
**ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO
EN LA CUENCA DEL RIO MANTARO
PARA EL AÑO 2100**

Título : Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro para el año 2100

Autor : SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
Centro de Predicción Numérica - CPN

Año : 2007

Edición: SENAMHI

La presente publicación forma parte del Proyecto Regional Andino de Adaptación – PRAA, como línea de base del proyecto “Adaptación al Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (Bolivia, Ecuador, Perú)”, auspiciado por el GEF a través del Banco Mundial y fue coordinado por el CONAM.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI
Jr. Cahuide 785 Jesús María
Teléfonos: (51 – 1) 6141414 (central) y 6141408 (CPN)
<http://www.senamhi.gob.pe>

Diseño: Jorge Dávila Flores
Impresión: Imprenta del SENAMHI

Primera edición: Diciembre 2007
Impreso en Perú
2007

El contenido de este documento puede ser reproducido mencionando la fuente o con autorización del autor.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Presidente Ejecutivo	May. General FAP (r) Wilar Gamarra Molina
Responsable de la Gestión Técnica	Ing. Constantino Alarcón Velazco
Director General de Meteorología	May. FAP Julio Villafuerte Osambela
Autores	Ing. Gabriela Rosas Benancio (Coordinación Local) Ing. Grinia Avalos Roldán (Coordinación Técnica) Ing. Amelia Díaz Pabló Ing. Clara Oria Rojas Ing. Luis Metzger Terrazas Ing. Delia Acuña Azarte
Apoyo en programación	Bach. Gerardo Jácome Vergaray
Especialista analista SIG	Ing. Elizabeth Herrera Robles
Consultas técnicas	Ing. Est. Marcia Valdez Rossell Ing. Wilfredo Yzarra Tito Ing. Juan Carlos Huamaní Cayhualla Ing. Nelson Quispe Gutiérrez Ing. Ricardo Jesús Gómez López (INRENA)
Soporte computacional	Ing. Richard Miguel San Martín
Recopilación	Sr. Jorge Dávila Flores
Edición	Ing. Grinia Avalos Roldán Sr. Jorge Dávila Flores
Impresión	Sr. Dante Bracamonte Luna Sr. César Quispe Chávez Sr. Rusbel Galán Marín

Consejo Nacional del Ambiente - CONAM

Presidente

Manuel E. Bernales Alvarado

Secretario Ejecutivo

César Villacorta Arévalo

**Jefe de la Unidad de Cambio Climático
Coordinador Regional PRAA**

Ricardo E. Giesecke

Especialista Coordinación Regional PRAA

Ana Iju Fukushima

PRESENTACIÓN

El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), Autoridad Ambiental Nacional y ente rector del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, es el punto focal en el Perú de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). La Estrategia Nacional de Cambio Climático aprobada por D.S. 086-2003-PCM, fue desarrollada de manera multisectorial y representa el alto nivel de prioridad que el país confiere a los serios retos y amenazas que representa el Cambio Climático en el Perú.

En este contexto y gracias al aporte del Special Climate Change Fund del Fondo Mundial del Ambiente, el CONAM, a través del Banco Mundial, coordinó la fase de preparación del proyecto “Adaptación al Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales”, el cual tiene como objetivo principal la implementación de medidas piloto de adaptación al cambio climático, para las comunidades que viven en valles que se surten de agua a partir de cuatro glaciares tropicales selectos en Bolivia, Ecuador y Perú.

Como parte de las actividades de la fase de preparación del proyecto, se priorizaron dos áreas de intervención en el Perú: la subcuenca del Shullcas perteneciente a la cuenca del Mantaro en la región Junín, que es alimentada por el nevado Huaytapallana, y las subcuencas Santa Teresa, Sacsara, Ahobamba y Chaupimayo pertenecientes a la cuenca del Vilcanota-Urubamba en la región Cusco, que son alimentadas por el nevado Salkantay. Con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre las condiciones climáticas actuales y futuras se desarrollaron escenarios climáticos regionales para ambas cuencas.

El desarrollo de los escenarios climáticos fue encargado al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, dada su especialización y experiencia en la observación y análisis de variables climáticas a nivel nacional y regional. Los escenarios climáticos fueron desarrollados en base al modelo japonés de alta resolución, procesado en el supercomputador más veloz del mundo para cuando se hizo este experimento, “el Simulador de la Tierra o Earth Simulator”, con el apoyo de los científicos del Meteorological Research Institute de Japón y los resultados de este trabajo aparecen en el presente documento.

El CONAM expresa su felicitación al equipo técnico-científico del SENAMHI por los muy buenos resultados de este trabajo encomendado, el cual se constituye en una herramienta indispensable para asegurar un proceso coherente de planificación del desarrollo regional, incorporando al mismo los impactos del Cambio Climático.

Manuel E. Bernales Alvarado
Presidente del Consejo Directivo del CONAM

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo desea expresar su agradecimiento:

Al Banco Mundial en las personas de Walter Vergara, Alejandro Deeb y Alfred Grunwaldt.

Al Meteorological Research Institute - MRI de Japón, en las personas de Hiroki Kondo, Manabu Komiya, Akira Noda, Shoji Kusunoki, Ryo Mizuta por su permanente apoyo técnico.

Al Consejo Nacional del Ambiente del Perú - CONAM

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.

CONTENIDO

PRESENTACION	5
AGRADECIMIENTOS	6
CAPITULO 1.	
INTRODUCCION	9
1.1 Objetivos.....	10
1.2 Marco Teórico.....	10
1.3 Antecedentes de Tendencias actuales del clima en el país.....	16
CAPITULO 2.	
LA CUENCA DEL MANTARO	
2.1 Ubicación y Características Geográficas.....	18
2.2 Importancia Socioeconómica y potencialidades de la cuenca.....	18
2.2.1 Recurso hídrico.....	18
2.2.1.1 El río Shullcas.....	19
2.2.2 Recurso suelo.....	20
CAPITULO 3.	
DIAGNOSTICO CLIMÁTICO DE LA CUENCA	
3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el periodo lluvioso.....	23
3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del Mantaro.....	25
3.3 Clasificación climática de la Cuenca.....	27
3.4 Climatología de la Cuenca.....	28
3.4.1 Precipitación.....	28
3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación.....	28
3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación.....	30
3.4.2 Temperatura Máxima.....	30
3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima.....	30
3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima.....	31
3.4.3 Temperatura Mínima.....	31
3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima.....	31
3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima.....	32
3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas.....	33
3.5.1 Heladas.....	33
3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas.....	34
3.5.1.2 Distribución espacial de las heladas.....	34
3.5.2 Periodos secos.....	34
3.5.3 Periodos húmedos.....	37
3.5.4 El ENOS.....	39
3.6 Tendencias climáticas observadas.....	43
3.6.1 Tendencias Promedio de las Precipitaciones Observadas.....	43
3.6.1.1 Tendencia Anual.....	43
3.6.1.2 Tendencias estacionales.....	44
3.6.2 Tendencias promedio de la Temperatura Máxima.....	45
3.6.2.1 Tendencia anual.....	45
3.6.2.2 Tendencias estacionales.....	45

3.6.3 Tendencias promedio de la Temperatura Mínima.....	46
3.6.3.1 Tendencia anual.....	46
3.6.3.2 Tendencia estacional.....	46
3.7 Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático.....	47
3.7.1 Precipitación.....	47
3.7.2 Temperatura.....	50

CAPITULO 4.

CAUDAL DEL RIO MANTARO PROYECTADO AL AÑO 2035

4.1 El modelo SAMS.....	53
4.2 Información.....	54
4.3 Metodología.....	55
4.3.1 Test de Normalidad.....	57
4.3.2 Estadísticas estacionales básicas.....	57
4.3.3 Ajuste del modelo estocástico.....	58
4.3.4 Prueba del Modelo.....	58
4.3.5 Generación de series sintéticas.....	59
4.4 Resultados.....	61
4.5 Conclusiones.....	63

CAPITULO 5.

ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

5.1 El modelo y el experimento del Time-Slice.....	64
5.1.1 El modelo.....	64
5.1.2 El experimento del Time-Slice.....	65
5.2 Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro.....	65
5.2.1 Metodología.....	65
5.2.2 Escenarios proyectados	67
5.2.2.1 Temperatura máxima.....	67
5.2.2.2 Temperatura mínima.....	71
5.2.2.3 Precipitación.....	75

CAPITULO 6.

RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	80
------------------------------------	-----------

CAPITULO 7.

BIBLIOGRAFÍA.....	83
--------------------------	-----------

APENDICE 1

RED HIDROMETEOROLÓGICA, MAPAS DE RELIEVE Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.....	85
--	-----------

APENDICE 2

MAPAS DE PROMEDIOS MULTIANUALES, EVENTOS EXTREMOS Y TENDENCIAS ACTUALES.....	89
---	-----------

APENDICE 3

ESCENARIOS CLIMÁTICOS AL AÑO 2100.....	110
---	------------

APENDICE 4

CONCEPTOS Y TÉRMINOS BÁSICOS.....	123
--	------------

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

“En los últimos cien años (1906-2005), la temperatura mundial se ha incrementado en 0.74 °C, IPCC (2007).”

El Proyecto Regional Andino de Adaptación, financiado por el GEF a través del Banco Mundial, coordinado por el CONAM - Perú y conformado por instituciones científicas especialistas en Cambio Climático del Perú, Ecuador y Bolivia, propone la realización del estudio técnico de Diseño y Adaptación al Cambio Climático para la región Andina en cuencas prioritarias de cada país andino, como línea de base del Proyecto de Adaptación al Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales.

En el Perú, el SENAMHI fue designado para determinar escenarios climáticos futuros en las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba, ambas con componente glaciar, considerando la experiencia desarrollada en la realización de este tipo de estudios sobre cambio climático en las Cuencas de los ríos Santa y Piura (PROCLIM, 2005). Dichos estudios sirvieron de base científica para la caracterización de vulnerabilidades e identificación de oportunidades, constituyéndose en información importante para la toma de decisiones y la planificación futura de las diversas actividades económicas de las cuencas.

En el presente informe técnico se presentan los resultados de la tendencia y extremos climáticos en la cuenca del Mantaro, así como los escenarios climáticos futuros para finales del Siglo XXI. Para un mejor entendimiento este documento ha sido estructurado de la siguiente manera:

Los Capítulos 1 y 2 abordan tópicos sobre las tendencias actuales del clima a nivel global basados en el último informe científico del IPCC (AR4, 2007) y generalidades socioeconómicas de la cuenca de interés.

En el Capítulo 3, se hace un análisis diagnóstico de las series históricas de la temperatura y precipitación con la finalidad de conocer las manifestaciones del clima en la cuenca y estimar los extremos climáticos en esa región, para lo cual se ha empleado el RCLIMDEX, software desarrollado en la Universidad de East Anglia del Reino Unido, en un esfuerzo europeo para analizar de una manera coherente y consistente las manifestaciones extremas del clima. En este capítulo también se analiza la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (sequías, heladas y ENOS) en los últimos cuarenta años. En el Capítulo 4 se hace un diagnóstico de los caudales históricos en el punto de control La Mejorada, estación hidrológica colectora de los ríos tributarios de la Cuenca, información que sirvió para proyectar estocásticamente los caudales medios en este tramo del río hacia el 2035.

En el Capítulo 5 se presenta los escenarios futuros del clima estacional (2099-2100) en la cuenca, elaborado en base a las salidas del Modelo Climático Atmosférico Global de altísima resolución (20 Km) del Instituto de Investigación Meteorológica y la Agencia Meteorológica Japonesa. Este modelo TL959L60 fue procesado en uno de los supercomputadores más veloces del mundo, el Earth Simulator. El método aplicado para la construcción de los escenarios del clima presente y futuro fue el Time-Slice (IPCC, 2001) donde utilizaron como forzante la Temperatura Superficial del Mar (TSM) climatológica y la anomalía respectivamente.

Finalmente, la estimación de los escenarios futuros del clima de la cuenca del río Mantaro, una de las principales regiones proveedora de alimentos y energía de nuestro país, son presentados en este reporte, escenarios que constituyen herramientas estratégicas para realizar proyecciones de los impactos potenciales socioeconómicos, permitiendo una adecuada planificación por parte de los tomadores de decisión, con el afán de mitigar posibles daños en la región. Es por esto que el presente documento trata de mostrar información real con base científica y lenguaje sencillo para la comprensión del mismo.

1.1 Objetivos

- Determinar las tendencias actuales de la temperatura, precipitación y extremos climáticos en la cuenca del Mantaro.
- Determinar la tendencia actual del caudal del río Mantaro y proyección al año 2035.
- Determinar escenarios futuros de la precipitación y temperaturas en la Cuenca del Mantaro.

1.2 Marco teórico

A lo largo de la historia de la Tierra, el clima siempre ha variado como consecuencia de procesos naturales desde etapas cálidas a frías y viceversa, en periodos de tiempo cortos como largos. Sin embargo, desde el siglo pasado el ritmo de estas variaciones se ha acelerado de manera anómala, a tal grado que afecta ya la vida en el planeta, y que a diferencia de los cambios naturales parece estar relacionado a procesos de origen antropogénico. Al buscar la causa de esta aceleración, algunos científicos encontraron que existe una relación directa entre el calentamiento global (causante del cambio climático) y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provocado principalmente por las sociedades industrializadas. Este Capítulo brinda al lector algunos alcances sobre las tendencias actuales y futuras del clima global, basados en el Cuarto Informe de Evaluación – AR4¹ del IPCC² (2007).

1.2.1 Tendencia actual del clima global

El cambio climático mundial es hoy en día una realidad indiscutible. Muchas observaciones constatan el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, el derretimiento

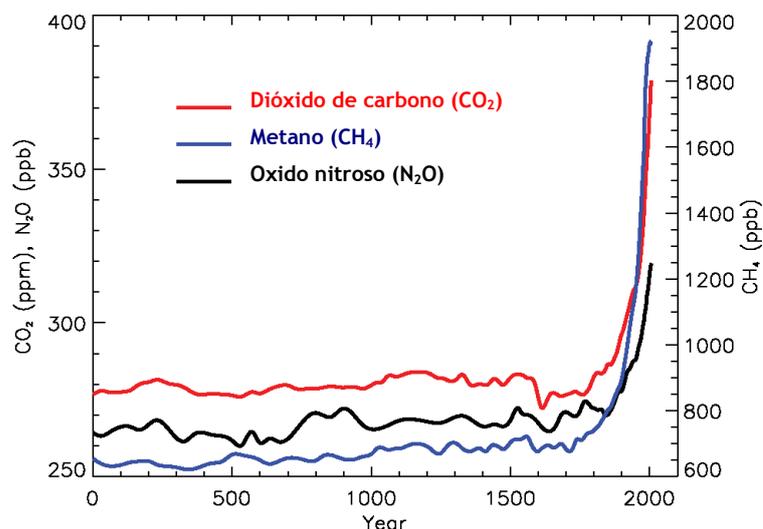
¹ Assesment Report 4

² Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Cambio Climático

generalizado de la nieve y el hielo, y el aumento del nivel del mar. En concreto, desde que las temperaturas de la superficie de la Tierra comenzaron a registrarse en 1850, once de los doce años más cálidos se han producido en los últimos doce años (1995-2006). En los últimos cien años (1906-2005), la temperatura mundial se ha incrementado en 0.74 °C. En conjunto, el nivel del mar aumentó en 17 cm durante el Siglo XX. El IPCC en el AR4 (2007) enfatiza que la probabilidad de que el calentamiento sea causado por procesos climáticos naturales es sólo 5%.

1.2.1.1 Gases de Efecto Invernadero

Destacados científicos coinciden en que el incremento de la concentración de gases efecto invernadero en la atmósfera terrestre está provocando alteraciones en el clima. Coinciden también en que las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) han sido muy intensas a partir de la Revolución Industrial, momento a partir del cual la acción del hombre sobre la naturaleza se hizo intensa. Los principales gases de efecto invernadero resultado de las actividades humanas son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), oxido nitroso (N₂O) y los halocarbonos (un grupo de gases que contienen fluorina, clorina y bromina). Incrementos significativos en todos estos gases se dieron en la era industrial (ver figura 1).



Fuente: IPCC, 2007

Figura N° 1. Concentraciones atmosféricas de GEI de larga duración sobre los últimos 2000 años. Las unidades en ppm o ppb indican el número de moléculas de GEI por millón o billón de moléculas de aire respectivamente, en una muestra de atmósfera.

1.2.1.2. Temperatura global

El IPCC en el AR4 (2007) concluye sobre diversos aspectos que muestran el estado del planeta y algunas proyecciones referentes al Cambio Climático. Sobre estas proyecciones el IPCC menciona que las recientes variaciones del clima en diversas regiones en especial los incrementos de la temperatura (ver figura 2), ya han afectado muchos sistemas físicos y biológicos; añade además que entre 1901 y 2005 la temperatura ha aumentado 0.74 °C.

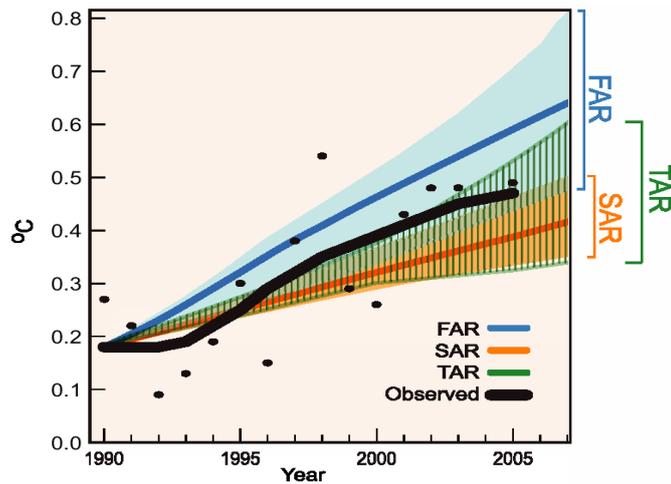
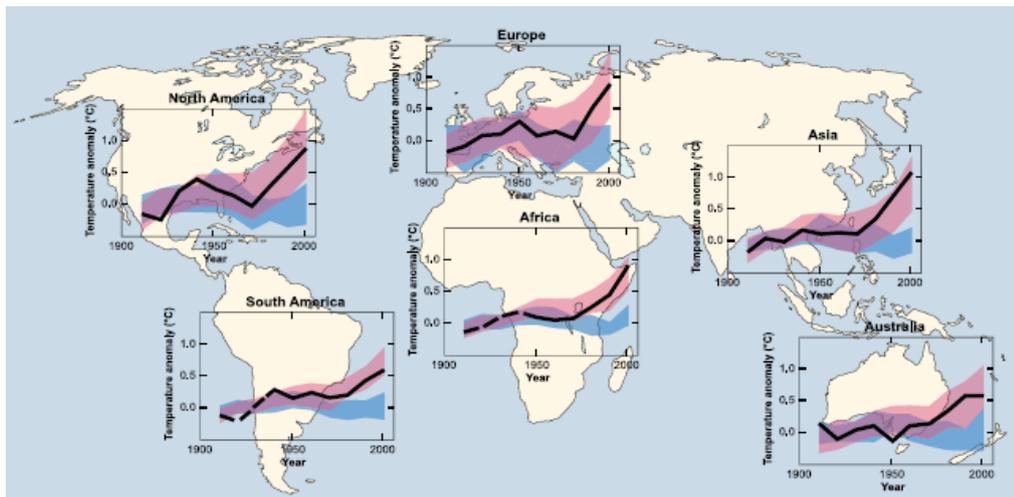


Figura N° 2. Temperatura Superficial promedio anual (Borhan, 2006), entre 1961 y 1990, lo proyectado en el Primer Informe de Evaluación - FAR³ (IPCC, 1990), en el Segundo Informe de Evaluación - SAR⁴ (IPCC, 1996) y en el Tercer Informe de Evaluación - TAR⁵ (IPCC, 2001). Las proyecciones del modelo “mejor estimado” desde FAR y SAR son las líneas gruesas con su rango de estimación de proyección mostrado por las áreas achuradas. El TAR no tuvo modelo de proyecciones “mejor estimado”, pero si un rango de proyecciones. Observaciones anuales son mostradas por puntos negros y la línea gruesa negra muestra variaciones en décadas obtenidas por la proyección de series de tiempo usando un filtro de puntos.



Fuente: IPCC, 2007

Figura N° 3. Comparación continental de cambios observados en la temperatura superficial con resultados simulados mediante modelos climáticos usando factores naturales y antropogénicos. Se observa promedios desde 1906 hasta 2005, donde las líneas celestes muestra resultados del modelo usando factores naturales, las rosadas usando factores naturales y antropogénicos y la línea negra gruesa correspondiente a las observaciones, por lo que se puede apreciar la efectividad del modelo climático.

Desde el primer reporte presentado por el IPCC en 1990, las proyecciones han sugerido un incremento de la temperatura promedio global de aproximadamente 0.15 - 0.3 °C por década entre 1990 y el 2005. Esto ahora puede ser comparado con los valores observados de aproximadamente 0.2°C por década, según el AR4 (IPCC, 2007).

³ First Assesment Report

⁴ Second Assesment Report

⁵ Third Assesment Report

1.2.1.3. Temperatura del aire sobre los océanos

Según las observaciones realizadas desde 1961, el promedio global de la temperatura del océano se ha incrementado hasta en profundidades de 3000 m; constatándose que el océano ha estado absorbiendo más del 80% del calentamiento añadido al sistema climático. Ese calentamiento causa que el agua del mar se expanda por el derretimiento del hielo de los polos, contribuyendo a que el nivel del mar aumente. Una de las consecuencias inmediatas del calentamiento de los océanos, es el incremento de la temperatura del aire adyacente al océano, con la consecuente alteración de los patrones atmosféricos (ver figura 4).

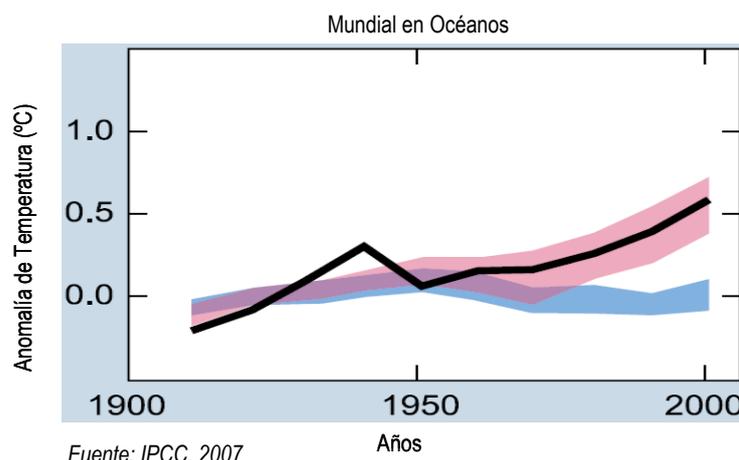


Figura Nº 4. Anomalías de temperatura del aire sobre los océanos, la línea celeste muestra resultados del modelo usando factores naturales, la rosada usando factores naturales y antropogénicos y la línea negra gruesa corresponde a las observaciones, por lo que se puede apreciar la efectividad del modelo climático.

1.2.1.4 Nivel del Mar

El nivel promedio global del nivel del mar se encuentra en una tasa de 1.8 (1.3 a 2.3) mm año⁻¹ para el periodo 1961 - 2003. Esta tasa fue mayor entre 1993 y 2003, aproximadamente 3.1 (2.4 a 3.8) mm año⁻¹. Si la rápida tasa desde 1993 hasta el 2003 refleja variabilidad en décadas o un incremento en un periodo largo de tiempo, la tendencia es incierta. Hay gran certeza de que la tasa del nivel del mar observado se ha incrementado desde el Siglo XIX hasta el Siglo XX. Durante todo el Siglo XX se estima que el incremento ha sido de 0.17 (0.12 a 0.22) mm, según datos del IPCC (ver figura 5).

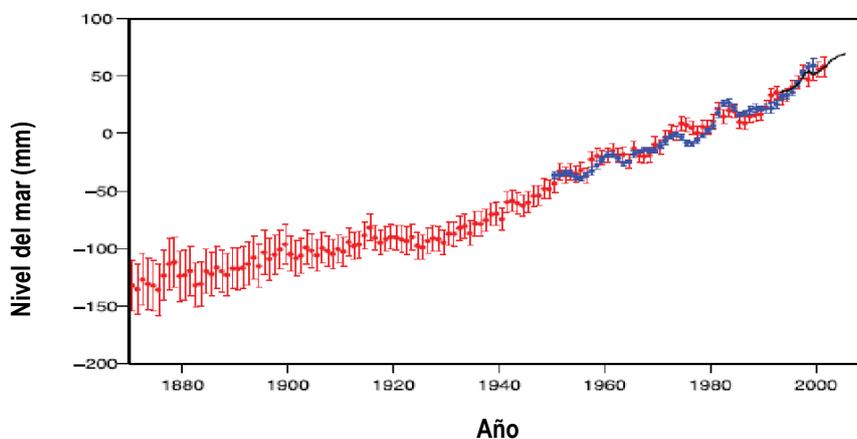


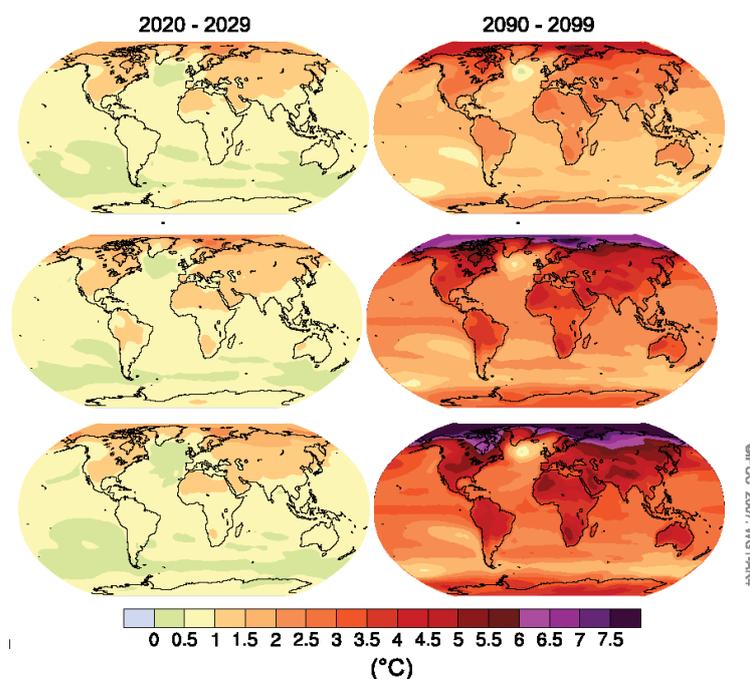
Figura Nº 5. Anomalías del nivel de los mares observados mediante satélites y datos directos.

1.2.2 Tendencias futuras del clima global

El IPCC haciendo uso de diferentes escenarios y modelos climáticos, genera proyecciones de las diferentes tendencias climáticas, mas no se pueden confundir dichas proyecciones como predicciones, pues los escenarios se basan en supuestos relacionados con la emisión del CO₂ como consecuencia de las actividades humanas en relación con su ambiente. Para esto se presenta las diferentes tendencias futuras en los siguientes aspectos:

1.2.2.1 Temperatura global del aire

Según el reporte especial de escenarios de emisión (SRES, *Special Report on Emission Scenarios*) para los próximos 20 años, se proyecta un calentamiento de aproximadamente 0.2 °C por década (ver figuras 6 y 7). Aunque los niveles de concentración de todos los GEI y aerosoles se mantuvieran constantes al año 2000 se esperaría un calentamiento de aproximadamente 0.1 °C por década, siendo el nivel máximo extremo proyectado de la temperatura a nivel global de 6.4 °C.

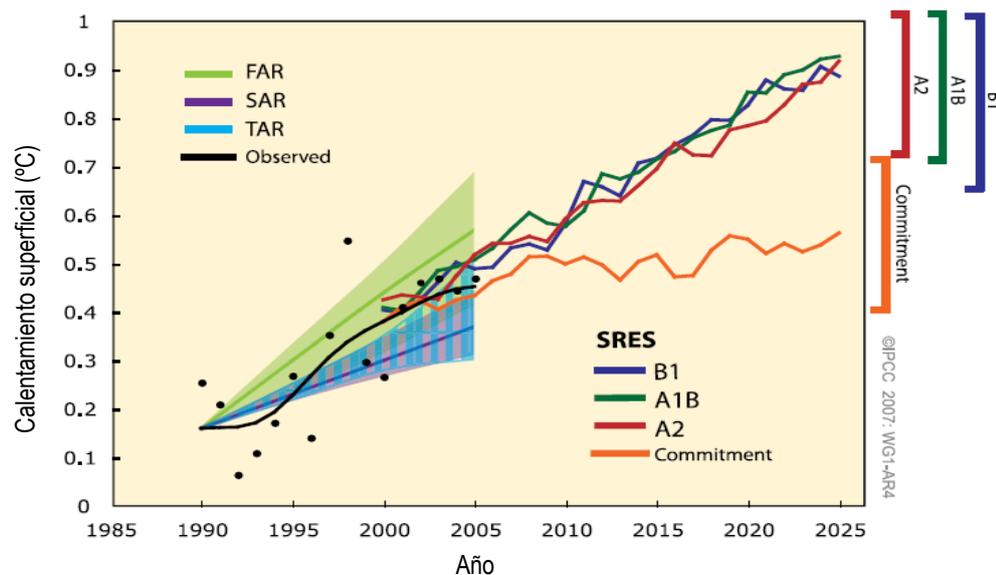


Fuente: IPCC, 2007

Figura N° 6. Proyecciones promedio multi-modelo AOGCM para el B1 (arriba), A1B (medio) y A2 (abajo). Escenarios⁶ SRES promediados sobre las décadas del 2020 – 2029 y 2090 –2099.

Asimismo, IPCC señala que en muchos países los sistemas naturales como arrecifes de coral y atolones, glaciares, los manglares, los bosques boreales y tropicales, son vulnerables al cambio climático y estima que algunos quedarán irreversiblemente dañados debido a que estos sistemas trabajan en un rango químico establecido y un cambio de estos rangos son fatales por la vulnerabilidad de estos.

⁶ ver en <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/005.htm>



Fuente: IPCC, 2007

Figura N° 7. Proyecciones de modelos de calentamiento global comparados con algunas observaciones hechas hasta el 2005 mostradas como puntos negros, el resto de líneas corresponden a las proyecciones hasta el 2025.

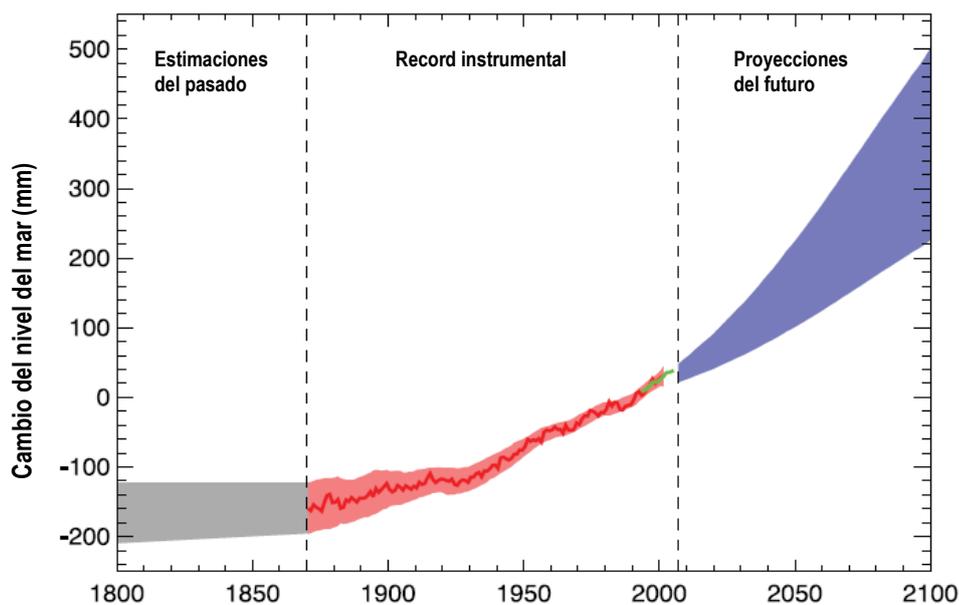
1.2.2.2 Nivel y Temperatura Superficial del Mar

Según el último informe del IPCC, se estima también, que el nivel del mar subirá entre 18 y 59 cm al 2100, con umbrales de 15 a 90 cm, y se proyecta que continuará subiendo por siglos (ver Tabla 1 y figura 8).

Tabla N° 1. Proyecciones de los cambios de temperatura y el nivel del mar en los diferentes escenarios

Caso	Cambio de Temperatura (°C al 2090-2099 relativo a 1980-1999)		Nivel del Mar Alcanzado (m al 2090-2099 relativo a 1980-1999)
	Mejor Estimado	Rango probable	Modelo basado en rangos futuros excluyendo los rápidos cambios dinámicos en el flujo de hielo
Constant Year 2000 concentrations ^b	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 escenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T escenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 escenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B escenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 escenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI escenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

El calentamiento previsto reducirá la cobertura de nieve y los casquetes polares; incluso no se descarta que a finales de siglo el hielo se derrita completamente en el Polo Norte, lo que elevaría el nivel medio del mar en unos siete metros.



Fuente: IPCC, 2007

Figura N° 8. Series de tiempo del nivel del mar (datos desde 1980 hasta 1999) en el pasado y los proyectados en el futuro. Para periodos anteriores a 1870 no hay datos disponibles.

1.3 Antecedentes de las tendencias actuales del clima en el país

En estudios realizados por el SENAMHI⁷ e IGP⁸, se ha podido hacer aproximaciones sobre las tendencias actuales y escenarios futuros del clima en las cuencas del Río Piura, Mantaro y Santa (PROCLIM, 2005)⁹.

En la cuenca del río Piura, las zonas correspondientes a la parte media y alta de la cuenca vienen presentando lluvias de magnitudes similares o superiores a las que acontecen durante El Niño, entre el verano y otoño SENAMHI (2005).

En lo que respecta a las temperaturas extremas, en los últimos 35 años, la tendencia de éstas es *positiva* en toda la cuenca con un incremento entre 0.1 – 0.4 °C por década, no obstante se encontró que en la parte media de la cuenca, la temperatura mínima en algunas localidades viene presentando una tendencia negativa entre 0.03 – 0.06 °C por década.

En la cuenca del Río Mantaro, el IGP (2005) señala que los cambios en su clima han producido diversos efectos como la exacerbación de los problemas de rancho en los meses de mayor intensidad de lluvias, y de gorgojo en los periodos de sequía. Además, sostiene que el aumento de la temperatura genera una mayor resistencia de las plagas, requiriéndose productos más fuertes y en dosis mayores produciendo deterioro ambiental.

Asimismo, a causa del calentamiento global se está produciendo la desaparición de tierras aptas para el cultivo de la maca en la meseta de Junín, a pesar de que el aumento no es significativo, este cultivo es muy vulnerable al requerir temperaturas frías para su desarrollo. Este problema

⁷ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

⁸ Instituto Geofísico del Perú

⁹ Programa de Fortalecimiento de Capacidades Nacionales para Manejar el Impacto del Cambio Climático y Contaminación del Aire

contrasta con el incremento del número de días con heladas a razón de 6 días en cada 10 años en los últimos 40 años. El IGP (2005) ha estimado un aumento de la intensidad de las heladas en Jauja a razón de $-0.95\text{ }^{\circ}\text{C año}^{-1}$, que significaría $-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ proyectado a 50 años. Estos datos se correlacionan con el descenso de la temperatura máxima durante los meses de verano (enero a marzo) y como consecuencia el enfriamiento del valle sería hasta de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo incluso hasta de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona oriental.

Según el INRENA¹⁰ el Perú ya ha perdido el 22% de su superficie glaciar en los últimos 22 a 35 años (previos a 1998). Con esto se entiende que a nivel nacional se ha perdido 7000 millones de metros cúbicos, equivalente al agua que toma Lima en 10 años (CONAM, 2005).

En la región Junín, la Cordillera de Huaytapallana (4,500 - 5,768 msnm) viene registrando un retroceso del área glaciar del orden de 5 Km en los últimos 10 años¹¹, prueba de ello es el incremento del nivel de las lagunas próximas a ésta. Los nevados y lagunas que dan origen al río **Shullcas** y van a desembocar hacia esta subcuenca son los nevados Chuspi, Talvez y Huaytapallana y las lagunas más importantes que se encuentran por debajo de estos glaciares son Chuspicocha y Lazu Huntay entre otros (UGRH¹², 2007).

En últimos estudios realizados por el INRENA (2001-2007), en el glaciar Shullcón de la Cordillera Central, el retroceso promedio de este glaciar en 6 años consecutivos de control fue de 20.54 m.



Nacientes del río Shullcas (Cordillera de Huaytapallana, Perú)



Foto: www.andes.com

A pesar de contar con glaciares importantes, el Perú en 25 ó 50 años alcanzará un máximo de disponibilidad de agua, luego del cual se iniciará una progresiva disminución, lo cual implicaría una crisis en la oferta y la demanda del recurso hídrico. Es por ello que se hace necesario iniciar acciones de prevención que permitan enfrentar en el mediano y largo plazo este problema.

Por las investigaciones realizadas por el SENAMHI y el IRD¹³, se prevé el incremento de caudales en los ríos con componente glaciar, a causa de la deglaciación, con un pico máximo en el año 2050 y posterior decrecimiento, que dependerá principalmente de las precipitaciones debido a los cambios a escala global del clima, que vienen aconteciendo paulatinamente en los últimos años y que seguirán produciéndose a corto, mediano y largo plazo. En el Capítulo 3 de este informe, se presenta el análisis de la tendencia actual del clima y de los índices extremos de cambio climático en la cuenca del Mantaro.

¹⁰ INRENA: Instituto Nacional de Recursos Naturales

¹¹ CONAM, <http://www.conam.gob.pe/cambioclimatico/pelicula/enperu.html>

¹² Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de INRENA

¹³ IRD: Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia

CAPITULO 2

LA CUENCA DEL RIO MANTARO

“Sabías que el Nevado Huaytapallana ha perdido 5 Km de su superficie en los últimos 10 años”¹⁴

2.1 Ubicación y características geográficas

La Cuenca del río Mantaro está ubicada en el centro del Perú, entre los paralelos 10°34'30" y 13°35'30" de latitud sur, y entre los meridianos 73°55'00" y 76°40'30" de longitud oeste. La cuenca abarca parcialmente territorios de las regiones Junín, Pasco, Huancavelica y Ayacucho, y limita al norte con otros territorios de la región Pasco, al este con otros territorios de las regiones Pasco, Junín y Ayacucho, al sur con otros territorios de las regiones Ayacucho y Huancavelica, y al Oeste con otros territorios de la región Huancavelica y con la región Lima. Además, en la cuenca se concentran importantes capitales de provincia como Junín, La Oroya, Jauja, Concepción, Chupaca y Huancayo en la región Junín; Cerro de Pasco en la región Pasco; Pampas, Huancavelica, Churcampa, Acobamba y Lircay en Huancavelica; y Huanta y Ayacucho en la región Ayacucho.

El caudal del río Mantaro, depende de las precipitaciones en toda la cuenca, del nivel del Lago Junín, y de las lagunas ubicadas al pie de los nevados de la Cordillera Occidental y Oriental. La presencia del río Mantaro, le infiere gran importancia a la región por ser la generadora de cerca del 35% de la energía eléctrica del país, la producción agrícola del valle provee de alimentos a Lima, y adicionalmente la población involucrada supera los 700.000 habitantes, por lo que es considerada como la cuenca más densamente poblada de la Sierra del Perú.

Para fines de estudio, la cuenca del Mantaro es una de las mejores equipadas con instrumental hidrometeorológico, contando con una de las series históricas del clima más extensas, Huayao, desde 1921. La distribución de la red hidrometeorológica utilizada en el presente informe, en la cuenca y alrededores se aprecia en el mapa 01 del Apéndice 1.

El área total de la cuenca es de 34.550,08 Km², y se divide en 23 subcuencas (ver mapa 02 de apéndice 1). En la margen izquierda del río Mantaro se ubican once subcuencas, mientras que en la margen derecha doce. La subcuenca de mayor extensión es la de Huarpa, ubicada al extremo sur de la Cuenca del río Mantaro entre las regiones de Huancavelica y Ayacucho.

2.2 Importancia socioeconómica y potencialidades de la cuenca

2.2.1 Recurso Hídrico

El río Mantaro tiene sus nacientes en la laguna de Atacocha (Pasco), que concentra las aguas del deshielo de los glaciares de la zona. Se llama río San Juan y después de recibir las aguas

¹⁴ CONAM, <http://www.conam.gob.pe/cambioclimatico/pelicula/enperu.html>

del afluente el Lago de Junín (en su extremo noroeste), se denomina Mantaro, hasta confluir con el Río Apurímac y formar el Río Ene.

El Mantaro, luego de pasar por Huancayo, que se localiza en su margen izquierda, sigue una dirección de N-S-SE y penetra en territorio del departamento de Huancavelica, formando igualmente un valle intensamente humanizado. En Huancavelica, después de recibir por su margen derecha las aguas de su afluente río Lircay, cambia de dirección y se desplaza en dirección SE-N-NO, formando un primer meandro encajonado, puesto que luego de formar una curva muy pronunciada sus aguas invierten nuevamente su dirección y corren NO a SE, dando origen a otra curva o meandro encajonado. En el desarrollo de los dos meandros o curvas, las aguas del Mantaro descienden aproximadamente 2000 m, aprovechando este desnivel se ha construido la Central Hidroeléctrica del Mantaro.

Siete son en total los ríos que drenan en el Valle del Mantaro, de los cuales el Yacus, Seco, Achamayo, **Shullcas** y Chanchas lo hacen por la vertiente o ladera oriental, es decir descienden desde las cumbres de la cadena montañosa orientales, mientras que el Río Cunas desciende desde las cumbres de la montaña occidental. Todos estos ríos describen subcuencas de diferentes formas y características.

Explicaremos la importancia del río **Shullcas** por ser esta subcuenca el área de interés del presente informe.

2.2.1.1 El río Shullcas

El río Shullcas desciende por la vertiente oriental del Valle del Mantaro, desde la Cordillera Oriental de los Andes centrales del país. Es de régimen nivo-lacustre, es decir, es alimentado por los desagües de las lagunas Chuspicocha y Lazo Huntay, y éstas a su vez, por la fusión del hielo glaciar de la Cordillera de Huaytapallana, de allí que su caudal es permanente, discurriendo agua durante todo el año (los mayores caudales ocurren durante los meses de enero-marzo). La longitud del río es de 35.9 Km, desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Mantaro. Sus nacientes se encuentran sobre los 4750 msnm y su desembocadura en la confluencia con el río Mantaro se da sobre los 3200 msnm. En la parte baja o curso inferior, es decir en el cono de deyección del río Shullcas se emplaza el centro poblado más importante de la región central del país, nos referimos a Huancayo. Las aguas del río Shullcas constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Huancayo, a través de la Planta de Tratamiento de SEDAM-Huancayo, con una dotación promedio de 400 litros por segundo, además, casi 2 mil hectáreas ubicadas en ambos márgenes del río Shullcas son atendidas a satisfacción por los cultivos instalados (INRENA, 2007).

Dentro del ámbito geográfico de la subcuenca del Shullcas existen 43 lagunas, todas emplazadas sobre los 4000 msnm, de las cuales la de mayor longitud son: Lazo Huntay 33.0 Has y Chuspicocha con 22.5 Has. Asimismo, 9 lagunas no tienen salida son cerradas (lagunas efluentes), están atravesadas por cursos de agua y 11 dan origen a los principales ríos de la subcuenca, destacando las Lagunas de Lazo Huntay y Chuspicocha en donde nace el río Shullcas, ambas lagunas se emplazan en la base de los nevados Talves y Haytapallana respectivamente, por consiguiente son abastecidas por el agua de fusión de los glaciares de montaña.

El hecho de tener sus nacientes en las cercanías del nevado de Huaytapallana, hace que los caudales bases, sean significativos. Esta característica ha permitido (otro) la instalación de las Centrales Hidroeléctricas de Chamisería I, II, y III, de las cuales sólo está operativa Chamisería I. El régimen torrencioso del río Shullcas, causa destrozos en la parte media, principalmente donde la pendiente del río tiende a conformar la cabecera del valle agrícola. La capacidad erosiva también es fuerte.

En general, la cuenca del Mantaro tiene un amplio potencial hídrico, no sólo para la seguridad energética sino también para el desarrollo acuícola. Las aguas del río Shullcas por ejemplo, son utilizadas, además, en la Piscigranja de Acopalca, principalmente con la especie trucha, que se ha constituido en una excelente alternativa nutricional para la población vinculada a esta actividad, en una magnífica oportunidad de desarrollo empresarial dirigido al mercado local, nacional y externo. Aunque como actividad económica todavía en la formación del PBI departamental no es muy significativo.

2.2.2 Recurso suelo

El recurso suelo está orientado básicamente al uso mayor de la tierra, con fines de aprovechamiento, para desarrollo agrícola (cultivos en limpio o transitorio, cultivos permanentes, producción forestal, pastos naturales), ganadería, minería y otros, siendo la agricultura, la actividad económica con mayor influencia de esta cuenca.

En la siguiente tabla podemos ver el porcentaje de población mayor de 15 años ocupada en agricultura:

Tabla N° 2. Porcentaje de población mayor de 15 años ocupada en la agricultura

CUENCA DEL MANTARO		
Departamentos	Población Censada	% de Población ocupada en agricultura ¹⁵
JUNIN	1091619	40.5
PASCO	266764	46.8
HUANCAVELICA	447054	75.6
AYACUCHO	619338	59.2

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007

El gran porcentaje de población que se dedica a la agricultura en esta cuenca tiene una gran importancia en la economía nacional. Cada departamento aporta a la economía en función a las actividades que desarrolla. Tenemos a Junín donde la producción de naranja en octubre del 2006 creció en 24.8%, debido a la mayor superficie cosechada y mejor rendimiento. Igualmente, aumentó la producción de arveja grano verde en 86.0%, papaya 79.3%, alfalfa 19.8%, plátano 15.6% y piña en 7.4%, entre los principales. En el subsector pecuario, se observaron incrementos en la producción de llama en 14.5%, leche fresca 2.8%, ave 2.5% y vacuno en 0.1%.¹⁶

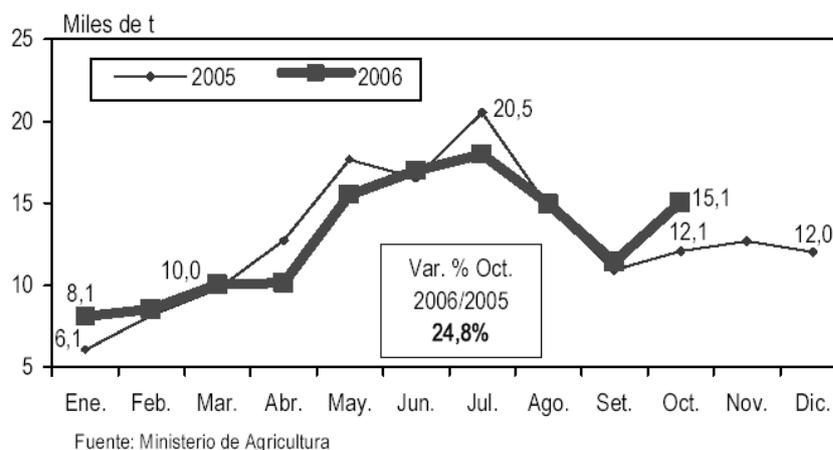


Figura N° 9. Producción de naranja en la región Junín

¹⁵ INEI, <http://desa.inei.gob.pe/mapas/bid/default.asp>

¹⁶ INEI, <http://www.inei.gob.pe/biblioinei.asp>, Avance Económico y Social Regional, Diciembre 2006

Por otro lado en Pasco, en octubre 2006, la producción de papa, producto representativo de la región, experimentó un crecimiento de 0.9%, respecto a octubre 2005, ocasionado por las mayores cosechas en áreas sembradas bajo el sistema de riego, principalmente, en el distrito de Paucartambo.

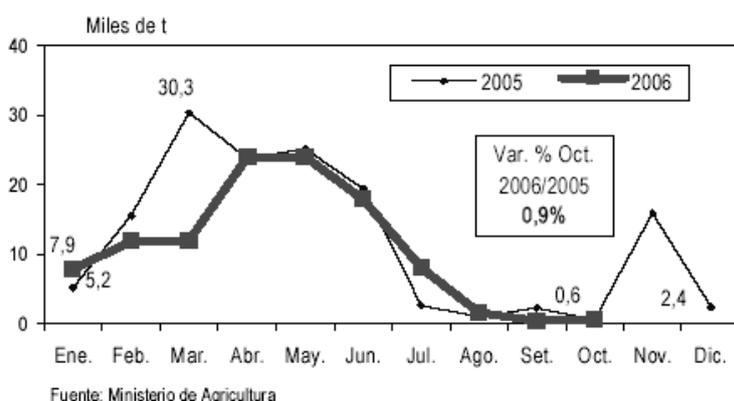


Figura Nº 10. Producción de papa en la región Junín

Asimismo, se incrementó la producción de piña en 234.3%, frijol grano seco 127.8%, naranja 66.7% y ají en 23.5%. En relación al subsector pecuario, aumentó la producción de leche fresca en 62.2%, ganado porcino 51.5%, huevo 49.2%, caprino 31.0%, llama 21.2%, alpaca 19.5% y ave en 18.3%.

La producción de plata, en octubre 2006 alcanzó 86,454 Kg. de contenido fino, siendo mayor en 21.8%, a lo registrado en similar mes del año anterior, por la mayor producción en las unidades mineras de Conquijirca (88.6%), Animón (44.0%) y Cerro de Pasco (24.7%) en la región Junín.

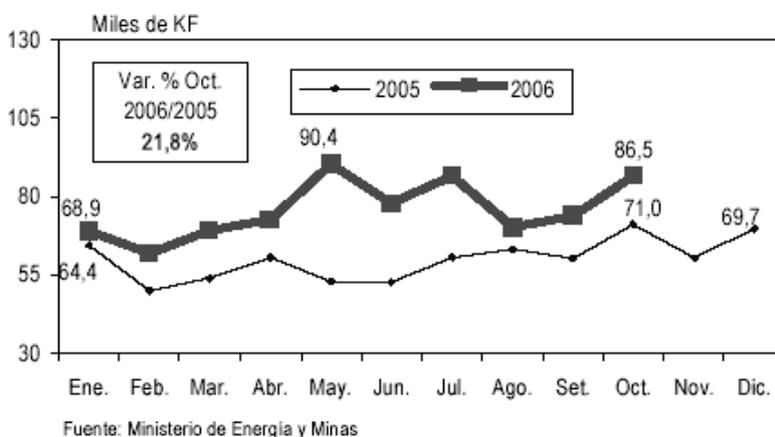


Figura Nº 11. Producción de Plata en la región Pasco

En el departamento de Huancavelica, en octubre del 2006, la producción de papa registró 1,789 toneladas, nivel superior en 8.5% en relación a similar mes del 2005, por las mayores superficies cosechadas. Asimismo, presentaron comportamientos positivos la producción de haba grano verde y arveja grano verde en 375% y 7.3%, respectivamente, por las cosechas complementarias en Tayacaja.

La producción de plata registró un crecimiento de 31.6% respecto al mes de octubre 2005, por la mayor extracción del mineral, en las unidades mineras de Julcani, Cobriza y Huachocolpa. También mostraron incrementos la producción de zinc en 45.6%, plomo 40.0% y cobre en 14.1%.

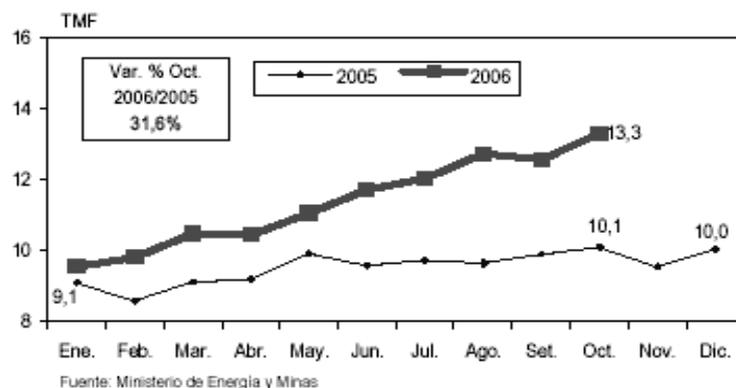


Figura N° 12. Producción de plata en la región Huancavelica

Por último en Ayacucho en octubre 2006, la producción de alfalfa, se incrementó en 4.5%, respecto a similar mes del año anterior, debido a una mayor superficie cosechada y mejor rendimiento obtenido. La papa, otro producto representativo de la región, alcanzó una producción de 190 toneladas, cifra mayor en 30.1%, a lo registrado en octubre 2005, debido a la favorable cosecha por su mayor siembra en la campaña agrícola.

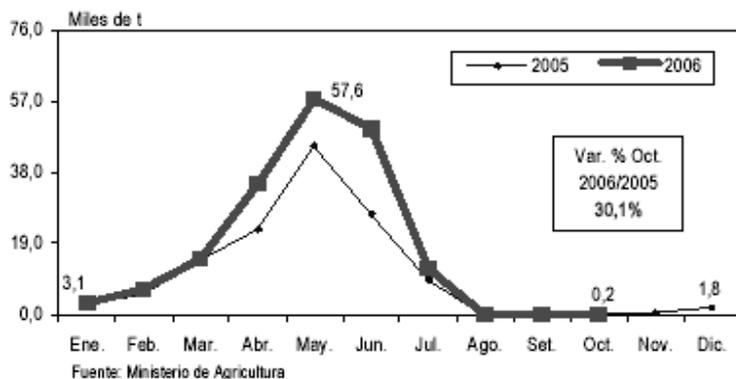


Figura N° 13. Producción de papa en la región Ayacucho

Asimismo, creció la producción de palta en 118.2%, yuca 87.1%, arveja grano verde 62.8%, tuna 33.3%, tomate 23.2% y maíz choclo en 12.5%, entre los más representativos.

Es por este sistema de producción que esta cuenca presenta diversos beneficios económicos. Si tomamos en cuenta la recaudación de la SUNAT para el año 2006 por parte de las actividades en cada uno de estos departamentos tenemos:

Tabla N° 3

CUENCA DEL RIO MANTARO		
Departamentos	% Aumento Recaudación	% Aumento Inscritos ¹⁷
JUNIN	26.6	1.6
PASCO	2.5	7.6
HUANCAVELICA	311.9	10.2
AYACUCHO	26.8	9.3

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007

¹⁷ INEI, <http://www.inei.gov.pe/biblioinei.asp>, Avance Económico y Social Regional, Diciembre 2006

CAPITULO 3

DIAGNOSTICO CLIMATICO DE LA CUENCA

“Desde la década de los ochenta, el tiempo de retorno de periodos secos en la cuenca del Mantaro se ha incrementado.”

3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el período lluvioso

Los principales sistemas de gran escala responsables de la variabilidad de la precipitación en el Perú y por ende en la cuenca de interés son: la Alta de Bolivia (AB), la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS). El acoplamiento de los tres primeros asegura gran actividad convectiva en la región durante la estación de verano, mientras que la intensificación y configuración del APS puede bloquear o facilitar el ingreso de sistemas frontales durante el invierno, que a su paso también generan lluvias; el fortalecimiento y ubicación del AAS favorece la advección de aire caliente y húmedo procedentes de la Hoya Amazónica y que al chocar con los Andes orientales ascienden por efecto orográfico, produciéndose un rápido enfriamiento de la masa de aire con lo cual se reduce en gran parte su capacidad de sostener la humedad inicial, produciéndose fuertes precipitaciones que se extienden longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes (Avalos, 2005). La AB y ZCAS son sistemas típicos de verano y la ZCIT, APS y AAS son sistemas cuasi estacionarios con desplazamientos meridionales estacionales.

Considerando que algunos modelos globales presentan ciertas limitaciones al simular los sistemas sinópticos en la región tropical (SENAMHI, 2005), especialmente durante la estación lluviosa, en las siguientes figuras se muestra la simulación de la posición, configuración y estacionalidad de los sistemas arriba mencionados durante el trimestre lluvioso diciembre, enero y febrero (verano Hemisferio Sur), en base a la climatología del modelo japonés de alta resolución TL959L60 (20-Km-mesh) MRI-JMA, con el propósito de conocer cuales de estos sistemas son bien caracterizados por el modelo y cuales merecen más atención, y finalmente determinar cuan confiables podrían ser las proyecciones del modelo para estudios de cambio climático. El análisis en alta troposfera para la AB (figura 14), se realizó con el modelo global de baja resolución T42CGCM/MRI, ya que el flujo predominante a este nivel no se ve afectado por la topografía.

En cuanto a los patrones espaciales como la ZCIT y ZCAS (figura 15), la distribución de precipitaciones promedio asociado a dichos patrones es coherente. La posición de ambos sistemas está dentro de su variabilidad normal en verano, aunque ligeramente desplazada hacia el norte en el caso de la ZCIT (Satyamurty et al, 1999). En un análisis de varios modelos globales, para la generación de escenarios de cambio climático sobre la Cuenca del Río Piura (costa norte de Perú), el SENAMHI (2005) encontró que dos de ocho modelos representaban deficientemente la posición de la ZCIT, ubicándola entre los 5°S y 10°S, casi frente a la capital, Lima.

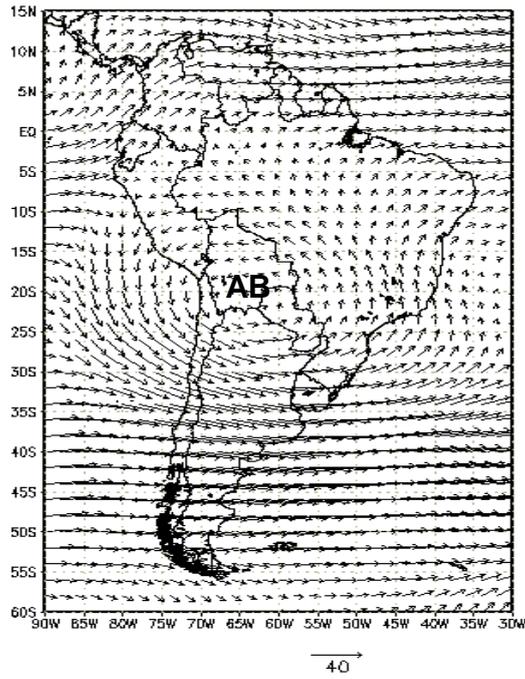


Figura N° 14. Campo de viento medio en 200 hPa en ms^{-1} durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo global T42CGCM/MRI. La AB se centra en promedio sobre los 19°S y 21°S , mostrando vientos comparativamente más intensos sobre los subtropicos con una marcada curvatura anticiclónica ($30^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$).

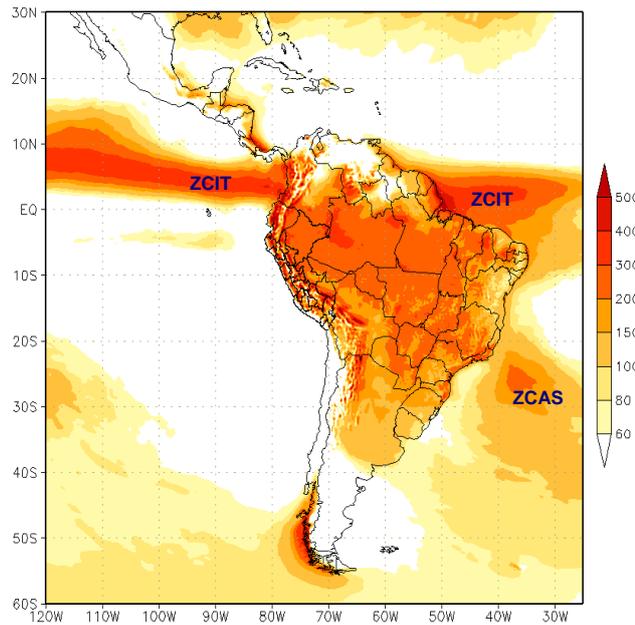


Figura N° 15: Campo de precipitación promedio en mm mes^{-1} durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI-JMA.

Durante el verano del Hemisferio Sur, la intensidad promedio del APS oscila entre 1020 hPa y 1023 hPa, y su centro se ubica entre los $20^{\circ}\text{-}40^{\circ}\text{S}$; $80^{\circ}\text{-}120^{\circ}\text{W}$ aproximadamente (Satyamurty, 1999). En la figura 16 (dominio Sudamérica), se observa que el modelo simula coherentemente su variabilidad normal en términos de intensidad y ubicación del APS; inclusive, el modelo es capaz de simular correctamente el desplazamiento meridional estacional del sistema (no se muestra resultados de invierno).

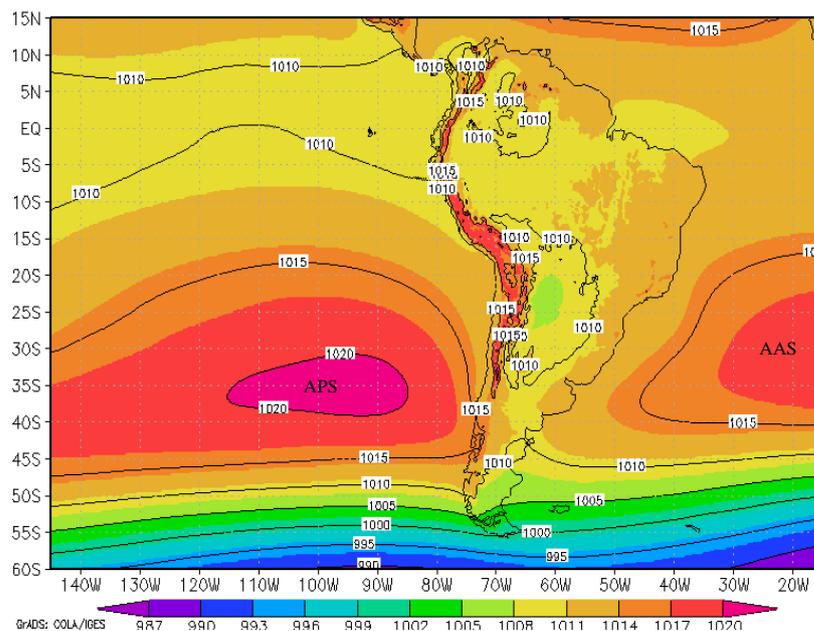


Figura N° 16. Campo de presión a nivel del mar durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI-JMA.

3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del Mantaro

Por su ubicación geográfica, el Perú debería tener un clima cálido y lluvioso; sin embargo la presencia de dos factores preponderantes como la Cordillera de los Andes y la Corriente Costera Peruana o Corriente de Humboldt, determinan y modifican completamente las condiciones ecológicas de nuestro territorio. En virtud de estos dos factores, el Perú posee casi todas las variantes climatológicas que se presentan en el mundo con un régimen pluviométrico de gran variabilidad espacio temporal cuyos mecanismos físicos conlleva necesariamente a realizar un análisis físico de la atmósfera.

Uno de los mecanismos físicos más importantes de la precipitación en la región andina, según Gómez D. (1978), ocurre cuando las masas de aire caliente y húmedo procedentes de la Hoya Amazónica llegan a los Andes orientales y ascienden por efecto orográfico, produciéndose un rápido enfriamiento de la masa de aire con lo cual se reduce en gran parte su capacidad de sostener la humedad inicial, produciéndose precipitación. Tal acción tiene como resultado una región con altas cantidades de precipitación que se extiende longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes (Selva alta), tal como acontece en la estación Quincemil ubicada en la selva sur, donde anualmente se registra valores cercanos a los 7000 mm. Este desecamiento parcial de la atmósfera es el causante de la disminución gradual de la precipitación en dirección oeste hasta los 3000 msnm (Avalos, 2005).

Considerando que las características topográficas juegan un rol importante en la determinación del clima local, ya que estas porciones de tierra con particular elevación, generan sus propios climas (Beniston, 2000) en función de la pendiente, aspecto y exposición de la superficie montañosa a los elementos del clima, se evaluó la simulación de la topografía andina provista por el modelo TL959L60 MRI-JMA, toda vez que la Cordillera de los Andes es la cadena montañosa más larga (10,000 Km) y la segunda más alta del planeta, y su correcta representación en un modelo numérico asegura el éxito de la simulación de procesos físicos ligados a la precipitación orográfica.

En la figura 17, la región en color corresponde al dominio de la Cordillera, la escala está expresada en metros sobre el nivel del mar. Puede apreciarse la buena aproximación de las altitudes sobre territorio peruano. El coeficiente de correlación de Pearson entre la elevación real de 45 estaciones ubicadas por encima de los 3000 msnm y la elevación simulada por el modelo es de 0.61 (ver figura 18).

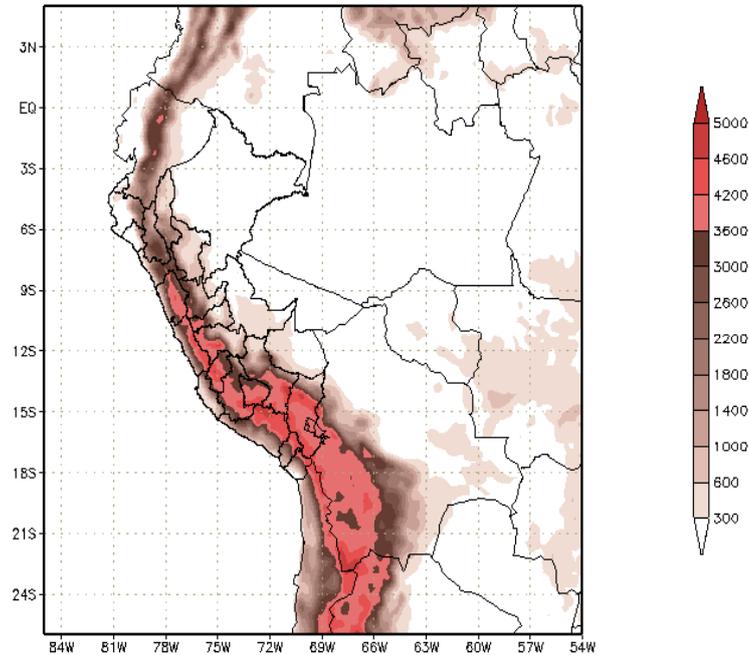


Figura N° 17. Topografía de la Cordillera de los Andes según el Modelo TL959L60 MRI-JMA.

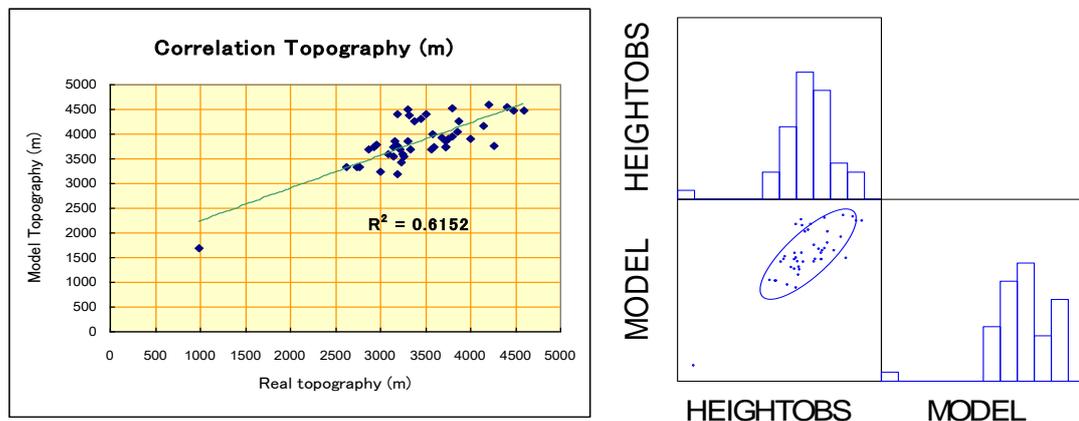


Figura N° 18. Correlación de Pearson entre la elevación real de las estaciones y la topografía del modelo.

En todas las escalas de tiempo, la variabilidad de la precipitación en nuestra región está condicionada por la circulación de alta atmósfera, con flujos zonales del este con alto contenido de humedad y flujos zonales del oeste causantes de condiciones secas. Los factores que influyen en la variabilidad interestacional dependen de la posición e intensidad de la Alta de Bolivia (AB) la cual es modulada por ondas Rossby emanadas de latitudes medias en el Pacífico Sur. La variabilidad interanual está relacionada con cambios en la baroclinicidad meridional entre el trópico y el sub-trópico, lo cual es consecuencia de anomalías de la temperatura superficial del

mar (TSM) en el Pacífico Tropical, dicho en otras palabras, la variación del gradiente térmico meridional produce variaciones en el viento zonal.

Las precipitaciones en la sierra de nuestro país, tienen una relación directa con la componente zonal este del viento; es decir, el periodo lluvioso de la sierra coincide con la intensificación de los vientos del este en todos los niveles de la atmósfera, los cuales favorecen la advección de humedad de la cuenca amazónica. Por otro lado, para que precipite en la sierra es necesario que este aire húmedo y cálido advechado por los flujos del este, ascienda orográficamente por las laderas de la Cordillera, o sea canalizado por los valles. En este contexto, el mecanismo de precipitación en las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba, es el mismo, sólo que con connotaciones geográficas locales muy particulares (Avalos, 2005).

Por ejemplo, en la cuenca del río Santa, las lluvias se producen cuando el flujo húmedo del este que sobrepasa la Cordillera Blanca (cadena montañosa más alta del territorio nacional) y además el aire húmedo del norte que logra pasar la Cordillera a la altura de los departamentos de La Libertad, Cajamarca y Piura (región donde la Cordillera tiene menor altura) y vira hacia el sur; modulado por la circulación en niveles altos (Alta de Bolivia), se canaliza entre la Cordillera Blanca y Cordillera Negra, dejando lluvias en el valle del Santa que tiene una orientación paralela al litoral.

En la Cuenca del río Mantaro (Andes Centrales del Perú), el mecanismo es similar, sólo que el valle tiene orientación NW-SE y la Cordillera de Huaytapallana (al este del valle) es de menor altitud, lo cual facilita el ingreso del flujo húmedo predominante del este, generándose precipitaciones de similar intensidad que la cuenca del río Santa.

3.3 Clasificación climática de la Cuenca

La clasificación climática en la cuenca del río Mantaro (ver Mapa 03 en Apéndice 1) se basa en el Mapa de Clasificación Climática del Perú (SENAMHI, 1988), el cual ha sido elaborado considerando factores que condicionan de modo preponderante el clima, como la latitud, la altitud, la Cordillera de los Andes, la Corriente Costera Peruana (de aguas frías), el Anticiclón del Pacífico Sur y la continentalidad. La información base de esta clasificación se sustenta en datos meteorológicos de veinte años (1965-1984), a partir de la cual se formularon los índices climáticos de acuerdo con el Sistema de Clasificación de Climas de Werren Thorntwaite.

En el sector norte de la cuenca predomina el clima semifrío húmedo D'H3 entre los 3200 m a 4800 m de altitud, de régimen lluvioso en verano y seco en invierno. En este sector de la cuenca se emplazan ciudades importantes como Cerro de Pasco Junín y la Oroya. El sector central de la cuenca, sector que alberga a la subcuenca de interés de este estudio (subcuenca del río Shullcas), presenta variadas zonas de vida que van desde clima cálido muy húmedo A'H4 al este, pasando por clima frío húmedo C'H3 hasta clima semifrío húmedo D'H3. En este sector, las precipitaciones ocurren en verano y son fundamentalmente orográficas, es decir resultantes de la condensación del vapor de agua de la masa de aire que al elevarse van descargando gran parte de esta humedad especialmente en las vertientes orientales de la cadena de altas montañas y en los valles interandinos. Bajo estas condiciones climáticas se emplazan ciudades importantes como Jauja, Concepción, Chupaca, Huancayo y Pampas.

En tanto, el sector sur de la cuenca, la gama de climas va desde semi frío húmedo D'H3 al este, pasando por templado húmedo B'2H3 y frío húmedo C'H3 hasta clima semifrío húmedo D'H3 al oeste. Las ciudades más importantes que se desarrollan en esta parte de la cuenca son Huancavelica, Churcampa, Acobamba, Huanta, Lircay y Ayacucho.

Como se indica líneas arriba, el este del sector central de la cuenca es de menor piso altitudinal, siendo el clima predominante semicálido muy húmedo B'1H4 y templado húmedo B'2H3. Esta zona se caracteriza por tener un declive muy suave hacia el Atlántico y exuberante vegetación, donde las precipitaciones se manifiestan de tipo convectivo y se dan en todas las estaciones del año.

3.4 Climatología de la Cuenca

3.4.1 Precipitación

3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación

Las precipitaciones en toda la cuenca del Mantaro presentan un comportamiento estacional que comprende básicamente dos periodos: uno húmedo con un máximo en los meses de verano y otro periodo de estiaje en donde las precipitaciones son mínimas en los meses entre junio a agosto.

Se han escogido 14 estaciones meteorológicas (ver Tabla 4) ubicados en tres sectores de la cuenca (sector norte, central y sur) para el periodo 1965 – 2006. Los trimestres analizados corresponden al verano (Diciembre-Febrero) DEF, otoño (Marzo-Mayo) MAM, invierno (Junio-Agosto) JJA y primavera (Setiembre-Noviembre) SON.

Tabla Nº 4: Precipitaciones estacionales en la cuenca del Mantaro en mm

SECTOR	ESTACIONES	DEF	MAM	JJA	SON
Norte	Cerro de Pasco	561.0	344.9	124.1	395.5
	Carhuacayan	391.5	238.1	36.6	204.4
	Yantac	308.1	224.7	43.3	158.3
	Marcapomacocha	538.8	339.8	57.7	268.7
Centro	Jauja	337.9	169.1	21.5	174.3
	Huayao	345.8	195.7	37.0	184.5
	San Juan de Jarpa	449.7	281.1	56.2	229.9
	Pilchaca	348.7	173.3	46.9	172.9
	Huancalpi	355.5	205.6	82.0	217.7
Sur	Huancavelica	376.7	224.0	43.0	191.5
	Acobamba	322.3	165.9	44.2	186.3
	Lircay	365.1	215.6	51.2	178.0
	La Quinua	396.9	197.3	35.4	158.1

Respecto a las precipitaciones estacionales, el trimestre DEF (verano) es el más lluvioso en la cuenca, mientras el trimestre menos lluvioso es JJA correspondiente al periodo de estiaje o invierno. En la mayor parte de las estaciones el trimestre MAM u otoño se considera el segundo trimestre lluvioso, mientras en algunas estaciones especialmente ubicadas en el sector central, el segundo trimestre más lluvioso es SON (primavera). Cabe indicar que ambos trimestres tienen cantidades muy similares (ver Tabla 4). Los valores acumulados de las precipitaciones en cada trimestre sobrepasan los 535 mm en la parte norte de la cuenca en el verano, mientras en el invierno los totales no exceden los 50 mm a excepción de Cerro de Pasco que acumula 124 mm en esta temporada.

En el figura 19 se observa el ciclo anual de la precipitación en cada uno de los sectores de la cuenca, encontrando que todas presentan un comportamiento similar, aunque con pequeños incrementos especialmente en las zonas altas del sector norte (Cerro de Pasco y Marcapomacocha), observándose en algunas zonas de la cuenca una dependencia directa entre las precipitaciones y la altitud, pero que además “está condicionada a otros factores físicos, tales como el grado de exposición al sol, la influencia de brisa montaña-valle y la dirección de los flujos de viento del este” (IGP, 2005).

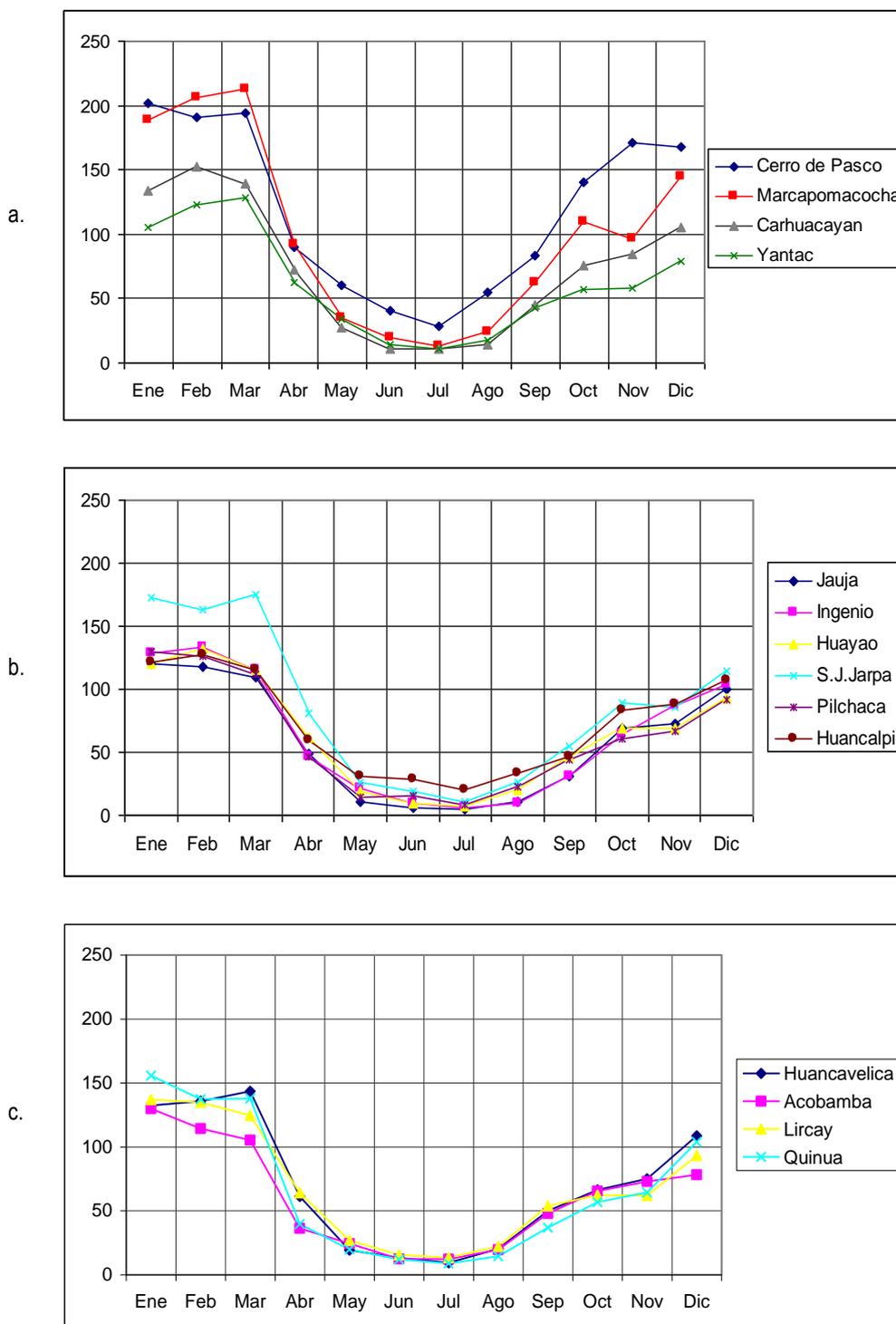


Figura N° 19: Ciclo anual de la precipitación en diferentes sectores de la cuenca del Mantaro en mm mes⁻¹.
a. sector norte, b. sector centro y c. sector sur

La mayor concentración de las precipitaciones se da entre octubre y abril, representando el 85% del total anual, de los cuales el 61% está comprendido entre los meses de enero a marzo, que tienen valores muy similares.

3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación

De acuerdo al estudio realizado por el IGP (2005), el promedio multianual de las precipitaciones presenta valores que superan los 1000 mm año⁻¹ en el sector occidental que comprende las partes altas de las subcuencas de San Juan, Colorado, Conocancha y Santa Ana, así como en la parte sur de la subcuenca del Huarpa (ver Mapa 04, apéndice 2). En la región centro-occidental de la cuenca, las precipitaciones son del orden del 700-800 mm año⁻¹. En la misma figura se puede observar tres núcleos de valores mínimos de precipitaciones (< 700 mm año⁻¹) las que abarcan algunas zonas desde el Lago Junín hasta Jauja, en el departamento de Huancavelica que comprende desde la provincia de Tayacaja hasta la Provincia de Angarares y finalmente en el extremo sur oriental de la cuenca.

3.4.2 Temperatura Máxima

3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima

El comportamiento mensual de la temperatura máxima durante el año (ver figura 20a), varía en promedio entre 17-21 °C en gran parte de la cuenca, mientras en localidades ubicadas sobre los 4000 msnm, la temperatura máxima oscila entre 10-12 °C; esta diferencia se debe principalmente al factor altitud y a la exposición de la zona al movimiento solar diario.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos máximos, uno en mayo y el más intenso en noviembre, mientras los valores mínimos se dan en los meses de verano. En localidades ubicadas sobre los 4000 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 recibe la máxima radiación incidente y no se tiene cobertura nubosa, mientras que en el verano la radiación es mínima debido a la cobertura nubosa, por ser temporada de lluvias.

En localidades por debajo de los 4000 msnm, el rango de las temperaturas máximas durante el año es mayor, éste varía de acuerdo a la altura y es mayor a 1.4 °C; por el contrario en localidades sobre los 4000 msnm el rango de variación anual es muy pequeño (1.1 °C). De lo anterior podemos concluir, que las temperaturas máximas en la cuenca del Mantaro es casi constante durante el año (ver Tabla 5).

La Tabla 5, muestra también la temperatura máxima estacional o por trimestres, siendo la primavera la estación más cálida en toda la cuenca, asociado a la máxima insolación durante este periodo, mientras que los mínimos valores de temperatura máxima en gran parte de la cuenca ocurren en el verano (DEF), asociado a la mayor cobertura nubosa. Los valores de la temperatura máxima en los otros trimestres son muy similares.

Tabla N° 5. Temperaturas máximas estacionales o por trimestres en °C, promedio 1965-2006

Sector	Estaciones	Media anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Norte	Cerrode Pasco	12.0	1.1	12.0	11.9	11.8	12.0
	Marcapomacocha	10.4	1.1	10.2	10.4	10.4	10.8
Centro	Jauja	19.3	1.9	19.1	19.0	19.3	20.0
	Huayao	19.4	2.4	19.0	19.0	19.3	20.3
	Pilchaca	17.3	2.0	16.7	17.2	17.3	17.9
Sur	Acobamba	18.0	1.4	17.5	17.8	18.0	18.3
	Lircay	20.4	2.1	19.8	20.1	20.5	21.1
	La Quinua	18.4	1.6	18.4	18.1	17.9	19.2

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007

3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima

La temperatura máxima dentro de la cuenca presenta variaciones que están relacionadas con la altitud. En el mapa 05 (ver apéndice 2), se muestra la distribución de la temperatura máxima multianual, realizada por IGP (2005), ésta varía desde 12 °C en la parte norte y extremo occidental y va incrementando en las localidades ubicadas en el valle, presentando valores de 18 a 20 °C. Asimismo, en la zona sur oriental en la parte baja de la cuenca, las temperaturas llegan hasta los 28 °C.

3.4.3 Temperatura Mínima

3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima

La variación mensual de la temperatura mínima en diferentes sectores de la cuenca del Mantaro se aprecia en la figura 20b, observándose una mayor estacionalidad en comparación con la temperatura máxima. Las temperaturas mínimas oscilan entre 0 y 7.7 °C en localidades comprendidos entre 3000 a 4000 msnm, mientras que en localidades sobre los 4000 msnm varía entre -4.5 a 1.5°C. En localidades menores de 3000 msnm las temperaturas tienden a ser mayores llegando hasta los 19 °C.

La temperatura mínima durante el año presenta los valores más bajos durante el mes de julio, lo cual está asociado al máximo enfriamiento debido a la escasez de nubosidad 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 nubes impiden el enfriamiento nocturno.

Comparado con la temperatura máxima, la mínima presenta un rango anual de mayores valores, tal como puede observarse en el Tabla 6. Hay una similitud en los rangos en localidades sobre los 4000 msnm en donde el rango promedio es de 4 °C, mientras que en localidades por debajo de este nivel, los rangos están asociados a la exposición de sus laderas con respecto al sol, a los vientos de circulación regional y las brisas de montaña-valle, principalmente.

En la misma Tabla 6 se observa que la temperatura mínima anual varía con valores positivos en localidades ubicadas por debajo de los 4000 msnm, mientras que en localidades de mayor altitud el promedio anual es negativo, lo cual sugiere que en gran parte del año la temperatura mínima predominantemente se presenta por debajo o cercano a los 0 °C, tal es el caso de Marcapomacocha, localidad en la que todo el año se registran valores negativos.

De otro lado, también se presenta en la misma tabla la temperatura mínima estacional o por trimestres en algunas localidades representativas de la cuenca del Mantaro, observándose que el trimestre más frío es JJA (invierno), mientras que el más calido es DEF (verano); los otros dos trimestres tienen valores muy similares.

Tabla N° 6. Temperaturas mínimas estacionales en °C, promedio 1965-1994

Sector	Estaciones	Media anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Norte	Cerro de Pasco	-0.1	3.9	1.0	0.3	-2.3	0.1
	Marcapomacocha	-2.0	4.0	-0.6	-1.2	-3.9	-2.0
Centro	Jauja	4.4	5.6	6.3	4.9	1.5	5.2
	Huayao	4.1	6.7	6.4	4.2	0.7	5.1
	Pilchaca	4.1	3.7	5.2	4.6	2.2	4.4
Sur	Acobamba	3.2	2.3	4.0	3.4	2.1	3.5
	Lircay	3.7	5.0	5.5	4.2	1.3	3.9
	La Quinoa	6.0	3.3	7.0	6.4	4.3	6.4

Fuente: Elaboración propia, SENAMHI 2007

3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima

En el mapa 06 (Apéndice 2) se muestra la distribución de la temperatura mínima anual en toda la cuenca (IGP, 2005). Las temperaturas más bajas se presentan en el extremo noroccidental valores que alcanzan los -4 °C, mientras que el lado nororiental, influenciado por el efecto termoregulador del lago, presentan valores entre -2.0 y 0 °C. En la región del valle, entre Jauja y Pilchaca, la temperatura mínima en promedio es de 4 °C, mientras en la zona de Huanta (Ayacucho) la temperatura llega hasta los 8 °C. De otro lado, en el extremo sur oriental de la cuenca correspondiente a la parte baja, la temperatura mínima alcanza valores hasta los 16 °C.

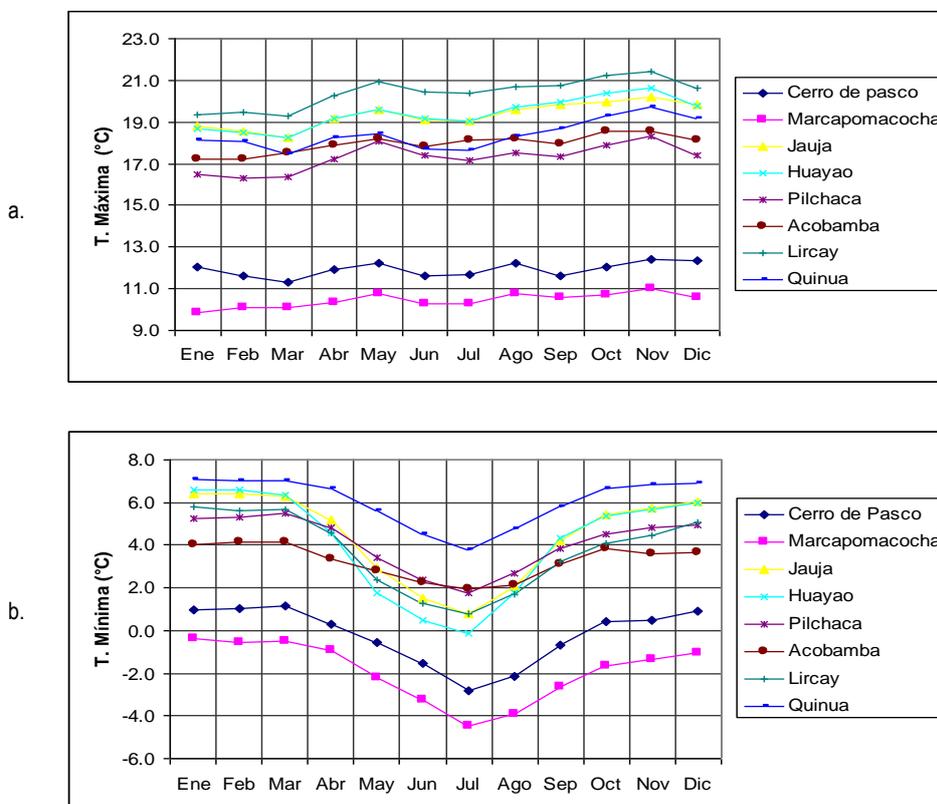


Figura N° 20. Ciclo anual de las temperaturas a. máxima y b. mínima en la cuenca del Mantaro

3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas

3.5.1 Heladas

Se considera la ocurrencia de helada meteorológica cuando la temperatura del aire, registrada en el abrigo meteorológico (es decir a 1.5 metros sobre el nivel del suelo), es de 0 °C o inferior (La Roca, 2007)

En la cuenca del Mantaro, debido a su compleja topografía, se registran heladas debido mayormente al proceso de irradiación. Este proceso físico es explicado por la pérdida de energía debido a la ausencia de nubosidad, viento en calma y escasa humedad atmosférica, además de los procesos de circulación del aire en las laderas, tal como se muestra en la figura 21 (Atlas de Heladas, SENAMHI 2005).

Este esquema ilustra que sobre las pendientes de la colina, el aire más denso se coloca en el fondo del valle, asociado a la brisa de las laderas, por lo cual se crea un “cinturón termal” de aire más caliente que se encuentra por encima del aire más frío del valle y por debajo de un nivel de altura de la colina.

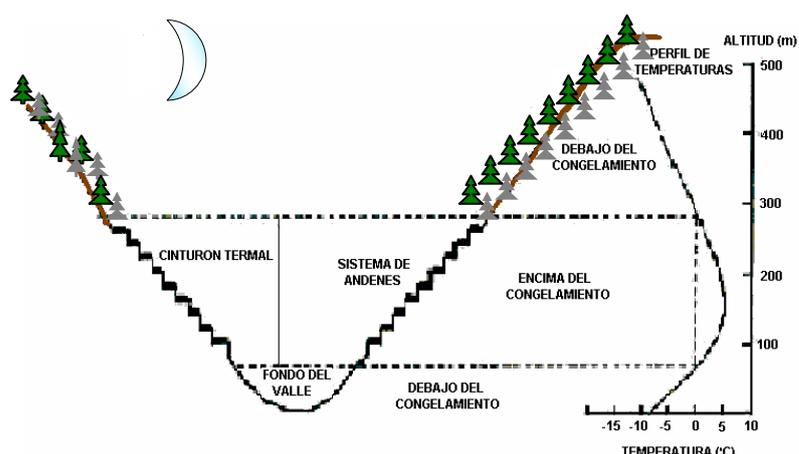


Figura N° 21. Esquema del enfriamiento irradiativo nocturno

3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas

La figura 22 nos muestra que la mayor frecuencia de heladas en gran parte de la cuenca se presentan en el invierno, asociado a la ausencia de nubosidad y escasa humedad, con una frecuencia de 10 - 25 días por mes en los sectores central y sur de la cuenca, y entre 22 - 30 días por mes en el sector norte (Marcapomacocha y Cerro de Pasco).

En verano, la frecuencia de heladas se reduce en gran parte de la cuenca a excepción de Marcapomacocha y Cerro de Pasco (ubicadas por encima de los 4200 msnm), donde se registran valores por debajo de los 0 °C, por lo menos en 15 días de cada mes de verano. Asimismo, gran parte del sector central sur que comprende Pilchaca, Huancalpi, Lircay y La Quinua, presenta baja frecuencia de heladas durante el año, no superando los 10 días de heladas por mes.

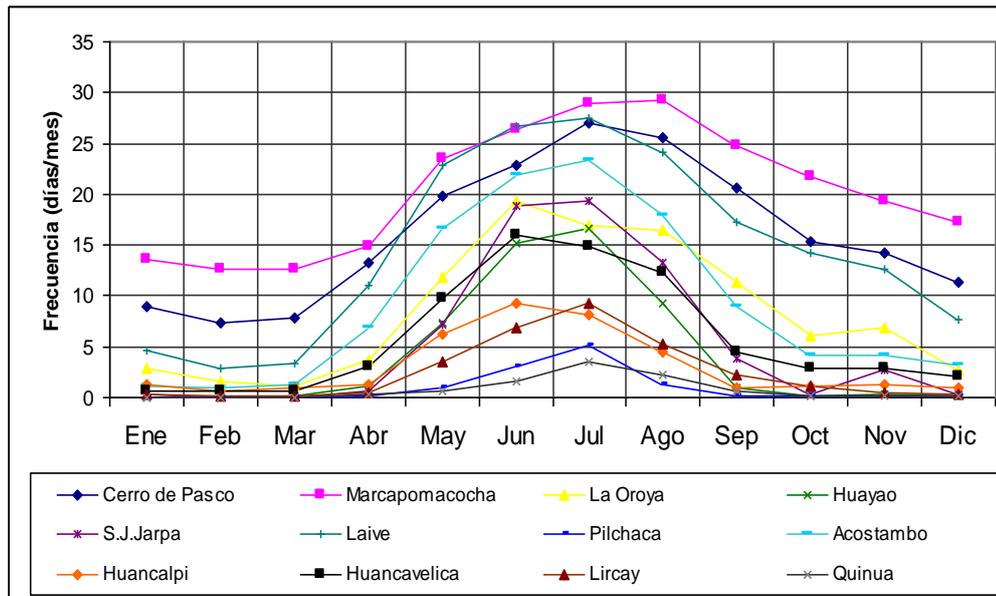


Figura N° 22. Frecuencia mensual de las heladas (días mes⁻¹)

3.5.1.2 Distribución espacial de las heladas

En la cuenca del Mantaro, a nivel espacial las heladas están relacionadas con la altitud (Huamaní, 2005), existiendo pequeñas diferencias debido a la orientación de las pendientes, situación que determina un calentamiento diferenciado de la superficie, así como a la presencia de las brisas de valle y montaña que ocurren en la cuenca.

En el mapa 07 (Apéndice 2), se muestra la distribución espacial de la frecuencia anual de heladas en la cuenca de estudio, caracterizado por el umbral de los 0 °C, para el periodo 1971-2000. Los núcleos de mayores días con heladas en el año se dan particularmente en tres zonas: el principal sobre la parte noroccidental de la cuenca (zona de Marcapomacocha) hasta con 250 días con heladas, seguido del sector nororiental (Cerro de Pasco) y del sector central-occidental (Laive), ambos con 180 días. En el resto de la cuenca el número de días con helada disminuye, y en la zona centro-sur oriental que representa la parte baja de la cuenca no se registran heladas.

El mapa 08 (Apéndice 2) muestra el periodo libre de heladas¹⁸ que se presenta en la cuenca, ubicándose en la parte suroriental de la cuenca las zonas de mayor periodo libre de heladas asociado a la menor altitud, mientras en la parte occidental y sector norte de la cuenca, se ubican las zonas de menor periodo libre de heladas.

3.5.2 Periodos secos

Las precipitaciones en la cuenca del Mantaro presentan una alta variabilidad espacial y temporal, pasando rápidamente de periodos secos o deficientes a húmedos y con excesos, especialmente a partir de los años ochenta.

Es difícil definir el término sequía porque tiene distintos significados en distintas regiones del mundo por la existencia de diferentes climas con características muy peculiares, por lo que la

¹⁸ Número de días que transcurren desde la última helada de un periodo hasta la primera helada del siguiente periodo (Huamaní, 2005)

definición de sequía depende del lugar en que nos encontremos, así como de la demanda hídrica de la zona, quedando claro que no es simplemente una disminución de las lluvias. En forma general, definimos la sequía (Australian Bureau of Meteorology, 1992), como un prolongado periodo seco anómalo en la cual no hay agua suficiente para las necesidades comunes de los usuarios (ver más en glosario, apéndice 4).

En el presente estudio se caracterizó los periodos secos y para ello se utilizó la metodología de los percentiles¹⁹ (Valiente, 2001). Con esta metodología han sido evaluadas las precipitaciones anuales totalizadas entre septiembre y agosto durante 1965 al 2006.

En este estudio se establecen como periodo deficiente a todas las lluvias anuales que están por debajo del percentil 30 y se le denominará sequías a aquellas por debajo del percentil 15, determinándose tres categorías, Percentil 15 (Sequía moderada), Percentil 10 (Sequía severa) y Percentil 5 (Sequía extrema), tal como se indica a continuación:

- Percentil 30 : Deficiencia
- Percentil 15: Sequía moderada
- Percentil 10: Sequía severa
- Percentil 5: Sequía extrema

De esta manera un periodo seco es caracterizado por deficiencias de lluvias, cuyos valores extremos se llamarán sequías, por lo tanto una sequía será un periodo seco, pero no necesariamente un periodo seco es una sequía.

En la tabla 7 se muestra de manera esquemática los periodos secos (deficiencias y sequías) en localidades representativas de la cuenca en los últimos cuarenta años, observándose que hasta antes de la década de los ochenta, se presentaron deficiencias y sequías moderadas pero en forma localizada, a excepción del año 1968/69, periodo en el que los sectores central y sur de la cuenca fueron afectados por sequías de moderadas a extremas, y el año 1965/66 donde el sector central soportó una sequía moderada. Posteriormente la cuenca estuvo afectada por deficiencias y sequías moderadas en manera más recurrente, como ocurrió en el año 1982/83, periodo considerado lluvioso en la parte norte de la cuenca pero deficiente en la parte sur, presentándose inclusive una sequía severa en Huancalpi y moderada en Lircay. En el año 1989/90 gran parte de la cuenca presentó deficiencias, siendo afectado el sector sur de la cuenca (Acobamba y Lircay) con sequías severas.

Es la década del noventa donde se presentaron con mayor frecuencia los periodos secos, alternándose periodos de deficiencia con periodos de sequías moderadas y extremas, excepto el año 1993/94 que fue lluvioso. El año más crítico fue 1991/92 con predominancia de sequías extremas en los sectores centro y sur principalmente, situación que continuó al año siguiente pero en forma localizada. En el año 1994/95 predominaron las deficiencias y sequías de moderadas a severas en toda la cuenca, y los dos años siguientes continuaron las sequías en forma localizada especialmente en el valle y en la parte noroccidental (Marcapomacocha).

¹⁹ A través de ellos se caracterizó el periodo de lluvias por medio de umbrales y que son obtenidos al dividir los datos de lluvias ordenados en forma ascendente de un período temporal suficientemente largo en intervalos de 1 %. Hay diferentes umbrales para determinar las sequías en términos de percentiles como en el proyecto FRIEND/amigo (2002) que utiliza el percentil 30 para sequía, mientras el percentil 5 y 10 son utilizados en Australia para definir la sequía (Australian Bureau of Meteorology, 1992).

Tabla N° 7: Periodos de sequía y deficiencias en la Cuenca del Mantaro para el periodo 1965 – 2006

AÑOS	CPCO	MPCHA	JJA	HAYO	PLCHCA	HNLPI	ABMBA	LRCAY
1965/66								
1966/67								
1967/68								
1968/69								
1969/70								
1970/71								
1971/72								
1972/73								
1973/74								
1974/75								
1975/76								
1976/77								
1977/78								
1978/79								
1979/80								
1980/81								
1981/82								
1982/83								
1983/84								
1984/85								
1985/86								
1986/87								
1987/88								
1988/89								
1989/90								
1990/91								
1991/92								
1992/93								
1993/94								
1994/95								
1995/96								
1996/97								
1997/98								
1998/99								
1999/00								
2000/01								
2001/02								
2002/03								
2003/04								
2004/05								
2005/06								

CPCO	Cerro de Pasco
MPCHA	Marcapomacocha
JJA	Jauja
HAYO	HUayao
PLCHCA	Pilchaca
HNLPI	Huancalpi
ACBMBBA	Acobamba
LRCY	Lircay

Percentil	Tipo de Sequía
5	S.extrema
10	S.severa
15	S.moderada
30	Deficiencia

Otro periodo de sequías ocurrió entre 2003 y 2006, siendo el más intenso el del 2003/04 en toda la cuenca, mientras que en los años posteriores las sequías fueron localizadas. Durante estos años, las precipitaciones no se presentaron dentro de su variabilidad normal. En la misma tabla se observa que hasta antes de la década de los noventa, el sector norte de la cuenca (Marcapomacocha y Cerro de Pasco), no presentaba deficiencias y sequías tan frecuentes como las que vienen ocurriendo desde el año 1991. En Marcapomacocha por ejemplo, se han presentado seis periodos de sequía sólo entre 1990 y 2006.

En la zona de Huancalpi, la década de los ochenta fue la más crítica, presentándose tres periodos de sequía entre los años 1982 - 1989.

3.5.3 Periodos húmedos

Los periodos húmedos también constituyen eventos extremos del clima, afectando la agricultura e infraestructura en la cuenca. De acuerdo a la metodología antes señalada, los valores extremos superiores al percentil 80 van a representar excesos de precipitaciones, teniendo dos categorías, las lluvias superiores al percentil 80 y menores al 90 son considerados excesos moderados, mientras las lluvias por encima del percentil 90 son considerados excesos extremos. El proyecto FRIEND/amigo (2002), considera tres tipos de excesos, las lluvias por encima del percentil 70, denominado "Por encima de la norma", el del percentil 80 "Bastante por encima de la norma" y el del percentil 90 "muy por encima de la norma". Similar a los periodos secos, las lluvias han sido totalizadas en un año desde setiembre a agosto, para cada estación y entre el periodo 1965 al 2006 y las dos categorías de excesos de lluvia se denominaron de la siguiente manera:

- Percentil 80 : Exceso moderado
- Percentil 90 : Exceso extremo

En la Tabla 8 se muestra la caracterización de estos excesos para algunas localidades representativas de la cuenca, pudiéndose observar que entre los años 1969 a 1988 se presentaron con más frecuencia eventos lluviosos superiores a sus normales y que constituyeron periodos húmedos con excesos moderados a extremos en gran parte de la cuenca, sobresaliendo el año 1973/74, considerado como un periodo húmedo extremo, mientras que el año 1981/82 se le considerara periodo húmedo moderado. A partir de los años noventa, la frecuencia de periodos húmedos con excesos decreció y solamente se presentaron en forma localizada especialmente en la parte del valle y sur de la cuenca. El año con exceso extremo 1993/94 afectó toda la cuenca, mientras que en el año 2002/03 los excesos fueron mucho más localizados. En la misma tabla se observa que en el sector norte de la cuenca, no se presentan periodos húmedos desde el año 1984, excepto en Cerro de Pasco en 1993/94.

Finalmente en la Tabla 9, se presenta el resumen de eventos secos y húmedos a nivel de cuenca y por sectores, durante el periodo 1965-2006: Los años 1968/1969 y 1991/1992 son considerados como años de sequía extrema en toda la cuenca, mientras que los 1973/74 y 1993/94 fueron los más lluviosos o húmedos.

Tabla Nº 8: Periodos húmedos moderados y extremos en la Cuenca del Mantaro, para el periodo 1965 –2006

Años	CPCO	MPCHA	JJA	HAYO	PLCHCA	HNCLPI	ACB MBA	LRCY
1965/66								
1966/67			80	90	90			
1967/68								
1968/69								
1969/70							90	
1970/71				80				
1971/72			80				80	
1972/73			90	80	80			
1973/74		80	90			80	90	90
1974/75								
1975/76			80	80	80		80	
1976/77								
1977/78		80				80		
1978/79		80	90					
1979/80								
1980/81	90	90						80
1981/82	80				80		80	80
1982/83	90	90						
1983/84	80	90			80			
1984/85								
1985/86				90	90			80
1986/87								
1987/88							80	
1988/89				80	90			
1989/90								
1990/91						80		
1991/92								
1992/93						90		
1993/94	80		80	90		90		80
1994/95								
1995/96						90		
1996/97						80		
1997/98								
1998/99								
1999/00						90		
2000/01								
2001/02								80
2002/03				90				90
2003/04								
2004/05								
2005/06								
2005/06								

CPCO	Cerro de Pasco
MPCHA	Marcapomacocha
JJA	Jauja
HAYO	HUayao
PLCHCA	Pilchaca
HNCLPI	Huancalpi
ACB MBA	Acobamba
LRCY	Lircay

Percentil	Excesos
80	Moderado
90	Fuerte

Tabla N° 9: Resumen de los periodos extremos en la cuenca del Mantaro

Periodo	Nivel de cuenca	Nivel zonal
Sequías	1965/66+	1982/83+ (central -sur)
	1968/69+++	1989/90++ (sur)
	1991/92+++	1992/93+ (zona central)
		1994/95++ (sur)
		1996/97+ (norte y central)
		1997/98++ (central)
		2003/04+++ (norte-central)
		2005/06+++ (zona norte)
Años húmedos	1973/74 **	1966/67** (central)
	1981/82 *	1970 a 1972* (central y sur)
	1993/94 **	1975/76* (central y sur)
		1979/79* (noroccidental)
		1980/81** (norte)
		1982/83** (norte)
		1983/84* (norte)
		1985/86** (central y sur)
		1988/89* (central)
	2002/03** (central y sur)	

Legenda: sequía Moderada + exceso moderado *
 Sequía Severa ++ exceso extremo **
 Sequía Extrema +++

3.5.4 EI ENOS

El Niño-Oscilación Sur (ENOS) es una perturbación del sistema Océano-Atmósfera en el Pacífico Ecuatorial con importantes consecuencias para el clima a nivel mundial, a través de la alteración de los patrones globales de la presión atmosférica, circulación atmosférica, precipitaciones y temperaturas (Kousky y Higgins, 2007). El ENOS, tiene una fuerte y directa influencia sobre gran parte de Sudamérica tropical y subtropical (Garreaud y Aceituno, 2007), por medio de la teleconexiones que son los cambios de la circulación atmosférica global inducida por anomalías océano-atmosféricas del Pacífico Ecuatorial.

El ciclo del ENOS presenta dos fases, una fase cálida (El Niño), la cual se presenta con intervalos de 4 -5 años y la fase fría (La Niña) así como periodos de transición caracterizados por temperaturas de agua de mar cercano a su media climática. La transición de Niño a Niña tiende a ser rápida mientras de Niña a Niño tiende a ser más gradual, ambas transiciones son influenciadas por la variabilidad intraestacional (Oscilación Madden-Julian, bloqueos de medias latitudes, sistemas de bajas y altas presiones, tormentas tropicales, etc.) según Kousky y Higgins (2007).

El Perú, no escapa de la influencia del ENOS y los eventos extremos asociados a éste, causan grandes pérdidas económicas por sus impactos ya sea en forma directa o indirecta. Los efectos en cuanto a precipitaciones es el incremento de las lluvias sobre lo normal en el norte de Perú y Ecuador y sureste de Sudamérica y lluvias debajo de su normal en el norte de Sudamérica y el Altiplano (Peruano – Boliviano) (Garreaud y Aceituno, 2007), las que han sido obtenidas a través de las teleconexiones utilizando en la mayoría de los casos la temperatura de agua de mar (TSM) de la zona del Pacífico Tropical y encontrándose que esta TSM afecta la predictabilidad y predicciones de Sudamérica (Nobre et al, 2006). Estas relaciones son obtenidas con datos observados de al menos 30 a 40 años y cuyo grado de relación puede variar significativamente cuando vemos escalas de mayor tiempo (Garreaud y Aceituno, 2007).

Desde un plano global, estas dos grandes porciones oceánicas del Pacífico Occidental tienen efectos sobre las precipitaciones en el Perú, y su influencia a nivel de cuenca se determina evaluando estas teleconexiones a través de técnicas estadísticas con el objetivo de mejorar la predicción estacional.

En la figura 23, se muestra la teleconexión entre el Pacífico y la cuenca del Mantaro y Urubamba a través de la primera componente de las funciones ortogonales empíricas de la radiación en onda larga (OLR²⁰, siglas en inglés) sobre el Pacífico Tropical, variable utilizada como indicador de nubosidad/convectividad. La figura indica que la primera componente o campo más dominante, ha capturado la variabilidad de El Niño con un 35 % de la variancia explicada obtenida en el trimestre de mayores lluvias (enero-marzo), mostrando un dipolo en el Pacífico occidental y la zona central y sur del Perú, dicho en otras palabras, si en el Pacífico occidental (Niño-4) hay anomalías negativas de OLR (mayor nubosidad), en la zona de nuestro territorio, sierra central y sur, hay anomalías positivas de OLR (menor nubosidad). Una investigación similar con fines de predicción fue realizada por Montecinos et al. (2000), que analizó los campos de la TSM en el Pacífico Tropical y estableció que la primera componente de esta variable sobre la región 20°N – 40°S captura la mayor parte de la variabilidad interanual relacionada al ENOS y que la variancia explicada también tiene una fuerte estacionalidad.

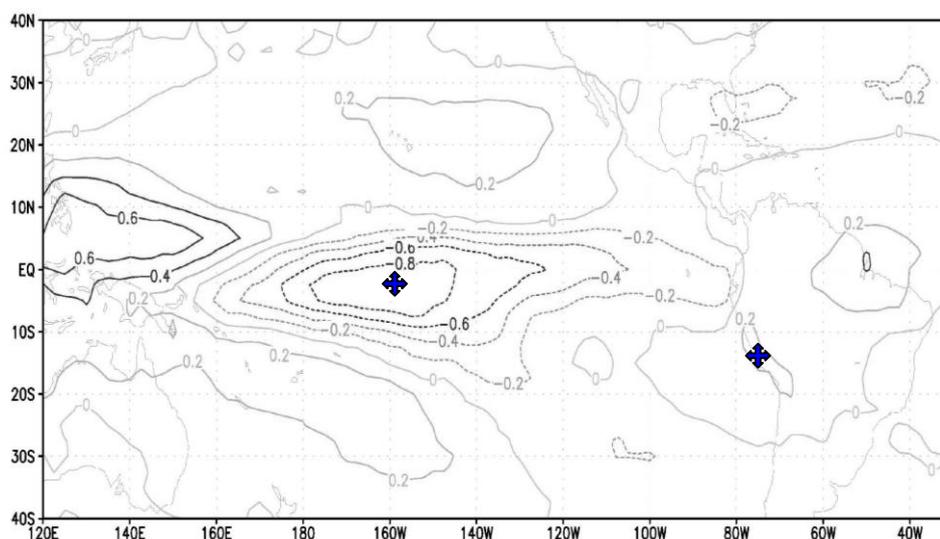


Figura N° 23. Mapa de la Primera componente de las Funciones Ortogonales Empíricas de OLR para el trimestre enero – febrero – marzo, en el periodo 1975 -2001. Fuente: SENAMHI, 2002

Las correlaciones lineales de Pearson entre OLR de la región Niño-4 con las precipitaciones en la cuenca del Mantaro, muestran correlaciones superiores a las obtenidas por el IGP (2005) quienes utilizaron la TSM de la región Niño-4 como predictor; ellos encontraron una correlación inversa con las precipitaciones en la cuenca (ver tabla 10).

La Tabla 10 muestra los valores de las correlaciones entre la OLR de la región Niño-4 y las precipitaciones en la cuenca del Mantaro, para la temporada lluviosa, trimestre de Enero a Marzo, época en que se presentaron los valores más altos de correlación. Se aprecia en el mismo cuadro que en el sector norte de la cuenca, la relación con El Niño es menor respecto a los sectores centro y sur, donde las correlaciones son mayores y más homogéneas, no obstante, estos valores son comparativamente inferiores a las correlaciones encontradas con la región del Altiplano, que son del orden de 0.6-0.7 (Díaz P. A., 2005).

²⁰ Outgoing Longwave Radiation

Tabla Nº 10: Valores de las correlaciones entre la OLR y TSM del Niño-4 y las precipitaciones en la cuenca del Mantaro durante EFM

Sector	Estaciones	Región Niño-4 con OLR (Senamhi, 2006)	Región Niño-4 con TSM (IGP, 2005)
Norte	Marcapomacocha	0.18	
	Carhuacayan	0.47	
	Yantac	0.51	
Centro	Jauja	0.59	-0.45
	Huayao	0.35	
	San Juan de Jarpa	0.50	-0.52
	Pilchaca	0.50	
	Pampas	0.52	-0.47
	Huancalpi	0.42	
Sur	Acobamba	0.46	
	San Pedro de Cachi	0.45	

La teleconexión sobre la cuenca del Mantaro durante los años Niño, físicamente se explica de la siguiente manera: la posición de la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (ZCPS) es desviada hacia el este por ondas Rossby atmosféricas, teniendo efectos con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) (Lenters y Cook, 1999), quien a su vez juega un papel crucial en la posición de la Alta de Bolivia sobre Sudamérica (Lenters y Cook, 1997); la ZCAS y AB, son sistemas que intervienen en la generación de las lluvias principalmente en la parte sur de la cuenca, mientras en la parte norte de la cuenca, se suma la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) la cual está modulado por el gradiente de la TSM en el Atlántico Ecuatorial, por lo que la correlación en esta zona es menor.

Por otro lado, se ha graficado la distribución temporal de la precipitación en dos estaciones ubicadas en los sectores central y sur de la cuenca (Pilchaca y Acobamba), para años catalogados como Niño y Niña, según Trenberth (1997). En la figura 24 a,c puede observarse que en los años Niño las precipitaciones tienden a presentarse por debajo de su normal denominado como “*nor*” en la figura, a excepción del año Niño 1972/73 que fue anteriormente tipificado como lluvioso, en ambas estaciones meteorológicas. En años Niña (figura 24 b,d), las precipitaciones tienden a ser menos deficientes y más cercanas a sus valores normales, observándose algunos años Niña con lluvias por encima de su normal, especialmente en las estaciones ubicadas en el sector sur de la cuenca (sólo se presenta Acobamba) como ocurrió en los años, 74/75, 95/96, 98/99 y 99/00.

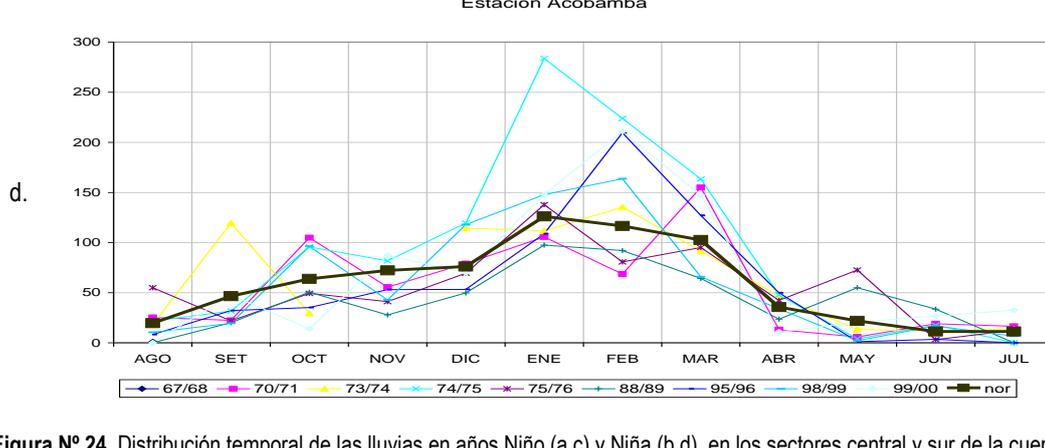
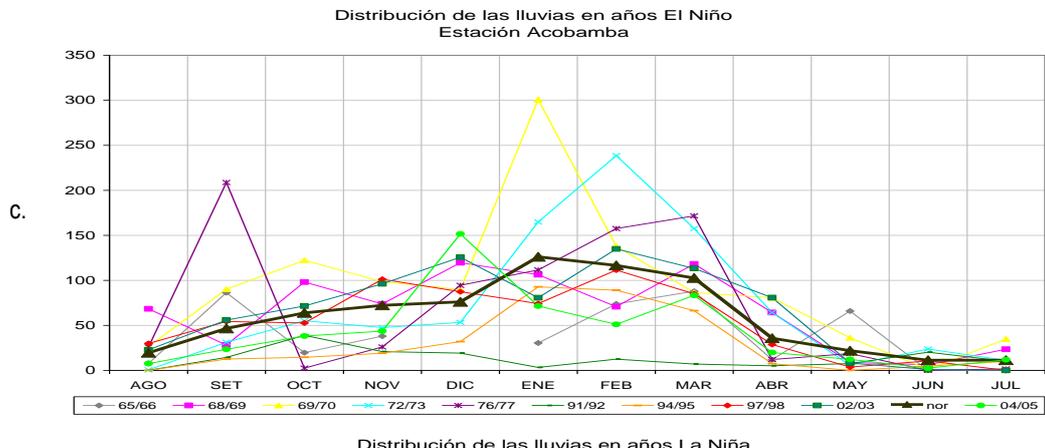
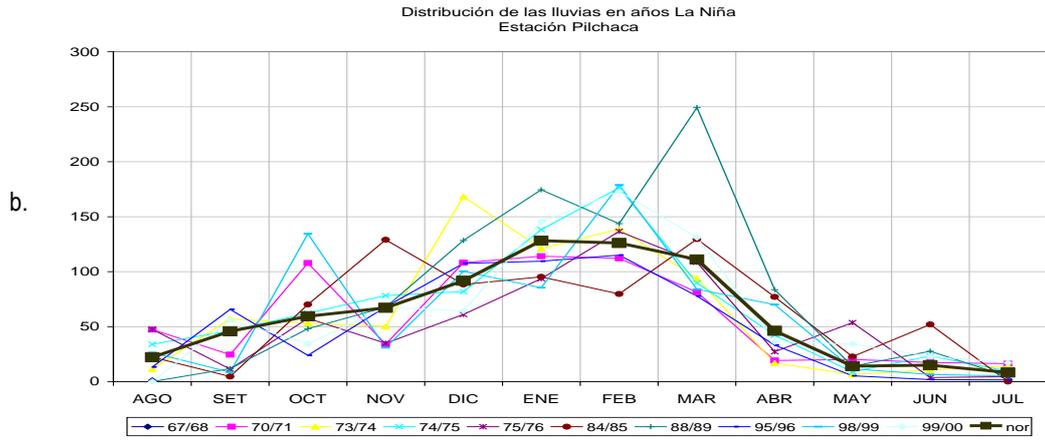
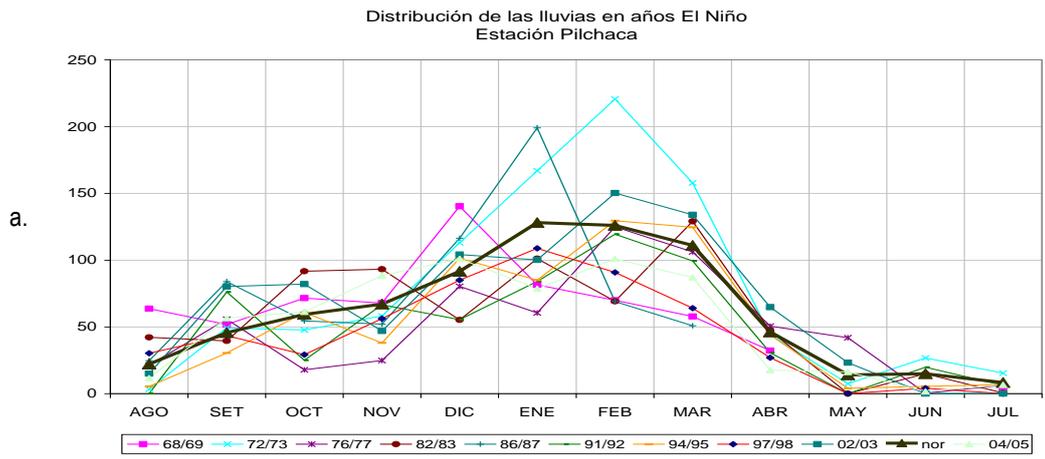


Figura Nº 24. Distribución temporal de las lluvias en años Niño (a,c) y Niña (b,d), en los sectores central y sur de la cuenca.

3.6 Tendencias climáticas observadas

3.6.1 Tendencias Promedio de las Precipitaciones Observadas

Para determinar las tendencias lineales de la precipitación se ha utilizado el test de Mann-Kendall (1976), así como la metodología desarrollada por Sen (1968), para obtener la pendiente o la magnitud de la inclinación (tasa de cambio de la variable por unidad de tiempo).

Las ventajas del test de Mann-Kendall se resume en lo siguiente:

- Es un test no paramétrico
- Se puede utilizar para evidenciar la existencia de una tendencia en la serie
- No es tan compleja matemáticamente
- Se puede determinar el año en que aparece la tendencia
- Es robusto, ya que rechaza calificar a una serie con tendencia estadísticamente significativa a no ser que ésta permanezca hasta la finalización del periodo de estudio, con lo que se evita que periodos o ciclos cortos se confundan con la serie.

3.6.1.1 Tendencia Anual

Se ha considerado como periodo anual a la precipitación totalizada de septiembre a agosto, de la serie comprendida entre 1965-2006. La tabla 11 muestra las estaciones utilizadas, la tendencia estimada y su significancia.

Tabla N° 11: Tendencia anual de la Precipitación (mm) y significancia (%) en la cuenca del Mantaro

LUGAR	PERIODO	Tendencia (mm año ⁻¹)	SIGNIFICANCIA (%)
CERRO DE PASCO	1965-2006	-28.52	99.94
CARHUACAYAN	1969-2006	-0.76	57.78
YANTAC	1965-2006	-0.78	58.80
MARCAPOMACOCHA	1969-2006	-14.87	99.92
JAUJA	1965-2006	-2.41	92.43
HUAYAO	1965-2006	-2.53	94.62
S.JUAN DE JARPA	1968-2006	-3.43	87.37
PILCHACA	1965-2006	-3.08	93.64
HUANCALPI	1965-2006	8.47	96.61
HUANCAVELICA	1965-2006	5.06	96.63
ACOBAMBA	1965-2006	-3.87	89.53
LIRCAY	1966-2006	-1.65	76.00
QUINUA	1965-2006	-4.33	93.16

En el mapa 09 (apéndice 2), se observa la tendencia de la precipitación en diferentes puntos de la cuenca; ésta viene siendo mayormente decreciente, a excepción de Huancalpi y Huancavelica que presentan una tendencia ascendente del orden de 5-8 mm año⁻¹, con un nivel de significancia del 85%.

De otro lado, las mayores tasas de decrecimiento se vienen dando en el sector norte con 28 mm año⁻¹ en Cerro de Pasco y 14 mm año⁻¹ en Marcapomacocha. En el resto de la cuenca las tasas son variables e inferiores de 6 mm año⁻¹.

3.6.1.2 Tendencias estacionales

Se ha analizado la precipitación acumulada en los trimestres Diciembre – Febrero (verano), Marzo – Mayo (otoño), Junio – Agosto (invierno) y Septiembre – Noviembre (primavera). En la Tabla 12 se indica las tendencias y su significancia y en los mapas 09, 10, 11 y 12 (apéndice 2), se muestra la tendencia en diferentes puntos de la cuenca para cada uno de los trimestres.

Tabla N° 12: Tendencias estacional de la precipitación (mm) y significancia (%) en la Cuenca del Mantaro

LUGAR	DEF		MAM		JJA		SON	
	TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig
CERRO DE PASCO	-4.9	96	-2.6	97	-2.9	99	-3.3	79
CARHUACAYAN	-0.5	60	1.23	88	-0.5	86	-0.1	57
YANTAC	-0.8	61	-1.2	89	0.28	79	0.39	58
MARCAPOMACOCHA	-6.9	99	-1.9	92	-0.1	56	-0.2	56
JAUJA	-2.4	96	0.07	54	-0.3	94	-0.2	63
HUAYAO	0.05	53	-1.2	95	-0.1	70	-0.1	55
SAN JUAN DE JARPA	-0.4	58	-1.8	91	-0.5	84	0.0	52
PILCHACA	-1.4	89	-1.0	89	0.0	52	-0.2	65
HUANCALPI	3.9	93	0.14	57	0.77	86	1.64	95
HUANCAVELICA	1.53	77	1.06	84	0.84	95	0.4	83
ACOBAMBA	-0.6	63	-2.5	99	-0.1	57	-1.5	93
LIRCAY	-0.5	71	-0.3	62	0.12	61	-1.7	98
QUINUA	-2.3	94	-0.7	74	0.29	78	0.23	57

Leyenda: TP : Tendencia de la precipitación
Sig. : Significancia

En el verano (Mapa 10, apéndice 2), en gran parte de la cuenca la tendencia de las precipitaciones tienden a ser decreciente a excepción de Huancalpi (Huancavelica) que presenta una tendencia creciente con un 93% de significancia. En esta estación de máximas lluvias, los mayores valores de decrecimiento se han dado en la parte alta del sector norte de la cuenca del orden de 4.5 – 7.0 mm año⁻¹, mientras en el resto de la cuenca la tendencia decreciente varía entre 1.4 - 3.7 mm año⁻¹. La tendencia positiva de la parte suroccidental ha sido 3.9 mm año⁻¹(ver Tabla 12).

En otoño, (Mapa 11, apéndice 2) las tendencias de las precipitaciones han sido decrecientes en toda la cuenca con valores de hasta 2.5 mm año⁻¹ en la parte nororiental y suroriental de la cuenca. Sólo en la vecindad de Carhuacayan (sector norte) la tendencia ascendente ha sido significativa con 1.2 mm año⁻¹ (ver Tabla 12).

En invierno (Mapa 12, apéndice 2), época de mínimas precipitaciones, la tendencia es menos significancia (ver Tabla 12), a pesar de ello los puntos de mayor significancia, la pendiente continúa siendo decreciente en los sectores norte y central de la cuenca, siendo la tasa de decrecimiento de 0.3-0.8 mm año⁻¹ a excepción de la parte nororiental que presenta mayores valores hasta de 2.9 mm año⁻¹. La parte suroccidental de la cuenca presenta tendencia positiva con incrementos de 0.8 mm año⁻¹.

Finalmente en primavera (Mapa 13, apéndice 2), época de inicio del periodo lluvioso, se incrementa la incertidumbre, presentando sólo en forma localizada tendencias significativas, tal como se puede observar en la tabla 12. La tendencia significativa decreciente se localiza en el

sector nororiental con valores que han llegado hasta 3.3 mm año⁻¹. En la parte suroccidental, en la que se venía observando tendencia de incrementos en los trimestres anteriores, en este trimestre la tendencia ha sido a decrecer con valores entre 1.5-1.7 mm año⁻¹. Sólo en forma puntual, en Huancalpi, la tendencia continúa siendo ascendente y con valores de 1.6 mm año⁻¹.

3.6.2 Tendencias promedio de la Temperatura Máxima

La tendencia anual y estacional de la temperatura máxima en la cuenca, ambas altamente significativas, se observa en las Tablas 13 y 14 respectivamente. En los mapas 13, 14, 15, 16 y 17 del apéndice 2 se presenta la tendencia con significancia mayor al 85%.

3.6.2.1 Tendencia anual

En el Mapa 14 y Tabla 13, se observa que la tendencia de la temperatura máxima en la cuenca es ascendente (valores positivos), a excepción de Cerro de Pasco (Pasco) con -0.06 °C año⁻¹, Jauja (Junín) y Lircay (Huancavelica) con -0.02 °C año⁻¹. La tendencia positiva varía entre 0.03 - 0.07 °C año⁻¹.

Tabla N° 13: Tendencia anual de las Temperaturas Máxima y Mínima (°C) y las significancias (%) en la cuenca del Mantaro

LUGAR	PERIODO	TMAX (°C/año)	SIGNIFI. (%)	TMIN (°C/año)	SIGNIFI. (%)
CERRO DE PASCO	1965-2005	-0.06	100	0.01	71
MARCAPOMACOCKA	1967-2005	0.03	99	0.01	89
JAUJA	1965-2005	-0.02	98	-0.03	99
HUAYAO	1965-2006	0.03	100	0.01	77
PILCHACA	1964-2006	0.07	100	0.02	98
ACOBAMBA	1965-2005	0.04	99	0.08	100
LIRCAY	1965-2005	-0.02	99	0.01	71
QUINUA	1965-2005	0.002	56	-0.04	100

3.6.2.2 Tendencias estacionales

La tendencia estacional es muy similar a la tendencia anual, es decir, mayormente ascendente. En el verano (Mapa 15), la tendencia es positiva en gran parte de la cuenca, con valores entre 0.02 - 0.04 °C año⁻¹ en promedio, pero con valores más altos en Pilchaca con 0.08 °C año⁻¹. La tendencia decreciente de la temperatura máxima durante esta estación se viene dando en Cerro de Pasco con 0.07 °C año⁻¹, Jauja con 0.04 °C año⁻¹ y Lircay con 0.02 °C año⁻¹. En otoño (Mapa 16), se sigue presentando la misma configuración anual, pero acentuándose la tendencia decreciente en Cerro de Pasco, Jauja y Lircay, y creciente en Pilchaca (ver Tabla 14). También se observa que la parte noroccidental de la cuenca así como el valle vienen presentando una tendencia reascendente del orden de 0.03 - 0.08 °C año⁻¹. Finalmente en el invierno y primavera (Mapas 17 y 18), la tendencia continúa con el mismo patrón del periodo anual y de los trimestres anteriores; las tendencias negativas son del orden 0.01 - 0.04 °C año⁻¹ y las positivas varían entre 0.01 - 0.06 °C año⁻¹ en invierno, mientras que en primavera la tendencia negativa oscilan entre 0.02 - 0.06 °C año⁻¹, y la positiva entre 0.01 - 0.05 °C año⁻¹ (ver Tabla 14).

Tabla N° 14: Tendencia estacional de las Temperaturas Máxima y Mínima (°C) y significancias (%) en la cuenca del Mantaro

LUGAR	Unidades	DEF		MAM		JJA		SON	
		TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN
MARCAPOMACOCHA	°C/año	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
	%	97	95.4	97.4	85.7	86.8	68	98	83
CERRO DE PASCO	°C/año	-0.07	0.02	-0.05	0.02	-0.04	0.02	-0.06	-0.0002
	%	100	98	99.4	87	97	92	100	53
HUAYAO	°C/año	0.04	0.01	0.04	0.02	0.03	0.01	0.02	-0.01
	%	99	88.9	99.8	95.2	99.9	75.4	99.5	71.9
PILCHACA	°C/año	0.08	0.02	0.08	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01
	%	100	100	100	98.8	100	78.2	100	95.9
ACOBAMBA	°C/año	0.04	0.11	0.03	0.07	0.01	0.02	0.05	0.07
	%	98	100	96.9	100	76.1	94.9	99.9	100
LIRCAY	°C/año	-0.02	0.02	-0.01	0.003	-0.01	-0.002	-0.02	-0.003
	%	96	91.1	90.6	58.2	87.4	58.3	99.9	58.8
LA QUINUA	°C/año	0.01	-0.04	-0.003	-0.03	-0.01	-0.05	0.01	-0.03
	%	80	99.5	58.1	99.7	80.3	100.0	87.6	99.4
JAUJA	°C/año	-0.04	-0.04	-0.02	-0.03	-0.01	-0.07	-0.03	-0.03
	%	99	100.0	97.0	99.7	71.2	100.0	99.1	99.5

3.6.3 Tendencias promedio de la Temperatura Mínima

Los valores y significancias de la tendencia anual y estacional de la temperatura mínima en la cuenca del Mantaro se presentan en la Tabla 13 y 14 respectivamente, así como en los mapas 19, 20, 21, 22 y 23 del apéndice 2, en donde se grafica las tendencias con significancia mayor al 85%.

3.6.3.1 Tendencia anual

La tendencia anual de la temperatura mínima (Tabla 13 y Mapa 19) es positiva en gran parte de la cuenca, a excepción de la parte oriental de los sectores central y sur, en que predomina la tendencia negativa. Los valores positivos oscilan entre 0.01-0.08 °C año⁻¹, siendo más acentuados en Acobamba. Los valores negativos oscilan entre 0.03 - 0.04 °C año⁻¹.

3.6.3.2 Tendencia estacional

Las tendencias estacionales de la temperatura mínima presentan el mismo patrón que la tendencia anual. En verano, la tendencia positiva varía entre 0.02 - 0.1 °C año⁻¹ y la negativa (Jauja y La Quinoa) varía entre 0.02 - 0.04 °C año⁻¹. La tendencia negativa de mayor valor se presenta en Acobamba con 0.11 °C año⁻¹ (ver tabla 14 y Mapa 20). En otoño, la tendencia positiva continúa en gran parte de la cuenca con valor promedio de 0.02 °C año⁻¹ y Acobamba sigue presentando la mayor tasa de incremento (0.07 °C año⁻¹); mientras que la tendencia negativa en Jauja y La Quinoa presenta valores entre 0.02 - 0.03 °C año⁻¹ durante esta estación (ver tabla 14 y Mapa 21). Tanto en invierno como en primavera, la significancia en algunos puntos de la cuenca disminuye, dicho en otras palabras, la tendencia de la temperatura mínima tiene mayor incertidumbre. Considerando sólo las zonas con tendencia significativa, la tendencia positiva se acentúa en Acobamba durante la primavera con 0.07 °C año⁻¹, mientras que la tendencia negativa en Jauja y La Quinoa toma mayores valores comparativamente a los trimestres anteriores (0.03 y 0.07 °C año⁻¹ (ver Tabla 14, Mapas 22 y 23).

3.7 Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático

Entre muchos métodos estadísticos usados para el diagnóstico de eventos extremos tanto de precipitación como de temperaturas, se tiene el que se basa en los “índices extremos”, propuesto por Frich et al. (2002) y es ampliamente usado en estudios recientes a nivel mundial y que también ha sido adoptado como salida estándar de datos para el reciente 4to Reporte de Evaluación del IPCC (Kamiguchi et al., 2006)

La investigación realizada por Frich et al. (2002) observa cambios en los extremos climáticos durante la segunda mitad del Siglo XX, usando cuidadosamente un conjunto definido de índices derivados desde observaciones diarias de temperatura máxima, mínima y precipitación. En un esfuerzo por facilitar y coordinar los análisis para un conjunto estándar de índices extremos y que estos sirvan para comparaciones a nivel mundial, se desarrolló un software simple que utiliza amplia y fácilmente la tecnología de la hoja de cálculo, este software es llamado ClimDex, el cual reproduce todos los índices usados en Frich *et al.* Una mejora realizada sobre este ClimDex es realizado en el nuevo software llamado RClimDex, el cual fue desarrollado en el 2004 por el área de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá, donde se pueden calcular los 27 índices básicos de extremos climáticos recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para el Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI). El análisis de la data observada diaria de temperaturas y precipitaciones en la cuenca del Río Mantaro, se ha realizado haciendo uso de este software RClimDex, cuya finalidad es construir índices de extremos climáticos para detección de cambio climático.

Para el análisis de estos índices en la cuenca del Mantaro se ha utilizado el periodo entre 1965 al 2005, considerando las tendencias significantes a un $p < 0.1$, lo que conlleva a las siguientes conclusiones

3.7.1 Precipitación

Los índices climáticos para evaluar el comportamiento de las precipitaciones y su nivel de son definidos en la Tabla 15, y los resultados se muestran en la Tabla 16.

Los sectores norte (Cerro de Pasco, Carhuacayan, Marcapomacocha) y sur de la cuenca (Acobamba, Lircay, La Quinua) presentan una alta coherencia espacial en las señales de tendencia negativa entre todos los índices analizados (ver Tabla 16 y figura 25) ya que en todas las estaciones, se observa disminución de las precipitaciones, y muchas de estas tendencias son significantes, tal como el índice PRCPTOT que es negativo en todas las estaciones analizadas de ambos sectores, así como los índices de intensidad diaria (SDII) y de días húmedos consecutivos (CWD) cuyas tendencias concuerdan mucho con el índice PRCPTOT, aunque el nivel de significancia es diferente para algunas estaciones.

Los patrones de tendencia para los índices de frecuencia de extremos R10mm y R20mm son similares a PRCPTOT, muchas estaciones muestran niveles de significancia mayores en estos índices extremos que en el índice de precipitación total. Los dos índices de intensidad de precipitaciones máximas en 1 y 5 días, RX1day y RX5day, respectivamente, muestran también tendencias negativas, pero con mayor significancia estadística en la región norte de la cuenca.

En relación, a los índices de excedencia de percentiles R95p y R99p, estos también guardan una relación directa con el índice de PRCPTOT. Caso contrario, pero en concordancia con todo lo anteriormente analizado se observa en el índice máximo consecutivo de días secos (CDD), el cual es positivo, indicando mayor cantidad de días secos en estas regiones de la cuenca.

Tabla N° 15: Índices de precipitación con su definición y unidades. RR es la tasa de lluvia diaria. Todos los índices son calculados anualmente de Enero a Diciembre.

Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
PRCPTOT	Precipitación en días húmedos	Precipitación Total Anual en los días húmedos (RR>=1mm)	mm
SDII	Índice simple de intensidad de lluvia	Precipitación total anual dividida por el numero de días húmedos en un año	mm día ⁻¹
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	días
R10mm	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP>=10mm	días
R20mm	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que PRCP>=20mm	días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual en que RR>95 percentil	mm
R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación total anual en que RR>99 percentil	mm
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
RX5day	Cantidad máxima de precipitación en cinco días	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm

Tabla N° 16. Tendencia y niveles de significancia de los índices extremos de precipitación en la cuenca del Mantaro

ÍNDICES / ESTACIONES	PRCPTOT	SDII	CDD	CWD	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RX1day	RX5day
Cerro de Pasco	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
Carhuacayan	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0
Marcapomacocha	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jauja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Huayao	0	0	+	+	0	0	0	0	0	+
Laive	+	0	0	+	0	0	0	0	+	+
Pilchaca	0	+	+	0	+	+	+	+	+	0
Huancalpi	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Acobamba	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
Lircay	0	0	+	0	0	0	0	+	+	0
La Quinua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+), Tendencia negativa sin significancia (0), Tendencia negativa con significancia (0).



Figura N° 25. Señal de tendencia en indicadores de precipitación. El incremento es mostrado por el símbolo cruz y el decrecimiento por un círculo. Valores en negrita indican significancia en $p < 0.1$.

Por otro lado, el sector central de la cuenca (Jauja, Huayao, Laive, Pilchaca y Huancalpi) muestra señales de no consistencia, ya que las tendencias varían de positivas a negativas, sin una señal clara, de acuerdo a los índices y estaciones analizadas. Así se tiene que en las estaciones de Jauja, Huayao y Laive predominan las tendencias negativas, en la mayoría de los índices de tendencias analizadas, encontrándose mayores niveles de significancia en la estación de Jauja. En Pilchaca y Huancalpi, las tendencias son principalmente positivas.

3.7.2 Temperatura

Los diez índices que explican las tendencias de la temperatura son definidos en la Tabla 17. Los valores y niveles de significancia de estos índices se presentan en la Tabla 18.

Tabla N° 17: Índices de temperatura con su definición y unidades. Todos los índices son calculados anualmente de Enero a Diciembre.

Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
FDO	Días de Heladas	Numero de días en un año cuando TN(mínimo diario) < 0°C	días
Txx	Temperatura Máxima Máxima	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
Txn	Temperatura Máxima Mínima	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
Tnx	Temperatura Mínima Máxima	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
Tnn	Temperatura Mínima Mínima	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
DTR	Rango diario de temperatura	Diferencia media mensual entre Tx y Tn	°C
Tx10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando Tx < 10th percentil	días
Tx90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando Tx > 90th percentil	días
Tn10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando Tn < 10th percentil	días
Tn90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando Tn > 90th percentil	días

Tabla N° 18: Valores de tendencia y niveles de significancia

ÍNDICES / ESTACIONES	fdo	Txx	Txn	Tnx	Tnn	dtr	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p
Cerro de Pasco	0	0	0	0	+	0				
Marcapomacocha	0	+	0	+	+	0	0	+	0	+
Jauja	+	0	0	0	0	+	+	0	+	0
Huayao	0	+	+	+	+	+	0	+	0	+
Laive	0	+	0	+	+	+				
Pilchaca	0	+	+	+	+	+	0	+	0	+
Acobamba	0	+	0	+	+	0				
Lircay	+	0	0	+	0	0	+	+	+	+
La Quinua	0	+	0	0	0	+				

Legenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+),
Tendencia negativa sin significancia (0), Tendencia negativa con significancia (0).



Figura N° 26. Señal de tendencia en indicadores de temperatura. El incremento es mostrado por el símbolo cruz y el decrecimiento por un círculo. Valores en negrita indican significancia en $p < 0.1$.

En la Tabla 18 y en forma espacial en la figura 26, se muestra una mezcla de índices de tendencias no significativas entre las estaciones analizadas. Se aprecia que algunas estaciones no muestran concordancia con estaciones cercanas, pero en términos generales existe una tendencia negativa en el número de días de heladas, en casi todas las estaciones, excepto en las estaciones de Jauja y Lircay, donde se tienen índices positivos. Los índices de días y noches calientes son positivos (basados en percentiles por encima de 90th) y con niveles de significancia representativos, esto principalmente se presenta en las estaciones de Huayao y Pilchaca (zona centro de la cuenca), donde también se aprecia la tendencia negativa (índices basados en percentiles por debajo de 10th) de noches y días fríos, con alta significancia estadística, principalmente en la estación de Pilchaca.

El índice DTR se ve incrementado en la zona central de la cuenca (estaciones de Jauja, Huayao, Laive y Pilchaca) con elevada significancia estadística en Huayao y Pilchaca.

CAPITULO 4

CAUDAL DEL RIO MANTARO PROYECTADO AL AÑO 2035

Las variaciones del caudal definen el régimen hidrológico de un río. Las variaciones temporales se dan durante o después de la temporada de lluvias. En manifestaciones extremas del clima, se puede producir la *crecida* pudiendo el aporte de agua ser mayor que la capacidad del río para evacuarla, desbordándose y cubriendo las zonas llanas próximas, pero si no llueve o la media de las precipitaciones es inferior a lo normal durante largos periodos de tiempo, el río puede llegar eventualmente a secarse, afectando dramáticamente a las poblaciones que dependen de éste vital elemento para satisfacer sus necesidades básicas.

La cuenca más poblada de la sierra del Perú, es la del río Mantaro (>1'000,000 habitantes, según el INEI - 2007), y como se indica en el Capítulo 2 de este informe, su importancia se relaciona directamente con la generación de energía y la producción alimentaria, que abastece a más del 35% de la población del país. También se ha puesto de manifiesto que uno de los tributarios del Mantaro es el río de origen glaciar Shullcas; esta subcuenca tiene vital importancia porque con sus recursos hídricos se atiende la demanda para el consumo de la población de la ciudad de Huancayo así como del distrito de El Tambo.

Considerando lo anterior y, en medio de un mundo cada vez más cálido, la alteración de la oferta y demanda del recurso hídrico en la cuenca como consecuencia del calentamiento global podría desencadenar conflictos sociales en la región.

En este Capítulo se presenta el análisis del caudal histórico del río Mantaro en el punto La Mejorada (sector centro-sur de la cuenca), y su proyección al año 2035. Se escogió esta estación por que tiene la mayor cantidad de años "ininterrumpidos" de información en su registro histórico, lo cual es muy importante cuando se trabaja con modelos de generación de series estocásticas ya que éstos son calibrados en base a los registros históricos.

4.1 El modelo SAMS

El modelo hidrológico empleado para la generación de caudales es el SAMS (Stochastic Analysis Modeling and Simulation), el cual utiliza el análisis estocástico, el modelamiento, y la simulación de series de tiempo hidrológicas. Está escrito en Lenguaje C y Fortran y corre bajo modernos sistemas operativos tales como Windows NT y Windows 98. Tiene las siguientes capacidades y limitaciones:

- Se puede realizar el análisis anual y estacional de los datos. Para datos estacionales el número máximo de estaciones es 12 (intervalos de tiempo dentro de un año).
- Incluye varios tipos de opciones de transformación para transformar la información original en normal.

- Incluye los siguientes modelos estocásticos: single site, multisite, and disaggregation que han sido ampliamente usados en la literatura.
- Incluye dos esquemas principales de modelamiento para modelación y generación de sistemas de redes de ríos complejos.
- Máximo número de estaciones es 40.
- Número máximo de estaciones por grupo (para desagregación multivariada) es 10.
- Máximo número de años para el archivo de entrada de datos es 600.
- El número de muestras que pueden ser generados es ilimitado.
- El número de años que pueden ser generados es ilimitado.

4.2 Información

La información empleada para este trabajo se obtuvo de la estación hidrológica La Mejorada (12° 32' S; 74° 55' W; 2820 msnm), ubicada en el distrito de Pampas, provincia de Tayacaja en la Región Huancavelica (ver figura 27). De esta estación se obtuvieron los caudales a nivel mensual y para el periodo 1951-1963 (ver figura 28).

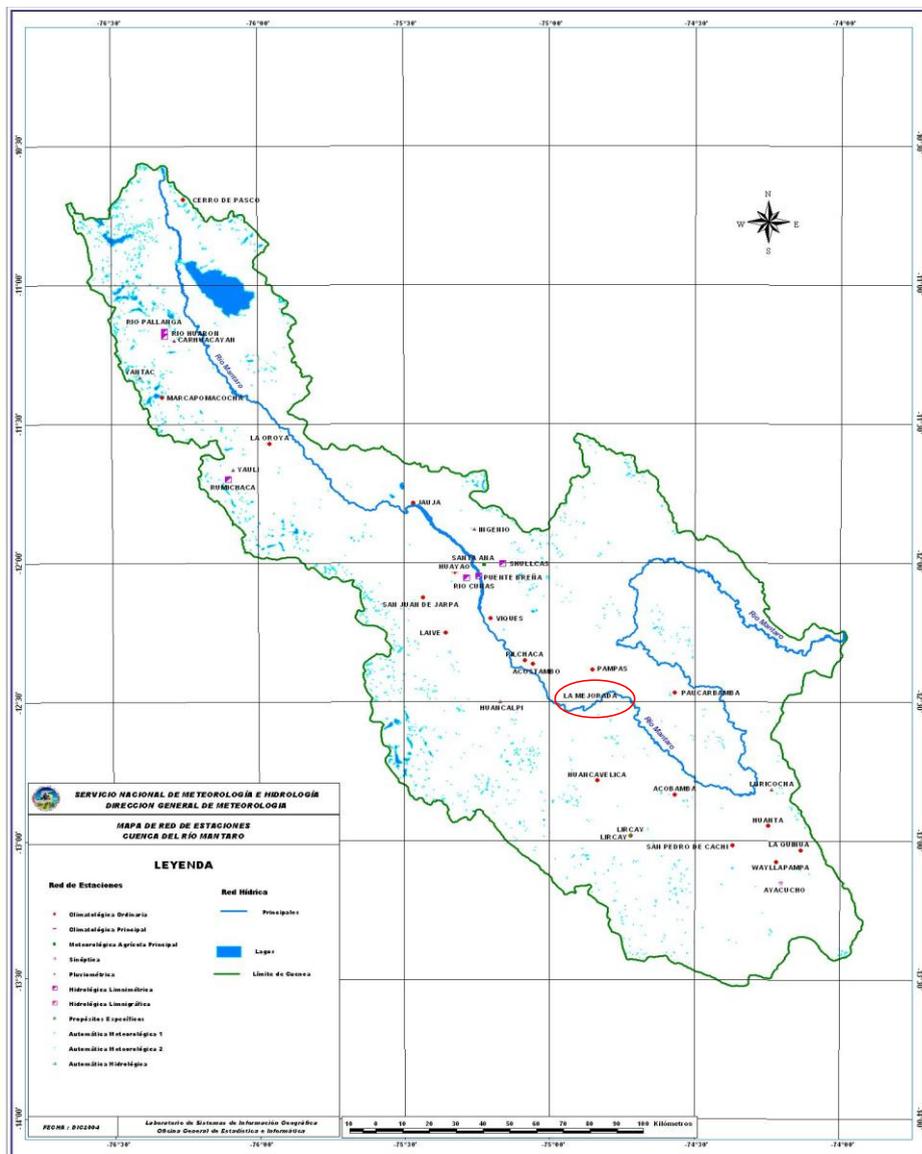


Figura N° 27. Ubicación de la estación La Mejorada

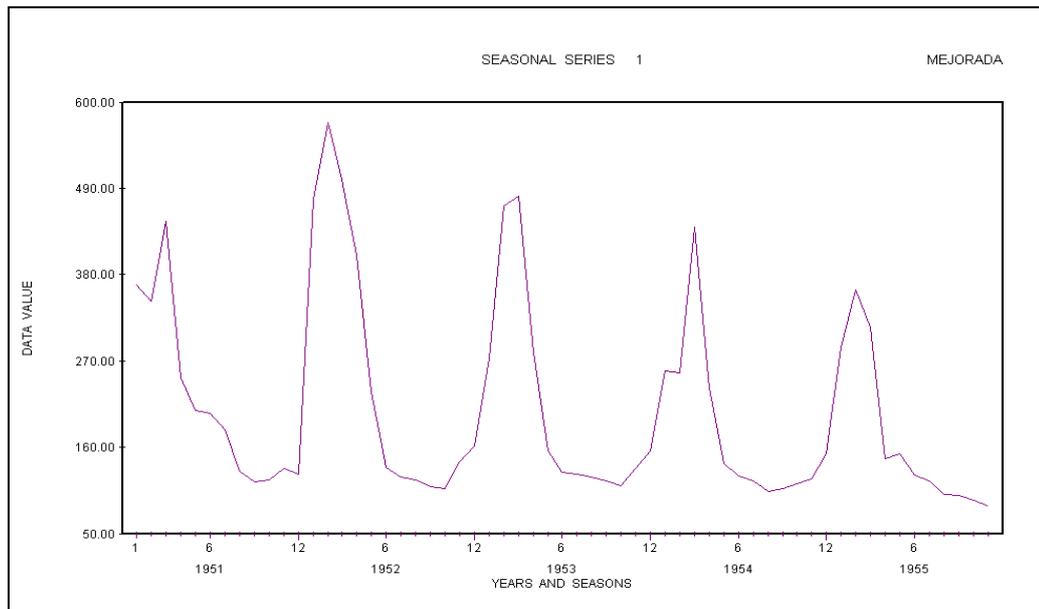


Figura N° 28. Caudales medios mensuales en la estación La Mejorada

4.3 Metodología

Se trabajó la estadística básica de los caudales mensuales de la estación La Mejorada donde se determinaron los caudales medios mensuales y caudales medios multianuales así como las desviaciones estándar mensuales; toda esta información nos permitió clasificar los caudales medios anuales en tres tipos: Seco, Normal y Húmedo.

Se consideró el comportamiento del caudal normal dentro de los siguientes rangos, para cada mes del año obtendremos:

$$\begin{aligned} \text{Limite Sup Normal} &= \text{Caudal mensual promedio} + 0.3 \cdot \text{Desviación estándar} \\ \text{Limite Inf Normal} &= \text{Caudal mensual promedio} - 0.3 \cdot \text{Desviación estándar} \end{aligned}$$

Según la Tabla 19 se consideró como año normal a los caudales dentro de los siguientes rangos [170.30 , 203.18]. Asimismo, año seco a los caudales medios anuales menores a 170.30 m³ s⁻¹, por último como año húmedo a los caudales mayores a 203.18 m³ s⁻¹.

Tabla N° 19. Clasificación de los caudales medios anuales en m³s⁻¹

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Caudal Mensual	256.26	349.60	383.52	242.54	164.08	127.92	120.43	107.67	105.01	106.71	120.94	156.19	186.74
Desviación Estándar	110.96	94.49	103.67	88.74	38.70	31.09	30.57	25.37	24.76	21.26	32.77	55.17	54.80
Limite Sup Normal	289.55	377.94	414.62	269.16	175.68	137.24	129.60	115.28	112.44	113.09	130.77	172.74	203.18
Limite Inf Normal	222.97	321.25	352.42	215.91	152.47	118.59	111.26	100.06	97.58	100.33	111.11	139.64	170.30

De acuerdo a esta clasificación, de los 13 años que se tiene registrada la información de caudales en la estación La Mejorada, se ha encontrado que: 6 años han sido secos, 1 año ha sido normal y 6 años han sido húmedos, tal como se muestra en el figura 29.

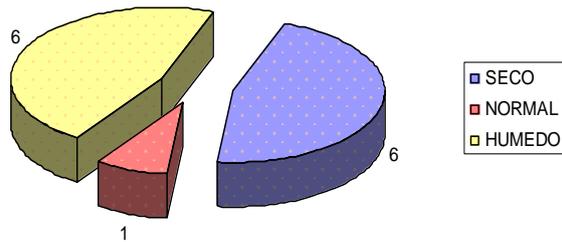


Figura N° 29. Clasificación en base al comportamiento de los caudales en la estación de control La Mejorada (cuena del Mantaro)

El río Shullcas nace de los deshielos del nevado Huaytapallana y es alimentado por lagunas que se encuentran ubicadas en las partes altas. De un informe elaborado por el MINAG (2005), se han obtenido algunos caudales referenciales del río Shullcas los cuales se muestran a continuación:

Tabla N° 20. Caudales registrados en el río Shullcas en m^3s^{-1}

Río	Estación de Aforo	Caudal Promedio Histórico		Caudal Promedio (m^3/seg)				
		Dic.	Jun.	Dic. 1996	Dic. 1997	Dic. 1998	Dic. 1999	Mar. 1999
Shullcas	Puente Chamisería Vilcacoto	4.69	1.43	3.55	29.29	4.04	2.77	14.35

Fuente: Distrito de Riego Mantaro. MINAG

Para tener una idea del comportamiento de los caudales en la cuena del Mantaro, se muestra el siguiente hidrograma de algunas estaciones ubicadas en la cuena.

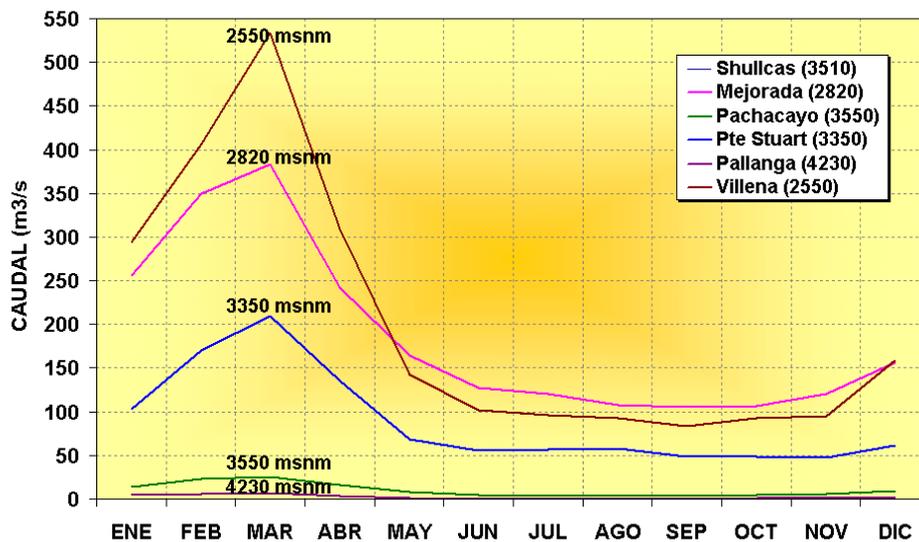


Figura N° 30. Caudales en diferentes tramos del río Mantaro

Según la figura 30, se puede observar la relación directa entre caudal-altitud, es decir a mayor altitud menor caudal y conforme la altitud disminuye el caudal aumenta gradualmente. Una característica en todos estos ríos es que presentan su pico máximo en el mes de marzo. Así mismo podemos concluir, por la altitud de la estación Shullcas y por los caudales históricos obtenidos del informe del MINAG, que el comportamiento hídrico del río Shullcas se asemejaría al del río Pachacayo y Pallanga.

4.3.1 Test de Normalidad

Se realizó la prueba de la normalidad de los datos planteando la información de caudales en papel probabilidad normal y usando el test de sesgo de la normalidad.

Para observar la adecuación de la transformación, se muestra en la figura 31, la comparación de la distribución teórica generada basada en la transformación y la distribución histórica de la muestra. Para nuestros datos de La Mejorada se observó que la data no era normal por lo que se tuvo que realizar pruebas para ver cual de las tres funciones de transformación (potencia, box cox y logarítmica) que tiene SAMS se ajustaba mejor a nuestros datos. Se determinó que las tres funciones de transformación se pueden adecuar a nuestros datos.

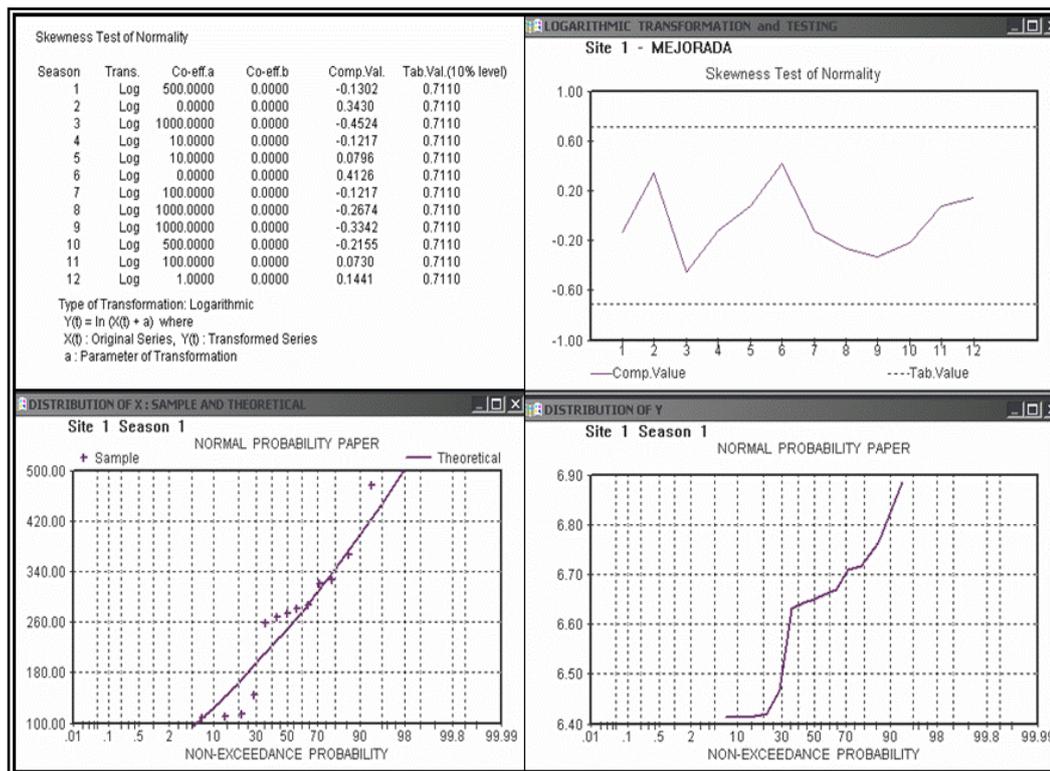


Figura N° 31. Test del sesgo de la normalidad

4.3.2 Estadísticas estacionales básicas

Para datos estacionales las características estadísticas pueden ser calculadas para la data original y la data transformada (ver figuras 32 y 33). Estas características estadísticas se muestran a continuación:

- Estadísticas básicas tales como medias estacionales, desviaciones estándar, coeficientes de sesgo, coeficientes de variación, valores máximo y mínimo.
- Coeficientes de correlación estación a estación.
- Coeficientes de correlación cruzada estación a estación para datos múltiples.
- Sequías, superávits (inundaciones) y estadísticas relacionadas al almacenamiento.

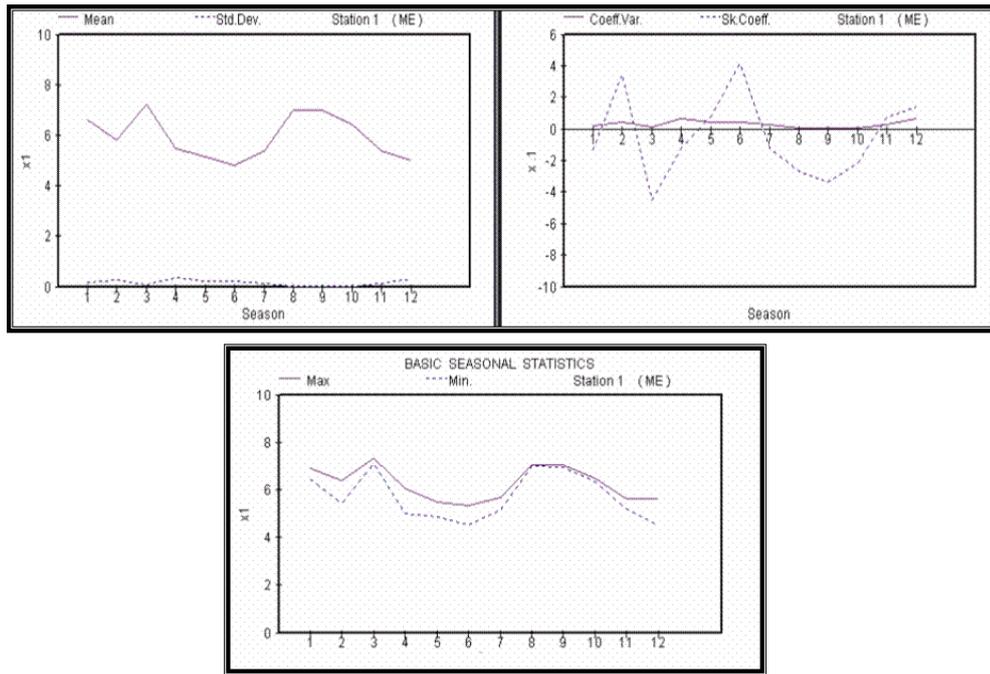


Figura N° 32. Estadísticas básicas estacionales de la data transformada

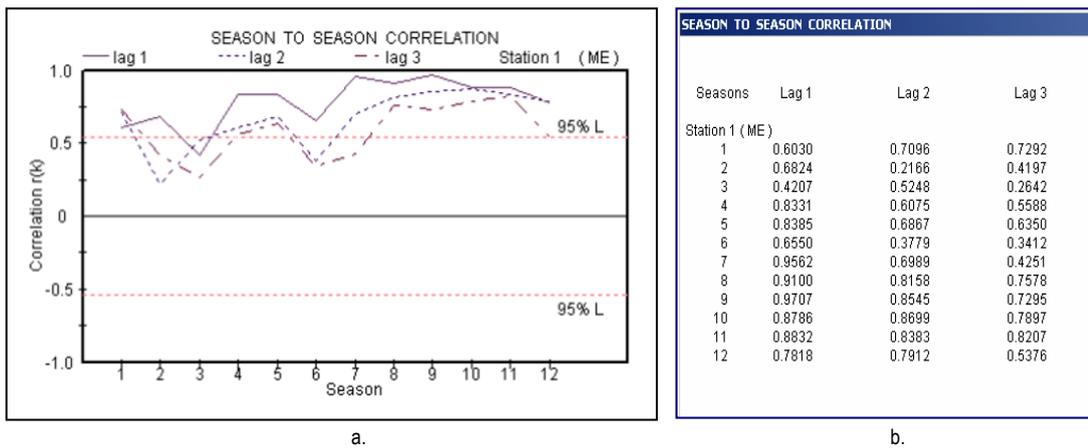


Figura N° 33. Correlación de coeficientes estacionales en forma gráfica (a) y tabular (b)

4.3.3 Ajuste del modelo estocástico

Para el modelamiento estacional se empleó el modelo PARMA estacional univariado con orden del modelo (1,0).

4.3.4 Prueba del Modelo

Después que el modelo fue ajustado y los parámetros estimados, el modelo fue probado para asegurar su óptimo uso en la generación de series. En general, esto puede hacerse probando los residuales y comparando las propiedades de los datos del modelo versus el histórico (ver figuras 34 y 35).

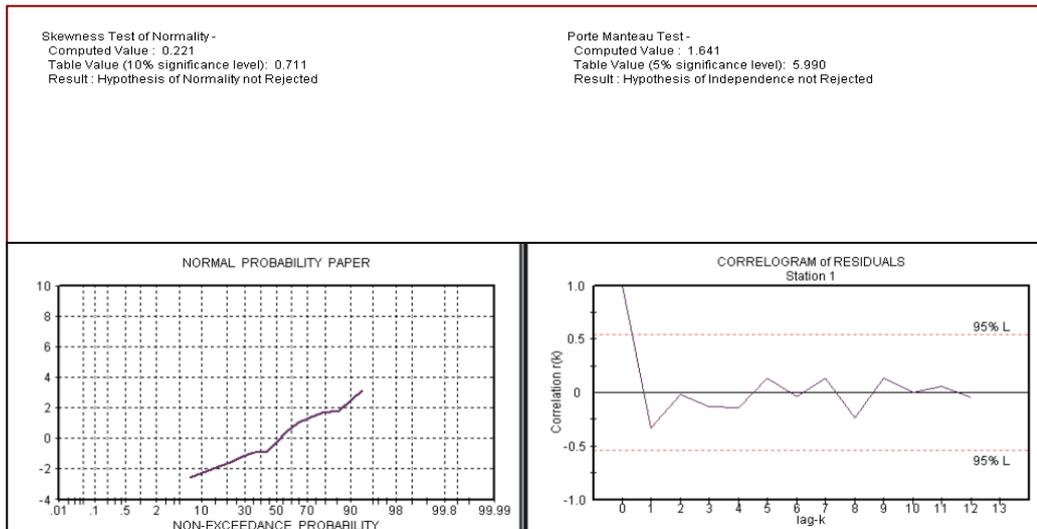


Figura N° 34. Prueba de los residuos para el modelo PARMA (1,0)

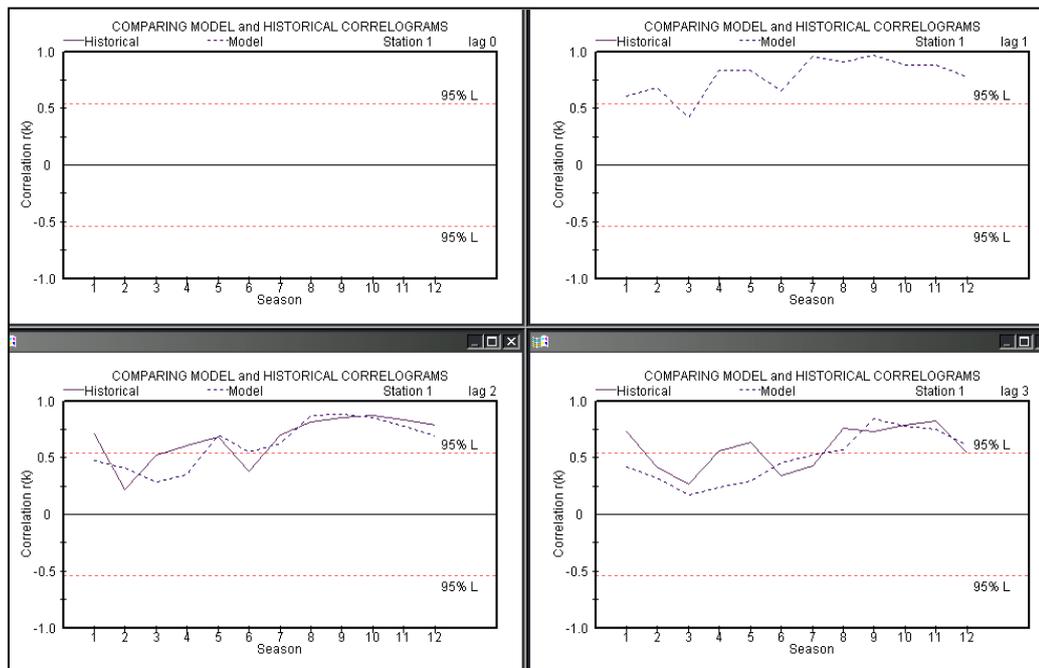


Figura N° 35. Comparación de los correlogramas del modelo vs. Histórico

4.3.5 Generación de series sintéticas

La principal filosofía detrás de la generación de datos sintéticos es que las muestras sintéticas que son generadas preservan ciertas propiedades estadísticas que existen en el proceso hidrológico natural (Lane y Frevert, 1990). Como resultado, cada muestra generada y la muestra histórica son igualmente probables para que ocurran en el futuro.

Una vez que se definió el modelo y se estimaron los parámetros, se generaron las series sintéticas basadas en este modelo (Ver figura 36).

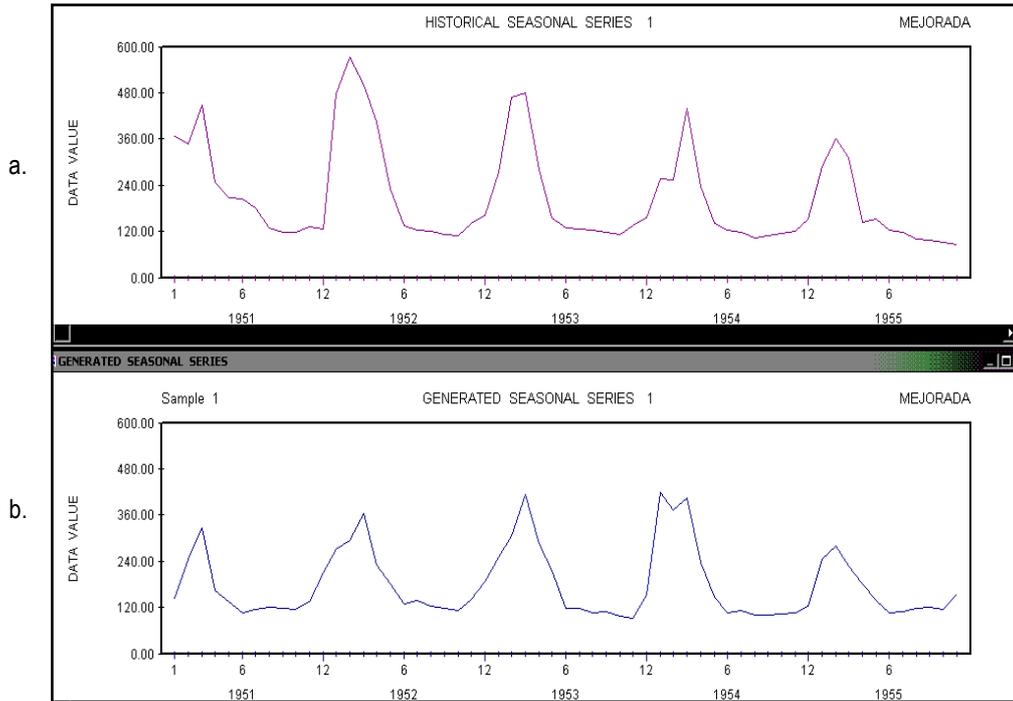


Figura Nº 36. Series sintéticas generadas con el modelo SAMS: (a) Histórico y (b) modelo SAMS

Luego de realizar múltiples calibraciones con los parámetros del modelo, se eligieron tres juegos de parámetros uno para la función potencia, otro para la función log y el último para la función box-cox todos ellos basados en el criterio de que el modelo representaba mejor el comportamiento estacional de los datos observados, tanto en medias, desviación estándar, coeficiente de sesgo y coeficiente de variación como se muestra en las figuras 37 y 38.

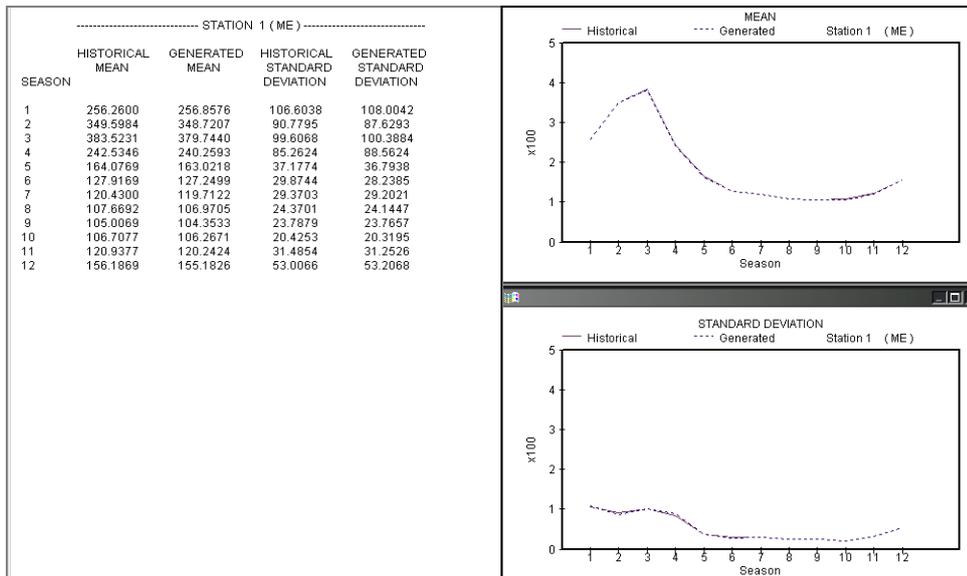


Figura Nº 37. Estadísticas básicas estacionales (Media y Desviación Estándar)

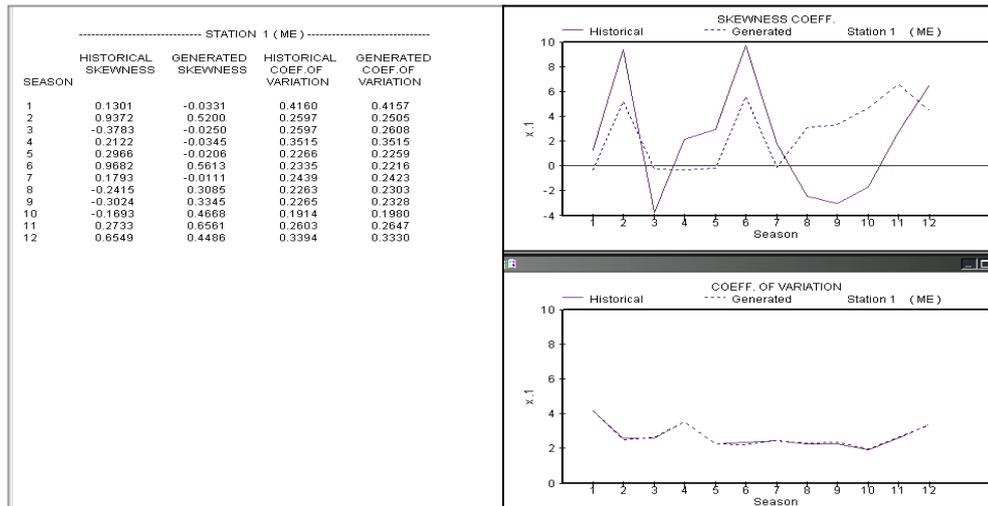


Figura N° 38. Estadísticas básicas estacionales (Coeficiente de sesgo y de variación)

Para cada juego de parámetros se generaron 50 series de caudales mensuales, para el periodo de enero 2007 hasta diciembre del 2035. Estas series mensuales se promediaron obteniéndose de esto 50 series anuales para cada juego de parámetros.

4.4 Resultados

Las series sintéticas generadas fueron a nivel mensual, según la clasificación de caudales hecho anteriormente (Seco, Normal, Húmedo) se le asignó el tipo correspondiente a cada una de las 50 series anuales para cada juego de parámetros (ver Tabla 21), asimismo se pudo determinar los porcentajes que representan cada uno de los caudales asignados como Seco, Normal y Húmedo para cada año de cada una de las series (ver Tabla 22), mediante el conteo de la ocurrencia para cada caso.

Tabla N° 21

	POTENCIA	LOG	BOX-COX
AÑOS	Jgo Param1	Jgo Param2	Jgo Param3
2007	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2008	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2009	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2010	NORMAL	HUMEDO	HUMEDO
2011	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO
2012	SECO	SECO	SECO
2013	SECO	NORMAL	NORMAL
2014	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2015	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2016	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2017	SECO	SECO	SECO
2018	SECO	SECO	SECO
2019	SECO	NORMAL	NORMAL
2020	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO
2021	HUMEDO	HUMEDO	HUMEDO
2022	SECO	SECO	SECO
2023	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2024	SECO	SECO	SECO
2025	SECO	SECO	SECO
2026	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2027	SECO	HUMEDO	HUMEDO
2028	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2029	SECO	SECO	SECO
2030	SECO	SECO	NORMAL
2031	SECO	SECO	SECO
2032	NORMAL	SECO	NORMAL
2033	SECO	SECO	SECO
2034	NORMAL	NORMAL	NORMAL
2035	SECO	SECO	SECO

Tabla N° 22

	POTENCIA	LOG	BOX-COX
AÑOS	Jgo Param1	Jgo Param2	Jgo Param3
2007	44	50	50
2008	44	44	44
2009	46	42	48
2010	36	34	36
2011	36	36	36
2012	44	42	38
2013	38	38	38
2014	42	40	40
2015	40	38	38
2016	50	44	50
2017	36	38	36
2018	38	40	38
2019	40	40	40
2020	34	36	38
2021	40	40	40
2022	42	48	44
2023	48	48	46
2024	40	36	36
2025	44	44	42
2026	42	42	42
2027	36	34	38
2028	42	46	42
2029	50	46	48
2030	40	42	42
2031	38	38	38
2032	40	40	40
2033	38	38	36
2034	44	44	42
2035	38	38	38

Finalmente, se agruparon los 150 caudales proyectados y se determinó la distribución de frecuencias de estos caudales hasta el año 2035. Por ejemplo, para el año 2008 (figura 39 b) hay una probabilidad del 71% que el caudal medio anual no exceda los $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que para el 2009-2010 (figuras 39 c,d), la probabilidad de que los caudales sobrepasen este umbral es de 40%. De igual forma se puede hacer extensivo el mismo análisis para las demás figuras.

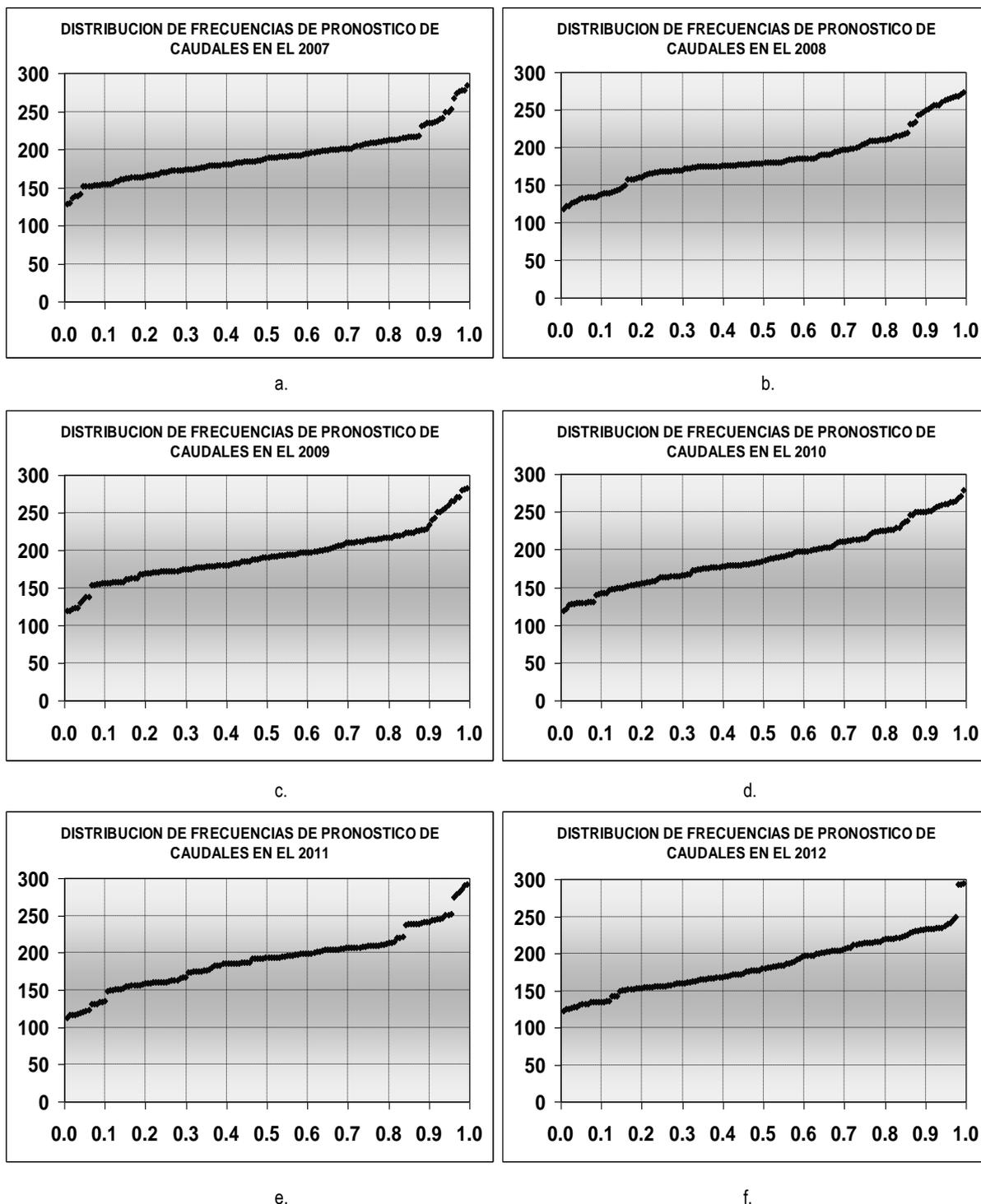


Figura N° 39. Distribución de frecuencias de caudales pronosticados al 2012 en al estación La Mejorada.

De manera similar se pueden determinar las distribuciones de frecuencias de los caudales pronosticados para los años siguientes, es decir del 2013 al 2035, pero considerando como umbral el caudal medio anual de La Mejorada estimado en la Tabla 19.

Tabla N° 23: Probabilidad de exceder o no exceder un caudal de $186.74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

AÑOS	Probabilidades de	
	No Excedencia	Excedencia
2007	0.4834	0.5166
2008	0.6225	0.3775
2009	0.4570	0.5430
2010	0.5033	0.4967
2011	0.4437	0.5563
2012	0.5563	0.4437

4.5 Conclusiones

- Los caudales históricos registrados en la estación La Mejorada (sector central-sur del río Mantaro), indican que de los 13 años de datos observados, 6 años han sido secos, 1 año ha sido normal y 6 años han sido húmedos.
- Los caudales generados no muestran una gran variabilidad para el periodo proyectado (2008-2035), es decir, los caudales se presentarían dentro de sus valores normales.
- Las distribuciones de frecuencia obtenidas con la totalidad de caudales generados nos indican mediante probabilidades, que para el año 2008 existe la probabilidad de 62.25% que el caudal podría no exceder los $186.74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (caudal normal anual), de igual manera para el año 2009 la probabilidad de exceder el caudal de $186.74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ es de 54.30%.
- El periodo del 2029-2035, serían mayormente años secos para el tramo central-sur del río Mantaro. Por otro lado existe la posibilidad que se presente entre 1 a 3 años normales pero en ningún caso años húmedos (ver tabla 21).

CAPITULO 5

ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

“Para fines del Siglo XXI, las temperaturas máxima y mínima en la cuenca del Mantaro se habrán incrementado, en promedio, 2.7 °C y 2.3 °C respectivamente; la reducción de las precipitaciones se acentuará en verano e invierno y en los sectores norte y centro principalmente”.

5.1 El modelo y el experimento del Time-Slice

EL Instituto de Investigación Meteorológica (MRI), la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) y la Organización Tecnología de Ciencias Avanzadas de la Tierra (AESTO), condujeron un proyecto de investigación de cinco años denominado "desarrollo de modelos globales climáticos de alta resolución y modelos regionales del clima", proyecto financiado por el Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MEXT). El propósito de este proyecto fue desarrollar un Modelo Atmosférico Global de la Circulación General (AGCM) con una resolución horizontal de 20 Km y un Modelo regional No-Hidrostatico (NHM) de nube con una resolución horizontal de pocos kilómetros con la finalidad de investigar los efectos del calentamiento global en los tifones (ciclones tropicales), el Baiu (Kusunoki et al. 2005) y fenómenos de meso-escala tales como nevadas y precipitación intensas.

5.1.1 El modelo

Con la finalidad de mejorar los procesos físicos del AGCM original desarrollado por la JMA con fines de previsión, se introdujeron mejoras en los esquemas de convección (Arakawa-Schubert), y condensación a gran escala. Así mismo, se introdujo un esquema de radiación incluyendo los efectos de los aerosoles y gases de efecto invernadero (GEI) en la estratopausa; y un esquema de biosfera simple desarrollado por el MRI. Se introdujo además un nuevo esquema Semi-Lagrangiano cuasi conservativo, el cual resulta ser más eficaz que el esquema convencional Euleriano, en los cálculos a mayores tiempos de integración. (Ver tabla 24)

Tabla Nº 24: Outline del Modelo Japonés TL959L60 de alta resolución

Características	Referencias
Resolución	TL959 (20 Km) y 60 niveles en la vertical
Tiempo de integración	Esquema semi-Lagrangiano (Yoshimua, 2004) 4 horas/mes con $\Delta T = 60$ minutos y 30 nodos del ES (640 nodos)
Radiación en onda corta	Shibata y Uchiyama (1992)
Radiación en onda larga	Shibata y Aoki (1989)
Cúmulos (convección)	Arakawa-Schubert (Randall y Pan, 1993)
Nubes	Condensación de gran escala, cúmulos y estratocúmulos
Capa Límite Planetaria	Mellor-Yamada (1974) , segundo orden de cierre
Arrastre por Ondas de Gravedad	Iwasaki et al. (1989) y Fricción de Rayleigh
Coordenada vertical	Híbrida sigma – presión

Las simulaciones se realizaron en un truncamiento espectral horizontal de TL959L60 (1920x960 puntos de grilla) que corresponde a una grilla horizontal de 20 Km y 60 niveles en la vertical. Las corridas se procesaron en el Earth Simulator (ES), el supercomputador más poderoso del mundo para cuando se hizo el experimento.

5.1.2 El experimento del Time-Slice

El método del time-slice consiste en forzar un modelo atmosférico de alta resolución con concentraciones de GEI correspondiente a un determinado intervalo de tiempo en el futuro (normalmente se considera la concentración del CO₂ duplicado); tomando como condiciones iniciales la temperatura superficial del mar (TSM) y distribución de hielo de un Modelo Acoplado Océano-Atmosférico de Circulación General (AOGCM) de baja resolución (Cubash et al., 1995; Bengtsson et al. 1996; IPCC 2001). El experimento desarrollado por el MRI/JMA de Japón, consistió en generar 5 corridas (AJ, AK, AS, AM y AN) con el modelo atmosférico TL959L60 del JMA, forzado con diferentes campos de TSM como condición de frontera, proveniente del modelo acoplado AOGCM2.3.2 del MRI.

La primera corrida AJ, correspondiente al primer time-slice o clima actual, fue generado con la climatología observada (1982-1993) de TSM; las corridas AK y AS fueron generados con la climatología observada de TSM más el cambio de la TSM entre el presente (1979-1998; promedio de 20 años) y el futuro (2080-2099; promedio de 20 años) obtenido de simulaciones del modelo MRI-AOGCM2.3 basado en el escenario de emisión A1B del IPCC, y el modelo MIROC (hires) respectivamente. Las corridas AM y AN fueron generados con TSM proveniente del modelo MRI-CGCM2.3.2, para el clima presente y futuro respectivamente. El AGCM ha sido integrado por 10 años para las corridas AJ, AK y AS y por 20 años para las corridas AM y AN. Los detalles del diseño del experimento del time-slice se presentan en la Tabla 25 (Noda et al., 2006).

Tabla N° 25. Diseño del experimento del time-slice

Experimento	Periodo	TSM	Variabilidad anual de TSM	Periodo de Integración
AJ	Presente	Climatología observada	No	10 años
AK	Futuro	Climatología observada + Δ TSM (MRI-CGCM2.3.2)	No	10 años
AS	Futuro	Climatología observada + Δ TSM (MIROC (hires))	No	10 años
AM	Presente	Corrida Siglo XX por MRI-CGCM2.3.2 de 1979 a 1998	Si	20 años
AN	Futuro	Corrida A1B IPCC por MRI-CGCM2.3.2 de 2080 a 2099	Si	20 años

Climatología observada de TSM: Promedio de 12 años de 1982 a 1993 por Reynolds y Smith (1994)

Δ TSM (Modelo): Cambio de la TSM proyectada (Corrida con el escenario A1B del IPCC de 2080 a 2099 menos la corrida de 1979 a 1998)

MRI-CGCM2.3.2: Modelo Acoplado Océano-Atmosférico de Circulación General (AOGCM) desarrollado por el MRI

MIROC²¹ (hires): AOGCM desarrollado por la Universidad de Tokio, el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES) y el Centro de Investigación para el Cambio Climático.

5.2 Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro

5.2.1 Metodología

²¹ Model for Interdisciplinary Research on Climate

Una manera de construir escenarios futuros del clima, es incorporando la variabilidad (interanual) a dichos escenarios (Wilks, 1992; Woo, 1992; Mearns et al., 1992; Barrow, 1995; citados por Hulme y Lu, 2000), siendo precisamente el cambio de la variabilidad el aspecto más importante en la frecuencia de los eventos extremos del tiempo en el futuro.

En el presente estudio, la construcción de los escenarios futuros de temperaturas máxima y mínima en la cuenca del Mantaro se basa en la incorporación de la variabilidad climática interanual observada a las salidas del Modelo Japonés de alta resolución MRI/JMA-TL959L60 en sus dos time-slice (AJ y AK). Esta aproximación (Hulme y Lu, 2000), toma las salidas de dicho modelo y los combina con la climatología observada de 30 años (1971-2000). En otras palabras, a las salidas del segundo time-slice (AK) del modelo correspondiente al periodo 2090-2099 se le resta el promedio del primer time-slice correspondiente al periodo 1982-1991, para un mes determinado.

El valor de la variable X para el mes j en el año k está determinado por:

$$X_{k,j} = \bar{X}_{o,j} + \Delta X_{k,j}$$

Donde:

$X_{k,j}$	=	Es el valor del mes j^{avo} de la variable X para el año k;
$\bar{X}_{o,j}$	=	Es el promedio multianual observado de 30 años de la variable X para el mes j;
$\Delta X_{k,j}$	=	Es el cambio en la variable X del modelo AGCM para el mes j y año k;

$$\text{donde, } \Delta X_{k,j} = (AK_{k,j} - AJ_{j,1982-1991})$$

En este caso, la variabilidad climática interanual de las salidas del modelo es incorporada a los escenarios, y combinada con la variabilidad climática observada.

Para el caso de la precipitación se ha utilizado el ajuste directo propuesto por Lenderink *et. al* (2007) para la generación de escenarios, que consiste en:

$$P_{futura}(t) = P_{fut}(t) \times (\bar{P}_{obs} / \bar{P}_{control})$$

Donde:

$P_{futura}(t)$	=	Es el escenario de la precipitación ajustada en un tiempo t
$P_{fut}(t)$	=	Es la precipitación del escenario futuro del modelo en un tiempo t
\bar{P}_{obs}	=	Es la precipitación promedio multianual observada de 30 años para el tiempo t
$\bar{P}_{control}$	=	Es la precipitación del escenario actual del modelo en un tiempo t

Para el análisis, se ha sectorizado la cuenca, considerándose sólo las estaciones de mejor calidad de información y record histórico completo, (ver tabla 26). Además de las estaciones que figuran en esta tabla, para la confección de los mapas de escenarios climáticos, se ha considerado información de estaciones aledañas a la cuenca (ver Mapa 01, apéndice 1).

Considerando que las proyecciones climáticas no son perfectas, es necesario incluir alguna medida de incertidumbre en los resultados finales, pues en la medida que el usuario incorpore correctamente estas incertidumbres a los escenarios climáticos, planteará mejor sus estrategias de adaptación frente al cambio climático (Trancton, 2001). En ese sentido, la inferencia estadística aplicada en el análisis de cambio del clima para finales de siglo, se ha realizado a través de la estimación del intervalo de confianza con un nivel de confianza de 95% (Cubasch, 2003).

Finalmente, se construyeron los escenarios climáticos en la escala mensual y estacional para la última década del presente siglo, correspondiente a las variables precipitación y temperaturas extremas.

Tabla N° 26. Estaciones meteorológicas sectorizadas en la cuenca del Mantaro

Áreas	Estaciones
Sector norte (SNCM)	Cerro de Pasco Marcapomacocha
Sector centro (SCCM)	Huayao, Jauja, Laive y Pilchaca
Sector sur (SSCM)	Acobamba, La Quinua, Laive y Huancavelica

Legenda:
 SNCM: Sector Norte de la Cuenca del Mantaro
 SCCM: Sector Centro de la Cuenca del Mantaro
 SSCM: Sector Sur de la Cuenca del Mantaro

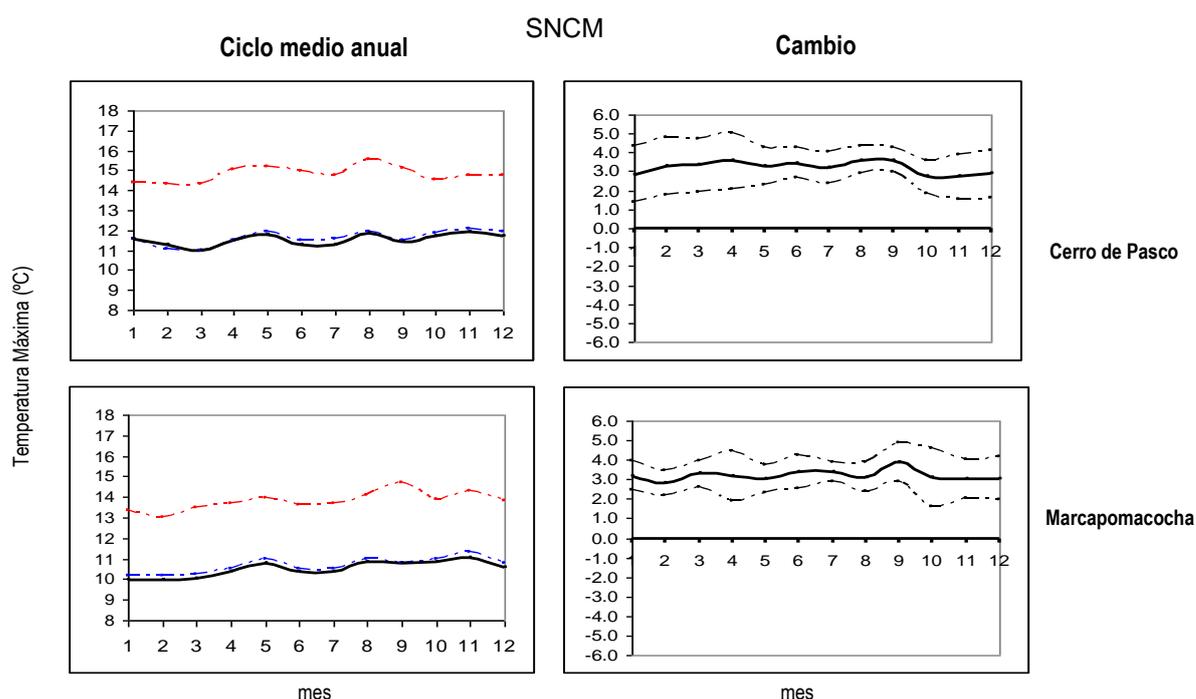
5.2.2 Escenarios proyectados

Las proyecciones de los modelos para fines de Siglo XXI en los Andes Tropicales, indican un calentamiento sostenido de la tropopausa tropical (Vuille, 2007). Según el escenario de emisiones A2, los Andes podrían experimentar un masivo calentamiento del orden de 4.5 – 5.0 °C para finales de siglo. El escenario de emisiones A1B proyecta un 80 – 90% del rango proyectado por el escenario A2, mientras que el escenario B1 proyecta la mitad del calentamiento del escenario A2. Tanto escenarios optimistas como pesimistas proyectan un mismo patrón de calentamiento, sólo difiere la amplitud del rango.

En este reporte, se presentan los escenarios del cambio de temperatura y precipitación para finales de siglo basados en el escenario A1B.

5.2.2.1 Temperatura máxima

El ciclo anual de la temperatura máxima sobre los sectores norte, centro y sur de la cuenca se muestra en la figura 40 (izquierda). El comportamiento anual de la temperatura máxima en las estaciones analizadas es muy bien simulado por el modelo en su primer time-slice, asegurando su buena performance en la simulación del clima actual en la región. A pesar de ello puede apreciarse una ligera sobrestimación de los valores durante la estación de verano, en SCCM principalmente. En la misma figura (entrelíneas en rojo), se aprecia las proyecciones del modelo para la última década del presente siglo (segundo time-slice), siendo apreciable la simulación del ciclo anual pero con un incremento sostenido a lo largo del año que oscila alrededor de 3.0-3.5 °C en el sector norte y de 2.3 °C a 3.4 °C en los sectores centro y sur de la cuenca.



(... continúa)

SCCM

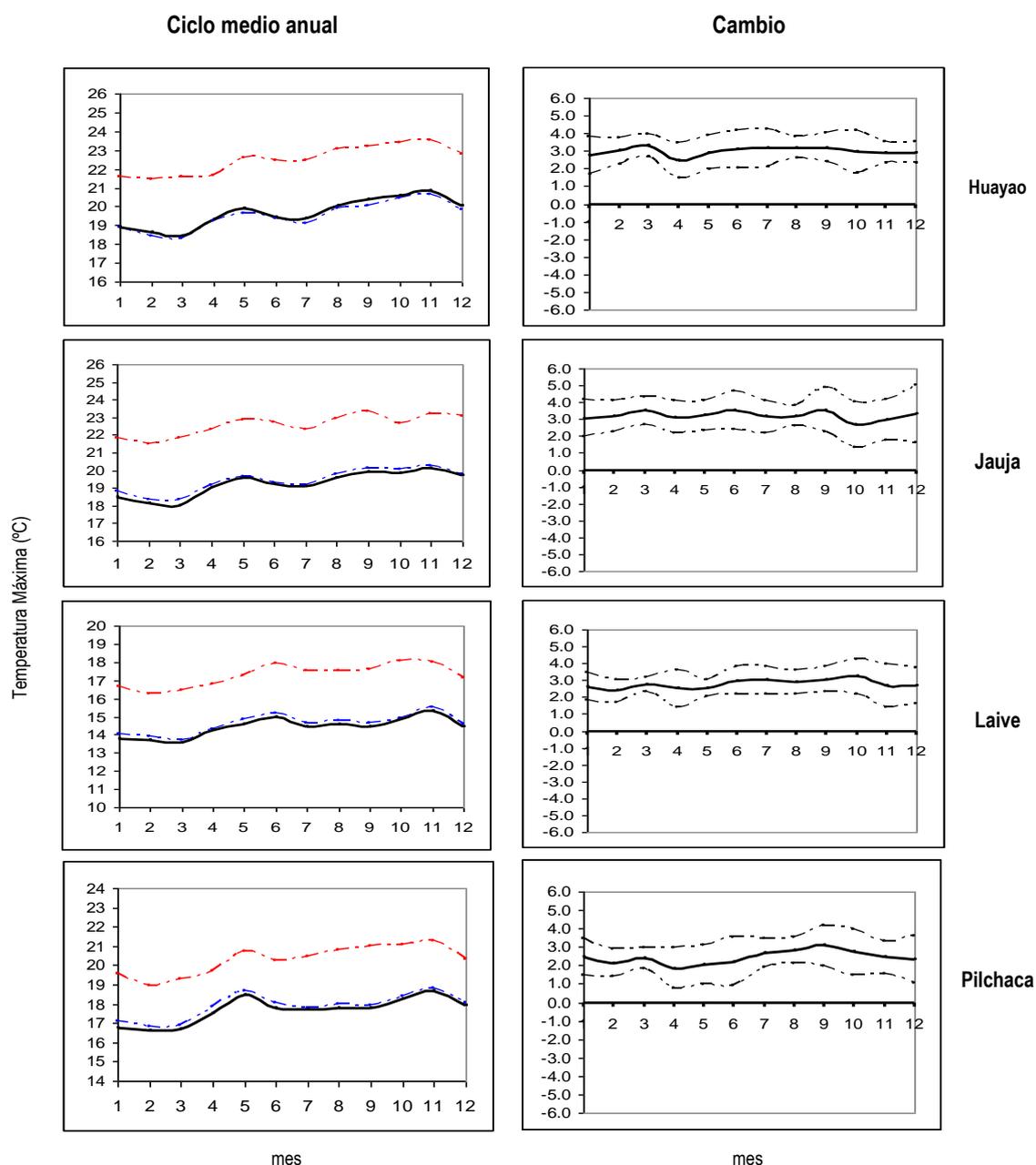
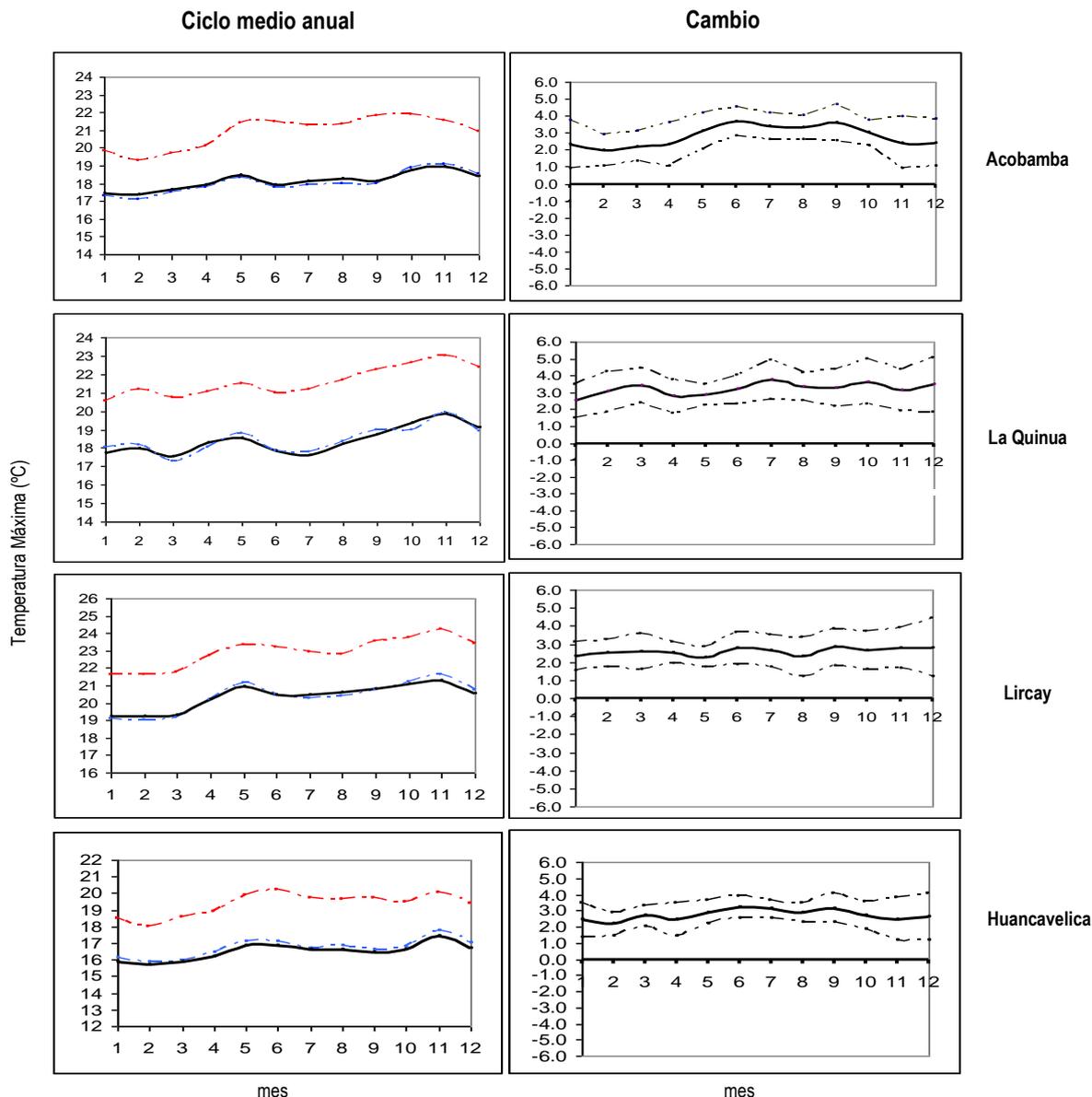


Figura N° 40. (Izquierda) Ciclo medio anual de la temperatura máxima (°C) en la cuenca del Mantaro en los dos time-slice (líneas delgadas entrecortadas en azul primer time-slice y en rojo segundo time-slice) y data histórica (línea sólida oscura). (Derecha) Cambios de la temperatura máxima entre los dos time-slice (la línea sólida) y umbrales de cambio con un 95% de confianza (líneas entrecortadas).

En la figura 40 (derecha), se observa el cambio de la temperatura máxima entre los dos time-slice el cual varía entre las bandas de 95% de confianza estimados, dicho de otro modo, el cambio esperado de la temperatura máxima fluctuaría entre esos dos límites con una probabilidad de 95%. No se aprecia variaciones estacionales importantes, es decir, el patrón de cambio de la temperatura máxima es casi uniforme durante el año; a pesar de ello, no se puede pasar por alto el ligero incremento que se observa entre invierno y primavera, en la mayoría de las estaciones. Así mismo, el límite superior del cambio podría eventualmente sobrepasar el umbral de los 5 °C en algún mes del año, particularmente en el sector norte, Jauja (SCCM) y La Quinua (SSCM).

El análisis anterior se complementa con la Tabla 26 y la figura 41 en donde se presenta los valores estacionales de la temperatura máxima para el periodo 2090-2100 y la distribución espacial de los centros de cambio reducidos o incrementados para la cuenca, respectivamente. En verano, se aprecia un mayor incremento en SNCM respecto a SSCM, mientras que en el norte de la cuenca el cambio o incremento es hasta de 3.0 °C, en el sur el cambio varía entre 2.4 - 2.9 °C. En el sector centro el cambio en verano no es uniforme, en estaciones cercanas al sector norte el cambio esperado es de 3.0 °C y en estaciones cercanas al sector sur el cambio es de 2.5 °C. Un mayor cambio sin embargo puede observarse en invierno, época en que la mayoría de las estaciones experimenta un cambio superior a los 3.0 °C, situación que se prolonga, pero en menor intensidad, hasta la primavera.

SSCM



(... continúa de la Figura 40)

Según la misma tabla y la figura 41, todo indica que el mayor cambio (>3.0°C) se producirá en SNCM, en pisos altitudinales por encima de los 4200 msnm de las provincias de Yauli (Marcapomacocha) y Pasco (Cerro de Pasco), calentamiento que será sostenido a lo largo del año. Un patrón similar lo encontramos en parte del SCCM, correspondientes a valles interandinos de Huancayo y Jauja, (≈ 3300 msnm), provincias importantes en el tema de

seguridad alimentaria por su alto rendimiento de papa a nivel nacional, en donde notamos una mayor estacionalidad, es decir, este cambio se acentúa durante el invierno y primavera. En SSCM y parte del sector centro, el área de cambio corresponde a un incremento de menor rango, pero no menos importante, ($<3^{\circ}\text{C}$), advirtiéndose además una tendencia hacia un mayor incremento en el lado occidental (partes altas de Huancavelica, límite con la región Ica), principalmente en invierno y primavera.

De todo lo anterior, podemos inferir que la tasa incremental de la temperatura máxima en la cuenca del Mantaro tendría, en promedio, un rango de 0.2°C a 0.28°C por década.

Tabla N° 26: Cambio estacional de la temperatura máxima en algunos puntos de la cuenca del Mantaro. (+/-: intervalo de variación con un 95% de confianza)

N°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	3.0	1.4	3.4	1.3	3.3	0.8	2.9	0.9
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	3.0	0.8	3.2	0.9	3.3	0.7	3.3	1.2
3	SCCM	Huayao	Huancayo	Junín	3.0	0.8	2.9	0.9	3.3	0.9	3.2	0.9
4		Jauja	Jauja	Junín	3.1	1.2	3.3	0.9	3.3	0.9	3.0	1.2
5		Laive	Huancayo	Junín	2.5	0.9	2.6	0.7	3.4	0.9	3.4	1.5
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	2.3	1.0	2.0	0.9	2.6	0.9	2.7	1.1
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	2.9	1.2	2.9	0.9	3.4	0.9	3.2	1.2
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	2.6	1.1	2.5	0.7	2.5	1.0	2.8	1.1
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	2.4	1.1	2.6	0.8	3.0	0.6	2.8	1.0
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	2.3	1.4	2.5	1.1	3.3	0.8	3.0	1.1

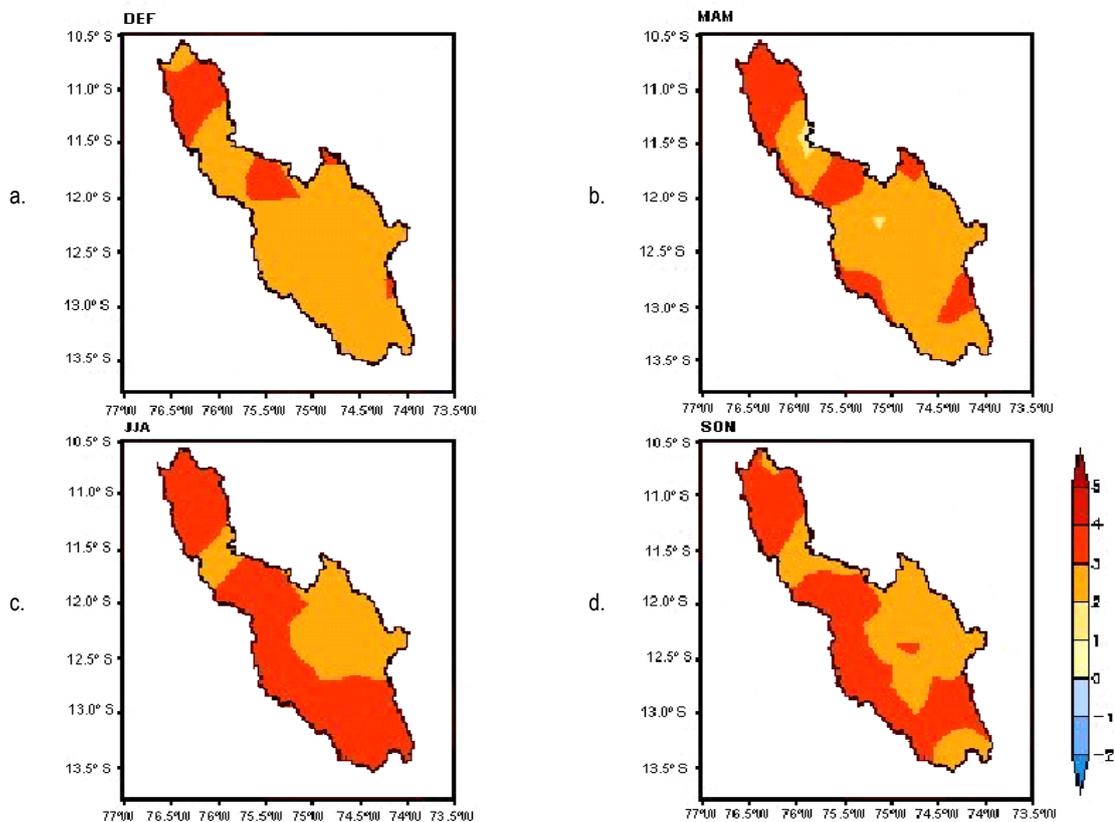


Figura N° 41. Distribución del cambio de la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del Mantaro

El escenario proyectado para finales de siglo, es coherente con la tendencia actual de la temperatura máxima anual (1965 – 2005), la misma que da cuenta de un incremento entre 0.02 y 0.04 °C año⁻¹, sin embargo, parte de los sectores norte (Cerro de Pasco) y sur (Lircay) de la cuenca actualmente experimentan una tendencia negativa entre -0.02 y -0.06 °C año⁻¹, inclusive. Considerando los cambios proyectados a nivel mundial para el presente siglo por el IPCC (2007) los cuales exceden largamente la variabilidad climática registrada en los últimos 10,000 años (incremento máximo de 6.1 °C para finales de siglo), la tendencia negativa de estas dos localidades, consistente con la tendencia positiva de algunos índice climáticos como el Tx10p (número de días fríos en el percentil 10), podría eventualmente invertirse, o acentuarse, toda vez que los cambios del clima a nivel regional están modulados en buena parte por la dinámica local.

Con la información anterior, se han confeccionado los mapas de escenario de temperatura máxima estacionales en la cuenca del Mantaro, para el periodo 2090-2100 (ver mapas en apéndice 3).

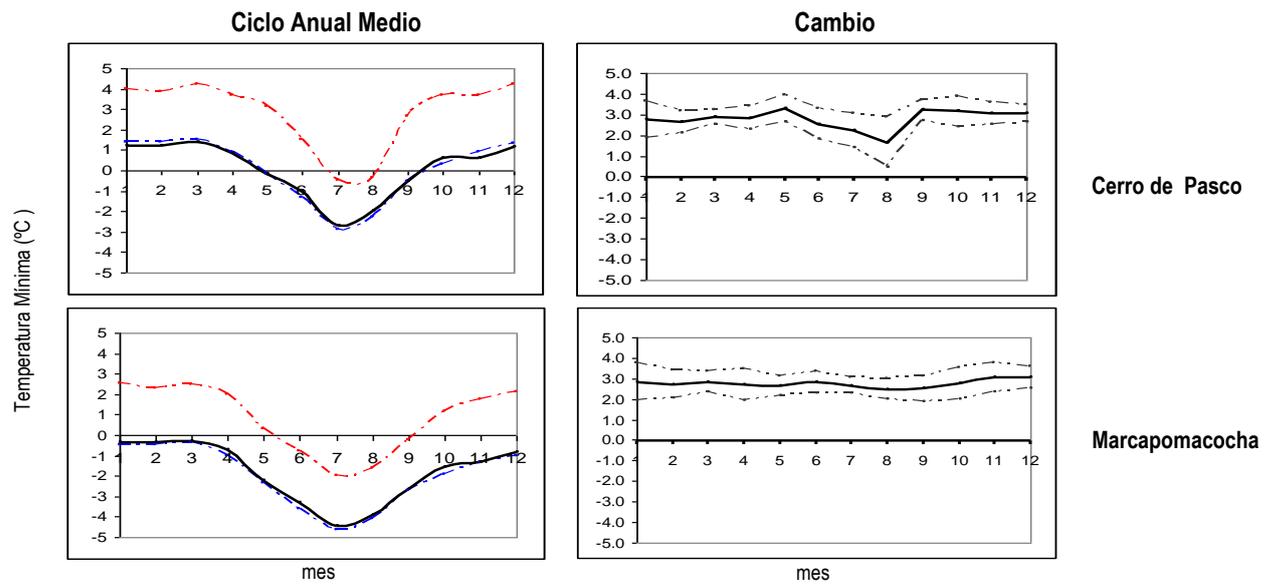
5.2.2.2 Temperatura mínima

Al igual que en la temperatura máxima, las proyecciones a largo plazo de la temperatura mínima presentarán incrementos relativamente uniformes a lo largo del año. En la figura 42, se aprecia el ciclo anual de la temperatura mínima (izquierda) y el cambio de ésta para finales del presente siglo (derecha). A diferencia de la temperatura máxima, la temperatura mínima presenta una estacionalidad más marcada lo cual es coherentemente simulado por el modelo en su primer time-slice, con una ligera subestimación en el invierno en la mayoría de las estaciones. El cambio para finales de siglo (figura 42, derecha), no muestra estacionalidad, a excepción de Cerro de Pasco en SNCM en donde el cambio es menor en el invierno. En el sector norte de la cuenca el rango del cambio varía entre 2 – 3 °C, mientras que en SCCM y SSCM los rangos del cambio varían entre 1.6 – 2.8 °C y 1.5 - 3.2 °C respectivamente; en relación a esto último, un menor rango de variación se advierte en Huancavelica (<1.7°C) principalmente entre el otoño y primavera.

En la variación estacional puntual y areal del cambio de la temperatura mínima para fines de siglo (Tabla 27 y figura 43 respectivamente), el rango de cambio predominante es de 2 - 3 °C, observándose un mayor cambio en el sector sur de la cuenca durante la primavera. Así mismo, un centro de incremento se ubica en el sector centro/norte de la cuenca, correspondiente a las provincias de Yauli y Jauja, situación que se acentúa durante el otoño y primavera.

Los incrementos proyectados de la temperatura mínima guardan preocupante relación con lo actualmente observado. En la Tabla 13 (Capítulo 3) se aprecia que la tendencia media anual es de 0.01 °C año⁻¹, acentuándose en el verano (Tabla 16), con un valor medio de 0.02 °C año⁻¹, lo cual extrapolado a finales de siglo, coincide con el incremento proyectado por el modelo. El lector debe recordar que el escenario de emisión considerado en este reporte (A1B) es el escenario de balance, en el que todas las opciones energéticas se utilizan sin que ninguna predomine sobre las otras, no obstante, investigaciones recientes en base a los escenarios de emisión extremos A2, B1 y B2 y otros AOGCM dan cuenta de un incremento promedio de 1.3 °C de la temperatura media en el verano sobre la cuenca del Mantaro para el 2050 (IGP, 2005) y un rango de variación de 3 – 7 °C en sectores ubicado por encima de los 4000 msnm en la región Arequipa, para el 2100 (Marengo et al., 2007). En el presente estudio, el rango del cambio de la temperatura mínima (figura 42, derecha) oscila entre 1.0 - 4.2 °C.

SNCM



SCCM

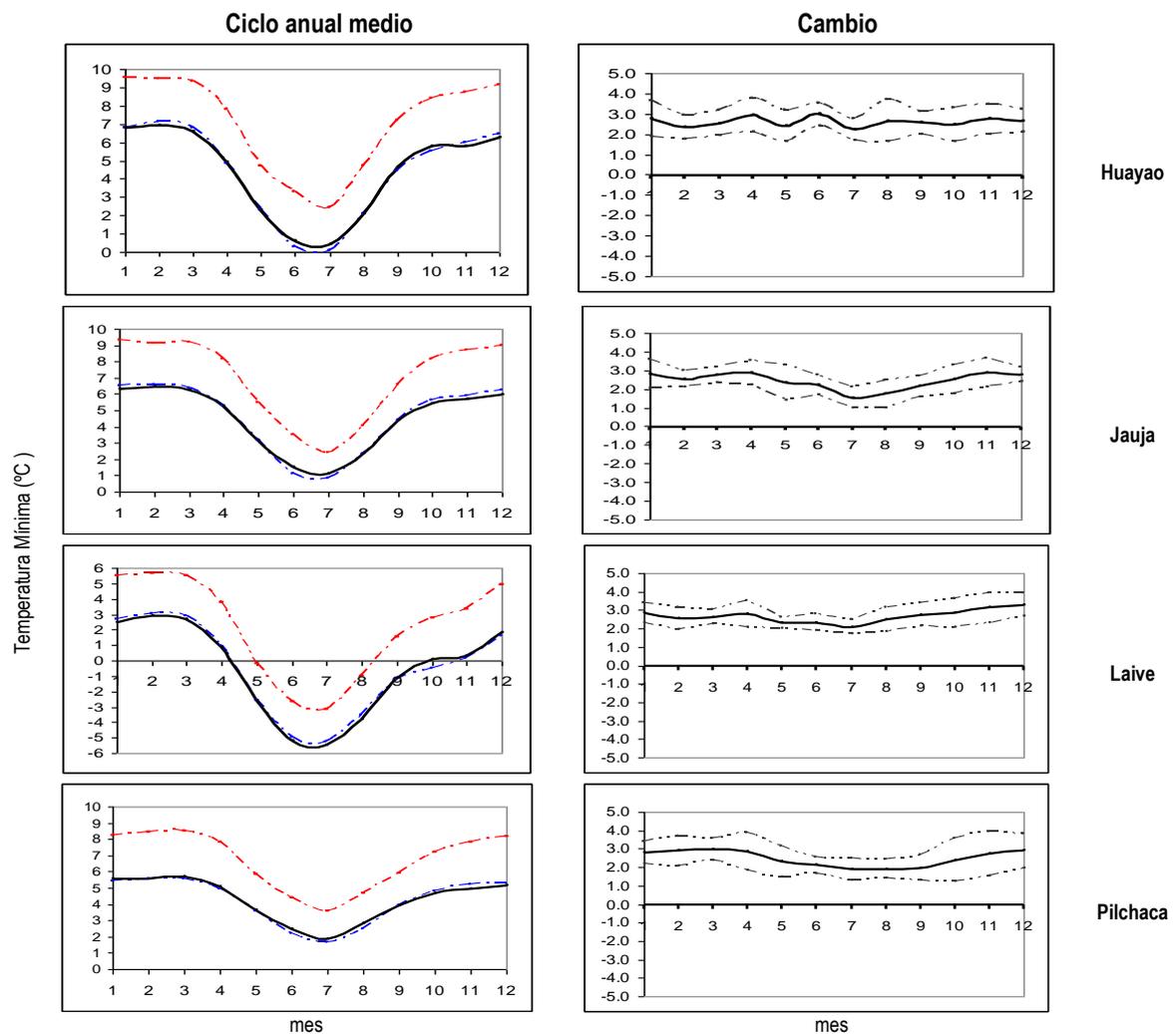


Figura Nº 42. (Izquierda) Ciclo medio anual de la temperatura mínima (°C) en la cuenca del Mantaro en los dos time-slice (líneas entrecortadas en azul primer time-slice y en rojo segundo time-slice) y data histórica (línea sólida). (Derecha) Cambios de la temperatura mínima entre los dos time-slice (la línea sólida) y umbrales de cambio con un 95% de confianza (líneas punteadas).

SSCM

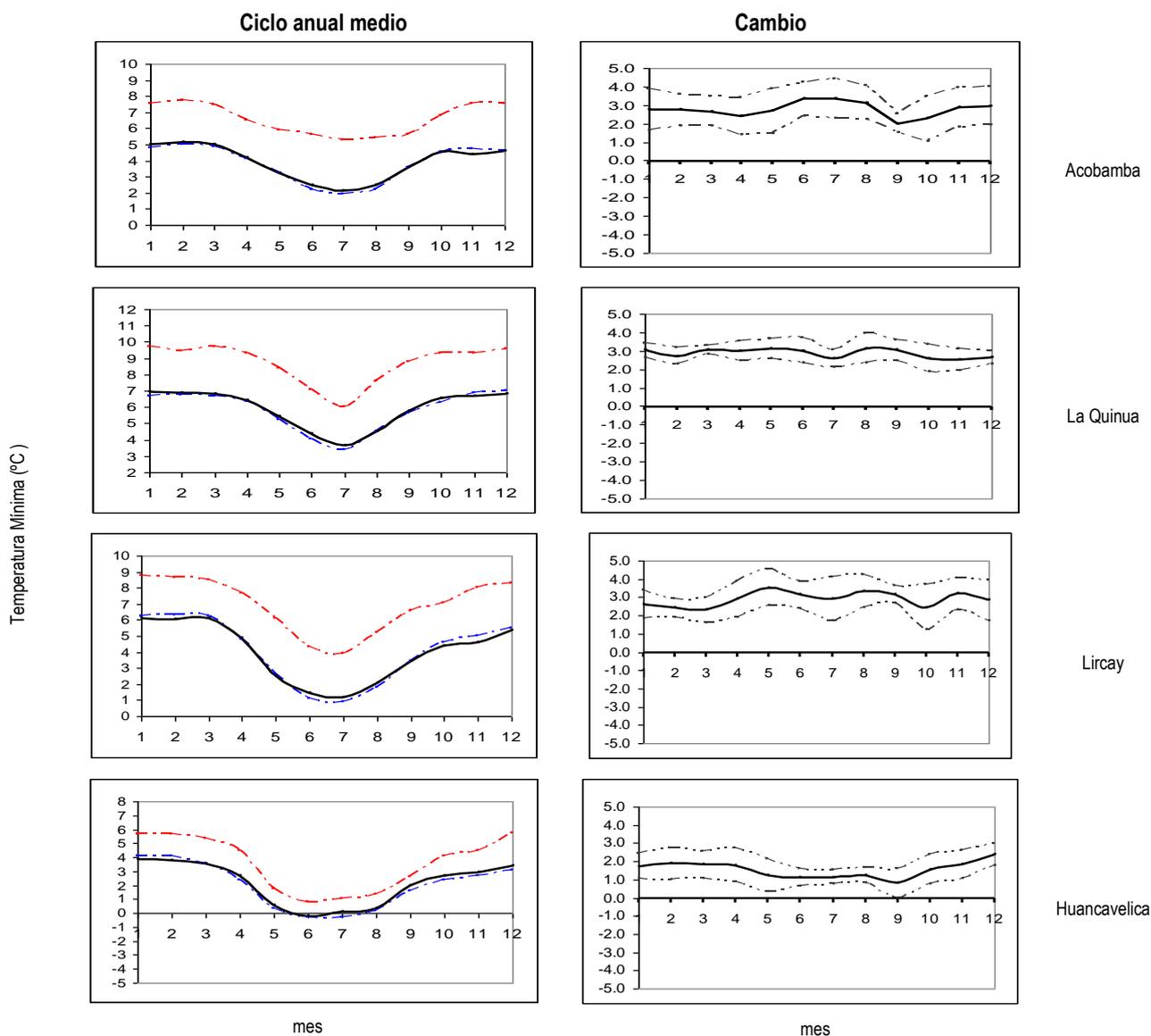


Tabla N° 27. Cambio estacional de la temperatura mínima en algunos puntos de la cuenca del Mantaro.
(+/-: intervalo de variación con un 95% de confianza)

N°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	2.8	0.6	3.0	0.5	2.0	0.6	3.0	0.6
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	2.8	0.8	2.7	0.6	2.4	0.5	2.7	0.7
3	SSCM	Huayao	Huancayo	Junín	2.7	0.6	2.7	0.7	2.5	0.7	2.7	0.7
4		Jauja	Jauja	Junín	2.9	0.5	2.7	0.7	1.6	0.6	2.6	0.7
5		Laive	Huancayo	Junín	2.9	0.6	2.8	0.5	2.3	0.5	2.9	0.7
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	2.8	0.8	2.6	0.8	1.8	0.5	2.5	1.0
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	2.6	0.4	2.8	0.4	2.7	0.9	2.8	0.6
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	2.7	0.8	3.2	0.9	3.0	1.0	3.0	0.9
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	2.2	0.7	1.7	0.8	1.3	0.5	1.5	0.8
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	2.7	1.5	2.5	1.3	3.2	1.0	2.4	1.7

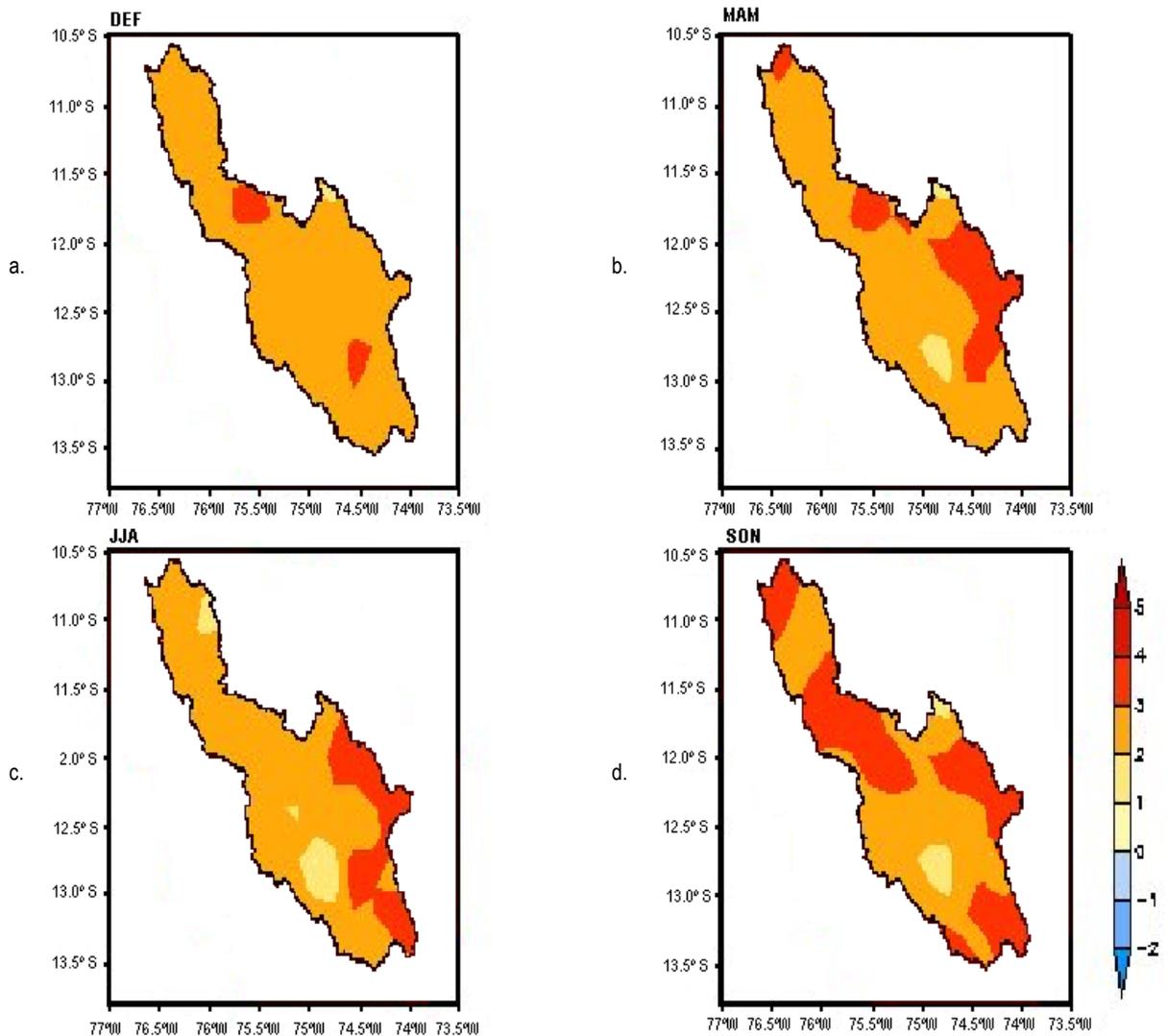


Figura N° 43. Distribución del cambio de la temperatura mínima (°C) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del Mantaro

En el contexto anterior, los cambios en la temperatura máxima y mínima en la cuenca del Mantaro proyectados para finales de siglo, vislumbran un panorama de calentamiento que podría afectar a la población en diversas formas, y la principal concierne a la seguridad alimentaria tanto de la región como de aquellas que se abastecen de ella. No debe perderse de vista el hecho de que más de un tercio de la población mayor de 15 años se dedica a la agricultura en los departamentos de Junín, Pasco y Huancavelica (ver tabla 2). Además, cultivos como la alcachofa y maíz choclo han incursionado exitosamente en años recientes sobre la margen izquierda del río, siendo las temperaturas actuales de la región propicias para su óptimo desarrollo.

En el apéndice 3 se presenta los escenarios de temperatura mínima estacionales para el periodo 2090-2100.

5.2.2.3 Precipitación

El modelo presenta un buen skill en la representación del clima actual, al simular correctamente el ciclo anual de la precipitación (figura 44, izquierda), pese a ello, en general el modelo sobrestima ligeramente los montos acumulados, situación que es más evidente durante el verano y en localidades ubicadas por encima de los 3600 msnm, como Huancavelica, Cerro de Pasco y Marcapomacocha.

En relación a lo anterior, Mizuta et al. (2006), dan cuenta de sobrestimaciones sistemáticas del modelo en la simulación de la precipitación total ²² sobre lo trópicos (tanto en verano como en invierno), lo cual está directamente relacionado con la resolución. Ocurre que cuando la resolución se incrementa, la velocidad vertical es mucho más resuelta horizontalmente, y la amplitud de la velocidad vertical es mayor respecto al tamaño de grilla. La estructura espacial de la humedad es también resuelta más claramente y el vapor de agua se satura con más facilidad en una grilla pequeña que en una más grande; el resultado: mayor precipitación como consecuencia de una mayor condensación en la grilla. Considerando que la precipitación en los trópicos, por ende en los Andes es principalmente convectiva, era de esperar del modelo tal comportamiento, sobretudo en el periodo lluvioso. En la misma figura, se percibe también una leve subestimación de la precipitación durante la primavera en algunas localidades.

La simulación del ciclo anual de la precipitación en el clima futuro o segundo time-slice (línea entrecortada en rojo), es coherente con el comportamiento observado, no obstante se espera una ligera reducción de las lluvias en verano e incrementos en primavera en los sectores norte y central, mientras que en el sector sur las lluvias se incrementarán en el verano y resto del año.

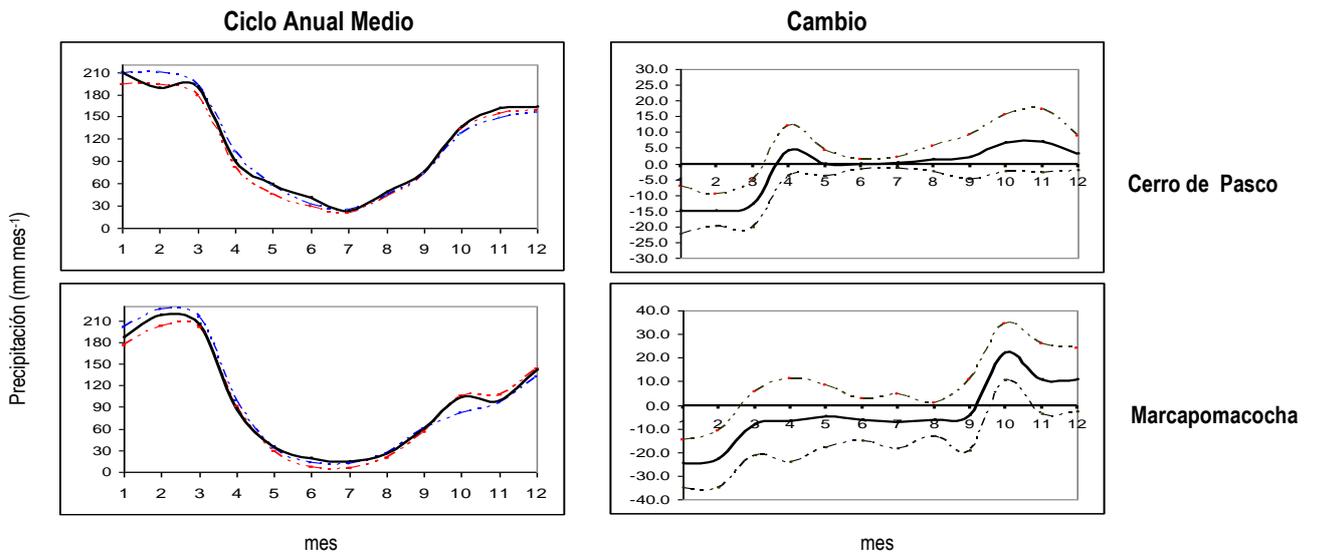
Como se aprecia en la figura 44, los cambios proyectados por el modelo para el periodo 2090-2100 son bastante heterogéneos espacialmente y conservadores, en otras palabras, los cambios estarían dentro de su variabilidad normal, aunque con un sesgo al incremento. A diferencia de las temperaturas extremas, el cambio de la precipitación (derecha) sí presenta estacionalidad, observándose un incremento de lluvias en el sector sur de la cuenca entre 5% y 10% en el verano, hasta 8% en otoño, de 6% a 14% en primavera y sin cambios significativos en el invierno, excepto en Acobamba (Región Huancavelica a 3236 msnm) donde se espera una reducción del 13 %.

En el sector centro de la cuenca, sector donde se ubica la subcuenca del Shullcas que se alimenta de los deshielos del nevado Lasuntay a 5720 msnm (Cordillera de Huaytapallana), se proyecta una reducción de lluvias en el verano de aproximadamente 5% (Huancayo) y 16% (Jauja), tendencia que se mantiene en parte del otoño, no se esperan cambios importantes en invierno y en primavera se espera un incremento del orden de 3 a 14%.

En Pilchaca (3570 msnm), localidad cercana al sector sur de la cuenca, pero dentro del dominio del sector central, los cambios esperados indican un ligero incremento de lluvias a lo largo de todo el año (excepto en invierno; -14%), comportamiento acorde con lo proyectado precisamente para el sector sur de la cuenca.

²² Precipitación total: suma de la precipitación convectiva y de gran escala

SNCM



SCCM

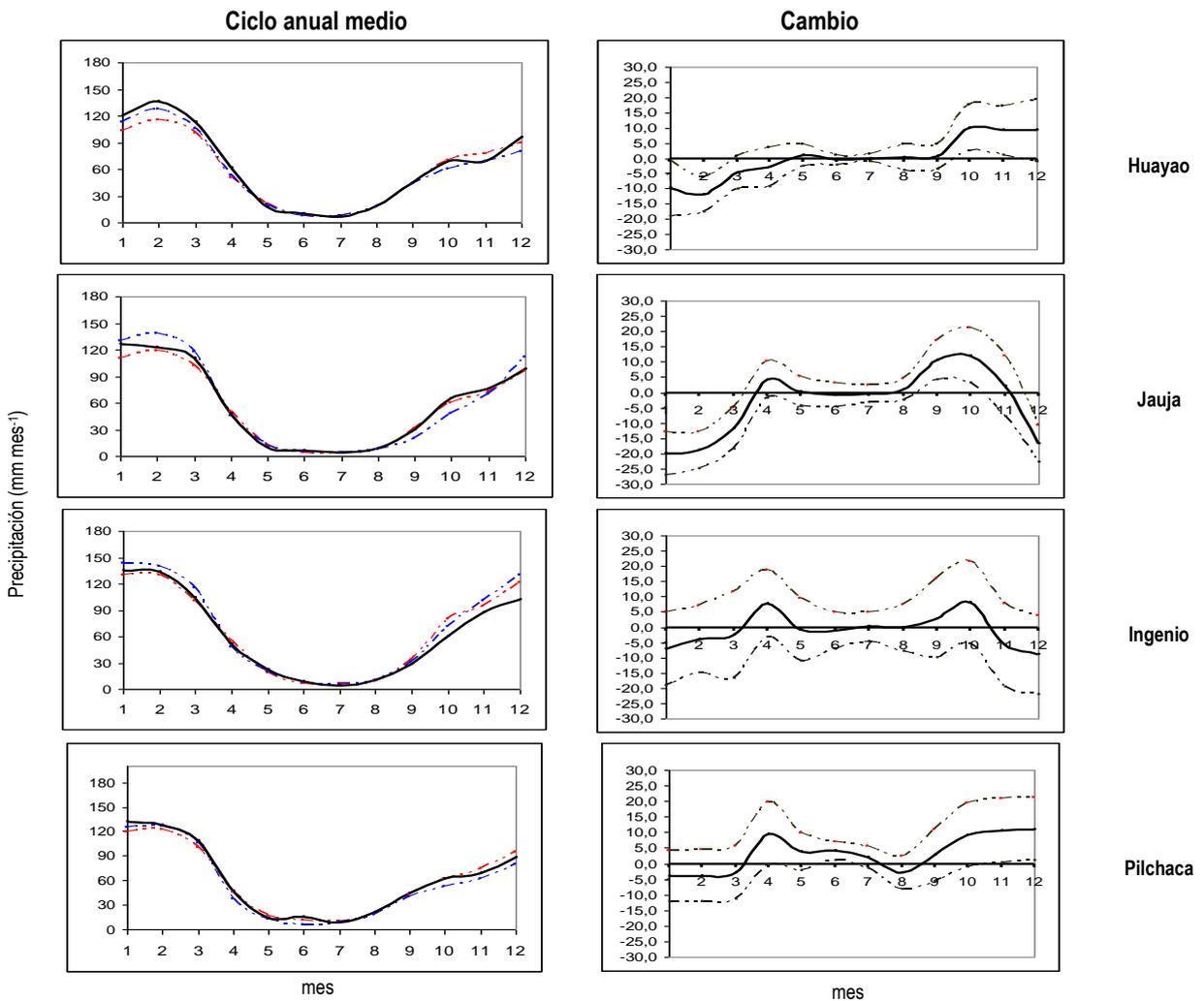
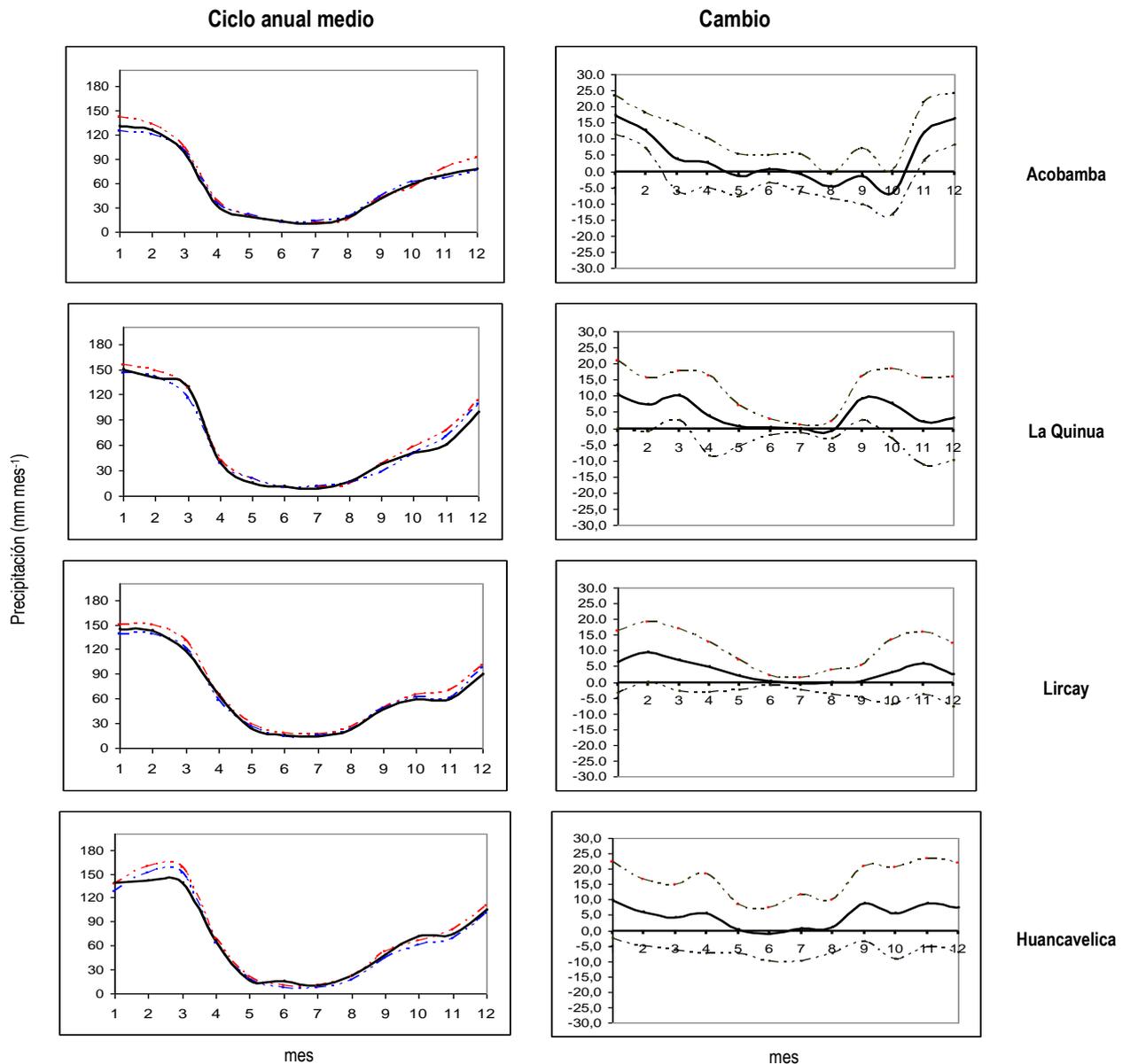


Figura N° 44. (Izquierda) Ciclo medio anual de la precipitación (mm mes⁻¹) en la cuenca del Mantaro en los dos time-slice (líneas entrecortadas en azul primer time-slice y en rojo punteado segundo time-slice) y data histórica (línea sólida). (Derecha) Cambios en la precipitación en los dos time-slice (la línea sólida) y umbrales de cambio con un 95% de confianza (líneas punteadas).

SSCM



(... continúa de la Figura 44)

En el sector norte de la cuenca, en localidades ubicadas por encima de los 4200 msnm como Marcapomacocha (Junín) y Cerro de Pasco (Pasco), la disminución de lluvias en el verano será de alrededor de 6%, situación que se prolongará hasta el otoño (5%). En invierno, no se esperan cambios importantes en Cerro de Pasco, sin embargo, en Marcapomacocha se estima que la reducción de lluvias será del orden de 35%, si a ello superponemos un escenario más cálido en el que las temperaturas extremas se incrementarán entre 2.5 °C y 3.3 °C para finales de siglo sobre este sector, estaríamos frente a una zona altamente vulnerable a los cambios del clima en el mediano o largo plazo. Estos resultados se tornan más consistentes, al ser contrastados con los resultados encontrados por Marengo et al. (2007) en un estudio de escenarios climáticos sobre Arequipa, ellos encontraron que para fines de siglo, los pisos altitudinales por encima de los 4000 msnm experimentarán un aumento significativo de la temperatura por encima de los 5°C inclusive, además de una reducción de las lluvias del orden de 2-3 mm día⁻¹ (en un escenario pesimista de emisión), previéndose el crecimiento de los denominados “desiertos altoandinos” con la consecuente afectación sobre la ganadería de la puna y la agricultura en los valles interandinos.

En relación a lo anterior, la proyectada reducción de lluvias en el largo plazo en los sectores norte y centro de la cuenca son particularmente consistentes con el incremento del número de días secos consecutivos y la disminución de días de precipitación máxima que se viene observando actualmente en ese sector (Capítulo IV). Específicamente en el caso del sector norte, los datos históricos revelan una tasa de decrecimiento altamente significativa de hasta 28 mm año⁻¹ (4.5 a 7 mm año⁻¹), mientras que en el sector central la tasa de decrecimiento 2.5 mm año⁻¹. En el sector sur, la tendencia observada indica una reducción de lluvias, principalmente entre Acobamba, Lircay y La Quinua, situación que es opuesta a lo proyectado para fines de siglo, mientras que en Huancavelica y sector suroccidental la tasa de incremento de 5 mm año⁻¹, es consistente con lo proyectado para finales de siglo.

En la Tabla 27 y figura 45, se aprecia con mayor claridad las áreas de mayor y menor cambio de la precipitación que se discute líneas arriba. En el apéndice 3 se presenta los escenarios de precipitación estacionales para el periodo 2090-2100.

Tabla N° 27: Cambio estacional de la precipitación (porcentual y en mm) en algunos puntos de la Cuenca del río Mantaro.

°	Sector	Estación	Provincia	Región	DEF (%)	(mm)	MAM (%)	(mm)	JJA (%)	(mm)	SON (%)	(mm)
1	SNCM	Cerro de Pasco	Pasco	Pasco	-5	-27,0	-3	-9,0	1	2,0	4	15,0
2		Marcapomacocha	Yauli	Junín	-7	-38,0	-6	-20,0	-35	-20,0	11	29,0
3	SCCM	Huayao	Huancayo	Junín	-4	-13,0	-4	-7,0	-1	-0,5	11	19,0
4		Jauja	Jauja	Junín	-16	-56,0	-5	-8,0	-3	-0,5	14	24,0
5		Ingenio	Huancayo	Junín	-6	-21,0	2	4,0	-7	-2,0	3	5,0
6		Pilchaca	Huancavelica	Huancavelica	4	14,0	9	15,0	-14	-6,0	5	8,0
7	SSCM	La Quinua	Huamanga	Ayacucho	5	20,0	8	14,0	-3	-1,0	14	19,0
8		Lircay	Angaraes	Huancavelica	5	18,0	7	14,0	-2	-1,0	6	9,0
9		Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	6	23,0	5	10,0	2	1,0	12	23,0
10		Acobamba	Acobamba	Huancavelica	10	23,0	2	3,0	-13	-5,0	-1	-2,0

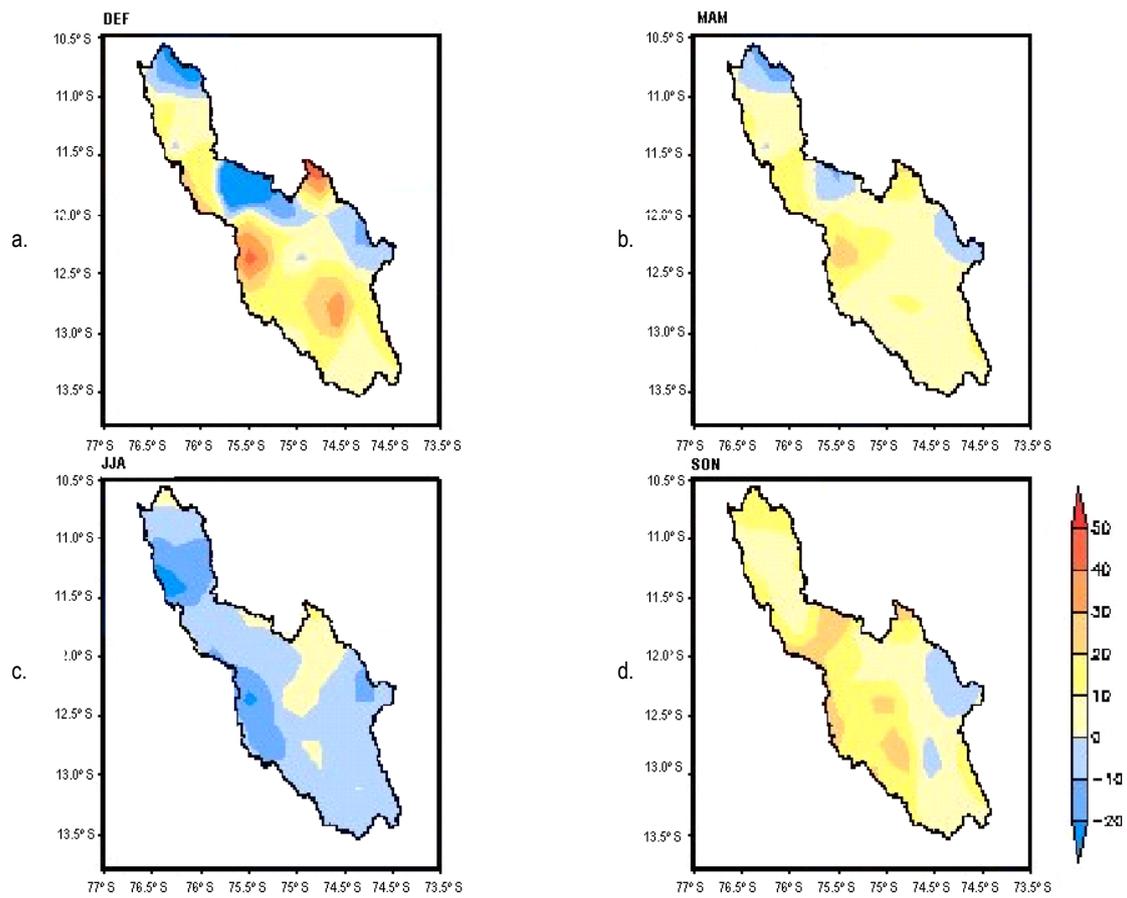


Figura N° 45. Distribución del cambio de la precipitación (mm) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del Mantaro.

CAPITULO 6

RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente estudio se desarrolló para apoyar los esfuerzos regionales (Ecuador, Bolivia y Perú) en el propósito de definir medidas de adaptación y alternativas de políticas que enfrenen los impactos previstos del cambio climático, así como implementar actividades de adaptación piloto de alta prioridad en cuencas prioritarias, en el marco del Proyecto de Adaptación al Retroceso Acelerado de los Glaciares en los Andes Tropicales. En el caso de Perú, el área de interés corresponde a las cuencas de los ríos Mantaro y Urubamba; en el primer caso, específicamente en la subcuenca glaciar del Shullcas (vertiente izquierda del río Mantaro, en las proximidades de la Cordillera de Huaytapallana), que involucra a los distritos de Huancayo y El Tambo; anexos Uñas, Vilcacoto, Cullpa Alta, Cullpa Baja, Cochab Chico, Cochab Grande, Incho Aza y Acopalca, que en conjunto representan una población de 700,000 habitantes en un área de aproximadamente 232.52 Km².

La construcción de los escenarios de precipitación y temperaturas máxima y mínima, se basaron en las salidas del modelo japonés de alta resolución en el contexto del escenario de emisión A1B del IPCC. Previamente se determinaron índices climáticos y tendencias actuales con datos climáticos observados en 14 estaciones meteorológicas, con un record promedio de 40 años; así como una aproximación del caudal en un sector del río Mantaro para el año 2035. Cuenta además con la experiencia del equipo de trabajo del Centro de Predicción Numérica del SENAMHI en la generación de escenarios climáticos en las cuencas de los ríos Piura y Santa (PROCLIM, 2005), y la permanente participación del Servicio²³ en estudios relacionados con el tema de cambio climático. Las conclusiones del presente estudio son las siguientes:

1. En relación al diagnóstico del clima actual.

- La información histórica observada revela un incremento sostenido de las temperaturas extremas (máxima y mínima) anuales desde 1965, del orden de 0.01 a 0.02 °C año⁻¹ en promedio, lo cual es consistente con la tendencia positiva del índice de días y noches calientes, observado principalmente en las regiones altoandinas de los sectores norte (Marcapomacocha) y central (Pilchaca) de la cuenca. No obstante algunas localidades como Jauja, Lircay y Cerro de Pasco, actualmente presentan una tendencia de decrecimiento de la temperatura máxima del orden de 0.02 - 0.06 °C año⁻¹, además de un incremento del índice de rango diurno e incremento del número de días fríos para el caso de Jauja y Lircay respectivamente.
- La tendencia de las precipitaciones en los últimos 40 años no es uniforme y es espacialmente diferenciada, presentando una tendencia decreciente en el sector norte de la cuenca entre 14 – 28 mm año⁻¹. La señal de esta aparente disminución de las precipitaciones en los últimos 40 años es más evidente en verano y tiene consistente coherencia con la significativa reducción del número de días húmedos consecutivos y la disminución de la intensidad de las lluvias. También es decreciente la tendencia en el sector central pero menos acentuada que el norte y una mezcla de ambos en el sector sur de la cuenca, siendo el lado suroccidental de este sector

²³ SENAMHI es sede del Simposio del APCC 2008 (APEC Climate Center) en el tema de cambio climático, en el marco del Encuentro de Líderes del Asia-Pacific Economic Cooperation – APEC.

(Huancavelica y Huancalpi) el que experimenta en los últimos años un incremento entre 5 – 8 mm año⁻¹. La señal de este aparente incremento de las precipitaciones en los últimos 40 años en este sector de la cuenca, es más evidente en verano y es consistente con el incremento de las precipitaciones extremas (muy intensas).

- El comportamiento anual de las heladas en los últimos 30 años presenta una tendencia decreciente en gran parte de la cuenca, es decir, hay una reducción del número de días con helada lo cual es más significativo en el sector norte de la cuenca (Marcapomacocha y Acobamba), opuestamente Jauja presenta una tendencia de incremento del número de días con heladas. La mayor frecuencia de temperaturas menores de 0 °C (heladas) se presenta en invierno con una frecuencia de 10-25 días por mes en el sector central y sur de la cuenca, mientras en el sector norte la frecuencia es de 22-30 días por mes. En el verano la frecuencia es menor a excepción de Marcapomacocha y Cerro de Pasco que presentan una frecuencia de 15 días por mes. Las localidades de Pilchaca, Huancalpi, Lircay y La Quinua presentan una menor frecuencia de heladas durante el año, no superando los 10 días por mes durante el invierno.
- Desde la década de los ochenta, las lluvias presentan un comportamiento irregular con situaciones de sequías y deficiencias moderadas en la cuenca, que incluso se han presentado consecutivamente por cuatro años (Acobamba). Las sequías y deficiencias moderadas significativas a nivel de toda la cuenca se han presentado en los periodos lluviosos que corresponden a los años 1965/66, 1968/69, 1991/92 y 1994/95, siendo la más intensa la de 1991/92 la cual tuvo una duración de dos años consecutivos a nivel de cuenca, le sigue la sequía de 1994/95 que también tuvo una duración de dos años pero su segundo año presentó sequías en forma localizada. Los periodos húmedos intensos y frecuentes se han presentado en toda la cuenca entre 1969 y 1990, a partir de los noventa la frecuencia de periodos húmedos ha disminuido en gran parte de la cuenca.
- Las correlaciones obtenidas, nos indican que gran parte de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca está asociada a la variabilidad interanual (Niño) y que esta zona está complementada con la intraestacional. Durante un año Niño, los sectores centro y sur de la cuenca presentan precipitaciones menores a sus valores normales, mientras que en el sector norte las precipitaciones tienden a ser normales.

2. En relación a la tendencia del caudal del río Mantaro.

- Los caudales generados para el periodo 2008-2035 a partir de la estación hidrológica de control La Mejorada, se presentarían dentro de sus valores normales, no obstante, el periodo 2029-2035, serían mayormente años secos para el tramo central-sur del río Mantaro. Por otro lado existe la posibilidad que se presente entre 1 a 3 años normales pero en ningún caso años húmedos.

3. En relación al clima para el 2090-2100.

Las proyecciones del clima en la cuenca del Mantaro al 2100 se resumen de la siguiente manera: Un progresivo incremento de las temperaturas máxima y mínima en toda la cuenca, con valores promedio de 2.7 °C y 2.3 °C respectivamente con respecto al clima actual; reducción de las precipitaciones durante el verano e invierno en los sectores norte y centro principalmente, así como un incremento generalizado en primavera, aunque con mayor incidencia en el sector sur de la cuenca.

Del análisis estacional, las conclusiones son las siguientes:

- En el caso de la temperatura máxima, el cambio fluctúa entre 2.5 – 3.1 °C en verano; en otoño el incremento varía entre 2.0 – 3.3 °C; en invierno el cambio es mayor y generalmente es por encima de los 3.0 °C y en primavera el cambio fluctúa entre 2.7-3.4 °C. Se estima además que estos cambios serán más acentuados durante el invierno y primavera y en regiones ubicadas por encima de los 4000 msnm del sector norte de la cuenca, no obstante una actual tendencia de decrecimiento como el que presenta Cerro de Pasco; así mismo, en las proximidades de la subcuenca glacial del Shullcas (sector central de la cuenca) en pisos altitudinales por encima del los 3300 msnm.
- El rango de variación proyectado de la temperatura mínima es de 2.2 – 2.9 °C en verano y de 1.7 - 3.0 °C en otoño, dicho cambio será más acentuado sobre los sectores centro y norte; en el invierno el incremento varía en un rango mayor a los anteriores, éste fluctúa entre 1.3 – 3.0 °C, siendo el sector sur el que experimentará un mayor cambio; en primavera el cambio es del orden de 1.5 – 3.0 °C y es más acentuado en el sector norte y sur. Es necesario puntualizar, que en medio de una panorama de incremento sostenido de la temperatura mínima, es la ciudad Huancavelica la que presenta un menor cambio en relación a lo proyectado en el resto de la cuenca (1.3 – 2.2 °C), en contraposición con Lircay y Cerro de Pasco que presentan el máximo cambio (2.8 – 3.0 °C).
- En lo que respecta a las precipitaciones, los cambios en el largo plazo no son uniformes en toda la cuenca. En verano se esperan leves incrementos en el sector sur del orden de 5 – 10% en relación al clima actual, y de leves a moderadas reducciones en los sectores norte y centro de la cuenca del orden de 5 – 16%, siendo éstas más acentuadas en el sector centro, próximo a la subcuenca del Shullcas. En otoño se espera un cambio similar al descrito en verano pero en menor proporción. En invierno no hay variaciones importantes excepto en pisos altitudinales encima de los 4000 msnm del sector norte, donde se espera una reducción de las lluvias de hasta un 35%. En primavera se proyecta un incremento generalizado en toda la cuenca del orden de 3 – 14%, aunque algo superiores en el sector suroccidental y central (12 – 14%).
- Superponiendo los escenarios antes mencionados, se prevé que las zonas más vulnerables de la cuenca corresponden a los sectores próximos a la subcuenca del Shullcas y a las partes altas del sector norte de la cuenca, en otras palabras, el calentamiento y reducción de lluvias se manifestarán más explícitamente en estos dos sectores, ubicados encima de los 4000 msnm. En contraposición a ello, el sector sur y suroccidental podría eventualmente presentar problemas de exceso de lluvias.

Recomendaciones

Considerando que las series históricas son relativamente cortas para estudios de cambio climático, y que además existen incertidumbres inherentes al modelo y a las proyecciones climáticas de muy largo plazo, los resultados del presente estudio deben ser tomados como una aproximación del clima futuro. Es importante tener en cuenta que este es el primer trabajo realizado sobre cuencas alto andinas en Sudamérica con un modelo global de altísima resolución, que ha demostrado una habilidad sin precedentes en la simulación del clima actual de las cuencas estudiadas. Sugerimos al lector tomar en cuenta los intervalos de confianza del cambio proyectado para fines del siglo, así mismo, considerar que estos escenarios climáticos se contextualizan *sólo en el escenario de emisión A1B*, escenario en el que todas las opciones energéticas se utilizan sin que ninguna predomine sobre las otras, siendo la principal asunción la duplicación de las emisiones de CO₂ al año 2100.

CAPITULO 7

BIBLIOGRAFIA

- Avalos, G., 2005: Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta/SENAMHI durante periodos secos y lluviosos. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. 98 pp., UNALM.
- Avalos, G., 2007: Projected Climate over the central Andes Countries caused by Global Warming. En Vergara, W., Perez, E., Méndez, J., Magaña, V., Martínez, M., Ruiz, F., Avalos, G., Palacios, Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the Application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, The World Bank, Washington DC. Pp. 61-81.
- Australian Bureau of Meteorology, Drought Review, Number 249, 1992.
- Bengtsson, L., M. Botzet and M. Esch, 1996: Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, 48A, 57–73.
- Beniston, M., 2000: Environmental change in mountains and uplands. Eds. Oxford University Press, USA, 172 pp.
- Cholaw, B., Cubash, U., y Hagemann, S. 2003: Impacts of global warming on changes in the East Asian monsoon and the related river discharges in a global time-slice experiment. *Clim. Res.* 24: 47-57 pp.
- Cubash, U., Waskewitz J., Hegerl G. y Perlwitz J. 1995: Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change* 31:273-304.
- Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Peterson, T. 2002: Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the twentieth century. *Clim Res.* 19: 193-212.
- Garreaud, R. D., Aceituno, P., 2007: Atmospheric circulation over South America: Mean features and variability. Chapter 2 in *The Physical Geography of South America*. Eds. Oxford University Press.
- Hulme, M., Lu, X., 2000: How to factor interannual climate variability into Climate Scenarios. A note prepared for the DETR Fast-Track Impacts Group.
- IGP, 2005: "Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro" Vol. I, II y III.
- IPCC, 2001: Tercer Informe de Evaluación. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J. T. Houghton et al. Eds., Cambridge University Press, UK, 881 pp.
- IPCC, 2007: Cuarto Informe de Evaluación. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Alley, R. et al. Eds., Cambridge University Press, UK.
- Kamiguchi, K. et al., 2005: Changes in precipitation-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. SOLA, submitted.
- Kendall, M.G., 1975: "Rank correlation methods", 4th Ed., Charles Griffin, London.
- Kousky, V., Higgins, R., 2007: An Alert classification System for Monitoring and Assessing the ENSO Cycle. *Weather and Forecasting*. 22, 353 -371.
- Kusunoki, S. et al., 2005: Change of Baiu in global warming projection by an atmospheric general circulation model with 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Japan*. Submitted.
- Lenderink G.; Buishand A. y Deursen W., 2007: Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(3), 1145-1159.

- Lenters, J., Cook, K., 1997: On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 656-677.
- Lenters, J., Cook, K., 1999: Summertime Precipitation Variability over South America: Role of the Large-Scale Circulation. *Monthly Weather Review*, 127, 409 – 431.
- Mann, H.B. (1945): “Non-parametric test against trend”. *Econometrica*, 13: 245-249.
- Marengo, J., Obregón, G. y Valverde, M., 2007: Elaboración de escenarios climáticos para la Región Arequipa. “Medidas Piloto de Adaptación al Cambio Climático en el Perú”. GTZ.
- Mizuta, R. et al., 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model –mean climate states- *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165-185.
- Montecinos, A., Díaz, A., Aceituno, P., 2000: Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America based on Tropical Pacific SST. *Journal Climate*, 13, 746 -758.
- Nobre, P., Marengo, J., Cavalcanti, I., Obregón, G., Barros, V., Camilloni, I., Campos, N., Ferreira, G., 2006: Seasonal to Decadal Predictability and Prediction of South American Climate. *J Climate*, 19, 5988 – 6004.
- Noda, A., Kusunoki, S. y Yoshizaki, M. 2006: Development of Super High Resolution Global and Regional Climate Models. *Atmospheric and Oceanic Simulation*, Cap. I.
- Satyamurty, P., C. Nobre, 1999: South America. *Meteorological Monograph*. Vol. 27, 49. 119-139.
- SENAMHI, 1988: Mapa de Clasificación Climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. Senamhi Perú, 50 pp.
- SENAMHI, 2005: Climate change scenarios in Peru to 2050: Piura river basin, por Rosas G., Díaz A., Avalos G., Oria C., Acuña D., Cornejo A., Metzger L., Fano G., Carrillo M., Miguel R. Eds. Senamhi Perú, 170 pp.
- SENAMHI, 2004: Tendencia de la precipitación en la cuenca hidrológica del Lago Titicaca. Díaz, P. A., 20 pp
- SENAMHI - MINAG, 2005: Atlas de Heladas. Huamaní, J. C., 37 pp.
- SENAMHI, 2007: Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100. Autores: Rosas G., Avalos G., Díaz A., Oria C., Acuña D., Metzger L. y Miguel R. Eds. Senamhi Perú, 124 pp.
- SET y L.T. Asociado, 2005: “Estudio Definitivo de Suministro de Energía Eléctrica en 60 kV para Huancayo Este.
- Takahashi, K., 2005: Downscaling estadístico de la precipitación en la cuenca del Mantaro. 17 pp.
- Valiente, O.M., 2001: “Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación”. *Invest. Geog.*, 26:59-80.
- Vuille, M., 2007: Climate change in the Tropical Andes – Impacts and consequences for glaciation and water resources. Part I, II and III. A report for CONAM and the World Bank.
- Uchiyama, T. et al., 2005: Changes in temperature-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. SOLA, submitted.
- Walter International, vol.10: 111-120.
- Whilite, D.A y Glantz, M.H., 1985: “Understanding the drought phenomenon: the role of definitions”.

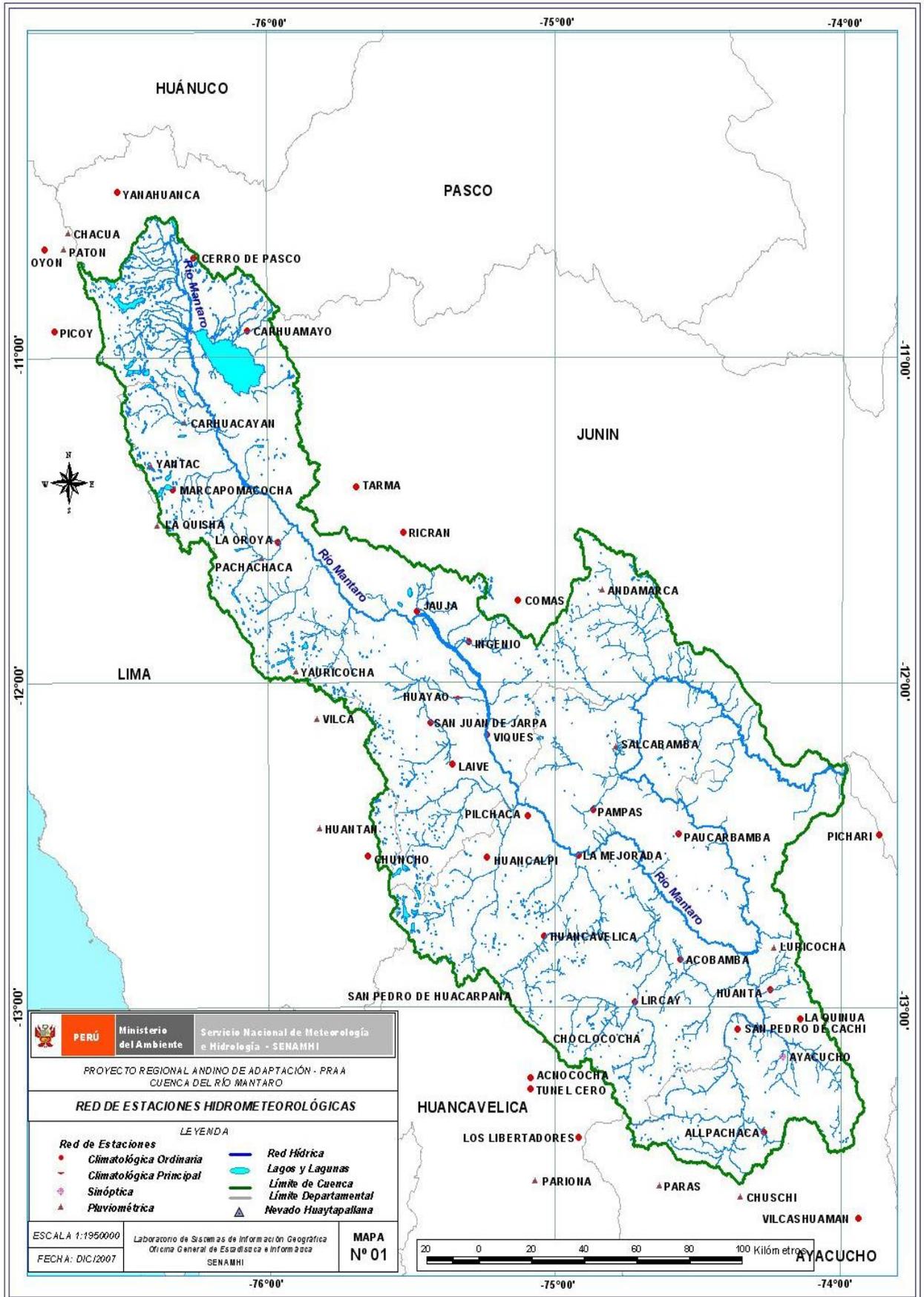
Páginas Web consultadas

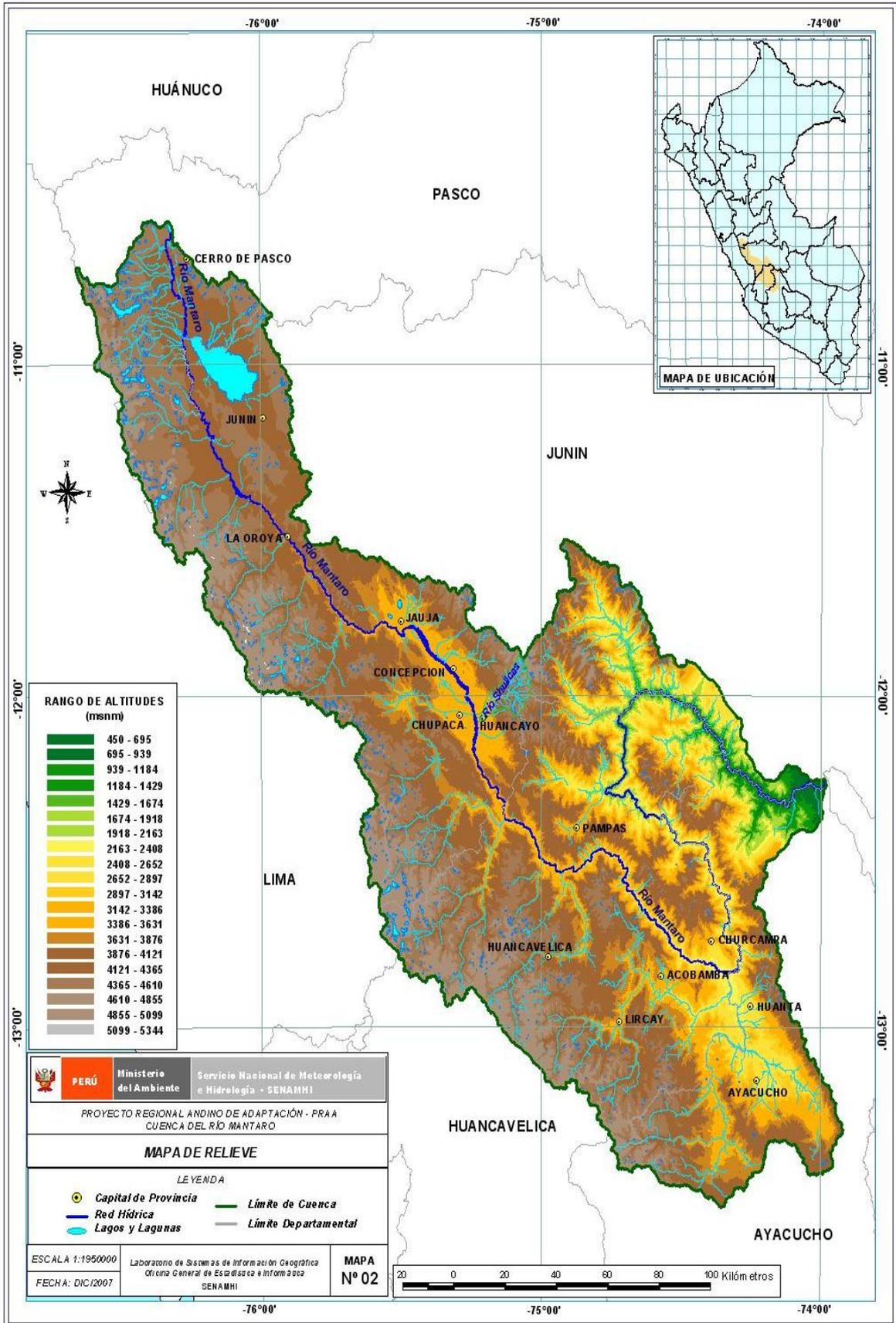
- <http://www.met.inf.cu/sequia/amigo.asp> Proyecto Friend Amigo Eventos hidrológicos mínimos (Sequías):
- http://sepiensa.org.mx/contenidos/2005/calenta/calentamiento_1.htm
- http://www.distriluz.com.pe/electrocentro/01_empresa/resena.html
- <http://www.sumaqperu.com.pe>
- <http://www.lennotech.com/greenhouse-effect.html>
- <http://www.ipcc.ch>

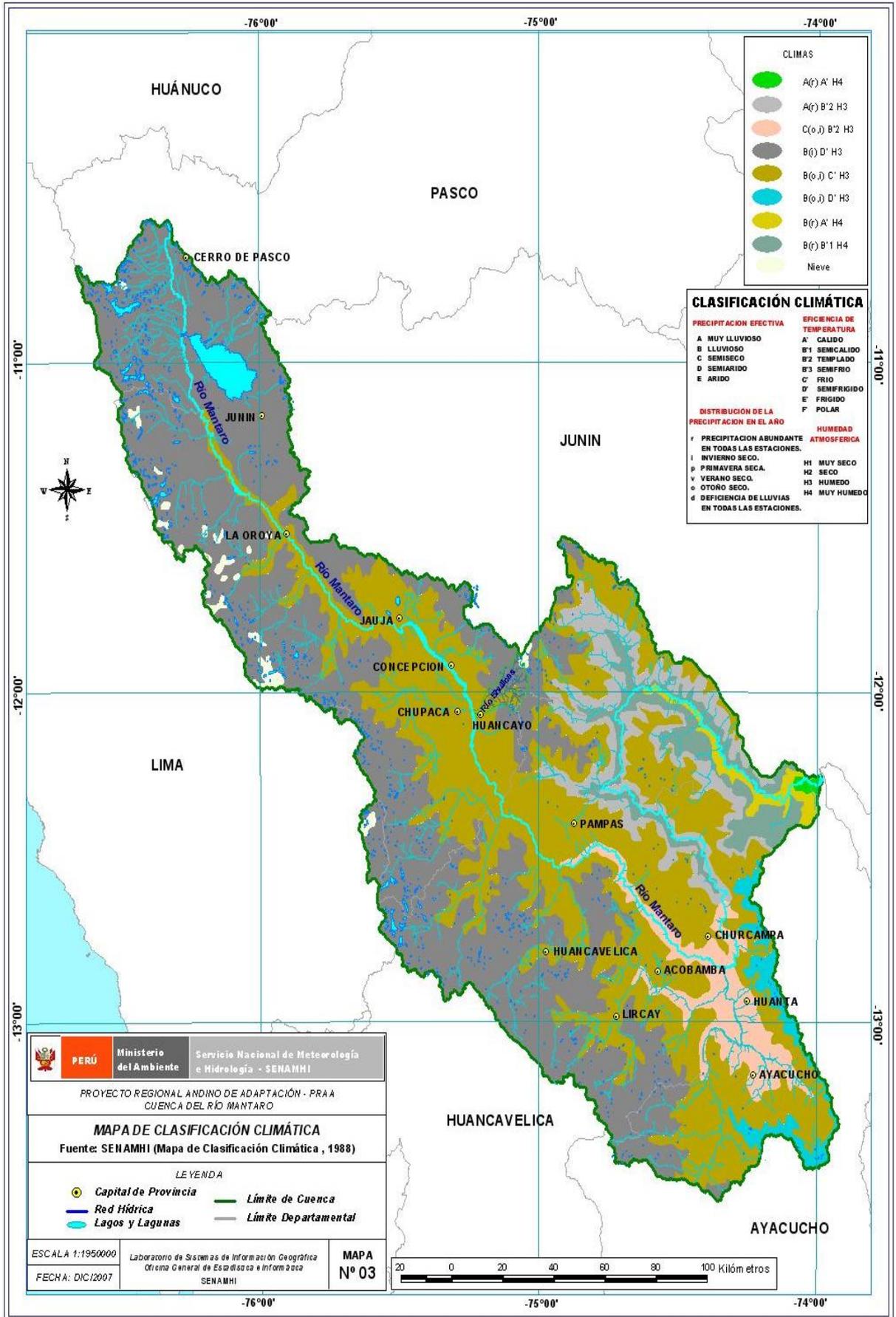
APENDICE 1

Red hidrometeorológica, Mapas de relieve y clasificación climática

- Mapa 01: Distribución hidrometeorológica de la cuenca del Mantaro
- Mapa 02: Relieve de la cuenca del Mantaro
- Mapa 03: Clasificación Climática de la cuenca del Mantaro



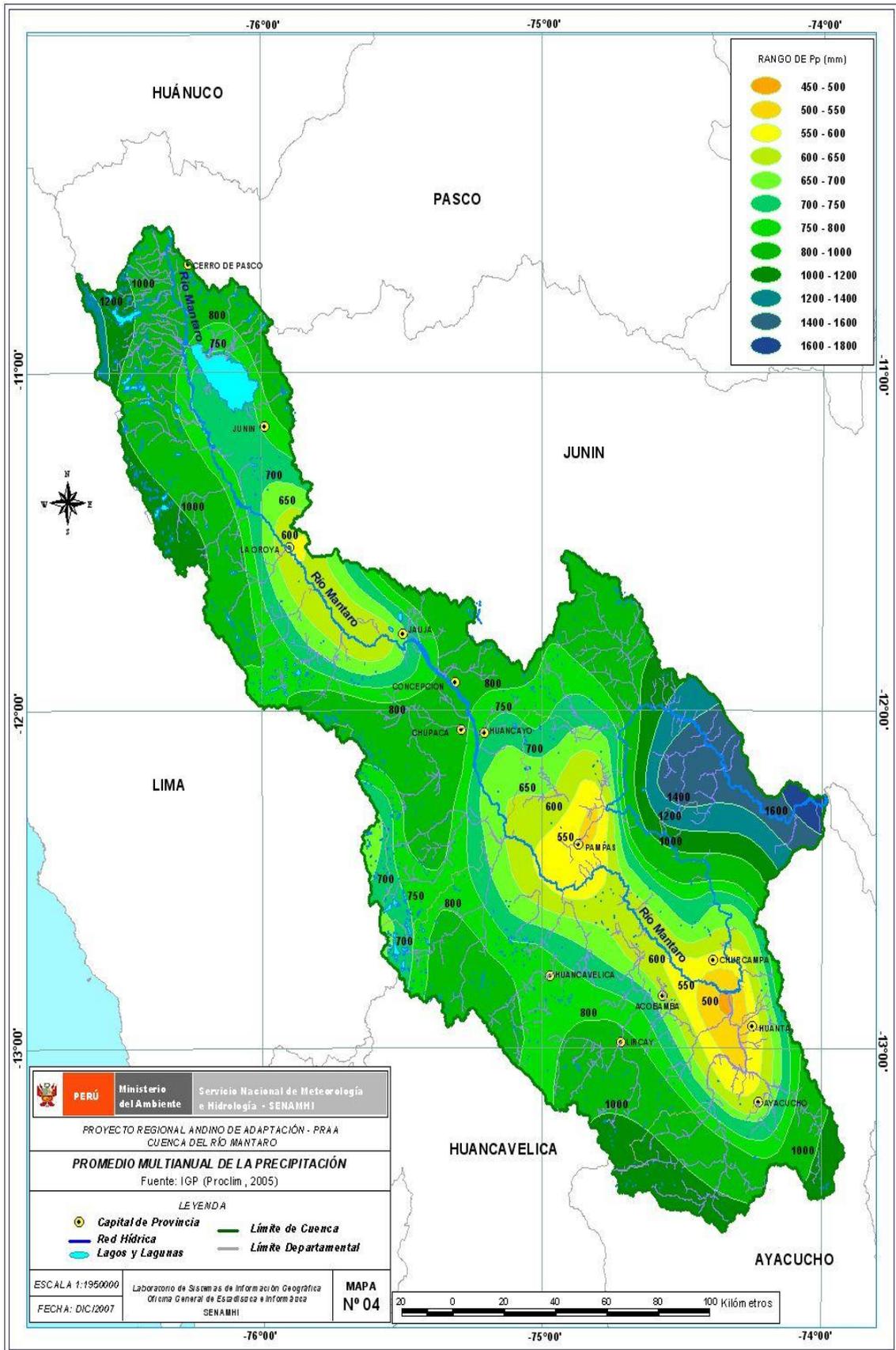


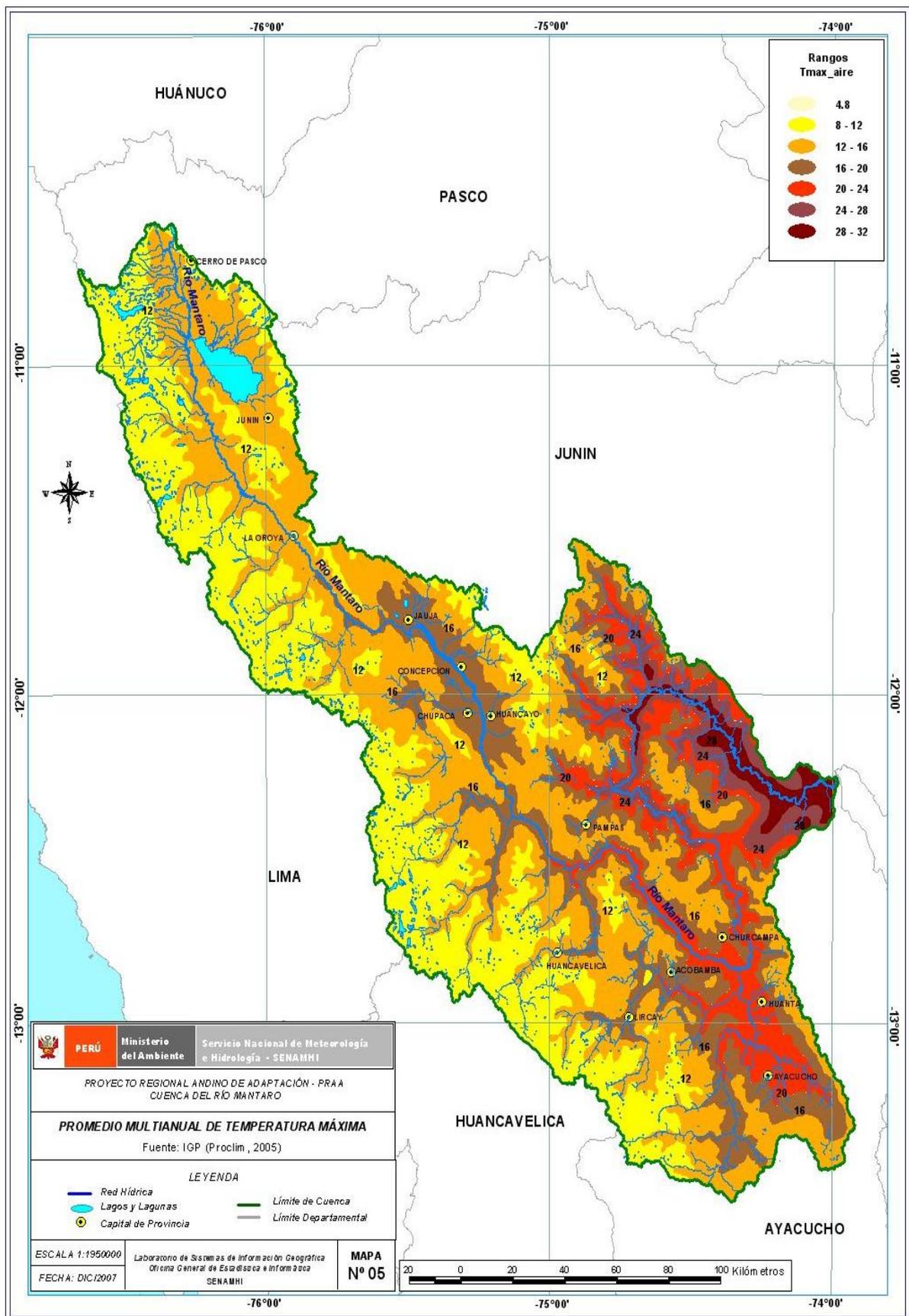


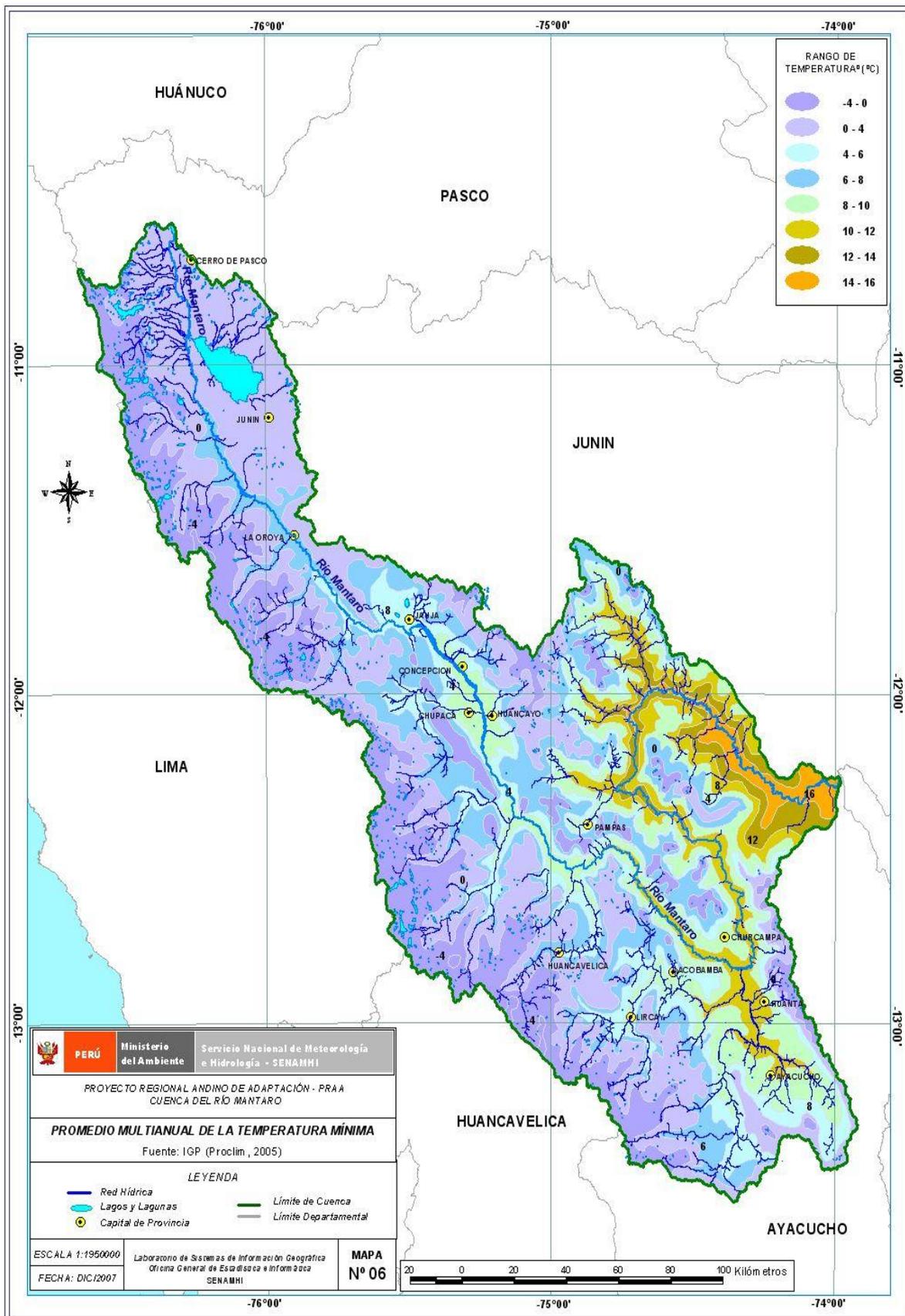
APENDICE 2

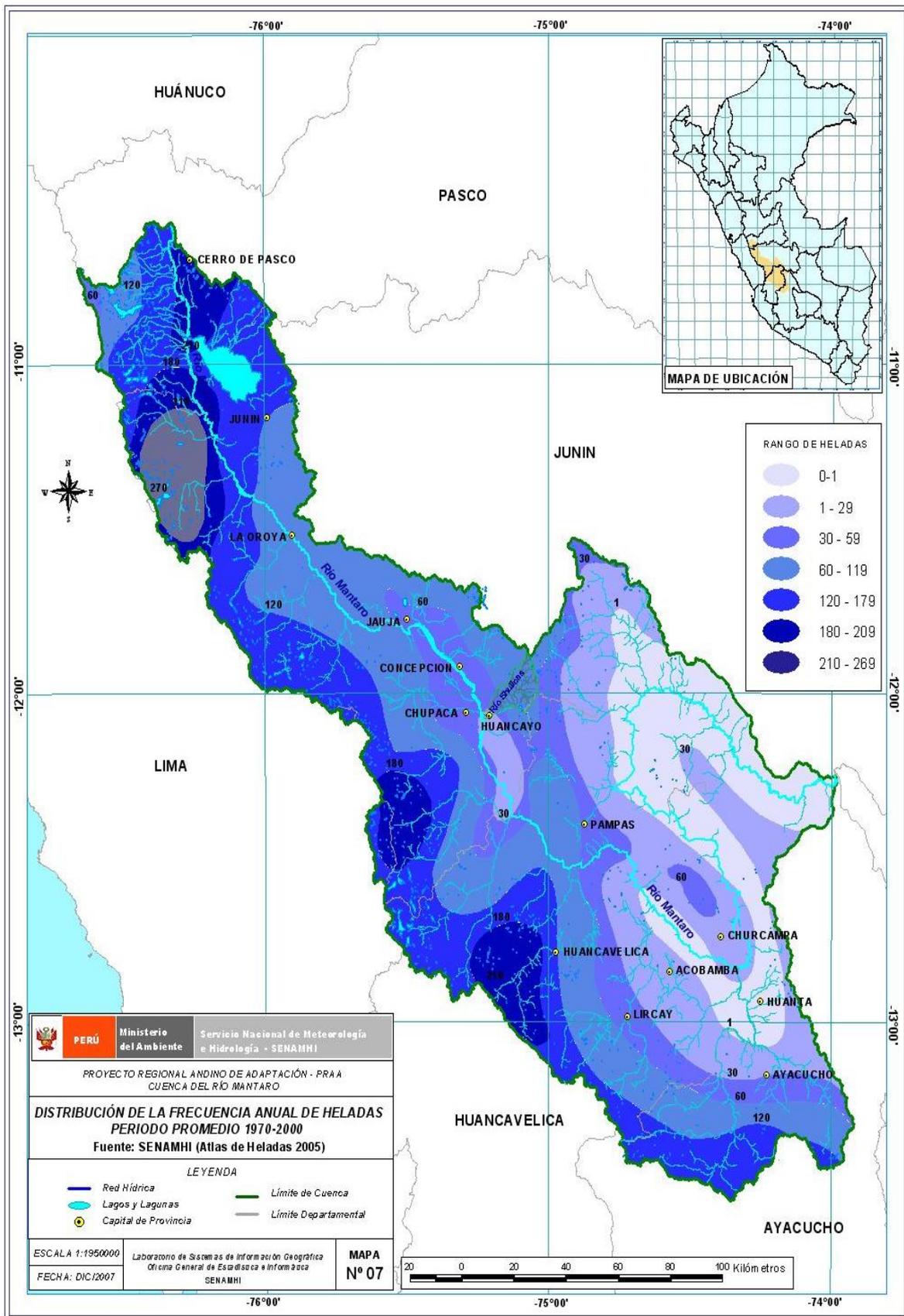
Mapas de promedios multianuales, eventos extremos y tendencias actuales

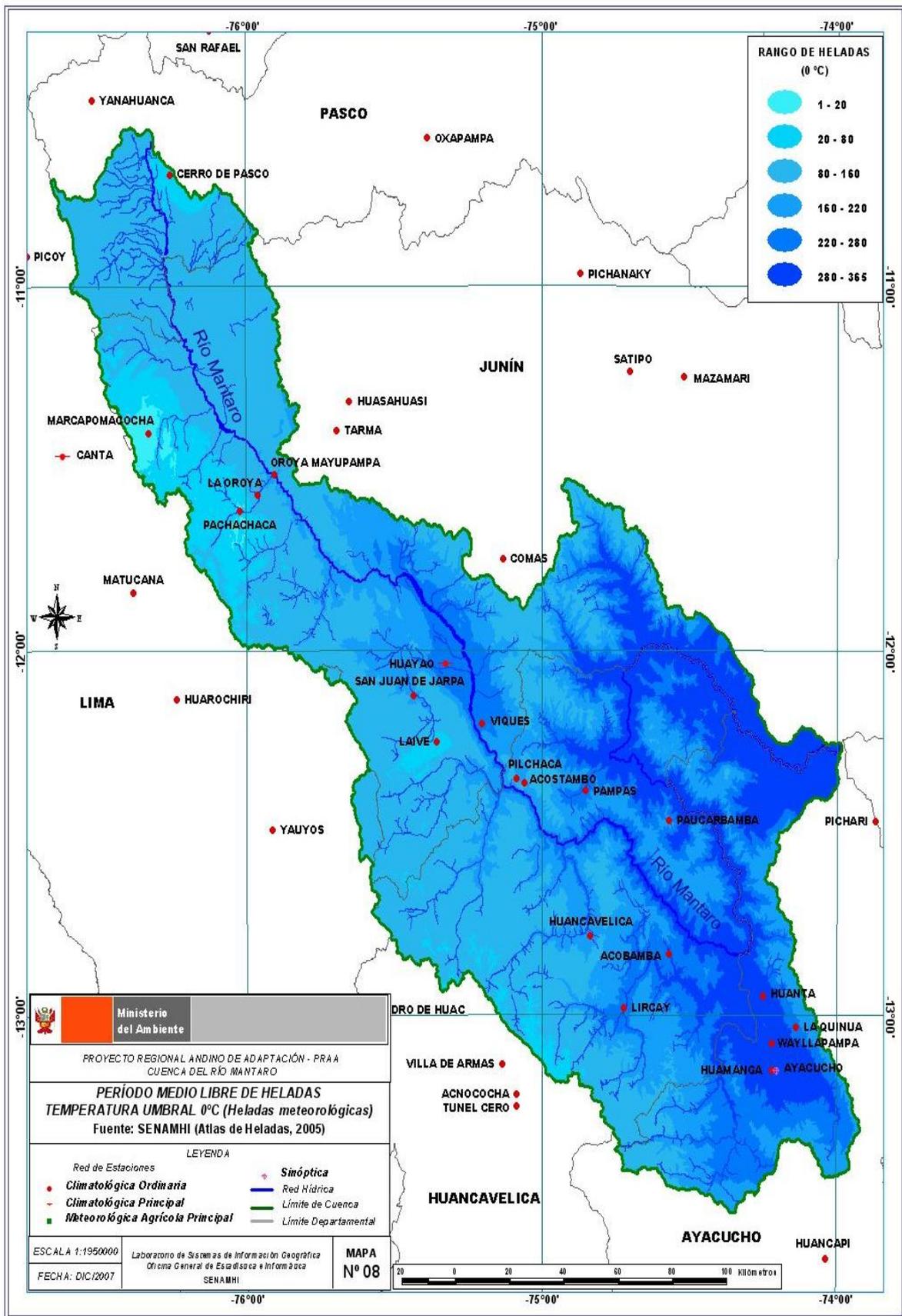
- Mapa 04: Distribución de la Precipitación multianual de la cuenca del Mantaro
- Mapa 05: Distribución de la Temperatura máxima multianual de la cuenca del Mantaro
- Mapa 06: Distribución de la Temperatura mínima anual de la cuenca del Mantaro
- Mapa 07: Distribución espacial de la frecuencia anual de heladas de la cuenca del Mantaro
- Mapa 08: Periodo libre de heladas de la cuenca del Mantaro
- Mapa 09: Tendencia de la precipitación anual de la cuenca del Mantaro 1965 - 2006
- Mapa 10: Tendencia de la precipitación de la cuenca del Mantaro para DEF.
- Mapa 11: Tendencia de la precipitación de la cuenca del Mantaro para MAM.
- Mapa 12: Tendencia de la precipitación de la cuenca del Mantaro para JJA.
- Mapa 13: Tendencia de la precipitación de la cuenca del Mantaro para SON.
- Mapa 14: Tendencia de la temperatura máxima promedio anual de la cuenca del Mantaro.
- Mapa 15: Tendencia de la temperatura máxima de la cuenca del Mantaro para DEF.
- Mapa 16: Tendencia de la temperatura máxima de la cuenca del Mantaro para MAM.
- Mapa 17: Tendencia de la temperatura máxima de la cuenca del Mantaro para JJA.
- Mapa 18: Tendencia de la temperatura máxima de la cuenca del Mantaro para SON.
- Mapa 19: Tendencia de la temperatura mínima promedio anual de la cuenca del Mantaro.
- Mapa 20: Tendencia de la temperatura mínima de la cuenca del Mantaro para DEF
- Mapa 21: Tendencia de la temperatura mínima de la cuenca del Mantaro para MAM.
- Mapa 22: Tendencia de la temperatura mínima de la cuenca del Mantaro para JJA.
- Mapa 23: Tendencia de la temperatura mínima de la cuenca del Mantaro para la SON.

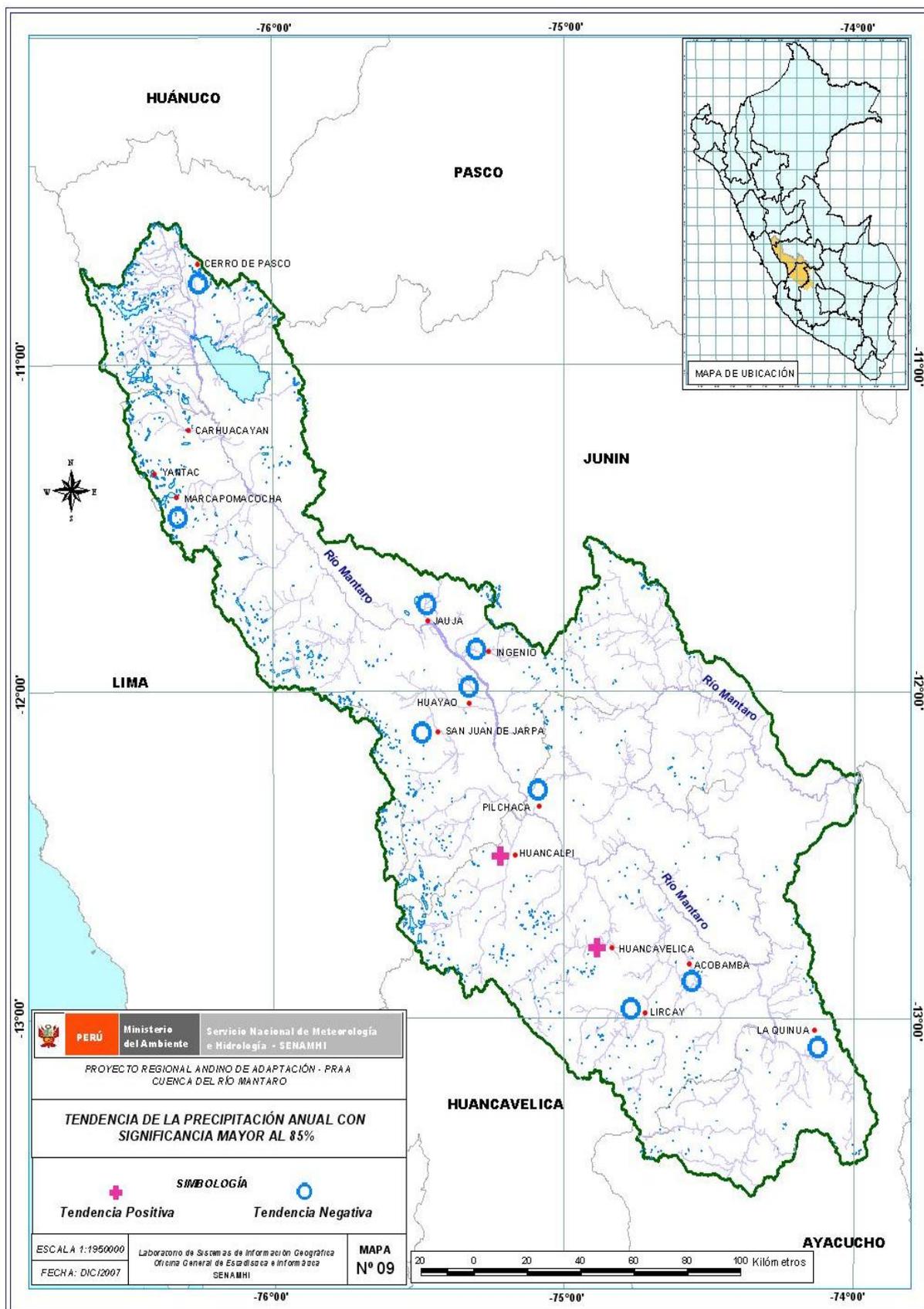


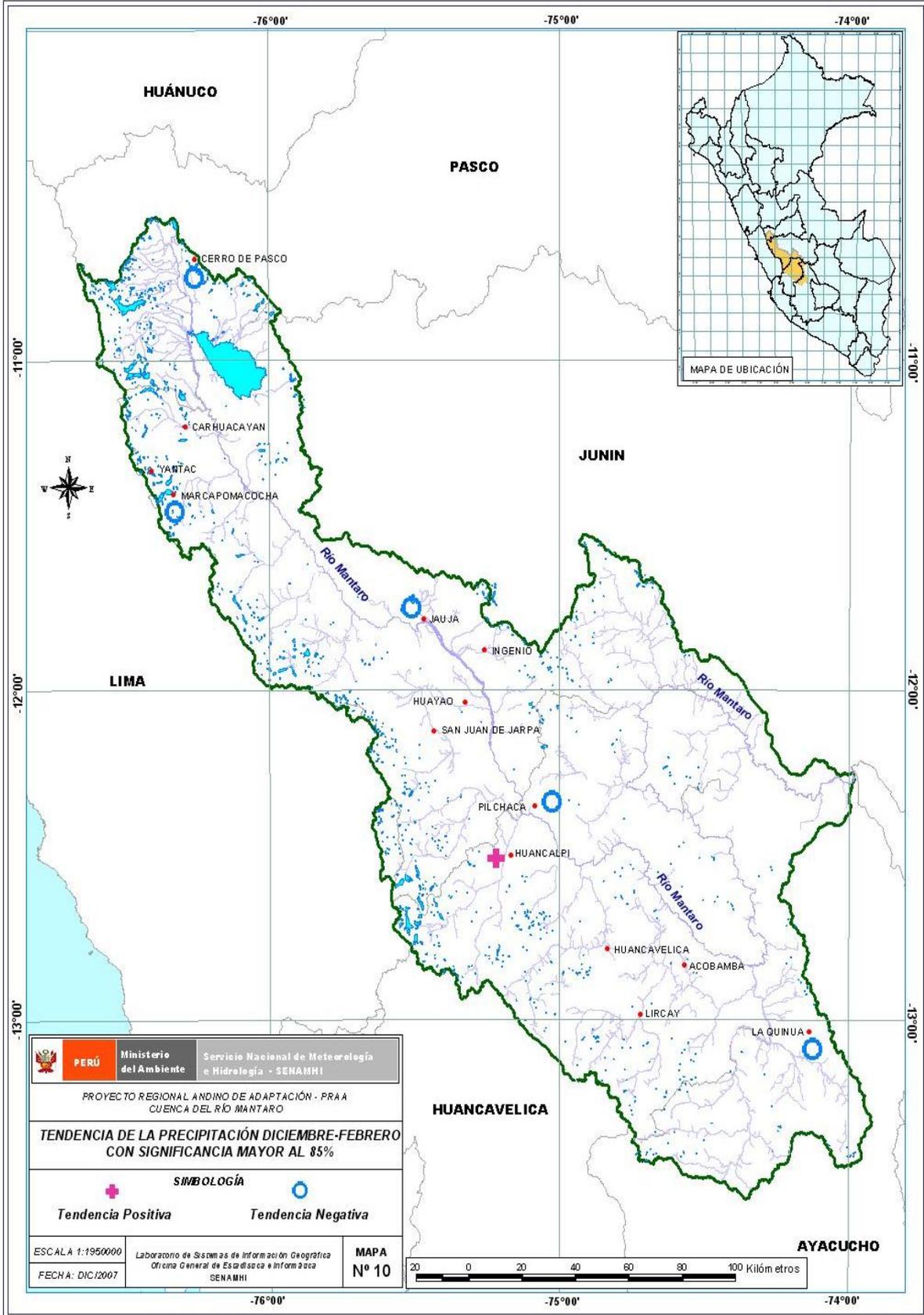




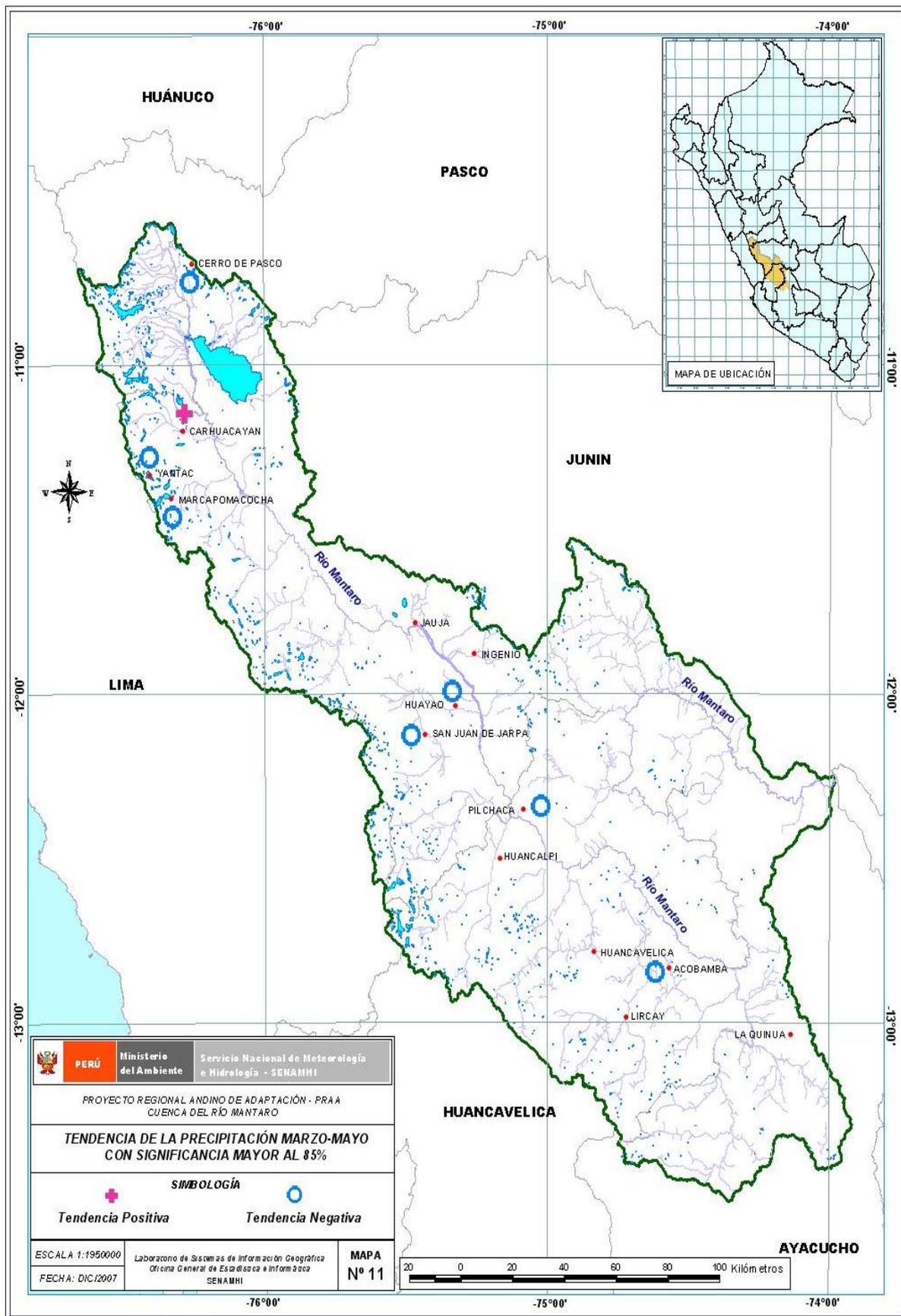


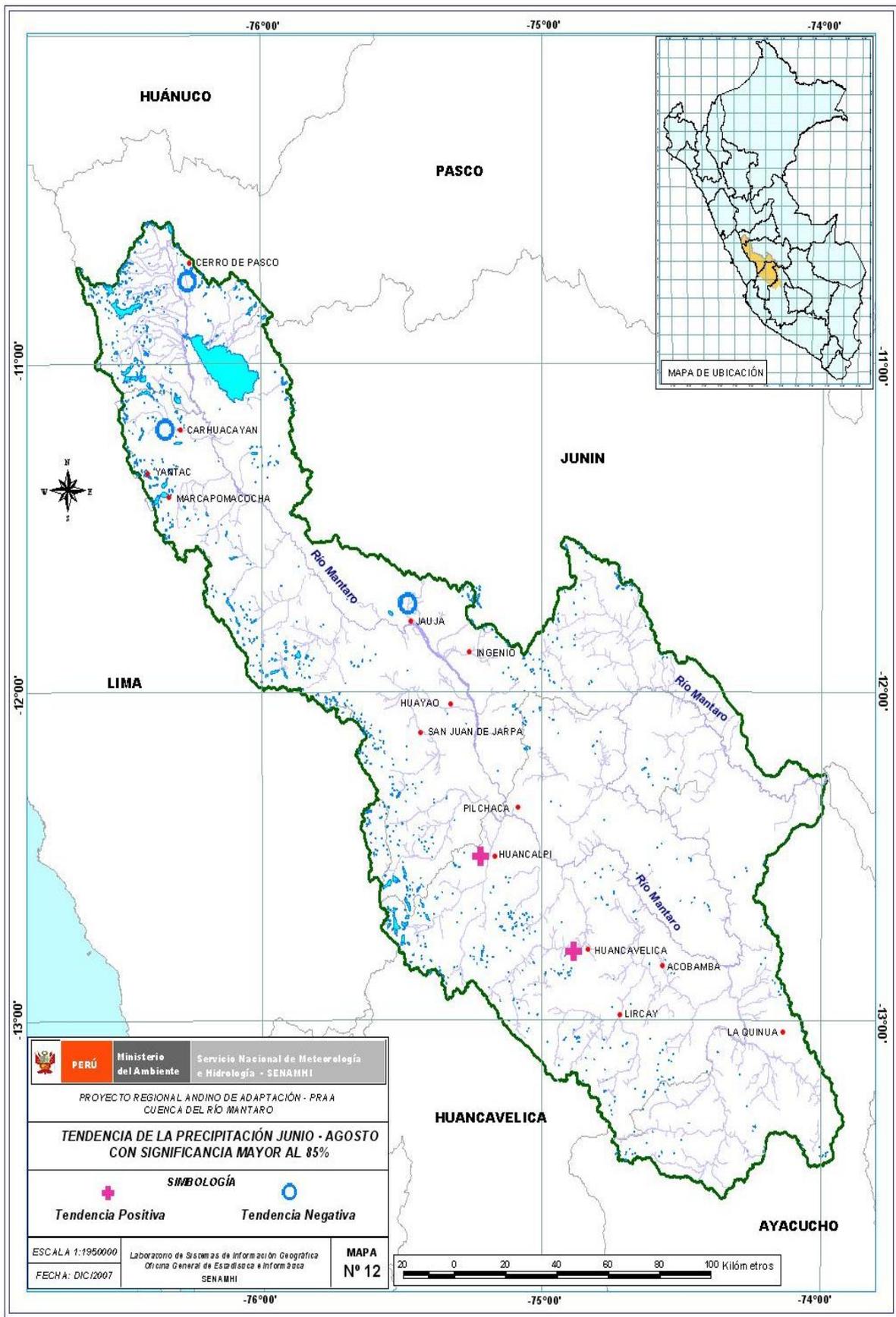


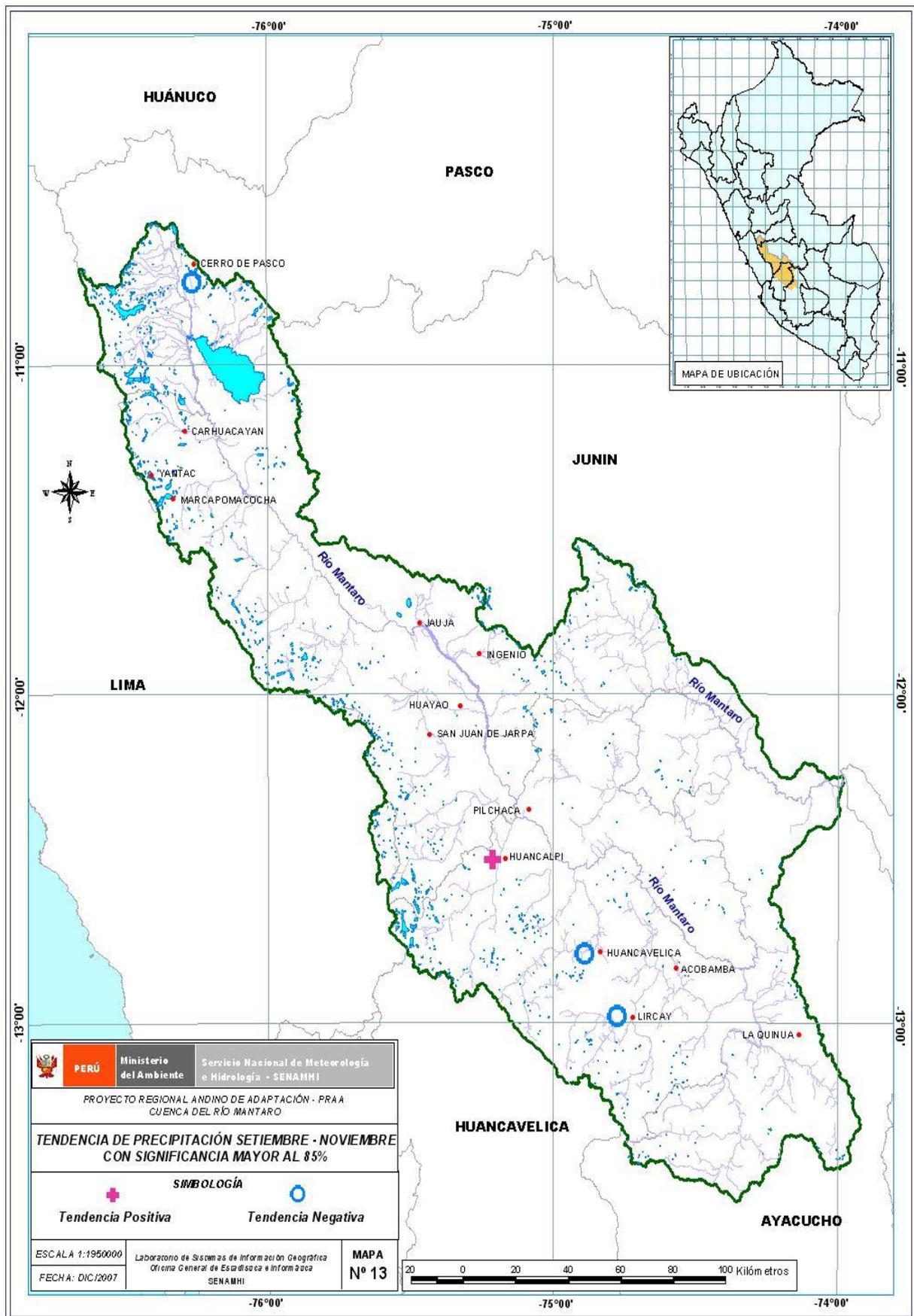




	PERÚ	Ministerio del Ambiente	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI
	PROYECTO REGIONAL ANDINO DE ADAPTACIÓN - PRA CUENCA DEL RÍO MANTARO		
TENDENCIA DE LA PRECIPITACIÓN DICIEMBRE-FEBRERO CON SIGNIFICANCIA MAYOR AL 85%			
SIMBOLOGÍA			
+		○	
Tendencia Positiva		Tendencia Negativa	
ESCALA 1:1950000	Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica Oficina General de Estadística e Informática SENAMHI		MAPA Nº 10
FECHA: DIC/2007	20 0 20 40 60 80 100 Kilómetros		

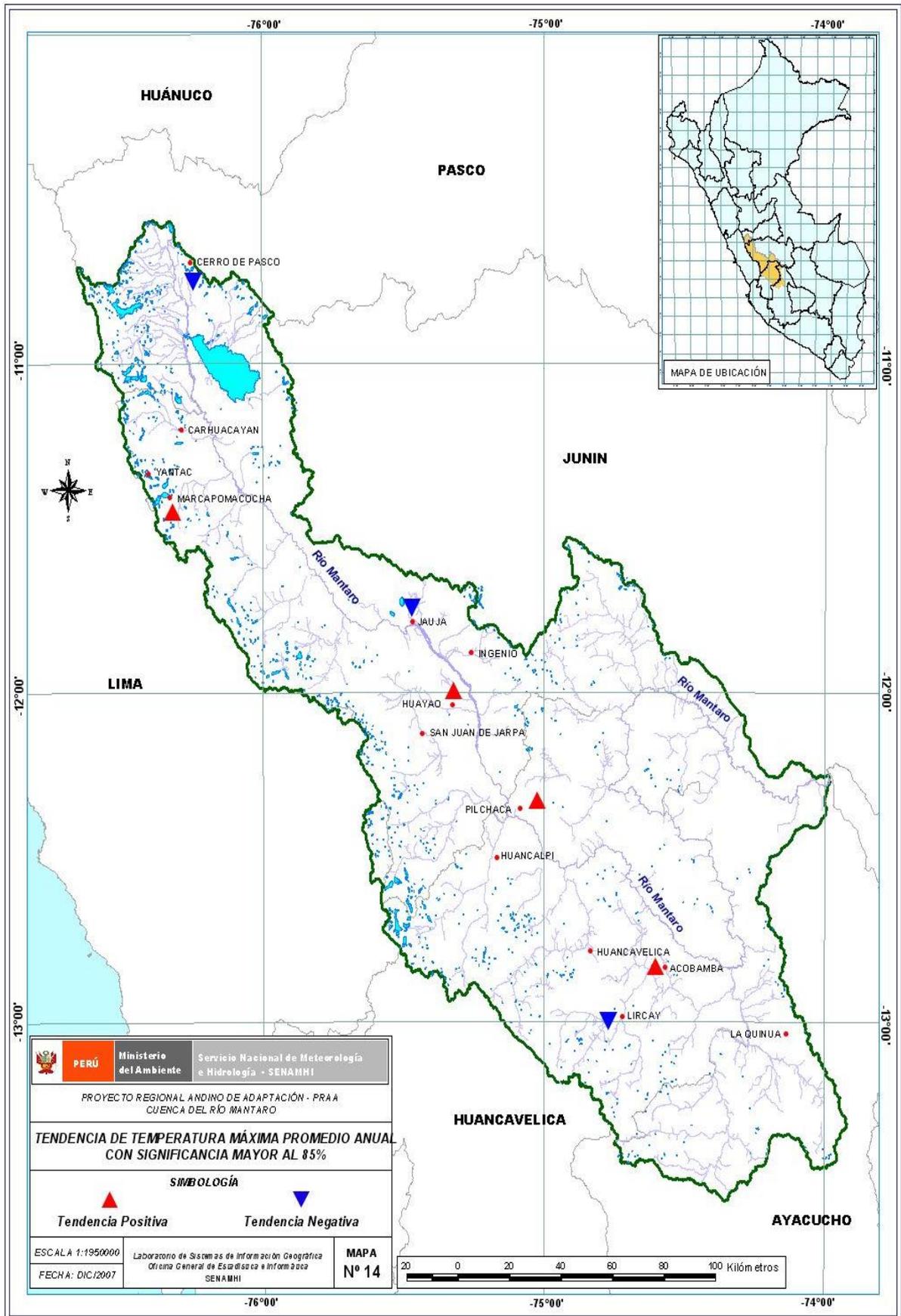


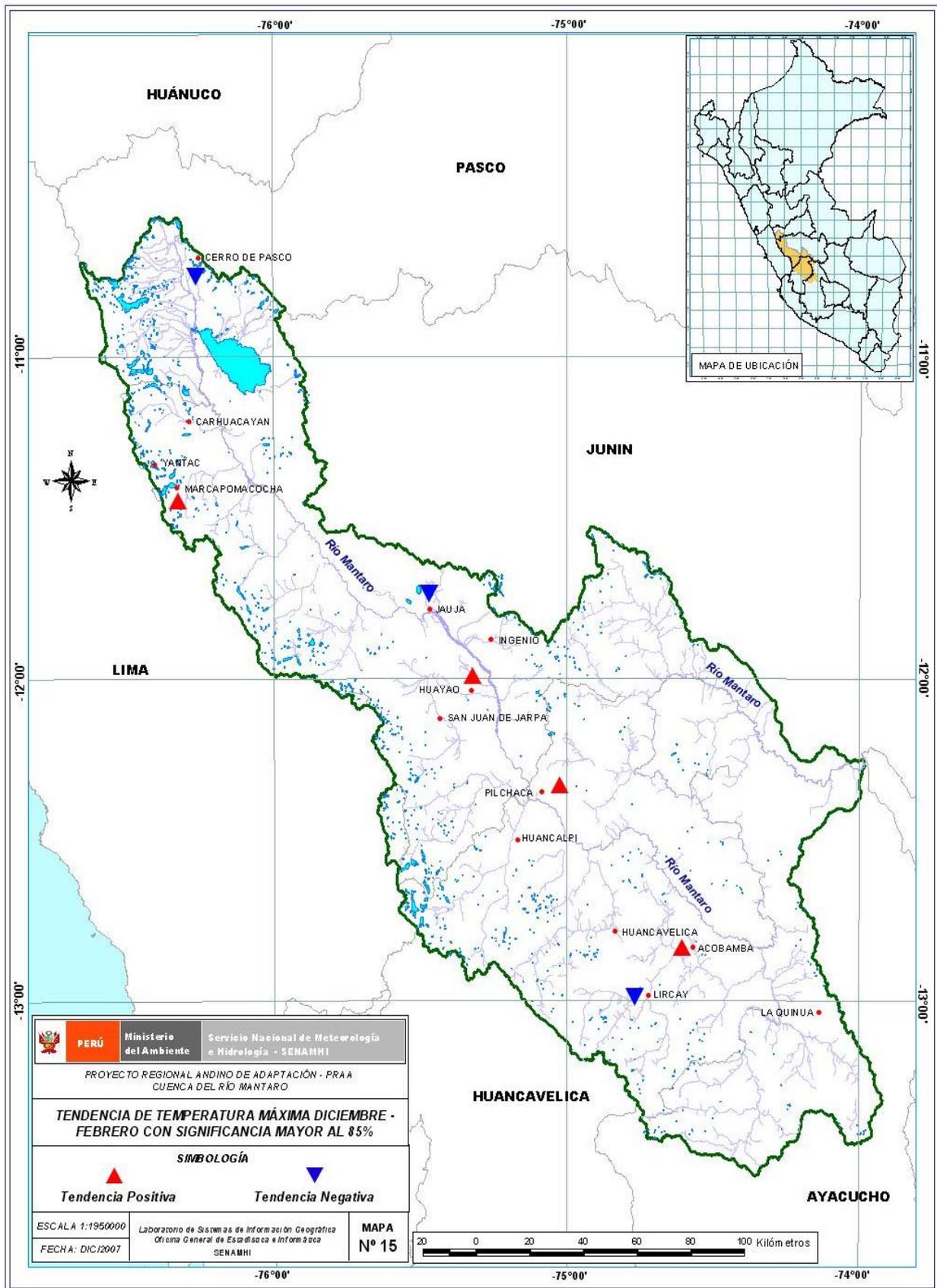


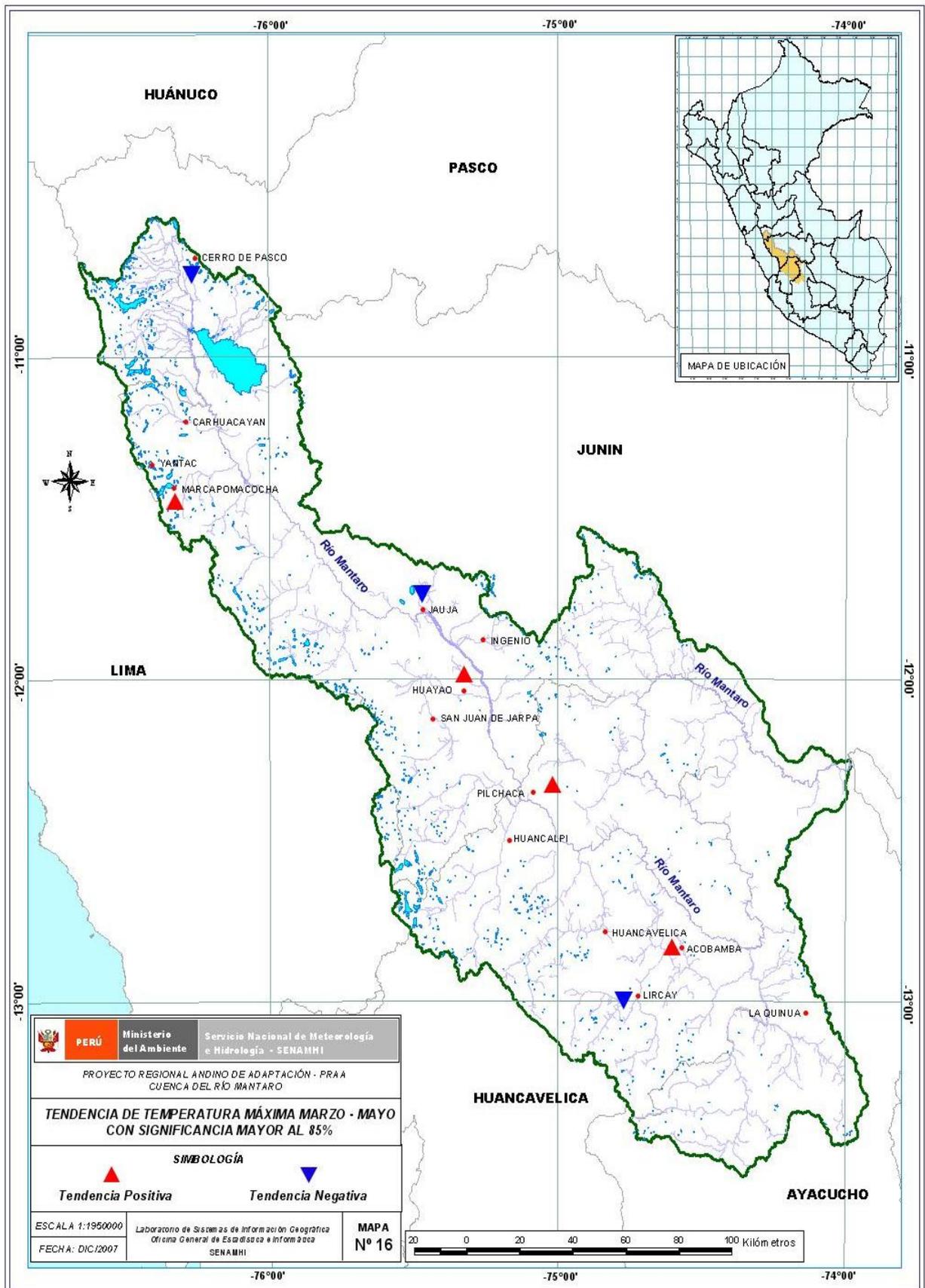


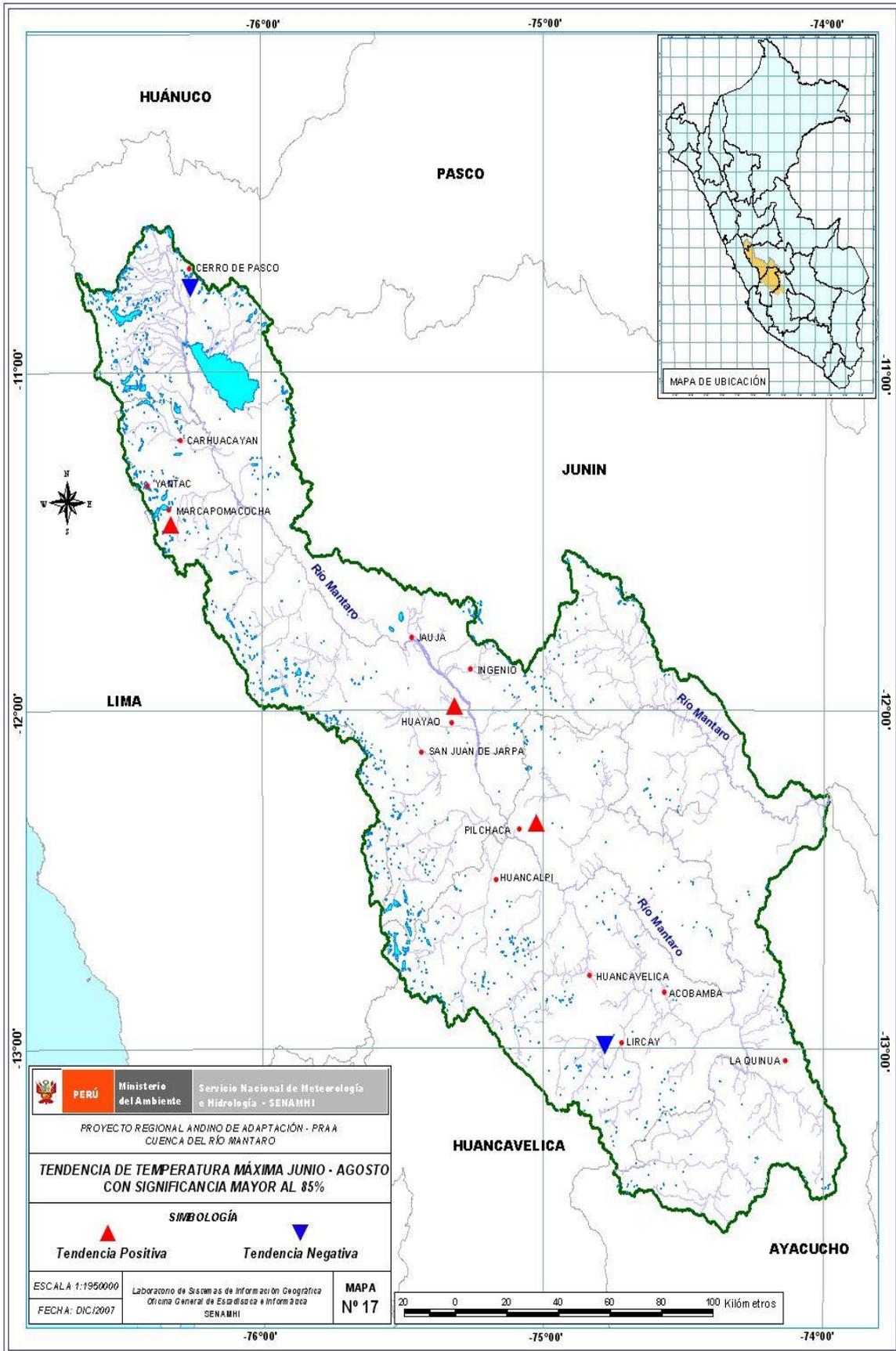
 PERÚ	Ministerio del Ambiente	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI
	PROYECTO REGIONAL ANDINO DE ADAPTACIÓN - PRAA CUENCA DEL RÍO MANTARO	
TENDENCIA DE PRECIPITACIÓN SETIEMBRE - NOVIEMBRE CON SIGNIFICANCIA MAYOR AL 85%		
SIMBOLOGÍA		
 Tendencia Positiva	 Tendencia Negativa	
ESCALA 1:1350000 FECHA: DIC/2007	Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica Oficina General de Estadística e Informática SENAMHI	MAPA Nº 13

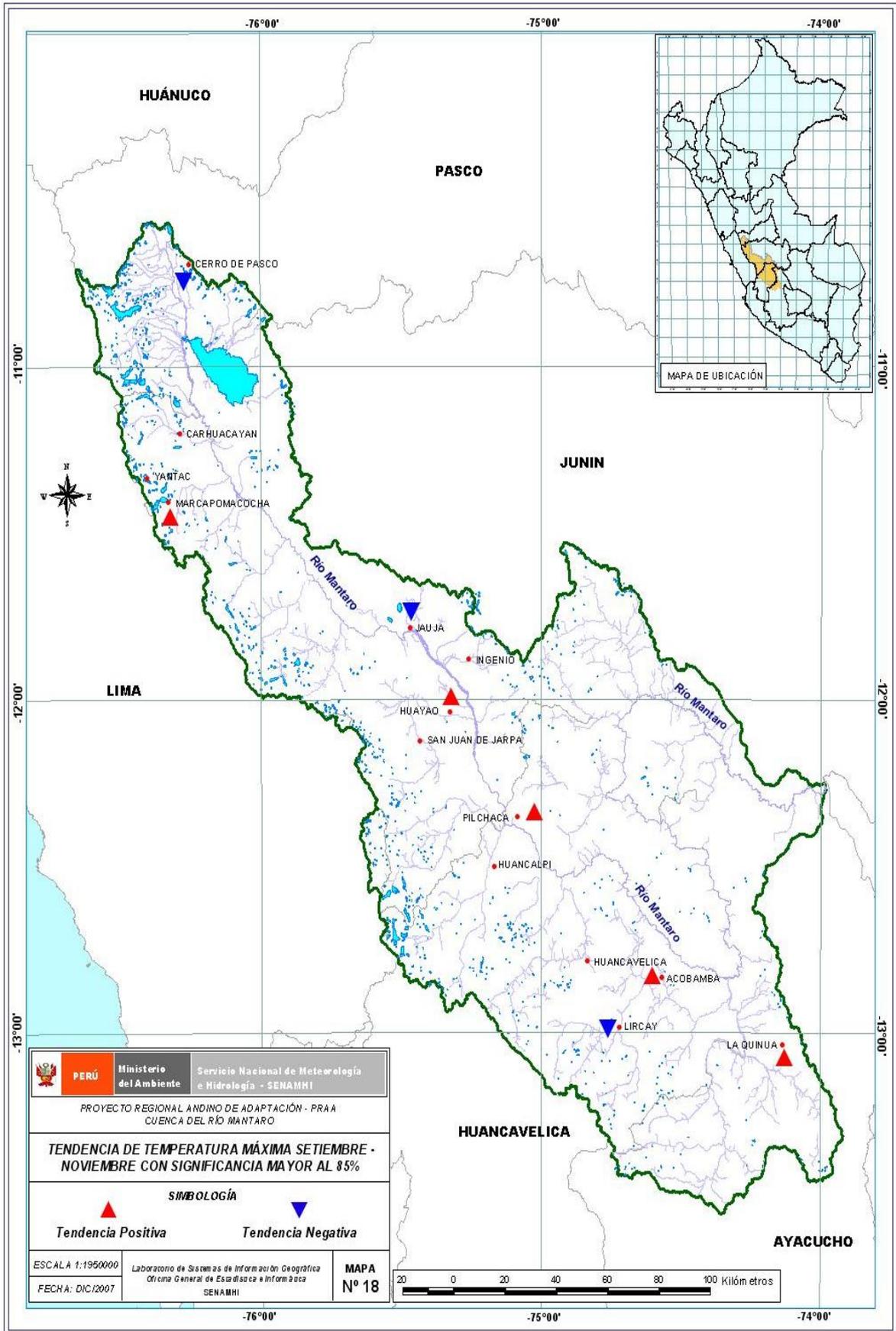


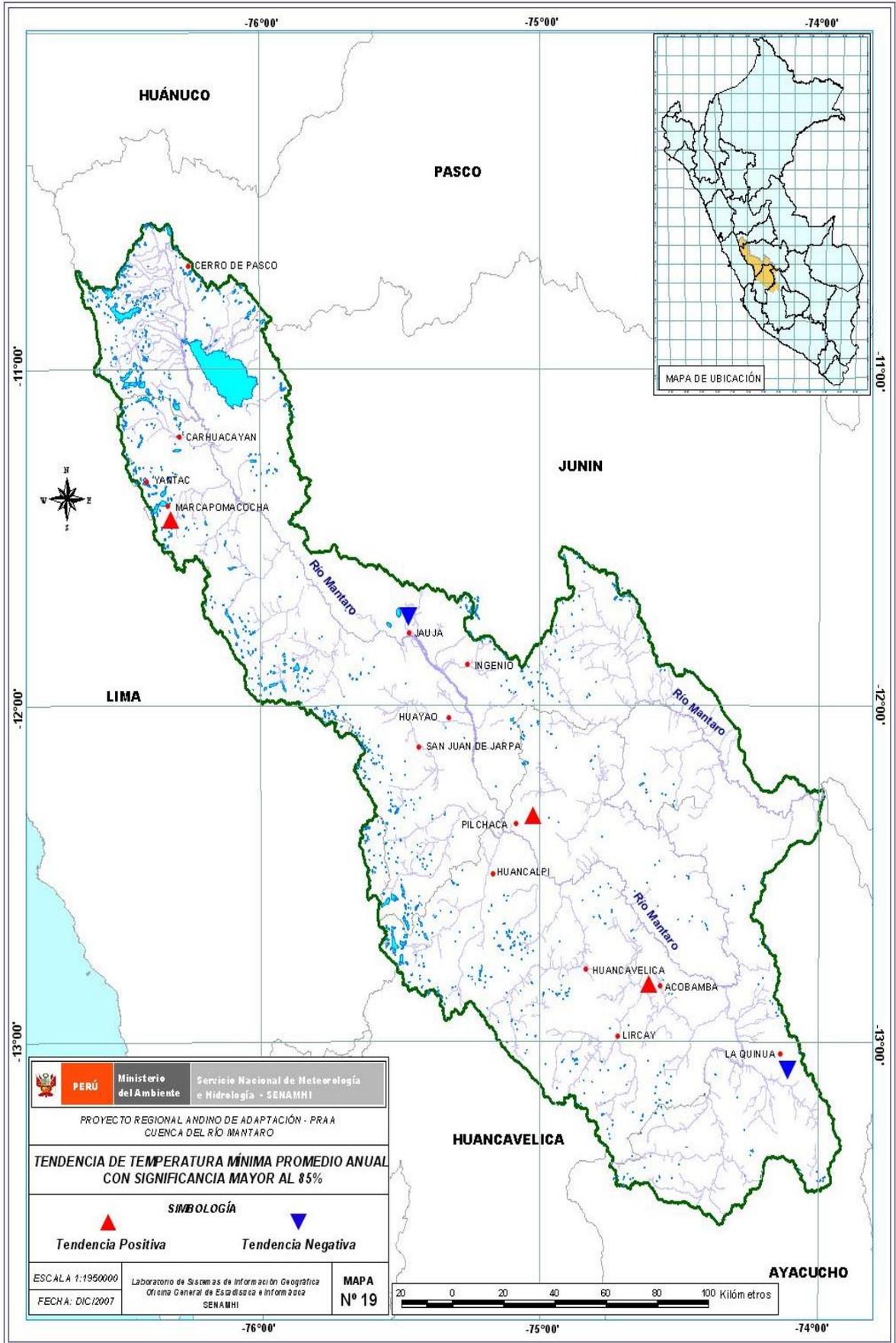




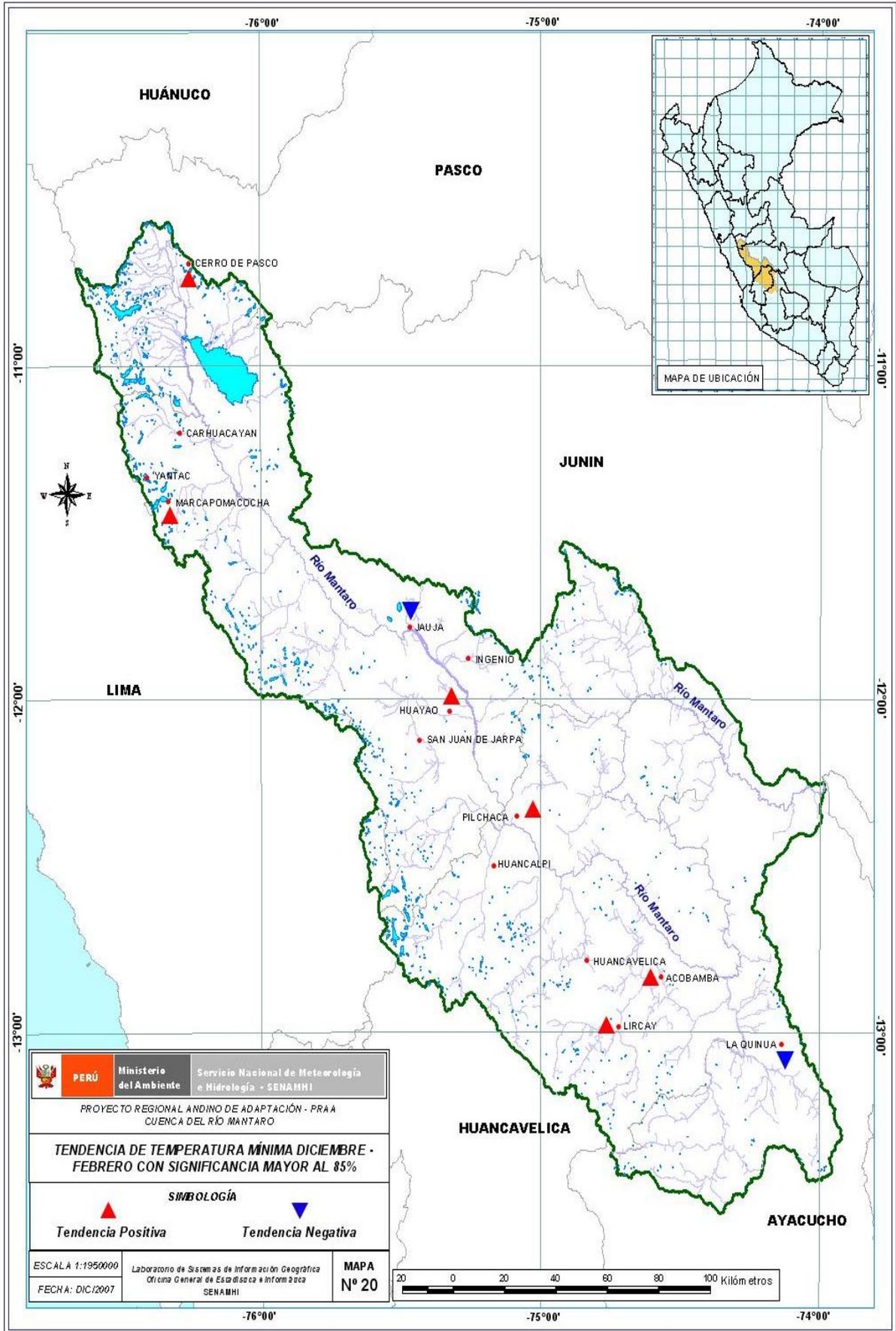


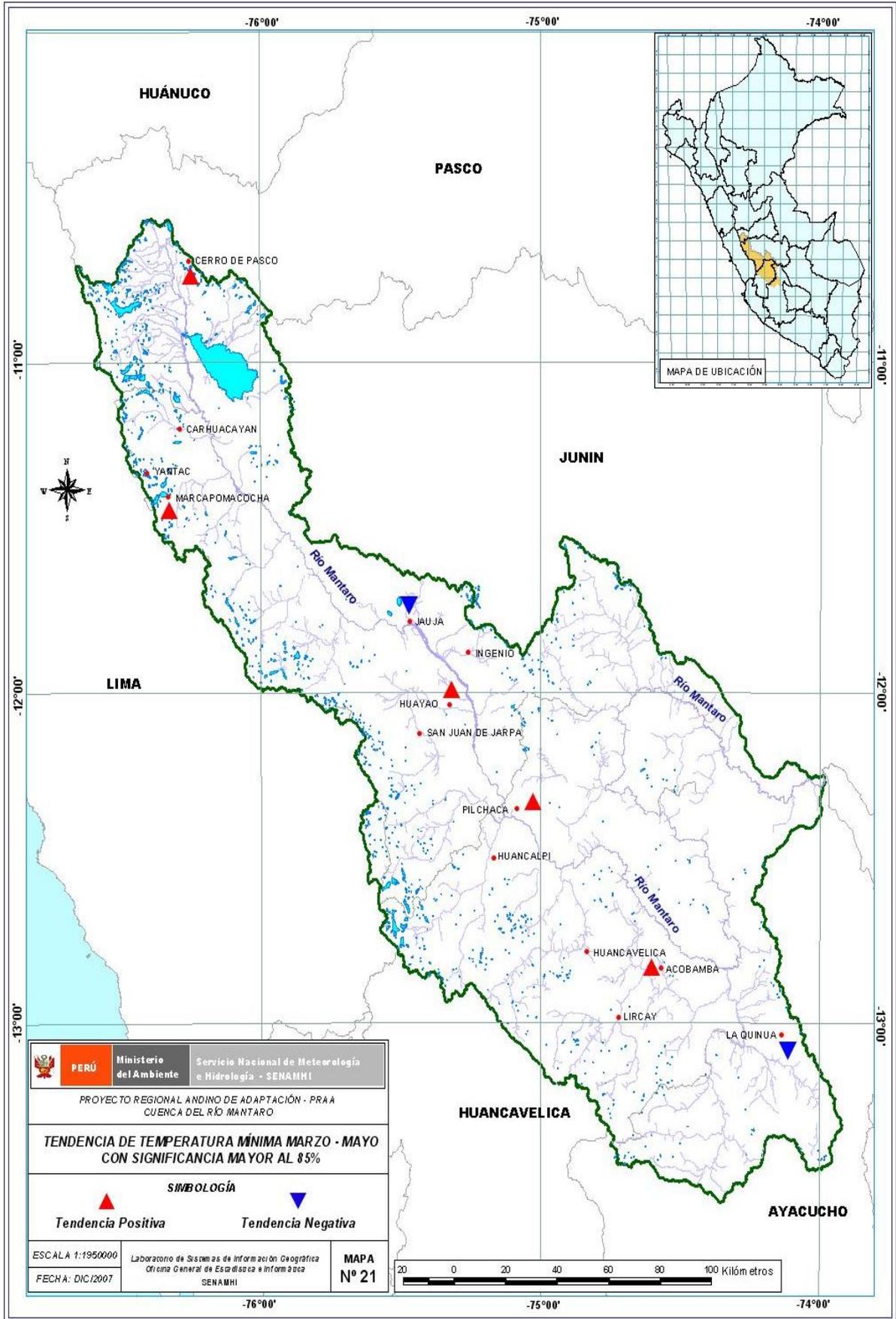


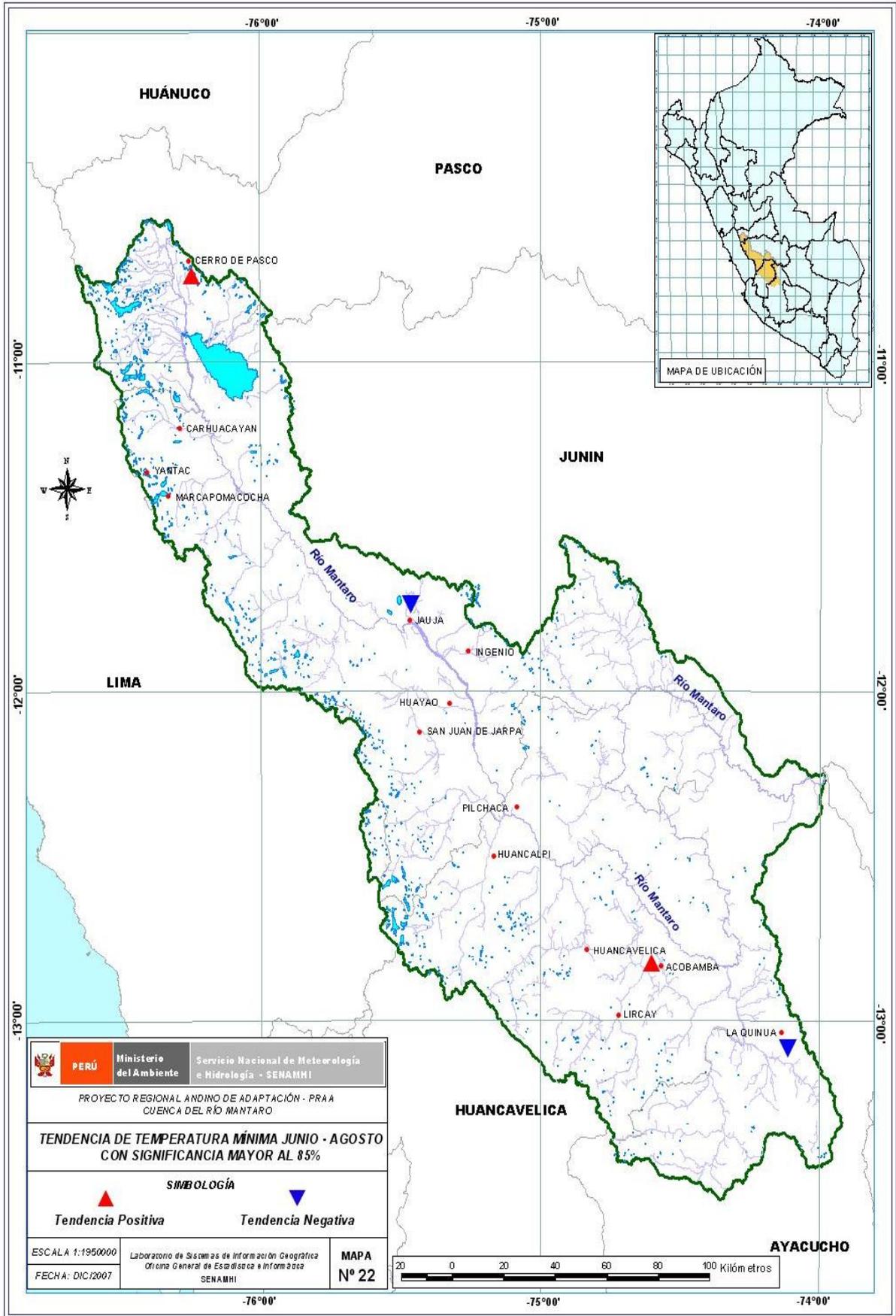




	PERÚ Ministerio del Ambiente Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI
	PROYECTO REGIONAL ANDINO DE ADAPTACIÓN - PRAA CUENCA DEL RÍO MANTARO
TENDENCIA DE TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO ANUAL CON SIGNIFICANCIA MAYOR AL 85%	
SIMBOLOGÍA Tendencia Positiva Tendencia Negativa	
ESCALA 1:1950000 FECHA: DIC/2007	Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica Oficina General de Estadística e Informática SENAMHI
MAPA N° 19	








PERÚ Ministerio del Ambiente Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

PROYECTO REGIONAL ANDINO DE ADAPTACIÓN - PRA A CUENCA DEL RÍO MANTARO

TENDENCIA DE TEMPERATURA MÍNIMA JUNIO - AGOSTO CON SIGNIFICANCIA MAYOR AL 85%

SIMBOLOGÍA

 **Tendencia Positiva**

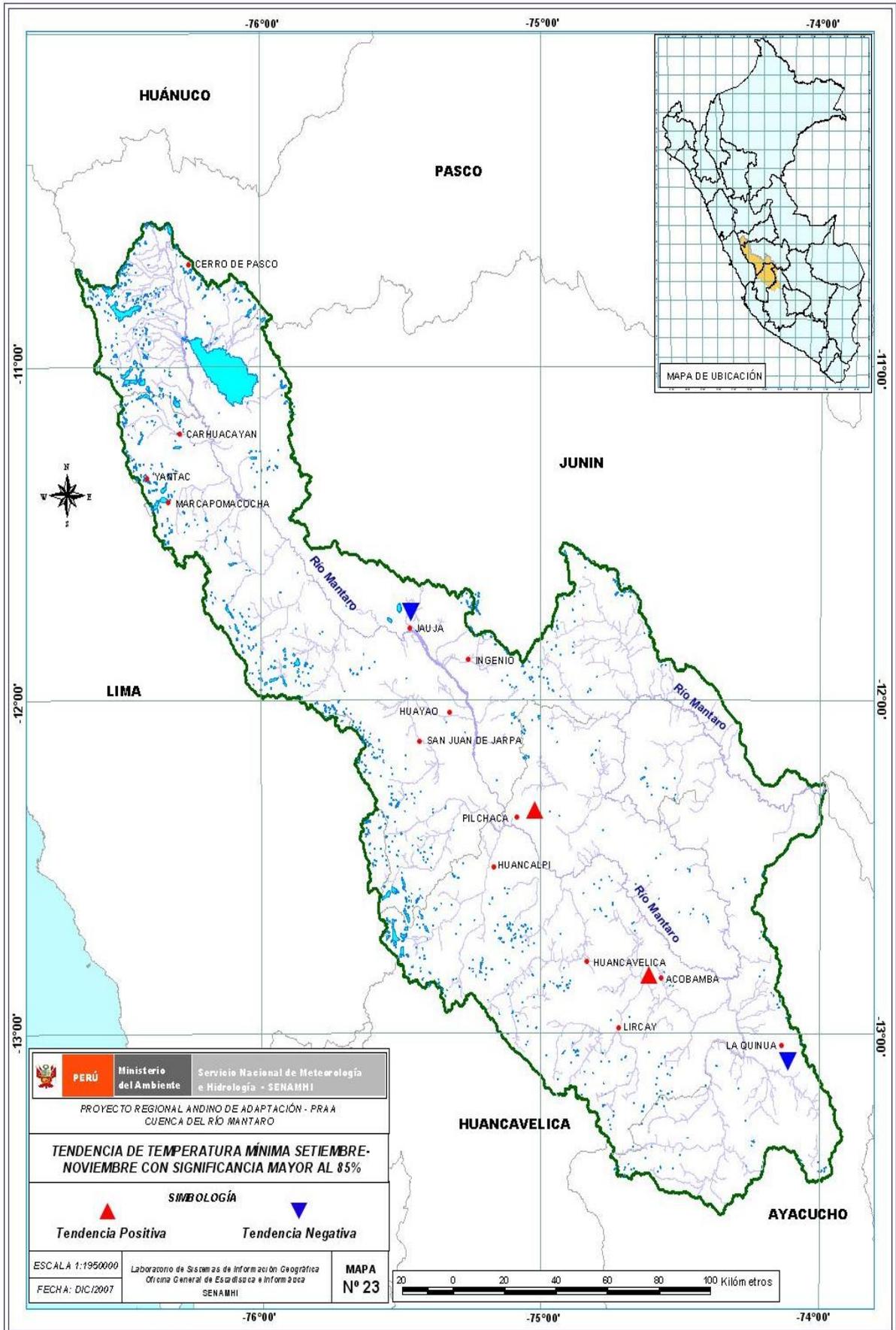
 **Tendencia Negativa**

ESCALA 1:1950000

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica
 Oficina General de Estadística e Informática
 SENAMHI

MAPA N° 22

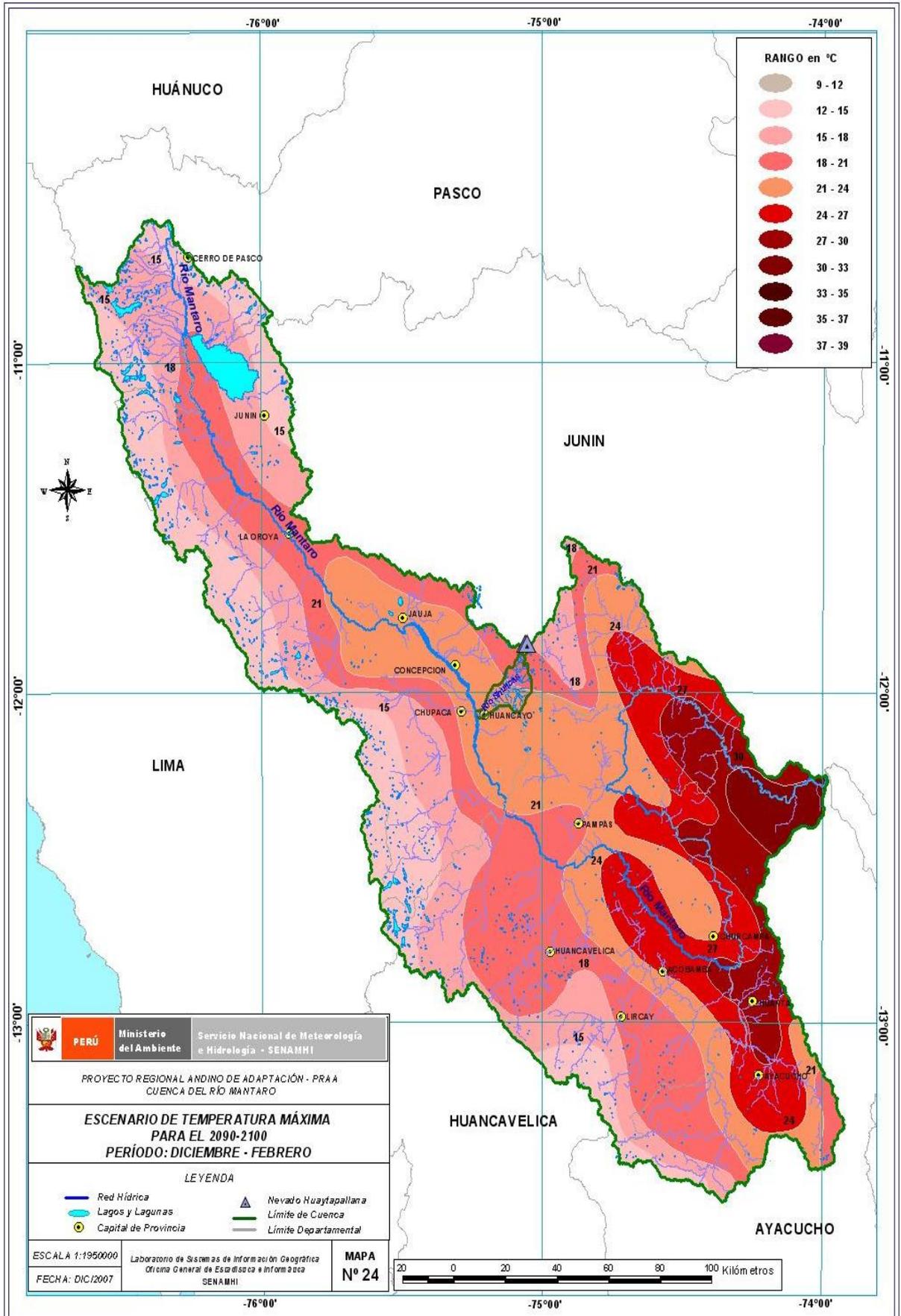


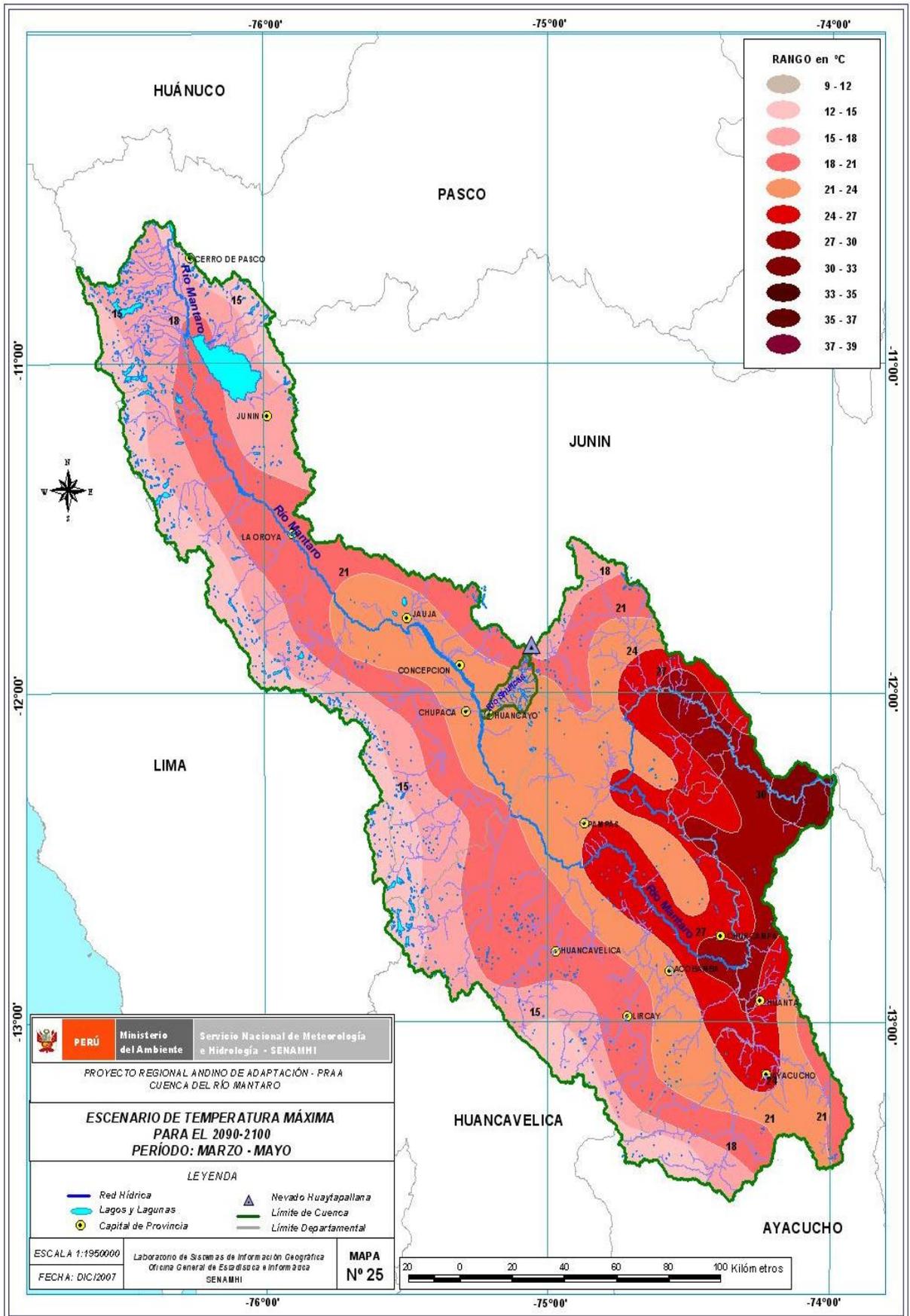


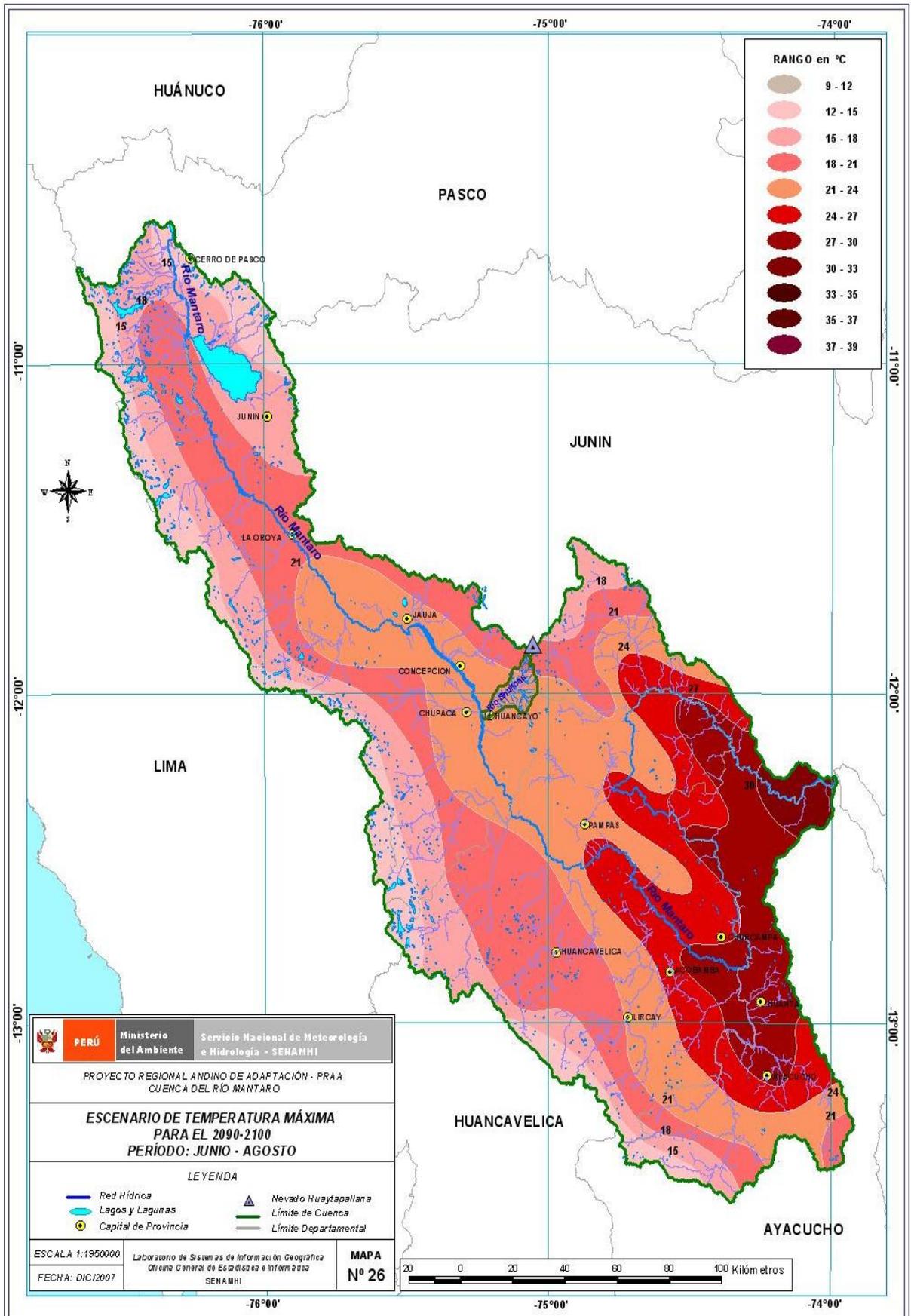
APENDICE 3

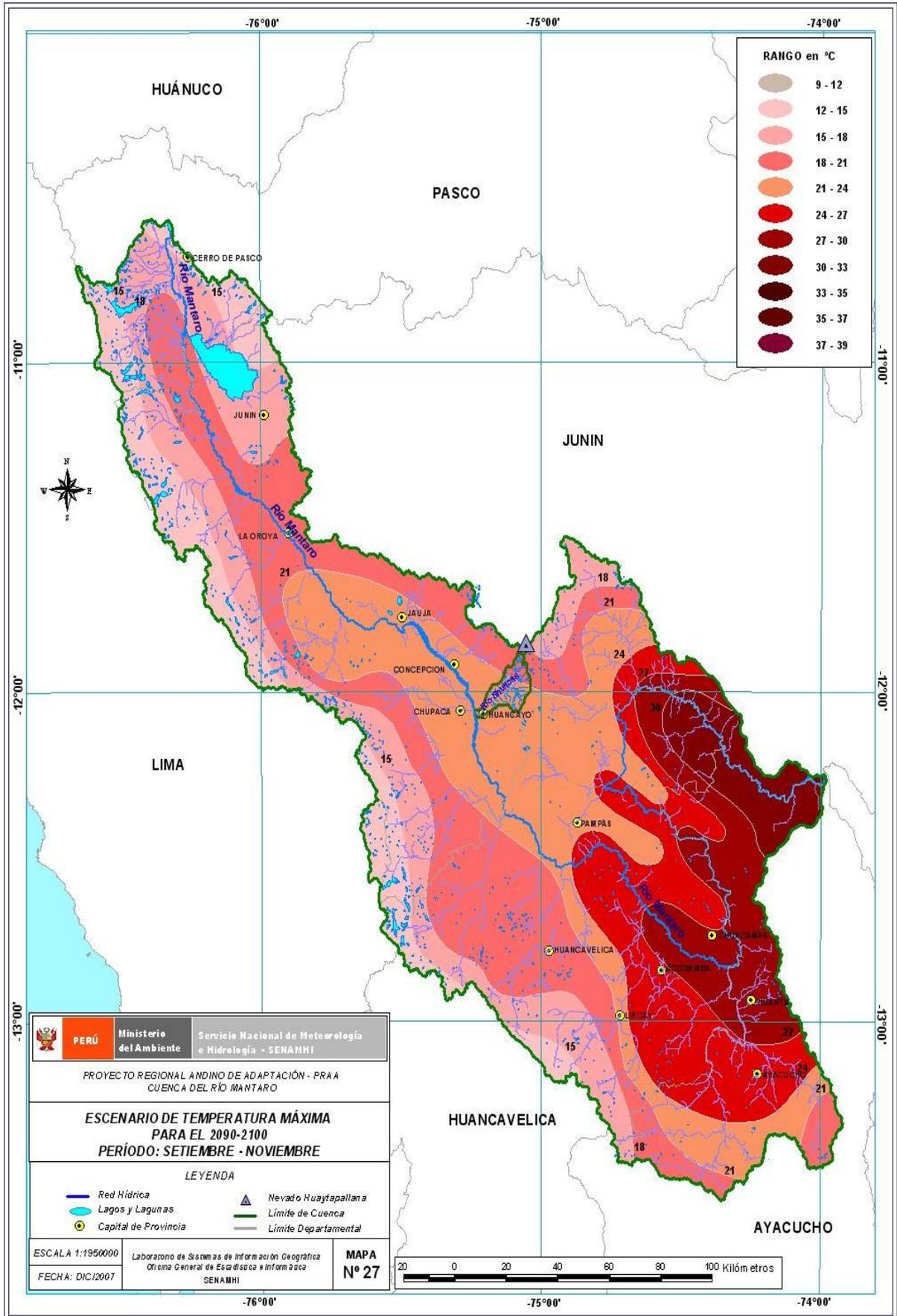
Escenarios climáticos al año 2100

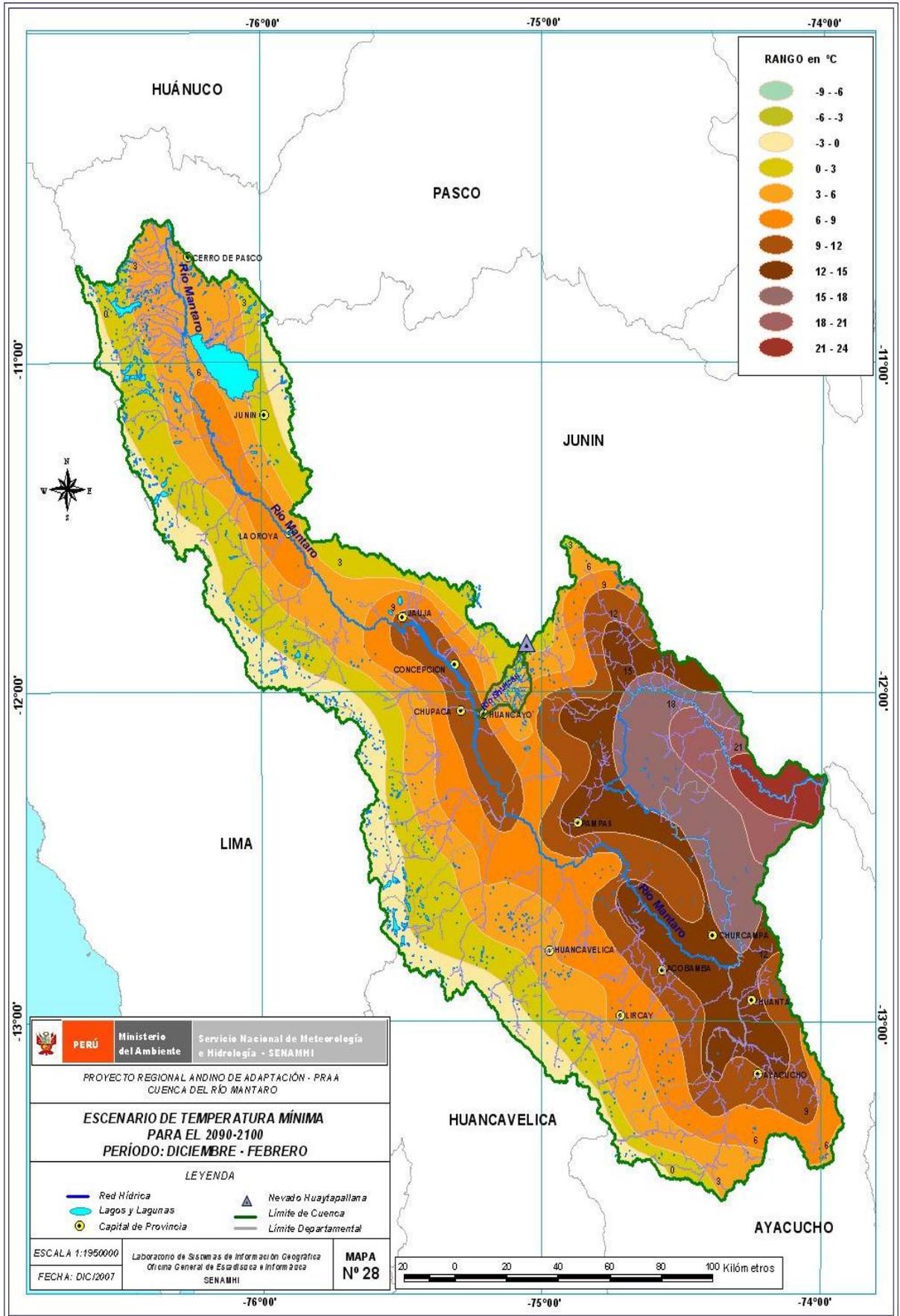
- Mapa 24: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre DEF).
- Mapa 25: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre MAM).
- Mapa 26: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre JJA).
- Mapa 27: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre SON)
- Mapa 28: Escenario de la temperatura mínima para el 2090-2100 (Trimestre DEF).
- Mapa 29: Escenario de la temperatura mínima para el 2090-2100 (Trimestre MAM).
- Mapa 30: Escenario de la temperatura mínima para el 2090-2100 (Trimestre JJA).
- Mapa 31: Escenario de la temperatura mínima para el 2090-2100 (Trimestre SON).
- Mapa 32: Escenario de precipitación para el 2090-2100 (Trimestre DEF).
- Mapa 33: Escenario de precipitación para el 2090-2100 (Trimestre MAM).
- Mapa 34: Escenario de precipitación para el 2090-2100 (Trimestre JJA).
- Mapa 35: Escenario de precipitación para el 2090-2100 (Trimestre SON).

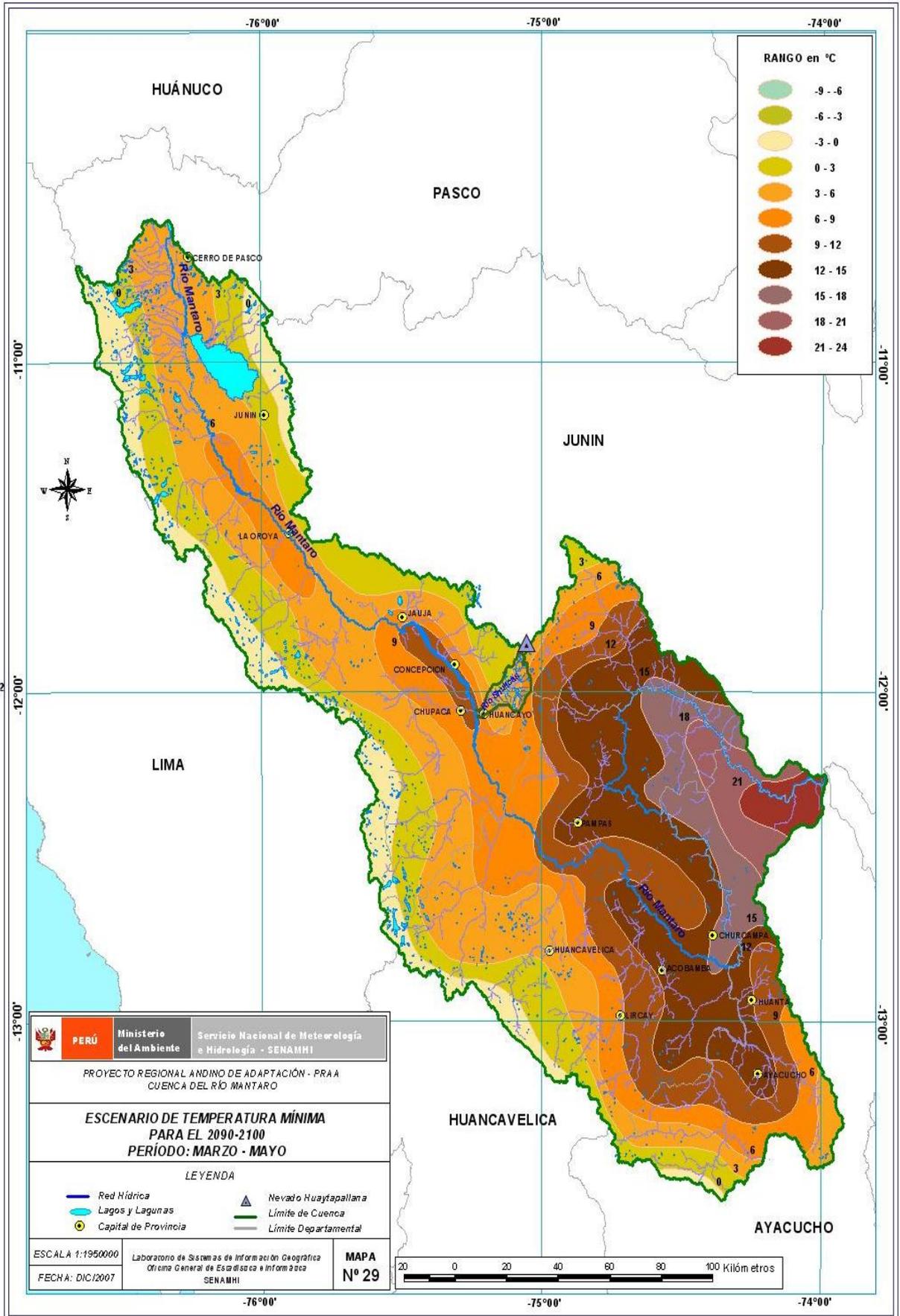


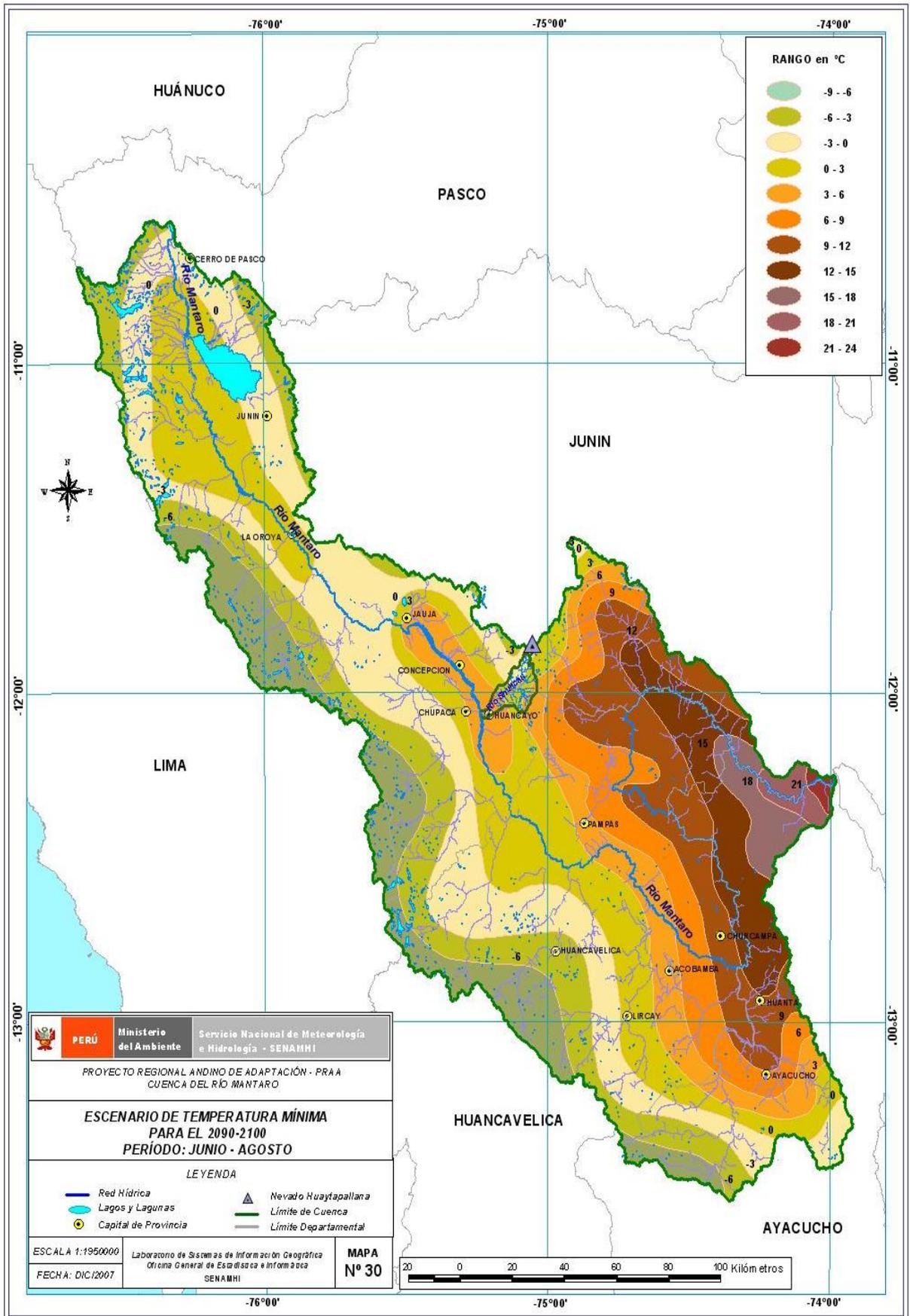


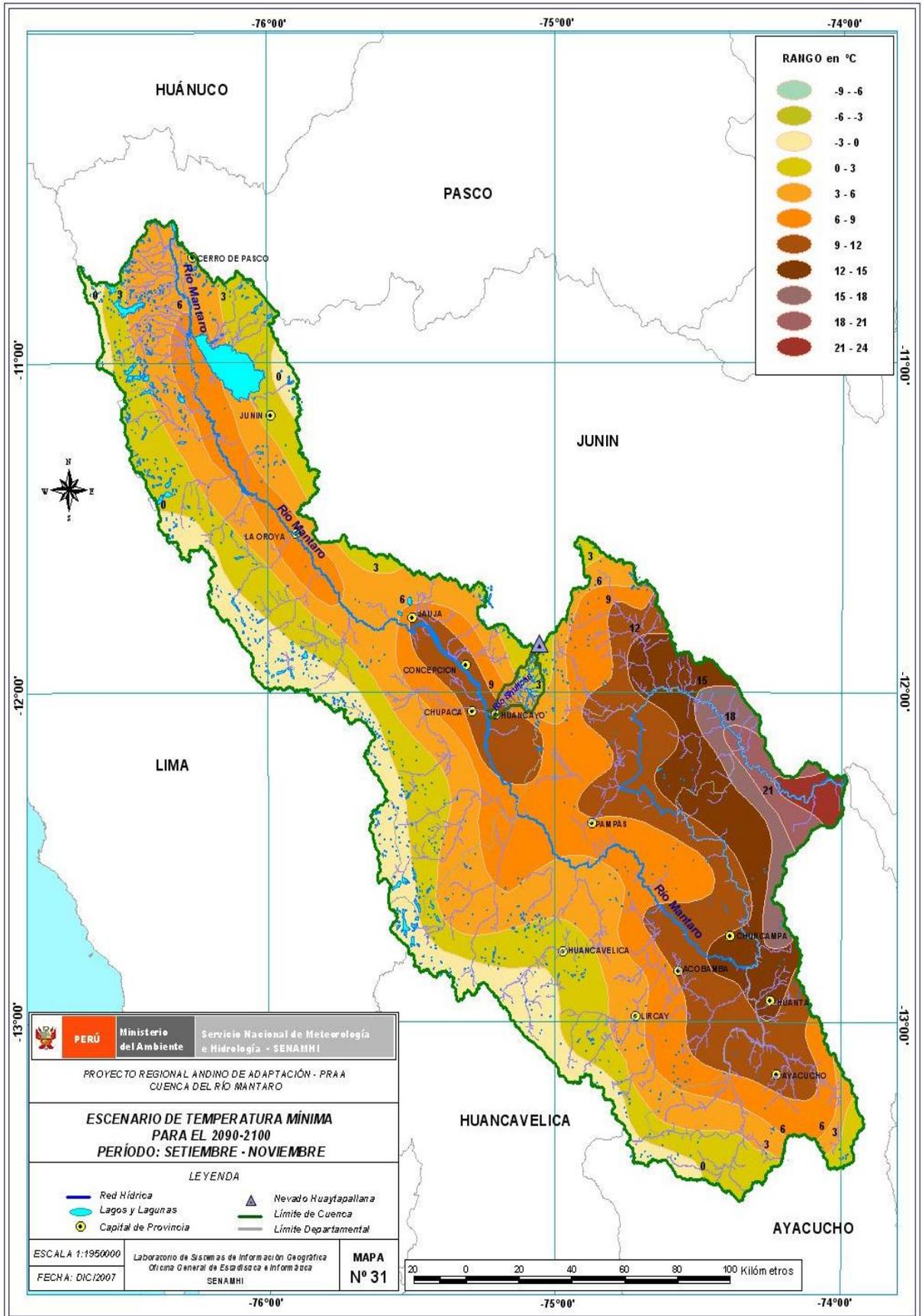


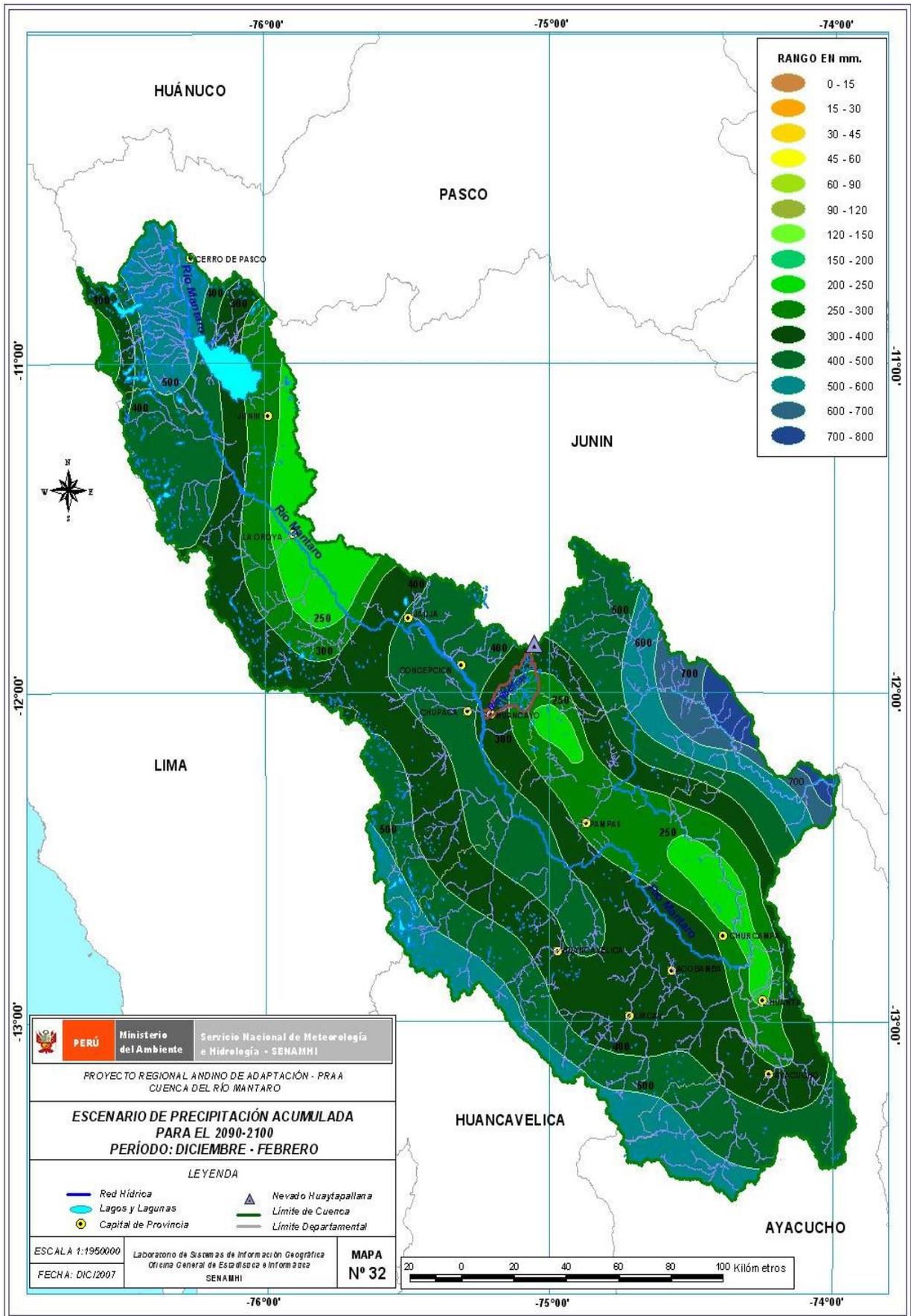


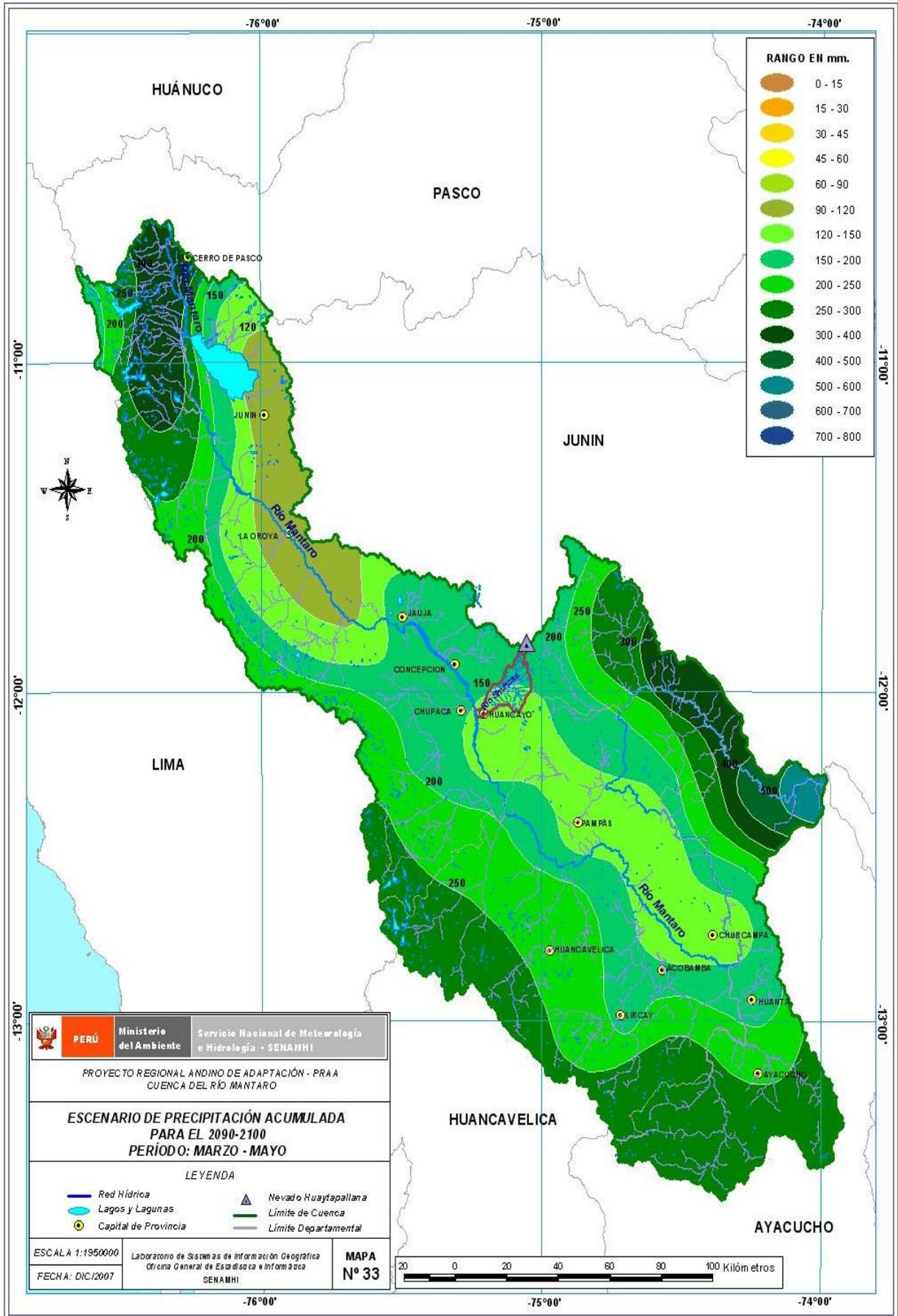


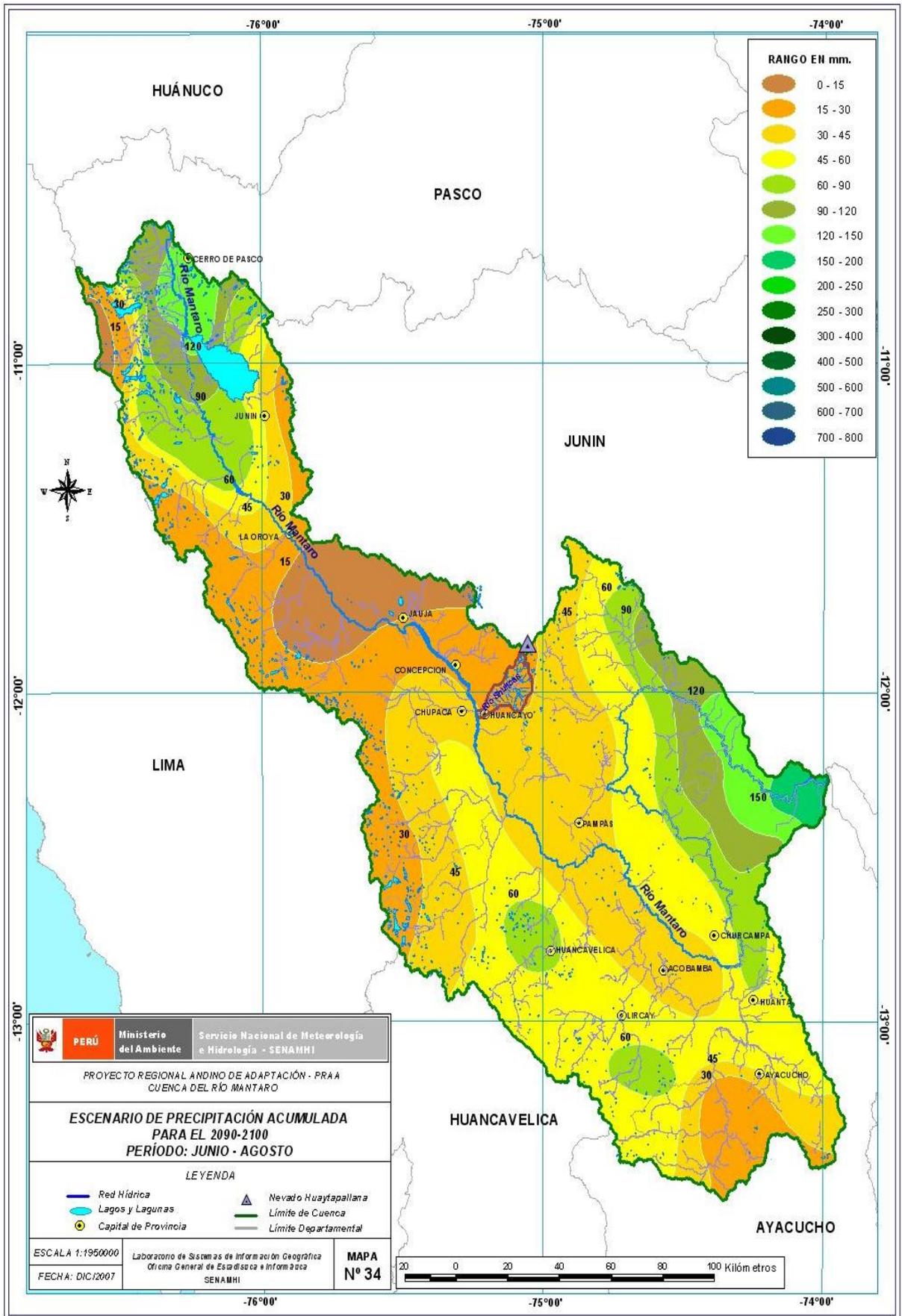


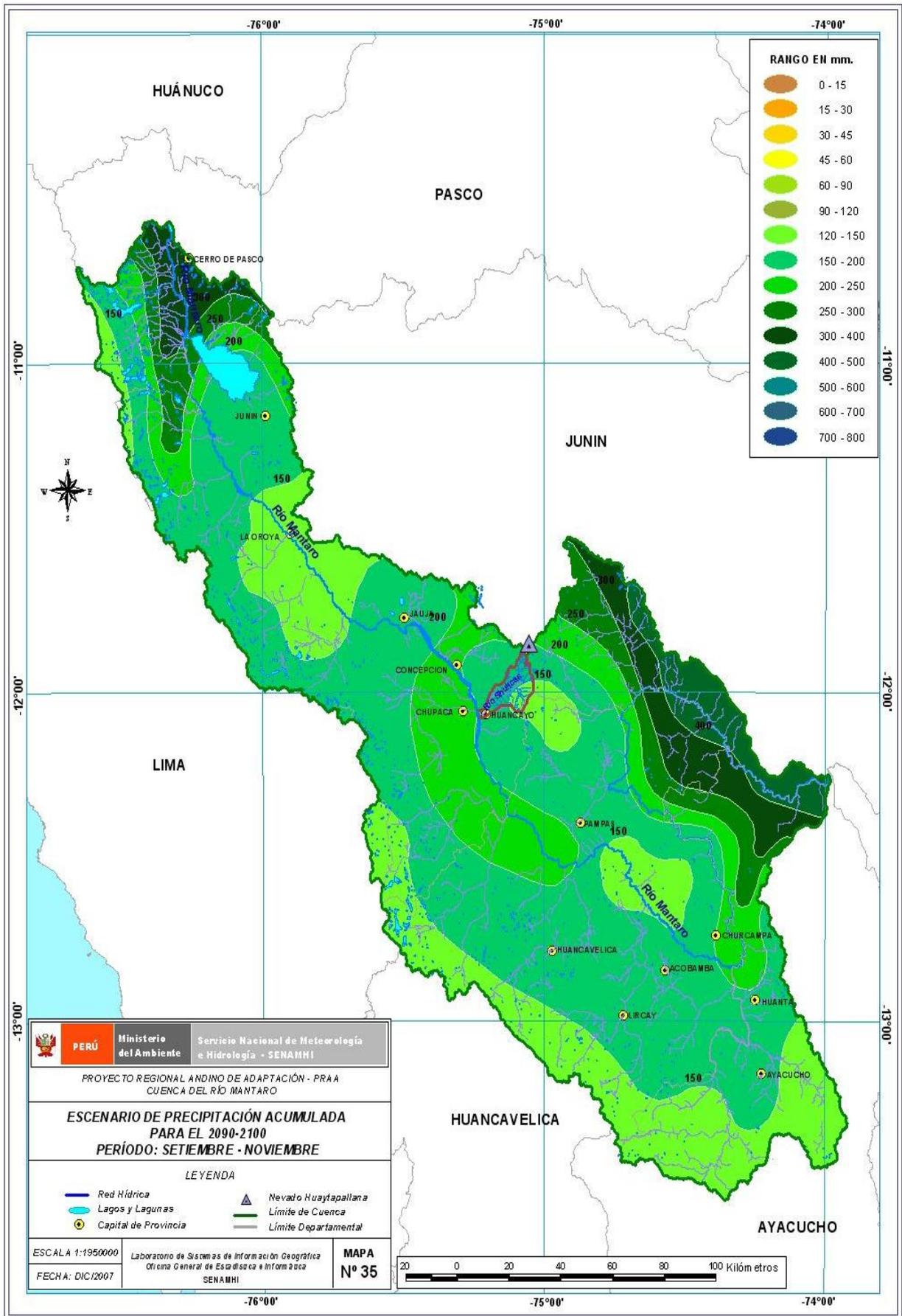












APENDICE 4

Conceptos y términos básicos

Para poder entender mejor este documento es necesario conocer algunos términos y definiciones relacionados con el tema. Este glosario se basa en el último reporte del IPCC (2007).

Ambiente

Es donde se encuentra reunido todos los procesos y agentes que intervienen en la vida, ya sean de carácter natural o antropogénico. La interacción de estos agentes entre sí tratan de lograr una armonía y un equilibrio.

Calentamiento Global

Es el fenómeno generalizado del efecto invernadero presentado a escala global, con aumentando de la temperatura de la tierra. Este fenómeno produce calentamiento en algunas zonas y enfriamientos en otras, siendo esto la causa principal del Cambio Climático.

Cambio Climático

Es una importante variación del clima que persiste en un periodo de tiempo prolongado. Tales variaciones se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, otros. Son debidos a causas naturales y, en los últimos siglos, también a la acción del hombre.

Contaminación

Es la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) o bien de una combinación de estos en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, la seguridad o para el bienestar de la población, o que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal. Es también la incorporación a los cuerpos receptores de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, o mezclas de ellas, que alteren desfavorablemente las condiciones naturales del mismo, o que puedan afectar la salud, la higiene o el bienestar de las personas.

Deshielo

Es la fusión de las nieves como consecuencia del aumento de las temperaturas. Una de las causas que produce esto es el calentamiento global que está elevando la temperatura de la tierra año tras año y que produce el deshielo de los casquetes polares, de los glaciares y otros cuerpos de hielo, provocando, entre muchos problemas, la pérdida de agua dulce para el abastecimiento de agua a la población.

Efecto Invernadero

Es el fenómeno a través del cual los gases invernadero retienen parte de la energía que el suelo emite después de calentarse por la radiación solar incidente y evita que la energía del sol recibida constantemente por la Tierra vuelva inmediatamente al espacio, produciendo a escala planetaria un efecto similar al observado en un invernadero. El efecto invernadero se ve acentuado por la emisión de gases como el dióxido de carbono y el metano, producidos por la actividad antropogénica

Escenarios Climáticos

Son descripciones plausibles de cómo las cosas pueden cambiar en el futuro. La metodología empleada para la construcción de escenarios varía de acuerdo al propósito de la evaluación. Por muchos años, los escenarios han sido utilizados por los gobiernos en los ámbitos empresariales y militares como base para

el planeamiento estratégico. Estos escenarios socioeconómicos proporcionan un marco para el pensamiento estructurado de cómo el futuro se puede revelar.

Gases de Efecto Invernadero

Son aquellos gases que contribuyen al Efecto Invernadero, debido a sus propiedades físicas y su interacción con la radiación infrarroja.

Incertidumbre

Expresión del grado de desconocimiento de un determinado valor (por ejemplo el estado futuro del sistema climático). Puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido e incluso cognoscible.

Modelo Climático

Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroefecto, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas.

Poder de Calentamiento Global

Es un valor referencial que permite comparar el grado de poder que tienen los gases de efecto invernadero con respecto al dióxido de carbono CO₂, el cual tiene un valor de poder de calentamiento global proporcional a 1 y el CH₄ de 25, lo que quiere decir que el CH₄ tiene 25 veces el poder de calentar la tierra con respecto al CO₂.

Predictibilidad

Capacidad de predecir el estado futuro de un sistema conociendo su estado actual y sus estados anteriores. El conocimiento de los estados actual y anteriores del sistema climático suele ser imperfecto, los modelos que mediante esos conocimientos generan predicciones climáticas son, por consiguiente, también imperfectos, y el sistema climático es inherentemente no lineal y caótico, todo lo cual hace que la predictibilidad del sistema climático sea inherentemente limitada. Incluso aunque se utilicen modelos y observaciones arbitrariamente precisos, existen limitaciones a la predictibilidad de un sistema no lineal como el clima.

Sequía

Whilhite y Glantz (1985) detectaron más de 100 definiciones de sequía, las cuales fueron categorizadas en cuatro grupos: sequía meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica. Asimismo definieron la sequía meteorológica como una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado. Por otro lado, el manejo y planeamiento de los sistemas de recursos de agua toma en cuenta los diferentes procesos hidrológicos como, excesos, inundaciones, deficiencias y sequías (Salas et al., 2005).

Variabilidad Climática

Variabilidad natural del sistema climático, en particular a escalas de tiempo estacionales o más prolongadas, se atiende preferentemente a determinadas pautas espaciales y escalas temporales, en virtud de las características dinámicas de la circulación atmosférica y de las interacciones con la superficie terrestre y oceánica. Tales patrones son conocidos también como regímenes, modos o teleconexiones.

Vulnerabilidad

Medida en que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, incluso la variabilidad climática y los episodios extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud y el índice de variación climática a que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación.