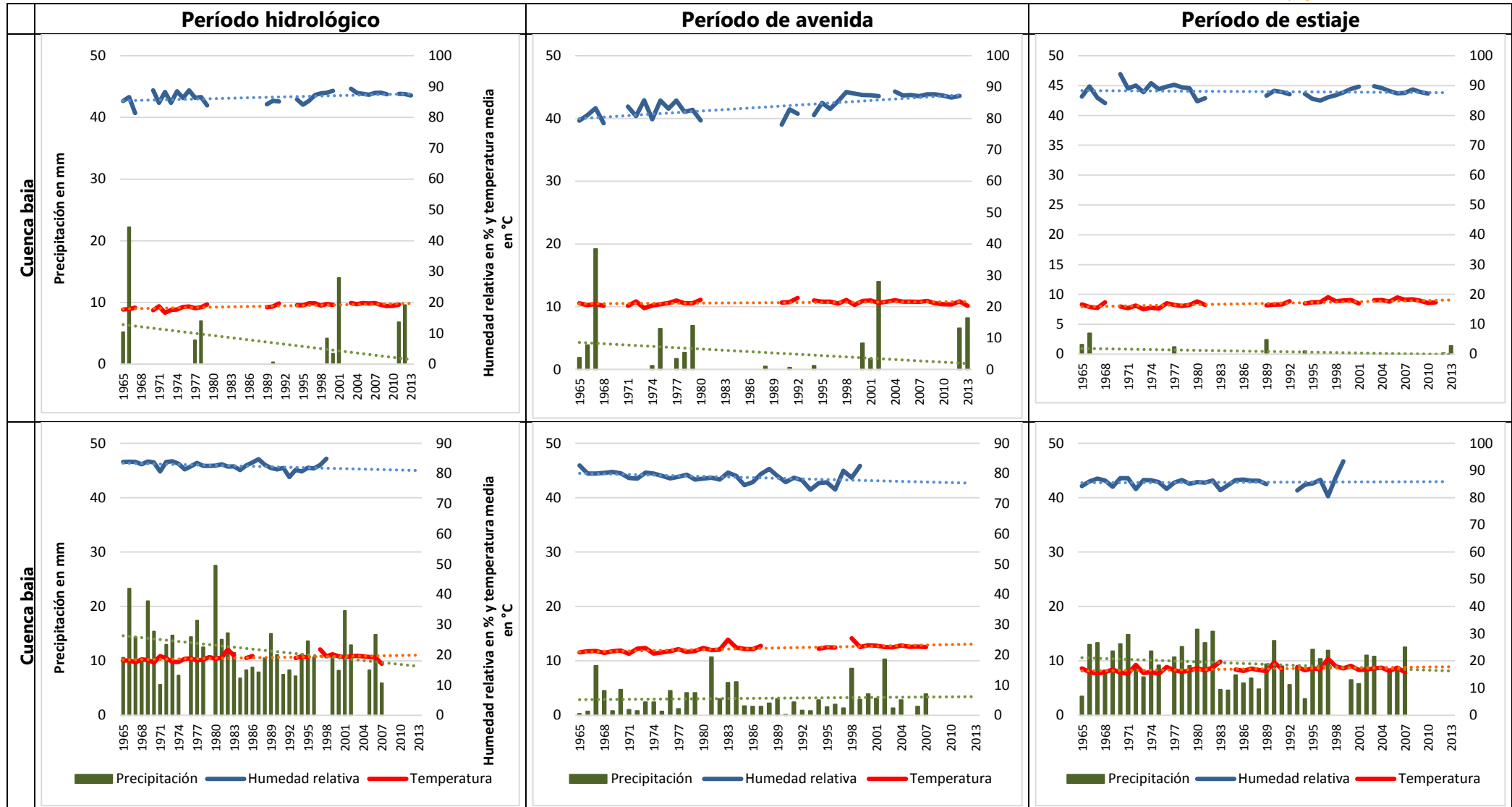


Figura 4-9 Tendencias actuales de precipitación, temperatura y humedad relativa en las estaciones meteorológicas Ñaña y Von Humboldt.

4.2 Caracterización y clasificación climática

Las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Mantaro se ubican en los Andes centrales del Perú y vierten sus aguas (El Mantaro parcialmente, por trasvase artificial) a la costa Pacífica del departamento de Lima. Ésta es una región compleja, no solo a nivel climático y topográfico, sino también a nivel socioeconómico. En poco más de 100 km la topografía varía desde las planicies aluviales hasta las cumbres de la cordillera, con presencia de glaciares a más de 5500 msnm. La gran presión antrópica que sufren las cuencas bajas de los ríos analizados, especialmente el Rímac, están directamente ligadas a la presencia de la gran área metropolitana de Lima y la importancia y magnitud de las actividades agrícolas, industriales y de consumo humano que se desarrollan en el entorno de la capital. La presencia de una población de más de 10 millones de habitantes, genera una gran demanda hídrica en ríos con cauces irregulares, y con sus reservorios naturales, las masas glaciares, en franco retroceso.

Conocer con precisión los patrones de circulación atmosférica que contribuyen o generan precipitaciones en las cuencas en análisis, es una tarea muy ardua. No obstante es de suma importancia para conocer cómo la dinámica atmosférica influye en el régimen pluviométrico e hídrico de estas cuencas de relevante interés para el desarrollo socio-económico de Perú. Los patrones de circulación regional determinan las condiciones de escala sinóptica que favorecen la existencia de dos estaciones (húmeda y seca) en los Andes tropicales, estos patrones han sido ampliamente estudiados a nivel sudamericano. Paradójicamente, los efectos de estos patrones sobre la cordillera andina, han recibido una menor atención de la comunidad científica. Existen pocos artículos sobre la climatología y la circulación atmosférica en los Andes, en comparación con otras grandes cadenas montañosas como los Alpes o Himalaya, (Garreaud, 2009). En concreto, el comportamiento de la circulación local en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y cuenca alta del Mantaro, ha sido poco estudiada, por lo que el presente estudio es uno de los principales esfuerzos realizados para caracterizar la circulación regional y local aplicada a estas cuencas.

El estudio del clima en el ámbito de las cuencas es fundamental dado que es el principal factor de alteración de las condiciones ambientales, modificando y alterando significativamente el comportamiento de la red de drenaje y su entorno. Dada la incidencia directa de las lluvias y temperaturas del aire sobre las actividades humanas, conocer la distribución anual y estacional de estas variables climáticas es un aspecto medular para tomar conocimiento de la oferta climática del área de interés y sobre todo, para gestionar adecuadamente el recurso clima.

En esta línea, es de prever que cambios significativos de los patrones termopluviométricos en las partes altas de las cuencas tendría efectos importantes en todos los aspectos de la vida social y económica de las poblaciones asentadas en las partes bajas, más aún en el contexto de un proceso acelerado de retroceso de los glaciares tropicales y una tendencia general de disminución de lluvias en los Andes centrales y en el sur del Perú (Vuille et al., 2003) y más notablemente en la parte alta de la cuenca del Mantaro (Avalos et al., 2012).

Las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro están ubicadas en la parte central de la vertiente occidental de los Andes peruanos con pisos altitudinales que van desde el nivel del mar hasta

aproximadamente los 6 000 msnm (Figura 1 y Mapa 1 en Anexo 01). La parte baja de las cuencas exhiben un clima semicálido y desértico con escasas lluvias durante el año (Figura 2 y Mapa 2 en Anexo 01). La región está bajo la influencia del brazo descendente del Anticiclón del Pacífico Sur (APS), sistema de alta presión ubicado en la parte suroriental del océano Pacífico sur responsable del gradiente Este – Oeste de las lluvias (de mayor a menor), de allí que los valores de precipitación sean en general escasos en el sector occidental de la región y se incrementan hacia el Este. Ocasionalmente el campo térmico de esta región es sutilmente perturbado por el ingreso de vientos fríos del sur asociados a los denominados vientos Paracas del Jet costero que no sólo incrementan la concentración de humedad sino que incrementan la frecuencia de lloviznas y neblinas.

La parte baja de las cuencas exhiben un clima semicálido y desértico con escasas lluvias durante todo el año (Figura 2 y Mapa 2 en Anexo 01). Esta región está bajo la influencia del brazo descendente del Anticiclón del Pacífico Sur (APS), sistema de alta presión en la parte suroriental del Océano Pacífico sur responsable del gradiente Este-Oeste de las lluvias (de mayor a menor), de allí que los valores de precipitación sean en general escasos en el sector occidental de la región y se incrementan hacia el este. Ocasionalmente el campo térmico de esta región es sutilmente perturbado por el ingreso de vientos fríos del sur asociados a los denominados vientos Paracas del Jet costero que no sólo incrementan la concentración de humedad sino que incrementen la frecuencia de lloviznas y neblinas.

En la parte media y alta de las cuencas, donde se ubican localidades tales como Huarochirí y Canta, el clima predominante es húmedo y con precipitaciones en los meses de verano y seco en el invierno. Las temperaturas varían entre templadas para la parte media y semifrías para la parte alta. El ingreso de vientos cálidos y húmedos procedentes de la Cuenca Amazónica hacia los Andes orientales es uno de los mecanismos físicos más importantes que determina los patrones locales de humedad y precipitación en estas regiones de las cuencas. La fuerte dependencia de la topografía condiciona el comportamiento de la temperatura del aire y de la precipitación. A medida que el aire asciende se produce un rápido enfriamiento lo cual se ve reflejado en una descarga de la humedad por la precipitación, caracterizando así a un clima con mayor humedad y consecuentemente mayor precipitación durante los meses de verano. Dicho proceso de descarga de humedad por medio de la precipitación provoca el desecamiento parcial de la atmósfera y es causante de que disminuya gradualmente la precipitación en dirección hacia el oeste (Avalos, 2005).

El régimen pluviométrico en la cuenca Alto Mantaro depende fuertemente de la circulación horizontal en niveles medios y altos de la tropósfera, la cual es predominantemente del este durante el verano, facilitando el transporte de humedad desde la Amazonía. En este sector de las cuencas se emplazan ciudades importantes tales como Cerro de Pasco, Junín y La Oroya. El periodo lluvioso coincide cuando los vientos del este se intensifican en todos los niveles de la tropósfera y el relieve favorece la inestabilidad mecánica para las lluvias orográficas. Otra fuente importante de humedad para esta región es el Lago Junín, cuya extensión de 529.9 Km² y de donde se evaporan aproximadamente 2 600 000 m³ de agua diariamente hace de este una gran fuente de humedad local mediante procesos de evapotranspiración, especialmente en los meses febrero a abril.

Durante los meses de invierno los flujos en la troposfera son predominantemente del oeste, los cuales favorecen el ingreso de aire seco provocando una fuerte disminución de la precipitación y nubes, permitiendo así el enfriamiento nocturno. Es frecuente la ocurrencia de heladas y nevadas durante la temporada de bajas temperaturas de mayo a septiembre. Las heladas están asociadas a procesos de irradiación o pérdida de energía debido a la ausencia de nubosidad, viento en calma y escasa humedad atmosférica (Atlas de Heladas, SENAMHI 2005) unido a los procesos de circulación del aire en las laderas y a la elevada altitud.

Es importante destacar, además, la presencia de nevados en las regiones más altas de las cuencas (a más de 5000 msnm) los cuales contribuyen, mediante sus deshielos, la disponibilidad de agua para diferentes fines en la cuenca.

La precipitación varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y los factores locales. La Figura 6-131 muestra para las estaciones de verano e invierno los campos del viento en el nivel de 850 hPa y 200 hPa. Durante el verano, la circulación atmosférica en las capas bajas (850 hPa~1 500 msnm) se caracteriza por la proyección de los vientos que penetran a la región central del Perú desde el Atlántico hasta los Andes. A este nivel el flujo de humedad hacia la zona de estudio es bloqueado por la pendiente orográfica y desviado hacia el Sur; es en las capas más altas (500 hPa~5 500 msnm) por donde el flujo logra cruzar la barrera orográfica y acumular humedad al otro lado de los Andes centrales que al interactuar con los flujos provenientes del Pacífico genera las lluvias en las partes media y alta de las cuencas.

En la troposfera media y alta predominan los vientos del oeste. En verano en la alta troposfera o capa en el nivel de 200 hPa (~12 000 msnm) se encuentra la Alta de Bolivia (AB) cuyos campos de divergencias afecta toda la región tropical y subtropical. La región de los Oestes intensos avanza hacia el norte en invierno y retrocede hacia el sur en verano. Al norte de los 40 °S sobre el Pacífico Suroriental, la circulación próxima a la superficie es dominada por un centro de alta presión casi estacionario conocido como el anticiclón del Pacífico Sur (APS) el cual contribuye significativamente en la modulación del clima en la vertiente occidental de los Andes generando subsidencia (flujos descendentes) en su lado Este por tanto limitando la convección (ascenso de masa para la formación de lluvias).

También hay que considerar la influencia de la temperatura superficial del mar (TSM) del Pacífico como principal forzante de la variabilidad interanual del clima en la zona de estudio. La influencia de la TSM en la atmósfera se puede propagar a grandes distancias a través de ondas que dan lugar a patrones de teleconexiones (Barros et al., 2006). De esta forma, es como pueden manifestarse forzamientos remotos desde el Pacífico occidental sobre las cuencas del Rímac, Chillón, Lurín y parte alta del Mantaro (Bazo J., 2014) que explican buena parte de la variabilidad climática de la zona de estudio.

Precipitación (mm), vientos (m/s) y presión en 850 hPa

Precipitación (mm) y vientos (m/s) en 200 Hpa

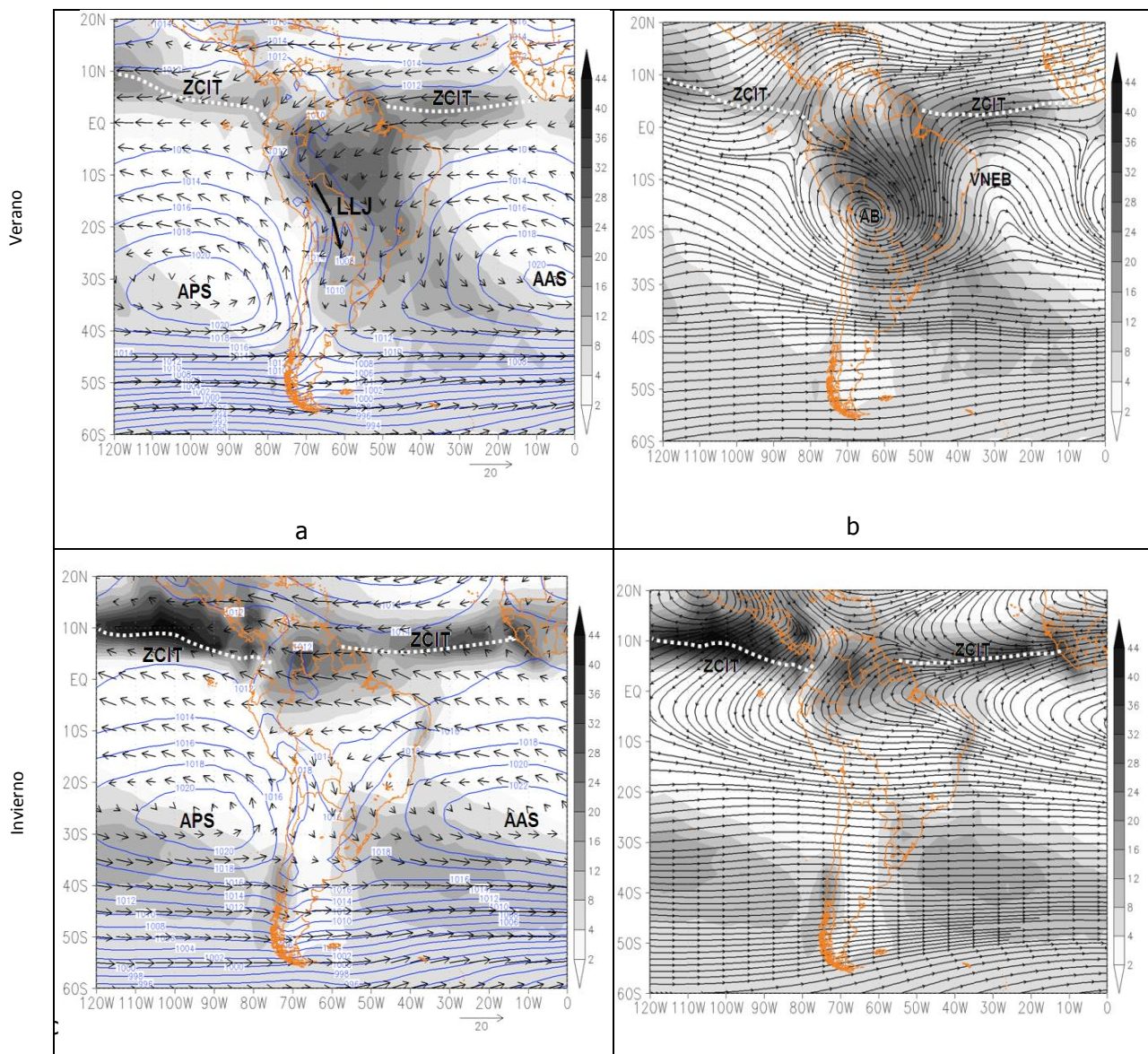


Figura 4-10 Circulación atmosférica de verano e invierno sobre Sudamérica.

Fuente de datos: Reanálisis NCEP 1980-2009 (Kalnay et al., 1996). Tomado de Avalos et al (2012).

Izquierda: flujos de vientos en 850 hPa (m/s, flechas), Zona de Convergencia Intertropical (línea entrecortada), presión reducida a nivel medio del mar (hPa, líneas azules); Derecha: flujo de vientos en niveles altos (200 hPa) y precipitación estacional (mm).

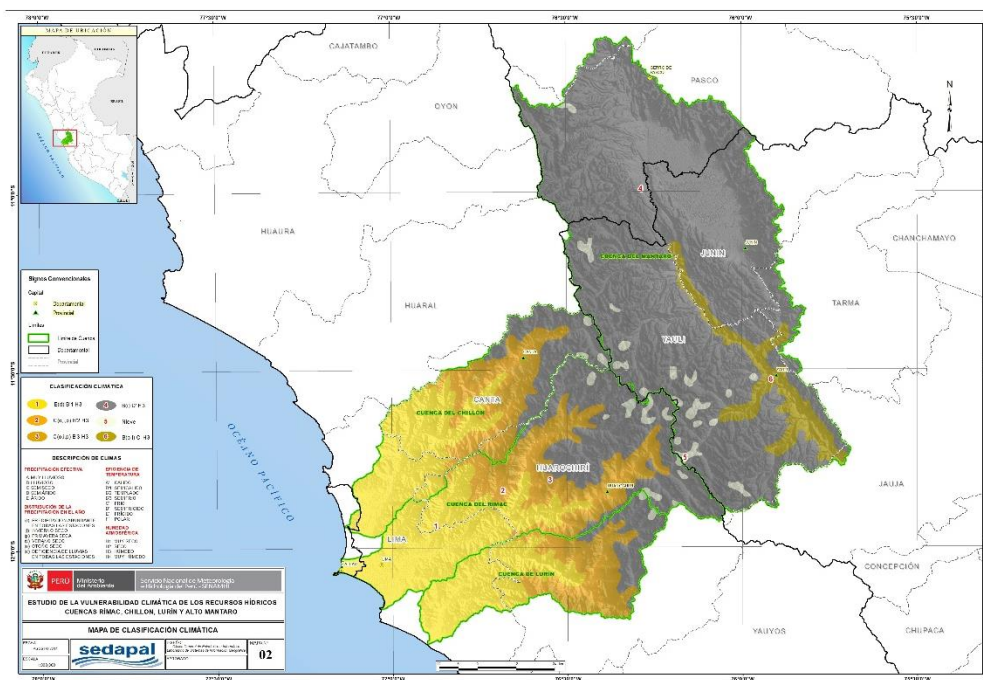


Figura 4-11 Mapa de clasificación climática de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y parte alta de la cuenca del río Mantaro.

4.2.1 Climatología de la precipitación y temperatura

Precipitación

El periodo de lluvias en la zona de estudio, como en toda la región andina del Perú, se inicia en setiembre (inicio de la primavera austral), acentuándose entre enero y febrero (verano), para luego disminuir entre abril y mayo (otoño). La distribución espacial de la precipitación en las cuencas R-CH-L-M exhibe una dependencia con la elevación, principalmente durante la temporada lluviosa (setiembre – abril). Dicho de otro modo, los mapas de isoyetas evidencian un incremento de precipitaciones en sentido Este-Oeste a medida que aumenta la elevación.

Durante el verano (DEF), la isoyeta de 250 mm atraviesa el sector medio de la cuenca media, mientras que el sector superior registra precipitaciones mayores a 400 mm. El valor máximo acumulado durante esta temporada se registra en las proximidades de las estaciones de Tingo (3 991 msnm), Milloc (4 361 msnm) y Marcapomacocha (4 417 msnm) con acumulados que van desde 400 mm hasta casi 500 mm. En esta última estación (parte alta de la cuenca del Mantaro), las lluvias registradas entre diciembre y febrero representan casi el 50 % del total acumulado en el año, lo cual es coherente con el resultado encontrado por Senamhi a lo largo de la cuenca del Mantaro para el periodo 1971-2000 (Avalos et al., 2012), que da cuenta que en la parte alta de esta cuenca entre setiembre y abril se acumula cerca del 92 % del total anual y durante este periodo sólo entre diciembre y marzo llueve cerca del 62 % del acumulado anual. Entre otoño (fin del periodo lluvioso) y primavera (inicio del periodo lluvioso) los acumulados en la parte media son del orden de 100-150 mm y 50-100 mm respectivamente, mientras que en la parte alta los varían entre 200-250 mm (otoño) y 150-200 mm (primavera).

Considerando que es en la parte alta de las cuencas R-CH-L-M donde se concentran los mayores acumulados de la precipitación, conocer su régimen a lo largo del año resulta ser de particular importancia para la gestión del recurso hídrico en las partes media y baja. En la Figura 6-132 se muestra los promedios ponderados de la distribución estacional y anual de las lluvias en las partes altas de las cuencas R-Ch-L versus parte Alta del Mantaro dado que el mecanismo físico para la producción de lluvias difiere en ambas zonas; mientras que las lluvias en la parte alta del Mantaro se generan debido al bloqueo de la cordillera al flujo predominante del Este (ascenso orográfico), al otro lado de la cordillera en la parte alta de las cuencas R-Ch-L (vertiente occidental) las lluvias se originan por convergencia de flujos del este y perturbaciones del oeste provenientes del Pacífico. El acumulado anual de lluvias en el alto Mantaro es del orden de 930 mm/año, esto es aproximadamente 150 mm más que el acumulado anual de la parte alta del R-Ch-L.

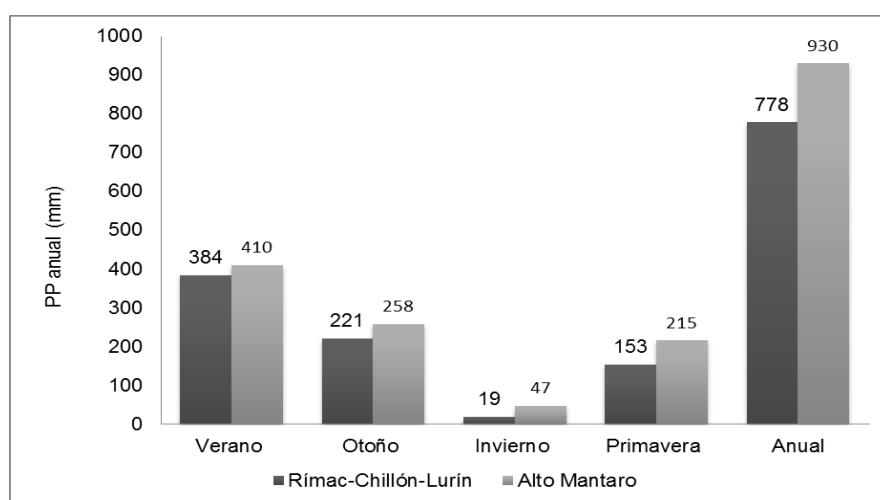


Figura 4-12 Valores medios ponderados de la precipitación total anual y estacional en la parte Alta de las cuencas de los ríos R-Ch-L-M.

a) Cuenca de río Rímac

La precipitación media anual hasta el punto de control de la estación hidrométrica Chosica R-2 alcanza los 491.0 mm. A nivel de subcuencas se ha identificado que la mayor pluviometría anual corresponde a la subcuenca Rímac con un módulo acumulado anual de 701.0 mm; en la subcuenca del río Santa Eulalia, la precipitación media anual alcanza los 541.0 mm, mientras que en el otro brazo del Rímac denominado subcuenca medio rímac la precipitación media alcanza los 327.0 mm. En los histogramas que se ilustra en las Figuras 4-163 y 4-164, se puede apreciar el ciclo anual de la precipitación media por cada subcuenca, donde se aprecia que en el período húmedo la precipitación acumulada alcanza el 82% de la precipitación anual entre los meses de diciembre a mayo.

b) Cuenca del río Chillón

La precipitación media anual hasta el punto de control de la estación hidrométrica de Puente Magdalena ha sido estimada en 484.0 mm. En relación a las subcuencas, la mayor pluviometría anual se ha estimado para la subcuenca Alto Chillón con un módulo acumulado anual de 506.0 mm; en la subcuenca del río Quisquichaca, la precipitación media anual alcanza los 389.0 mm. Otras subcuencas

con menor pero importante pluviometría anual por la incidencia de huaycos son Socos con 124.0 mm y Medio Alto Chillón con 89.0 mm. En los histogramas que se ilustra en las Figuras 4-166 y 4-167, se puede apreciar el ciclo anual de la precipitación media por cada subcuenca, donde se aprecia que en el período húmedo la precipitación acumulada alcanza el 91 % de la precipitación anual entre los meses de diciembre a mayo.

c) Cuenca del río Lurín

La precipitación media anual hasta el punto de control de la estación hidrométrica de Antapucro ha sido estimada en 325.0 mm. Con respecto al comportamiento pluviométrico a nivel de subcuencas, la mayor pluviometría anual se ha estimado para la subcuenca Alto Lurín con un módulo acumulado anual de 467.0 mm; otras subcuencas de importante aporte pluviométrico lo constituyen las subcuencas de Chalilla con una precipitación anual de 425.0 mm y Canchahuara con 411.0 mm. En los histogramas que se ilustra en las Figuras 4-169 y 4-170, se puede apreciar el ciclo anual de la precipitación media por cada subcuenca, donde se aprecia que en el período húmedo la precipitación acumulada alcanza el 91 % de la precipitación anual entre los meses de diciembre a mayo.

d) Cuenca del río Alto Mantaro

En la cuenca alta del Mantaro, la precipitación media anual ha sido estimada en 868.0 mm. En relación al comportamiento pluviométrico a nivel de subcuencas, se tiene que la mayor pluviometría anual se ha estimado para la subcuenca con codificación ANA 499695, con una precipitación media anual de 779.0 mm, le siguen en importancia pluviométrica la subcuenca de Conocancha con 766.0 mm/año y la subcuenca con codificación ANA 499697 con 467.0 mm/año. En los histogramas que se ilustra en la figura 4-172 y 4-173, se puede apreciar el ciclo anual de la precipitación por cada subcuenca, donde se ha determinado que el comportamiento trimestral de la precipitación se caracteriza por lo siguiente, la mayor concentración de la precipitación se da en los trimestres DEF con 45 % y MAM con 26 %; por otro lado los trimestres más secos son JJA con 5 % y SON con 24 % de la precipitación anual, respectivamente. En los histogramas de la figura, se ilustra el ciclo anual de la precipitación media de cada subcuenca.

Temperatura del aire

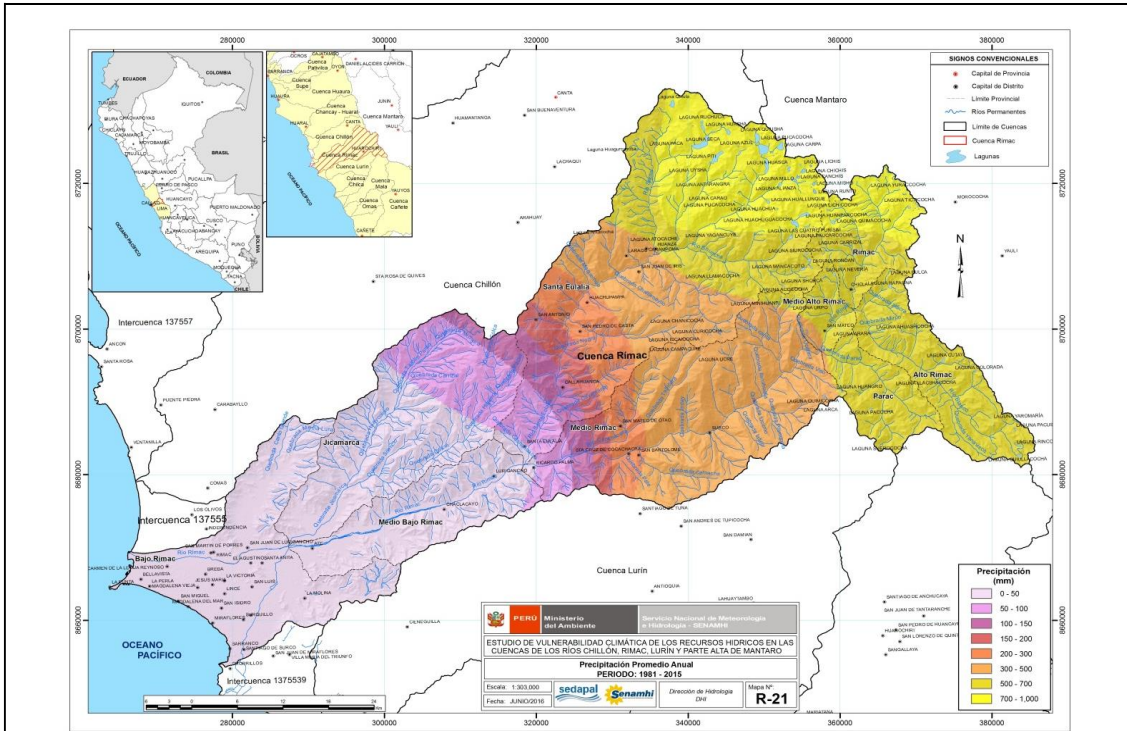
Las formas del relieve que dominan el área de estudio, condicionan el comportamiento de las temperaturas del aire. La variedad altitudinal propicia la existencia de variados escenarios térmicos de fuertes contrastes desde los fríos climas de la parte alta hasta los abrigados valles en la parte baja.

La temperatura del aire mínima presenta valores más bajos durante los meses de invierno, asociado a los bajos valores de radiación solar incidente y al máximo enfriamiento de la superficie debido a la escasez de nubosidad nocturna y baja humedad durante este periodo. El valor más alto durante el año ocurre entre enero y marzo y está asociado a la temporada de lluvias, época en el que el contenido de humedad en la atmósfera se incrementa y la mayor presencia de humedad y de nubes impiden el

enfriamiento nocturno. En el sector correspondiente a la cuenca media, la temperatura mínima oscila entre 4° y 6°C durante el verano y alrededor de 0 °C en el invierno. Las temperaturas mínimas más bajas se registran en las partes altas con un rango -2 °C y 0 °C en verano y de -5° a -2 °C en invierno.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos picos máximos, uno en mayo y el más intenso en noviembre, mientras los valores menores se dan en los meses de verano. En localidades ubicadas sobre los 4 000 msnm estos máximos no son muy notorios, registrándose temperaturas máximas muy similares durante todo el año. La ocurrencia del segundo pico máximo (noviembre) se debe a que en esta temporada se tiene escasa cobertura nubosa y la superficie recibe la máxima radiación solar incidente, además los suelos están relativamente secos, mientras que en el verano la radiación solar incidente disminuye debido a la cobertura nubosa, por ser temporada de lluvias. Es la primavera la estación más cálida en el área de estudio, asociado a la mayor exposición solar durante este periodo, mientras que los menores valores de temperatura máxima ocurren en el verano, asociado a la mayor cobertura nubosa. La temperatura máxima en el verano varía en un rango de 14 °C y 16 °C en la cuenca media. En las partes altas se registran temperaturas máximas del orden de 10 °C y 12 °C. Durante la primavera las temperaturas máximas oscilan entre 16° y 18 °C en la parte media de la cuenca y de 12° a 14 °C en la parte Alta

En el Atlas hidroclimático de cuencas, incluido en el Anexo de este Capítulo, se presenta en detalle los mapas elaborados por variable y por cuenca.



Precipitación media areal subcuencas - Rímac

Subcuenca	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
alto Rimac	17	41	57	90	117	108	104	52	10	4	3	5	608
bajo_rimac	1	0	0	0	1	3	2	0	1	1	1	2	12
jicamarca	1	1	1	4	8	17	13	2	0	0	0	0	48
medio alto rímac	10	27	39	77	96	114	115	39	8	2	1	3	532
medio bajo rímac	0	0	1	3	6	10	6	1	1	0	0	1	30
medio rimac	2	9	17	44	64	83	82	23	2	0	0	1	327
San José de Parac	11	31	49	83	109	112	114	46	7	3	1	3	568
Santa Eulalia	13	29	38	67	89	107	103	40	8	2	2	5	501
Rímac	27	52	57	101	122	125	125	53	17	6	4	11	701

Precipitación acumulada Subcuencas - Rímac

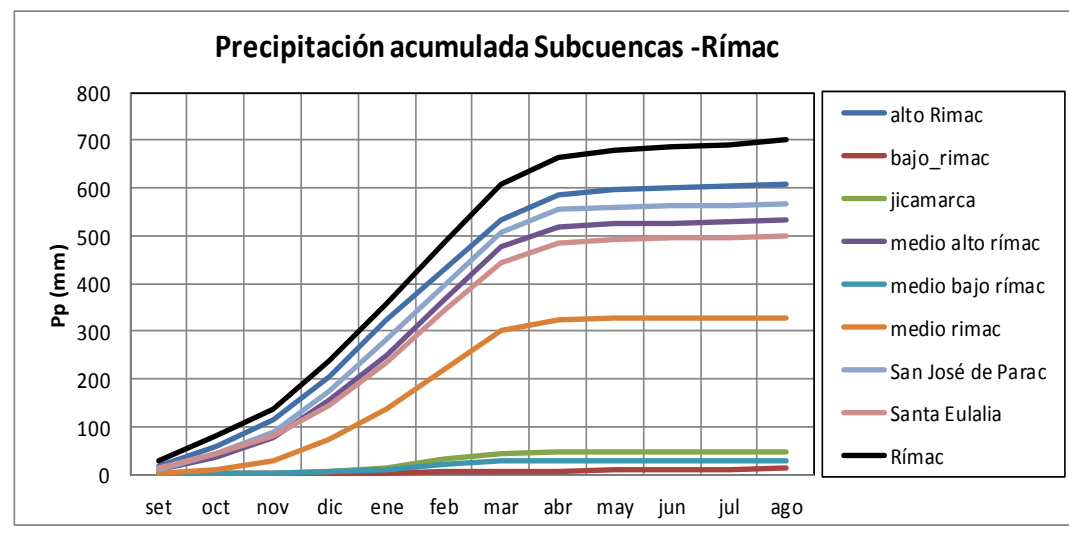
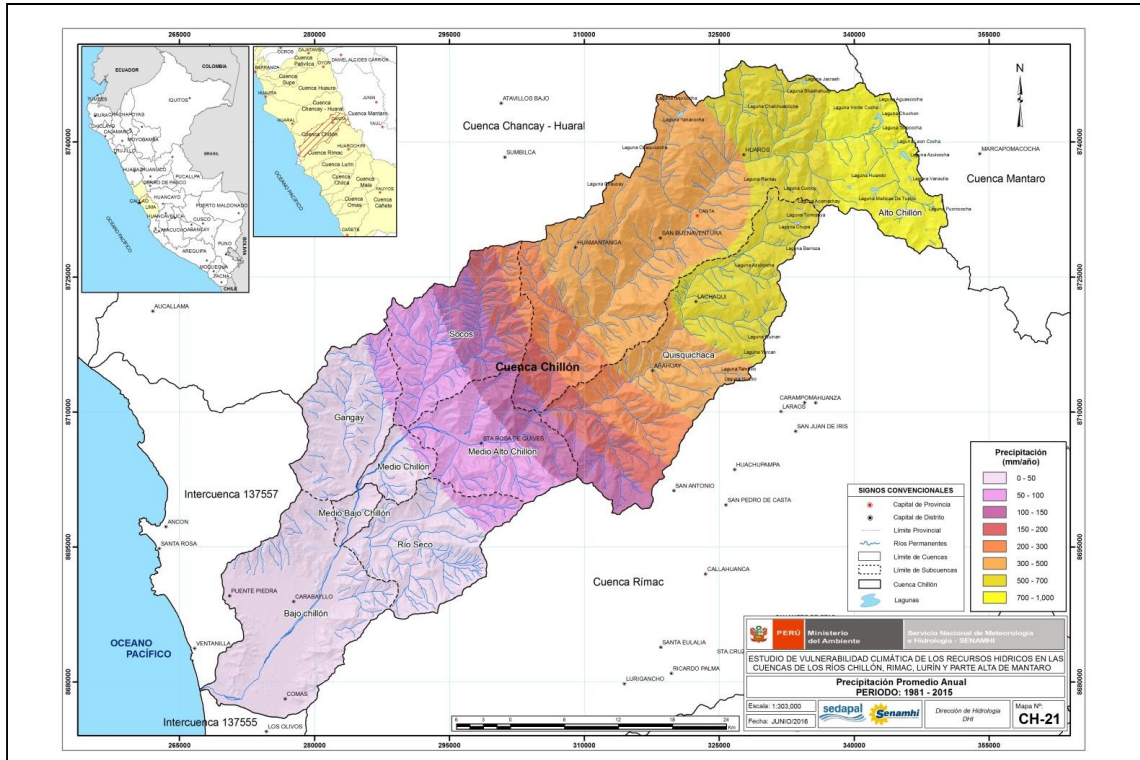


Figura 4-13 Climatología de la Precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Rímac



Precipitación media areal subcuencas - Chillón

Subcuencas	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
alto chillón	11	27	36	65	90	112	112	40	7	2	1	3	506
bajo chillón	1	0	0	1	1	8	6	0	0	0	1	1	18.52
Gangay	0	0	1	2	3	17	14	1	0	0	0	0	39.6
Medio Alto Chillón	1	1	2	6	11	33	30	4	1	0	0	0	89
Medio Bajo Chillón	0	0	0	1	2	13	11	0	0	0	0	0	30
Medio Chillón	0	1	1	2	3	19	17	1	0	0	0	0	45
Quisquichaca	4	15	24	48	74	97	93	31	3	0	0	1	389
Río Seco	0	1	1	2	4	16	13	1	0	0	0	0	38.7
Socos	1	3	4	9	16	44	39	6	1	0	0	0	124

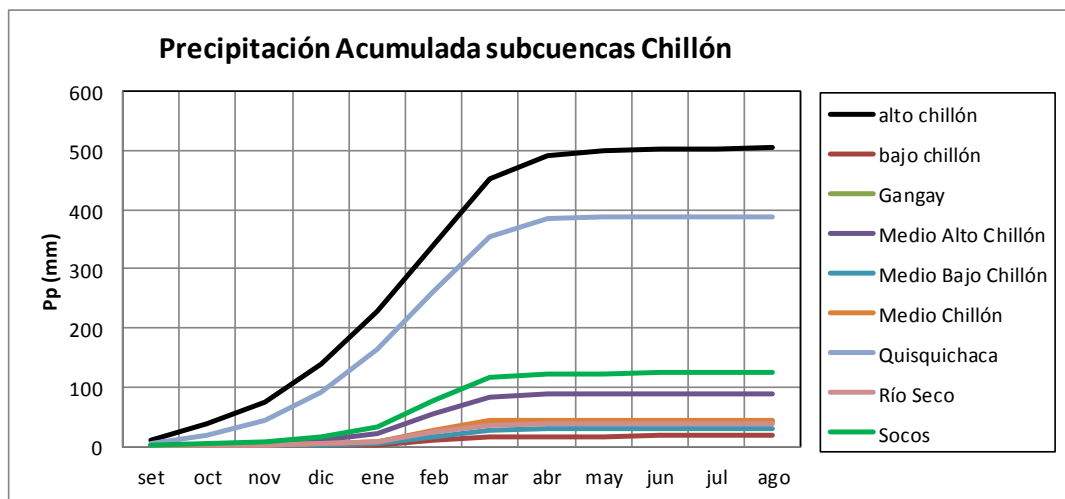
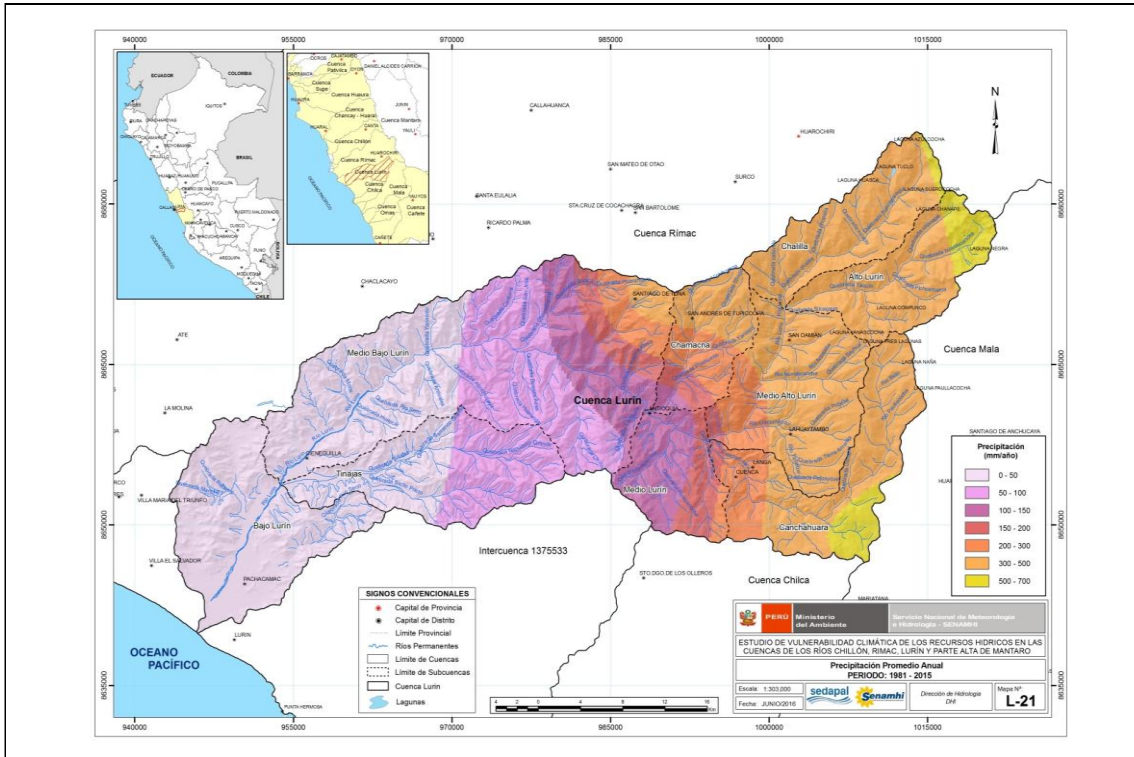


Figura 4-14 Climatología de la precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Chillón



Precipitación media areal subcuencas - Lurín

	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Alto Lurín	3	14	35	59	96	101	117	39	1	0	0	1	467
Bajo Lurín	1	1	0	2	2	8	6	1	1	1	1	1	24
Canchahuara	2	10	24	51	80	105	103	33	2	0	0	0	411
Chalilla	2	11	29	54	87	95	110	34	1	0	0	0	425
Chamacna	1	4	12	36	55	77	73	18	1	0	0	0	276
Medio Alto Lurín	1	7	18	43	73	95	96	26	1	0	0	0	360
Medio Bajo Lurín	0	1	3	10	16	29	22	5	1	0	0	0	88
Medio Lurín	1	2	5	19	26	46	37	7	1	0	0	0	144
Tinajas	1	1	1	5	7	19	13	2	1	0	0	0	51

Precipitación Acumulada subcuencas Lurín

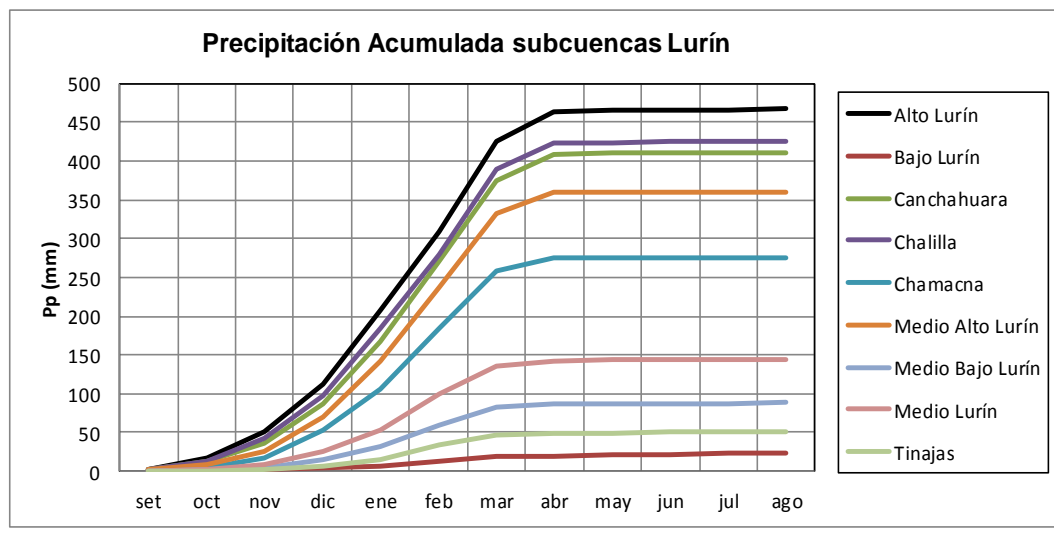
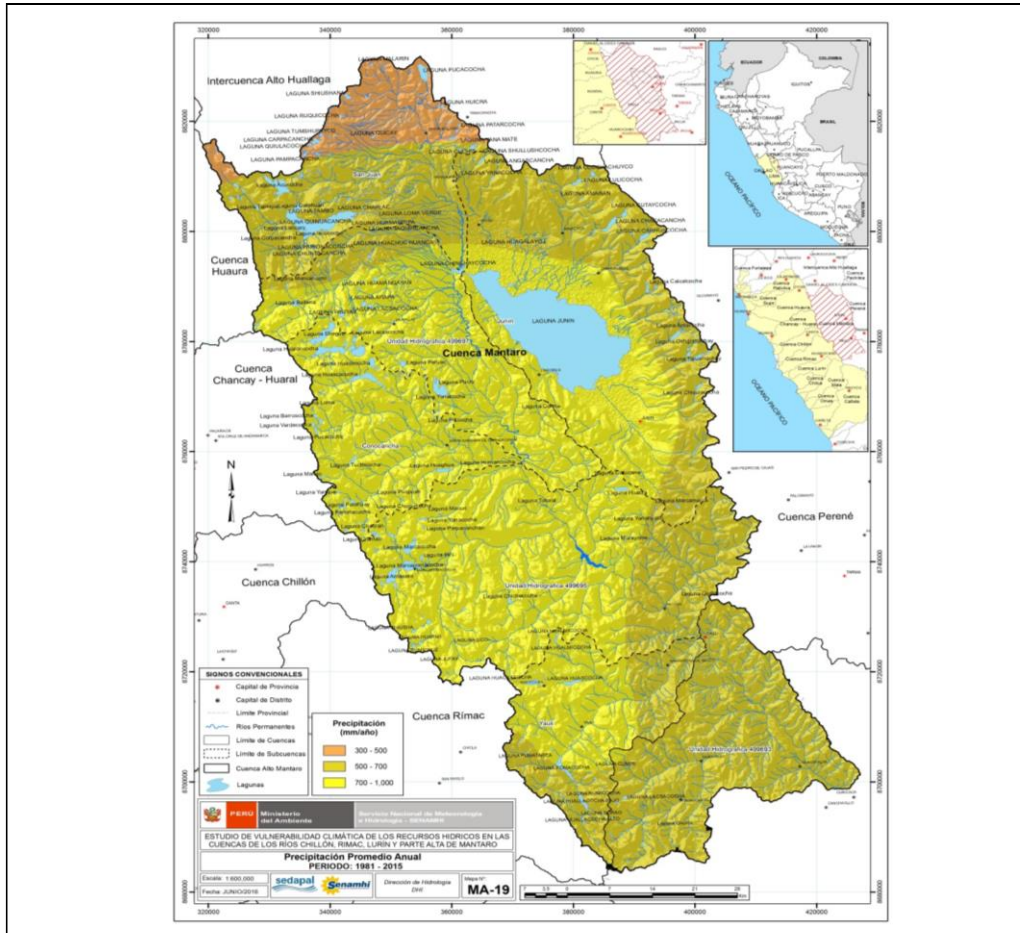


Figura 4-15 Climatología de la precipitación media por subcuencas. Cuenca del río Lurín



Precipitación media areal subcuencas - Alto Mantaro

	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Yauli	34	62	63	92	114	120	113	59	19	10	10	16	712
san juan	22	50	53	80	94	82	77	50	15	6	4	7	540
junin	42	70	62	90	106	107	102	54	24	14	8	15	693
conocancha	34	72	73	104	122	122	122	69	21	8	7	14	766
499693	28	56	58	81	98	98	92	51	16	10	8	12	607
499695	49	73	69	101	116	119	118	59	25	17	12	23	779
499697	38	75	73	103	119	116	114	66	23	11	7	14	760

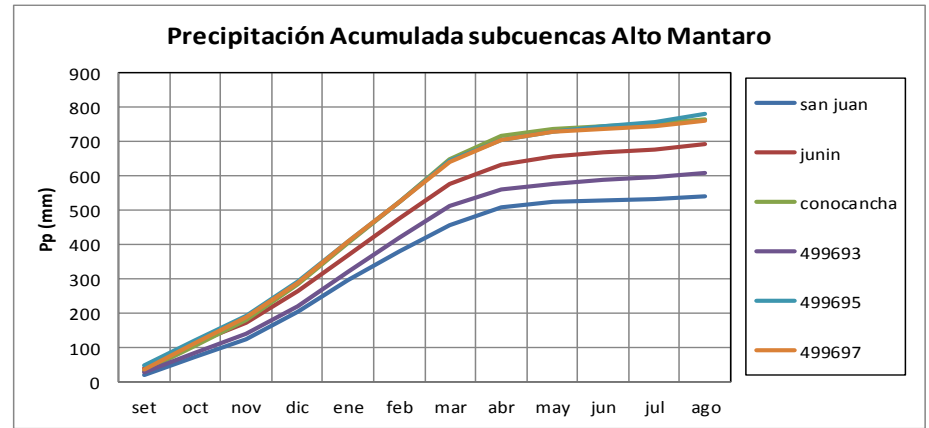


Figura 4-16 Climatología de la precipitación media en subcuencas del Alto mantaro

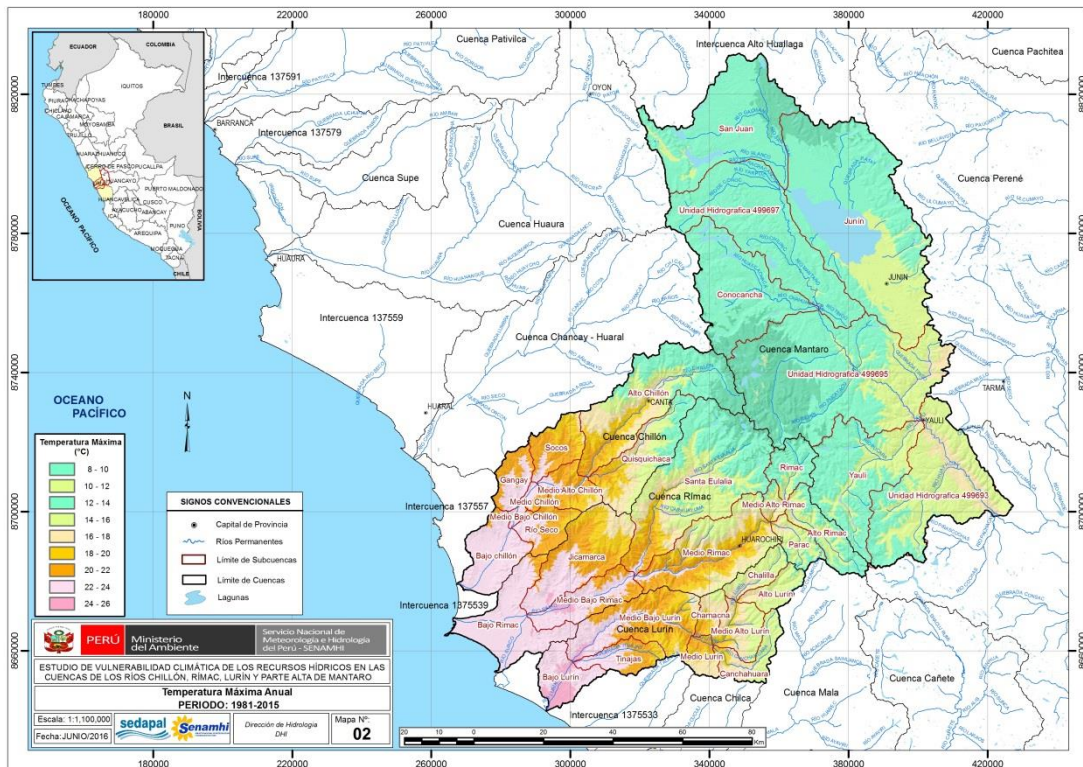


Figura 4-17 Mapa de temperatura máxima promedio anual del periodo 1981-2015

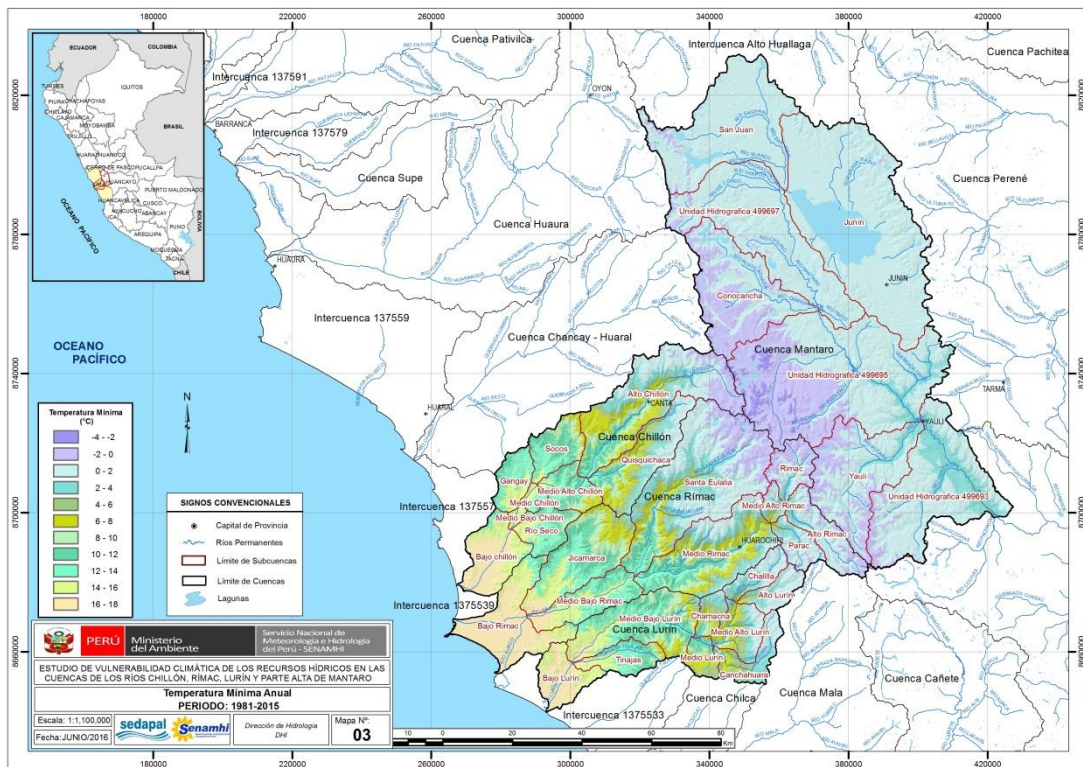


Figura 4-18 Mapa de la temperatura mínima promedio anual del periodo 1981-2015

4.3 Régimen de caudales

4.3.1 Cuenca del río Rímac

En la cuenca del Rímac, se ha analizado la información hidrológica de la estación de Chosica-R2, para el periodo 1970-2015, habiendo determinado un caudal promedio multianual de 26.8 m³/s. De la serie analizada mensual se obtiene un caudal máximo mensual de 134.8 m³/s presentado en marzo de 1972. El caudal mínimo mensual para este período se presentó en agosto de 1973 con un valor de 1.53 m³/s. En las Tablas del 4-6 al 4-9 se presentan la caracterización de los caudales basados en criterios estadísticos-climáticos.

Tabla 4-6 Caracterización anual de los caudales del río Rímac en régimen natural

Parámetro	Unidad	Valor	
Area drenaje	Km ²	2274.0	
Caudal promedio anual	m ³ /s	26.87	
Caudal máximo	m ³ /s	134.80	
Caudal mínimo	m ³ /s	1.53	
Caudal promedio anual en años secos	m ³ /s	19.12	
Caudal promedio anual en años húmedos	m ³ /s	34.44	
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m ³ /s	26.78	
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m ³ /s	22.08	
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m ³ /s	21.51	
Caudal promedio anual en años "Niño"	m ³ /s	26.11	
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m ³ /s	26.91	
Volumen máximo disponible	MMC	1089.9	
Volumen mínimo disponible	MMC	604.7	

Tabla 4-7 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Rímac

Parámetro	PARAMETROS ESTADISTICOS DE CAUDAL ESTACION CHOSICA R-2												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ANUAL
Promedio	14.05	14.71	17.19	23.74	36.67	51.48	57.71	39.68	21.72	16.65	14.73	14.14	26.87
Mediana	14.09	14.17	15.93	21.71	33.75	48.36	56.67	36.15	20.81	15.35	14.20	13.81	26.78
DS	4.51	4.06	6.22	9.83	15.65	20.25	22.69	13.82	8.04	5.57	4.74	4.60	6.85
CV	0.32	0.28	0.36	0.41	0.43	0.39	0.39	0.35	0.37	0.33	0.32	0.33	0.25
máx	26.90	24.75	32.50	49.90	84.24	89.97	134.80	69.45	51.33	31.76	25.21	26.77	44.51
Min	1.53	4.29	6.50	5.61	14.81	10.27	14.62	11.60	9.58	6.97	4.30	3.80	11.01

Tabla 4-8 Comportamiento de los caudales del río Rímac en años normales, secos y húmedos

AÑO	CAUDAL PROMEDIO EN AÑOS SECOS, NORMALES Y HUMEDOS (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	promedio
SECO	11.15	11.74	12.71	14.67	24.62	34.46	40.90	26.60	16.26	12.90	11.82	11.57	19.12
NORMAL	13.69	14.85	16.68	23.93	37.72	53.74	55.78	41.59	21.17	16.82	14.47	13.81	27.02
HUMEDO	17.42	17.52	22.32	32.56	47.37	65.60	76.99	50.32	27.88	20.17	17.97	17.14	34.44

Tabla 4-9 Caudales característicos del río Rímac para diferentes niveles de persistencia

Persistencia	PERSISTENCIA DE CAUDAL PROMEDIO MENSUAL (m ³ /s)												Anual
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	
P - 50%	14.12	14.37	16.36	22.07	33.93	48.36	56.67	36.15	20.83	16.07	14.22	13.81	26.78
P - 75%	10.89	11.53	12.70	16.93	26.65	41.48	43.58	30.00	16.52	13.08	11.58	11.50	22.08
P - 80%	10.09	11.10	11.89	16.37	25.73	38.66	41.37	28.94	15.85	12.76	10.99	10.64	21.51
P - 90%	9.05	9.91	9.22	13.61	18.27	24.54	32.64	25.06	12.66	10.39	8.90	9.71	18.42

En el capítulo de caracterización de la oferta hídrica se tiene información en detalle del régimen de los caudales a nivel de subcuencas y microcuencas.

En contraste, en la cuenca baja del Rímac, predomina la señal de aumento marcadamente significativo en las estaciones Ñaña y Von Humboldt de 0.35 °C/década es decir de 1.75 °C en los últimos 49 años que aparentemente estarían afectadas por el efecto urbano. Sin embargo, entre 1.5 - 5 Km existe una tendencia de disminución gradual ligera y no significativa de la temperatura a razón de -0.042 °C/década, que podría estar explicada aparentemente por otros modos de variabilidad climática que no han sido experimentados en este artículo y que amerita un estudio más profundo en una segunda fase.

En general, las tendencias de la temperatura media en el período avenidas presentan un patrón aproximado al comportamiento de la señal climática espacial de tendencias del periodo hidrológico. No obstante, al norte de la Cuenca Chillón y sur este de las cuencas Lurín y Alto Mantaro, se observa un patrón regional de aumento no significativo de la temperatura, que guarda coherencia con el comportamiento de la tendencia entre 5 - 12 km y la estación en superficie de Marcapomacocha, más no en las estaciones Canta y Matucana que muestran un tendencia de disminución no significativa.

4.3.2 Cuenca del río Chillón

En la cuenca del Chillón, se ha analizado la información hidrológica de la estación de Pte Magdalena, la cual ha sido extendida completada y extendida vía modelización matemática con modelo GR2m. El período analizado corresponde a 1970-2015, habiendo determinado un caudal promedio multianual de 7.1 m³/s para un área de drenaje de 1253.5 Km². De la serie analizada mensual se obtiene un caudal máximo mensual de 84.1 m³/s presentado en marzo de 1972. El caudal mínimo mensual para este período se presentó en junio de 1990 con un valor de 0.4 m³/s. En las Tablas del 4-10 al 4-13 se presentan la caracterización de los caudales basados en criterios estadísticos-climáticos.

Tabla 4-10 Caracterización anual de los caudales del río Chillón

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km ²	1253.5
Caudal promedio anual	m ³ /s	7.09
Caudal máximo	m ³ /s	84.91
Caudal mínimo	m ³ /s	0.40
Caudal promedio anual en años secos	m ³ /s	4.27
Caudal promedio anual en años húmedos	m ³ /s	9.99
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m ³ /s	6.78
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m ³ /s	4.93
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m ³ /s	4.84
Caudal promedio anual en años "Niño"	m ³ /s	6.50
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m ³ /s	8.57
Volumen máximo disponible	MMC	316.9
Volumen mínimo disponible	MMC	135.3




Tabla 4-11 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Chillón

Parámetro	PARAMETROS ESTADÍSTICOS DE CAUDAL DEL RIO CHILLON												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ANUAL
Promedio	2.1	2.6	3.7	6.1	11.2	15.4	20.0	11.5	5.0	3.1	2.3	2.0	7.1
Mediana	1.9	2.4	3.2	5.0	8.3	14.3	18.2	11.1	4.9	3.0	2.1	1.8	7.1
DS	1.1	1.2	2.3	3.3	8.2	7.4	12.8	4.8	2.3	1.7	1.1	1.0	2.6
CV	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
máx	5.1	5.6	15.5	15.0	41.1	36.2	84.9	24.4	9.7	6.7	4.9	4.2	15.1
Min	0.5	0.9	0.8	1.4	1.5	2.1	5.1	2.2	0.7	0.4	0.4	0.4	2.5

Tabla 4-12 Comportamiento de los caudales del río Chillón en años normales, secos y húmedos

AÑO	CAUDAL PROMEDIO EN AÑOS SECOS , NORMALES Y HUMEDOS (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	promedio
SECO	1.5	2.0	3.2	3.5	5.1	9.1	11.3	7.9	3.1	1.8	1.5	1.4	4.3
NORMAL	2.1	2.4	3.9	6.2	9.0	15.8	19.9	10.9	5.1	3.3	2.6	2.3	7.0
HUMEDO	2.6	3.5	3.9	8.7	20.0	21.3	28.8	15.5	6.6	4.2	2.6	2.1	10.0

Tabla 4-13 Caudales característicos del río Chillón para diferentes niveles de persistencia

Persistencia	PERSISTENCIA DE CAUDAL PROMEDIO MENSUAL (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Annual
P - 50%	1.9	2.3	3.1	5.4	9.3	14.3	18.7	10.9	4.9	2.9	2.1	1.6	6.8
P - 75%	1.2	1.9	2.4	3.8	5.5	10.6	12.2	7.7	3.0	1.8	1.5	1.2	4.9
P - 80%	1.2	1.7	2.3	3.6	5.1	9.3	11.0	7.6	2.9	1.6	1.4	1.1	4.8
P - 90%	0.9	1.4	1.6	2.0	4.3	5.6	9.2	6.2	2.5	1.1	1.0	0.8	3.8

4.3.3 Cuenca del río Lurín

En la cuenca del Chillón, se ha analizado la información hidrológica de la estación de Puente Magdalena, la cual ha sido completada y extendida vía modelización matemática con modelo GR2m. El período analizado corresponde a 1970-2015, habiendo determinado un caudal promedio multianual de 3.5 m³/s, para un área de drenaje de 1198.5 Km². De la serie analizada mensual se obtiene un caudal máximo mensual de 26.8 m³/s presentado en febrero de 1999. El caudal mínimo mensual para este período se presentó en julio de 1988 con un valor de 1.3 m³/s. En las Tablas 4-14 al 4-17 se presentan la caracterización de los caudales basados en criterios estadísticos-climáticos.

Tabla 4-14 Caracterización anual de los caudales del río Lurín

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km ²	1198.5
Caudal promedio anual	m ³ /s	3.48
Caudal máximo	m ³ /s	26.77
Caudal mínimo	m ³ /s	1.30
Caudal promedio anual en años secos	m ³ /s	2.88
Caudal promedio anual en años húmedos	m ³ /s	3.95
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m ³ /s	3.47
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m ³ /s	3.00
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m ³ /s	2.94
Caudal promedio anual en años "Niño"	m ³ /s	3.19
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m ³ /s	3.82
Volumen máximo disponible	MMC	124.9
Volumen mínimo disponible	MMC	91.1




Tabla 4-15 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Lurín

Parámetro	PARAMETROS ESTADÍSTICOS DE CAUDAL DEL RIO LURIN												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ANUAL
Promedio	1.6	1.9	2.4	3.9	6.1	8.9	8.6	2.8	1.5	1.4	1.3	1.4	3.5
Mediana	1.5	1.8	2.1	3.7	5.5	8.4	8.0	2.7	1.4	1.4	1.3	1.4	3.5
DS	0.2	0.4	0.8	1.8	2.7	4.7	4.1	1.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7
CV	0.1	0.2	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
máx	2.0	2.9	5.1	10.8	14.7	26.8	22.1	7.3	2.1	1.6	1.9	1.8	4.9
Min	0.6	0.8	1.2	1.5	1.9	2.3	2.7	1.6	1.3	0.9	0.8	0.8	1.8

Tabla 4-16 Comportamiento de los caudales del río Lurín en años normales, secos y húmedos

AÑO	CAUDAL PROMEDIO EN AÑOS SECOS , NORMALES Y HUMEDOS (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	promedio
SECO	1.6	1.8	2.2	3.1	4.5	6.4	7.0	2.6	1.4	1.4	1.3	1.4	2.9
NORMAL	1.5	1.8	2.4	3.8	5.5	10.1	8.9	3.0	1.5	1.4	1.3	1.4	3.6
HUMEDO	1.6	2.0	2.4	4.8	8.4	9.9	10.0	2.8	1.5	1.4	1.3	1.4	3.9

Tabla 4-17 Caudales característicos del río Lurín para diferentes niveles de persistencia

Persistencia	PERSISTENCIA DE CAUDAL PROMEDIO MENSUAL (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Annual
P - 50%	1.5	1.8	2.1	3.6	5.6	8.4	8.0	2.7	1.4	1.4	1.3	1.4	3.5
P - 75%	1.5	1.6	1.8	2.6	4.2	5.8	5.5	2.2	1.4	1.4	1.3	1.3	3.0
P - 80%	1.5	1.6	1.8	2.4	4.0	5.4	5.1	2.1	1.4	1.4	1.3	1.3	2.9
P - 90%	1.4	1.5	1.6	1.9	2.9	4.5	4.2	1.9	1.3	1.4	1.3	1.3	2.6

4.3.4 Cuenca del río Mantaro

Los caudales del río Mantaro han sido caracterizados en base a la información de la estación Pte Stuart. El período analizado corresponde a 1970-2015, habiendo determinado un caudal promedio multianual de 86.8 m³/s, para un área de drenaje de 9339.0 Km². De la serie analizada mensual se obtiene un caudal máximo mensual de 415.2 m³/s presentado en febrero de 1974. El caudal mínimo mensual para este período se presentó en octubre de 1993 con un valor de 18.2 m³/s. En las Tablas 4-18 al 4-21 se presentan la caracterización de los caudales basados en criterios estadísticos-climáticos.

Tabla 4-18 Caracterización anual de los caudales del río Mantaro

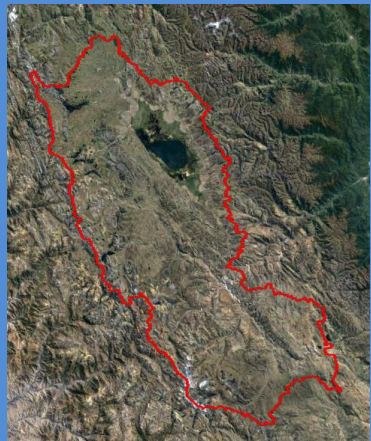
Parámetro	Unidad	Valor	
Area drenaje	Km ²	9339.0	
Caudal promedio anual	m ³ /s	86.83	
Caudal máximo	m ³ /s	415.20	
Caudal mínimo	m ³ /s	18.12	
Caudal promedio anual en años secos	m ³ /s	55.96	
Caudal promedio anual en años húmedos	m ³ /s	118.86	
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m ³ /s	87.41	
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m ³ /s	61.22	
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m ³ /s	58.39	
Caudal promedio anual en años "Niño"	m ³ /s	82.59	
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m ³ /s	96.37	
Volumen máximo disponible	MMC	3764.6	
Volumen mínimo disponible	MMC	1766.6	

Tabla 4-19 Parámetros estadísticos de la serie de caudales medios mensuales del río Mantaro

Parámetro	PARAMETROS ESTADÍSTICOS DE CAUDAL DEL RIO MANTARO												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	ANUAL
Promedio	56.1	53.2	54.4	65.2	97.7	159.8	186.4	126.7	67.2	57.4	58.5	59.3	86.8
Mediana	57.8	51.3	54.5	62.7	87.9	141.9	167.8	117.5	64.0	53.1	56.8	59.0	87.4
DS	12.0	10.9	14.4	24.8	50.5	91.3	97.4	65.0	27.3	17.5	13.6	11.4	26.8
CV	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3
máx	76.3	71.5	86.3	138.8	253.0	415.2	412.9	302.8	158.1	119.9	90.2	80.0	152.7
Min	23.7	18.1	19.2	19.1	39.7	26.5	57.1	30.5	20.3	24.7	26.0	23.1	40.5

Tabla 4-20 Comportamiento de los caudales del río Mantaro en años normales, secos y húmedos

AÑO	CAUDAL PROMEDIO EN AÑOS SECOS, NORMALES Y HUMEDOS (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	promedio
SECO	54.5	51.0	49.3	47.6	58.4	82.7	87.8	62.8	40.3	43.6	45.0	48.6	56.0
NORMAL	54.5	53.0	55.3	66.5	93.3	154.1	170.2	117.2	68.8	58.9	60.3	61.0	84.4
HUMEDO	60.1	55.5	57.8	79.6	140.6	239.5	301.0	199.5	89.8	67.9	68.3	66.7	118.9

Tabla 4-21 Caudales característicos del río Mantaro para diferentes niveles de persistencia

Persistencia	PERSISTENCIA DE CAUDAL PROMEDIO MENSUAL (m ³ /s)												
	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Anual
P - 50%	58.2	52.1	54.8	63.1	88.7	143.8	170.0	118.1	64.2	53.6	57.0	59.2	87.4
P - 75%	47.7	46.3	43.1	47.1	60.3	82.2	109.9	80.3	48.0	46.0	50.5	53.0	61.2
P - 80%	46.5	44.4	41.6	44.7	53.2	76.4	99.5	72.4	46.1	44.2	49.9	51.4	58.4
P - 90%	42.7	41.0	37.9	42.2	48.8	66.8	73.9	58.7	36.6	42.5	41.1	47.9	56.4

4.4 Análisis de periodos secos y húmedos

Se utiliza el Índice de Precipitación estandarizado-SPI para el análisis de los periodos secos y húmedos, con resultados que se sintetiza a continuación:

- **SPI 03 y 12 meses**

Según el SPI - 3 del mes de febrero y marzo (Figura 4-19 y 4-20) se han identificado los años 1968, 1980, 1990, 1991 y 1992 como periodos con sequías de moderadas a extremadamente secas en las cuencas del Mantaro, Chillón, Rímac y Lurín, y los años 1984, 1998 y 2000 como periodos de moderadamente a extremadamente húmedos, en las cuencas Chillón, Rímac y Lurín, principalmente. Además, se puede observar que en la última década (2003-2012) vienen predominando los años con condiciones normales.

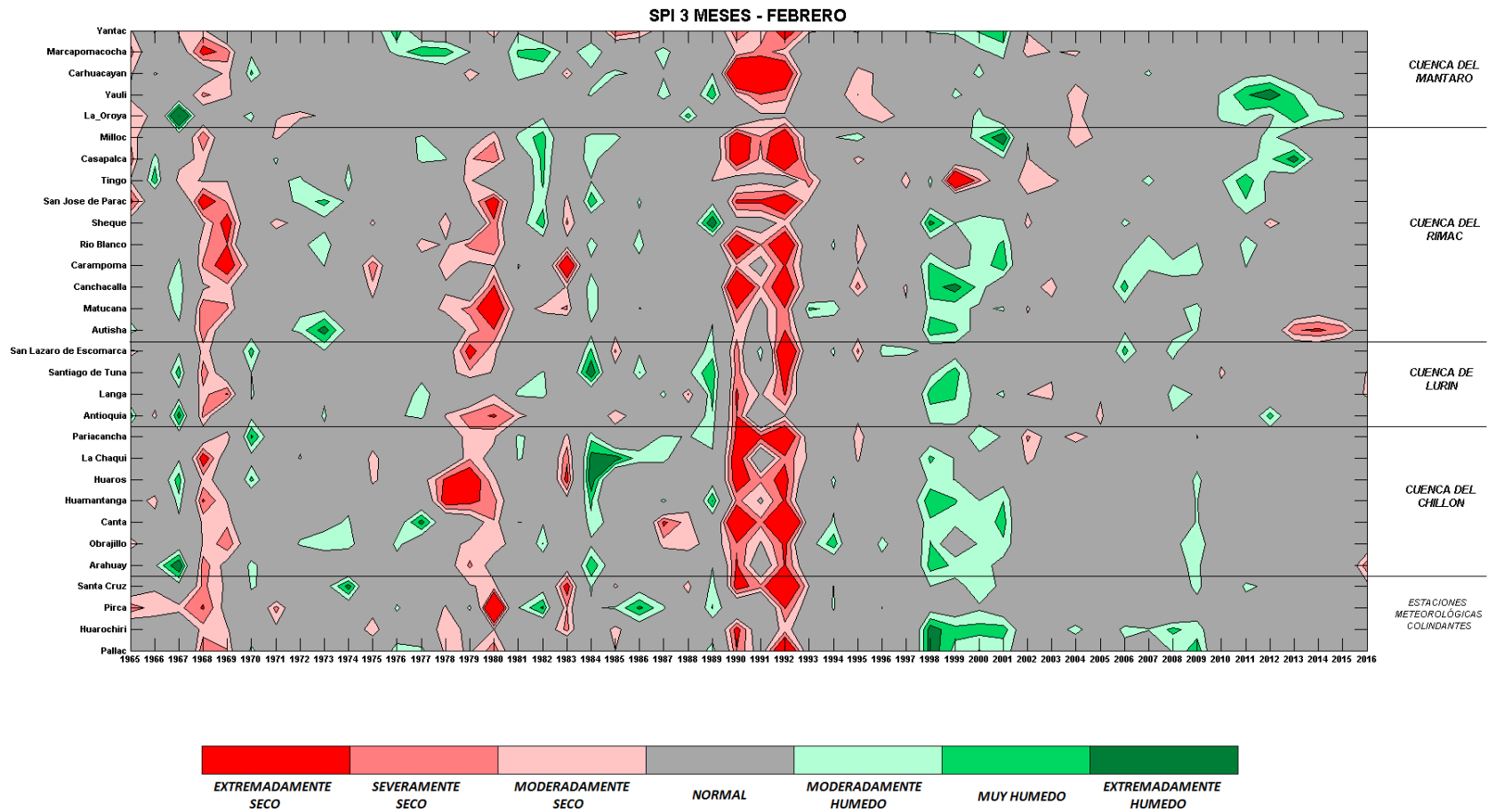


Figura 4-19 SPI 3 -Febrero de 1965 al 2016 de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las cuencas en estudio y sus alrededores

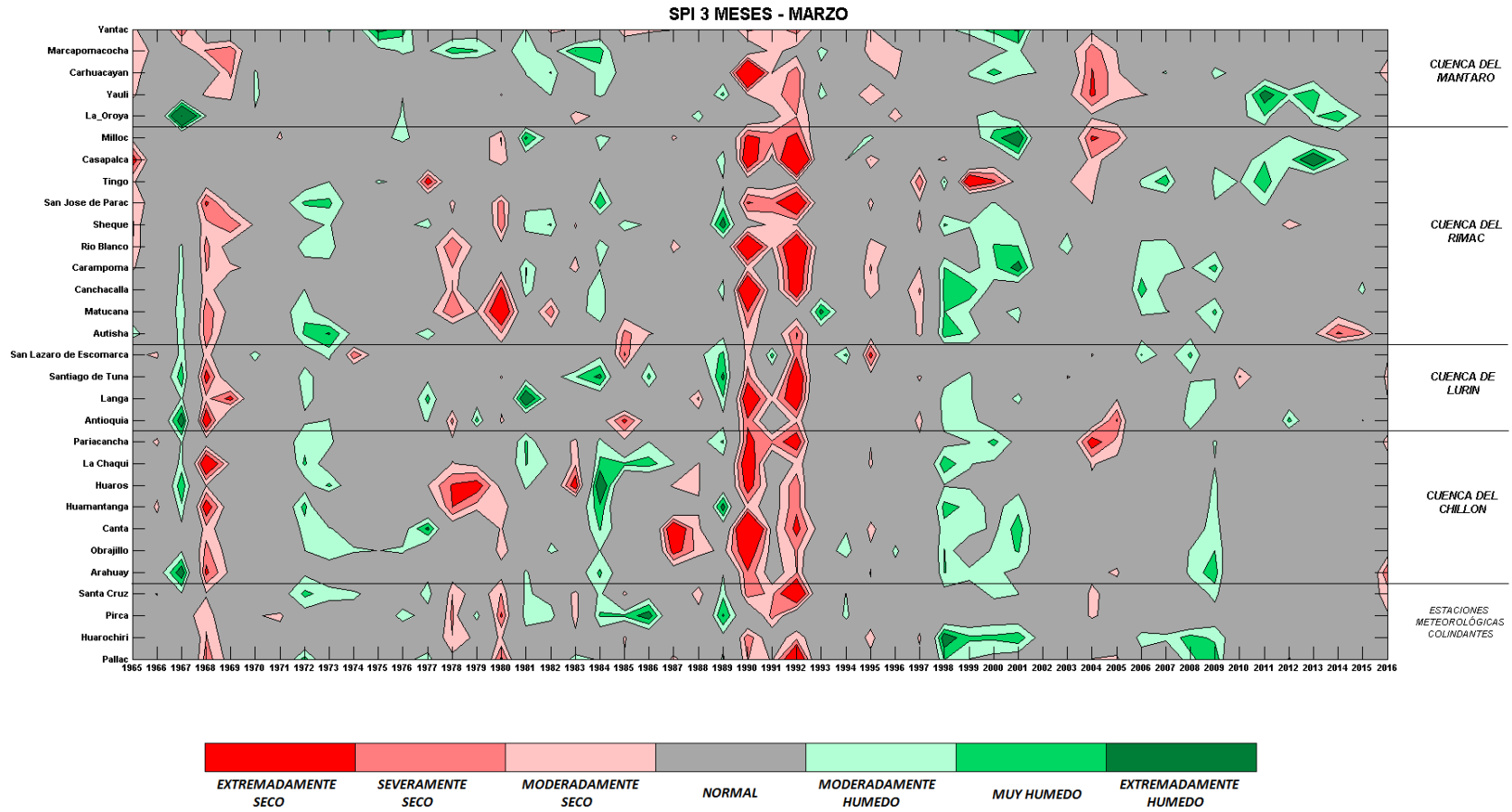


Figura 4-20 SPI 3-Marzo de 1965 al 2016 de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las cuencas en estudio y sus alrededores

- **Análisis espacial de los años secos y húmedos en las cuatro cuencas con los índices estandarizados de precipitación:**

SPI

El comportamiento espacial del SPI 3 del mes de marzo, permite diferenciar entre años secos (1992, 1968 y 1990) y húmedos (1984, 1967, 1973, 1981 y 2001), siendo el año de 1992 una sequía bastante regional ya que abarca las cuatro cuencas de estudio (Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro) alcanzando las categorías de moderado a extremadamente seco (-1.0 a menores que -2.0).

En cuanto a los años húmedos la distribución del SPI en las cuencas fue variable, alcanzando categorías de moderado a extremadamente húmedo, algunas veces solo en las partes altas (~ 4000msnm) de las cuencas y otras en las más bajas (~2000msnm).

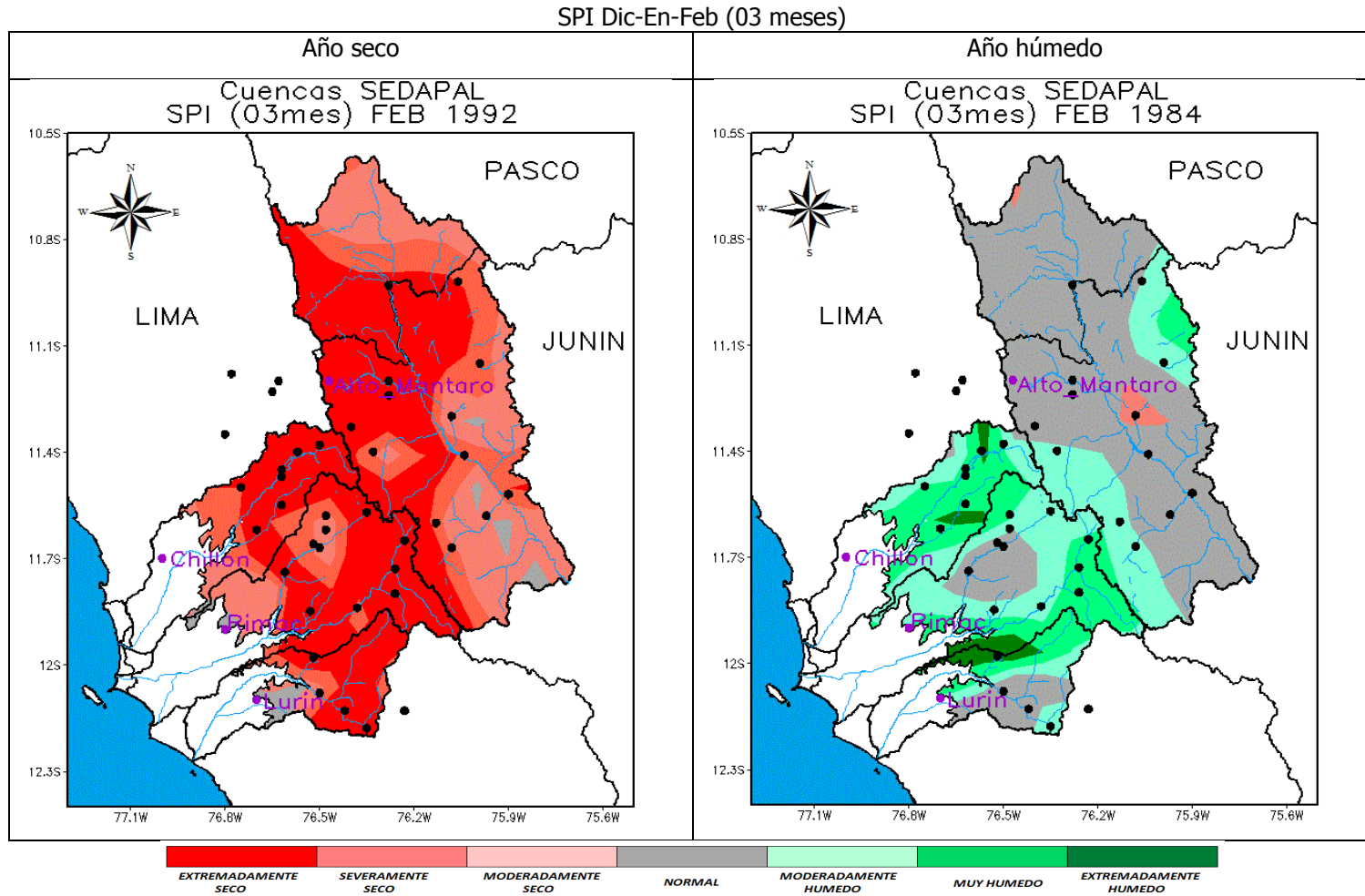


Figura 4-21 Patrón espacial del SPI-3 en feb-1992 y feb - 1984

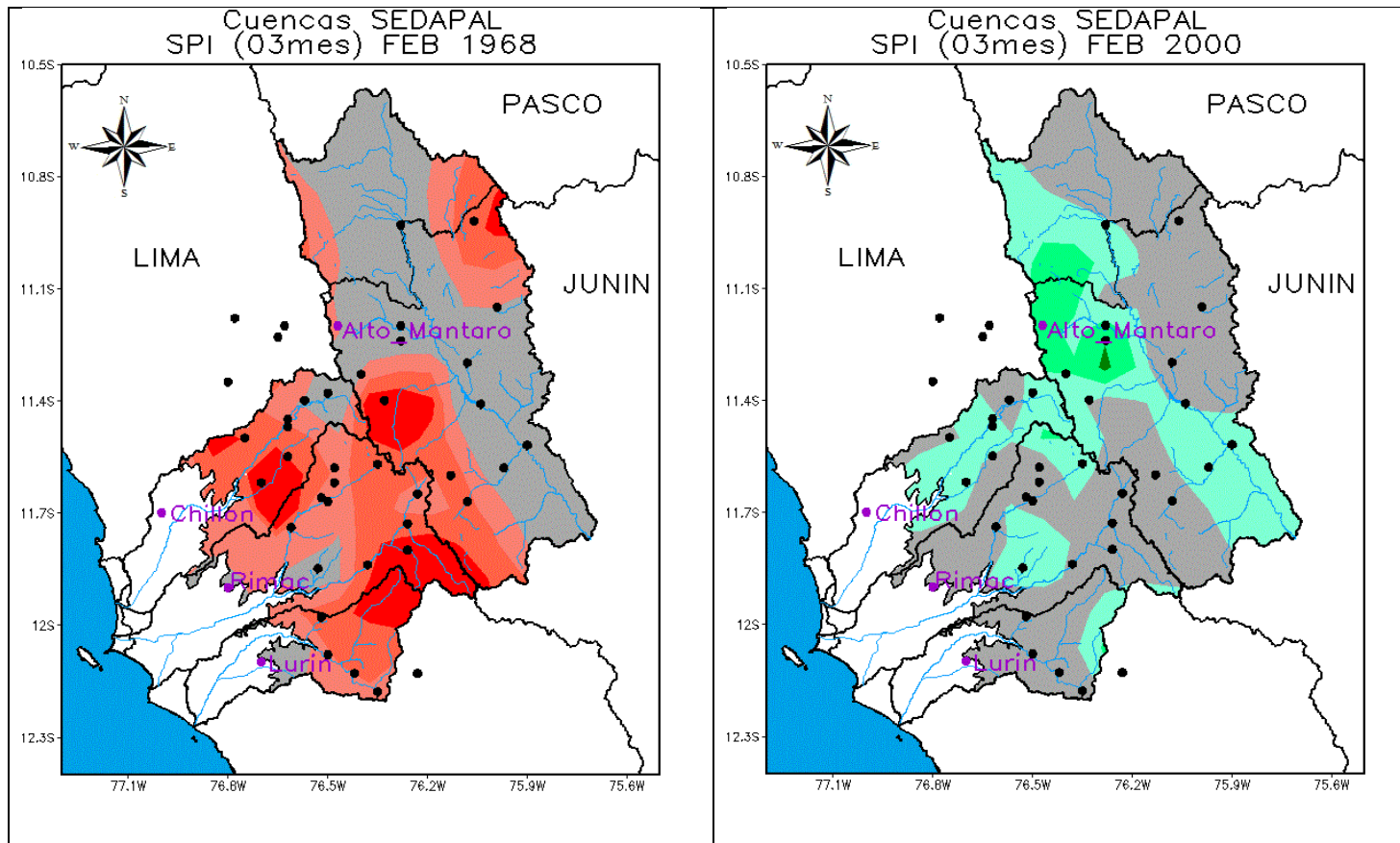


Figura 4-22 Patrón espacial del SPI-3 feb-1968 y feb-2000

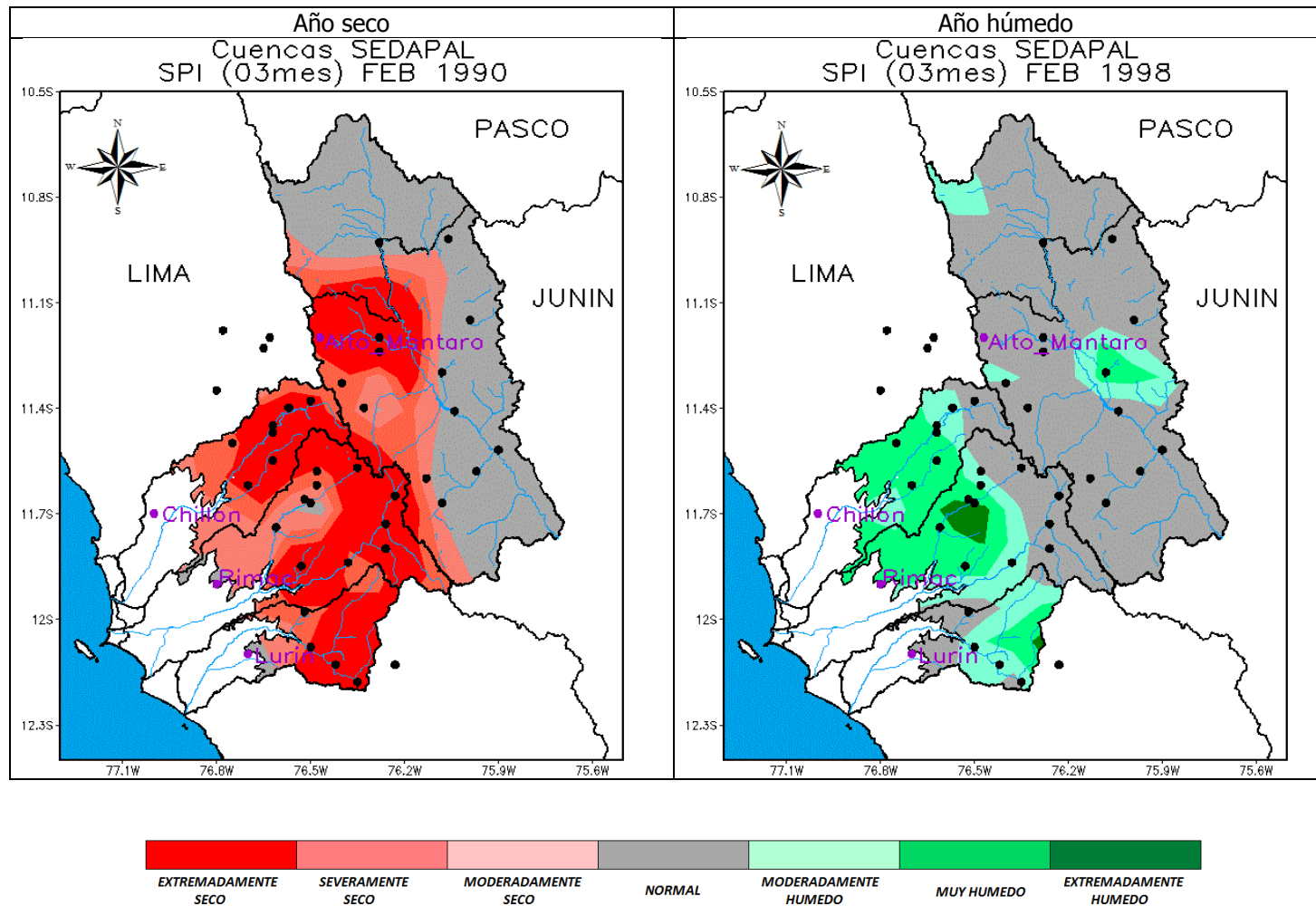


Figura 4-23 Patrón espacial del SPI-3 Feb-1990 y Feb-1998

SPI Ene-Feb-Mar (03 meses)

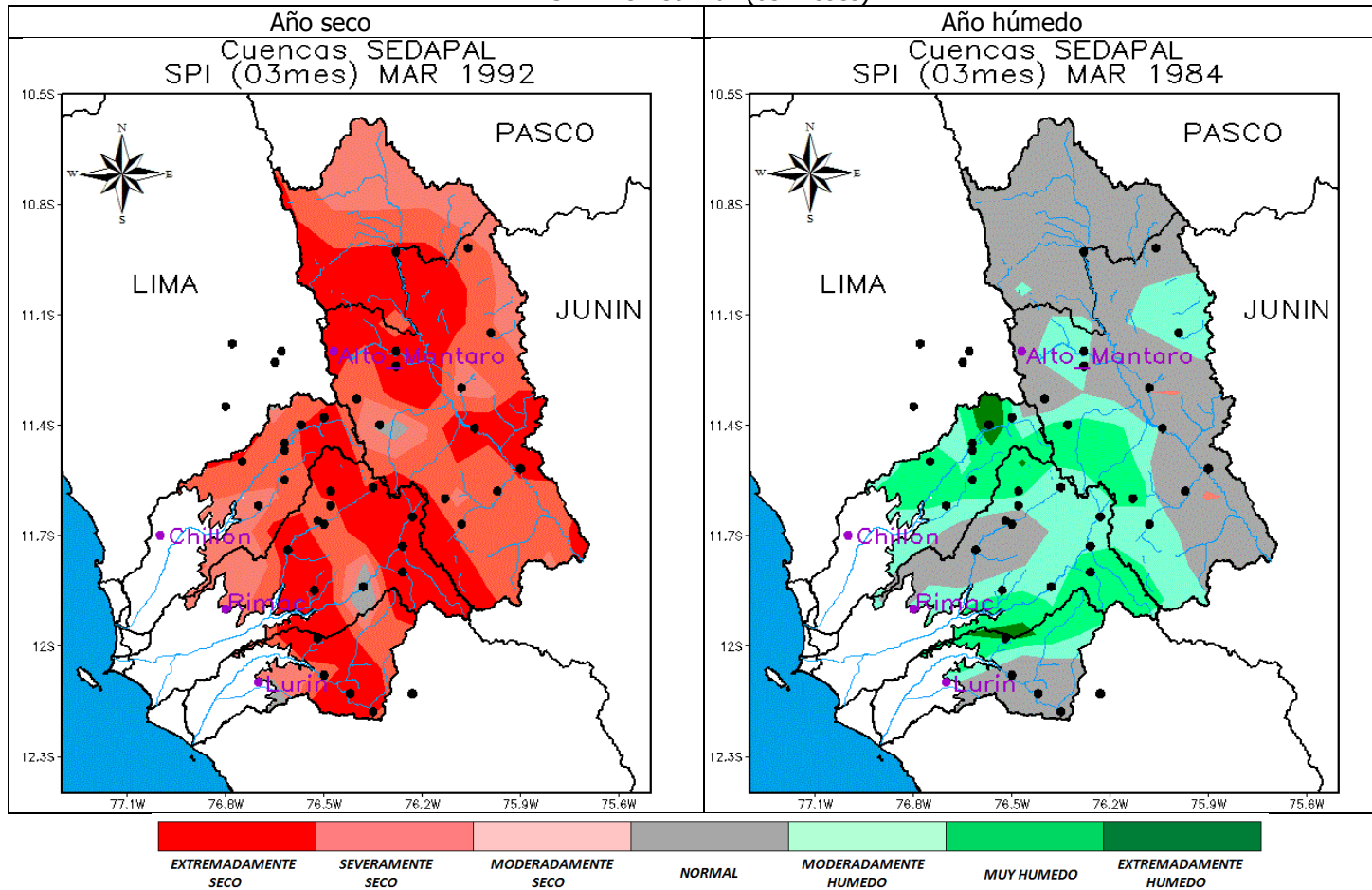


Figura 4-24 Patrón espacial del SPI-3 Mar-1992 y Mar-1984

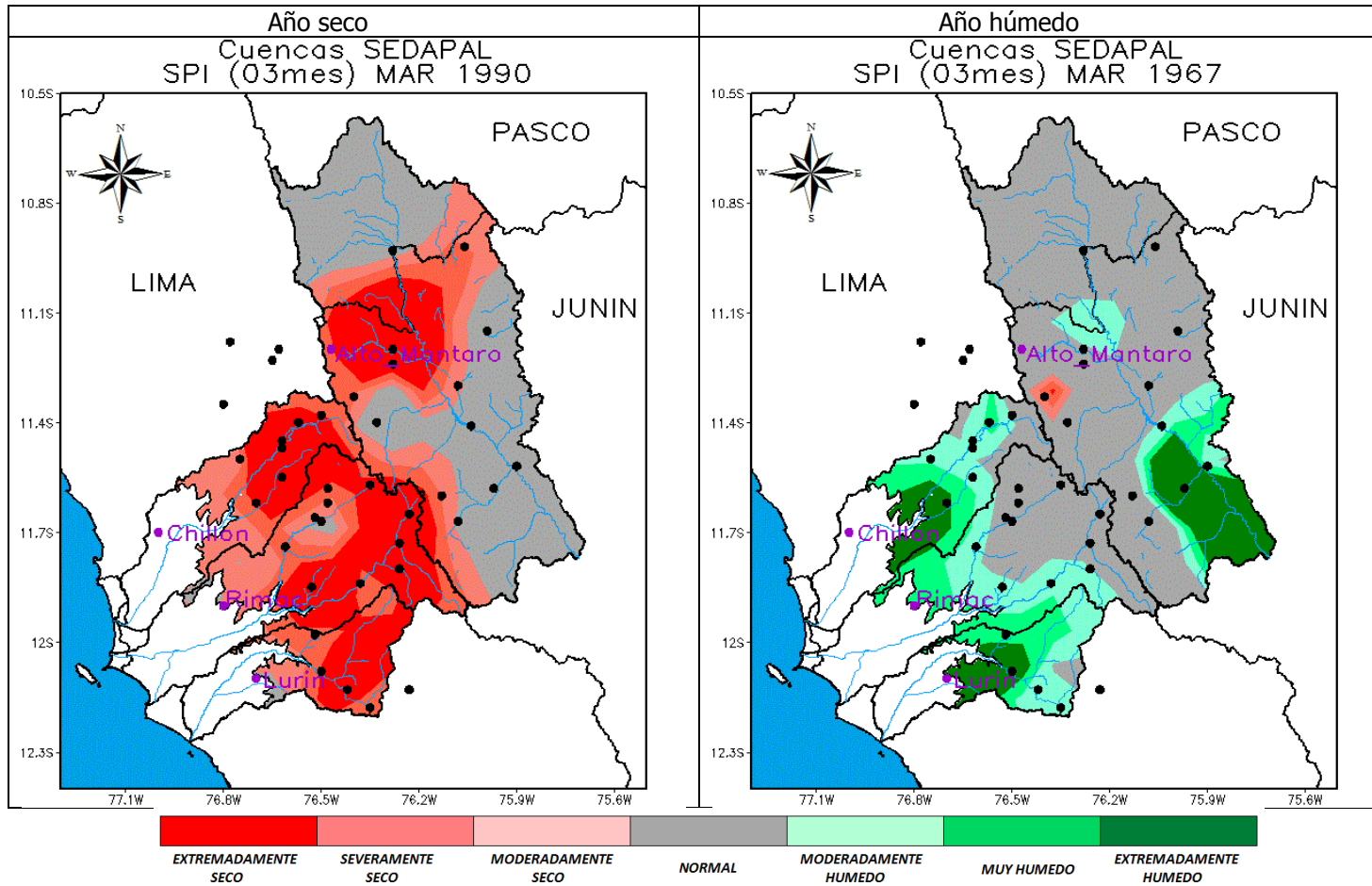


Figura 4-25 Patrón espacial del SPI-3 mar 1990 y mar-1967

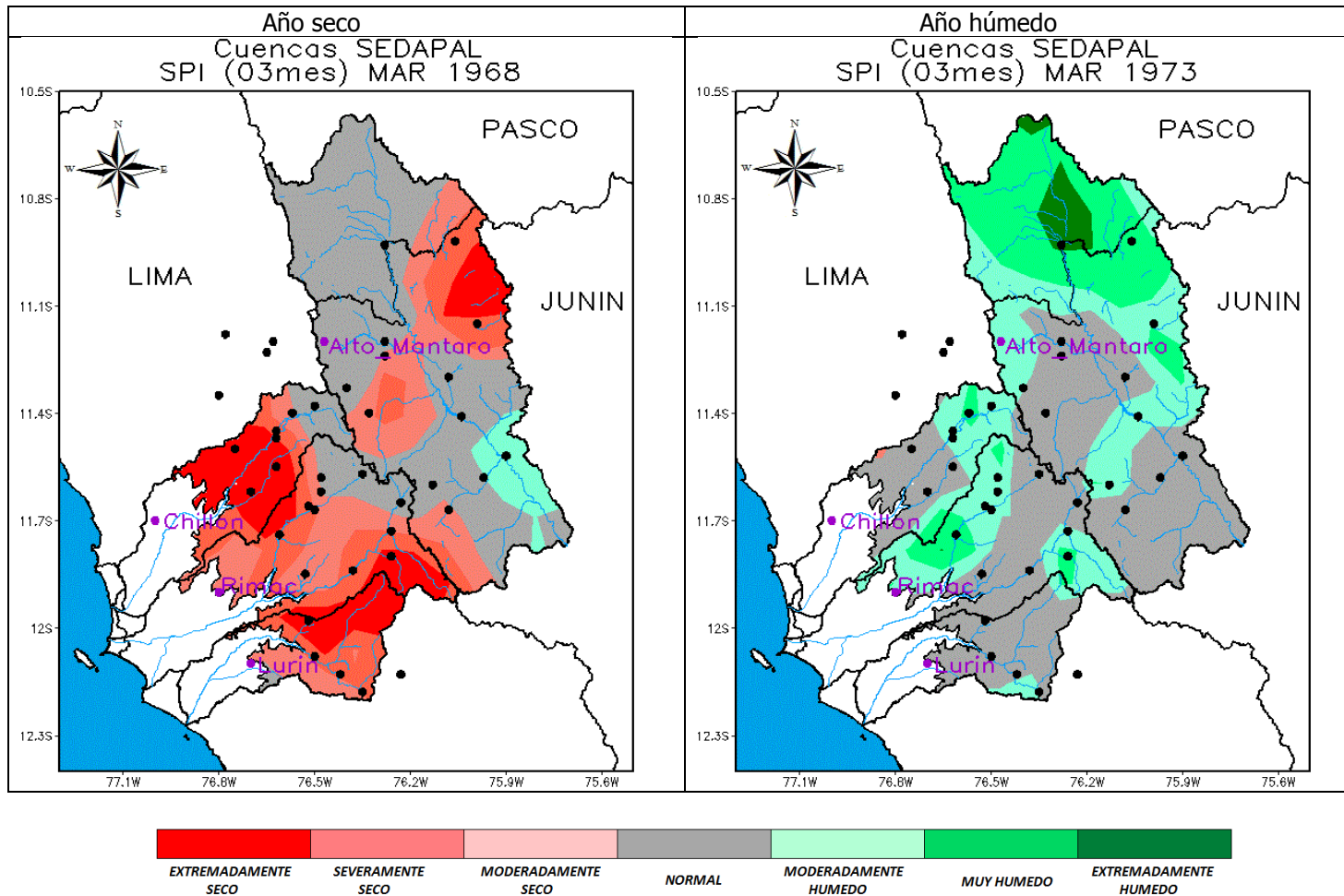


Figura 4-26 Patrón espacial del SPI-3 mar 1968 y mar-1973

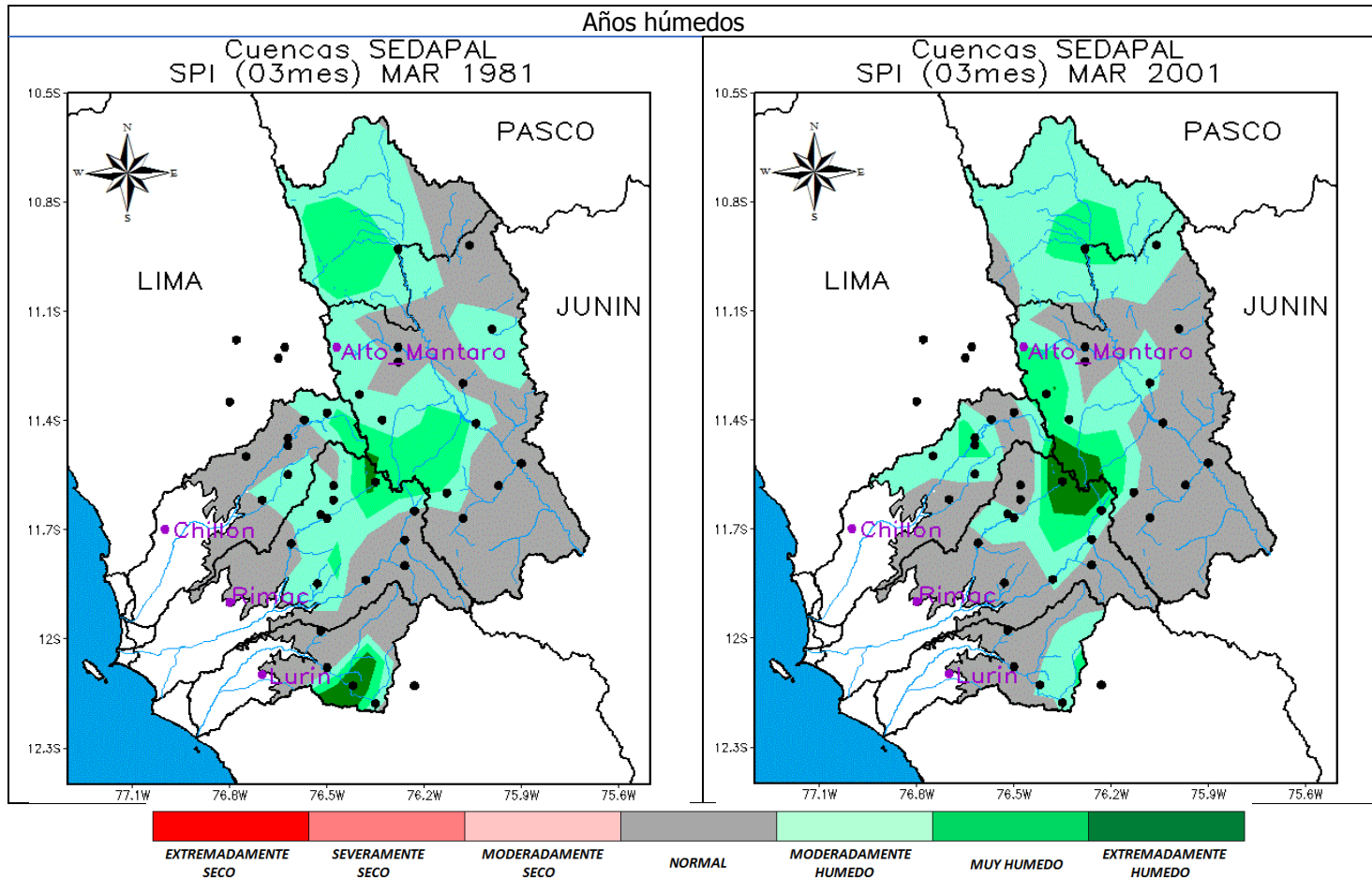


Figura 4-27 Patrón espacial del SPI-3 mar 1981 y mar-2001

5 Capítulo V: La oferta hídrica superficial en el sistema de cuencas de los ríos Chillón, Rimac, Lurín y Alto Mantaro

En esta parte del estudio que comprende el capítulo V se describe los resultados obtenidos de la caracterización hidrológica a nivel de subcuencas y microcuencas vía modelamiento matemático para la generación de los caudales medios mensuales en los puntos de cierre de las diferentes unidades hidrográficas evaluadas. Cabe señalar que se ha utilizado diferentes modelos lluvia-escorrentía como son GR2m, SMAP, Watbal con los cuales se ha realizado la calibración en los puntos de control hidrométrico de Chosica-R2, Puente Magdalena, Antapucro, correspondientes a las cuencas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín. En la zona del Mantaro se ha calibrado los modelos en el punto de control de Puente Stuart (río Mantaro) y San Juan y Pachacayo ubicadas en las subcuencas del mismo nombre. Se utiliza el criterio de regiones hidrológicas homogéneas para hacer la transferencia de los parámetros del modelo hidrológico calibrado hacia subcuencas no aforadas a fin de obtener la generación de series continuas de caudales. El mismo criterio se generaliza para la determinación de los caudales a nivel de microcuencas.

Finalmente los caudales son caracterizados para diferentes condiciones hidrológicas, como años secos, años, húmedos y normales; así como años Niño y Niña. En el Anexo del capítulo V se ha incluido la información hidrológica de síntesis por cada subcuenca trabajada en fichas hidrológicas.

5.1 La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Chillón

La oferta hídrica promedio anual en la cuenca del río Chillón, ha sido calculada en 7.0 m³/s, en base a la información hidrológica de la estación hidrométrica de Puente Magdalena, ubicada en la cabecera de valle del río Chillón. Hasta este punto de control de la cuenca se tiene una superficie colectora de la escorrentía superficial de 1253.5 Km². En época de avenidas el caudal alcanza valores máximos de 84.9 m³/s y en época de estiaje, el caudal mínimo baja hasta 0.40 m³/s. En la figura 5-1 se presenta los resultados de la caracterización de la oferta hídrica anual por subcuenca.

Se ha determinado que las subcuencas del Alto Chillón y Quisquichaca son las de mayor oferta hídrica con un caudal promedio anual de 5.1 m³/s y 1.82 m³/s, respectivamente. Otras subcuencas del sistema hídrico del río Chillón presentan una disponibilidad hídrica más modesta con un caudal promedio anual comprendido entre 0.12 m³/s y 0.64 m³/s, según detalle que se presenta en la Tabla de la Figura 5-1.

Subcuenca	Area (Km ²)	Pp_anual (mm)	Qgenerado (m ³ /s)	Caudal específico (lt/s/km ²)	Volumen almacenamiento (MMC)
Alto Chillón	777.10	507.00	5.05	6.50	159.31
Gangay	148.52	39.68	0.48	3.22	15.10
Medio Alto Chillón	165.34	89.18	0.47	2.83	14.77
Medio Bajo Chillón	21.84	30.06	0.41	18.78	12.94
Medio Chillón	42.75	45.09	0.12	2.77	3.73
Quisquichaca	392.77	389.77	1.82	4.64	57.43
Río Seco	168.50	38.78	0.51	3.01	15.98
Socos	198.56	124.25	0.64	3.24	20.30

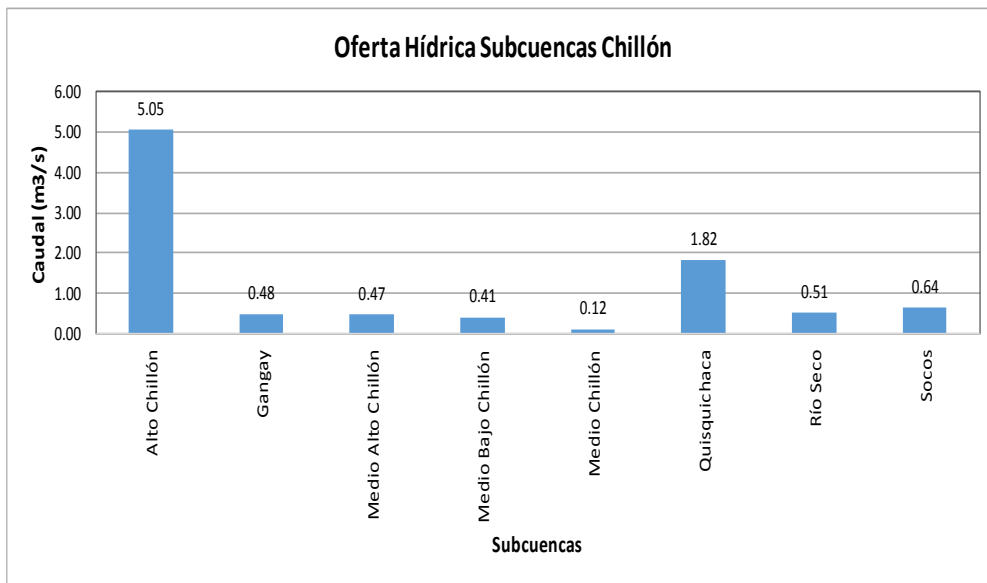


Figura 5-1 Caudal promedio anual por subcuencas

Fuente: Elaboración propia

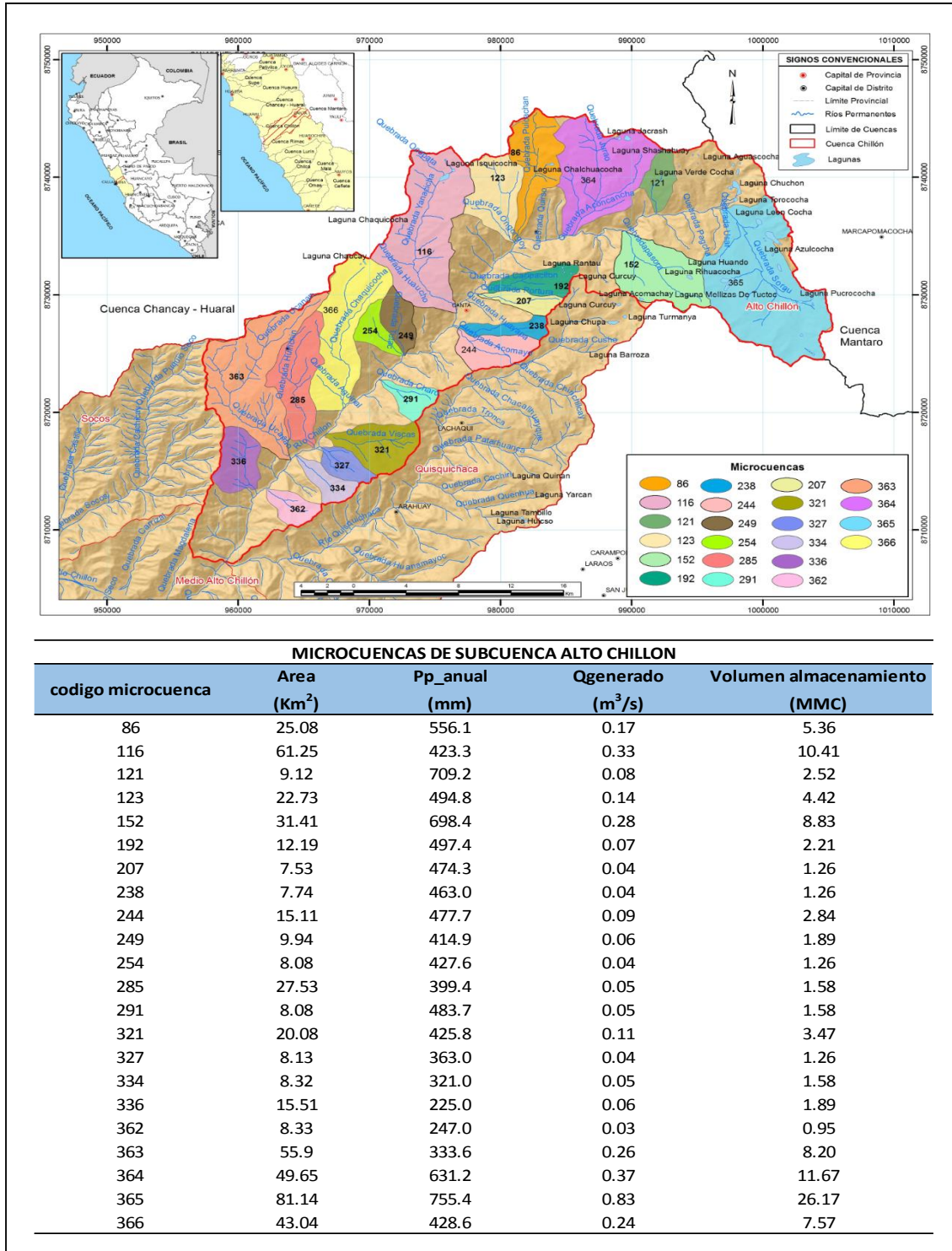


Figura 5-2 Ubicación y Caracterización anual de los caudales de microcuencas del Sc-Alto Chillón

Fuente: Elaboración propia

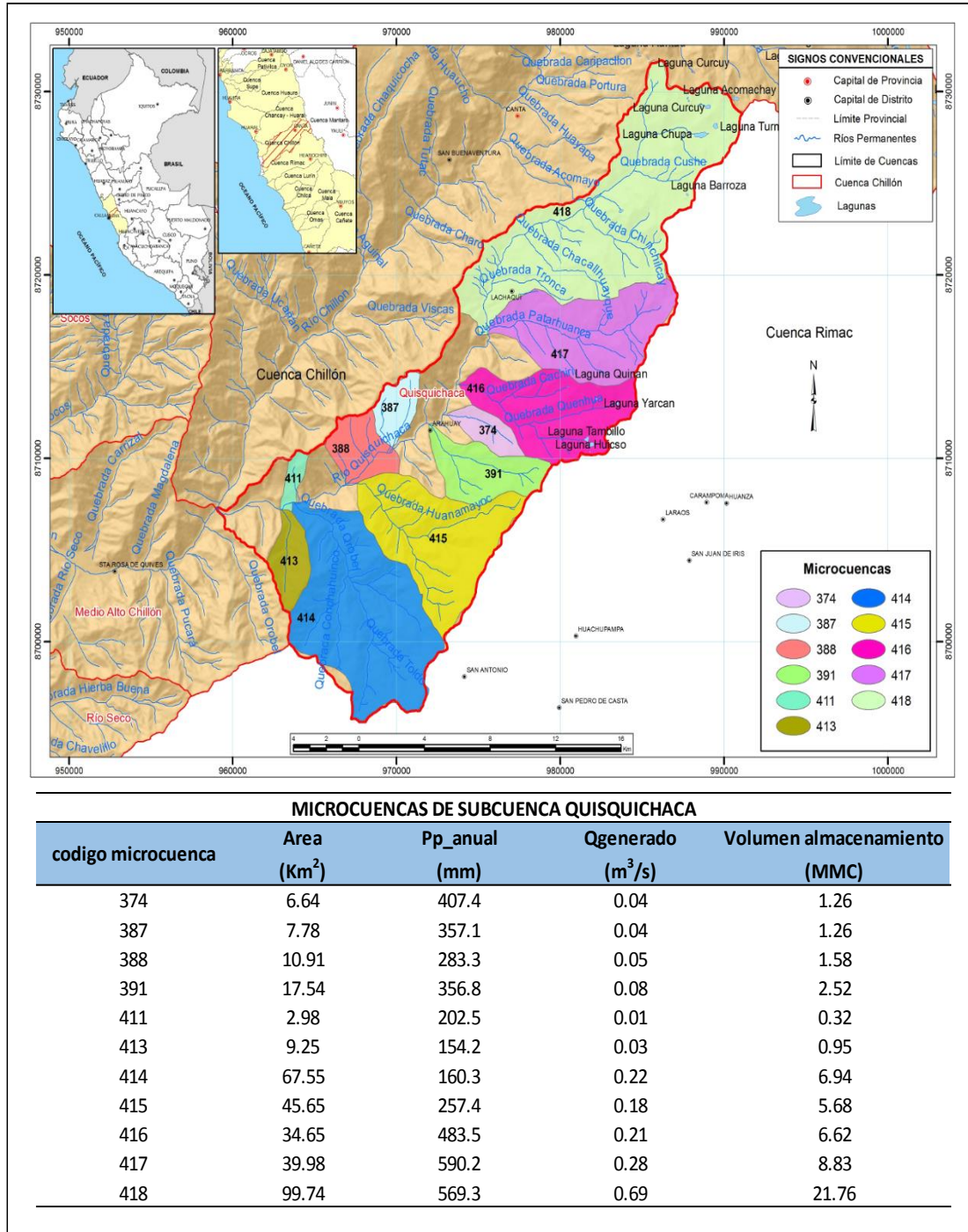


Figura 5-3 Ubicación y Caracterización anual de los caudales en microcuencas

Fuente: Elaboración propia

5.2 La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Rímac

La oferta hídrica promedio anual en la cuenca del río Rímac, ha sido calculada en 27.0 m³/s, en base a la información hidrológica de la estación hidrométrica de Chosica R-2. Hasta este punto de control de la cuenca se ha considerado como la cuenca de recepción, la cual tiene una superficie colectora de la escorrentía superficial de 2274.0 Km². En época de avenidas el caudal alcanza valores máximos diarios

promedio de 62.0 m³/s y en época de estiaje, el caudal mínimo baja hasta 12.0 m³/s. En épocas muy húmedas los caudales máximos instantáneos superan los 200.0 m³/s. En la Figura 5-4 se presenta la caracterización de la oferta hídrica anual por subcuenca.

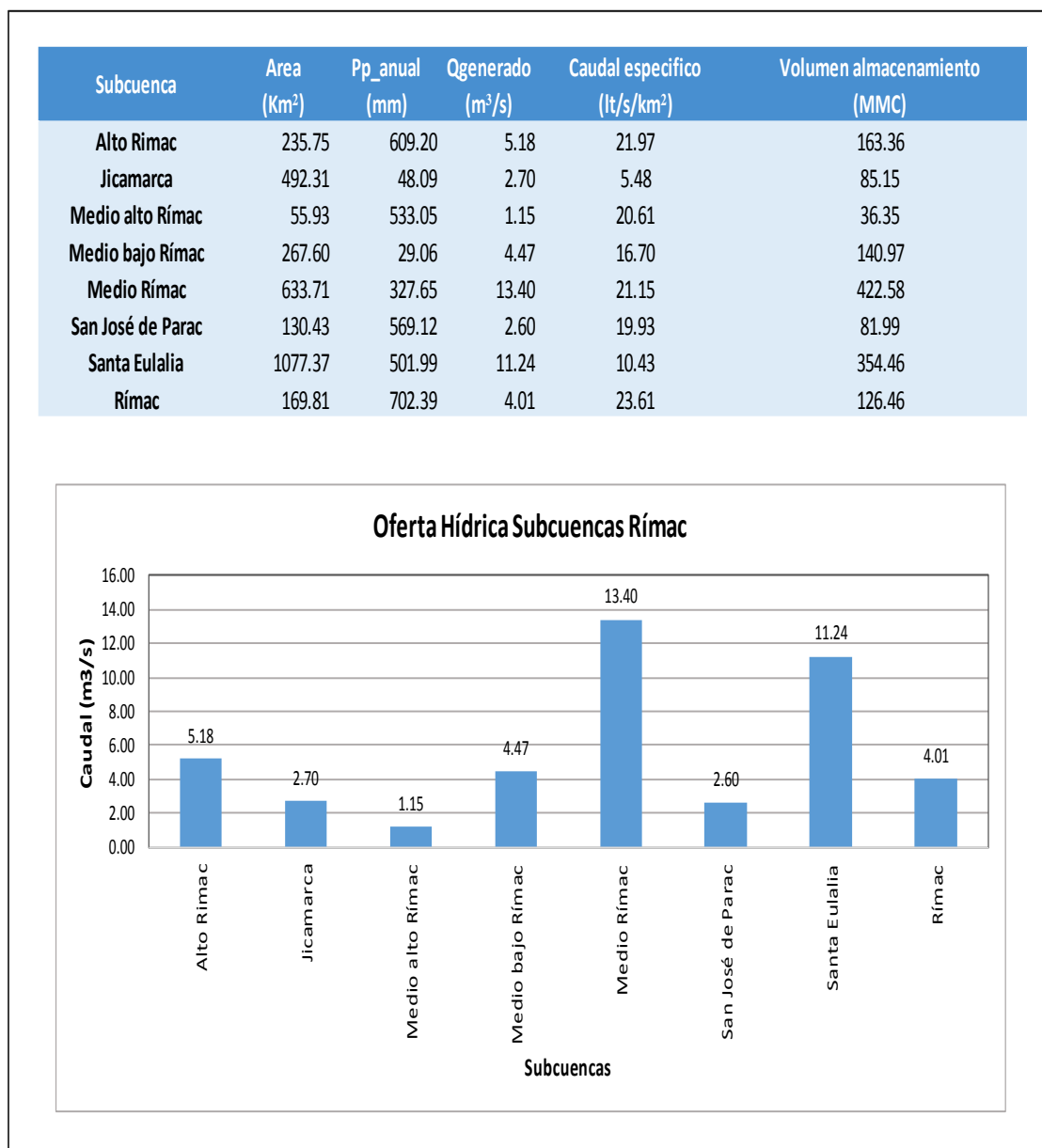


Figura 5-4 Caudal promedio anual por subcuencas

Fuente: Elaboración propia

Se ha determinado que las subcuencas del Medio Rímac y Santa Eulalia son las de mayor oferta hídrica con un caudal promedio anual de 13.4 m³/s y 11.24 m³/s, respectivamente. Otras subcuencas del sistema hídrico del río Rímac presentan una disponibilidad hídrica más modesta con un caudal promedio anual comprendido entre 1.15 m³/s y 5.18 m³/s, según detalle que se presenta en la Tabla de la Figura 5-4.

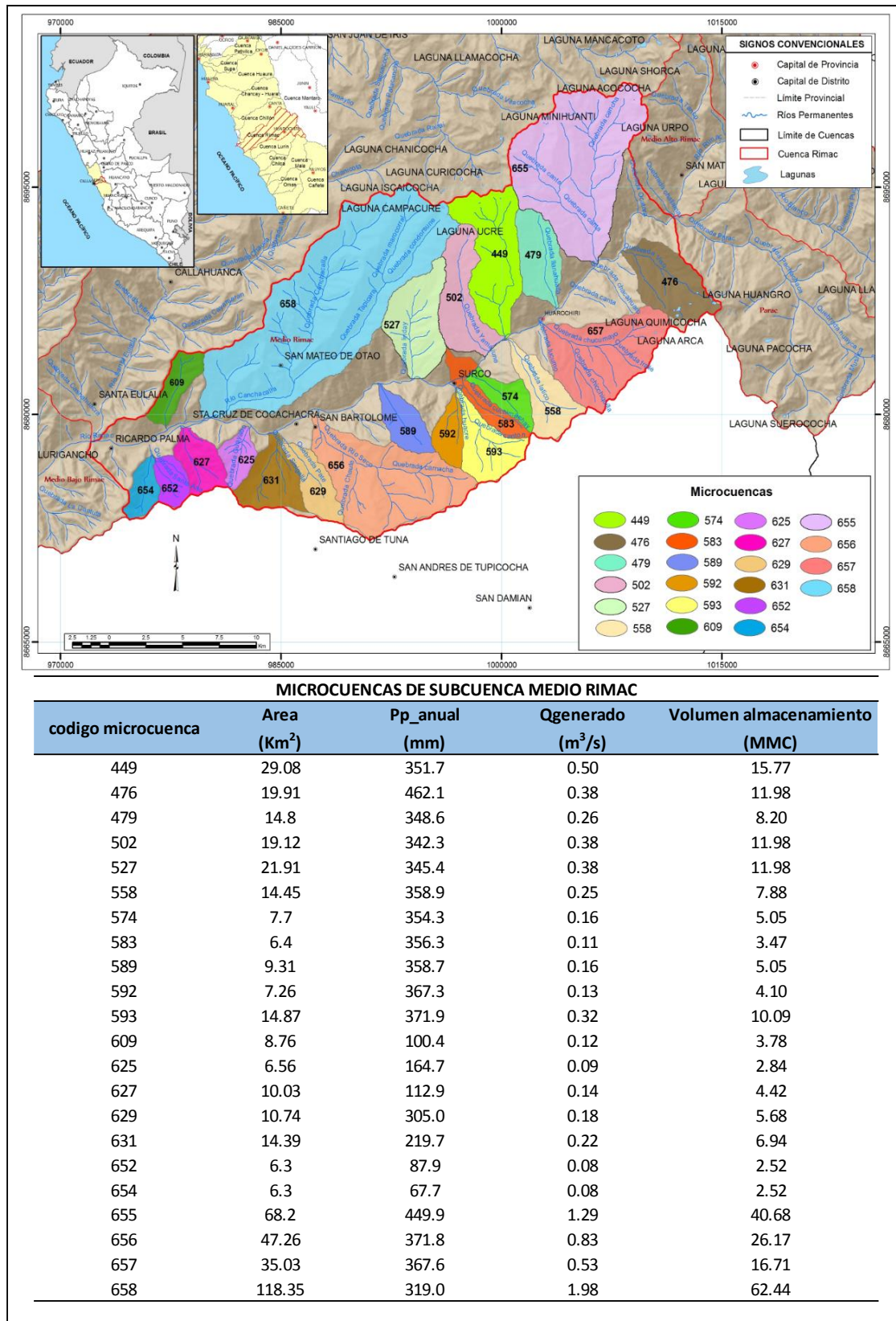


Figura 5-5 Ubicación y caracterización anual de los caudales de microcuencas del Medio Rímac.

Fuente: Elaboración propia

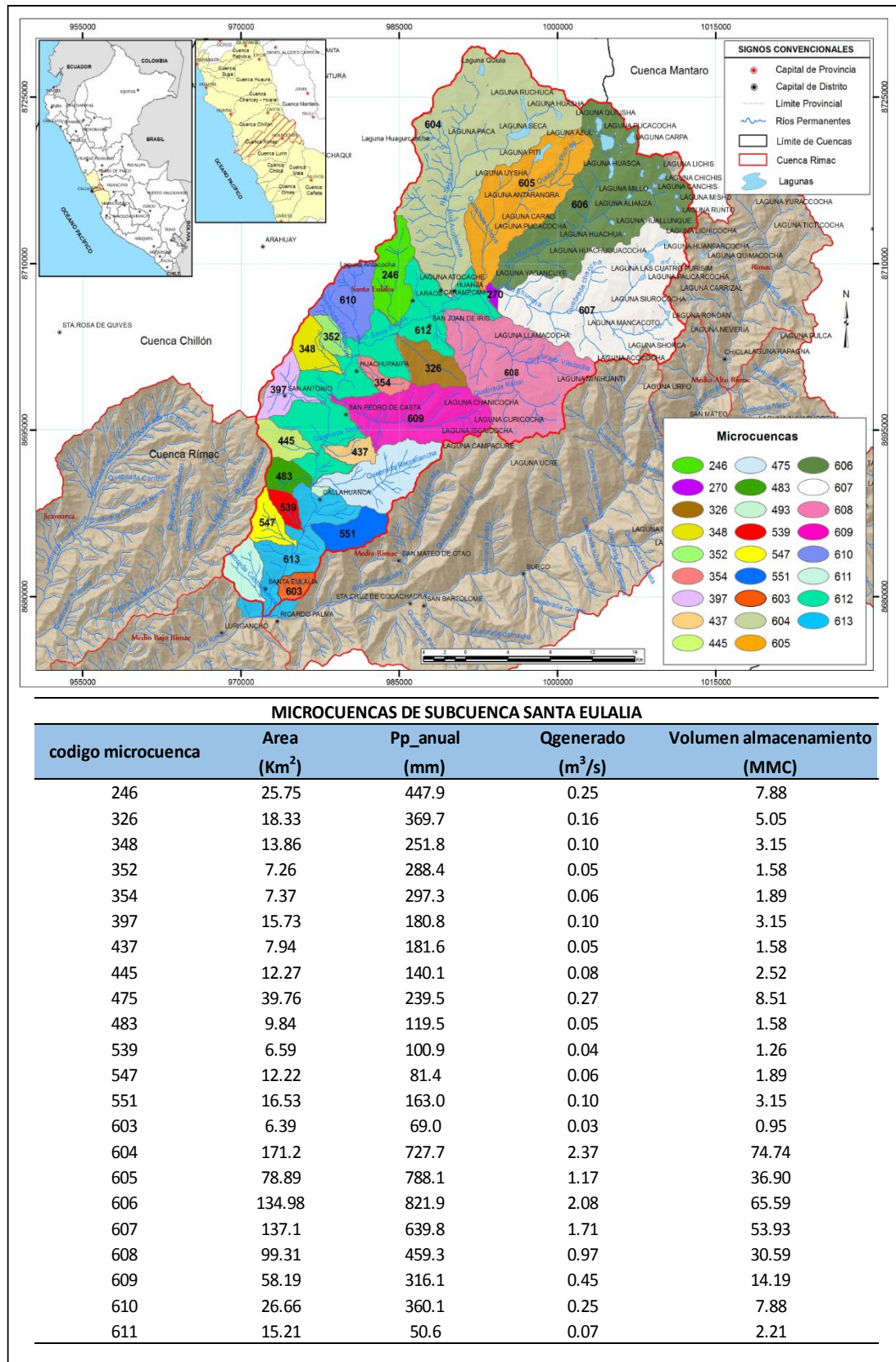


Figura 5-6 Ubicación y caracterización anual de los caudales de microcuencas

Fuente: Elaboración propia

5.3 La oferta hídrica superficial en la cuenca del río Lurín

La oferta hídrica promedio anual en la cuenca del río Lurín, ha sido calculada en 3.5 m³/s, en base a la información hidrológica de la estación hidrométrica de Antapucro. Hasta este punto de control de la cuenca se ha considerado como la cuenca de recepción, la cual tiene una superficie colectora de la escorrentía superficial de 1019.4 Km². En época de avenidas el caudal alcanza valores máximos de 26.8 m³/s y en época de estiaje, el caudal mínimo baja hasta 1.30 m³/s. En la Figura 5-7 se presenta la caracterización de la oferta hídrica anual por subcuencas.

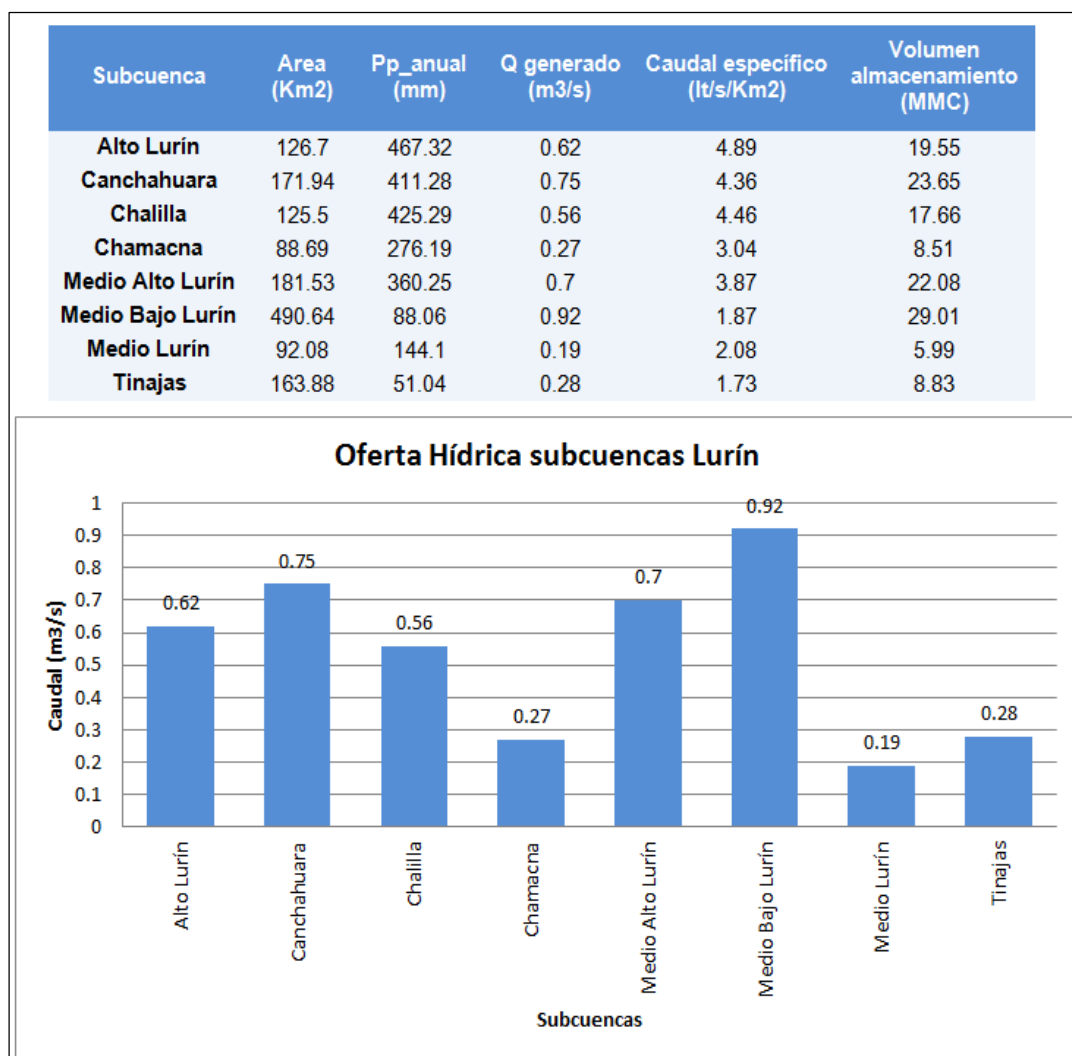


Figura 5-7 Caudal promedio anual por subcuencas

Fuente: Elaboración propia

Se ha determinado que las subcuencas de mayor oferta hídrica anual son Canchahuara (donde se encuentran ubicadas importantes lagunas que almacenan importantes volúmenes de agua en época de avenidas) y Medio bajo Lurín con un caudal promedio anual de 0.75 m³/s y 0.92 m³/s, respectivamente. Otras subcuencas del sistema hídrico del río Lurín presentan una disponibilidad hídrica más modesta con un caudal promedio anual comprendido entre 0.19 m³/s y 0.70 m³/s, según el detalle que se presenta en la Tabla de la Figura 5-7.

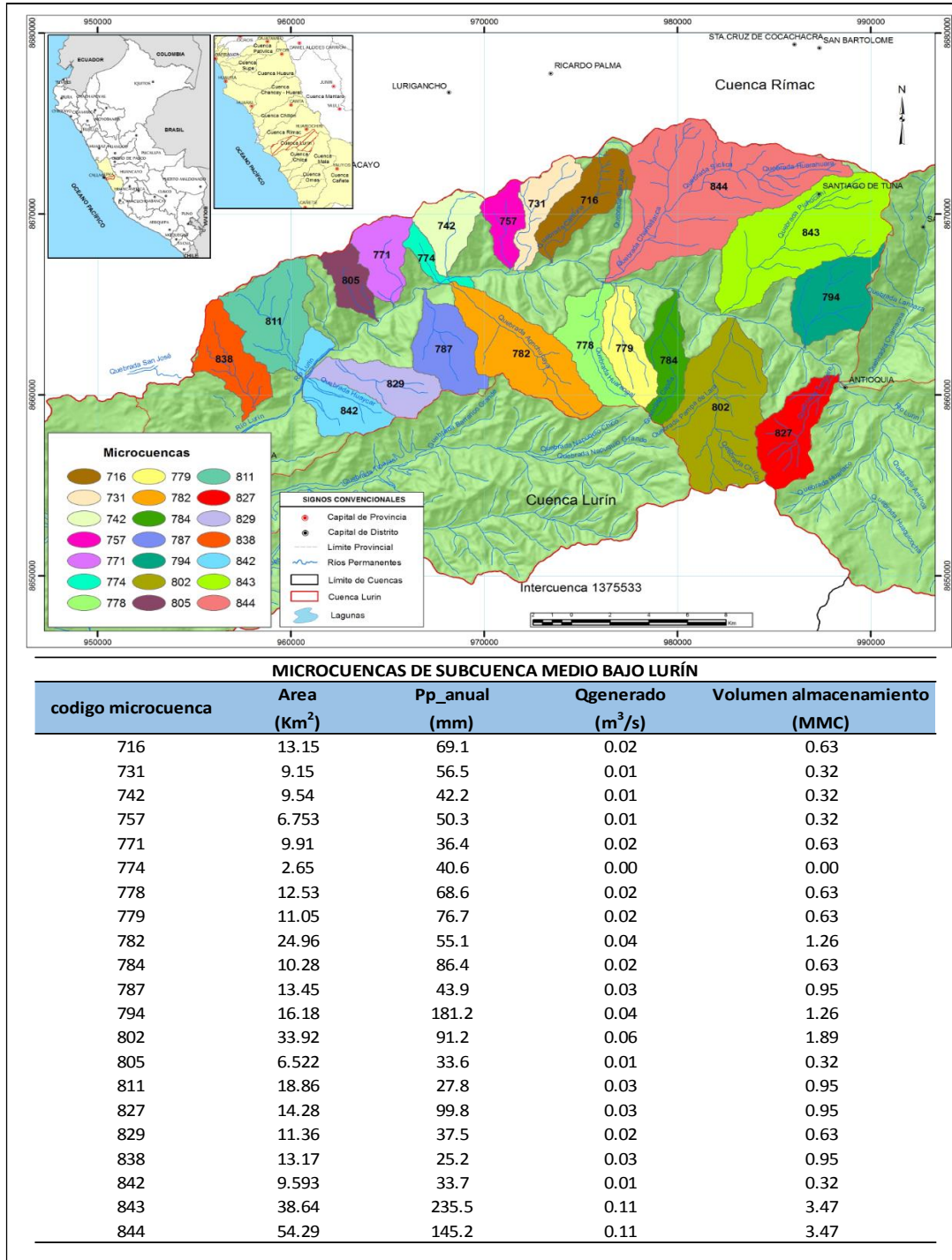


Figura 5-8 Ubicación y Caracterización anual de los caudales en microcuencas
Fuente: Elaboración propia

5.4 La oferta hídrica superficial en la cuenca del Alto Mantaro

Se ha determinado que las subcuencas 499695 y Junín son las de mayor oferta hídrica con un caudal promedio anual de 25.18 m³/s y 21.88 m³/s, respectivamente, en ambas subcuencas se encuentran ubicadas importantes lagunas que almacenan importantes volúmenes de agua en época de avenidas. Otras subcuencas del sistema hídrico del Alto Mantaro presentan una disponibilidad hídrica más

modesta con un caudal promedio anual comprendido entre 9.02 m³/s y 14.21 m³/s, según el detalle que se presenta en la Tabla de la Figura 5-9.

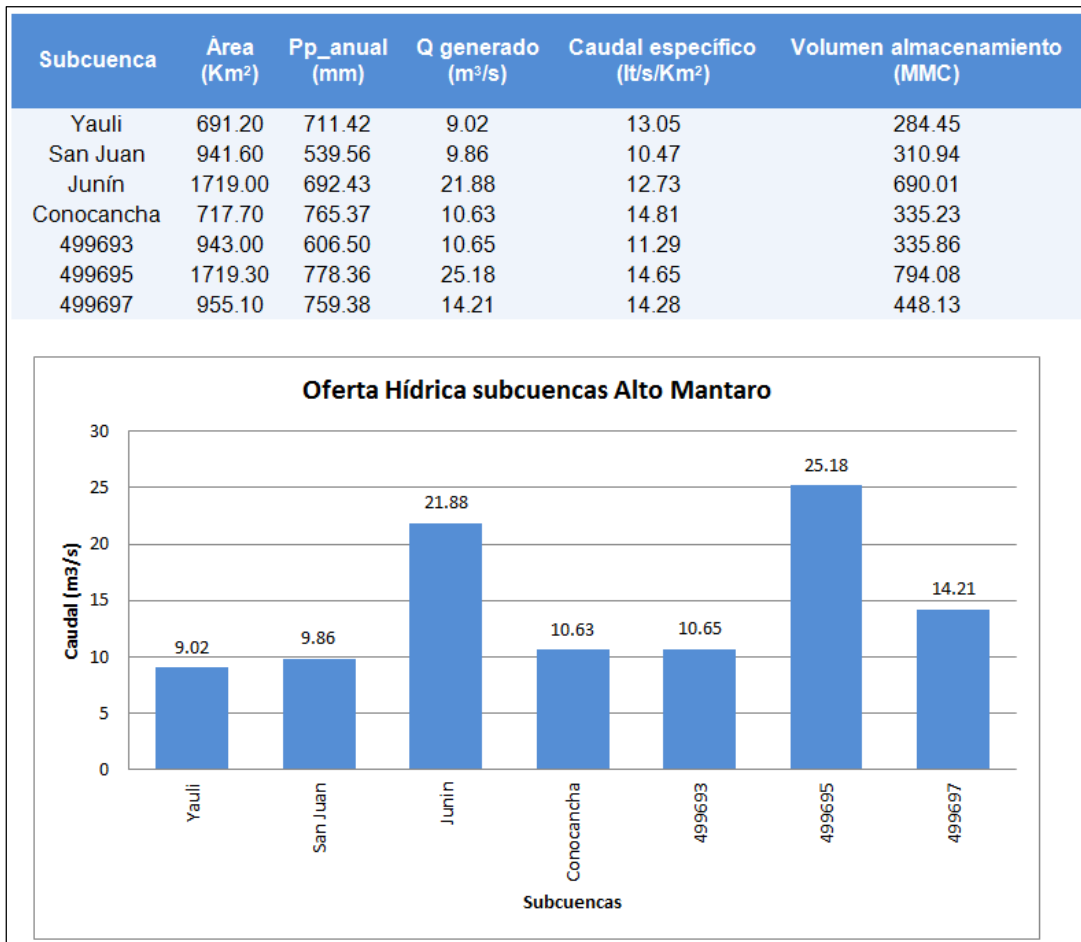


Figura 5-9 Caudal promedio anual por subcuencas

Fuente: Elaboración propia

6 Capítulo VI: Escenarios de cambio climático para el sistema de cuencas de los ríos Chillón-Rímac-Lurín y Alto Mantaro considerando, las salidas de los modelos climáticos globales

El desarrollo del presente capítulo tiene como objetivo principal exponer las bases conceptuales de los modelos globales de proyección climática, así como los distintos escenarios de cambio climático. Ello implica conocer el estado actual y las causas principales que han llevado al sistema climático a cambios en sus componentes, lo que permitirá mostrar un panorama general del estado del arte de los modelos climáticos y cómo estos simulan el clima para las cuencas de interés de Sedapal, teniendo en cuenta en el proceso de análisis solo siete del conjunto de 36 modelos del CMIP5, seleccionados por mejor representatividad climatológica del país.

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó información de un total de 36 modelos globales acoplados pertenecientes al CMIP5 de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, para un periodo histórico comprendido entre los años 1981-2005 y un periodo de proyección del 2016 al 2045 con escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5. Los detalles acerca de cada uno de estos modelos se muestran en Tabla 6-1.

Todos los modelos globales de gruesa resolución espacial del CMIP5 analizados en este estudio, proyectan cambios positivos de la temperatura máxima y temperatura mínima, es decir aumentos que fluctúan entre +0.8°C y 2°C para el período 2016-2045, respecto a línea base climática 1981-2005. Los valores de calentamientos más intensos se muestran en la estación de invierno (JJA) de 1°C a 2°C, principalmente en las cuencas medias y altas.

Respecto a la precipitación, los resultados de los modelos globales muestran mayor incertidumbre en su variabilidad espacial y temporal; sin embargo, sugieren un débil acuerdo en proyectar el ligero incremento de las precipitaciones en las cuencas medias y altas para la estación de verano (DEF), las épocas de avenida y estiaje. Estos cambios se proyectan hasta de 20%, que caen dentro de su variabilidad normal actual siendo esta de $\pm 15\%$.

Tabla 6-1 Datos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de escala global provenientes de modelos climáticos pertenecientes al CMIP5 en sus experimentos historial 1981-2005, escenarios de emisión de GEI RCP4.5 y RCP8.5 período 2016-2045 y de reanálisis Era-Interim para las temperaturas y CRU para precipitación

	MODELOS	PAIS	CENTRO O GRUPO DE MODELIZACIÓN	RESOLUCIÓN ATMOSFERICA	
Modelos CMIP5 del IPCC	1	ACCESS1-0	Australia	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	192 x 145 N96
	2	bcc-csm1-1-m	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	T42L26
	3	bcc-csm1-1	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	T106
	4	BNU-ESM	China	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	T42
	5	CanESM2	Canadá	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	T63 espectral
	6	CCSM4	EE.UU	National Centre for Atmospheric Research	0.9x1.25 f09
	7	CESM1-BGC	EE.UU	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	0.9x1.25 f09
	8	CESM1-CAM5	EE.UU	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	0.9x1.25 f09
	9	CMCC-CM	Italia	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	0.75°x0.75° (T159)
	10	CMCC-CMS	Italia	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	1.875°x1.875°(T63)
	11	CNRM-CM5	Francia	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	TL127
	12	CSIRO-Mk3-6-0	Australia	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1.875x1.875 (espectral T63)
	13	EC-EARTH	Europa	EC-EARTH consortium	1.125° de longitud. Grilla gaussiana T159 L62
	14	FGOALS-g2	China	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University	2.8125°x2.8125°
	15	FIO-ESM	China	The First Institute of Oceanography, SOA, China	T42
	16	GFDL-CM3	EE.UU	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	200 km C48L48
	17	GFDL-ESM2G	EE.UU	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2.5°x2° M45L24
	18	GFDL-ESM2M	EE.UU	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2.5°x2° M45L25
	19	GISS-E2-H-CC	EE.UU	NASA Goddard Institute for Space Studies	1.0°x1.0°
	20	GISS-E2-H	EE.UU	NASA Goddard Institute for Space Studies	2.5°x2.0°
	21	GISS-E2-R-CC	EE.UU	NASA Goddard Institute for Space Studies	1.0°x1.0°
	22	GISS-E2-R	EE.UU	NASA Goddard Institute for Space Studies	2.5°x2.0°
	23	HadGEM2-AO	UK/Corea	Met Office Hadley Centre	1.875°x1.25° N96
	24	HadGEM2-CC	UK	Met Office Hadley Centre	1.875°x1.25° N96
	25	HadGEM2-ES	UK	Met Office Hadley Centre	1.875°x1.25° N96
	26	inmcm4	Rusia	Institute for Numerical Mathematics	2.0°x1.5°
	27	IPSL-CM5A-LR	Francia	Institute Pierre-Simon Laplace	1.9°x3.75°
	28	IPSL-CM5A-MR	Francia	Institute Pierre-Simon Laplace	1.9°x2.75°
	29	IPSL-CM5B-LR	Francia	Institute Pierre-Simon Laplace	1.9°x3.75°
	30	MIROC5	Japón	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. Atmosphere and Ocean Research Institute (university of tokyo) and National Institute for Environmental Studies	1.40625°x1.40625°
	31	MIROC-ESM-CHEM	Japón	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. Atmosphere and Ocean Research Institute (university of tokyo) and National Institute for Environmental Studies	2.8125°x2.8125°
	32	MIROC-ESM	Japón	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. Atmosphere and Ocean Research Institute (university of tokyo) and National Institute for Environmental Studies	2.8125°x2.8125°
	33	MPI-ESM-LR	Alemania	Max Planck Institute for Meteorology	1.8° T42
	34	MPI-ESM-MR	Alemania	Max Planck Institute for Meteorology	1.8° T42
	35	MRI-CGCM3	Japón	Meteorological Research Institute	320x160 TL159
	36	NorESM1-M	Noruega	Norwegian Climate Centre	Volumen finito 1.9° lat, 2.5°lon
Reanálisis	1	CRU TS3.21	UK	Climatic Research Unit de la School of Enviromental Sciences, University of East Anglia.	0.5° x 0.5°
	2	ERA-Interim	Europa	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	0.5° x 0.5°

A pesar que se utilizaron 36 modelos globales del CMIP5 se debe tener en cuenta que no todos pueden presentar una buena simulación de las características atmosféricas para la parte nuestra región. En ese sentido, Barreto y Llacza (2013) realizaron un análisis de la eficiencia de los modelos del CMIP5 para simular los principales patrones atmosféricos que determinan el clima en el Perú. Dicho trabajo tuvo como fin analizar la representación la climatología de las circulaciones en alta y baja atmosfera sobre Sudamérica por parte de los MCG. Los resultados obtenidos mostraron una mejor representación de la precipitación durante el periodo de verano por parte de siete modelos (ver Tabla 6-2) y una mejor representación de la temperatura mínima a comparación de la máxima, principalmente para el periodo de verano. Debido a que estos siete modelos tuvieron un mejor rendimiento en cuanto a la representación de los patrones atmosféricos sobre Sudamérica, se le dará un especial énfasis en sus resultados, pero sin dejar de considerar los otros 29 modelos.

Tabla 6-2 Modelos con mejor representación de los patrones atmosféricos sobre Sudamérica

	MODELOS	RESOLUCION ATMOSFERICA	PAIS
1	ACCESS1-0	192x145 N96	Australia
2	CESM1-CAM5	0.9x1.25 f09	USA
3	NorESM1-M	Finite Volume 1.9 degrees latitude, 2.5 degrees longitude	Norway
4	HadGEM2-CC	1.875 deg in longitude by 1.25 deg in latitude N96	United Kingdom
5	HadGEM2-ES	1.875 deg in longitude by 1.25 deg in latitude N96	United Kingdom
6	HadGEM2-AO	1.875 deg in longitude by 1.25 deg in latitude N96	Korea
7	MPI-ESM-LR	approx 1.8 deg T63	Germany

Fuente: Barreto & Llacza, 2013

6.1 Anomalías y cambios proyectados de temperatura máxima promedio en las cuencas

La Figura 6-1 muestra las series de tiempo de las anomalías de temperatura máxima promedio en las cuencas. La línea delgada ploma que se ubica dentro del periodo 1980 - 2014 representan las anomalías de temperatura calculados a partir de los datos del reanálisis Era-Interim; mientras que en el periodo 2015-2046, la parte sombreada indica la dispersión de las anomalías proyectadas para los 36 GCM, las líneas de colores muestran las anomalías de los siete modelos y la línea negra gruesa representa el promedio de estos.

Los datos de temperatura máxima del reanálisis de 1981 al 2003 presentan mayormente anomalías negativas llegando a valores de -1°C para alguno años, mientras que en la última década (2004-2014) las anomalías son en su mayoría positivas o de aumento para los cuatro con valores que fluctúan entre 0 y $+1^{\circ}\text{C}$, lo cual indica una clara tendencia de aumento de la temperatura máxima en la cuenca.

Este comportamiento es identificado para todos los períodos de análisis en las estaciones de verano (DEF), invierno (JJA), época de avenida (diciembre–abril) y estiaje (mayo-noviembre).

En el periodo de proyección (2015-2045) se aprecia que en todos los casos existe un acuerdo por parte de todos los modelos en proyectar aumento gradual de la temperatura máxima. La tendencia de estos cambios es ligeramente mayor para el trimestre JJA y para el periodo de estiaje. Con respecto a los escenarios de emisión, se aprecia que las tendencias de anomalías son mayores en el escenario RCP 8.5, a comparación del escenario RCP 4.5. Bajo el escenario RCP 8.5 los siete modelos representativos de los 36 MCG proyectan anomalías positivas entre +1°C y +2°C para el año 2016-2045; mientras que en el escenario RCP 4.5 los valores de cambio varían entre 0°C y +2°C.

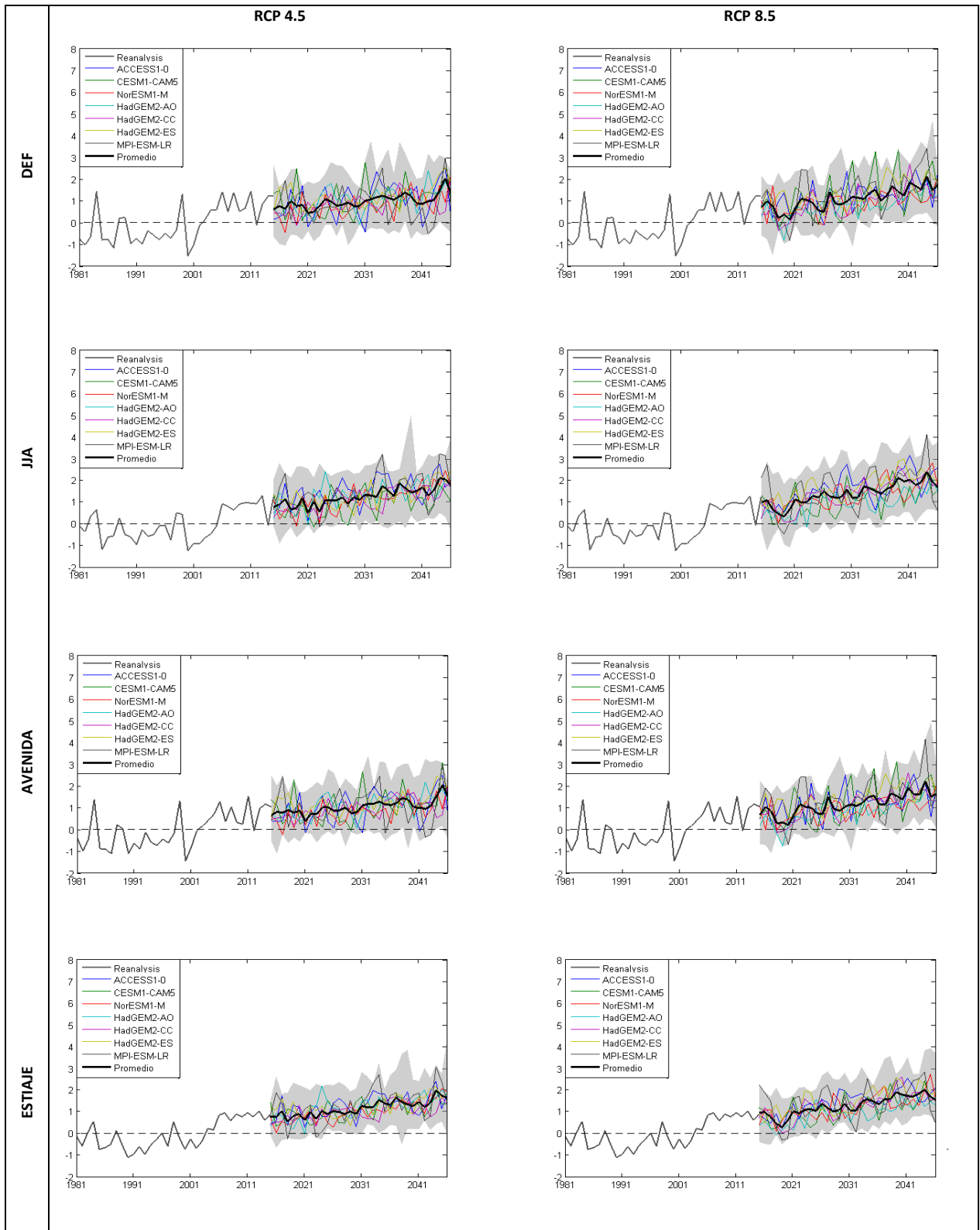


Figura 6-1 Dispersión de las anomalías de temperatura máxima (°C) período 1981-2014 (reanálisis Era Interim en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo), de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores; y el promedio de estos, en línea negra gruesa. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5.

6.2 Anomalías y cambios proyectados de temperatura mínima promedio en las cuencas

La Figura 6-2 muestra las anomalías de temperatura mínima promedio de las cuenca proyectadas por los 36 modelos globales. Los datos del reanálisis Era-Interim muestran que durante las primeras dos primeras décadas del periodo histórico las anomalías se encuentran en su mayoría debajo de 0°C, a excepción de algunos años en donde hay valores que llegan a +1°C los cuales muy posiblemente están asociados a eventos de El Niño. La última década del periodo histórico (2004-2014) se caracteriza por presentar anomalías por encima de 0°C donde en algunos años estos valores llegan a +1°C para los trimestres DEF, JJA y el periodo de avenida, mientras que el periodo de estiaje se muestra más estable con valores positivos pero más cercanos a 0°C. Las anomalías positivas nos indican un progresivo calentamiento para la última década.

Las proyecciones para el periodo 2016-2045 indican cambios positivos de la temperatura mínima por parte de todos los modelos globales. A nivel estacional, el trimestre JJA muestra mayor pendiente de las series de tiempo a comparación del trimestre DEF. Con respecto a las épocas hidrológicas, la tendencia de las anomalías en la época de estiaje es ligeramente mayor a comparación de la época de avenidas.

Las magnitudes de cambio por parte de los siete modelos globales representativos finalizando el periodo de proyección se encuentran entre +1°C a +2°C aproximadamente, para todos los casos, a excepción del trimestre JJA en donde algunos de ellos proyectan cambios mayores de +2°C.

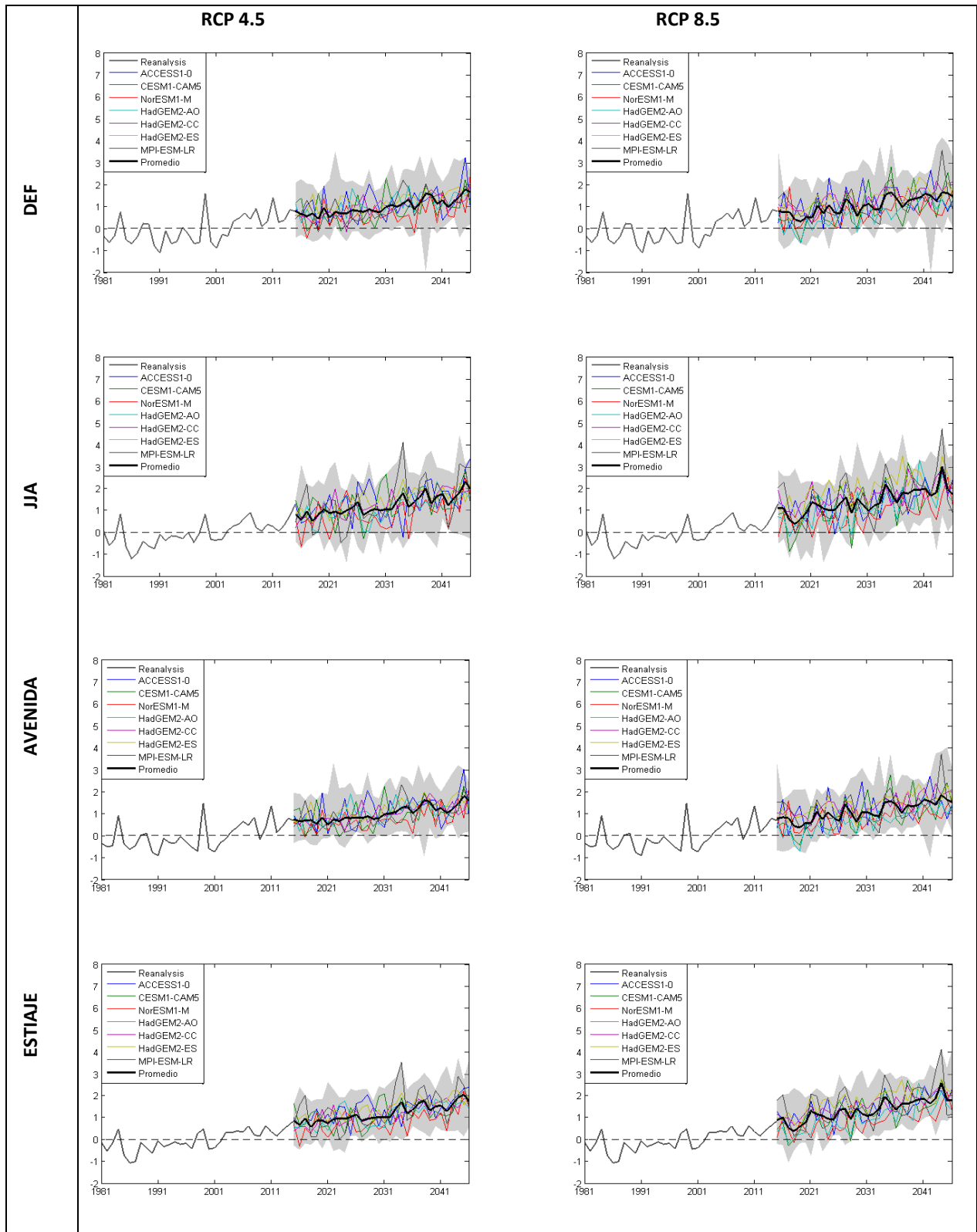


Figura 6-2 Dispersión de las anomalías de temperatura mínima (°C) en el período 1981-2014 (reanálisis Era Interim en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo), de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores; y el promedio de estos, en línea negra gruesa. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5.

6.3 Anomalías y cambios estandarizados de precipitación promedio en las cuencas

Los resultados de series de precipitación estandarizadas en general muestran alta variabilidad temporal, siendo menor en el período histórico 1981-2014, donde la precipitación presenta picos asociados a eventos ENOS o de variabilidad climática. Estos resultados demuestran que no existe una tendencia clara de la precipitación promedio en la cuenca, por lo que se recomienda realizar este análisis con información observada de estaciones.

En el periodo proyectado (2016-2045) los modelos globales muestran una considerable discrepancia. A nivel estacional, el trimestre DEF no existe una tendencia clara si realizamos el análisis con los 36 modelos globales; sin embargo, analizando solamente los siete modelos globales representativos vemos que estos presentan anomalías positivas en su mayoría, principalmente bajo el escenario RCP 8.5, lo cual puede significar un aumento de la precipitación. Este comportamiento se ve mejor representado por el promedio de los cambios (línea negra gruesa).

En el trimestre JJA los resultados presentan una mayor incertidumbre ya que los MCG proyectan cambios tantos positivos como negativos; sin embargo, alguno de ellos como el CESM1-CAM5 proyecta valores de cambios estandarizados de 5, especialmente para el escenario RCP 8.5. Cabe resaltar que es la época de escasas a nulas lluvias en las cuencas y cualquier aumento sustancial no sería significativo.

Con respecto a los periodos hidrológicos, en el periodo de avenida los siete modelos globales representativos muestran en su mayoría anomalías positivas para ambos escenarios de emisión. Esta señal es aún más clara para la época de estiaje donde la mayoría de los años se proyectan cambios estandarizados superiores a 0 para los siete MCG.

A pesar de ver una posible señal de aumento de las precipitaciones promedio en las cuencas, aún existe una gran incertidumbre en estos resultados. Estas incertidumbres son debidas principalmente a las limitaciones de los modelos globales para simular los procesos para la ocurrencia de la precipitación y la topografía a detalle espacial y a la variabilidad natural típica que tiene esta variable a escala espacial, temporal y en su concentración.

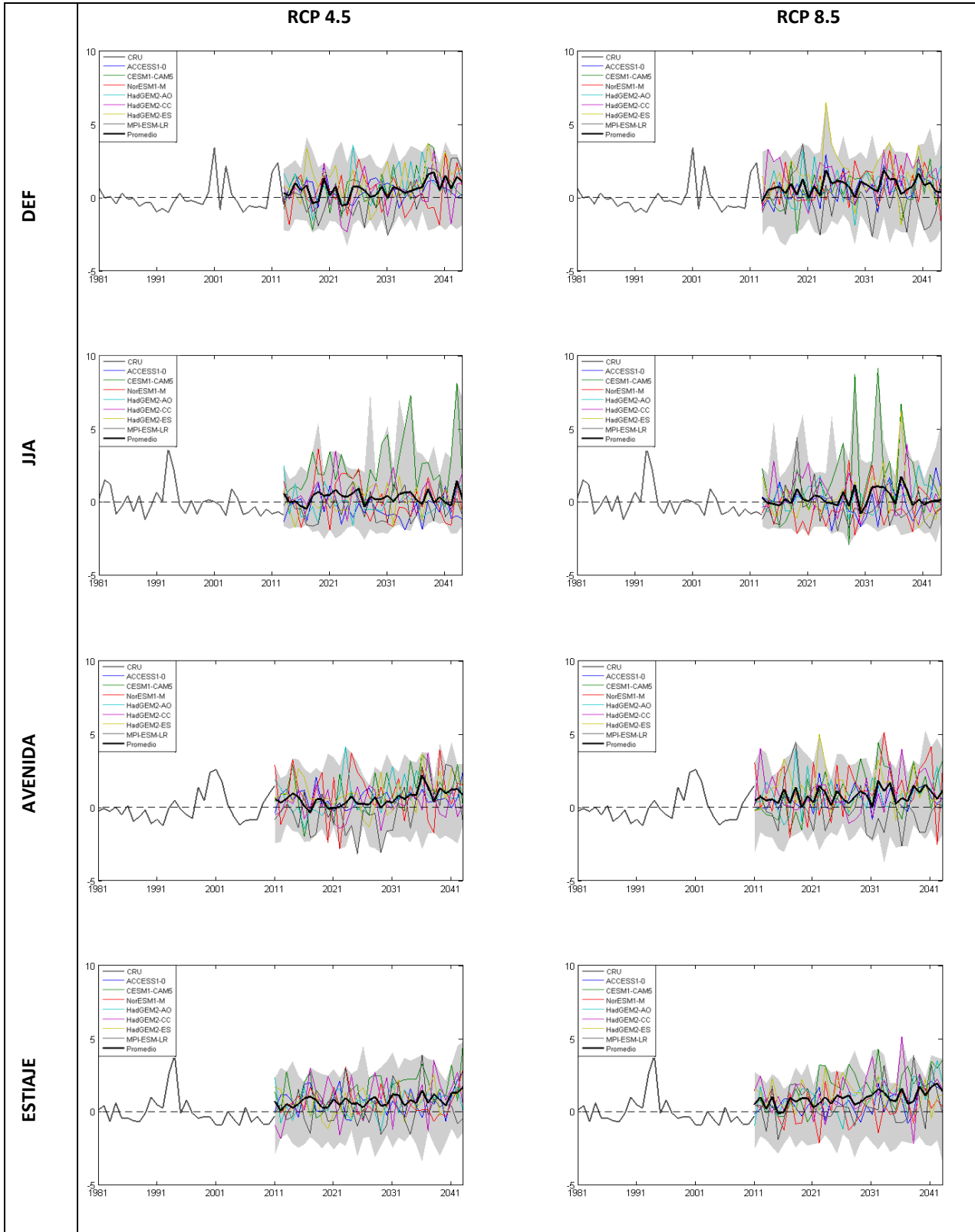


Figura 6-3 Dispersión de las anomalías precipitación estandarizada del periodo 1981-2014 (reanálisis CRU en línea negra), y cambios futuros 2016-2045 (provenientes de 36 modelos del CMIP5 sombreado en color plomo), de los cuales siete modelos representativos para la región de estudio son graficadas en líneas de colores. Los cambios son mostrados para los escenarios de emisión de GEI moderada RCP4.5 y alta RCP8.5.

7 Capítulo VII: Modelamiento climático regional

En este capítulo VII se presenta los resultados de la tercera fase de la componente meteorológica del estudio, que tuvo la finalidad de la modelización climática regional con el modelo WRF-ARW a 16 Km de resolución espacial, siendo los períodos de simulación 1981-2005 y 2016-2045 para el ámbito de las cuencas de interés; sobre la base de la identificación de los modelos globales óptimos presentados en el capítulo VI, como el HadGEM-ES para la modelización climática regional.

Para el logro de los objetivos de la modelización climática regional, Senamhi disponibilizó de seis servidores para el procesamiento de la simulación climática, siendo el servidor de mayor performance de características SGI UV 20 (Intel Xeon E5-4650, 2.60 GHz) con 32 procesadores. Así como de un equipo de almacenamiento del gran volumen de información procesada, de características de alto rendimiento modelo Storage EMC VNX-5200 con capacidad de 17 TB de espacio efectivo en discos de alta velocidad 15K RPM. Sobre estas plataformas la simulación climática fue lanzada el 15 de setiembre 2014 y finalizando en abril del 2015, su proceso posterior fue llevado a cabo de mayo a junio.

Para el horizonte 2016-2045, la distribución espacial de la precipitación anual futura a lo largo del área de estudio en general se mantiene similar a la del clima actual, sin embargo los máximos de precipitación llegan hasta los 1150 mm anuales sobre la cuenca alta del río Mantaro, Chillón y Rímac, siendo ligeramente mayor al clima actual.

La distribución espacial de la precipitación estacional futura no muestra cambios respecto al clima actual. En general, las precipitaciones más bajas se mantienen sobre la zona costera del área de estudio y las precipitaciones más altas se dan sobre la cuenca alta del Mantaro. DEF es la estación del año de mayor precipitación y alcanza hasta 505 mm acumulando casi la mitad de la lluvia totalizada anual. El JJA es la estación más seca y alcanza hasta 63 mm.

7.1 Comportamiento espacial de la precipitación anual y estacional según escenarios de 16 km

7.1.1 Análisis anual

La distribución de las precipitaciones anuales proyectadas a lo largo del área de estudio se mantiene similar a la del clima actual, con los máximos valores que llegan hasta más de los 1150 mm anuales hacia las zonas más altas, que corresponden a la cuenca alta del río Mantaro, siendo Marcapomacocha la localidad que registraría hasta un máximo de casi 1300 mm; por otro lado los valores mínimos se ubican hacia las zonas costeras, cuenca baja de las cuencas Chillo, Rímac y Lurín, por debajo de los 1500 msnm donde las precipitaciones serían menores a 40 mm por año.

En general se observa un incremento de las lluvias, principalmente importante sobre las zonas altas de la cuenca del Mantaro, Chillón y Rímac, en comparación con el clima actual, se puede apreciar como la isoyeta de 850 mm tiene una mayor cobertura espacial respecto al clima actual donde esta solo cubre parte de la localidad de Marcapomacocha y Milloc en el clima actual mientras que en el proyectado alcanza localidades hacia al sur llegando hasta Morococha y Yauli y hacia el norte llegando

hasta el Lago Junín, pasando por Yantac, Pariacancha al oeste y Atocsaico y Malpaso al este. Ver Figura 7-1.

7.1.2 Análisis estacional

La distribución espacial de la precipitación a nivel estacional no varía, en general los valores más bajos se mantienen sobre la zona costera del área de estudio y las precipitaciones máximas se dan sobre la cuenca alta del Mantaro. Una evaluación temporal nos indica que DEF es el trimestre más lluvioso del año acumulando casi la mitad de la lluvia totalizada anual.

a. DEF (diciembre-enero-febrero)

La distribución proyectada de lluvias, para el periodo 2016-2045, mantiene al trimestre DEF como el más lluvioso del año, alcanzado los máximos de más de 500 mm sobre un área ligeramente mayor a la del clima actual, sin embargo, la distribución espacial en general es muy similar. Otras áreas que presentan valores máximos proyectados son las localidades de Milloc y Casapalca en la cuenca del Rímac y Pariacancha en la del Chillón. Del otro lado de la vertiente sobre la cuenca del Mantaro, la localidad de Marcapomacocha proyecta valores máximos de precipitación de hasta 565.8 mm para el trimestre DEF. Ver Figura 7-2.

b. MAM (marzo-abril-mayo)

Durante el trimestre MAM proyectado, las precipitaciones decrecen progresivamente. Si bien con respecto al clima actual, mantiene una distribución espacial muy similar, se observa que existiría un ligero incremento en la cantidad de lluvia acumulada en la parte alta de la zona de estudio, alcanzando máximos de hasta 378.3 mm en la localidad de Marcapomacocha, asimismo se aprecia una mayor cobertura espacial de la isoyeta de 200 mm con respecto al clima actual, extendiéndose más al sur de las localidades de Morococha y Yauli. Ver Figura 7-3.

c. JJA (junio-julio-agosto)

Climáticamente el trimestre JJA es el más seco del año, la precipitación acumulada desciende dramáticamente hasta los valores más bajos del año característica que se observa de igual manera en la proyección generada para el periodo 2016-2045. Los valores máximos de lluvia alcanzan hasta con 61.8 mm en Atocsaico sobre la cuenca alta del Mantaro. Las áreas que comprenden la parte baja y media y en alguna medida la parte alta de las cuencas de Rímac, Chillón y Lurín, por debajo de los 4000 msnm, presentan acumulados de hasta 20 mm, manteniendo la misma distribución espacial del clima actual. Ver Figura 7-4.

d. SON (setiembre-octubre-noviembre)

El trimestre SON es el periodo de transición hacia el inicio de un periodo lluvioso, la cantidad de lluvia acumulada se incrementa en toda el área de estudio. La distribución espacial proyectada mantiene las mismas características de su climatología, con máximos que alcanzan hasta los 292 mm en Marcapomacocha, y mínimos, entre 0 y 10 mm por debajo de los 2000 msnm. Ver Figura 7-5

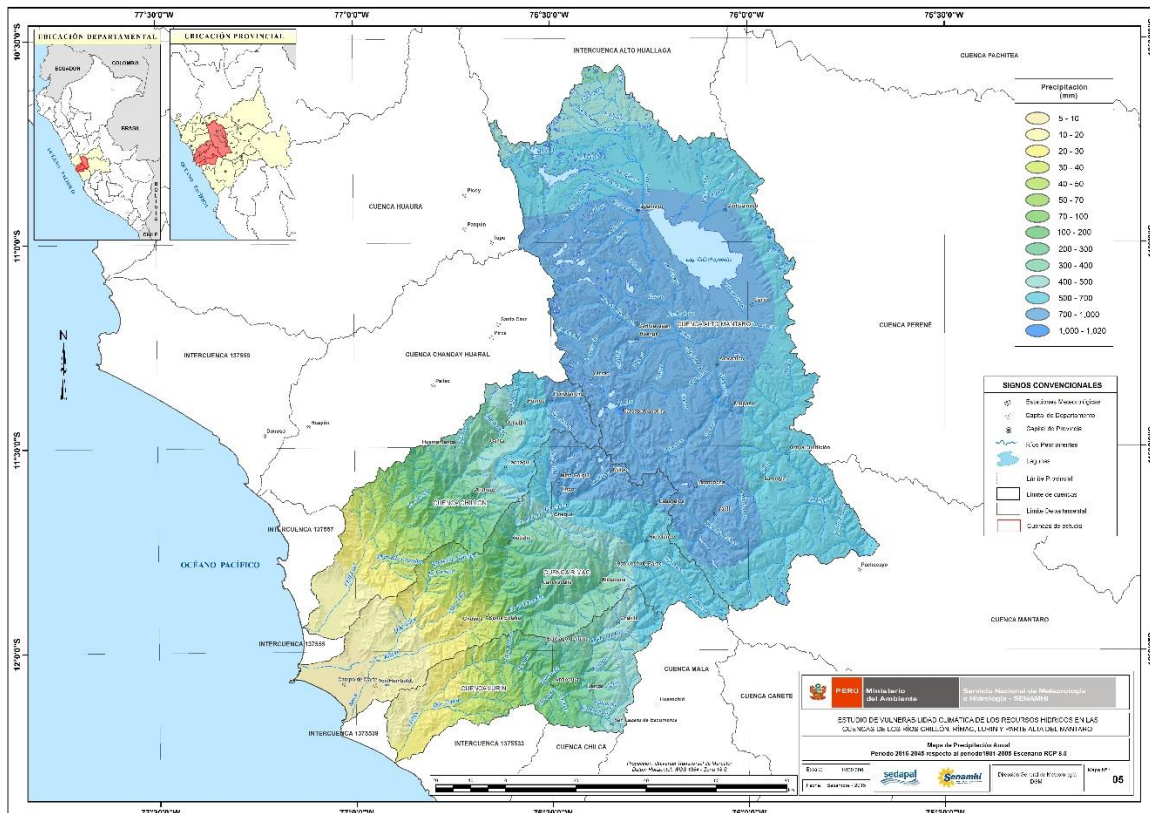


Figura 7-1 Mapa de precipitación anual del periodo 2016 – 2045

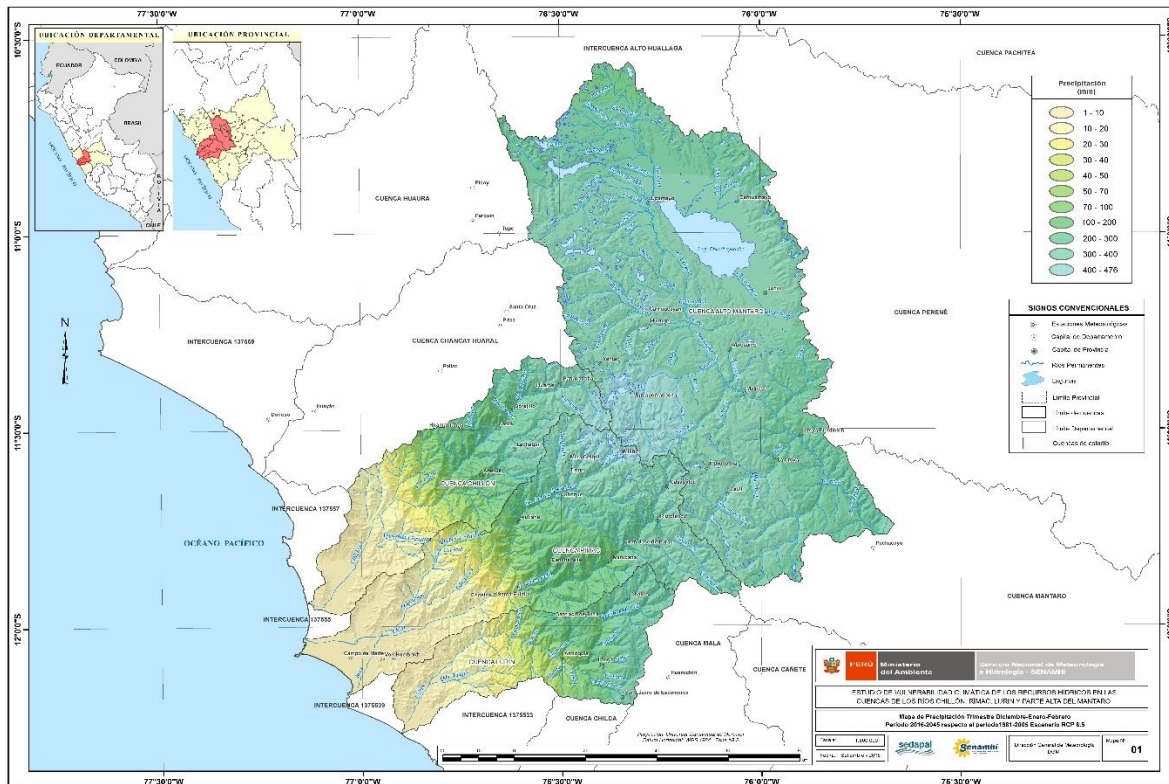


Figura 7-2 Mapa de precipitación DEF (diciembre-enero-febrero) del periodo 2016 – 2045.

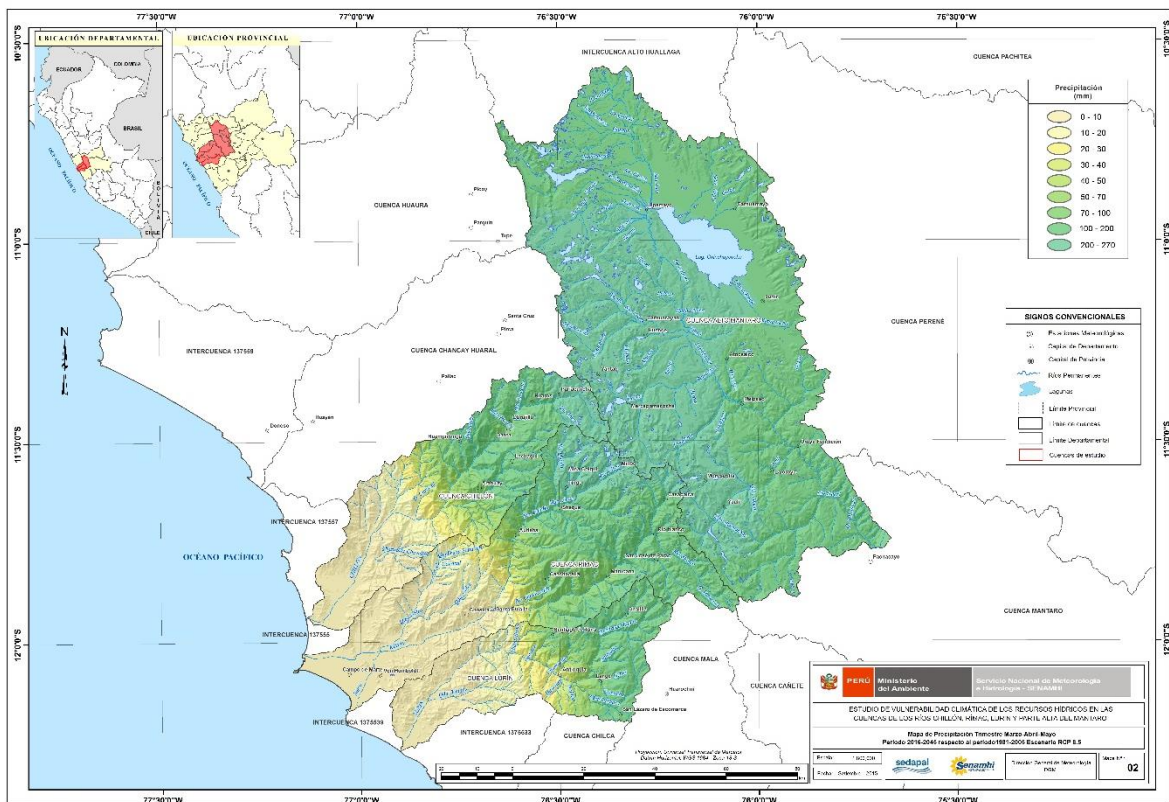


Figura 7-3 Mapa de precipitación MAM (marzo-abril-mayo) del periodo 2016 – 2045

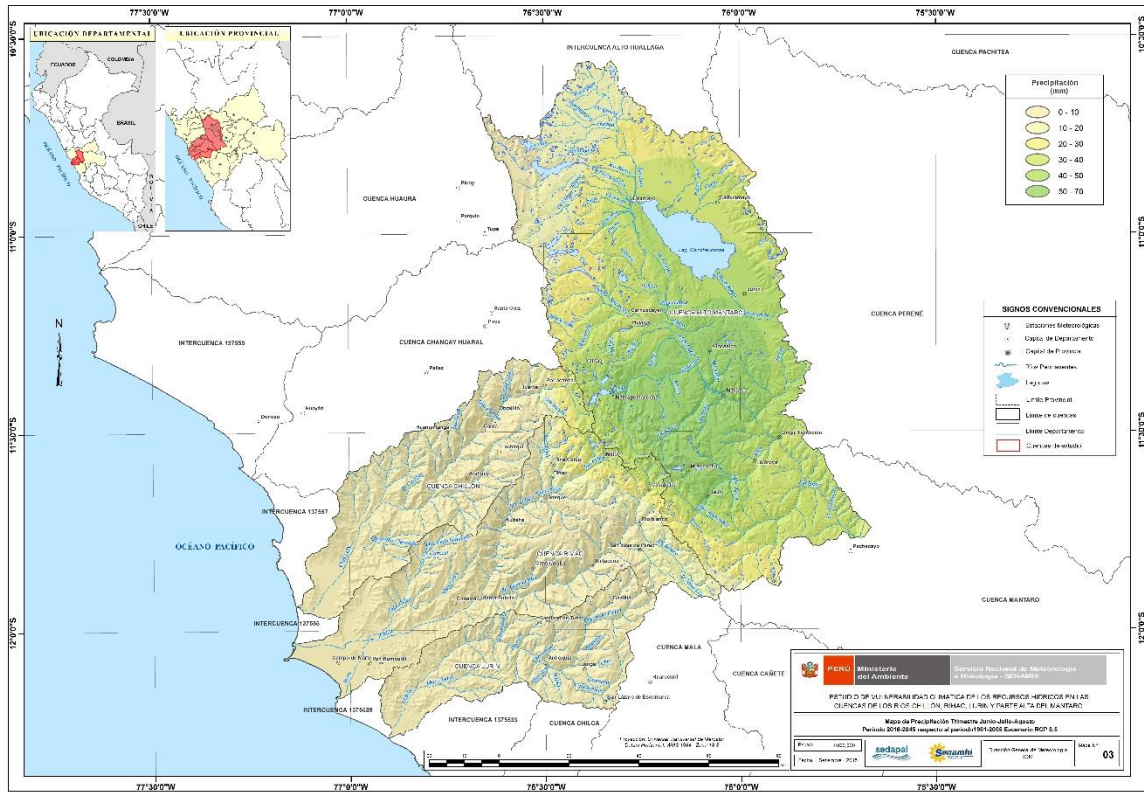


Figura 7-4 Mapa de precipitación JJA (junio-julio-agosto) del periodo 2016 – 2045

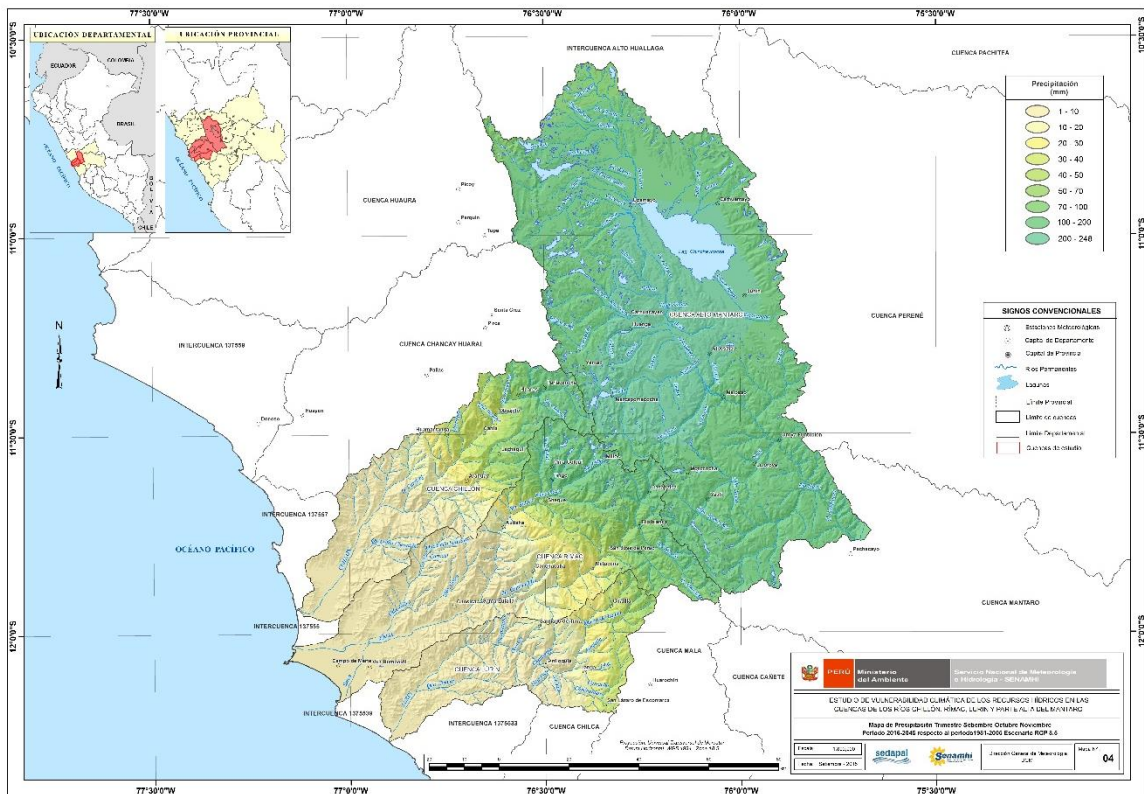


Figura 7-5 Mapa de precipitación SON (ser-oct-nov) del periodo 2016 – 2045

8 Capítulo VIII: Modelamiento climático de alta resolución, en el dominio del sistema de cuencas

En el presente capítulo se presenta los resultados de las simulaciones climáticas de alta resolución espacial. Los “Escenarios del clima futuro a nivel de cuenca”, corresponden a la tercera fase del Estudio de Vulnerabilidad climática de los recursos hídricos de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Alto Mantaro. Los períodos que comprende la modelización climática: histórico 1981-2005 y futuro 2016-2045 están basados en el escenario de alta emisión de Gases de Efecto Invernadero RCP 8.5.

Este informe ha sido realizado sobre la base del conocimiento y entendimiento de las condiciones y variabilidad hidroclimática presente en las cuencas de interés, y de la integración de los resultados de la segunda fase sobre la identificación de los modelos globales óptimos (HadGEM2-ES, CCSM4, MPI-ESM-LR) para la modelización climática regional y local. Siendo el modelo global HadGEM2-ES utilizado como forzante para la modelización dinámica de alta resolución espacial (5 Km) y para la modelización estadística a escala local.

El resultado del “consenso estadístico” de la modelización dinámica y estadística interpolada a 250 m de resolución espacial son presentados en este reporte final.

Para el logro de la modelización dinámica a escala de cuenca 5 Km de resolución espacial, el SENAMHI disponibilizó de seis servidores para el procesamiento, siendo el servidor de mayor performance de características SGI UV 20 (Intel Xeon E5-4650, 2.60 GHz) con 32 procesadores. Así como también disponibilizó de un equipo de almacenamiento para el gran volumen de información procesada, de características de alto rendimiento modelo Storage EMC VNX-5200 con capacidad de 17 TB de espacio efectivo en discos de alta velocidad 15K RPM. Sobre estas plataformas, la modelización climática fue iniciada el 15 de setiembre 2014 finalizando el 15 de setiembre del 2015. Estos resultados fueron complementados con la modelización estadística para la generación de escenarios locales de cambio climático, que tuvo como primer paso la selección de los predictores óptimos de gran escala que tienen relación física con los predictandos de precipitación y temperatura en las localidades representativas de las cuencas en estudio (SENAMHI, 2015 Informe Técnico N°7).

El postproceso de la modelización dinámica y estadística, y el consenso estadístico que lleva a la generación de los Escenarios del clima futuro a fina resolución en las cuencas de interés, fue realizado durante octubre. Como resultado, se presenta los Escenarios de cambio de temperatura y precipitación promedio de 30 años correspondiente al periodo 2016-2045 relativo a 1981-2005, que fueron condición de entrada importante y necesaria para la modelización de los Escenarios de disponibilidad hídrica futura.

La cartografía de los Escenarios Climáticos de consenso son presentados, y se basa en la aplicación de la geoestadística –la combinación de técnicas estadísticas con la herramienta de información georeferenciada, que ha facilitado la interpolación espacial de la precipitación, temperatura máxima y mínima a una resolución de 250 m, como resultado de la fuerte dependencia física con la elevación, principalmente de las temperaturas; cuyo estadístico de correlación múltiple fue de 0.9.

Los resultados de los Escenarios del clima futuro a fina resolución espacial 2016-2045 relativo al período 1981-2005 en las cuencas donde opera SEDAPAL, indican cambios de la precipitación dentro de su variabilidad normal de $\pm 15\%$ principalmente en las cuencas altas y deficiencias de 15-30 % en las cuencas medias y bajas.

Los resultados también indican el aumento futuro de la temperatura máxima en 1.6 °C y la mínima en 1.8 °C, principalmente en las cuencas medias y altas, siendo más sensibles al calentamiento. Este aumento de la temperatura máxima podría tener efectos en la variación de los vientos, una mayor evaporación de los cuerpos de agua y evapotranspiración de la vegetación y cultivos en el área de influencia de SEDAPAL. El aumento de la temperatura mínima es posible que repercuta en la intensidad y frecuencia de las heladas meteorológicas y en la temporalidad de los nevados y glaciares que puede ser relevante en las pequeñas comunidades, en los bofedales, ganadería y ecosistemas propios de la alta montaña. Se presume que el aumento de la temperatura podría tener efectos en la biodiversidad y en los cultivos sensibles a los cambios de temperatura, incidiendo en su variedad, calidad y rendimiento, en la adaptación y migración de los cultivos hacia otros pisos altitudinales.

Este reporte, contiene mapas climáticos de la distribución espacial de temperatura y precipitación y sus cambios futuros a fina resolución espacial en los trimestres DEF, MAM, JJA, SON y anual para el clima promedio de 30 años centrado en el año 2030 correspondiente al periodo 2016-2045 escenario RCP8.5 relativo al período 1981-2005.

8.1 Cambios en la precipitación

Las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro presentan un relieve complejo con quebradas profundas y fuertes pendientes, flanqueada por amplias cadenas de montañas, principalmente en sus cuencas medias. Esto permite la canalización de la humedad determinando un verano austral lluvioso y moderadamente templado; en contraste al invierno seco y frío.

El complejo relieve de las cuencas determina características especiales del clima –que no siempre alcanzan a ser distinguidos en una representación espacial–, como las condiciones a detalle de la alta variabilidad de la distribución espacial, altitudinal y de concentración temporal de la precipitación a escala local.

La distribución espacial de los cambios futuros de precipitación trimestral 2016-2045 relativo a 1981-2005, en gran parte del área de influencia de las cuencas de estudio se proyectan precipitaciones dentro de su variabilidad normal $\pm 15\%$, con aumentos principalmente en el trimestre junio-julio-agosto (trimestre seco), aunque climáticamente las precipitaciones en esta época del año son escasas a nulas, un cambio en los patrones futuros de precipitación en este trimestre no será significativo. Asimismo, las proyecciones indican reducción de la precipitación anual en las cuencas medias y principalmente en las bajas de 15-20 %.

En el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF), los cambios de la precipitación futura indican déficit en la cuenca baja y media. Asimismo, en gran parte de la cuenca Alto Mantaro, se presenta disminución

del orden de 41 %. A excepción de Chalilla, Yaulu y Carhuacayan que responden a un cambio positivo o de aumento de precipitación de 15 %, los cuales se consideran dentro de su variabilidad climática. Mientras, un déficit de 15 a 40 % de precipitación se proyecta para las cuencas bajas de los ríos Lurín, Rímac y Chillón, principalmente en Santiago de Tuna, Antioquía, Santa Eulalia, Langa, Chosica, Autisha, Arahua, Huamantanga, Canta y Obrajillo.

En el trimestre marzo-abril-mayo (MAM), la precipitación muestra cambios relevantes, en las cuencas bajas, los déficit de precipitación alcanzan 31 % (estaciones Campo de Marte y Von Humboldt) y en la cuenca alta del río Chillón los déficit llegan hasta 30 % (estaciones de Huamantanga y Arahua). En las cuencas medias y altas del área de estudio se proyecta aumentos y déficits dentro de su variabilidad climática de ± 15 %.

En el trimestre junio-julio-agosto (JJA), los resultados muestran un patrón espacial de aumentos de precipitación para las cuencas de interés (Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro) del orden de 30% a más, pero no son relevantes ya que se trata de un trimestre de escasa a nula precipitación, donde cualquier cambio en los patrones de precipitación no es relevante. A excepción de las cuencas bajas. En las estaciones de Carhuamayo, Upamayo, Junín, Huenge, Atocsaico, La Oroya Fundición, La Oroya, Yantac, Marcapomachocha, Arahua y Campo de Marte, se proyectan aumentos dentro de su variabilidad climática hasta de 15%, sin embargo, no son significativos.

En el trimestre setiembre-octubre-noviembre (SON), en la gran parte de las cuencas altas y medias de interés, presentan aumentos hasta en 15 % de precipitación que se consideran dentro de la variabilidad climática. Sin embargo, en las cuencas bajas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín se proyecta aumentos de la precipitación entre 15 % y 35 % (estaciones Von Humboldt, Campo de Marte).

En el período anual, la distribución espacial de la precipitación anual en la cuenca media y alta del río Alto Mantaro, refleja dos características principales: el ingreso por el este de los vientos cálidos y húmedos provenientes de la cuenca Amazónica, principalmente hacia la vertiente oriental de las cuencas en estudio, y la distribución de su concentración asociada a la configuración espacial y altitudinal en las diferentes estaciones del año.

Las precipitaciones anuales (mm/año) en la cuenca baja (0 a 1500 msnm) refleja la influencia del relieve y del océano que alteran la estructura de la atmósfera generando núcleos de precipitación hasta de 25 mm para el periodo futuro (2016-2045) y que caen dentro del rango de la variabilidad climática actual. Más arriba, en la cuenca media (1500-3000 msnm) muestran variabilidad de la precipitación, disminución entre 15 y 21 %, y aumentos dentro de su rango de variabilidad normal (15 %). Estos cambios se reflejan en las localidades de Antioquia, Autisha, Matucana, Canchacalla, Pallac, Arahua, Canta y Obrajillo pertenecientes a la cuenca media y están asociados a la particularidad del relieve y procesos físicos complejos en la cuenca media.

En la cuenca alta el comportamiento anual de la precipitación oscilan entre 247 mm y 922 mm; las bajas precipitaciones están influenciadas por los efectos locales de valle, mientras que las altas

precipitaciones tienen influencia del relieve que favorece la inestabilidad mecánica para la precipitación orográfica. La forma de exposición del relieve a los vientos cálidos y húmedos provenientes de la Amazonía crea un cinturón húmedo en las cuencas altas con orientación norte-sur de la cordillera oriental, principalmente sobre la cuenca Alto Mantaro, con mayores precipitaciones en relación a las cuencas baja y media. Los cambios de la precipitación futura en las cuencas altas indican cambios de -15 % a 11 %, siendo el rango de variabilidad normal actual de precipitación de ± 15 %.

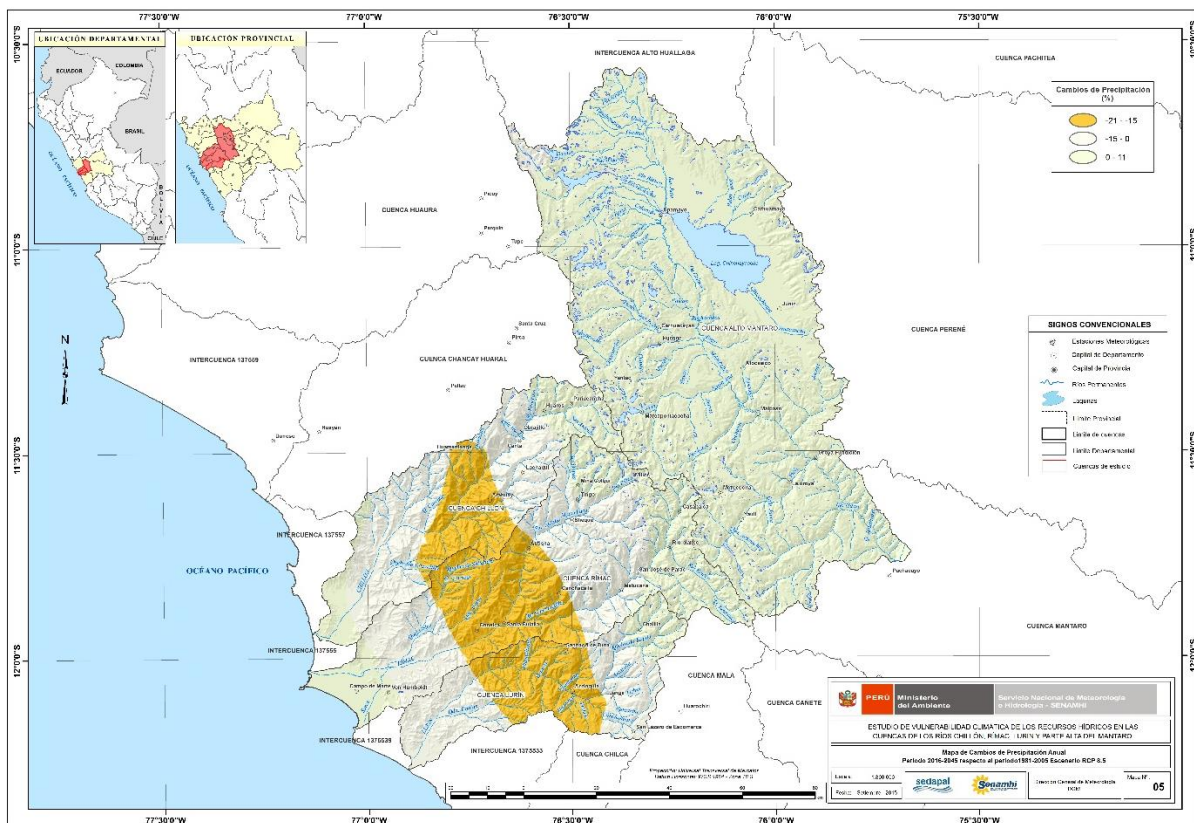


Figura 8-1 Cambios en la precipitación anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8.5

8.2 Cambios en la temperatura máxima

La configuración espacial de la temperatura máxima, está relacionada con las características altitudinales y las diferentes estaciones astronómicas del año. Las condiciones más cálidas predominan sobre las cuencas bajas con temperaturas entre 24 °C y 26 °C. En las cuencas medias y altas, a medida que aumenta la elevación de oeste a este, las temperaturas máximas disminuyen de modo tal que en las cuencas medias, la temperatura llega hasta los 21 °C y en las cuencas altas donde los andes atraviesan de sur a norte, la temperatura máxima del aire puede alcanzar de 9 a 12 °C, respectivamente.

En los valles de las cuencas medias y altas, la configuración del relieve en las cuencas determinan microclimas variados asociados a procesos físicos más complejos que contribuyen con las características particulares del comportamiento de la temperatura máxima.

En el futuro 2016-2045, la configuración espacial de la temperatura máxima del aire en las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y Alto Mantaro, indican aumentos significativos con un potencial escenario de riesgo. Este aumento de la temperatura máxima sobre las cuencas de interés tienen relación directa con las características altitudinales, siendo el área identificada más sensible al cambio, las cuencas altas por encima de los 3000 msnm, donde se encuentran ubicados los escasos nevados, glaciares, los reservorios natural y artificial de agua que se distribuyen a través de la red hídrica de SEDAPAL a Lima-Metropolitana.

Este posible aumento de la temperatura máxima es uno de los elementos que contribuirá en la variación del clima de escala local y regional en el horizonte cercano, que estaría acentuado por la pérdida de áreas verdes –que incrementarían el efecto de islas de calor–, la disminución de oxigenación de la ciudad y los valles, la densificación de la construcción y de la población, con ampliación de la frontera del suelo urbanizado, la disminución de las áreas agrícolas y de los ecosistemas de valle.

En el trimestre DEF, la temperatura máxima a nivel espacial en las cuencas, se caracteriza por presentar calentamiento, aunque no todas las regiones de la cuenca experimentarían el mismo grado de calentamiento. Siendo, el cambio más notable de 1.2 a 2.0 °C en las cuencas altas, en la estación meteorológica Milloc; y el cambio relativamente más bajo de 0.9 a 1.6 °C en las cuencas bajas, la estación Campo de Marte. Mientras, la cuenca media experimentarían aumentos entre 1.2 °C a 2.0 °C. En este contexto, la máxima variación para este trimestre estaría proyectada hacia las cuencas altas; donde están ubicados los escasos nevados. En tanto, los ligeros aumentos estarían asociadas a variaciones locales, principalmente.

En el trimestre MAM, la variabilidad espacial de los cambios de la temperatura máxima es de 1.6 a 2.0 °C y es más relevante en las cuencas altas. Mientras que en las cuencas medias y bajas mantienen un patrón general de calentamiento del orden de 1.2 a 2 °C y 0.8 a 2 °C, respectivamente.

En el trimestre JJA, la distribución espacial de los cambios en la temperatura máxima del aire proyectadas al 2016-2045, mostrarían en las cuencas bajas los menores cambios de 1.6 a 2 °C, en las cuencas medias de 1.6 a 2.4 °C y en las cuencas altas alcanzarían los mayores cambios de 2 a 2.8 °C, principalmente en las estaciones Huenge (2.7 °C), Morococha (2.6 °C), Carhuacayán (2.7 °C) y Yauli (2.7 °C).

El aumento de la temperatura máxima futura en las cuencas de estudio estaría asociado a la ausencia de nubosidad durante los meses de época de estiaje (invierno), lo cual determina que dichas temperaturas sean mayores durante esta temporada, en contraste al trimestre DEF. El mecanismo físico de este proceso aparentemente estaría asociado al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical con su posición más al norte, y a la intensificación de los vientos de dirección oeste en niveles medios y altos de la atmósfera que ingresan desde el pacífico a continente, provocando la ausencia de nubosidad, por lo tanto el aumento de la temperatura máxima.

En el trimestre SON, los incrementos de temperatura máxima son menores a 2 °C en el ámbito de la cuenca de estudio, mostrando cambios fuertes en la cuenca Alto Mantaro y en las cuencas medias de los ríos Rímac, Chillón y Lurín.

En la cuenca alta, las estaciones Atocsaico, Carhuamayo, Malpaso y Junín muestran aumento de la temperatura máxima de 1.8 °C. En la cuenca baja, se proyecta aumentos en la estación Chosica de 1.7 °C y Santa Eulalia de 1.8 °C.

En el período anual, la temperatura máxima del aire presenta dos áreas de máximo aumento; la primera abarca una gran área donde se encuentra la estación de Milloc 2.5 °C y en la segunda área de aumento se encuentran las estaciones de Yantac 2.2 °C, Pariacancha 2.1 °C y Huaros 2.1 °C. Mientras, las áreas de menor aumento (<2 °C), se presentan en el resto de las cuencas interés.

En el periodo anual, al igual que en los trimestres del año, el calentamiento es en el ámbito de las cuencas de estudio, como resultado de la modelización regional que contiene el forzamiento del modelo global que considera el escenario de alta emisión de GEI RCP8.5.

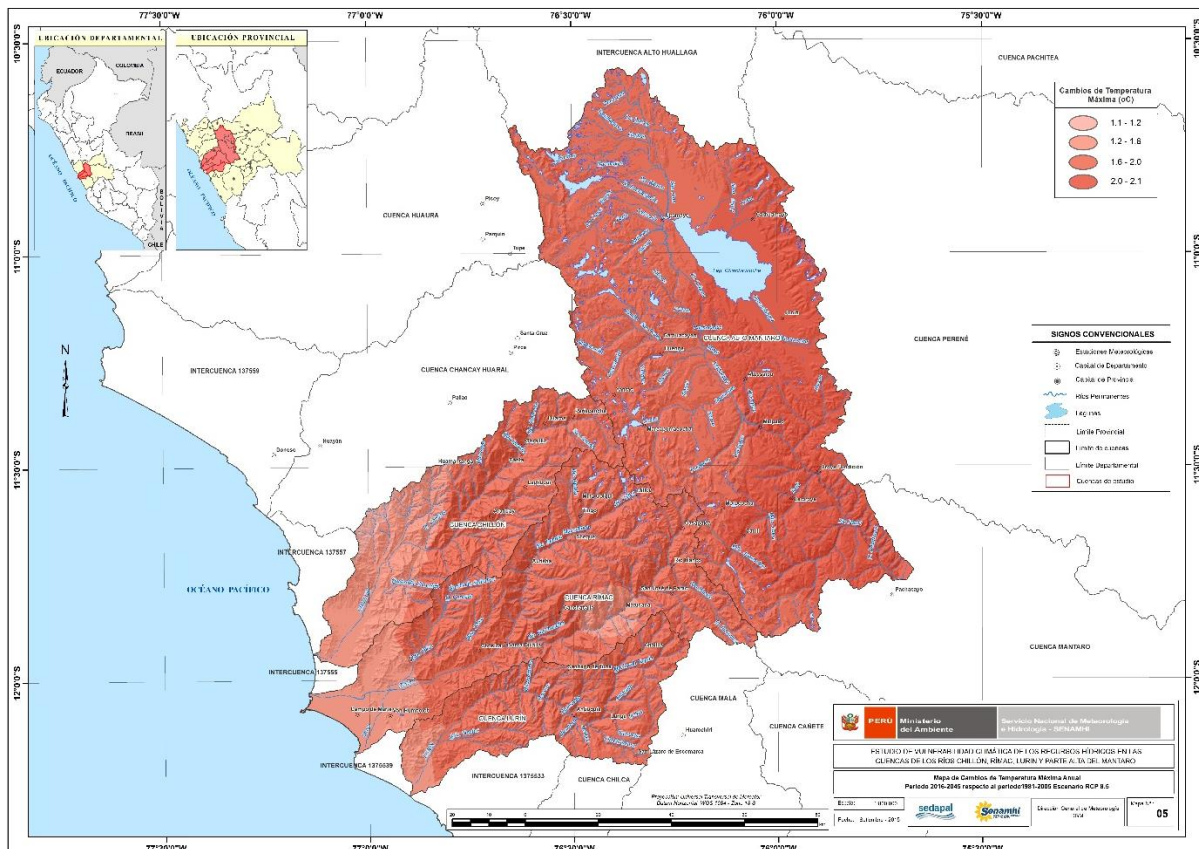


Figura 8-2 Cambios en la temperatura máxima anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8.5.

8.3 Cambios en la temperatura mínima

Las cuencas bajas (altitud 0-1500m) ubicadas en el oeste del ámbito de influencia de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, presenta cambios en la temperatura mínima anual –en el período 2016-2045 escenario RCP8.5 relativo al período histórico 1981-2005–, entre 1.5 y 2 °C; principalmente en las estaciones de Campo de Marte, Von Humboldt, Santa Eulalia, Chosica.

Este aumento futuro de la temperatura mínima anual en las cuencas bajas puede verse acentuado, entre otras causas por el impacto provocado por el proceso de urbanización acelerado. En la actualidad, existe una fuerte demanda por usos de suelo urbanísticos y el crecimiento de estas áreas, lo cual conlleva a considerar un forzamiento local por urbanización que podría estar contribuyendo al cambio de la temperatura mínima actual y futura, que no han sido evaluados en este estudio. Además de los gases de la industria creciente que podrían incidir en las emisiones de carbono en el escenario de alta emisión RCP8.5, acentuando el incremento de la temperatura mínima y máxima del aire.

La cuenca del río Rímac, en general, presenta un uso de suelo diversificado, que se extiende a lo largo del río, desde el centro de la ciudad de Lima y hacia el este, con el aprovechamiento de los suelos por la agricultura en determinadas zonas altas de la cuenca (Chosica, entre otros valles), irrigación y actividades mineras en las la cuenca alta (laguna Titicocha, San Mateo); además cuenta con una densidad urbana e industrial (Ate Vitarte y a lo largo del río Huaycoloro), así como un parque vehicular considerable. Este uso diversificado del suelo a lo largo de la cuenca puede estar contribuyendo en el incremento de la temperatura mínima actual y en la futura en el escenario proyectado, premisas que no han sido experimentadas en este estudio.

En el trimestre DEF, la temperatura mínima en toda el área de estudio aumentan muestra aumentos de 0.9 a 2.2 °C. En las cuencas bajas de los ríos Rímac, Lurín, Chillón (estaciones de Von Humboldt, Campo de Marte, Santa Eulalia, Chosica), las temperaturas aumentan de 0.9 a 1.6 °C. En las cuencas medias de los ríos Chillón (entre Huamantanga y Arahua), cuenca del Rímac (entre Canchacalla, Matucana,) y cuenca de Lurín (entre Santiago de Tuna y Antioquia), presentan aumentos de 1.6 y 2.0 °C. En la cuenca alta del río Mantaro, desde la región norte atravesando las localidades de Upamayo, Huenge, Yantac y Marcapomacocha, los cambios de la temperatura mínima oscilan también entre 1.6 y 2.0 °C

En el trimestre MAM, los cambios positivos o de aumento de la temperatura mínima varían entre 0.5 y 2.0 °C. En la cuenca baja se observa que los cambios de temperatura se incrementan con la altura (Chosica y Matucana). Sobre la cuenca media, los aumentos más débiles de temperatura mínima se observan en los alrededores de la localidad de Matucana perteneciente a la cuenca del río Rímac, las demás localidades ubicadas también sobre la cuenca media presentan valores de cambios alrededor de 1.6 °C. En la cuenca alta se observa cambios de la temperatura mínima entre 1.6 y 2.0 °C, excepto en la localidad de Marcapomacocha ubicado en la cuenca del Mantaro donde llegan hasta 1.6 °C. Los cambios más altos, con aumentos de 2 °C se presentan en las localidades de Chalilla (Cuenca alta del río Lurín) y Milloc (cuenca alta del río Rímac).

En el trimestre JJA, la temperatura mínima aumenta con la altura entre 1.6 y 2.8 °C, desde las cuencas bajas hacia las cuencas altas en dirección oeste-este. El trimestre JJA corresponde al período seco en las cuencas medias y altas. En la cuenca media los cambios varían entre 1.6 y 2.4 °C. Sobre la cuenca alta del área de estudio se presentan los cambios más altos del período estacional variando entre 2.0 y 2.8 °C; excepto en las localidades de Marcapomacocha (cuenca Alto Mantaro y Lachaqui (cuenca Chillón), con cambios de temperatura de 1.6 °C y 1.5 °C, respectivamente.

En el trimestre SON, en la cuenca baja del río Rímac, desde Lima Metropolitana hasta Chosica y Santa Eulalia, los cambios de temperatura son del orden de 1.6 °C; mientras que en la cuenca media llegan a 1.8 °C. Un panorama similar se observa en casi toda la cuenca alta del área de estudio, donde la localidad de Milloc presenta el mayor cambio de 2 °C, caso contrario ocurre cerca de la localidad de Marcapomacocha en donde presenta el cambio de la temperatura mínima de 0.3 °C.

En el período anual, la temperatura mínima 2016 - 2045, en el ámbito de influencia de SEDAPAL indica aumentos entre 1.1 y 2.2 °C. En la cuenca baja los cambios varían entre 1.5 y 1.7 °C presentándose los mayores cambios en las localidades de Santa Eulalia y Chosica. En la cuenca media los cambios varían entre 1.0 y 1.9 °C, donde la localidad de Matucana presenta menor cambio de temperatura de 1 °C con una diferencia de 0.7 °C respecto a las demás localidades representativas de la cuenca media. En la cuenca alta, los cambios varían entre 1.7 y 2.2 °C, el menor cambio se observa en la localidad de Marcapomacocha.

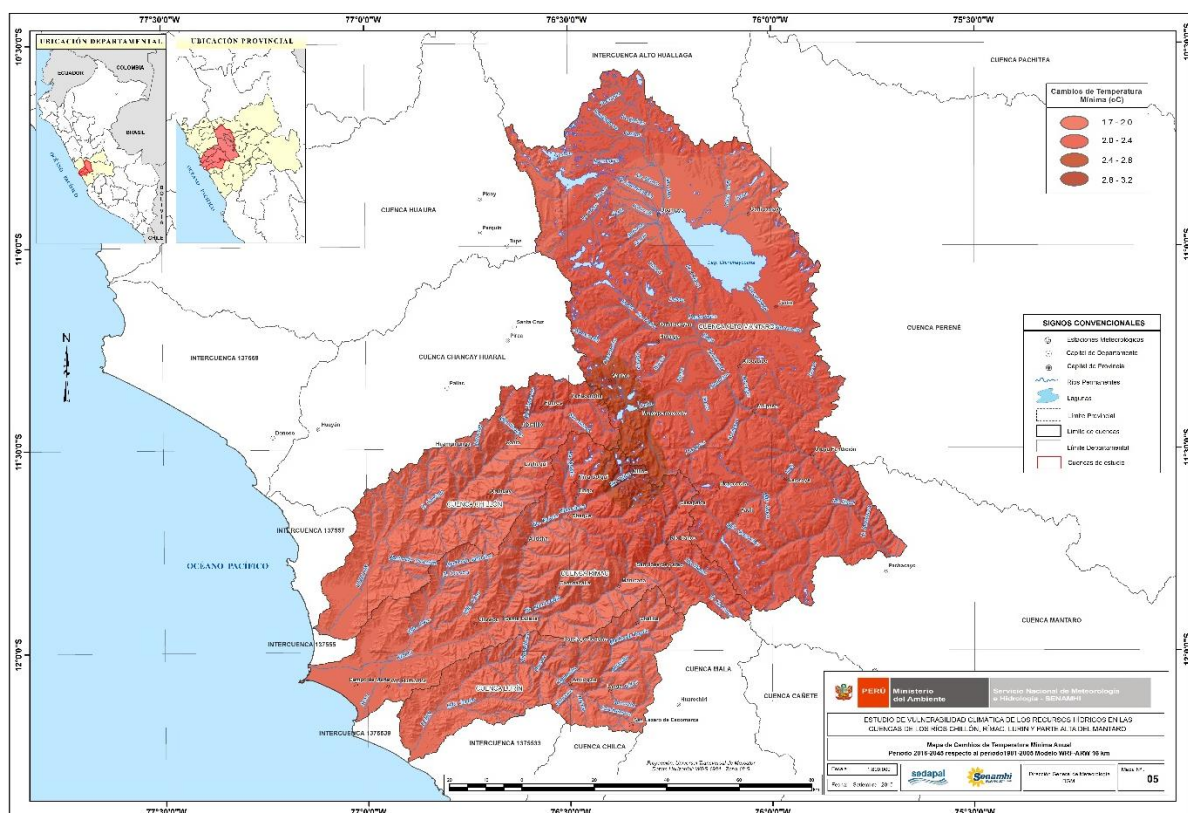


Figura 8-3 Cambios en la temperatura mínima anual 2016-2045 relativo a 1981-2005 escenario de altas emisiones RCP8.5

8.4 La incertidumbre de los escenarios de precipitación de alta resolución

Trimestre diciembre-enero-febrero

En la cuenca alta las anomalías de precipitación durante el periodo histórico (1981-2014) presenta oscilaciones de amplia frecuencia y gran amplitud que se superponen a una ligera tendencia de incremento, la mayor parte de la serie temporal se encuentra dentro de su variabilidad normal. Algunos años como 1991-1992 y 1999 están asociados a El Niño-Oscilación Sur (ENOS) de fase cálida y fría, respectivamente, con anomalías fuera del rango de su variabilidad climática normal.

Los escenarios de cambios de precipitación después del 2015 de acuerdo a cada modelo y cada escenario de emisión, son mostrados en la Figura 8-4. Los escenarios modelizados mediante método dinámico (modelo regional WRF-ARW 5km), estadístico de escala local para el escenario de alta emisión de GEI RCP 8.5 y los cambios de precipitación según el escenario de moderada emisión 4.5, todos forzados con el modelo global HadGEM; muestran una señal clara de incremento hasta el año 2030 para después presentar reducción de la precipitación dentro de su variabilidad normal. Mientras, las proyecciones de los modelos usados en AMICAF presentan una visible tendencia de reducción importante en el periodo 2016-2045.

El total de modelos indican cambios en la precipitación con una clara tendencia de reducción después del 2030, reduciéndose la incertidumbre. Sin embargo, la amplitud del cambio de la precipitación es de -150 a 90 mm, que indica una mayor incertidumbre en su magnitud del cambio.

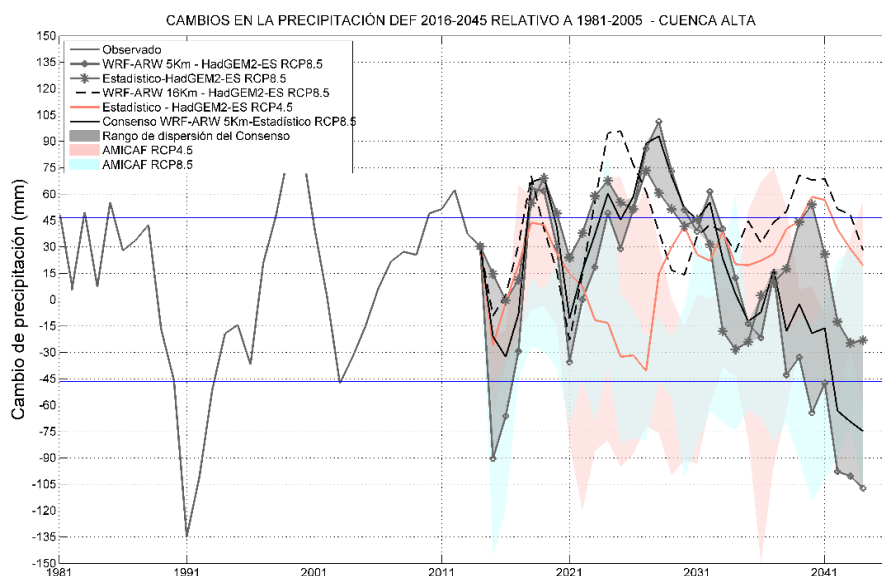


Figura 8-4 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca alta del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

En la cuenca media la serie histórica muestra un comportamiento similar a la cuenca alta, con una tendencia ligera de incremento con anomalías moduladas por El ENOS, los años 1991 y 1999.

Todos los modelos indican un acuerdo del incremento de la precipitación después del 2015, con una tendencia dentro de la variabilidad climática normal actual hasta el año 2030, para después mostrar una tendencia de reducción significativa, disminuyendo su incertidumbre.

Sin embargo, la magnitud de los cambios de precipitación es de -75 a 90 mm indicando una mayor incertidumbre asociada en la magnitud, Figura 8-5.

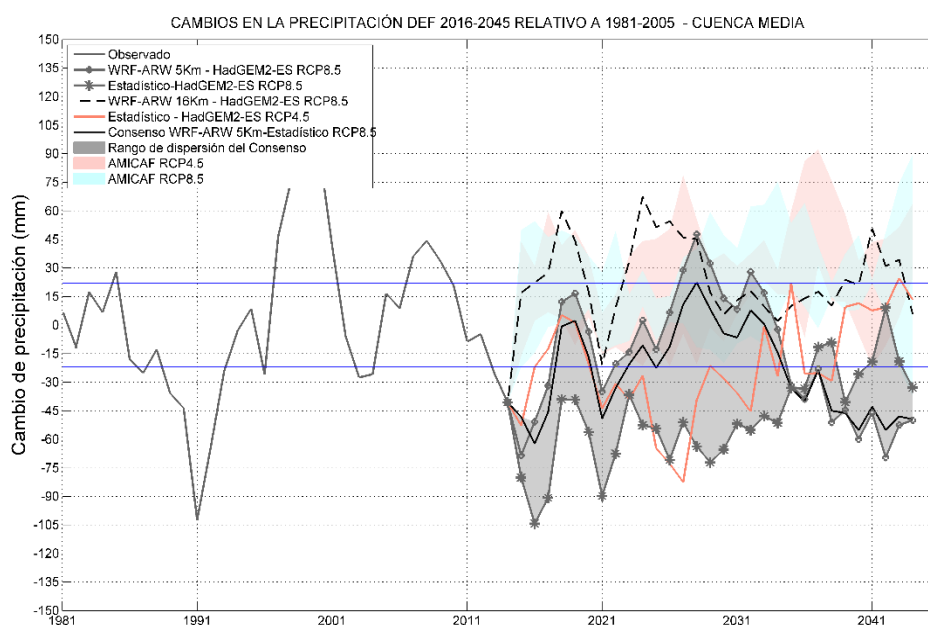


Figura 8-5 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

En la cuenca baja del área de influencia de SEDAPAL, la anomalía de precipitación muestra una tendencia visible de incremento en el periodo histórico, mientras que en los cambios futuros se identifica una reducción permanente de la precipitación dada por los modelos de fina resolución RCP8.5. Mientras que lo modelizado por AMICAF muestra una amplia dispersión de los cambios que están sujetos a una mayor incertidumbre en cuanto a magnitud, Figura 8-6.

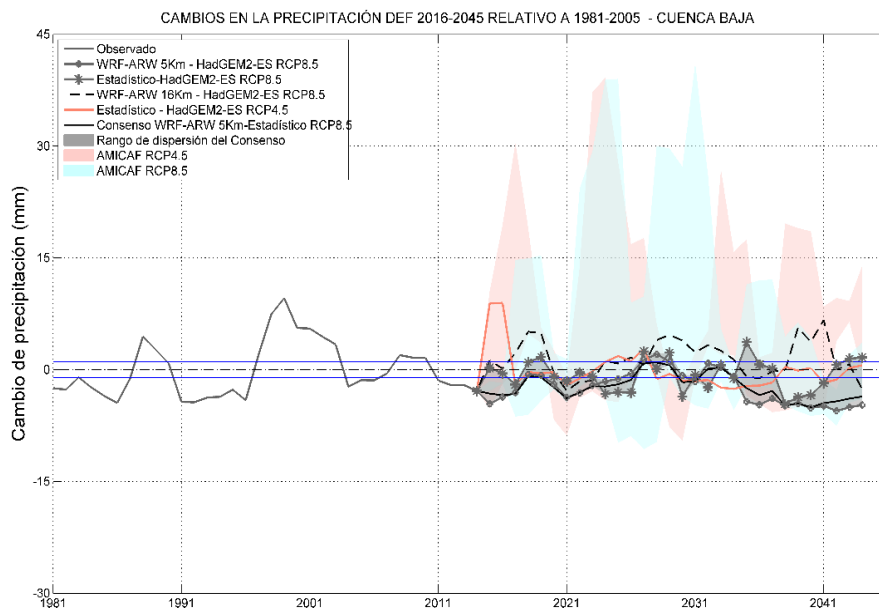


Figura 8-6 Anomalías de precipitación histórica y proyecciones de los cambios de precipitación para el trimestre DEF, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderadas emisiones RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

Trimestre junio-julio-agosto

Las Figura del 9.21 al 9.23 muestran las anomalías y los escenarios de cambios proyectados por los distintos modelos (forzados con HadGEM) y los modelos de AMICAF para los escenarios moderados y altos de emisión RCP4.5 y RCP 8.5, para el trimestre Junio-Julio-Agosto, periodo en el cual las precipitaciones en general son de escasas a nulas, en la región de estudio, principalmente en las cuencas medias y altas.

En la cuenca alta en el período histórico es visible la tendencia de reducción de la precipitación. Mientras, las proyecciones climáticas muestran en consenso el incremento de la precipitación no significativa es decir dentro de su variabilidad para los modelos Forzados con HadGEM y de mayor magnitud para los modelos de AMICAF que sobrepasan de manera significativa su variabilidad histórica.

En síntesis, con respecto a la tendencia todos los modelos indican aumentos, reduciéndose la incertidumbre. En cuanto a magnitud existe una mayor incertidumbre, cabe resaltar que es la época de escasas precipitaciones en la cuenca, Figura 8-7.

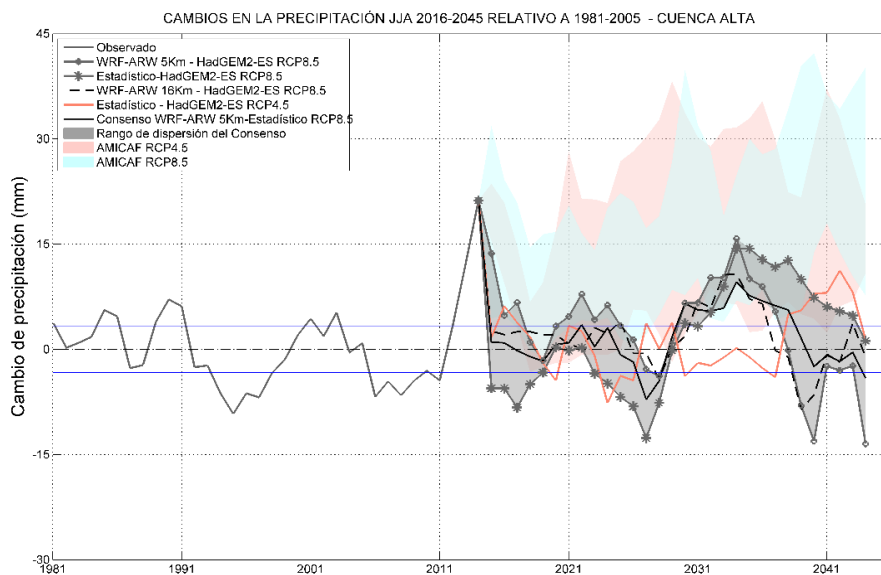


Figura 8-7 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca alta del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

En la cuenca media la anomalía de precipitación histórica presenta variabilidad casi nula, que refleja la gran sequedad de la cuenca media en esta época del año JJA. Al igual que la serie observada, la precipitación proyectada no muestra cambios significativos. Sin embargo, algunos valores de cambio por encima de la variabilidad natural se identifican en los modelo estadístico RCP4.5, RCP8.5 y en los modelos AMICAF para ambos escenarios. Aunque este último muestra una tendencia aparente de aumento de la precipitación, Figura 8-8.

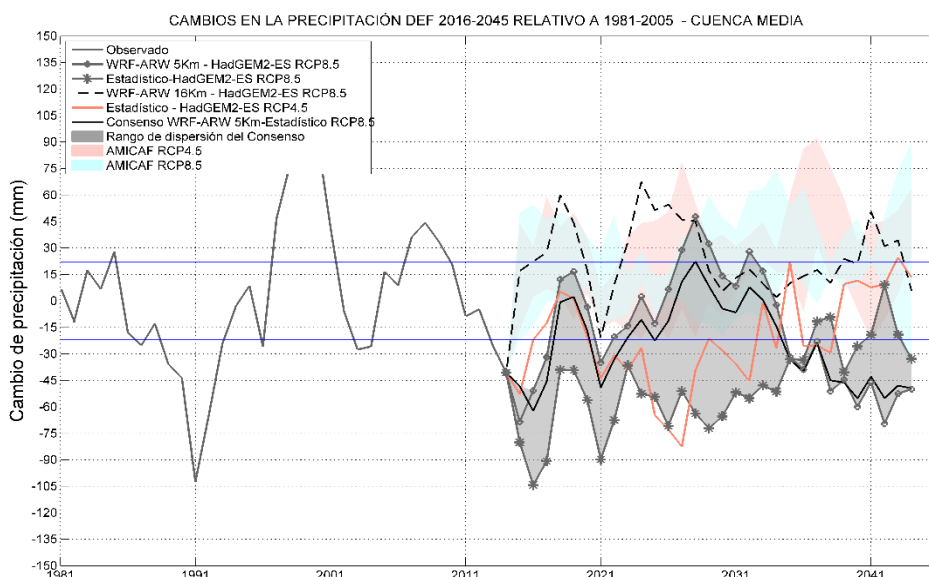


Figura 8-8 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca media del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

En la cuenca baja una tendencia de incremento es observada en la serie histórica 1981-2014 en JJA, época de llovizna en la cuenca baja. Mientras, las proyecciones climáticas indican cambios de la precipitación con tendencia de reducción presentes en todos los modelos usados, reduciéndose la incertidumbre.

El rango de los cambios de precipitación se encuentra entre -5 mm a 10 mm para todos los modelos, reduciéndose la incertidumbre en cuanto a la magnitud, Figura 8-9.

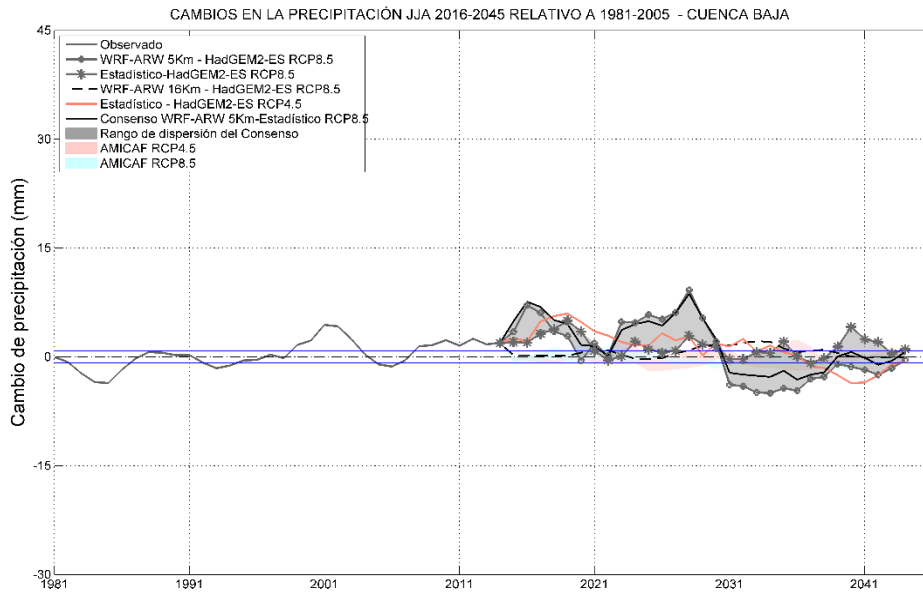


Figura 8-9 Anomalías de precipitación histórica y escenarios de cambios de precipitación para el trimestre JJA, 1981-2045 en promedio para la cuenca baja del área de influencia de SEDAPAL. Las series son el resultado de la modelización dinámica y estadística, ambos forzados con las salidas del modelo HadGEM-ES escenario de altas emisiones RCP8.5 en plomo y moderada emisión RCP4.5 en rosado. En líneas azules se muestra el rango de la variabilidad climática actual.

9 Capítulo IX: Resultados de la modelamiento de la disponibilidad hídrica, en el sistema de cuencas, basados en proyecciones del clima de alta resolución espacial

En este capítulo se aborda en detalle los resultados de las simulaciones de la disponibilidad hídrica basados en las proyecciones del clima futuro de alta resolución espacial, descritos en el capítulo IX. Las simulaciones climáticas de las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima fueron realizadas con el modelo regional WRF-ARW a 5 km de resolución, siendo el escenario de forzamiento radiativo el RCP 8.5, considerado como un escenario de altas emisiones. Cabe señalar que en una primera aproximación a la disponibilidad de agua futura se hicieron simulaciones hidrológicas, teniendo en consideración los escenarios climáticos obtenidos a resolución de 16 km, con resultados no muy coherentes en el comportamiento de los caudales futuros de las cuencas.

El análisis realizado en este capítulo incluye el procesamiento de información de los escenarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, así como la evapotranspiración, para obtener finalmente vía modelo hidrológico las simulaciones de la disponibilidad hídrica superficial a nivel de subcuencas para el horizonte centrado al año 2030. (2016-2045). La evaluación de los escenarios climáticos e hidrológicos ha sido realizado para dos escalas de tiempo: Considerando la climatología de todo el horizonte 2030 y considerando la climatología por quinquenios, que para nuestro análisis fueron en número de 6. En todos los casos este análisis es realizado a nivel de subcuencas a fin de visualizar con más detalle el impacto del cambio climático en el comportamiento espacio-temporal de las variables hidrológicas en las cuencas de estudio.

Para elaborar los escenarios de disponibilidad hídrica superficial se ha utilizado el modelo hidrológico GR2m el cual fue calibrado y validado con información histórica de caudales en distintos puntos de control hidrométrico ubicados en estas cuencas. Para las simulaciones de caudal se ha utilizado los escenarios de precipitación y temperatura obtenidos con simulaciones climáticas dinámicas elaborados a punto de estación por el Centro de Predicción Numérica del SENAMHI.

Los resultados de las simulaciones de la precipitación anual para el horizonte 2030 indica para la cuenca del río Chillón un déficit anual de -3 %; en la cuenca del río Rímac se esperaría un incremento de 4.5 %; en la cuenca del río Lurín se esperaría un déficit promedio de -11 % y en la cuenca del Mantaro, se esperaría un incremento promedio de 16.2 %.

Con respecto a la variable temperatura máxima, se tiene incrementos en todas las cuencas, así tenemos que en la cuenca del río Rímac se espera un incremento en la temperatura máxima anual de 1.9 °C; en la cuenca del Chillón 2.0 °C; en la cuenca Lurín 1.8 °C y en la cuenca del Mantaro 2.3 °C.

Con respecto a la variable temperatura mínima, de igual forma se espera incrementos en todas las cuencas; en la cuenca del Rímac este incremento en la temperatura mínima anual será de 1.2 °C; en la cuenca del río Chillón, 1.2 °C, en la cuenca de Lurín 1.7 °C y en la cuenca del Mantaro 1.6 °C.

Con respecto a la variable evapotranspiración potencial anual, se tiene incrementos en todas las cuencas; así tenemos que en la cuenca del río Rímac, el incremento será de 6.2 %, en la cuenca del río

Chillón, 5.2 %; en la cuenca de Lurín 5.5 % y en la cuenca del Mantaro 2.2 %.

Los resultados de las simulaciones hidrológicas de la disponibilidad hídrica futura, indica un escenario de mayor oferta de agua en la cuenca del Alto Mantaro para el horizonte 2030. En la cuenca del río Rímac, se esperaría un leve incremento en la disponibilidad anual del orden de 0.3 %; en la cuenca del río Chillón se esperaría superávit de 5.0 %; en la cuenca del río Lurín se esperaría una disminución de -5.0 %, mientras que en la cuenca del Alto Mantaro, la disponibilidad hídrica anual se incrementaría en 14%.

Cabe señalar que cuando se analiza la distribución espacial de la oferta hídrica, los cambios que se esperaría en la escurrentía no son homogéneos, dada la variabilidad espacial de la precipitación; lo cual implica que los impactos hidrológicos en algunas subcuencas están dando condiciones de mayor disponibilidad de agua y en otras, menor. Sólo en el caso de la cuenca del Mantaro, se tendrá un incremento generalizado de la disponibilidad hídrica superficial en todas las subcuencas.

Los escenarios climáticos e hidrológicos han sido agrupados en quinquenios, con los cuales se ha elaborado su respectiva climatología mensual y anual; este nivel de desagregación temporal utilizado ha permitido analizar las variables climáticas a escalas temporales de 5 años para evaluar los impactos en la disponibilidad de agua. De este análisis se concluye que el quinquenio más húmedo en las cuencas Chillón, Rímac y Lurín será el 2026-2027/2030-2031; mientras que en la cuenca del Mantaro será el 2026-2027/2030-2031. El período más seco será 2041-2042/2045-46 para todas las cuencas.

A continuación se pasa a describir los principales resultados obtenidos de la caracterización de los escenarios de disponibilidad hídrica por cuenca y subcuencas.

9.1 Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Chillón

La disponibilidad de agua anual en la cuenca integral del Chillón, evaluada en la estación hidrológica de Puente Magdalena, proyectada para el período 2016-2046, tendría un incremento de 4.7 %, con respecto al periodo de referencia 1970-2015.

A nivel de subcuencas, la subcuenca del Alto Chillón, sería afectada con una menor disponibilidad hídrica anual, con un déficit de -12.6 %, con respecto al período de referencia, tal como se ilustra en la Tabla 9-1.

Tabla 9-1 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca del Chillón

SUBCUENCAS	ANOMALIAS DE CAUDAL EN (%) EN SUBCUENCAS DEL CHILLON RESPECTO AL PERIODO 1970-2015						
	2016-2020	2021-2025	2026-2030	2031-2035	2035-2040	2041-2045	2016-2045
Alto Chillón	-4.7	-13.1	4.6	-12.8	-18.4	-31.1	-12.6
Gangay	0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
Medio Alto Chillón	3.3	1.7	1.1	0.4	1.6	2.8	1.8
Medio Bajo Chillón	3.2	6.8	4.9	-0.1	0.0	-23.5	-1.4
Medio Chillón	0.3	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1
Quisquichaca	29.3	16.1	38.4	13.7	2.9	-9.7	15.1
Socos	3.3	2.7	1.7	0.2	1.2	2.8	2.0
Río Seco	0.4	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0
Pte Magdalena	14.9	4.5	24.7	4.5	-3.6	-17.0	4.7

Fuente: Elaboración propia

La subcuenca del río Quisquichaca, sería impactada con la mayor disponibilidad hídrica anual, con un incremento de 15.1 %, respecto al período de referencia.

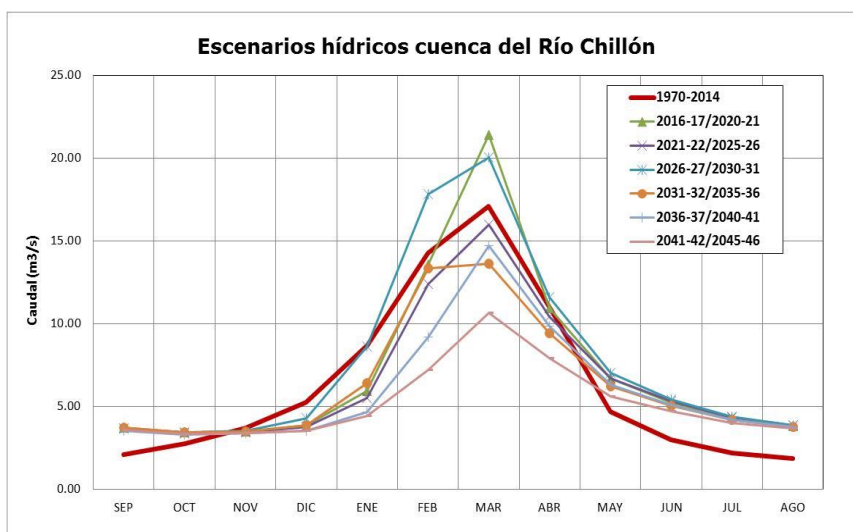


Figura 9-1 Ciclo anual de los caudales del río Chillón para diferentes quinquenios. En línea roja la climatología del período de referencia (1970-2015)

Para esta cuenca se tendría mayor incidencia de quinquenios donde la escorrentía anual presentará un comportamiento de normal a húmedo, siendo el quinquenio de mayor oferta hídrica 2026-2030, con un incremento de 24.7 %. El quinquenio de mayor deficiencia hídrica sería 2041-2045, período en el cual se esperaría un déficit hídrico anual de -17.0 %. Respecto al ciclo estacional de los caudales, que se presenta en el gráfico de la Figura 9-1 A nivel estacional en el trimestre más húmedo MAM, se observa la reducción de los picos de los caudales de avenidas hasta 46.0% en el quinquenio más seco 2041-2045. En el trimestre más seco JJA, se observa el incremento de los caudales de estiaje, en el rango de 77.0 % a 97.0 %.

9.2 Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac

Para la cuenca integral del río Rímac, los caudales simulados al 2030, en la estación de Chosica R-2, indican un leve incremento en la disponibilidad hídrica anual de 0.3 %.

A nivel de subcuencas, el mayor impacto en la disponibilidad de agua, asociado a déficit hídrico se presentaría en las subcuencas Chosica y Santa Eulalia, con -8 % y -7.8 %, de disminución de la oferta hídrica anual, respectivamente. Si bien la magnitud de este déficit que se espera en la subcuenca de Santa Eulalia está en el rango de su variabilidad normal, preocupa el hecho de que en los dos últimos quinquenios del período analizado la deficiencia hídrica anual alcanzaría valores de -13 % y -22 %, respectivamente, tal como se ilustra en la Tabla 9-2

La subcuenca Medio Alto Rímac, sería impactada con una mayor disponibilidad de agua en el 2030, con un incremento de 4 %, respecto del período de referencia.

El quinquenio más crítico por déficit hídrico en la cuenca integral del río Rímac se presentaría en el 2041-2046, con una disminución de la disponibilidad hídrica anual de -15.0 %. Por otro lado la mayor disponibilidad hídrica anual se presentaría en el quinquenio 2026-2031, donde la disponibilidad hídrica se incrementa en 13.3 %.

Respecto al ciclo estacional de los caudales del río Rímac, se observa en el gráfico de la Figura 9-2 una clara tendencia deficitaria de los caudales de avenidas que se proyecta hacia el 2030, estimándose para el período diciembre a abril una disminución de -12.0 %, con respecto al período de referencia. Caso contrario se observa en el patrón estacional de los caudales de estiaje, con una tendencia al incremento de los caudales del período junio-agosto de 36 %.

Tabla 9-2 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca del Rímac

SUBCUENCAS	ANOMALIAS DE CAUDAL (%) EN SUBCUENCAS DEL RIMAC RESPECTO AL PERIODO 1970-2014						
	2016-2021	2021-2026	2026-2031	2031-2036	2036-2041	2041-2046	2016-2046
Rímac	-3.9	-8.4	7.7	-4.9	-10.1	-28.8	-8.0
Alto Rímac	-1.5	-4.2	11.7	-1.0	-5.7	-19.9	-3.4
Jicamarca	0.6	0.2	0.4	0.3	0.1	0.1	0.3
Medio Alto Rímac	5.3	1.5	19.4	7.4	2.1	-12.2	3.9
Medio Bajo Rímac	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Medio Rímac	-2.2	-9.0	-1.5	-4.7	-8.8	-11.8	-6.3
Santa Eulalia	-2.0	-11.8	4.0	-1.8	-13.1	-22.2	-7.8
San J. de Parac	2.0	-1.2	11.7	1.7	-1.5	-13.3	-0.1
Rímac-Chosica	5.6	-2.0	13.3	3.7	-3.6	-15.3	0.3

Fuente: Elaboración propia

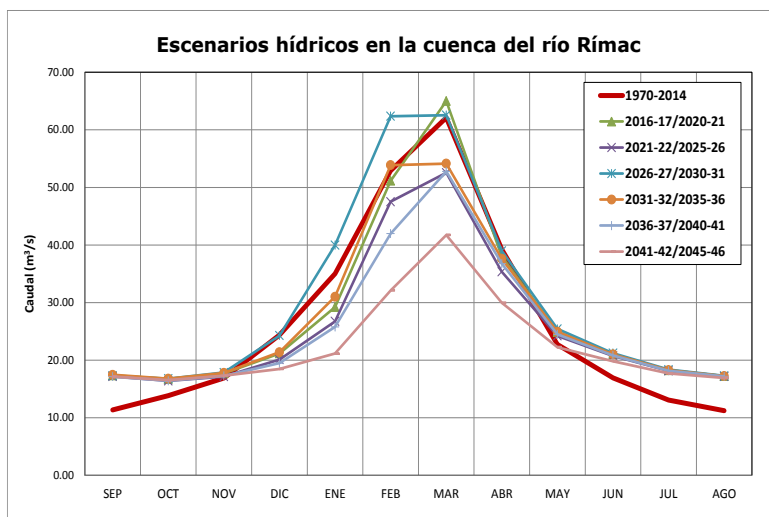


Figura 9-2 Ciclo anual de los caudales del río Rímac para diferentes quinquenios. En línea roja la climatología del período de referencia (1970-2015)

9.3 Los escenarios de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lurín

Para la cuenca integral del río Lurín, los caudales simulados al 2030, en la estación de Antapucro, indican una disminución de disponibilidad hídrica anual de -5.0 %.

A nivel de subcuencas, según la Tabla 9-3 se observa que las subcuencas de mayor rendimiento o producción hídrica serán afectadas por déficit hídrico, como son las subcuencas del Alto Lurín, Canchahuara, Chamagna y Medio Alto Lurín; en éstas se espera una disminución de la disponibilidad hídrica anual de -40.0 %, -26.0 %, -44.0 % y -42.0 %, respectivamente. La subcuenca medio Lurín será impactada con una mayor disponibilidad hídrica anual de 19.0 %.

El quinquenio más crítico por déficit hídrico en la cuenca integral del río Lurín se presentaría en el 2041-2046, con una disminución de la disponibilidad hídrica anual de -21.0 %. Por otro lado la mayor disponibilidad hídrica anual se presentaría en los quinquenios 2016-2021 y 2026-2031, donde la disponibilidad hídrica se incrementa en 7.0 %, en ambos períodos.

Respecto al ciclo estacional de los caudales del río Lurín, que se ilustra en la Figura 9-3, se observa un desplazamiento en los picos máximos, de febrero (histórico) a marzo (2030); por otro lado es clara la tendencia deficitaria de los caudales de avenidas del período diciembre-abril, con una disminución en la disponibilidad hídrica estimada en -24 %, con respecto al período de referencia.

Caso contrario se observa en el patrón estacional de los caudales de estiaje, con una tendencia al incremento de los caudales del período junio-agosto, estimado en 82%.

Tabla 9-3 Anomalías de caudal anual (%) proyectados en la cuenca Lurín

SUBCUENCAS	ANOMALIAS DE CAUDAL (%) EN SUBCUENCAS DE LURIN RESPECTO AL PERIODO 1970-2014						
	2016-2021	2021-2026	2026-2031	2031-2036	2036-2041	2041-2046	2016-2046
Alto Lurín	-30.8	-40.8	-39.6	-42.1	-33.1	-54.7	-40.2
Canchahuara	-16.8	-31.3	-11.5	-15.8	-36.1	-47.2	-26.4
Chalilla	24.1	-10.0	13.4	-3.8	-27.8	-9.0	-2.2
Chamagna	-38.6	-43.9	-36.9	-44.7	-50.3	-51.4	-44.3
Medio Lurín	31.2	19.9	34.9	18.2	6.3	3.9	19.1
Medio Alto Lurín	-35.1	-45.7	-32.7	-35.3	-47.7	-52.9	-41.6
Medio Bajo Lurín	8.3	4.3	8.8	2.4	-1.6	-1.7	3.4
Tinajas	8.6	5.4	8.4	4.7	2.7	2.2	5.3
Antapucro	6.9	-8.5	6.8	0.6	-12.7	-21.4	-4.7

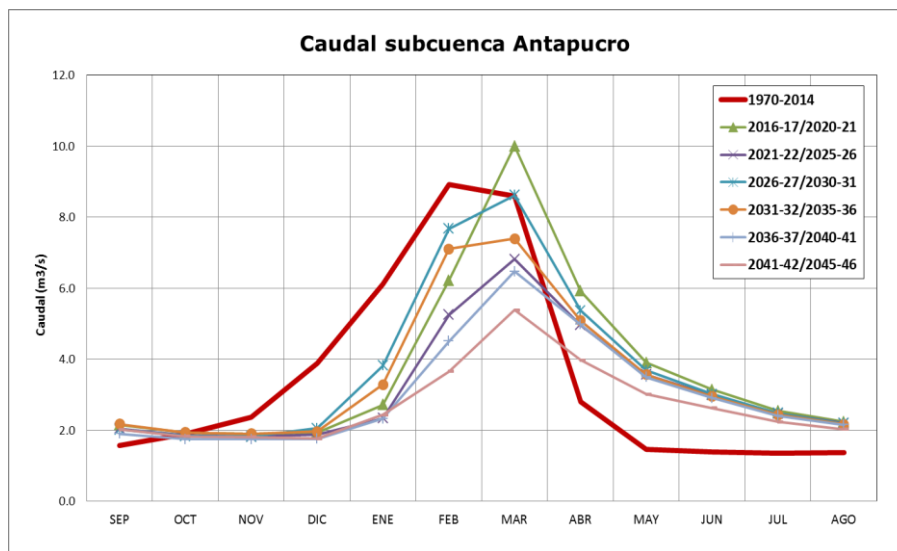


Figura 9-3 Ciclo anual de los caudales del río Lurín para diferentes quinquenios.

En línea roja la climatología del período de referencia (1970-2015)

10 Capítulo X: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo hidroclimático. Determinación y aplicación de índices para su evaluación, en el sistema de cuencas

En este capítulo se aborda el tema de la aplicación de índices para la calificación del peligro, la vulnerabilidad y riesgo asociada a sequías, erosión hídrica e inundaciones a nivel de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro. La metodología utilizada ha sido adaptada del Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). Por tanto el nivel de detalle del presente trabajo, inédito para estas cuencas, ha sido abordado por distrito, obteniendo finalmente la representación cartográfica de la valoración del peligro, vulnerabilidad y riesgo para cada una de las cuencas de estudio.

La exposición a las amenazas de origen natural que obedecen a factores hidrometeorológicos es alta en las cuencas de los ríos Rímac, Lurín, Chillón y parte alta del Mantaro. Esto incrementa los niveles de vulnerabilidad en función del tiempo, tomando en cuenta el incremento de su población y los asentamientos en zonas de alta exposición a inundaciones, deslizamientos y eventos extremos.

Los resultados del análisis realizado aterrizan finalmente a nivel de los distritos que forman parte de las cuencas de estudio, siguiendo el marco metodológico del modelo conceptual de la Figura 10-1

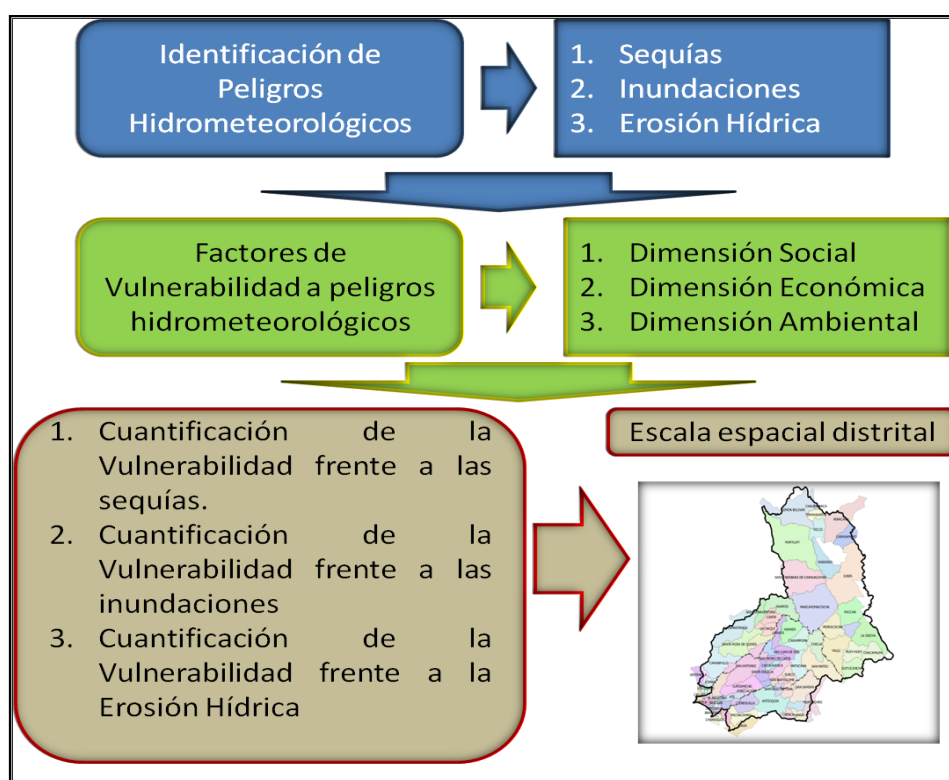


Figura 10-1 Modelo conceptual para el análisis del Peligro y Vulnerabilidad

Fuente: Elaboración propia

10.1 Peligro a Sequías

Los peligros de sequías en diferentes escalas de tiempo se identifican sobre la base de su porcentaje de ocurrencias. El porcentaje de ocurrencia de sequía se calcula tomando la relación de los sucesos de la sequía en cada paso de tiempo a las ocurrencias totales de sequía en la misma categoría de paso de tiempo. Teniendo en cuenta que nuestro objetivo es determinar el peligro de sequías por distrito, la interpolación para cada distrito se realizó utilizando el método de interpolación de IDW (pesos de inversos de la distancia), que fue desarrollado en el software R.

Los mapas de sequía moderada, severa y extrema de 6 y 12 meses (IPE-6 e IPE-12) se preparan y luego se integran por separado para estimar los mapas de peligros de sequía. Para determinar el peligro de sequías, en una primera etapa se calculan las frecuencias de sequías para las tres diferentes clasificaciones de sequía (moderada, severa y extrema). Luego se integran estos porcentajes de acuerdo a la Tabla 10-1. Después el índice de peligro de sequía (DHI) se calcula como:

$$DHI = (MD_r * MD_w) + (SD_r * SD_w) + (VSD_r * VSD_w)$$

Donde:

MD_r, son valores asignadas a las frecuencias de sequías moderada;

MD_w, es el peso asignado a la clase sequía moderada;

SD_r, son valores asignadas a las frecuencias de sequías severas;

SD_w, es el peso asignado a las sequías severas;

VSD_r, son valores asignadas a las frecuencias de sequías extremas;

SD_w, es el peso asignado a las sequías extremas.

Los mapas de riesgo de sequía resultantes se superponen en el mapa de los distritos de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón, Lurín y la parte alta del Mantaro. Es necesario precisar que al estar las provincias de Lima y Callao localizadas en el desierto, no se estimó las sequías en estas dos provincias. Finalmente, el DHI se obtendrá para cada distrito.

Tabla 10-1 Peso y peso de frecuencia asignado a cada clase de sequía en función de los porcentajes de frecuencias.

Severidad de la sequía	Peso	Frecuencia (%)	Peso a la Frecuencia
Moderada	1	<=9.0	1
		9.1–10.0	2
		10.1–11.0	3
		>=11.1	4
Severo	2	<=3.5	1
		3.6–4.5	2
		4.6–5.5	3
		>=5.6	4
Extremo	3	<=1.5	1
		1.6–2.0	2
		2.1–2.5	3
		>=2.6	4

10.2 Índice de riesgo de sequía (irs o dhi)

Por sus siglas en inglés Drought Hazard Index (DHI) o el Índice de Riesgo de Sequía (IRS), se basa en la probabilidad de lluvias, en cualquier período de tiempo. Fue desarrollado por McKee et al. (1993) para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples periodos de tiempo. Estos periodos reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos.

Las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías pluviométricas en un intervalo de tiempo relativamente corto, mientras que el agua subterránea, el caudal de los cursos superficiales y el agua embalsada reflejan tales anomalías a largo plazo, razón por la cual, originalmente, el IRS se calculaba para periodos de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

El IRS está formado por cuatro componentes: precipitación media anual corregida en función de la temperatura media anual, estacionalidad pluviométrica, variabilidad y persistencia de la sequía. El IRS es adaptable a cada región en particular y su principal fortaleza es la habilidad de tomar en cuenta tanto el clima como los factores de suministro de agua.

Una sequía se produce siempre que el IRS sea permanentemente negativo y alcance una intensidad de $-1,0$, o menor; el fenómeno finaliza cuando el IRS se hace positivo. Cada fenómeno de sequía, por lo tanto, tiene una duración definida por su comienzo y su final, y una intensidad diferente para cada mes que dure el fenómeno. La magnitud de la sequía puede también ser la magnitud acumulada de la sequía, es decir, la suma de todos los valores positivos del IRS durante los meses que ésta dura.

Las ventajas de este indicador son: que el IRS se puede calcular para diferentes periodos de tiempo, que da una señal de alerta temprana de la sequía, que ayuda a valorar la intensidad de la misma y que es menos complejo que el Indicador de Palmer. La desventaja es que los valores del IRS se basan en datos previos, que pueden sufrir cambios.

La Tabla 10-2 muestra la clasificación de sequías por el método de SPI definida por McKee et al. (1993). LA misma tabla se usa para la clasificación del DHI.

Tabla 10-2 Clasificación de sequías.

Índice de SPI	Clasificación
2 o mayor	Extremadamente húmedo
$1.50 < SPI \leq 2.00$	Muy húmedo
$1.00 < SPI \leq 1.50$	Moderadamente húmedo
$-1.00 < SPI \leq 1.00$	Normal
$-1.50 < SPI \leq -1.00$	Moderadamente seco
$-2.00 < SPI \leq -1.50$	Muy seco
-2 o menor	Extremadamente seco

10.3 Peligro a erosión hídrica

Considerando los datos disponibles, las dimensiones de la cuenca y el propósito de estudio, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (por sus siglas en inglés USLE) (Renard et al., 1997) es el modelo de simulación empírico más usado para estimar el riesgo de erosión.

Esta ecuación es una revisión de USLE (Wischmeier & Smith 1978), donde se mantiene la misma estructura general, pero se modificó la forma de obtención de cada uno de los factores del modelo (Renard, et al., 1997). Aunque fue desarrollado para pequeñas pendientes, USLE y sus resultados han sido incorporados en aplicaciones de modelación de erosión y transporte de sedimento a escala de cuenca. Los requerimientos de datos de entrada son bajos, comparado con muchos otros modelos: lluvia anual, un estimado de la erosibilidad, información de la cobertura de suelo y la topografía.

Dando como resultado una estimación de la pérdida de suelo anual promedio (Merritt, et al., 2003). USLE ha sido el modelo empírico más usado a nivel mundial para predecir la erosión de los suelos (Nearing, et al., 1994; Merritt, et al., 2003).

$$\varepsilon = R * K * LS * C * P$$

Donde:

- ε** es el promedio de la pérdida de suelo anual estimada por unidad de área, (t/ha.año),
- R** es el factor erosividad de las precipitaciones (MJ.mm/ha.h.año),
- K** es el factor erodibilidad del suelo (t.ha.h/ha.MJ.mm),
- LS** es el factor largo y grado de pendiente,
- C** es el factor manejo de la cultivos y
- P** es el factor prácticas de medidas antierosivas. Los últimos tres factores son adimensionales.

10.4 Peligro a Inundaciones fluviales

De acuerdo al CENEPRED (2013) los parámetros de evaluación de inundaciones deben ser la Geología, la Geomorfología, la Meteorología, la Hidrología y la Hidrografía. Dentro de este marco, Manfreda et al. (2007, 2011) han desarrollado un procedimiento simple que explota la correlación entre la exposición de inundación y un índice topográfico modificado (ITM), calculado sobre la base del modelo digital de elevación y fuertemente influenciada por la resolución de este último.

10.4.1 Índice Topográfico de Humedad (ITH)

Este índice está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucho más fácilmente en escorrentía. Así, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de un modelo de elevación digital (MED). Una de las grandes ventajas que ofrecen los MED es que contienen información totalmente distribuida, espacialmente continua y fácilmente transformable, de allí que la precisión y robustez del ITH depende

de la exactitud y escala del MED utilizado para su generación.

La viabilidad de asociar procesos geomorfológicos con métodos como el ITH. Maneta y Schnabel (2003), plantea que la variabilidad espacial y temporal de la distribución de la humedad en el suelo es producto de una cantidad de factores que lo determinan y que se influyen mutuamente, pero agrega que autores como Beven & Kirkby (1979), Florinsky et al. (2002); Qiu et al. (2001) y Western et al. (1999), coinciden en considerar el relieve como el factor determinante de los patrones de humedad del suelo, dando lugar al desarrollo de índices o métodos que ponen en relación las formas del terreno con propiedades del suelo. De allí que, el ITH sea un factor fundamental en el modelado de procesos geomórficos por contribuir a su cuantificación, considerando igualmente que el análisis cuantitativo de la geomorfología no solo describe las características topográficas sino revela también procesos geomorfológicos (Dong et al., 2008).

El ITH combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de la misma, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como (Sorensen et al., 2005):

$$\ln\left(\frac{\alpha f}{\tan\beta}\right)$$

Donde:

αf , es el área local drenada para un punto de cálculo, y
 $\tan\beta$, es la pendiente direccional de la celda de interés.

Este modelo expresa parcialmente el volumen relativo y la cantidad de movimiento del flujo que pasará por cada punto del terreno. A mayor área drenada y menor pendiente se incrementa la concentración y saturación hídrica en los suelos, áreas con valores altos de ITH son zonas de concentración del escurrimiento (Alcántara-Ayala, 2000).

10.4.2 Índice Topográfico Modificado (ITM)

La exposición a las inundaciones puede definirse por medio de un Índice Topográfico Modificado, este índice ha demostrado ser un buen indicador para la delimitación de las zonas expuestas a las inundaciones. Su capacidad se ha mejorado a través de una modificación que dio lugar a un nuevo índice topográfico (Manfreda et al. 2008). Esto se obtiene cambiando el peso relativo de la zona de drenaje, con una exponente n.

Este índice se define de la siguiente forma:

$$TI_n = \log\left[\frac{a_d^n}{\tan(\beta)}\right]$$

Donde:

a_d^n = área drenada por unidad de longitud de contorno (este valor depende de la resolución del MDE);

y $\tan(\beta)$ = pendiente local. El índice topográfico modificado puede proporcionar una descripción preliminar de la porción de una cuenca expuesta a inundarse a través de una metodología sintética que asume a las zonas expuestas a la inundación como un valor superior a un threshold (T). El threshold T y n pueden estimarse sobre la base de un mapa de inundación obtenido con la simulación hidráulica. La calibración de estos dos parámetros se puede conseguir mediante la adopción de dos funciones de error que comparan las áreas inundadas obtenidos a partir de dos métodos diferentes suponiendo que los resultados de simulación hidráulica como la correcta.

Los errores se definen como:

$$Er_1 = \frac{S_{sim} \cap NS_{TI}}{S_{sim}} * 100 \quad Er_2 = \frac{(NS_{sim} \cap S_{TI})}{NS_{sim}} * 100$$

Donde:

S_{SIM} e S_{TI} = conjuntos de dominio predijeron como inundada y por el procedimiento propuesto; N_{sim} y N_{STI} = predijeron regiones como nonflooded por el modelo hidráulico.

Los errores Er_1 y Er_2 pueden ser definidos como errores falsos negativos y falsos positivos, respectivamente. Desde otro punto de vista, Er_1 se define en relación a la correcta identificación de las zonas de inundación, y Er_2 representa el error debido a la sobreestimación del método. En particular, esta función se utiliza en un algoritmo iterativo que busca un mínimo que proporciona la estimación de los parámetros citados. Afortunadamente, esta función tiene sólo un mínimo, por lo que los dos parámetros se pueden determinar de manera inequívoca.

10.5 Vulnerabilidad

La metodología utilizada para el análisis de vulnerabilidad es una modificación a la metodología utilizada en el PLANGRACC-A 2012, que integra indicadores sociales, económicos y productivos ligados a la actividad económica preponderante, siendo en nuestra área de estudio la actividad agropecuaria, una breve descripción de sus parámetros se contempla en líneas posteriores. El modelo conceptual se muestra en la siguiente Figura 10-2

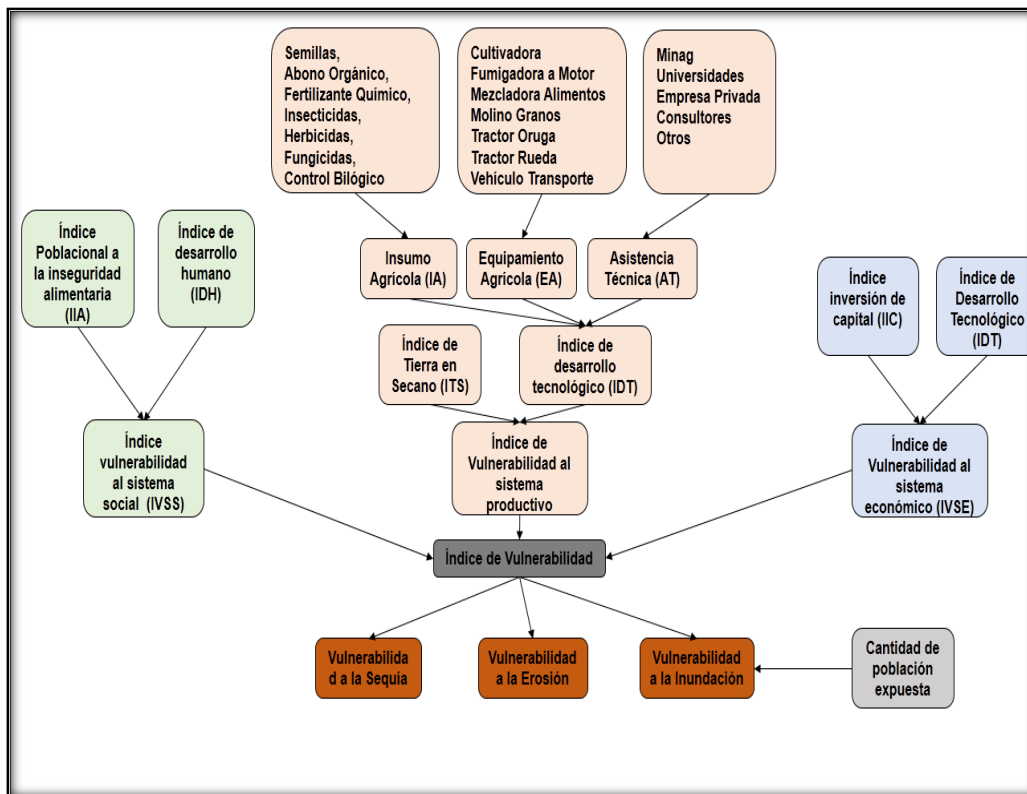


Figura 10-2 Modelo Conceptual para el cálculo de la vulnerabilidad

10.5.1 Índices de vulnerabilidad

Índice de Vulnerabilidad del Sistema Social (IVSS)

Este índice da como resultado la población en riesgo asociado a posibles impactos negativos del clima, combina la población vulnerable a la inseguridad alimentaria y su desarrollo humano, con la actividad económica principal en este caso la agricultura.

$$IVSS = \left(IPVIA + \frac{1 - IDH}{2} \right) * Super. Agrícola$$

Donde:

IPVIA: Índice de Población Vulnerable a la Inseguridad Alimentaria (MINDES),
IDH: Índice de Desarrollo Humano (PNUD – INEI).

Índice de Vulnerabilidad del Sistema Productivo (IVSP)

Este índice refleja la vulnerabilidad del sistema productivo, el cual disminuye cuando más tecnificados, infraestructura de riego, etc., siendo ponderado con la superficie agrícola para ver el grado de exposición.

$$IVPS = \left(ITS + \frac{1 - IDT}{2} \right) * Super. Agrícola$$

Donde:

ITS: Índice de tierras en seco

IDT: Índice de desarrollo tecnológico.

Índice de Desarrollo tecnológico (IDT)

Es índice fue generado a nivel distrital en el censo agropecuario del 2012, es calculado como la media aritmética de los siguientes indicadores:

- **Insumo Agrícola (IA):** Semillas, abono orgánico, fertilizante químico, insecticidas, herbicidas, fungicidas, control biológico, etc.
- **Equipamiento Agrícola (EA):** Cultivadora, Fumigadora a Motor, Mezcladora Alimentos, Molino Granos, Tractor Oruga, Tractor Rueda, Vehículo Transporte.
- **Asistencia Técnica Agrícola (ATA):** MINAG, Universidades, Empresa Privada, Consultores, Otros.
- **Índice Tierras en Secano (ITS):** Se calcula la como la proporción entre la superficie agrícola en la que el ser humano no contribuye con agua, sino que utiliza únicamente la que proviene de la lluvia sobre la cantidad de agricultura total.

Índice de Vulnerabilidad del Sistema Económico (IVSE)

Este índice refleja la vulnerabilidad del sistema económico, el cual disminuye cuando hay mayor economía dedica a la actividad agrícola, y mayor desarrollo tecnológico.

$$IVSE = (1 - IIC) + \left(\frac{1 - IDT}{2} \right) * Super. Agrícola$$

Donde:

IIC: Índice de Inversión de Capital

IDT: Índice de Desarrollo Tecnológico

10.5.2 Estratificación de la vulnerabilidad

Para fines de la evaluación de riesgos, las zonas de vulnerabilidad pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyas características y su valor correspondiente se detallan en la siguiente matriz de vulnerabilidad (CENEPRED, 2013).

10.6 Estimación del Riesgo

Una vez identificados los peligros (P) a los que está expuesto el centro poblado, y realizado el análisis de vulnerabilidad (V), se procede a una evaluación conjunta, para calcular el riesgo (R), es decir estimar la probabilidad de pérdidas y daños esperados (personas, bienes materiales, recursos económicos) ante la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o tecnológico. El cálculo del riesgo corresponde a un análisis y una combinación de datos teóricos y empíricos con respecto a la probabilidad del peligro identificado, es decir, la fuerza e intensidad de ocurrencia; así como el análisis de vulnerabilidad o la capacidad de resistencia de los elementos expuestos al peligro (población, viviendas, infraestructura, etcétera).

La metodología seguida para la estimación del riesgo puede verse en el siguiente diagrama conceptual. Se estima el riesgo según la Figura 10-3; la vulnerabilidad total es un promedio aritmético de las vulnerabilidades económicas, sociales y productivas, la información de peligro fue categorizada mediante la técnica de clustering K-means definiéndose 4 clúster “Muy Alto”, “Alto”, “Medio” y “Bajo”.

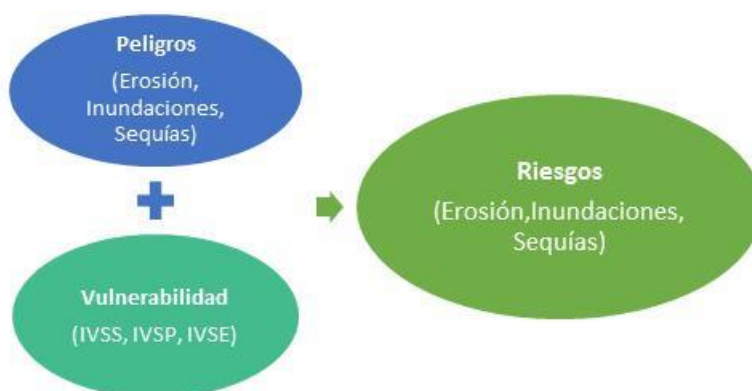


Figura 10-3 Metodología para la Estimación del Riesgo hidroclimático

Nivel	Descripción	Rango
VULNERABILIDAD MUY ALTA	<i>Grupo Etario:</i> de 0 a 5 años y mayor a 65 años. Servicios educativos expuestos: mayor a 75 % del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: mayor a 60 % del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: estera/cartón. Estado de conservación de la edificación: Muy malo. Topografía del terreno: $50\% \leq P \leq 80\%$. Configuración de elevación de la edificación: 5 pisos. Incumplimiento de procedimientos constructivos de acuerdo a normatividad vigente: mayor a 80 %. Localización de la edificación: Muy cerca 0 a 0.20 km. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75 % del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: mayor a 75 %. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: mayor a 75 %. Servicio de empresas de transporte expuesto: mayor a 75%. área agrícola: mayor a 75 %. Servicios de telecomunicación: mayor a 75 %. Antigüedad de construcción: de 40 a 50 años. PEA desocupada: escaso acceso y la no permanencia a un puesto de trabajo. Organización y capacitación institucional: presentan poca efectividad en su gestión, desprestigio y aprobación popular. Deforestación: áreas sin vegetación, terrenos eriazos. Flora y fauna: 76 a 100 % expuesta. Pérdida de suelo: erosión provocada por lluvias. Pérdida de agua: demanda agrícola y pérdida por contaminación.	$0.260 \leq R < 0.503$
VULNERABILIDAD ALTA	<i>Grupo Etario:</i> de 5 a 12 años y de 60 a 65 años. Servicios educativos expuestos: menor o igual a 75 % y mayor a 50 % del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 60 % y mayor a 35 % del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: madera. Estado de conservación de la edificación: Malo. Topografía del terreno: $30\% \leq P \leq 50\%$. Configuración de elevación de la edificación: 4. Actitud frente al riesgo: escasamente provisoria de la mayoría de la población. Localización de la edificación: cercana 0.20 a 1 km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 75 % y mayor a 50 % del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75 % del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: menor a 75 % y mayor a 50 %. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: menor o igual 75 % y mayor a 50 %. Servicio de empresas de transporte expuesto: menor o igual 75 % y mayor a 50 %. Servicios de telecomunicación: menor o igual 75 % y mayor a 50 %. Área agrícola: menor o igual 75 % y mayor a 50 %.	$0.134 \leq R < 0.260$
VULNERABILIDAD MEDIA	<i>Grupo Etario:</i> de 12 a 15 años y de 50 a 60 años. Servicios educativos expuestos: menor o igual a 50 % y mayor a 25 % del servicio educativo expuesto. Servicios de salud terciarios expuestos: menor o igual a 35 % y mayor a 20 % del servicio de salud expuesto. Materia de construcción: quincha (caña con barro). Estado de conservación de la edificación: Regular. Topografía del terreno: $20\% \leq P \leq 30\%$. Actitud frente al riesgo: parcialmente provisoria de la mayoría de la población, asumiendo el riesgo sin implementación de medidas para prevenir. Localización de la edificación: medianamente cerca 1 a 3 km. Servicios de agua y desagüe: menor o igual 50 % y mayor a 25 % del servicio expuesto. Servicios de agua y desagüe: mayor a 75 % del servicio expuesto. Servicio de empresas eléctricas expuestas: menor o igual a 25 % y mayor a 10 %. Servicio de empresas de distribución de combustible y gas: menor o igual a 50 % y mayor a 25 %.	$0.068 \leq R < 0.134$

Figura 10-4 Matriz de Vulnerabilidad

10.7 Mapa de riesgos

Un Mapa de Riesgos es un gráfico, un croquis o una maqueta, donde se identifican y se ubican las zonas de la comunidad, las casas o las principales obras de infraestructura que podrían verse afectadas si ocurriera una inundación, un terremoto, un deslizamiento de tierra o una erupción volcánica. En el Mapa de Riesgos se utilizan símbolos o dibujos, para identificar determinados lugares que sirven de puntos de referencia, como por ejemplo la Cruz Roja, el centro de salud, la Policía, los bomberos, las iglesias, el edificio de la municipalidad, el río que pasa por la comunidad, la escuela, etcétera. Se usan también colores para señalar mejor las zonas de riesgo específico que tienen determinados lugares, por ejemplo, el color rojo para zonas de mucho peligro, el color amarillo para zonas en riesgo, el color verde para zonas sin riesgo. En las Tablas del 10-3 al 10-7 se ilustra parcialmente los resultados parciales obtenidos con la aplicación de los índices asociados a peligros de erosión, sequías e inundaciones antes descritos.

Tabla 10-3 Niveles de Peligro a erosión hídrica por distrito

DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	PELIGRO A LA INUNDACIÓN
SAN ANDRES DE TUPICOCHA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
RICARDO PALMA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA CRUZ DE COCACHACRA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
HUAROCHIRI	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LANGA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CUENCA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LAHUAYTAMBO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
ANTIOQUIA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTIAGO DE TUNA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN BARTOLOME	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN DAMIAN	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN MATEO DE OTAO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA EULALIA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SUITUCANCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN JUAN DE IRIS	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN ANTONIO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CHACAPALPA	YAULI	JUNIN	BAJO
HUAY-HUAY	YAULI	JUNIN	BAJO
HUACHUPAMPA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
ARAHUAY	CANTA	LIMA	BAJO
YAULI	YAULI	JUNIN	BAJO
CHICLA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CAMPOMA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	BAJO
LACHAQUI	CANTA	LIMA	BAJO
SANTA ROSA DE SACCO	YAULI	JUNIN	BAJO
HUANZA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LA OROYA	YAULI	JUNIN	BAJO
LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
HUAMANTANGA	CANTA	LIMA	BAJO
CANTA	CANTA	LIMA	BAJO
MOROCOCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SAN BUENAVENTURA	CANTA	LIMA	BAJO
PACCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
HUAROS	CANTA	LIMA	BAJO
MARCAPOMACOCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SANTA BARBARA DE CARHUACAYAN	YAULI	JUNIN	BAJO
JUNIN	JUNIN	JUNIN	MEDIO
ONDORES	JUNIN	JUNIN	MEDIO
CARHUAMAYO	JUNIN	JUNIN	ALTO
VICCO	PASCO	PASCO	MUY ALTO
HUAYLLAY	PASCO	PASCO	MEDIO
TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	MEDIO
CHAUPIMARCA	PASCO	PASCO	MEDIO
NINACACA	PASCO	PASCO	MEDIO
SIMON BOLIVAR	PASCO	PASCO	ALTO
LIMA	LIMA	LIMA	MEDIO
CALLAO	CALLAO	CALLAO	ALTO

Tabla 10-4 Niveles de Peligro a Inundación fluvial por distrito

DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	PELIGRO A LA INUNDACIÓN
SAN ANDRES DE TUPICOCHA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
RICARDO PALMA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA CRUZ DE COCACHACRA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
HUAROCHIRI	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LANGA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CUENCA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LAHUAYTAMBO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
ANTIOQUIA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTIAGO DE TUNA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN BARTOLOME	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN DAMIAN	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN MATEO DE OTAO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA EULALIA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SUITUCANCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN JUAN DE IRIS	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SAN ANTONIO	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CHACAPALPA	YAULI	JUNIN	BAJO
HUAY-HUAY	YAULI	JUNIN	BAJO
HUACHUPAMPA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
ARAHUAY	CANTA	LIMA	BAJO
YAULI	YAULI	JUNIN	BAJO
CHICLA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
CAMPOMA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	BAJO
LACHAQUI	CANTA	LIMA	BAJO
SANTA ROSA DE SACCO	YAULI	JUNIN	BAJO
HUANZA	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
LA OROYA	YAULI	JUNIN	BAJO
LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	BAJO
HUAMANTANGA	CANTA	LIMA	BAJO
CANTA	CANTA	LIMA	BAJO
MOROCOCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SAN BUENAVENTURA	CANTA	LIMA	BAJO
PACCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
HUAROS	CANTA	LIMA	BAJO
MARCAPOMACOCHA	YAULI	JUNIN	BAJO
SANTA BARBARA DE CARHUACAYAN	YAULI	JUNIN	BAJO
JUNIN	JUNIN	JUNIN	MEDIO
ONDORES	JUNIN	JUNIN	MEDIO
CARHUAMAYO	JUNIN	JUNIN	ALTO
VICCO	PASCO	PASCO	MUY ALTO
HUAYLLAY	PASCO	PASCO	MEDIO
TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	MEDIO
CHAUPIMARCA	PASCO	PASCO	MEDIO
NINACACA	PASCO	PASCO	MEDIO
SIMON BOLIVAR	PASCO	PASCO	ALTO
LIMA	LIMA	LIMA	MEDIO
CALLAO	CALLAO	CALLAO	ALTO

Tabla 10-5 Niveles de Peligro a Sequía (SPI-6) por distrito

DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	SPI-6 (moderada)	SPI-6 (severa)	SPI-6 (extrema)
SAN ANDRES DE TUPICOCHA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
RICARDO PALMA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MEDIO
SANTA CRUZ DE COCACHACRA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
HUAROCHIRI	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MUY ALTO	ALTO
LANGA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
CUENCA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	ALTO
LAHUAYTAMBO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
ANTIOQUIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	ALTO
SANTIAGO DE TUNA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
SAN BARTOLOME	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
SAN DAMIAN	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SAN MATEO DE OTAO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SANTA EULALIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MEDIO
SUITUCANCHA	YAULI	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	ALTO
SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SAN JUAN DE IRIS	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
SAN ANTONIO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	ALTO
CHACAPALPA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO
HUAY-HUAY	YAULI	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	ALTO
HUACHUPAMPA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
ARAHUAY	CANTA	LIMA	MUY ALTO	MEDIO	MUY ALTO
YAULI	YAULI	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	ALTO
CHICLA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
CARAMPOMA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	ALTO	ALTO	MUY ALTO
LACHAQUI	CANTA	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
SANTA ROSA DE SACCO	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO
HUANZA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
LA OROYA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO
LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
HUAMANTANGA	CANTA	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
CANTA	CANTA	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
MOROCOCHA	YAULI	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	ALTO
SAN BUENAVENTURA	CANTA	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
PACCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	ALTO
HUAROS	CANTA	LIMA	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
MARCAPOMACOCHA	YAULI	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
SANTA BARBARA DE CARHUACAYAN	YAULI	JUNIN	ALTO	ALTO	MUY ALTO
JUNIN	JUNIN	JUNIN	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
ONDORES	JUNIN	JUNIN	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
CARHUAMAYO	JUNIN	JUNIN	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
VICCO	PASCO	PASCO	ALTO	ALTO	MUY ALTO
HUAYLLAY	PASCO	PASCO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
CHAUPIMARCA	PASCO	PASCO	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
NINACACA	PASCO	PASCO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SIMON BOLIVAR	PASCO	PASCO	MEDIO	MUY ALTO	MUY ALTO
LIMA	LIMA	LIMA	BAJO	BAJO	BAJO
CALLAO	CALLAO	CALLAO	BAJO	BAJO	BAJO

Tabla 10-6 Niveles de Peligro a Sequía (SPI-12) por distrito

DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	SPI-12 (moderada)	SPI-12 (severa)	SPI-12 (extrema)
SAN ANDRES DE TUPICOCHA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	ALTO
RICARDO PALMA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MEDIO
SANTA CRUZ DE COCACHACRA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
HUAROCHIRI	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
LANGA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
CUENCA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MUY ALTO	ALTO
LAHUAYTAMBO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
ANTIOQUIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MUY ALTO	ALTO
SANTIAGO DE TUNA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
SAN BARTOLOME	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
SAN DAMIAN	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	MEDIO	ALTO
SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	MUY ALTO
SAN MATEO DE OTAO	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
SANTA EULALIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MEDIO
SUITUCANCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	MUY ALTO
SAN JUAN DE IRIS	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
SAN ANTONIO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
CHACAPALPA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
HUAY-HUAY	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
HUACHUPAMPA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
ARAHUAY	CANTA	LIMA	MUY ALTO	MEDIO	ALTO
YAULI	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	MEDIO
CHICLA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO	ALTO
CARAMPOMA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
LACHAQUI	CANTA	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
SANTA ROSA DE SACCO	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
HUANZA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO	ALTO
LA OROYA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MEDIO	ALTO
HUAMANTANGA	CANTA	LIMA	MEDIO	MEDIO	MUY ALTO
CANTA	CANTA	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
MOROCCOCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	MEDIO
SAN BUENAVENTURA	CANTA	LIMA	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
PACCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	MEDIO
HUAROS	CANTA	LIMA	ALTO	MUY ALTO	ALTO
MARCAPOMACOCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MUY ALTO	MEDIO
SANTA BARBARA DE CARHUACAYAN	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MEDIO	MEDIO
JUNIN	JUNIN	JUNIN	ALTO	ALTO	MEDIO
ONDORES	JUNIN	JUNIN	ALTO	ALTO	MEDIO
CARHUAMAYO	JUNIN	JUNIN	MEDIO	MUY ALTO	ALTO
VICCO	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
HUAYLLAY	PASCO	PASCO	ALTO	MEDIO	ALTO
TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	ALTO	ALTO	ALTO
CHAUPIMARCA	PASCO	PASCO	ALTO	ALTO	ALTO
NINACACA	PASCO	PASCO	ALTO	ALTO	ALTO
SIMON BOLIVAR	PASCO	PASCO	ALTO	ALTO	ALTO
LIMA	LIMA	LIMA	BAJO	BAJO	BAJO
CALLAO	CALLAO	CALLAO	BAJO	BAJO	BAJO

Tabla 10-7 Niveles de Peligro a Sequía (DHI-6 Y DHI-12) por distrito

DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	DHI-6	DHI-12
SAN ANDRES DE TUPICOCHA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO
RICARDO PALMA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO
SANTA CRUZ DE COCACHACRA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO
HUAROCHIRI	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
LANGA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MUY ALTO
CUENCA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	MUY ALTO
LAHUAYTAMBO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
ANTIOQUIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO
SANTIAGO DE TUNA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	ALTO
SAN BARTOLOME	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
SAN DAMIAN	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
SAN MATEO DE OTAO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
SANTA EULALIA	HUAROCHIRI	LIMA	MEDIO	MEDIO
SUITUCANCHA	YAULI	JUNIN	ALTO	ALTO
SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	ALTO
MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
SAN JUAN DE IRIS	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
SAN ANTONIO	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
CHACAPALPA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	MEDIO
HUAY-HUAY	YAULI	JUNIN	ALTO	MEDIO
HUACHUPAMPA	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
ARAHUAY	CANTA	LIMA	ALTO	MUY ALTO
YAULI	YAULI	JUNIN	ALTO	MEDIO
CHICLA	HUAROCHIRI	LIMA	ALTO	ALTO
CARAMPOMA	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	ALTO
SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	ALTO	ALTO
LACHAQUI	CANTA	LIMA	ALTO	MEDIO
SANTA ROSA DE SACCO	YAULI	JUNIN	ALTO	MEDIO
HUANZA	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	ALTO
LA OROYA	YAULI	JUNIN	ALTO	MEDIO
LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	MUY ALTO	ALTO
HUAMANTANGA	CANTA	LIMA	MUY ALTO	ALTO
CANTA	CANTA	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
MOROCOCHA	YAULI	JUNIN	ALTO	ALTO
SAN BUENAVENTURA	CANTA	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
PACCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO
HUAROS	CANTA	LIMA	MUY ALTO	MUY ALTO
MARCAPOMACOCCHA	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO
SANTA BARBARA DE CARHUACAYAN	YAULI	JUNIN	MUY ALTO	ALTO
JUNIN	JUNIN	JUNIN	MUY ALTO	ALTO
ONDORES	JUNIN	JUNIN	MUY ALTO	ALTO
CARHUAMAYO	JUNIN	JUNIN	ALTO	MUY ALTO
VICCO	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO
HUAYLLAY	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO
TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO
CHAUPIMARCA	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO
NINACACA	PASCO	PASCO	MUY ALTO	MUY ALTO
SIMON BOLIVAR	PASCO	PASCO	MUY ALTO	ALTO
LIMA	LIMA	LIMA	BAJO	BAJO
CALLAO	CALLAO	CALLAO	BAJO	BAJO

Respecto al análisis del peligro hidroclimático se concluye lo siguiente:

- Que en las partes altas y medias de las cuencas del Rímac, Chillón y Lurín es más fuerte la incidencia de procesos erosivos asociados a la acción hídrica. En la cuenca del Mantaro los procesos erosivos no son relevantes.
- Las sequías de 6 meses de duración caracterizadas como extremas adquiere la categoría de Peligro Muy Alto en la cuenca alta del Rímac y Chillón así como el Mantaro y en particular en la zona de interés para SEDAPAL donde se ubican sus principales obras de infraestructura de reservorios y trasvases. En la cuenca del río Lurín el peligro a sequías extrema es Alto en la zona media y alta de la cuenca, con una pequeña porción del territorio caracterizado de Peligro Muy Alto en el distrito de Lahuaytambo de la provincia de Huarochirí.
- En escalas temporales mayores, la incidencia de las sequías se adquiere diferentes matices desde categoría de Muy Alto, Alto, Medio y Bajo, según la distribución espacial de lluvias.
- Se ha determinado que en más del 70% de la zona de estudio existe un peligro Bajo de Inundación, en la zona de los valles de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín el peligro de inundación es medio. En la cuenca del Mantaro, el riesgo de inundación alto, representa el 22.3% de su superficie, el riesgo medio es el 41.6, y el riesgo bajo es el 35.9%. La cuenca está expuesta a un riesgo alto hacia el lado norte y este. Hacia el nor-oeste presenta un riesgo medio de inundación.
- El riesgo de inundación alto, representa el 22.3% de su superficie, el riesgo medio es el 41.6, y el riesgo bajo es el 35.9%. La cuenca está expuesta a un riesgo alto hacia el lado norte y este. Hacia el nor-oeste presenta un riesgo medio de inundación.

Con respecto a la vulnerabilidad hidroclimática se concluye lo siguiente:

- En la cuenca del río Lurín se tiene una baja vulnerabilidad, la que representa el 95.2% de su superficie. El 4.8% restante presenta media vulnerabilidad en la zona media-alta.
- En la cuenca del río Rímac se tiene una baja vulnerabilidad, la que representa el 91.7% de su superficie. El 8.3% restante presenta vulnerabilidad a medio nivel en la zona media-alta.
- En la cuenca del río Chillón se tiene una baja vulnerabilidad, la que representa el 83.9% de su superficie. El 16.1% restante presenta vulnerabilidad a medio nivel en la zona media.
- En la cuenca Alto Mantaro se tiene una baja vulnerabilidad, la que representa el 73.9% de su superficie. El 13.8% presenta vulnerabilidad a medio nivel al este de la cuenca, y el 4.1% restante presenta alta vulnerabilidad al nor-este de la cuenca.

Con respecto al riesgo de Erosión se concluye que:

- Los distritos con mayor riesgo de erosión son San Buena Ventura, Laraos, Lachaqui, Arahua, Santiago de Surco, Matucana, San Bartolomé, Huachupampa, Santiago de Tuna, San Andrés de Tupicocha, Chicla, correspondientes a las cuencas del chillón, Rímac y Lurín; en la cuenca del Mantaro se ha identificado que el distrito de mayor riesgo a erosión es Junín.

Con respecto al Riesgo de Sequías, se concluye:

- En la cuenca del río Chillón, según el índice SPI severo para 6 meses, el riesgo de sequía alto representa el 14.4% de su superficie, el riesgo medio es el 56.9%, y el riesgo bajo el 28.7%. La cuenca está expuesta a un riesgo medio de sequía en su zona media y alta, y a un riesgo alto en la parte alta principalmente.
- En la cuenca del río Rímac, según el índice SPI severo para 6 meses, el peligro de sequía muy alto representa el 13.5% de su superficie, el peligro alto es el 48.9%, el peligro medio es el 14.2%, y el peligro bajo el 23%. La cuenca está expuesta a un alto peligro de sequía en su zona media y alta principalmente.
- En la cuenca del río Lurín, según el índice SPI severo para 6 meses, el riesgo de sequía alto representa el 4.4% de su superficie, el riesgo medio es el 55.7%, y el riesgo bajo el 39.9%. La cuenca está expuesta a un riesgo medio de sequía en su zona media y alta principalmente.
- En la cuenca Alto Mantaro, según el índice SPI moderado para 6 meses, el riesgo de sequía muy alto representa el 5.3% de su superficie, el riesgo alto es el 34.1%, el riesgo medio es el 60.3%, y el riesgo bajo es el 0.1%. La cuenca está expuesta a un riesgo alto de sequía en la parte central de su ámbito y un riesgo muy alto hacia el sur-este. El riesgo medio se presenta en mayor extensión hacia el norte y sur-oeste.

Con respecto al riesgo de Inundación se concluye:

- En la cuenca del río Chillón, el riesgo de inundación medio, representa el 1.6% de su superficie, y el riesgo bajo es el 98.4%. La cuenca está expuesta a un riesgo medio en casi toda su superficie, a excepción de la costa, en donde hay un riesgo medio de inundación.
- En la cuenca del río Rímac, el riesgo de inundación medio, representa el 11.7% de su superficie, y el riesgo bajo es el 88.3%. La cuenca está expuesta a un riesgo medio en casi toda su superficie, a excepción de la costa, en donde hay un riesgo medio de inundación.
- En la cuenca del río Lurín, El riesgo de inundación es bajo en el 100% de su superficie.

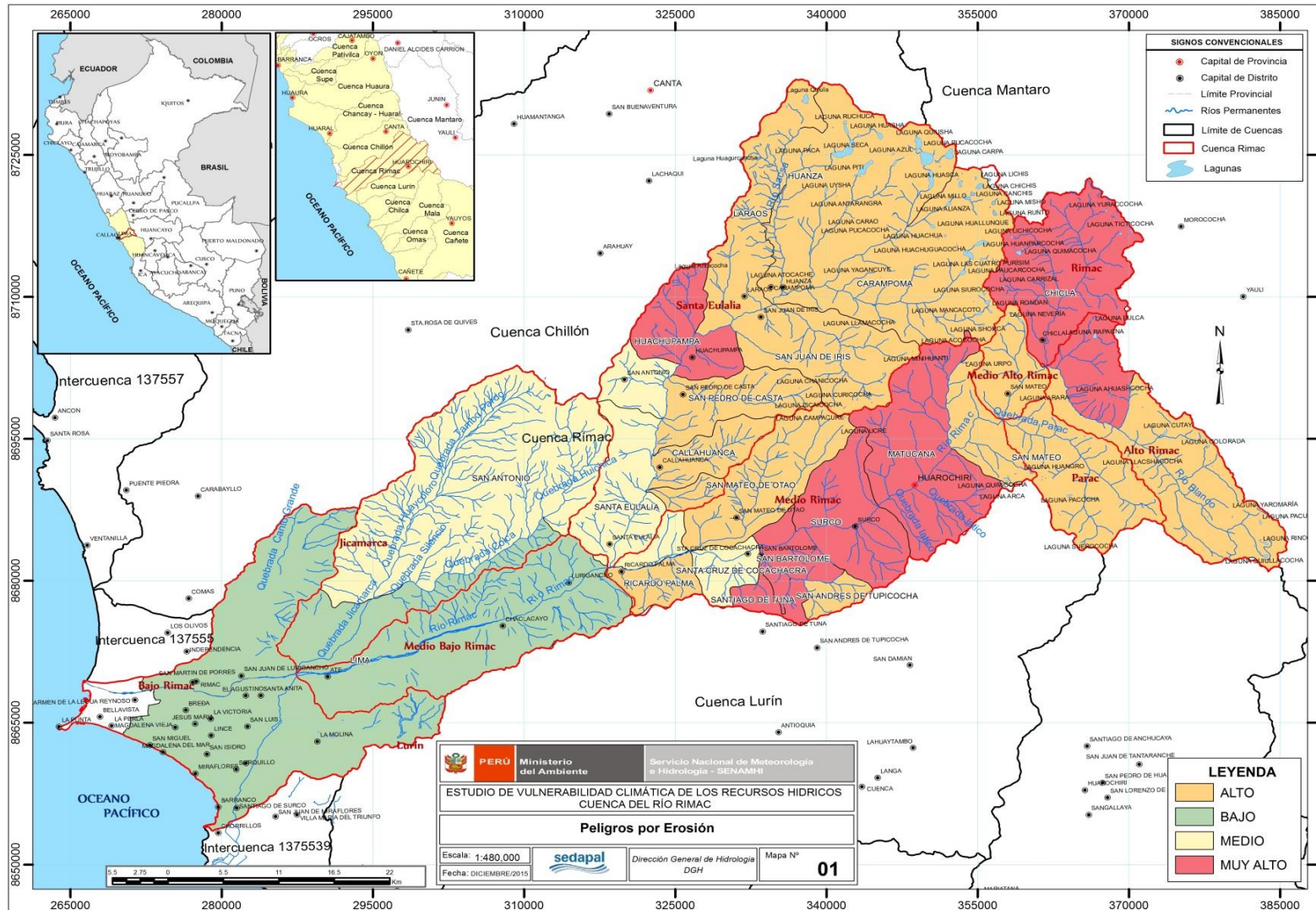


Figura 10-5 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Rímac

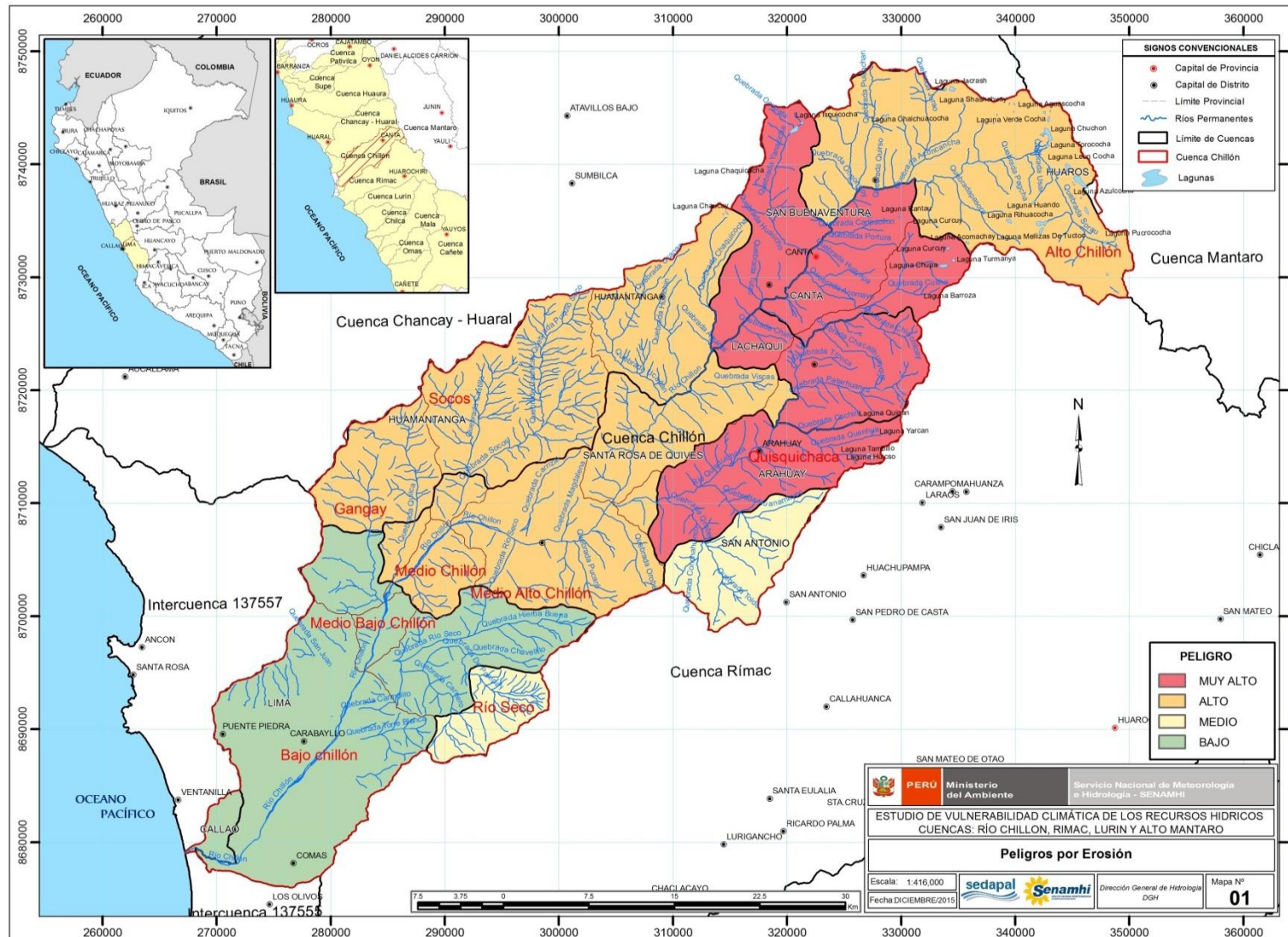


Figura 10-6 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Chillón

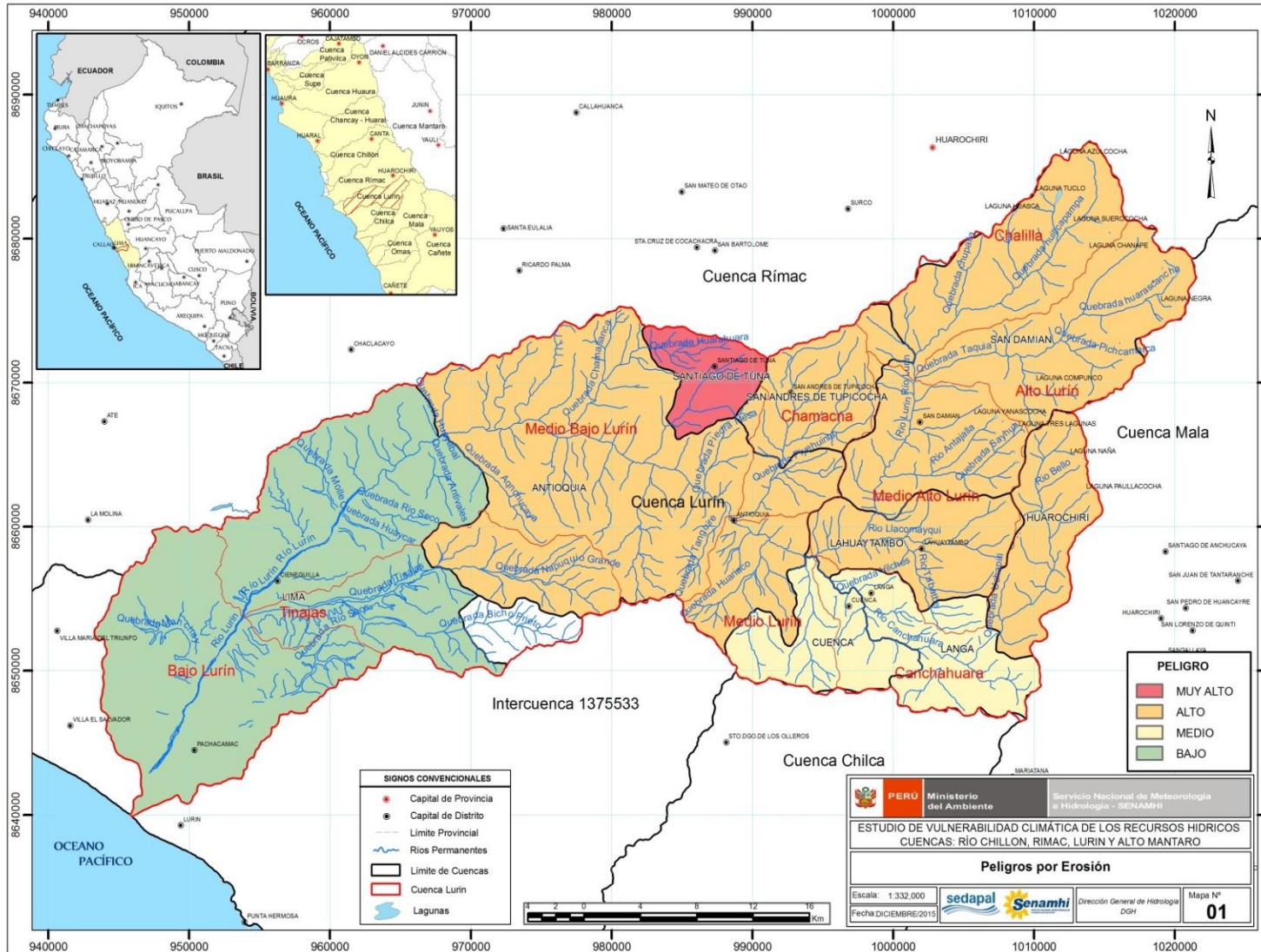


Figura 10-7 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Lurín

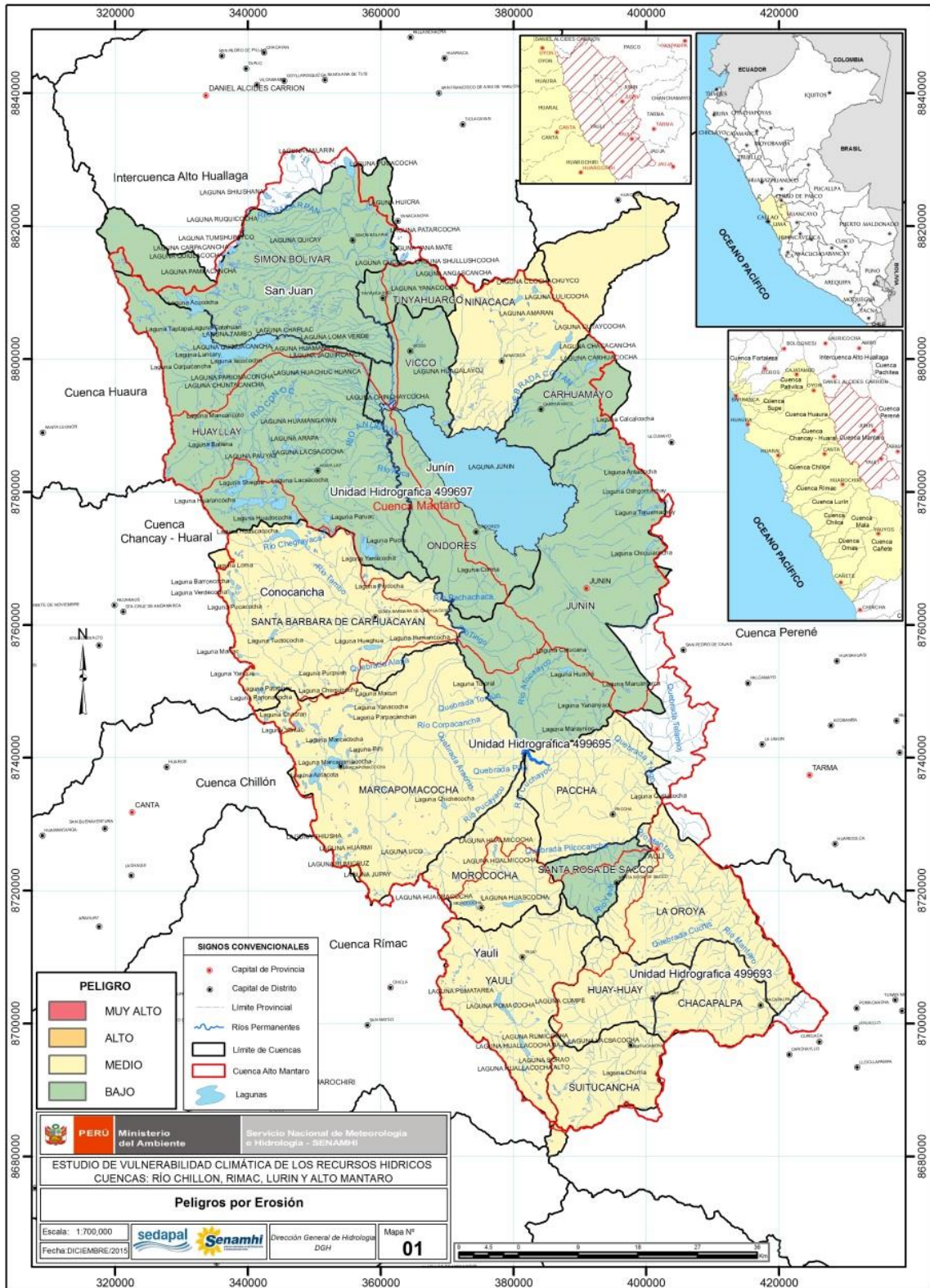


Figura 10-8 Mapa de peligro de erosión en la cuenca del río Alto Mantaro

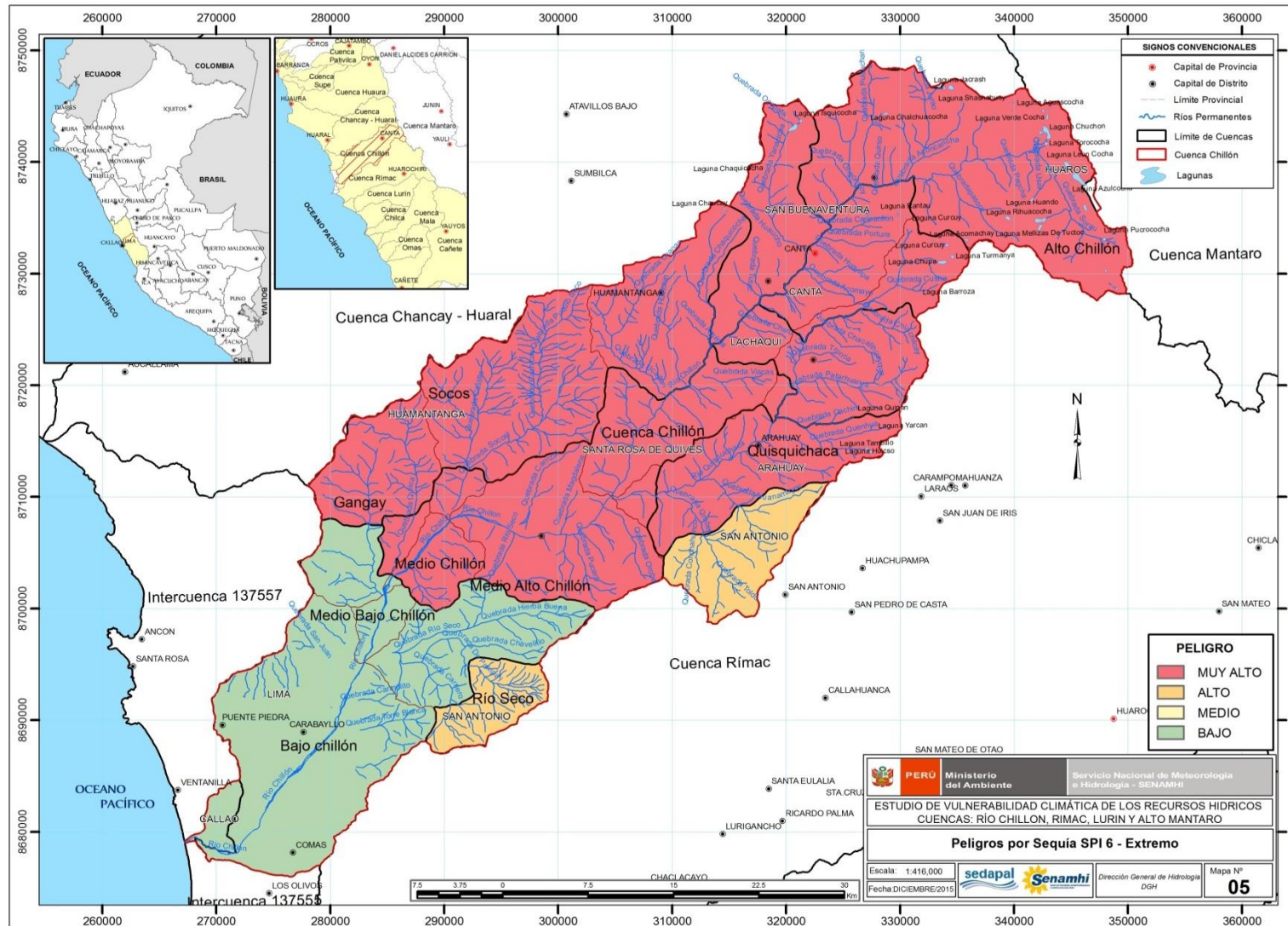


Figura 10-10 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Chillón

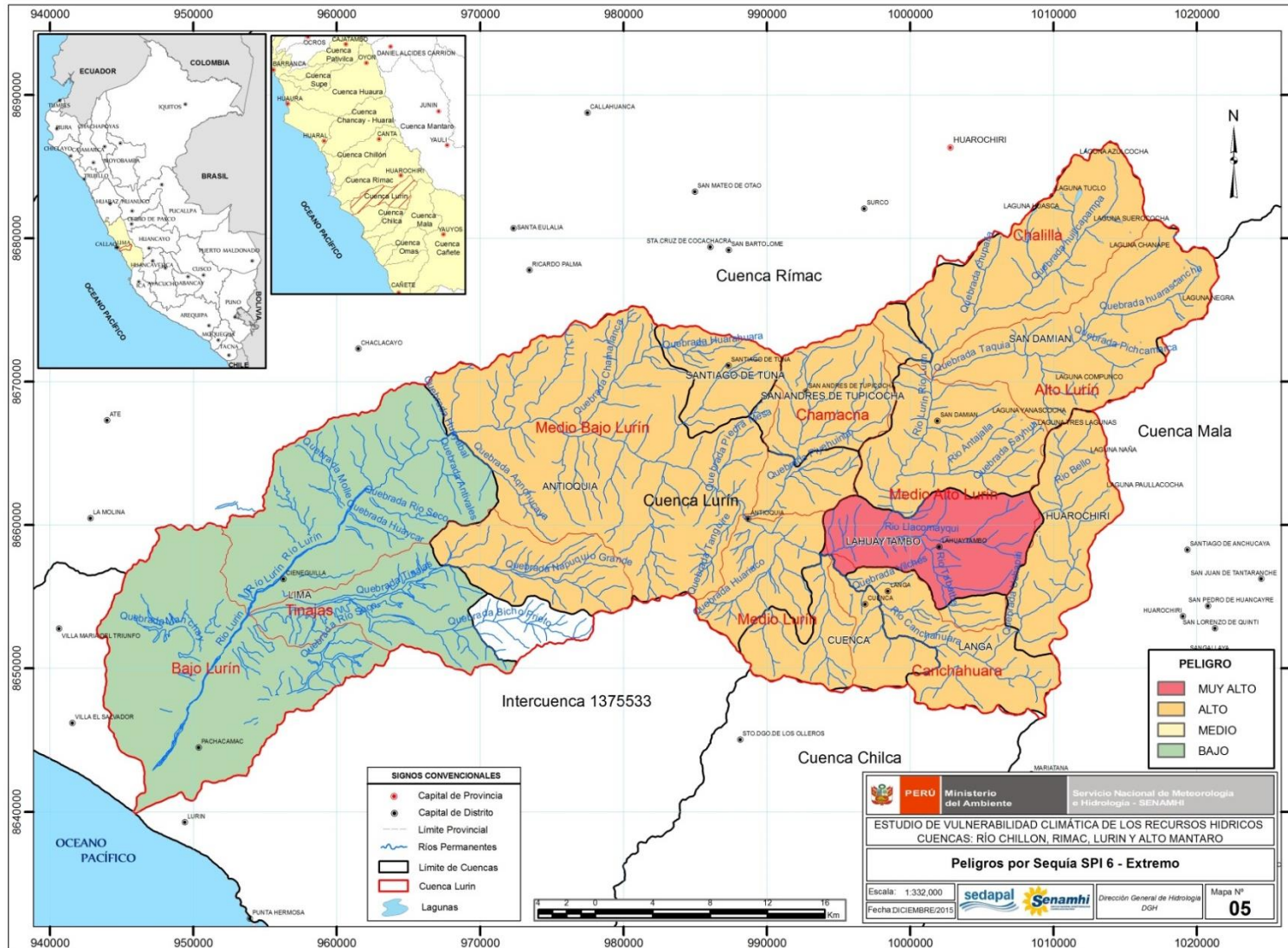


Figura 10-11 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Lurín

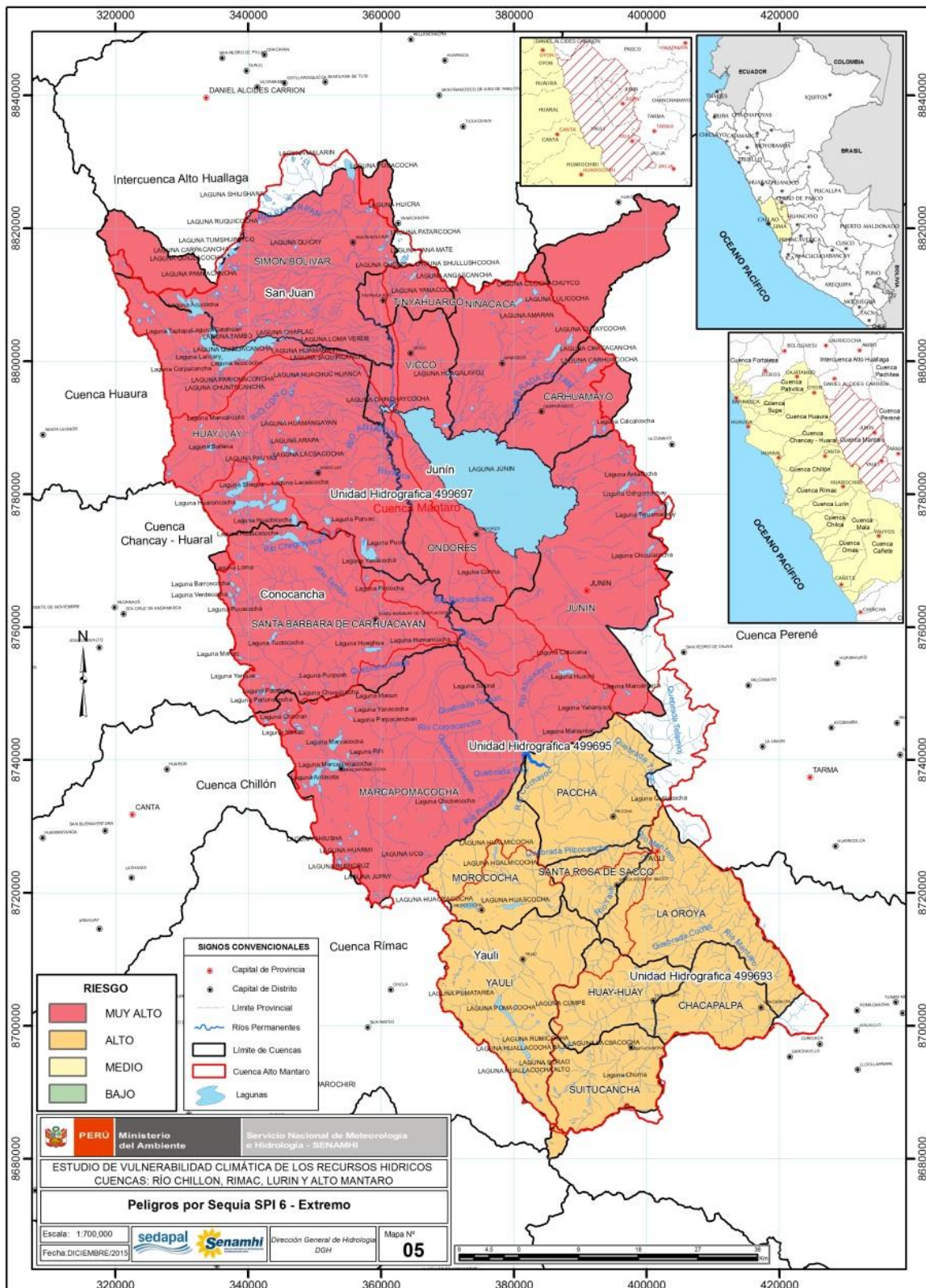


Figura 10-12 Mapa de peligro por sequía en la cuenca del río Lurín

11 Capítulo XI: Las propuestas de medidas de adaptación

En este capítulo se aborda la formulación de algunas propuestas adaptativas basados en los escenarios de cambio climático expuestos los capítulos precedentes; con énfasis en iniciativas de proyectos que puede impulsar SEDAPAL para garantizar la disponibilidad de agua para uso poblacional frente a escenarios de deficiencia hídrica que se proyecta en las principales cuencas abastecedoras de agua potable para Lima-Metropolitana.

La evaluación realizada se propone en primer término la sistematización de la información escenarios climáticos e hidrológicos a nivel de cuencas y subcuencas, a fin de identificar el ámbito geográfico de mayor vulnerabilidad al cambio climático, y formular propuestas de adaptación al cambio climático, teniendo en cuenta las características propias del sistema natural y social de las cuencas involucradas. La propuesta viene complementada con el diseño de una estrategia para la viabilidad y sostenibilidad del proceso de adaptación y del plan de manejo adaptativo en subcuencas piloto priorizadas.

Las propuestas de adaptación se han abordado bajo dos enfoques: un enfoque global en el marco de la gestión Integrada del agua en las cuencas de estudio; un enfoque particular que se centre en los impactos potenciales del cambio climático en el sector agua potable.

Para la conservación del ecosistema altoandino y del servicio que éste brinda como fuente natural de la regulación hídrica de la cuenca se debe tener en cuenta para la elaboración de las propuestas de adaptación el reconocimiento del saber local del clima y el agua; las prácticas adaptativas tradicionales y capacidad adaptativa de la población. El uso y manejo adecuado del ecosistema de bofedales permitirá, por un lado mejorar la oferta de agua mediante su almacenamiento en microreservorios y el incremento de la oferta forrajera de las comunidades altoandinas.

Las propuestas de adaptación tienen conexas la definición de líneas de investigación específicas como insumo para su implementación.

- Mejorar el conocimiento de la dinámica del clima y del recurso hídrico en el sistema de bofedales altoandinos.
- Red observacional del ecosistema de bofedales para la evaluación del clima, con énfasis en la variable evapotranspiración y la disponibilidad de agua en cantidad y calidad.
- Microcuencas piloto para implementar prácticas de siembra y cosecha de agua.
- Evaluación de los impactos de las prácticas de conservación de suelos en el control de la erosión y la producción de sedimentos.
- Evaluación de los impactos de las prácticas de conservación de suelos en el rendimiento hídrico de las cuencas.
- Incorporación en el planeamiento de la infraestructura hidráulica, los nuevos conceptos de tiempo de retorno y riesgo en el diseño hidrológico.
- Alerta temprana de sequías e inundaciones.
- Pronósticos hidrometeorológicos de corto y mediano plazo.

De acuerdo a las proyecciones de la disponibilidad hídrica simuladas para el horizonte 2016-2046, se tiene que en las cuencas del Rímac, Chillón y Lurín, sus zonas de mayor producción o rendimiento hídrico serán impactadas con déficit hídrico, mientras que en la zona alta del Mantaro donde se ubica las principales reservas de agua para el trasvase.

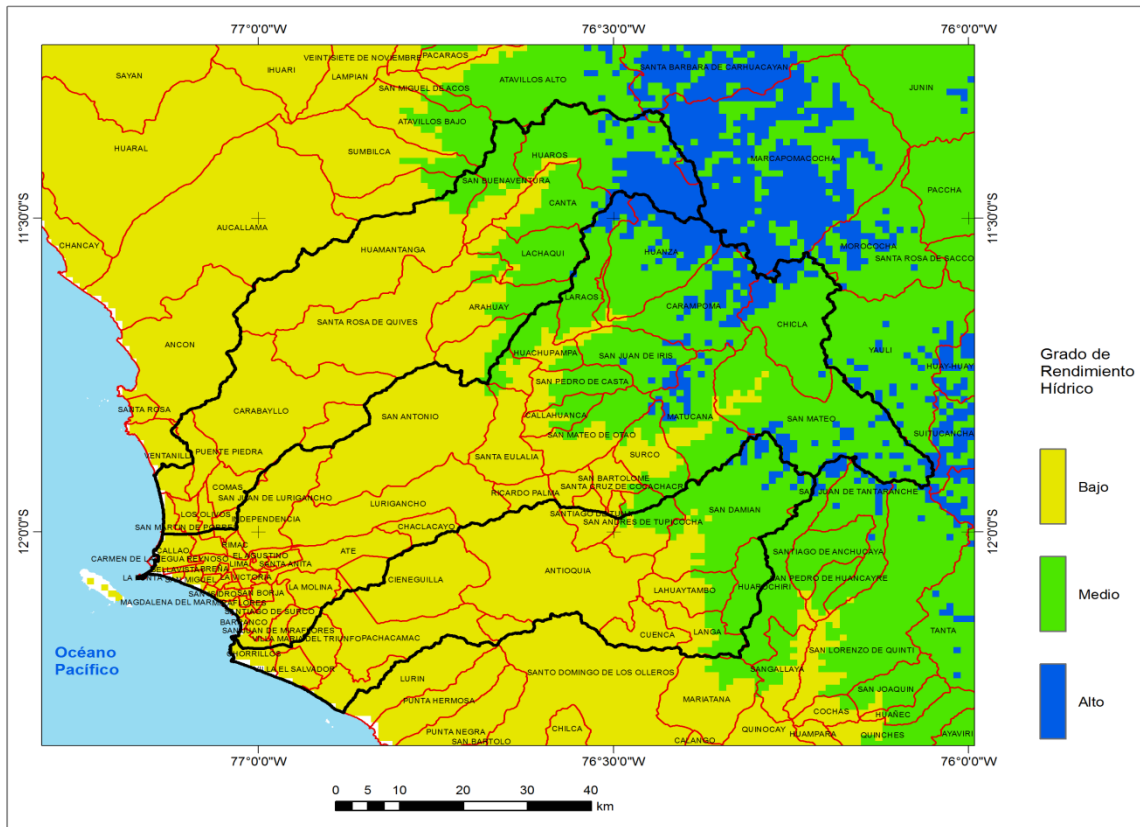


Figura 11-1 Mapa de calificación del Rendimiento hídrico de la zona de estudio

11.1 Revisión de prácticas adaptativas recomendadas en la zona de estudio

Se revisa y evalúa diferentes experiencias de prácticas adaptativas realizadas en la zona de estudio, por diferentes entidades.

El Fondo de Agua de Lima y Callao, conocido como AQUAFONDO es mecanismo financiero que permite apalancar fondo públicos privados para la conservación y protección de las fuentes de agua que abastecen a Lima. Su ámbito de acción son las tres cuencas principales Chillón, Rímac y Lurín. Desde su creación en el 2010 viene promoviendo proyectos de “infraestructura verde”, que son soluciones naturales que brindan beneficios similares o equivalentes a la infraestructura gris. Este es un concepto relativamente nuevo que viene cobrando fuerza porque se considera que la infraestructura gris que se basa en represas, transvase o túneles tienen que estar acompañadas de prácticas de conservación de ecosistema que también proveen agua a estas estructuras.

En un contexto de cambio climático la infraestructura verde serían las medidas de adaptación al cambio climático, y los fondos de agua son los mecanismos para la implementación de la

infraestructura verde. A continuación se detalla la experiencia de AQUAFONDO en la determinación y priorización de medidas de adaptación principalmente en la parte alta de la cuenca en estudio donde predomina un ecosistema de puna.

La parte alta de las cuencas en estudio están siendo deterioradas no solo por el cambio climático sino por la gran cantidad de actividades antrópicas, como intensa actividad agropecuaria, minería y crecimiento poblacional, etc., sobre todo la cuenca del Rímac. Entre los principales problemas encontrados en cuanto a la cantidad y calidad del agua de las cuencas del Chillón, Rímac y Lurín se tiene:

Escasez de Agua	Falta de suministro de riego
Insuficiente oferta de agua de calidad y potable	Disminución en niveles de agua subterránea debido a la disminución de la infiltración
Protección y mantenimiento de lagunas naturales	Falta de protección contra inundaciones
Necesidad de prácticas agrícolas sostenibles	Falta de tratamiento de aguas residuales
Deforestación	Contaminación minera
Falta de manejo de residuos sólidos	Sedimentación

Fuente: AQUAFONDO talleres en el 2010 y 2011

En base a esto se elaboró una lista de tipos de proyectos potenciales que podrían abordar cuestiones hídricas alineadas con las prioridades de AQUAFONDO. Sin embargo, cada proyecto potencial debe ser evaluado para determinar los beneficios de calidad o cantidad de agua derivados de inversiones. Un marco de evaluación de los beneficios esperados fue realizado en forma preliminar por la consultora Kieser & Associates y complementada por Forest Trends y Condesan en el 2013. Los resultados obtenidos proporcionan un punto de partida para evaluar los beneficios y costos relevantes de los posibles proyectos de conservación de la cuenca. Los costos y beneficios identificados en el cuadro siguiente son rangos generales asociados típicamente con cada categoría de proyecto. Los rangos de costos y beneficios medibles de cada proyecto son estimados y pueden variar, por lo que cuando sean abordados en campo se tendrá una mejor estimación.

Tabla 11-1 Beneficios de proyectos adaptativos

Opciones de Proyecto	Descripción	Rango Costo	Beneficio medible ○ ninguno ◐ medio ● alto	
		B M A	Calidad	Cantidad
Reforestación	Plantación de bosques	Medio	◐	◐
Prácticas de infiltración	Captura de escorrentía superficial y almacenamiento temporal hasta que se infiltre en suelos subyacentes (por ejemplo, zanjas de infiltración, amunas)	Medio	◐	●
Mejoras de riego agrícola	Disminución de cantidad de agua utilizada para riego de cultivos (por ejemplo, instalación de nuevas tecnologías para reemplazar el riego por inundación)	Bajo	◐	●
Prácticas urbanas de conservación de agua	Disminución de la cantidad de agua consumida por la población urbana	Medio	○	●

Opciones de Proyecto	Descripción	Rango Costo	Beneficio medible ○ ninguno ◐ medio ● alto	
		B M A	Calidad	Cantidad
Micro Reservorios	Construcción de pequeños reservorios para dueños de pequeñas propiedades para coleccionar y guardar agua de lluvia	Medio	○	●
Proyectos de reutilización de Agua	Encontrar opciones de reutilización de aguas residuales tratadas, agua de lluvia recolectada o aguas grises	Alto	○	●
Manejo de pastizales	Mantener sanos pisos vegetales de pastos con pastoreo rotativo y fuentes alternas de agua	Bajo	●	○
Proyectos de Canal	Sistemas por gravedad para entregar el suministro de agua	Alto	○	●
Proyectos de tratamiento de agua potable	Instalación de tecnología que mejore la calidad del agua con estándar de agua potable	Alto	●	○
Restauración de lagunas	Enfoque integral para restaurar la hidrología de los ecosistemas naturales	Medio	○	●
Cercado de pasto o ganadería exclusiva	Evitar acceso de ganado a pastos o aguas superficiales a través de vallas	Bajo	●	○
Protección de Riberas fluviales	Plantación de vegetación nativa a lo largo de arroyos para interceptar y frenar la escorrentía de agua de zonas altas	Bajo	●	○
Restauración de humedales	Restauración original hidrológica, biológica y funcional de humedales en sitios históricos	Medio	●	●
Manejo de nutrientes	Gestión de nutrientes de las plantas para el máximo beneficio ambiental y económico	Bajo	●	○
Recolección de desechos sólidos	Sistema para recoger y disponer adecuadamente de los residuos sólidos	Medio	◐	○
Proyectos/programas de reciclaje	Sistema para recopilar, procesar y entregar los materiales reciclables a los compradores / usuarios en el mercado	Medio	◐	○
Restauración de riberas fluviales	Remodelación, estabilización y / o revegetación (abordando hidrología) de orillas de arroyos para reducir la erosión e incisión	Alto	●	◐
Tratamiento de residuos mineros	Instalación de sistemas para recoger y disponer debidamente residuos mineros o contener pilas de relaves existentes para evitar contaminación	Alto	●	○
Proyectos de tratamiento de alcantarillado	Instalación/reparración de sistemas sépticos	Alto	●	○
Proyectos de dragado	Eliminar físicamente los sedimentos que se han acumulado en los canales	Alto	◐	●

De acuerdo a este cuadro, los proyectos con bajo costo y que tienen un mayor impacto en cuanto a calidad son: manejo de pastizales, ganadería exclusiva (cercado de pasto), protección de riberas

fluviales, manejo de nutrientes. En cambio los proyectos más costosos para mejorar la calidad involucran proyectos de tratamiento de agua potable y alcantarillado, tratamiento de residuos mineros. Asimismo, los proyectos que tienen un mayor impacto en cuanto a cantidad a bajo costo son: mejora de riego agrícola, prácticas de infiltración, microreservorios, restauración de lagunas.

En base a esta información se ha seleccionado ocho intervenciones y/o proyectos en teniendo en cuenta su bajo costo y alto beneficio hidrológico, los cuales se describen a continuación:

11.1.1 Cercado de pastos naturales:

El cercado de pastos naturales o exclusión de ganado consiste en colocar una barrera física que impida el ingreso del ganado o que permita la permanencia del mismo en una zona de pastura identificada como zona de protección hídrica.

Con esta acción lo que se evita es la degradación de la cobertura vegetal y de las características hidrofísicas del suelo como la densidad y la capacidad de infiltración, contribuyendo así a mantener o mejorar la capacidad de regulación hídrica que tienen los ecosistemas de puna. Es decir esta medida daría lugar a una menor escorrentía superficial y una mayor retención de humedad del suelo, aumentando así el agua subterránea para la recarga de los ríos. Además una buena cobertura garantiza la protección del suelo y por lo tanto su erosión, contribuyendo a disminuir o evitar el aporte de sedimentos, nutrientes o bacteria en el agua. El beneficio local será mayor en la medida que la comunidad es usuaria del agua de la microcuenca y está comprometida a su conservación por largo plazo.

El enfoque para medir el beneficio hidrológico de esta medida es mejorar la regulación hídrica a través de un aumento en caudal base del área cercada. Para el cálculo teórico se usa la ecuación de balance de masas, antes y después de la intervención. La diferencia entre estas condiciones refleja una mayor infiltración de la precipitación, y a su vez un aumento del caudal base en las quebradas, beneficiando a la cuenca aguas abajo. Para ello se debe tomar en cuenta factores como: cantidad de lluvia, periodo de sequía, altitud, textura de suelo, estado de la cobertura vegetal, etc. Por ejemplo, para una zona con condiciones de 400 mm de lluvia, suelo franco-arcilloso, con un número de curva (CN) de 30 y 38, con un periodo de estiaje de 245 días (8 meses), se espera un incremento de caudal base de 0.022 lt/seg por hectárea de cercado de pasto.

11.1.2 Pastoreo rotativo en pastos naturales

El pastoreo rotativo en pastos naturales consiste en el traslado del ganado hacia otra zona de pastoreo de manera permanente y organizada. Se controla así la densidad vegetal lo cual aporta a proteger el suelo de la erosión, amortiguar las precipitaciones y aumentar la capacidad de infiltración.

Con esta acción lo que se evita es la degradación de la cobertura vegetal y pérdida del suelo, contribuyendo así a mantener o mejorar la capacidad de regulación hídrica que tienen los ecosistemas de puna. Además una buena cobertura garantiza la protección del suelo y por lo tanto su erosión,

contribuyendo a disminuir o evitar el aporte de sedimentos en el agua. Este beneficio local existe en la medida que la misma comunidad es usuaria del agua de la microcuenca. Además se obtiene con esta práctica un aumento en la producción de los pastos para el ganado de la comunidad.

El beneficio hidrológico del pastoreo rotativo es lo mismo que el cercado de pasto, por lo que se espera un incremento de caudal de 0.022 lt/seg por hectárea para las mismas condiciones.

El quinquenio más crítico por déficit hídrico en la cuenca integral del río Rímac se presentaría en el 2041-2046, con una disminución de la disponibilidad hídrica anual de -15.0 %. Por otro lado la mayor disponibilidad hídrica anual se presentaría en el quinquenio 2026-2031, donde la disponibilidad hídrica se incrementa en 13.3 %.

Respecto al ciclo estacional de los caudales del río Rímac, se observa en el gráfico de la Figura 10.2 una clara tendencia deficitaria de los caudales de avenidas que se proyecta hacia el 2030, estimándose para el período diciembre a abril una disminución de -12.0 %, con respecto al período de referencia. Caso contrario se observa en el patrón estacional de los caudales de estiaje, con una tendencia al incremento de los caudales del período junio-agosto de 36 %.

11.1.3 Restauración de humedales

Una causa del deterioro de los humedales es el drenaje de agua de los humedales a través de canales o acequias de tierra para convertir el espacio en un lugar de pastoreo para el ganado. El proyecto busca tapar estos canales y construir un dique para que el agua se conserve en el ecosistema y rehidratar el suelo y recargar los cuerpos de agua. Otra causa del deterioro y pérdida de los humedales es que comerciantes ilegales suben a las partes altas y extraen champa de turba de los bofedales altoandinos para venderlas como sustrato para jardines o parques a los viveros. La medida en este caso requiere construir un cerco perimétrico que prohíba la entrada a los bofedales, con vigilancia permanente, y también hacer una campaña que eduque a la gente a no comprar el sustrato extraído ilegalmente. Esta es una acción que afecta directamente la capacidad de regulación hídrica que tiene la cuenca.

El beneficio hidrológico de la restauración de humedales va a depender de la precipitación que se tiene en época seca, que va de mayo a diciembre generalmente. Por ejemplo, para una precipitación media en época de estiaje de 125 mm y considerando que el periodo dura 245 días (8 meses), se espera un incremento 0.06 lt/seg por hectárea de humedal conservado.

11.1.4 Forestación y/o reforestación

La forestación debería darse mayormente con especies nativas para ecosistemas de puna como *Polylepis incana* (Queñual) y *reticulada* (yagual), *Alnus acuminata* (Aliso), *Buddleja* sp. (Quishuar), etc. Aunque no excluye forestar con exóticas si las condiciones lo permite cuidando de que no consuman mucha agua.

La forestación es muy bien vista por la población porque ayuda a las condiciones de vida del poblador, ya que actúa como cortina rompe viento desviando el viento por las plantaciones que existen alrededor. El actuar como barreras contra el viento ayuda al crecimiento y/o recuperación de pastos y otras especies, de plantas y animales. También, el beneficio productivo es que los pobladores pueden usarlo como madera después de 10 a 15 años, si la plantación es bien manejada.

El mayor beneficio hidrológico local puede darse en el control de sedimentos producto de la erosión sobre todo en suelos de fuerte degradación. En este caso una cobertura vegetal, pueden disminuir la erosión y aumentar la capacidad de infiltración, eventualmente recuperando manantiales de la zona. Sin embargo, si se siembra en un área que no había experimentado una fuerte degradación, el impacto en el rendimiento puede ser negativo.

Existe mucha incertidumbre sobre el beneficio hidrológico de la forestación, en cuanto a la mejora en el caudal base. Existen estudios que afirman que más bien reduce el rendimiento hídrico de la cuenca, pero hay otras experiencias que afirman lo contrario (Granja Porcon en Cajamarca). De acuerdo a este último, el beneficio hidrológico de la forestación bien manejada se basa en que aumenta el contenido de humedad del suelo en un 60% y según versiones se estima un incremento en el caudal base de 20 m³/ha/año, que equivale a 0.001 lt/seg por hectárea de plantación combinado con pasto bien manejado.

11.1.5 Construcción de microreservorios

Esta intervención está relacionada con la cosecha de agua. Para su construcción se requiere hacer una excavación de tierra si se quiere almacenar agua en un terreno, o simplemente hacer un pequeño dique de contención en una laguna o cocha. Los microreservorios pueden ser excavados a mano o con maquinaria y compactado con material limo arcilloso para que permita una infiltración lenta y luego ser aprovechada aguas abajo. Los microreservorios que se plantean comprende entre 300 a 1000 m³ de capacidad, esto va depender de la disponibilidad de agua y del terreno.

Esta medida es muy requerida por los pobladores locales porque significa un aumento a la seguridad alimentaria y resiliencia ante las sequías, así como una menor necesidad de agua de riego y el uso de energía para el transporte de agua. La zona de cultivo puede ser regado con un sistema de riego tecnificado, por micro-aspersión o goteo. Inclusive puede ayudar a la rehabilitación de andenes. Los beneficios locales, al disponer de riego son bastante claros: permiten tener una vegetación bien mantenida, productiva, lo que significa también un control de sedimentos. El beneficio hidrológico a la cuenca en términos de incremento de caudal es mínimo; sin embargo ayuda a la regulación de la cuenca, recarga del acuífero y a un control de sedimentos.

Lo que se refiere al represamiento de pequeñas lagunas y construcción de pequeños reservorios también contribuyen directamente sobre la capacidad de regulación de la cuenca, al almacenar agua que – aunque parcialmente – fluye hacia aguas abajo después de un tiempo de almacenamiento.

11.1.6 Reutilización de amunas

Esta intervención está relacionada con la siembra de Agua. La reutilización de amunas (antiguos canales de desviación) consiste en la captura de agua de una quebrada en la parte alta de la cuenca para luego ser conducido por un canal rustico hacia una superficie pedregosa y rocosa, en donde el agua se infiltra en el subsuelo, alimentando el acuífero. El objetivo principal es aumentar el caudal de los manantiales aguas abajo en época de estiaje. En algunas zonas altas de la cuenca se le denomina “mamanteo” haciendo referencia a la técnica ancestral que consiste en derivar agua, en época de lluvias, desde las quebradas o ríos hacia zonas de alta infiltración, con la finalidad de recargar los acuíferos y así abastecer de agua por más tiempo para los manantiales. El canal de desviación no es revestido para que infiltre agua durante su recorrido.

El camino subterráneo del agua es un misterio, puede que tenga beneficios locales (alimentando los manantes de la comunidad) o es posible que los beneficios vayan más allá de lo local (alimentando manantes mucho más abajo) o ambos. Sin embargo está claro que ayuda a la regulación de la cuenca, se disminuye la velocidad con que el agua baja por la cuenca, disminuye el riesgo de inundaciones y erosión. También las amunas ayudan en la retención y la mejora de la humedad del suelo que favorece al desarrollo de vegetación nativa. En un ciclo positiva, la vegetación nativa promueve aún más la humedad del suelo y disminuye la probabilidad de erosión. La vegetación nativa también mantiene micro climas que soporten la biodiversidad de flora y fauna.

El beneficio hidrológico de las amunas en términos de incremento de caudal a la cuenca es ampliamente ventajoso en comparación con las otras intervenciones. El cálculo va a depender del caudal al ingreso del canal de desviación, de las pérdidas a lo largo del canal y del número de días en época seca y época húmeda. Si se considera un caudal de ingreso al canal de 50 lt/seg y para un periodo húmedo de 120 días se espera un incremento en el caudal base de 9.8 lt/seg por km de amuna.

11.1.7 Zanjas de infiltración

Esta intervención está relacionada con la siembra de Agua. Las zanjas de infiltración son construidas siguiendo la línea de contorno del terreno en forma perpendicular a la pendiente de la ladera. Tienen la finalidad de almacenar el agua de lluvia, disminuir la escorrentía superficial y promover la infiltración lenta en terrenos poco permeables. Es una práctica que se promovió mucho con PRONAMACHCS y fue seguido de muchos otros proyectos y es aceptado generalmente por los pobladores; pero se desconoce a ciencia cierta el efecto hidrológico de esta acción.

Las zanjas de infiltración aumentarían la humedad del suelo localmente entre las zanjas, lo que mejoraría la producción de pasto en el área. En algunos casos se les atribuye recarga de manantiales cercanos. Estos procesos son altamente dependientes de las condiciones de suelo y geológicas específicas locales, y tienen que ser comprobadas.

Es una acción que busca disminuir la velocidad de la escorrentía y promover la infiltración lenta, por lo tanto contribuye con la capacidad de regulación hídrica de la cuenca. Esta es una acción por lo general aceptada como beneficiosa, sin embargo requiere comprobar su beneficio real.

Para medir el beneficio hidrológico de la zanja de infiltración se ha analizado de igual manera que las amunas, considerando que cada zanja lleve en promedio un caudal de 10 lt/seg, esto nos genera un incremento en el caudal base de 2.45 lt/seg por km de zanja. Para el cálculo por hectárea el caudal base es la mitad 1.22 lt/seg.

11.1.8 Recuperación de andenes o terrazas

En la zona existen terrazas y andenes que están abandonadas a pesar de que existen varias iniciativas para recuperarlas y ponerlas a producir. Muchas de ellas no tienen agua disponible y es necesario construir infraestructura de riego, como los microreservorios y repara canales para llevar agua a estas zonas. Algunas terrazas son utilizadas sólo para el cultivo bajo lluvias donde se realiza una sola campaña agrícola.

Los andenes constituyen una estructura para la siembra de agua, ya que anula o disminuye la escorrentía superficial, favoreciendo la infiltración y su retención en el suelo. Además favorece a la dotación de agua a los manantiales ubicados en las partes bajas, constituyendo un colchón de almacenamiento de agua. De acuerdo a los datos obtenidos por las estaciones agrometeorológica del proyecto de Recuperación de Andenes en Matucana, se determinó que una hectárea de anden puede almacenar entre 4000 a 7000 m³/ha. Considerando el más bajo, el incremento en el caudal esperado es de 0.26 lt/s por hectárea.

Las terrazas también pueden mejorar la regulación hídrica en función al manejo del agua de riego. Es decir que pueden tener un impacto positivo sobre la regulación si el riego se realiza de manera tradicional (inundación y con frecuencias largas entre riego), este agua de exceso es drenado a través del sistema de drenaje que tienen los andenes. Si el sistema de riego es tecnificado, entonces la eficiencia es mayor y la frecuencia menor, por lo que el agua en exceso es casi nulo y no hay un aporte para la regulación hídrica en la cuenca.

Las terrazas tendrán un impacto positivo sobre la retención de sedimentos, están comprobados y son una medida robusta en este sentido. Las terrazas son una tecnología que mejor sirve para el control de sedimentos que para la regulación o rendimiento hídrico. En este sentido la recuperación de terrazas tiene sentido, desde el punto de vista hidrológico, si esta actividad reemplazaría zonas de cultivo que están expuestas a procesos severos de erosión causados por riego en fuertes pendientes. En otras palabras, es mejor recuperar terrazas para intensificar la producción agrícola que ampliar el área de cultivo en zonas con alta pendiente y propensa a sufrir procesos de erosión severa.

Por otro lado es innegable que agua consumida por cultivos en la parte alta, es agua que no está disponible para usuarios aguas abajo y que no existían en igual número en la época prehispánica cuando estas terrazas fueron construidas.

11.2 Evaluando intervenciones verde para abastecer de agua a Lima

Este estudio desarrollado 4 tipos de intervenciones verdes como opciones más costo-efectiva que la infraestructura gris o convencional, las cuales son: exclusión de ganado, pastoreo rotativo, restauración de humedales drenados y restauración de amunas.

La metodología para determinar el rendimiento hidrológico o incremento en el caudal base fue adaptado de programas agrícolas y mercados acreditados de servicio de cuenca en los Estados Unidos, así como información local cuando fue posible. Para el caso de exclusión de ganado y pastoreo rotativo una ecuación de masa se aplica para estimar la mejoría en el caudal base. Para la restauración de humedales un simple cálculo del balance de masa para la profundidad de la precipitación anual (o la lluvia de la estación seca en metros) multiplicado por la superficie de los humedales restaurados (m²) menos la evapotranspiración. Asimismo para las amunas se calcula utilizando una sencilla ecuación de balance de masas.

El proyecto piloto de Aquafondo en la comunidad de Huamantanga en la cuenca del Chillón, donde se espera que una mejor gestión de los pastizales y la restauración de amunas, logren una mejora en el caudal base, lo que ha convertido un elemento motivacional para la participación de la comunidad en el proyecto.

El ámbito de aplicación de estas inversiones fue una estimación gruesa en base a tipo de ecosistema, pendiente; el cual determinaron 50,506 ha, de los cuales las mayoría se realizarían sobre zonas sobrepastoreadas. Para el caso de amunas se estimaron cerca de 30 canales a restaurar.

Según sus resultados la restauración de amunas se destaca como la intervención verde más costo-efectiva, seguido por de humedales, aunque este último su impacto a mayor escala es baja en comparación a la exclusión de ganado y pastoreo rotativo. Si se implementaran las cuatro intervenciones en todo el ámbito encontrado se podría mejorar el caudal base en 2.74 m³/s ó 58.2 MMC (90% del déficit de Lima), aun costo de US\$ 7.9 millones por año.

Finalmente el estudio hizo una comparación de costo marginal con otros proyectos que tiene SEDAPAL en su plan maestro como infraestructura gris, resultando que La restauración de amunas y la restauración hidrológica de los humedales son más costo-efectivas que cualquier intervención gris considerada; colocándose muy por debajo de la proyecto de una planta desaladora que está en US\$0.74/m³ (Nippon Koei LAC Co., Ltd., 2011).

11.3 Implementación de proyectos de infraestructura verde

Para identificar zonas prioritarias para implementar medidas de adaptación al cambio climático en la cuenca del río Rímac, TNC realizó un estudio hidrológico. Este análisis fue realizado en base a mapas de cobertura vegetal, precipitación, pendiente e índice de vegetación. En base a esta información se calcularon mapas de regulación hídrica, rendimiento hídrico y grado de erosión en las cuencas. Para llegar a una mejor priorización se usó el programa RIOS (Resource Investment Optimization System),

el cual permitió identificar y ubicar un portafolio de proyectos con el máximo retorno a la inversión ecológica, para un monto de S/. 10 millones. Para ello se agregó datos de los tipos de intervenciones y costos de intervención por hectárea. El máximo retorno de inversión involucra realizar más de una actividad o intervención en conjunto, el cual resultaría en un proyecto. Este programa da como resultado un mapa con las zonas que se tienen que intervenir, tal como se muestra en la siguiente Figura 11-2.

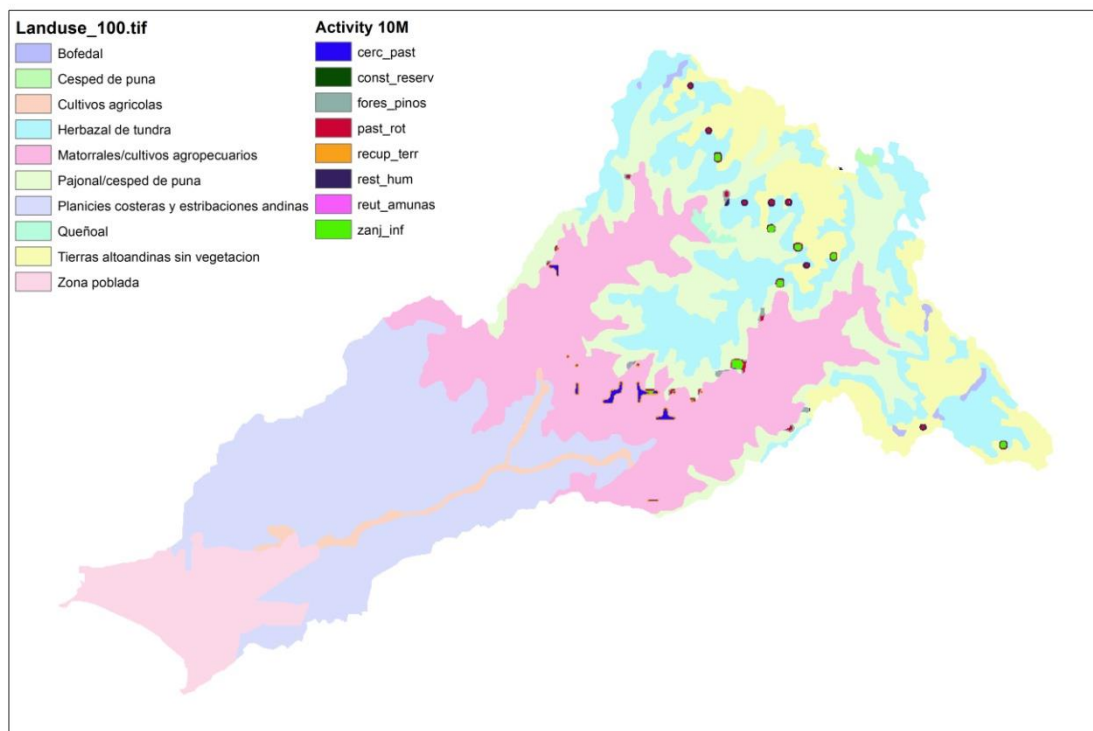


Figura 11-2 Zonas de intervención en la cuenca del río Rímac

11.4 Elaboración de las propuestas de adaptación

11.4.1 Propuestas globales

Infraestructura verde e infraestructura gris para la adaptación al cambio climático

a) Cuenca Chillón

a-1 Sub cuenca alto Chillón

Es la zona de mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Chillón. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 5.05 m³/s promedio anual, con una máxima de 12.8 m³/s. Las microcuencas que brindan un mayor aporte de agua son de la Quebrada Sorau y Aconcancha, con 0.83 y 0.37 m³/s respectivamente; todas ellas ubicada en el distrito de Huaros, provincia de Canta.

Microcuenca Sorau

Se encuentra en la naciente del río Chillón, sus aguas recorren de sur a norte. Tiene un área de 81 km² y una precipitación de 828 mm de promedio anual. En esta zona existen varias lagunas que pueden represarse para almacenar más agua, entre las principales están: Laguna Pucrococha, Vanauilla y Chuchun.

Asimismo existen lagunas que se puede aumentar el nivel de su represamiento como: Laguna Chuchón, Azulcocha y León Cocha que se encuentran al pie de la cordillera La Viuda. Más abajo se encuentra la laguna Yahuaya.

Cabe señalar, según el estudio hidrogeológico del INGEMMET han indicios de poder construir una galería filtrante tipo el túnel Gratón de la cuenca Rímac.

Asimismo existen varias laguna que han desaparecido y otras están en peligro de desaparecer si no se protegen. Esta protección incluye cercar las áreas cercanas a las lagunas para que los animales no invadan, ya que muchas lagunas se van convirtiendo en bofedales. Entre las lagunas en peligro de secarse se encuentran: Laguna Mellizas de Tuctucocha Chica y Tuctucocha Grande, de Huando, Rihuacocha, Aguascocha.

Por otro lado existe una gran cantidad de bofedales y/o humedales que requieren también protección del ingreso de animales y también de personal inescrupulosas que extraen la champa de turba para viveros. Existen cerca de 260 ha de humedales que están cerca de la carretera principal que requiere urgente protección y vigilancia.

Microcuenca Aconcancha

Se encuentra también en la naciente del río chillón y sus aguas van de norte a sur. Tiene una área de 49.6 km² y una precipitación promedio anual de 630 mm.

Lagunas: Esta zona tiene solo dos lagunas importantes de las cuales la laguna Yahuaya se podría levantar el nivel de su represamiento.

Bofedales: En cuanto a bofedales se requiere proteger cerca de 20 ha de humedales ubicados aguas debajo de las laguna.

Forestación: Esta zona es propicia para implementar forestación, ya que los suelos son de protección y por el grado de pendiente, son suelos muy erosionables. Esta área presenta un potencial de 600 ha de forestación con zanjas de infiltración.

Recuperación de terrazas: Aguas abajo a la confluencia de la microcuenca, en la confluencia con el río Chillón hay un potencial de 50 ha para mejorar terrazas.

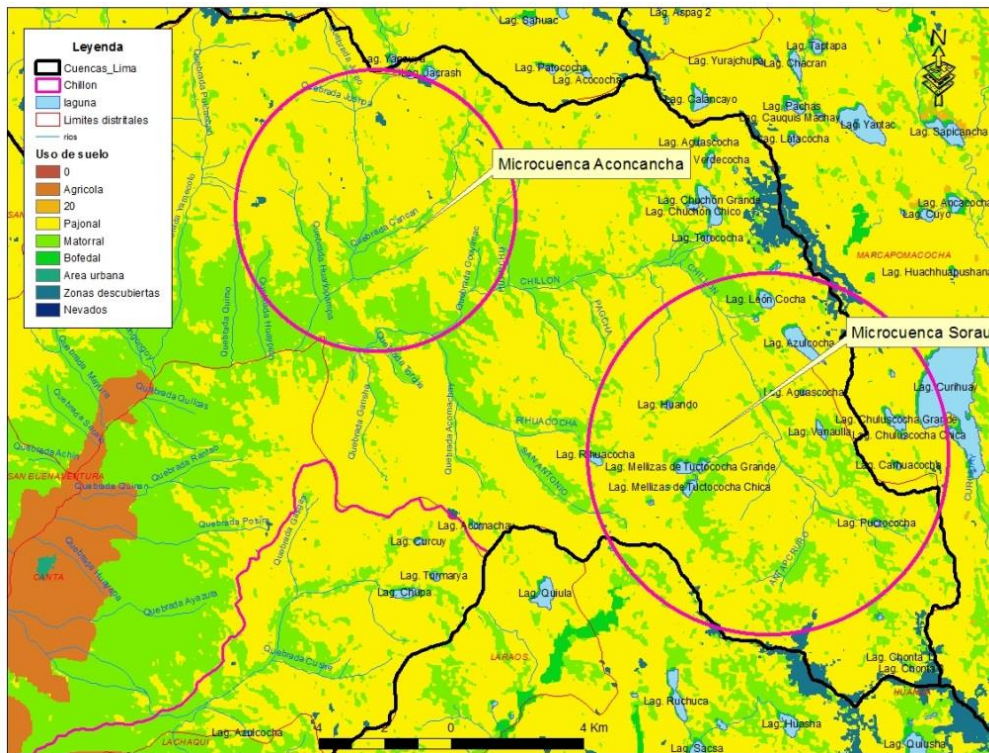


Figura 11-3 Ubicación de microcuencas Aconcancha y Sorau

Sub cuenca Quisquichaca

Es la segunda zona con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del Chillón. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado es de 1.82 m³/s promedio anual, con una máxima de 3.62 m³/s. Las microcuencas que brinda un mayor aporte de agua está ubicada en la naciente de la subcuenca y la quebrada Patarhuanca, con 0.69 y 0.28 m³/s respectivamente. La naciente se encuentra en el distrito de Canta y la microcuenca Patarhuanca en el distrito de Lachachi, provincia de Canta.

Microcuenca Naciente

Ubicada también en una de las nacientes del río Chillón, sus aguas recorren de Noreste a suroeste. Tiene un área de 100 km² y una precipitación de 568 mm de promedio anual. En esta zona existen cuatro lagunas principalmente que aumentar el nivel de su represamiento para almacenar más agua, las cuales son: Laguna Chupa, Turmarya, Curcuy y Azulcocha.

También existe bofedales y/o humedales que requieren también protección del ingreso de animales y también prevenir la extracción de champa de turba para viveros. Existen cerca de 260 ha de humedales que están cerca de la carretera principal que requiere urgente protección y vigilancia.

Microcuenca Patarhuanca

Se encuentra también en la naciente del río chillón y sus aguas van de este a oeste. Tiene una área de 40 km² y una precipitación promedio anual de 589 mm.

Bofedales: se encuentran en la naciente y se requiere proteger cerca de 30 ha de humedales.

Forestación: existen zonas adecuadas para forestación, ya que los suelos son de protección y por el grado de pendiente son suelos muy erosionables. Existe un potencial de 100 ha de forestación combinada con zanjas de infiltración y amunas en la parte alta.

Recuperación de terrazas: Cerca al pueblo de Lachachi hay un potencial de 50 ha para mejorar terrazas.

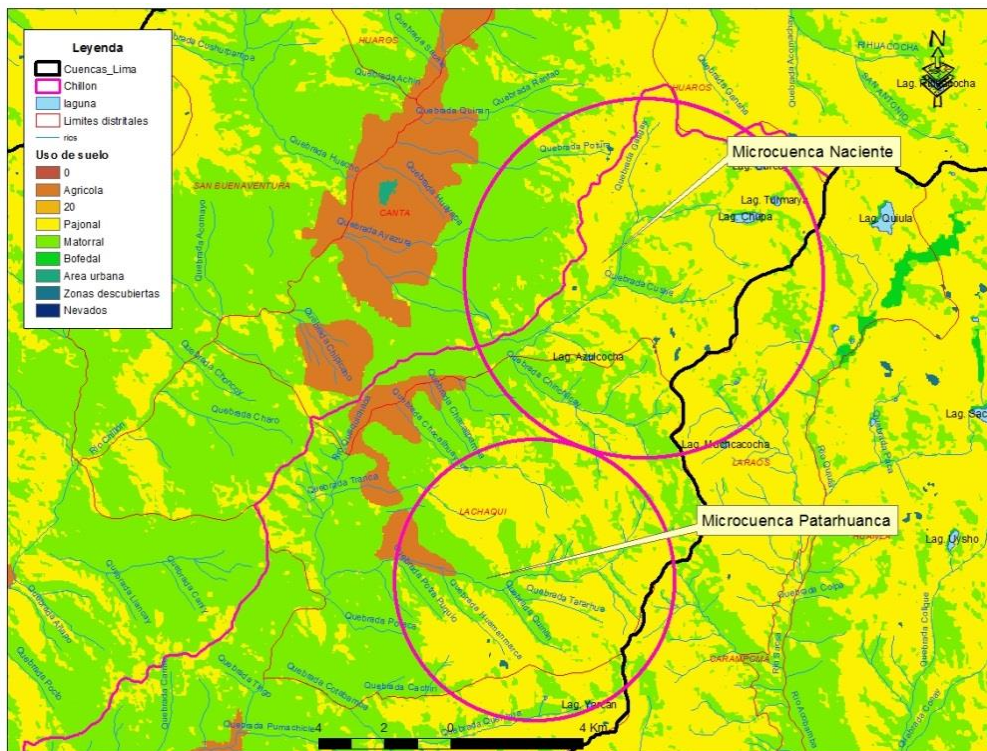


Figura 11-4 Mapa de ubicación de las microcuencas Naciente y Patarhuanca

b) Cuenca del río Rímac

b-1 Subcuenca Santa Eulalia

Es la zona de mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 10 m³/s promedio anual, con una máxima de 21 m³/s. Las microcuencas que brindan un mayor aporte de agua son la Quebrada Acobamba, Macachaca y Shuncha, con 2.37, 2.1 y 1.71 m³/s respectivamente; todas ellas ubicada en el distrito de Laraos, Huanza y Carampoma, provincia de Huarochiri.

Microcuenca Acobamba

Es una de las nacientes del río Santa Eulalia, sus aguas recorren de norte a sur. Tiene un área de 171 km² y una precipitación de 726 mm. de promedio anual. En esta zona existen varias lagunas que pueden aumentar el nivel de su represamiento como: Laguna Quihuila y Sacsá que se encuentran en el poblado de Acobamba. Existen pequeñas lagunas que pueden represarse como la laguna Paca y Muchcacocho.

Asimismo existen varias lagunas que viene desapareciendo para luego quedar como bofedales. Una actividad a considerarse es la protección de estas pequeñas para que los animales no ingresen, ya que muchas lagunas se van secando.

Por otro lado existe una gran cantidad de bofedales y/o humedales que requieren también protección del ingreso de animales. Existen cerca de 300 ha de humedales que requieren cuidado.

Microcuenca Macachaca

Aquí se encuentra la naciente principal del río Santa Eulalia, y donde se entrega las aguas de trasvase de la cuenca del Mantaro en la laguna Milloc. Sus aguas recorren de noreste a suroeste. Tiene una área de 135 km² y una precipitación promedio anual de 820 mm. Entre los principales ecosistemas a conservar se encuentran:

Lagunas: Esta zona tiene la mayor cantidad de laguna, cerca de 12. Muchas alimentan en cadena a otras, como por ejemplo la laguna Huasca que recibe las aguas de tres lagunas principales, por lo tanto se recomienda levantar el nivel de dique para almacenar más agua. Asimismo la laguna Millo recibe las aguas de cuatro lagunas importantes; sin embargo, por la topografía es complicado pensar en un represamiento, ya que inundaría un área significativa de bofedal, aparte del túnel trasandino.

Bofedales: Es también una zona importante en bofedales. En la zona de Milloc se requiere proteger cerca de 100 ha de humedales, ya que la turba viene siendo extraída por ser ubicada cerca de la carretera.

Forestación: Esta zona es propicia para sembrar árboles, ya que los suelos son de protección y de calidad agroecológica baja y por el grado de pendiente son suelos muy erosionables. Existe un potencial de 200 ha de forestación combinadas con zanjas de infiltración.

Microcuenca Shucha

Este es un río de buena calidad ya que no hay mayor actividad antrópicas en la zona. Sus aguas recorren de noreste a suroeste. Tiene una área de 135 km² y una precipitación promedio anual de 820 mm. Entre los principales ecosistemas a conservar se encuentran:

Lagunas: Esta zona cuenta con cerca de 9 lagunas significativas, la mayoría con un nivel de represamiento, muchas alimentan en cadena a otras, como por ejemplo la laguna Paucaraconcha que recibe las aguas de tres lagunas represadas. Por lo tanto se recomienda levantar el nivel de dique para almacenar más agua. Asimismo la laguna Mancacoto se recomienda levantar el dique porque recibe las aguas de tres lagunas importantes.

Bofedales: Es también una zona importante en bofedales. En la zona de la laguna Paucaraconcha se requiere proteger cerca de 100 ha de humedales.

Forestación: Aquí se encuentra gran parte del bosque de Japani de 700 ha de forestación con quinales. Esta zona es propicia para aumentar la forestación, ya que los suelos son de protección y de calidad agroecológica baja y por el grado de pendiente son suelos muy erosionables. Existe un potencial de 200 ha de forestación al frente del bosque de Japani que debe ser combinada con zanjas de infiltración y amunas.

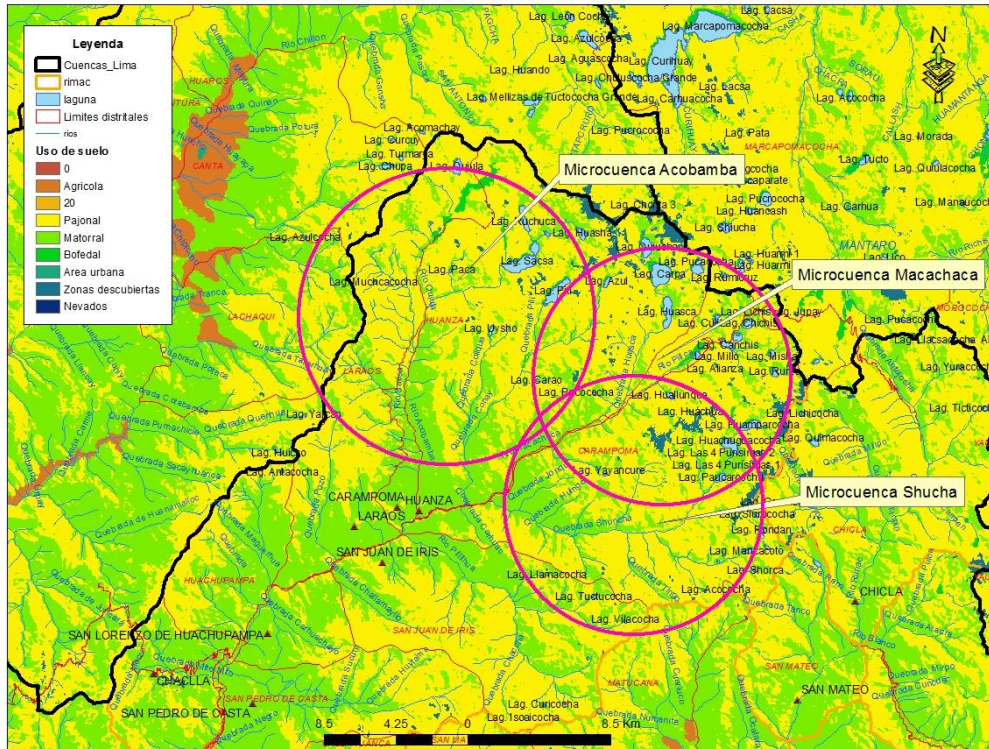


Figura 11-5 Mapa de ubicación de las microcuencas de Santa Eulalia

b-2 Subcuenca Alto Rímac

Es la segunda zona con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 5.19 m3/s promedio anual, con una máxima de 9.7 m3/s. sin embargo, esta disponibilidad se va a ver reducida 0.7 %, ya que del 2031 al 2036 se va a presentar un fuerte déficit de agua en esta zona.

Es la naciente del río Blanco, y sus aguas recorren de sureste a noroeste. Tiene un área de 235 km² y una precipitación de 608 mm de promedio anual. Se encuentra mayormente en el distrito de San Mateo de Huanchor. En esta zona se encuentra la represa de Yuracmayo con una capacidad de 48 MMC y varias lagunas y nevados que alimentan a la represa. También hay lagunas aguas abajo de la represa que pueden represarse como la laguna Lachsacocha y Ahuascacocha. En esta zona está proyectado realizar otro trasvase de Mantaro, del río Yauli al río Blanco, a través de un túnel de 10 km.

En esta zona existe una gran cantidad de bofedales y/o humedales que requieren también protección del ingreso de animales. Existen cerca de 200 ha de humedales que requieren cuidado.

También se observa que con el proceso de desglaciación que viene ocurriendo en esta zona es recomendable hacer prácticas de conservación de suelo como zanja de infiltración y reforestación en laderas, ubicadas mayormente en la parte baja de la subcuenca.

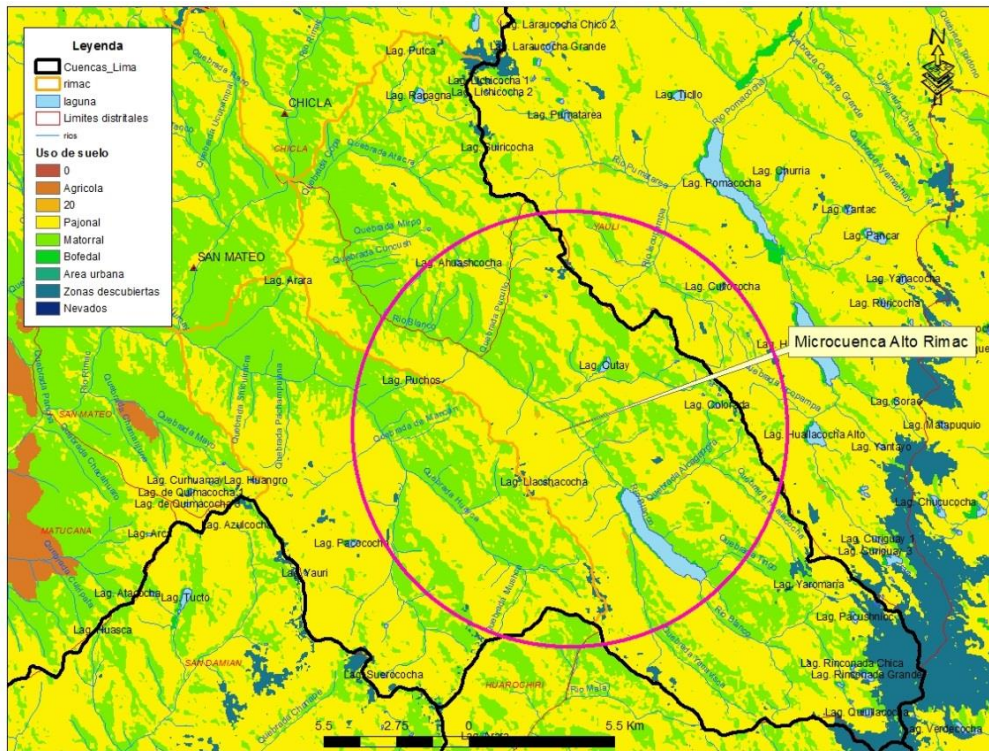


Figura 11-6 Mapa de ubicación de la microcuenca Alto Rímac

b-3 Subcuenca Rímac

Es la tercera zona con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 4 m³/s promedio anual, con una máxima de 7.8 m³/s. Sin embargo, es la zona que va a sufrir la mayor pérdida de disponibilidad de agua, con una reducción de 5.6 %, ya que del 2031 al 2036 se va a presentar un fuerte déficit de agua en esta zona.

Es la naciente del río Rímac, y sus aguas recorren de norte a sur. Tiene un área de 170 km² y una precipitación de 701 mm de promedio anual. Se encuentra totalmente en el distrito de Chicla. En esta zona se encuentra gran actividad minera y sus lagunas se han visto reducidas por la actividad antrópica (minería, sobrepastoreo, crecimiento urbano, etc.) junto al calentamiento global.

En esta zona es importante rescatar los pocos bofedales y/o humedales que quedan y que ponen en riesgo la existencia de la animales y plantas.

Se recomienda también hacer prácticas de forestación y conservación de suelo en las zonas aledañas a la carretera central para que ayude a la captura de CO₂ en la zona y de paso ayuda a la recarga hídrica y control de sedimentos al río.

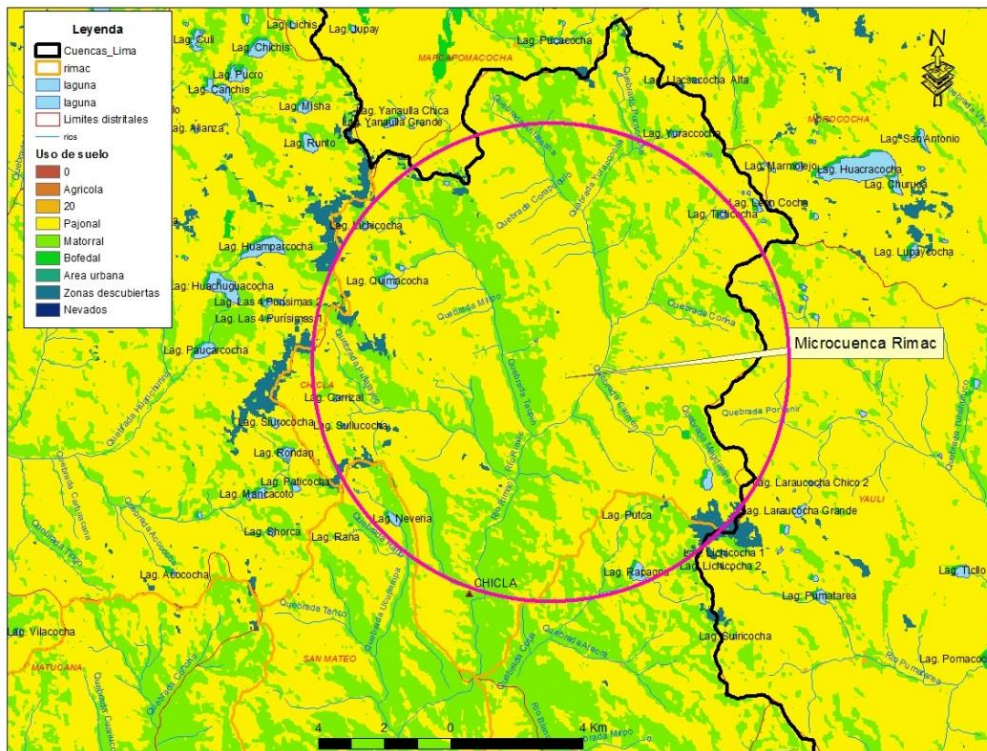


Figura 11-7 Mapa de ubicación microcuenca Rímac

b-4 Subcuenca Medio Rímac

Es la cuarta zona con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac. Para el horizonte centrado al 2030, el caudal determinado fue de 3.9 m³/s promedio anual. Tiene un área de 633 km² y una precipitación de 327 mm de promedio anual. Esta subcuenca abarca varios distritos que están ubicados a lo largo de la carretera central, desde Santa Cruz de Cocachacra hasta Matucana. En esta zona se encuentra varios centros urbanos en crecimiento. Los que mayor aporte hídrico brindan a la subcuenca son las microcuencas de la quebrada de Pancha y la Quebrada de Canchacalla, ambas ubicadas en la margen derecha del río Rímac, con un aporte de 1.3 m³/s y 1.98 m³/s respectivamente.

Microcuenca Pancha

En esta zona hay pequeñas laguna que requieren construir diques para almacenar agua como las lagunas Minihuanti, también proteger bofedales en una área aproximada de 25 ha. En la parte baja se puede recuperar terrazas en una área aproximada de 35 ha.

Se recomienda también hacer prácticas de forestación combinada con zanjas de infiltración y amunas o canales de desviación.

Microcuenca de Canchacalla

Esta zona es adecuada para realizar prácticas de conservación de suelos como forestación, zanjas de infiltración, amunas, etc., para que ayuden a infiltrar agua al subsuelo. Hay un potencial de forestación de 600 ha en ambas quebradas principales que son abruptas.

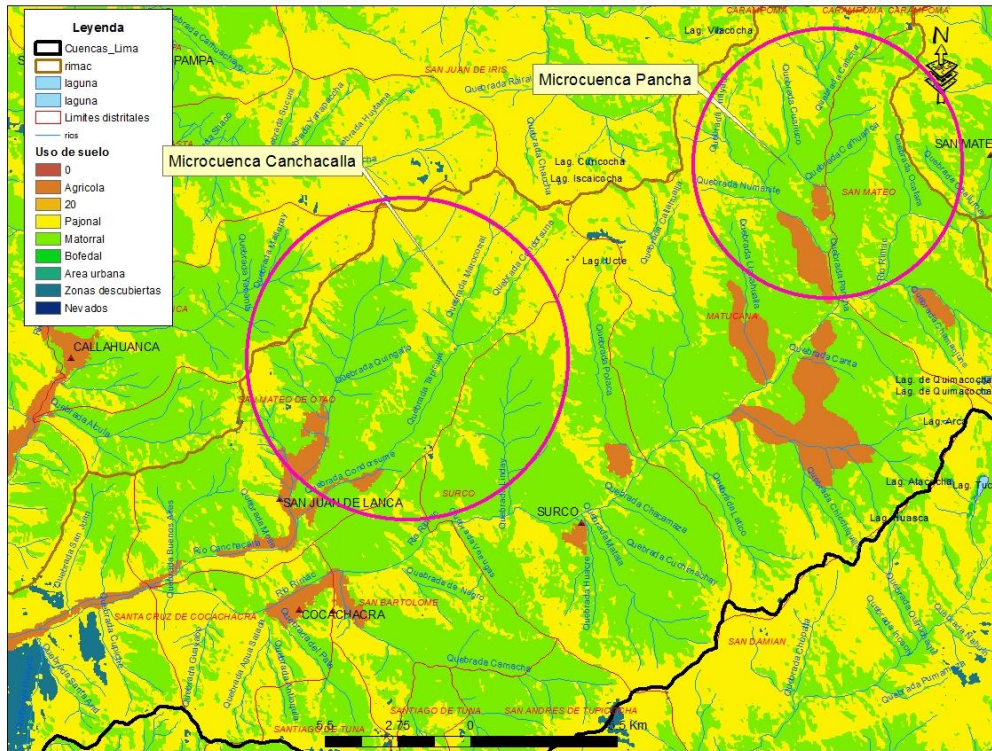


Figura 11-8 Mapa de ubicación de microcuencas Pancha y Canchacalla

b-5 Subcuenca San José de Parac

Es la quinta zona con mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 2.7 m³/s promedio anual, con una máxima de 4.6 m³/s.

Es la subcuenca del mismo nombre del río, y sus aguas recorren de sureste a noroeste. Tiene un área de 130 km² y una precipitación de 568 mm de promedio anual. Se encuentra totalmente en el distrito de San Mateo de Huanchor. En esta zona se encuentra pasivos ambientales por minería en la naciente de sus aguas.

En esta zona pocas lagunas, la más grande es la Pocococha que puede construirse un dique para almacenar más agua. También la laguna Arara presenta buenas condiciones para un represamiento. Pero hay un importante número de bofedales y/o humedales que pueden conservarse que suman alrededor de 70 ha.

En esta zona se recomienda hacer cercado de pasto y/o pastoreo rotativo para evitar el sobrepastoreo de los suelos que terminan degradándose. Aquí existe una experiencia del Aquafondo en la recuperación de una cancha, donde se cercó 100 ha pasto, 2400 m de zanja de infiltración 4 ha de forestación, un microreservorio de 300 m³ y 1 ha de riego por aspersión. El potencial otros proyectos similares es alto.

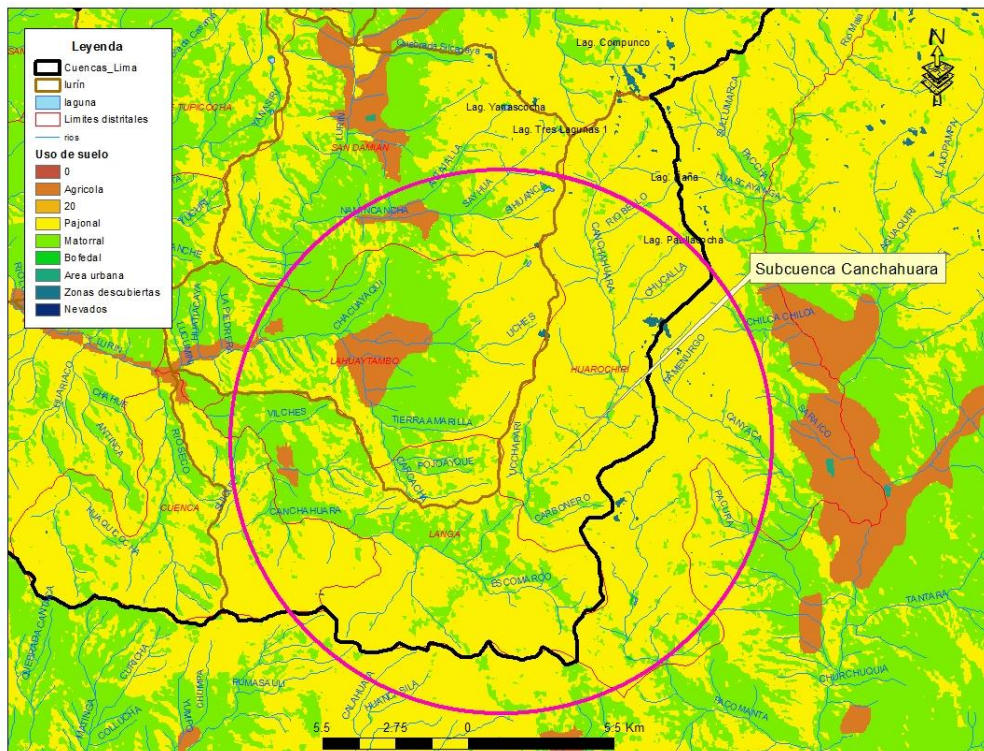


Figura 11-10 Mapa de ubicación de microcuenca Canchahuara

c-2 Subcuenca Medio Alto Lurín

Es la segunda zona de mayor disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lurín. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 0.92 m³/s promedio anual, con una máxima de 1.8 m³/s. Sin embargo, se observa que su disponibilidad va disminuir en 2.6 % en promedio, siendo un escenario crítico en los próximos 30 años. A diferencia de las anteriores subcuencas esta no es una de las nacientes del río Lurín, pero sí cuenta con mayor vegetación y lagunas. Sus aguas recorren de este a oeste, y se encuentran los distritos de San Damían y Lahuaytambo principalmente. Tiene un área de 182 km² y una precipitación de 360 mm de promedio anual. En esta zona hay varias lagunas pequeñas, la mayoría con un nivel de represamiento, siendo las más importantes la laguna Yanasoconcha y Tres lagunas. La primera se puede elevar la altura del dique para almacenar más agua, la segunda por su orografía no se puede represar. En esta zona no se observa bofedales significativos.

A pesar de ser una zona seca, se puede aumentar prácticas conservacionistas como recuperación de terrazas en una área de 60 ha, a la altura del pueblo de San Damían. También la forestación con 60 ha, combinado con zanjas de infiltración que permitan humedecer el suelo, a la altura del poblado de Sunicancha. Esta zona también tiene varias amunas para recuperar en la parte alta para infiltrar agua al acuífero.

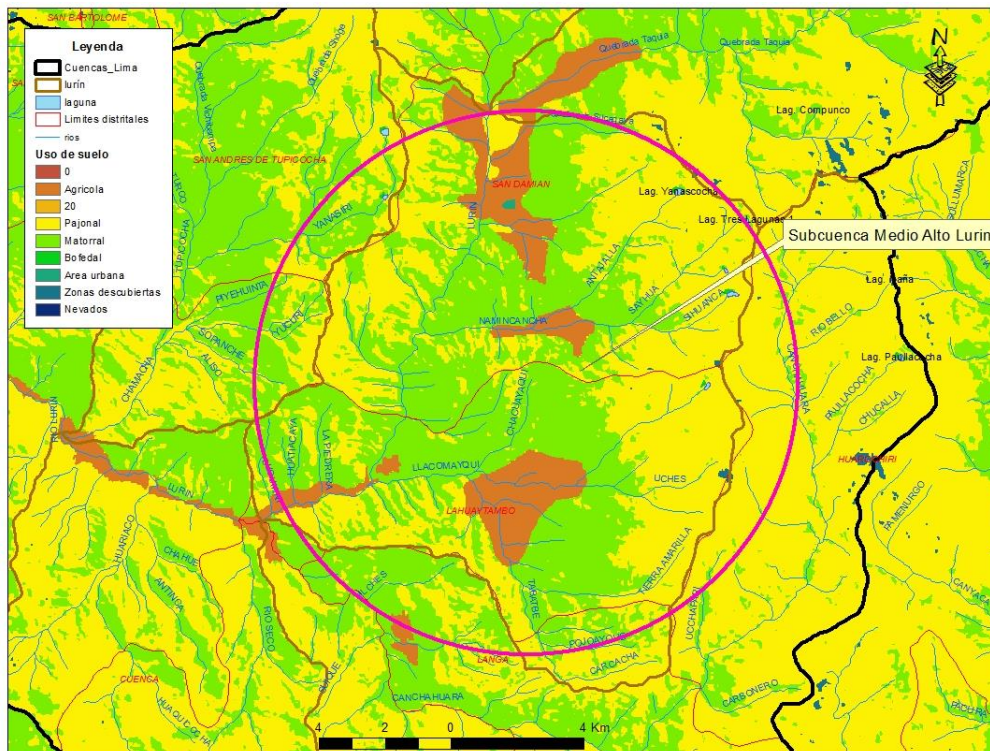


Figura 11-11 Mapas de ubicación subcuenca Medio Alto Lurín

d) Cuenca del Mantaro

d-1 Subcuenca 499695

Es la zona de mayor disponibilidad hídrica en la cuenca alta del río Mantaro. Para el horizonte centrado al 2030, el caudal determinado fue de 33.4 m³/s promedio anual, con una máxima de 83 m³/s. Las microcuencas que brindan un mayor aporte de agua son la Quebrada Santa Ana y Pacayacu; todas ellas ubicada en el distrito de Marcapomacocha.

Es una de las nacientes del río Mantaro, sus aguas a diferencia de las anteriores de oeste a este. Tiene un área total de 1719 km², (aunque mayormente nos interesa la margen derecha del río Mantaro) y una precipitación de 1100 mm de promedio anual. En una zona de grandes lagunas, producto de ellos se dio inicio a la serie de repesamiento de lagunas conocidas como Marcas, el primero se construyó en esta zona, siendo la laguna Marcapomacocha la más importante con 70 MMC de reservas. Esta es la zona de mayor precipitación en todo el ámbito de estudio, por lo tanto las medidas de almacenamiento deben considerarse en todo este ámbito. Asimismo, existe un área grande de conservación de bofedales que están cerca a las lagunas. Por ser una zona extensa se debe priorizar la implementación de prácticas de conservación en el ámbito de todas las lagunas para evitar la sedimentación de ellas.

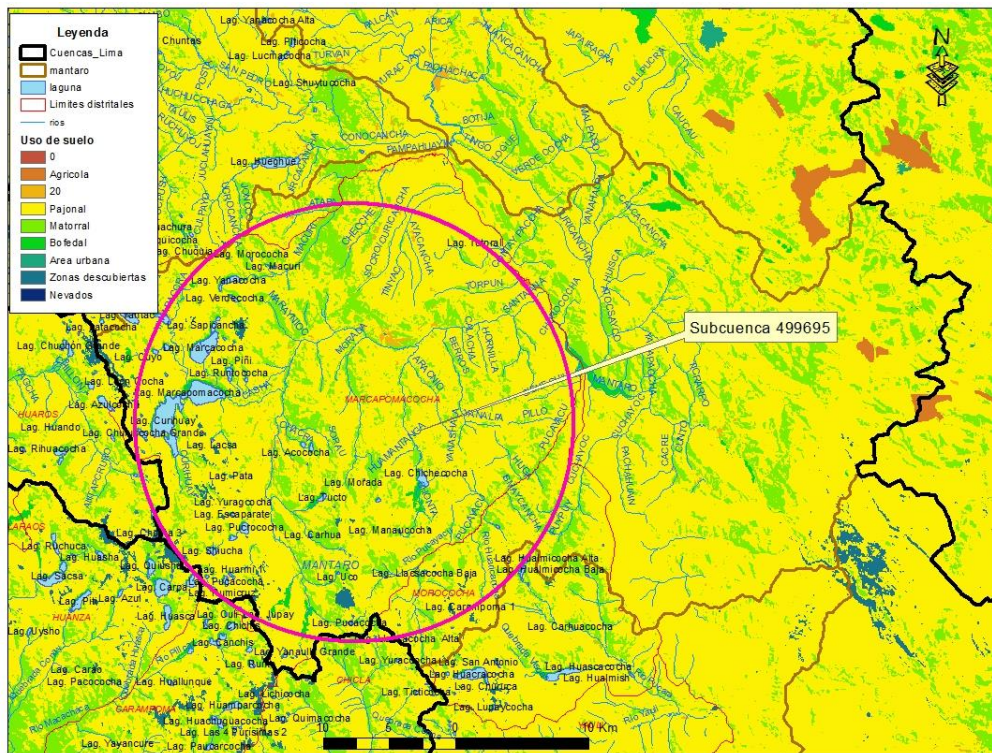


Figura 11-12 Mapa de ubicación subcuenca 499695

d-2 Subcuenca Conocancha

Es la segunda zona de mayor disponibilidad hídrica en la cuenca alta del río Mantaro. Para el horizonte centrado 2030, el caudal determinado fue de 14.5 m³/s promedio anual, con una máxima de 42 m³/s en Marzo. Esta subcuenca a diferencia de las anteriores sus aguas drenan a un colector común llamado Conocancha.

Es también una de las nacientes del río Mantaro, sus aguas van de oeste a este. Tiene un área total de 717 km² y una precipitación de 900 mm de promedio anual. Al igual que la anterior es una zona de grandes lagunas, que también forma parte de infraestructura mayor Marcos, siendo la más importante la laguna Huascacocha con cerca de 70 MMC de reservas. Esta zona presenta también altas precipitaciones, por lo tanto las medidas de almacenamiento deben considerarse en todo este ámbito. Asimismo existe un área grande de conservación de bofedales que están cerca a las lagunas. Por ser una zona extensa se debe priorizar implementar prácticas de conservación en el ámbito de todas las lagunas que eviten la sedimentación de ellas.

11.4.2 Gobernabilidad

- **Fortalecer el consejo de recursos hídricos o una plataforma de diálogo a nivel de cuenca que permita coordinar acciones de ACC y gestión de riesgos de desastres**

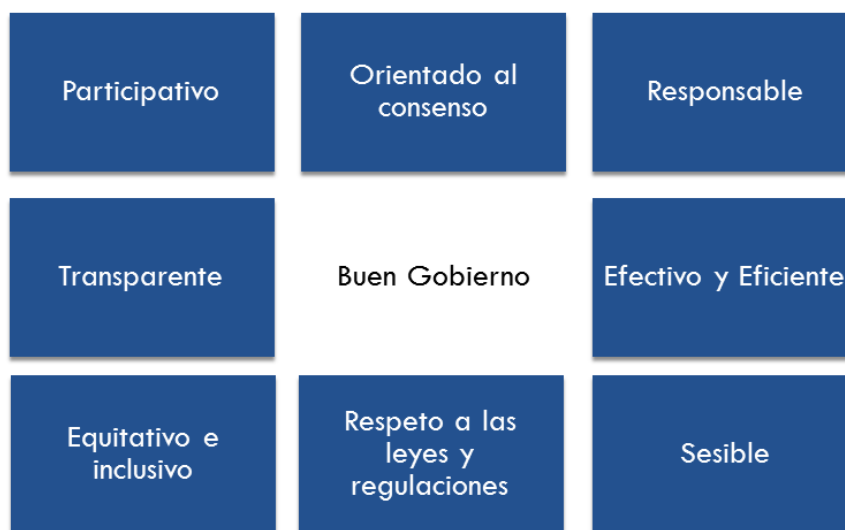
En la cuenca del río Rímac se está organizando la creación del Consejo de Recursos Hídricos que tiene por finalidad promover la participación activa y permanente de los gobiernos regionales, gobiernos

locales, sociedad civil, organizaciones de usuarios de agua, comunidades campesinas, comunidades nativas y demás integrantes del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos que intervienen en la cuenca. El principal objetivo es participar en la planificación, coordinación y concertación para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos en sus respectivos ámbitos, mediante el Plan de Gestión de Recursos Hídricos en la Cuenca.

Una plataforma para la ACC brinda a los actores como representantes de gobierno, industria, organización de profesionales y sociedad civil colaborar en priorizar la implementación de medidas de adaptación. Esta estructura permite poner en común el conocimiento, capacidades y recursos financieros. El objetivo de la plataforma sería crear un entorno propicio para la adaptación donde los tomadores de decisiones cuenten con las herramientas e información necesaria para adaptarse. Además, asegurar la implementación de medidas de adaptación, brindar información, herramientas y recomendaciones para involucrar a todos los actores de la cuenca. La estructura de la plataforma podría estar organizada a través de grupos de trabajo donde participan los diversos sectores: agricultura, agua potable, energía, infraestructura, minería, ciencia e investigación, información sobre agua y cambio climático. La plataforma deberá promover la colaboración entre actores para (Gobierno de Canadá, 2016):

- Determinar prioridades compartidas y tratarlas de manera eficaz
- Abordar problemas comunes que atraviesan las jurisdicciones y afectan múltiples sectores de la economía.
- Utilizar recursos de manera eficiente.
- Compartir datos, conocimientos y experiencias
- Evitar consecuencias negativas no deseadas de la adaptación.
- Una plataforma de múltiples partes interesadas permite compartir,
- comprender, interpretar y comunicar información sobre el clima, dando espacio para el diálogo sobre de los problemas de adaptación y opciones. Sinergia de través de los actores interesados.
- Permite la combinación de los sistemas de conocimientos locales y científicos para hacer que la información relevante del clima y para la potenciación de las comunidades a nivel local.
- Fortalece la comunicación y análisis de información sobre el clima mediante los procesos de planificación, esto permite gestionar la incertidumbre y riesgos que se presentan con el cambio climático.

Los actores son definidos como “todas las instituciones, organización e individuos que pueden ser afectados en la toma de decisiones”. Además, todos los actores que están involucrados en las políticas de cambio climático y medidas de adaptación que incluyen instituciones del estado, sociedad civil, empresas. El objetivo es fortalecer el proceso de toma de decisiones y asegurar la implementación de medidas de adaptación. El involucramiento de todas las partes interesadas fortalecerá la coordinación y evitará la duplicación de esfuerzos (Department of Environmental Affairs, South Africa (2011). Governance of Climate Change in South Africa. p 27).



Source: UNESCAP

Figura 11-13 Principios base para una efectiva planificación en cambio climático

La participación de los actores en la toma de decisiones es un elemento importante para la buena gobernanza. La Figura 11-13 muestra los principios base para un buen gobierno que previenen la corrupción y procesos transparentes en la toma de decisiones (UNESCAP, 2014 cited by UN Learn).

- **Elaboración de un plan de adaptación al cambio climático del sector agua potable que debe incorporar al plan de gestión de gestión de la cuenca Chillón, Rímac, Lurín y al plan maestro.**

La planificación es el proceso de establecimiento de objetivos, el desarrollo de estrategias, perfilando los mecanismos de ejecución y la asignación de recursos para alcanzar metas (PNUD). La planificación es uno de los componentes más importantes en el proceso de adaptación. El plan de adaptación elaborado por el sector agua potable deberá incorporarse en los planes de gestión a nivel de cuenca en el futuro, el cual debe incorporar actividades y formas de financiamiento (UN Learn, 2016).

Sin embargo este el proceso de planificación debe superar varios desafíos:

- Falta de coordinación
- Falta de liderazgo y soporte político.
- Limitado monitoreo y evaluación de políticas
- Complejidad científica e incertidumbre
- Costos y beneficios económicos de la política climática

Para el éxito de un proceso de planificación se requieren cuatro pasos importantes: fuerte respaldo político, la coordinación adecuada entre los departamentos y las instituciones pertinentes, el apoyo de los organismos de investigación y la participación de múltiples partes interesadas. Estos deben estar al inicio y durante el proceso (Loftus, 2011).

11.4.3 Propuesta Sector Agua Potable

Portafolio de proyectos

La sostenibilidad de cada proyecto se basa en la participación activa y compromiso permanente de las comunidades aguas arriba que se benefician de los proyectos y de los usuarios aguas abajo, como SEDAPAL, que financian dichos proyectos. Es así que los proyectos permiten concientizar y empoderar a la población en el cuidado y conservación de los recursos naturales y esto se consolida con las actividades de monitoreo hidrológico y socioeconómico.

Estos proyectos se sobreentienden que no ocasionan impacto negativo al medio ambiente, no contemplan obras de infraestructura de importancia ambiental, ni actividades que generen residuos tóxicos u otros de efectos contaminantes. Las propuestas de los proyectos implican el uso de tecnologías acordes con el uso racional de los recursos naturales, proteger la diversidad biológica, recuperar y mantener la fertilidad del suelo, etc. Con este portafolio, SEDAPAL se ve beneficiada principalmente en el incremento de caudal y reducción de sedimentos.

Tiempo de ejecución del proyecto

El portafolio de proyectos está estimado para ejecutarse en 5 años. Para ello un componente fuerte será la sensibilización a los pobladores para desarrollar este tipo de intervenciones. El tiempo total de cada proyecto va a depender de las coordinaciones con la comunidad, la disponibilidad de la gente a trabajar, del acceso a la zona, entre otras. Esta etapa de concientización se estima entre 3 a 6 meses. La elaboración del expediente técnico requiere entre 1 y 2 meses con planos y costos reales. La ejecución de cada proyecto estaría entre 2 y 3 meses aproximadamente. En total cada proyecto duraría entre 6 a 10 meses. La implementación de este tipo de proyectos puede parecer mucho tiempo, pero AQUAFONDO busca lograr relaciones de mediano a largo plazo y esto se lograría con el sistema de monitoreo.

Sistema de monitoreo y evaluación

Estimar el beneficio hidrológico es más difícil de realizar con la infraestructura verde que con la infraestructura gris convencional, debido a la falta de datos disponibles sobre los procesos hidrológicos en estas complejas cuencas montañosas. Debido a la falta de un monitoreo exhaustivo y riguroso en la zona de estudio para largos períodos de tiempo, no se ha realizado un claro esfuerzo para estimar los beneficios hidrológicos de las intervenciones basadas en las cuencas.

El caudal base fue seleccionado como el criterio para evaluar el rendimiento de las intervenciones verdes. El caudal base se define como la menor tasa de caudal del agua superficial en el año y se expresa en metros cúbicos por segundos.

El sistema de monitoreo permite evaluar si los proyectos están produciendo cambios en la dirección y la magnitud que se desea, y proporciona una forma de evaluar el progreso hacia el logro de objetivos.

El monitoreo de tendencias se centra en un conjunto básico de indicadores de costo-eficiencia que pueden ser monitoreados a través del tiempo.

El Monitoreo por lo tanto nos permitirá medir el impacto de nuestras intervenciones en términos hidrológicos y socioeconómicos. Esto es una de las actividades que nos diferencia de otras intervenciones realizadas por otras instituciones ambientalistas o de desarrollo productivo. Para el diseño e implementación del monitoreo se va a seleccionar algunos de los proyectos de este portafolio. Como parte de este portafolio se está considerando realizar 10 sistemas de monitoreo hidrológico y social con una toma de datos de por lo menos 3 años consecutivos. El monitoreo hidrológico medirá cambios en la cantidad y calidad del agua debido a los cambios en el uso del suelo por las intervenciones planteadas. La cantidad de agua se mide a través del aumento en el caudal base expresado en litros/segundo, y la calidad se mide a través de la reducción de sedimentos expresado en Tn/ha. Esta labor se realiza con participación de la comunidad para crear conocimiento científico y mejorar sus prácticas agrícolas y de conservación. El monitoreo social implica hacer una línea base antes de la ejecución del proyecto y establecer indicadores que nos permitan medir el impacto en sus actividades económicas, sociales, culturales y ambientales.

Costo del portafolio

El costo total del portafolio de proyectos asciende a S/.11'966,456 de los cuales los gastos de ejecución de obra representan S/.9'497,187; en el costo por actividad está considerado el pago por mano de obra no calificada o peón, sin embargo si se llega a un acuerdo de que la comunidad aporte su mano de obra, los costos directos pueden disminuir en un 20%. Los costos de elaboración de estudios es de S/. 284,916; el cual va a depender del tamaño del proyecto. Los gastos generales son los gastos que va a incurrir la institución que ejecuta el proyecto, el cual representa S/.949,719. Los gastos de supervisión de los proyectos son de S/. 284,916 y estarían a cargo de AQUAFONDO. El sistema de monitoreo representa S/. 949,719 de las cuales el monitoreo hidrológico estaría a cargo de Condesan y social a cargo de AQUAFONDO. En el cuadro siguiente se muestra el costo total con las 8 intervenciones seleccionados por AQUAFONDO; sin embargo los proyectos abarcan más de un tipo de intervención como se detalla en cada proyecto.

12 Conclusiones y recomendaciones del estudio

En general, los volúmenes I y II del estudio cubren un amplio espectro de la hidroclimatología actual de las cuencas de estudio, caracterización que queda bien sintetizada en cada uno de los Atlas hidrológicos elaborados por cuenca. En el volumen III del estudio está plasmado los resultados de las simulaciones del clima futuro y de la disponibilidad hídrica proyectados para el período 2016-2045 o su equivalente denominado horizonte centrado al año 2030. El comportamiento de las variables climáticas e hidrológicas que se esperaría a nivel de cuenca resultado de las simulaciones climáticas e hidrológicas realizadas se describe a continuación:

12.1 Cuenca del río Rímac

Respecto a las variables climáticas en el horizonte 2030

El incremento promedio de la precipitación anual que se espera en esta cuenca es de 4.5%. A nivel de subcuencas, se observa que las subcuencas impactadas con mayor déficit de lluvias serán las subcuencas secas del Medio Bajo Rímac, Jicamarca y Medio Rímac, en las cuales la precipitación anual disminuiría en 30.0%, 24.0% y 18.0%, respectivamente.

El incremento de la evapotranspiración Potencial anual en promedio ha sido estimada en 6.0%, con un rango de variabilidad anual a nivel de subcuencas que va de 4.0% a 11.0% de incremento.

Respecto a la disponibilidad de agua en el horizonte 2030

Los impactos en la disponibilidad de agua superficial que se proyecta para el horizonte 2030, indica una tendencia al incremento de la oferta hídrica anual en el conjunto de la cuenca, que alcanzaría 0.3%.

Se ha observado que los impactos en la disponibilidad de agua superficial alcanza diferente magnitud en cada una de las subcuencas evaluadas; así tenemos que las subcuencas Alto Rímac y Santa Eulalia presentarán una disminución en su caudal promedio anual de -3.0% y -8.0%; anomalías que se encuentran dentro su variabilidad normal. En la subcuenca Medio Alto Rímac se espera el incremento de la oferta hídrica anual en 4.0%

En relación al ciclo estacional de los caudales, a nivel de la cuenca integral del Rímac, se observa en las proyecciones hidrológicas una reducción de los picos de los caudales de avenidas de hasta 36%, mientras que los caudales de estiaje podría alcanzar un incremento máximo de hasta 38.0%, tomando como referencia la cuenca de recepción de la estación hidrológica de Chosica.

Respecto a la disponibilidad de agua agrupada por quinquenios

El quinquenio 2026-2030 se proyecta como el más húmedo en la cuenca, período en el cual el caudal promedio anual del río Rímac se incrementará en 13.0%. Por otro lado, el quinquenio 2041-2045 se proyecta como el más seco, con un déficit en el caudal promedio anual de -15.0%. En este quinquenio, las subcuencas más afectadas por deficiencia hídrica serían Rímac, Santa Eulalia, Alto Rímac y San José de Parac, con deficiencias de caudal de -29%, -22.0%, -20.0% y -13.0% a nivel anual, respectivamente.

12.2 Cuenca del río Chillón

Respecto a las variables climáticas en el horizonte 2030

Para la cuenca integral del río Chillón se espera el incremento en la precipitación anual de 15.0%. En las subcuencas de mayor aporte hídrico como son Alto Chillón y Quisquichaca se espera un comportamiento pluviométrico diferenciado, en el primer caso se presentará un déficit hídrico anual de -8 %, mientras que en el segundo caso se espera un incremento de la precipitación anual de 5%. El mayor incremento de la precipitación anual se espera en la subcuenca Medio Alto Chillón con 7.0%, mientras que el mayor déficit se espera en la subcuenca Gangay con -10.0%.

El incremento de la evapotranspiración Potencial anual en promedio ha sido estimada en 5.0%, con un rango de variabilidad anual a nivel de subcuencas que va de 3.0% a 9.0% de incremento.

Con respecto a la disponibilidad de agua en el horizonte 2030

Los impactos en la disponibilidad de agua superficial que se proyecta para el horizonte 2030, indica una tendencia al incremento de la oferta hídrica anual en el conjunto de la cuenca, que alcanzaría 5.0%.

En la distribución espacial de la oferta de agua, se ha determinado que los impactos en la disponibilidad de agua superficial alcanzaría diferente magnitud en cada una de las subcuencas evaluadas; así tenemos que las subcuencas que experimentarán mayor déficit hídrico serán Alto Chillón y Medio bajo Chillón, con la disminución del caudal promedio anual en 13% y 1.0%, respectivamente; por otro lado las subcuencas de Quisquichaca y Medio Alto Chillón presentarán los mayores incrementos en el caudal promedio anual con 15.0% y 2.0%, respectivamente.

En relación al ciclo estacional de los caudales, las proyecciones hidrológicas indican que los picos de los caudales de avenidas se reducirán hasta en 45%, mientras que los caudales de estiaje presentarían incrementos de hasta 97.0%, tomando como referencia la cuenca de recepción de la estación de Pte Magdalena.

Con respecto a la disponibilidad de agua agrupada por quinquenios

El quinquenio 2026-2030 se proyecta como el más húmedo en esta cuenca, con un incremento en la oferta hídrica anual de 25.0%; por otro lado el quinquenio 2041-2046 se proyecta como el más seco, período en el cual la oferta hídrica anual alcanzará un déficit de -17.0%. En este quinquenio, las subcuencas más afectadas por déficit hídrico serán Alto Chillón, Medio Bajo Chillón y Quisquichaca, con disminución de la oferta hídrica anual de 31.0%, 24.0% y 10%, respectivamente.

12.3 Cuenca del río Lurín

Respecto a las variables climáticas en el horizonte 2030

Se espera para esta cuenca la disminución de la precipitación anual con un déficit en la cuenca de recepción de la estación de Antapucro, de -11%. Las subcuencas más afectadas por déficit

pluviométrico serían Chamagna, Medio Alto Lurín, Alto Lurín y Canchahuara, las cuales presentarán deficiencias pluviométricas a nivel anual de -37.0%, -29%, -27.0% y -18.0%, respectivamente. En las subcuencas de Tinajas y Medio bajo Lurín, se espera el incremento de la precipitación anual en 37% y 3.0%, respectivamente.

El incremento de la evapotranspiración Potencial anual en promedio ha sido estimada en 5.5%, con un rango de variabilidad anual a nivel de subcuencas que va de 3.0% a 14.0% de incremento.

Con respecto a la disponibilidad de agua en el horizonte 2030

Los impactos en la disponibilidad de agua superficial que se proyecta para el horizonte 2030, indica una tendencia a la disminución de la oferta hídrica anual en el conjunto de la cuenca, con un déficit de -5% en la cuenca de recepción de la estación de Antapucro.

En la distribución espacial de la oferta de agua, se ha encontrado que los impactos en la disponibilidad de agua superficial alcanza diferente magnitud en cada una de las subcuencas evaluadas; así tenemos que las subcuencas de mayor afectación por déficit hídrico serán Chamagna, Medio Alto Lurín, Alto Lurín y Canchahuara, donde se presentaría la disminución del caudal promedio anual en 44.0%, 42.0%, 40% y 26.0%, respectivamente.

En las subcuencas de Medio Bajo Lurín y Tinajas se espera incrementos leves en la oferta hídrica anual del orden de 3.0% y 5.0%, respectivamente.

En relación al ciclo estacional de los caudales, se espera un impacto más significativo en los caudales de avenidas los cuales se reducirán hasta en 42.0% a fines del horizonte evaluado. Los caudales de estiaje se verán afectados por déficit hídrico con una reducción de los mismos hasta en 12%.

Respecto a la disponibilidad de agua agrupada por quinquenios

La oferta hídrica anual se ve impactada de diferente manera en todos los quinquenios, mostrando un rango de variabilidad entre -29% a 1.0%. El mayor déficit hídrico se presentaría en el quinquenio 2041-2045, mientras que el quinquenio 2031-2035, sería el único donde se daría un leve incremento. Las subcuencas más afectadas en el quinquenio más seco serían Chamagna, Medio Alto, Lurín, Alto Lurín, Canchahuara y Chalilla, con la disminución de la oferta hídrica anual del orden de 45%, 39%, 39%, 35% y 24%, respectivamente.

12.4 Cuenca del río Mantaro

Respecto a las variables climáticas en el horizonte 2030

El incremento promedio de la precipitación anual que se presentaría en esta cuenca es de 16.0%. En las subcuencas de San Juan y Junín, se espera los mayores impactos en el régimen pluviométrico con incrementos en la precipitación anual de 34.0 % y 21.0 %, respectivamente. En la subcuenca de Conocancha, donde se ubican las principales obras de almacenamiento y regulación para el suministro de agua potable de Lima Potable, existe condiciones favorables de mayor aporte de lluvias que en promedio alcanzaría un incremento de 9.0% a nivel anual.

El incremento de la evapotranspiración potencial anual en promedio ha sido estimada en 2.0%, con un rango de variabilidad anual a nivel de subcuencas que va de 3.0% a 10% de incremento.

Con respecto a la disponibilidad de agua en el horizonte 2030

Los impactos en la disponibilidad de agua superficial que se proyecta para el horizonte 2030, indica una tendencia al incremento de la oferta hídrica anual en el conjunto de la cuenca, que alcanzaría 21.0%.

Se ha observado que los impactos en la disponibilidad de agua superficial alcanzan mayor homogeneidad en la distribución espacial de la oferta de agua, toda vez que el incremento en los caudales es generalizado en todas las subcuencas. Las subcuencas de San Juan, Junín, 499693 y Conocancho serán impactadas con mayor incremento en la oferta hídrica anual del orden de 47.0%, 28.0% 23.0% y 14.0%, respectivamente.

Con respecto al ciclo estacional de los caudales, se espera un mayor incremento en los caudales de avenidas en todas las subcuencas comprendido en un rango de 14.0% (Conocnacha) a 74% (San Juan). Por otro lado, los caudales de estiaje también presentarán un incremento pero en menor magnitud, variando este incremento de 1.0% (499695) a 8% (San Juan).

Con respecto a la disponibilidad de agua agrupada por quinquenios

El quinquenio 2026-2030 será el más húmedo en la cuenca del Alto Mantaro período en el cual la oferta hídrica promedio anual se incrementaría en 38%. En este quinquenio las subcuencas más impactadas por mayor oferta de agua serían San Juan, 499693 y Yauli, las cuales presentarán incrementos en el caudal anual de 61.0%, 52.0% y 51%, respectivamente. Por otro lado el quinquenio más seco será el 2041-2045, donde la disponibilidad hídrica disminuye en 9.0 % como valor medio de toda la cuenca alta. En este quinquenio seco, las subcuencas más afectadas por déficit hídrico serían Yauli, 499695, 499697 y Conocancho, en las cuales se espera la reducción de la oferta hídrica anual en 25%, 19.0%, 15% y 15%, respectivamente.

12.5 Recomendaciones

Los resultados de este estudio se han obtenido con los modelos y escenarios de emisiones GEI disponible del CMIP5. Con cierta periodicidad aparecen nuevos modelos, y se definen nuevos escenarios de emisiones futuras de GEI, más acordes con la realidad de la evolución política y social del planeta. Resultará por tanto necesario actualizar los escenarios de disponibilidad hídrica a medida que vayan estando disponibles versiones actualizadas de las simulaciones del clima futuro que realizan los grandes centros de modelación del clima global; lo cual lleva implícito también buscar afinar aún más la resolución espacial de las simulaciones dinámicas del clima a nivel de cuenca.

Los escenarios del clima y de la disponibilidad hídrica proyectados por quinquenio deberán ser utilizados para la actualización de los planes maestros de SEDAPAL; en ese sentido se recomienda tener en cuenta en la construcción de los escenarios de gestión hídrica los resultados de las variaciones más críticas de la oferta de agua obtenidos por cada quinquenio.

Para complementar el estudio se deben hacer proyecciones de demanda de agua para el mismo horizonte de los escenarios de disponibilidad hídrica elaborados. El contraste de la oferta y demanda hídrica futura permitirá tener una mejor percepción y manejo de los escenarios de riesgo ante escasez hídrica, así como la priorización de proyectos de afianzamiento hídrico.

Sobre la base de los escenarios de disponibilidad hídrica a nivel de subcuencas, se deberá analizar el tipo de medida de adaptación a implementar, con el objetivo de garantizar la disponibilidad hídrica para el abastecimiento poblacional de Lima y Callao.

En subcuencas críticas identificadas por deficiencia o excesos hídricos es importante establecer estaciones de monitoreo hidrometeorológico para hacer el seguimiento de las prácticas adaptativas que se implemente. En ese sentido se propone instrumentar microcuencas experimentales para evaluar científicamente los impactos de siembra y cosecha de agua en la cabecera de cuencas, como una alternativa verde de conservación del recurso hídrico. Al mismo tiempo estas parcelas experimentales deben ser representativas para la evaluación y desarrollo de modelos matemáticos hidrológicos, hidráulicos, flujo de escombros, erosión y transporte de sedimentos.

Se debe consensuar la información referente a los caudales naturales del río Rímac; existe discrepancia en las series naturalizadas obtenidas por diferentes fuentes, EDEGEL, ANA y los resultados del presente estudio. Para el SENAMHI la información de referencia es la que se obtiene de la estación hidrológica de Chosica, la cual integra toda la escorrentía superficial que se genera en su cuenca húmeda. En ese sentido para que el SENAMHI pueda monitorear los caudales naturales del río Rímac a nivel horario se necesita la información de los caudales de descarga del sistema regulado a esa misma resolución temporal, para descontarlos de los caudales observados en Chosica; esto amerita establecer arreglos o acuerdos interinstitucionales para la transferencia de información hidrológica entre los diferentes operadores de estaciones existente en la cuenca. Por otro lado se deberá contrastar en campo los protocolos, tipo de equipamiento y prácticas hidrométricas utilizadas para la estimación de los caudales por parte de los diferentes operadores a fin de encontrar las fuentes de discrepancia en los

caudales medidos por los diferentes operadores. SENAMHI, EDEGEL y SEDAPAL forman parte del Comité Directivo del reciente Observatorio del Agua de las cuencas chillón-rímac-lurín creado por el ANA y ese espacio debería ser aprovechado para promover los arreglos institucionales conducentes al sinceramiento de la información hidrológica y la homegenización de las mediciones hidrométricas.

Se debe resolver la instrumentación hidrológica en los puntos de control de San Mateo y río blanco, que son estaciones convencionales del SENAMHI; la potenciación de dichas estaciones con sensores hidrométricos automáticos con transmisión en tiempo real debe priorizarse en apoyo al sistema de Monitoreo y Alerta Temprana de inundaciones en la cuenca del Rímac.

Es importante desarrollar a futuro trabajos de investigación orientado a mejorar el conocimiento respecto de:

- a) Erosión y transporte de sedimentos, mediante la implementación de una red de monitoreo hidrosedimentológico en sitios estratégicos donde se opera redes hidrométricas.
- b) La determinación de escenarios de riesgos en quebradas altamente vulnerables ante la ocurrencia de huaycos. Modelado matemático de flujo de escombros.
- c) Determinación de umbrales críticos de precipitación generadora de huaycos para la alerta en tiempo real.
- d) Aplicación de modelos matemáticos para la cuantificación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica en contexto de cambio climático.
- e) Intensificar el Monitoreo de eventos extremos mediante sensoramiento remoto.
- f) Modelos de Predicción hidrológica en tiempo real
- g) Predicción hidrológica estacional por ensambles
- h) Modelos de pronóstico de inundaciones y sequías.
- i) Mejora de las mediciones hidrométricas mediante tecnología de velocimetría por imágenes de partículas LSPIV
- j) Evaluación del desempeño de los nuevos productos satelitales globales (GPM) a paso de tiempo horario disponibles a tiempo real para sus aplicaciones en el monitoreo y pronóstico de eventos extremos.