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

Título : Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Urubamba 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 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
Tiraje: 20 ejemplares
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. Héctor Vera Arévalo
Met. Félix Cubas Saucedo

Soporte computacional Ing. Richard Miguel San Martín

Recopilación Sr. Jorge Dávila Flores

Edición Ing. Grinia Avalos Roldán
Sr. Jorge Dávila Flores
Sr. Dante Bracamonte Luna
SO1.FAP 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 URUBAMBA	
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 Santa Teresa.....	19
2.2.2 Recurso suelo.....	20
CAPITULO 3.	
DIAGNOSTICO CLIMÁTICO DE LA CUENCA	
3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el periodo lluvioso.....	22
3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del río Urubamba.....	24
3.3 Clasificación climática de la Cuenca.....	26
3.4 Climatología de la Cuenca.....	27
3.4.1 Precipitación.....	27
3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación.....	27
3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación.....	28
3.4.2 Temperatura Máxima.....	29
3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima.....	29
3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima.....	30
3.4.3 Temperatura Mínima.....	30
3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima.....	30
3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima.....	32
3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas.....	32
3.5.1 Heladas.....	32
3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas.....	33
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 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.....	44
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.....	46
3.7.1 Precipitación.....	47
3.7.2 Temperatura.....	49

CAPITULO 4.

CAUDAL DEL RIO URUBAMBA PROYECTADO AL AÑO 2035

4.1 El modelo SAMS.....	51
4.2 Información.....	52
4.3 Metodología.....	53
4.3.1 Test de Normalidad.....	54
4.3.2 Estadísticas estacionales básicas.....	55
4.3.3 Ajuste del modelo estocástico.....	56
4.3.4 Prueba del Modelo.....	56
4.3.5 Generación de series sintéticas.....	57
4.4 Resultados.....	58
4.5 Conclusiones.....	60

CAPITULO 5.

ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

5.1 El modelo y el experimento del Time-Slice.....	62
5.1.1 El modelo.....	62
5.1.2 El experimento del Time-Slice.....	63
5.2 Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Urubamba.....	63
5.2.1 Metodología.....	63
5.2.2 Escenarios proyectados	65
5.2.2.1 Temperatura máxima.....	65
5.2.2.2 Temperatura mínima.....	68
5.2.2.3 Precipitación.....	71

CAPITULO 6.

RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	75
------------------------------------	-----------

CAPITULO 7.

BIBLIOGRAFÍA.....	78
--------------------------	-----------

APENDICE 1

RED HIDROMETEOROLÓGICA, MAPAS DE RELIEVE Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.....	81
--	-----------

APENDICE 2

MAPAS DE PROMEDIOS MULTIANUALES, EVENTOS EXTREMOS Y TENDENCIAS ACTUALES.....	85
---	-----------

APENDICE 3

ESCENARIOS CLIMÁTICOS AL AÑO 2100.....	116
---	------------

APENDICE 4

CONCEPTOS Y TÉRMINOS BÁSICOS.....	119
--	------------

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 Urubamba, 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 Pisac, 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.

El Capítulo 5 se refiere a 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 Urubamba, una de las principales regiones agrícolas y arqueológicas 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. Con ese propósito, el presente documento presenta información 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 Urubamba.
- Determinar la tendencia actual del caudal del río Urubamba y proyección al año 2035.
- Determinar escenarios futuros de la precipitación y temperaturas en la Cuenca del Urubamba.

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 o 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 generalizado de la nieve y el hielo, y el aumento del nivel del mar. En concreto, desde que las

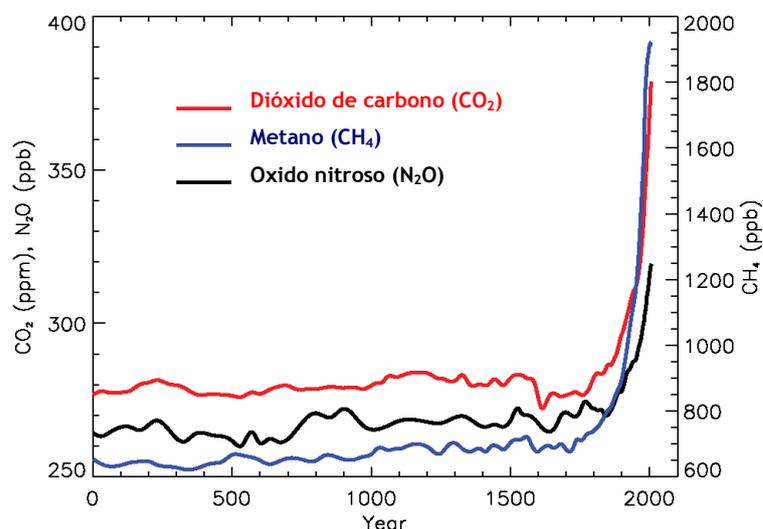
¹ Assesment Report 4

² Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Cambio Climático

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 (CO_2), metano (CH_4), óxido nítrico (N_2O) 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.

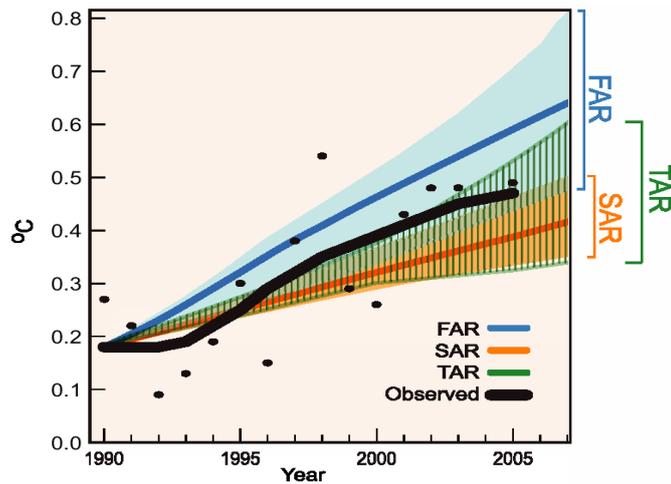
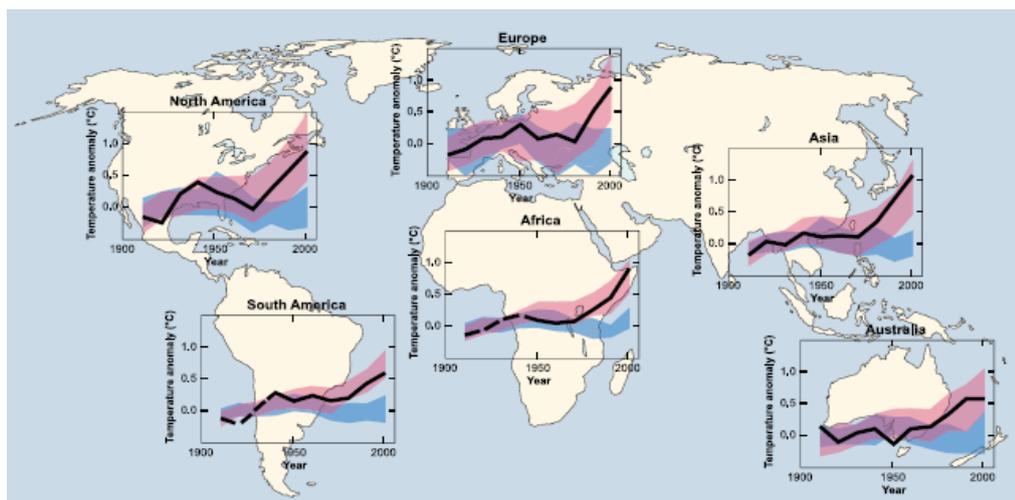


Figura N° 2. Temperatura Superficial promedio anual (Borhan, 2006), entre 1961 y 1990, lo proyectado en el Primer Informe de Evaluación - FAR³ (IPCC, 1990), en el Segundo Informe de Evaluación - SAR⁴ (IPCC, 1996) y en el Tercer Informe de Evaluación - TAR⁵ (IPCC, 2001). Las proyecciones del modelo “mejor 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).

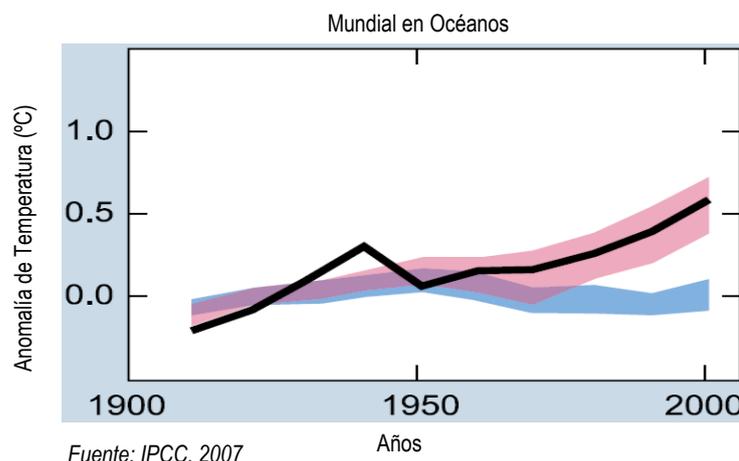


Figura Nº 4. Anomalías de temperatura del aire sobre los océanos, la línea celeste muestra resultados del modelo usando factores naturales, la rosada usando factores naturales y antropogénicos y la línea negra gruesa corresponde a las observaciones, por lo que se puede apreciar la efectividad del modelo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

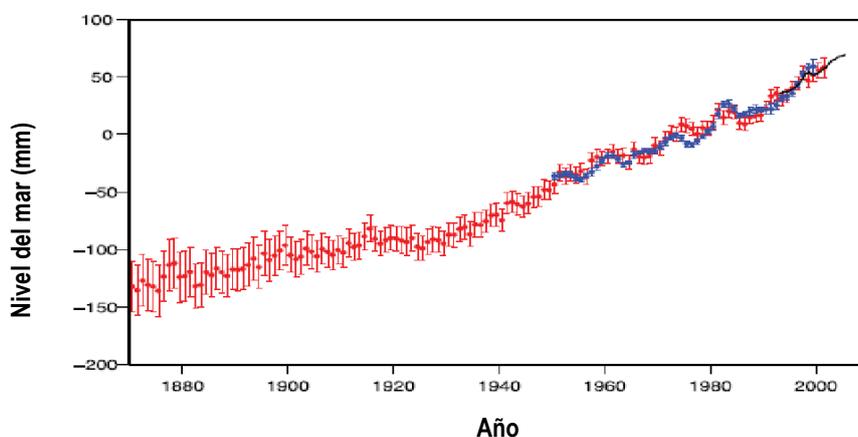


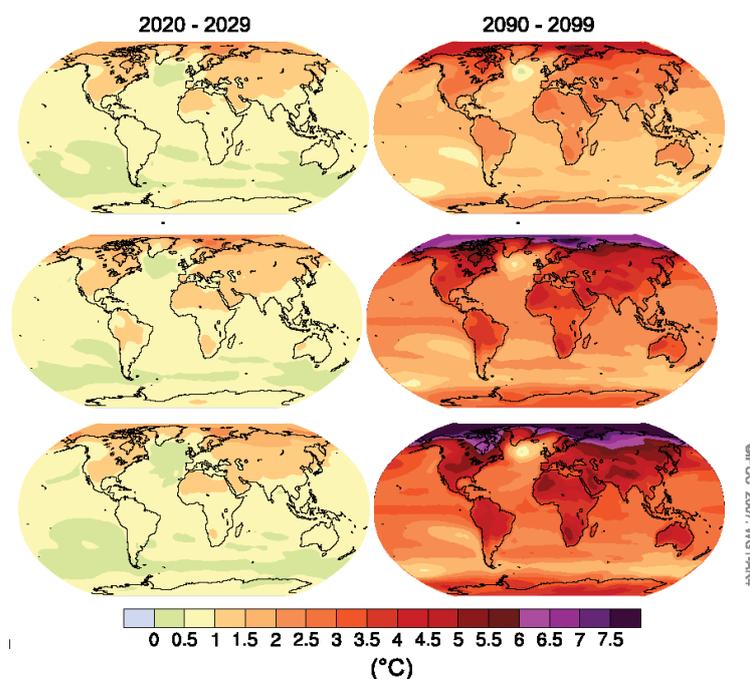
Figura Nº 5. Anomalías del nivel de los mares observados mediante satélites y datos directos.

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.

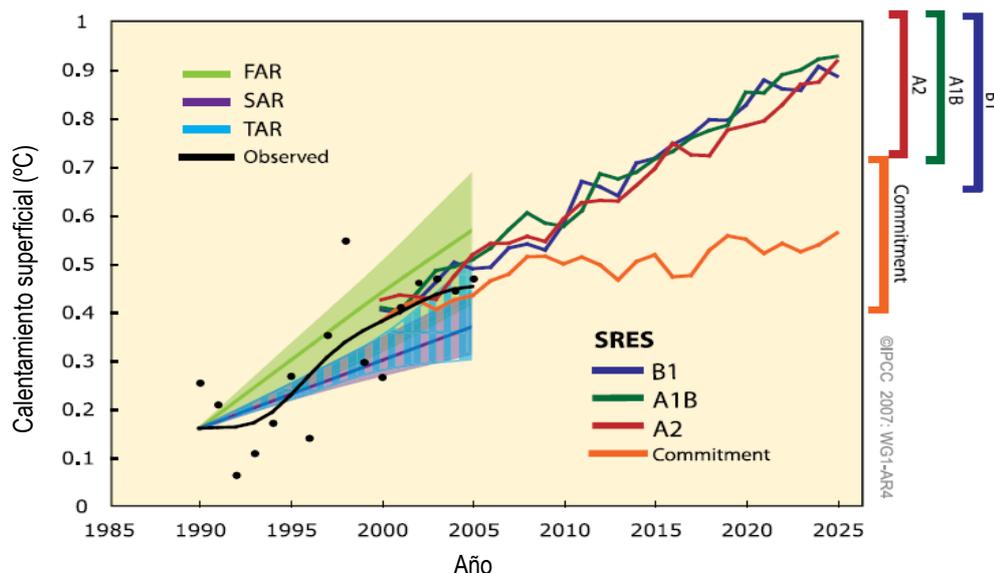


Fuente: IPCC, 2007

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.

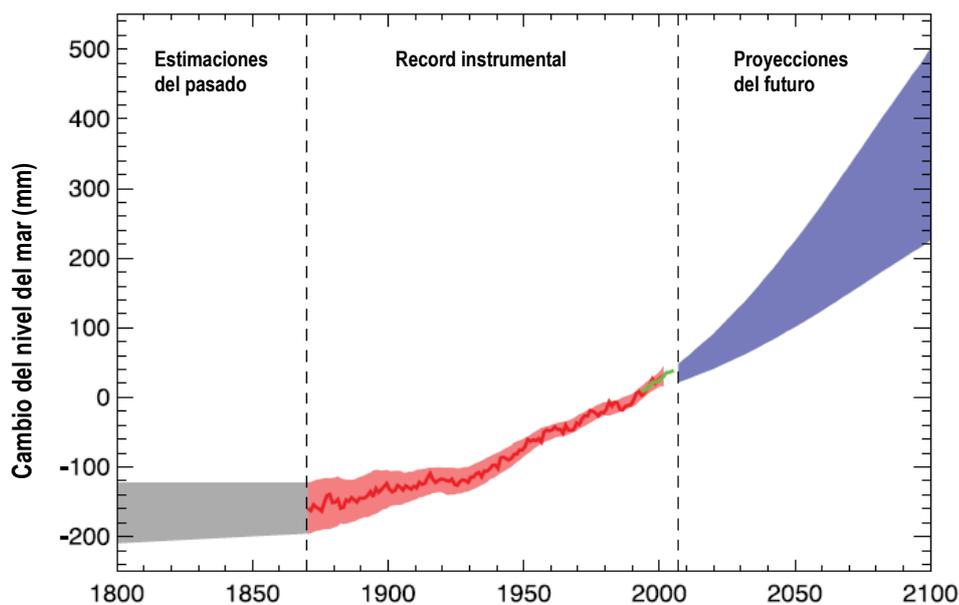
1.2.2.2 Nivel y Temperatura Superficial del Mar

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 contrasta con el incremento del número de días con heladas a razón de 6 días en cada 10 años

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

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).

De acuerdo a los estudios realizados por el Dr. Lonnie Thompson del Centro Byrd, entre 1963 y 1978 el glaciar del nevado Quelccaya (cordillera de Vilcanota) se redujo en un 20%; y el glaciar Qori Kalis, ubicado en la misma Cordillera, está desapareciendo a una velocidad alarmante: entre 1998 y 2001 retrocedió un promedio de 155 metros por año, 32 veces más rápidamente que lo que retrocedió desde de 1963 a 1978. Nevados cercanos como el **Salkantay** o el Chicón muestran los mismos efectos de retroceso y además con aludes y aluviones asociados, poniendo en riesgo la infraestructura y las poblaciones.

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.



Nevado Salkantay - Cusco

F uente: <http://www.atiq.com/pictures/>

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 IRD¹¹, 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 Urubamba.

¹⁰ INRENA: Instituto Nacional de Recursos Naturales

¹¹ IRD: Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia

CAPITULO 2

LA CUENCA DEL RIO URUBAMBA

“Sabías que el calentamiento global puede afectar al Nevado Cururana, del cual nace el Río Urubamba”¹²

2.1 Ubicación y características geográficas

La Cuenca del río Urubamba, está ubicada entre las de latitudes 10°10' y 14°37'; y las longitudes 70°48' y 73°45' oeste. Cuenta con una extensión aproximada de 76200 km². Tiene el punto más alto en el Nevado Auzangate a 6384 msnm, y el punto más bajo a 240 msnm en la localidad de Atalaya; entre los departamentos de Cuzco y el sur de Ucayali en el vértice oriental de los Andes. La cuenca del Urubamba soporta una población 817 311 habitantes. Está formada a su vez por las cuencas de los Ríos Vilcanota, Yanatili, Cumpirusiato, Yavero, Camisea, Pichá, Mishagua, Sepahua e Inuya, hasta confluir con el río Tambo formando el Río Ucayali uno de los principales tributarios del gran río Amazonas. La oferta ambiental de la cuenca se puede considerar como alta por la biodiversidad existente, por el gran número de zonas de vida y variedad de calidad de suelos.

El río Urubamba cuyo recorrido es de 862 km, con un área de 76 200 km², nace en los deshielos del nevado Cururana, a 5443 msnm al noreste del pueblo de Santa Rosa y con el nombre de Vilcanota atraviesa la alta meseta de Quequepampa y se dirige de sureste (SE) a noroeste (NO), por un valle muy poblado que concentra sus habitantes en centros poblados como Maranganí, Sicuani, Combopata, Quiquijana, Andahuaylillas, etc.

El ancho del Urubamba, que aguas abajo de Quillabamba varía entre 100 y 300 m, tiene aproximadamente 1000 m en su desembocadura. Las crecientes de sus aguas se inician entre noviembre y las mínimas se producen de mayo a septiembre.

El régimen de las aguas presenta crecientes relacionadas con fenómenos meteorológicos producidos en la alta montaña. Fuertes nevadas que caen en la parte alta de la cuenca, originan crecientes cuando las nieves se deshielan.

2.2 Importancia socioeconómica y potencialidades de la cuenca

La cuenca se ubica dentro de la Región Cuzco, capital arqueológica de América, por lo que el turismo es una primordial fuente económica. Las condiciones del clima y el uso de suelo son propicios para cultivos como el té, cacao, café, papa, maíz, coca, entre otros.

La población asentada en la Cuenca del Río Urubamba desarrolla diversas actividades como la agricultura, ganadería, minería, energía, turismo y otros. Siendo la **agricultura**, energética y **turística** una de las actividades económicas más importantes de esta cuenca.

¹² CONAM, <http://www.conam.gob.pe/cambioclimatico/pelicula/enperu.html>

En la agricultura, Cusco es líder en la producción de té, café y cacao. Es el segundo productor de papa y soya del Perú. Por otro lado, la explotación del Gas de Camisea es y será determinante para el desarrollo, pues hay dos ricos yacimientos de hidrocarburos. Las reservas recuperables se estiman en 750 millones de barriles de gas natural líquido. La cuenca tiene, asimismo, plantas procesadoras de fertilizantes y una avanzada industria cervecera. Aparte de todo ello, cuenta con las centrales hidroeléctricas de Quillabamba y de Machu Picchu.

El crecimiento explosivo de la población, nuevos procesos industriales, urbanización, la explotación para uso energético de la Gas de Camisea y variaciones del clima, han generado cambios drásticos que afectan los ecosistemas. Estos impactos han afectado a la Cuenca del Urubamba, que por su fragilidad y condiciones muy especiales ameritan una propuesta de gestión integral.

Respecto a las potencialidades del turismo en zonas alternativas, por ejemplo, en el área de interés de este estudio, el río Santa Teresa es utilizado por mochileros que lo cruzan para llegar a la orilla del río Vilcanota-Urubamba e ingresar de manera informal a ciudadela de Machu Picchu. Tomando la ruta hacia la hidroeléctrica, cruzando el río Santa Teresa y por las orillas del río Vilcanota-Urubamba, se observa algunas cascadas y se aprecia una parte del majestuoso Machu Picchu. Ante esta situación la comunidad de Santa Teresa quiere establecer un circuito turístico que permita apreciar las montañas del abra Málaga, las pozas termales de Santa Teresa y Choquequirao.

2.2.1 Recurso Hídrico

El río Urubamba cuyo recorrido es de 862 km, con un área de 76 200 km², nace en los deshielos del nevado Cunurana, cerca del abra La Raya, provincia de Melgar (Puno) a 5443 msnm. Con el nombre de *Vilcanota* atraviesa la alta meseta de Quequepampa y se dirige de sureste (SE) a noroeste (NO), por un valle muy poblado.

Al pasar el río Vilcanota por Urubamba, toma la denominación de este poblado y se llama río Urubamba, vocablo quechua que significa "valle sagrado". Sus aguas siempre discurren de SE a NO, hasta Quillabamba, donde cambia de rumbo de SO a NE, hasta confluir con el río Yanatile, su afluente por la margen derecha, allí forma una curva pronunciada y toma una dirección Este a Oeste, hasta confluir con el río Coshireni y a partir de entonces corre de Sur a Norte, hasta recibir las aguas de los ríos Mishagua y Shepagua (Alarcón, 1991).

El río Urubamba, en su sector interandino, corre por un lecho con fuerte pendiente lo que origina que sus aguas se desplacen a gran velocidad. El valle que forma es estrecho y su ensanchamiento se produce cuando el río penetra a la Selva Alta. Grandes cañones fluviales, como el que se observa en la zona de Machu Picchu, alternan con valles amplios a lo largo del río Urubamba, hasta concluir con el imponente Pongo de Mainique, donde el lecho fluvial que se angosta considerablemente, forma una ruptura de pendiente. El valle que forma el río Urubamba y sus afluentes en la Selva Alta, aguas arriba del pongo de Mainique, es conocido con el nombre de valle de La Convención. Finalmente el río Urubamba entrega sus aguas al río Tambo, a la altura de la localidad de Atalaya, para dar origen al río Ucayali, en la región del mismo nombre (MINEM, 2005).

3.2.1.1 El río Santa Teresa

El **río Santa Teresa** nace con el nombre de río Chalán a una altitud de 4650 msnm de los deshielos de los glaciares ubicados en la provincia de Anta (Cusco). En su trayecto recibe el aporte de la quebrada Totorayoc que se origina del proceso de deglaciación de estos nevados, al confluir cerca de la localidad de Herbabuenayoc con la quebrada Huamantay que proviene del

nevado **Salkantay**, toma del nombre de río Santa Teresa cuya longitud es de 24.1 Km hasta su confluencia con el río Vilcanota-Urubamba. Un afluente importante por la margen izquierda es el río **Sacsara** (con cota máxima de 4350 msnm). La subcuenca del río **Sacsara** tiene algunas lagunas de origen glaciar, resaltando entre ellas las lagunas: Llaspay, Negrococha, Maramuyoc, Chaupicocha y Pucapuca (Vera, 2007). En su trayecto se encuentran comunidades como: Bayono, Lucmabamba, Sillapata, Saucépampa, **Santa Teresa** entre otros, cuyos cultivos de café, maíz, palta y plátano son irrigados por aguas del río Santa Teresa.

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. Población ocupada - Cusco

CUENCA DEL URUBAMBA			
Departamento	Población Censada	% de Población ocupada en agricultura	% de Población ocupada en otros servicios
CUSCO	331192	52.8	35.5

Fuente: Base de datos provincial, INEI.¹³

De acuerdo al último Censo Agropecuario de 1994, la superficie agrícola en la Región Cusco representa el 13.2%, mientras que los pastos naturales representan el 66.1% ubicados mayormente en las provincias alto andinas. No se considera la llanura amazónica ni la ceja de selva.

El gran porcentaje población ocupada en la agricultura tiene una gran importancia en la economía regional y nacional. Tenemos que en el Cusco, en diciembre 2006, la producción de papa, ascendió a 3959 toneladas, cifra que representó un crecimiento considerable de 62.5%, respecto al volumen producido en diciembre 2005, que fue de 550 toneladas, influenciado por la alta temporada de cosecha y superproducción de papa en las diferentes variedades. Ver figura 9.

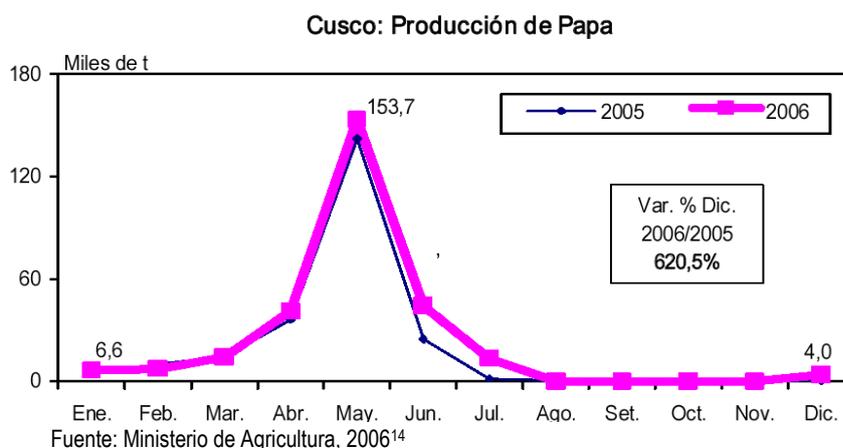


Figura N° 9. Producción de papa en la región Cusco.

¹³ INEI, <http://desa.inei.gob.pe/mapasbid/default.asp>

¹⁴ Ministerio de Agricultura, INRENA 2006

Otros productos agrícolas que presentaron similar comportamiento, fueron: palta en 98.6%, arveja grano verde 40.1% y papaya en 17.4%, entre los principales. La producción fiscalizada de gas natural, se incrementó en 25.1%, respecto a lo obtenido en diciembre 2005, como resultado de la mayor actividad extractiva y mejor rendimiento promedio obtenido del lote 88 en los yacimientos de Camisea. Ver figura 10.

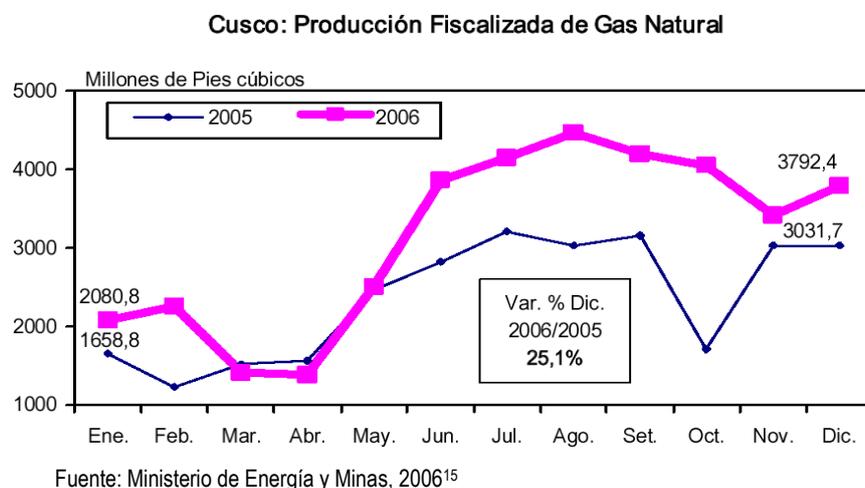


Figura N° 10. Producción fiscalizada de Gas Natural en la región Cusco.

El número de visitantes a la ciudadela Inca de Machu Picchu, en el último mes del 2006, alcanzó los 41 mil 409 visitantes, superior en 8.7% a lo reportado en el mismo mes del 2005, impulsado por la promoción turística nacional e internacional.

En diciembre 2006, los ingresos recaudados por la SUNAT, confirmaron la tendencia creciente en la recaudación, al incrementarse en 101,0%, respecto a lo captado en similar mes del 2005, como consecuencia de la mayor recaudación del impuesto a la renta. Asimismo, subió el número de contribuyentes inscritos en 7,0%.

Es por este sistema de producción que esta cuenca presenta diversos beneficios económicos (Ver tabla N° 3). Si tomamos en cuenta la recaudación de la SUNAT por parte de las actividades en cada uno de estos departamentos tenemos:

Tabla N° 3. Recaudación - Cusco

CUENCA DEL RIO URUBAMBA		
Departamentos	% Aumento Recaudación	% Aumento Inscritos
CUSCO	101.0	7.0

Fuente: INEI 2006 ¹⁶

Para citar por ejemplo la importancia del río de la Sub cuenca de Santa Teresa, en su trayecto las aguas de este río irrigan tierras con cultivares como el café, maíz, palta y plátano principalmente, en comunidades como Bayono, Lucmabamba, Sillapata, Saucepampa, Santa Teresa entre otros.

¹⁵ Ministerio de Energía y Minas, Hidrocarburos 2006

¹⁶ Avance Económico y Social Regional Cusco, Diciembre, INEI 2006

CAPITULO 3

DIAGNOSTICO CLIMATICO DE LA CUENCA

“Desde la década de los ochenta, el tiempo de retorno de periodos húmedos en la cuenca del Urubamba 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 11), 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 12), 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.

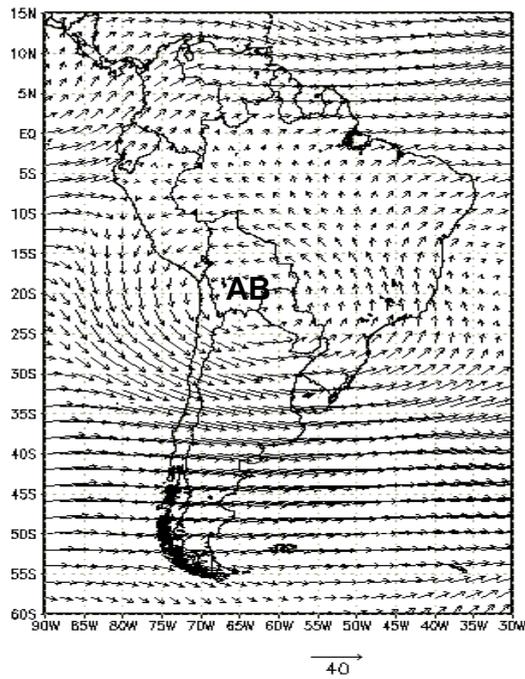


Figura N° 11. Campo de viento medio en 200 hPa en ms^{-1} durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo global T42CGCM/MRI. La AB se centra en promedio sobre los 19°S y 21°S , mostrando vientos comparativamente más intensos sobre los subtropicos con una marcada curvatura anticiclónica ($30^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$).

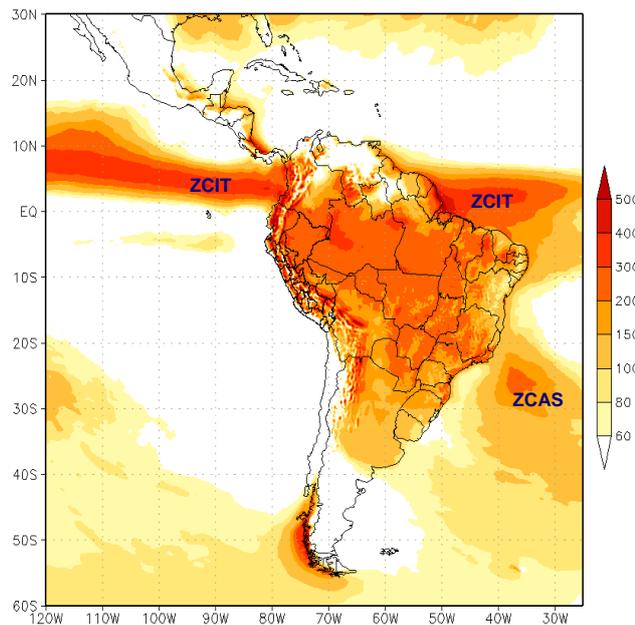


Figura N° 12. Campo de precipitación promedio en mm mes^{-1} durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI-JMA.

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°S - 40°S ; 80°W - 120°W aproximadamente (Satyamurty, 1999). En la figura 13 (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).

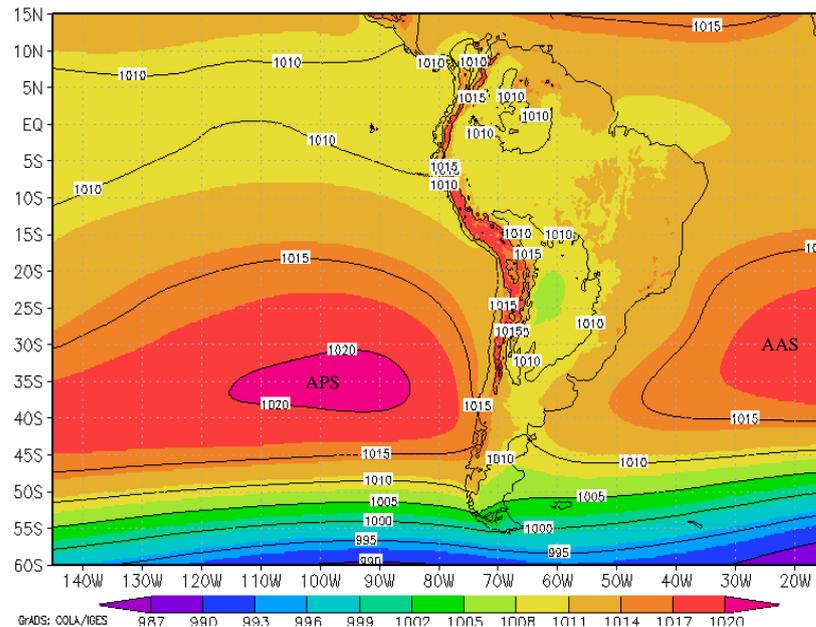


Figura N° 13. Campo de presión a nivel del mar durante el verano del hemisferio sur, simulado por el modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI-JMA.

3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del río Urubamba

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 14, 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 15).

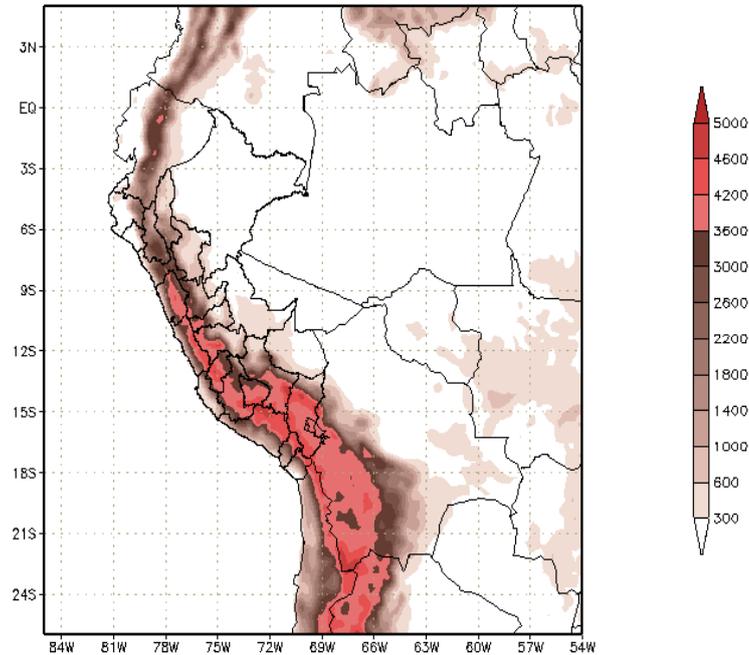


Figura N° 14. Topografía de la Cordillera de los Andes según el Modelo TL959L60 MRI-JMA.

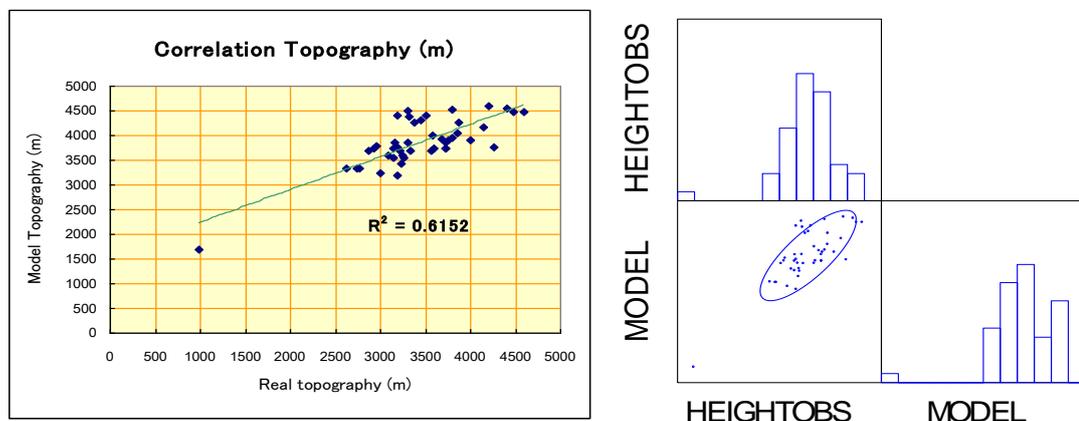


Figura N° 15. Correlación de Pearson entre la elevación real de las estaciones y la topografía del modelo.

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.

Las precipitaciones en la cuenca del río Urubamba (sector sur oriental de los Andes del Perú), acontecen cuando la humedad advechada por los vientos del este es canalizada y confinada por las abruptas vertientes de la cuenca, que tiene una orientación aproximadamente meridional. Debido a que este flujo recorre menos distancia en comparación a otras cuencas como la del Mantaro, es más húmedo, inestabilizándose con mayor facilidad, dando como resultado cantidades de precipitación mayores a las cuencas mencionadas anteriormente, sobre todo en la parte baja de la cuenca (Bajo Urubamba). En las partes altas, este ingreso de humedad es limitado por un ramal de la Cordillera oriental (Cordillera de Vilcanota) lo cual se ve reflejado en los acumulados anuales de precipitación en localidades como Sicuani (594.1 mm), Cay Cay (330.9 mm) entre otros. (Cubas, 2005).

3.3 Clasificación climática de la Cuenca

La cuenca del río Vilcanota o Urubamba, comparte horizontes entre tierras y valles interandinos, ceja de selva y llanura amazónica. El espacio geográfico (la cuenca) desciende desde los 4326 msnm (provincia de Canchis) hasta Machu Picchu (provincia de Urubamba) en una superficie de 8939.2 Km² en la que se ubican 8 provincias y 42 distritos. Después de Machu Picchu, viene la parte baja del río conocido como Bajo Urubamba cuyo clima difiere ampliamente del sector antes mencionado.

La clasificación climática en la cuenca del río Urubamba (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 la cuenca predomina una amplia extensión de Selva, con clima cálido húmedo a muy húmedo (A'H3- A'H4) en gran parte de las estaciones del año, correspondiéndole este tipo del clima a localidades como Sepahua, Malvinas, Echarate y Machu Picchu.

La cuenca presenta además una región que va de clima semifrío húmedo D'H3 a clima frío seco C'H2 en donde se asientan localidades de gran población como Anta, Cusco, Urcos y Sicuani, donde 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.

En la zona correspondiente al poblado de **Santa Teresa** (zona de interés del Proyecto a 1830 msnm), predomina un clima lluvioso, pero con otoño e invierno secos, presencia de humedad y un régimen térmico semifrío; sin embargo en el dominio de la subcuenca del río Santa Teresa, las características climáticas anteriormente descritas se alternan con sectores muy lluviosos, semicálidos y más húmedos, incluso hay sectores templados.

3.4 Climatología de la Cuenca

3.4.1 Precipitación

3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación

Las precipitaciones en la cuenca del Urubamba comprende dos periodos bien definidos en el año, un periodo húmedo o lluvioso que se inicia en septiembre y termina en abril del siguiente año y un periodo de estiaje o de ligeras precipitaciones que comprende desde mayo hasta agosto.

Dentro del periodo lluvioso, en casi toda la cuenca, los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de verano, siendo enero el mes en donde se registran las precipitaciones más altas, sin embargo, en la parte baja de la cuenca, las precipitaciones máximas se dan entre enero y febrero. Los meses de menor precipitación correspondientes al periodo de estiaje, coincide con la estación de invierno, siendo el mes de julio donde se registran las precipitaciones más bajas.

En el presente informe, el análisis de la precipitación se ha enfatizado en la parte alta y media de la cuenca, por ser de interés en los aspectos de disponibilidad hídrica y retroceso glaciar.

En la tabla N° 4, se presentan los valores climatológicos a nivel estacional y anual en las estaciones meteorológicas que cuentan con información de mayor record.

Tabla N° 4. Climatología del acumulado anual (mm año⁻¹) y estacional (mm trimestre⁻¹) de la Precipitación en estaciones de la Cuenca del río Urubamba. Periodo: 1971-2000
Fuente de datos: SENAMHI

ESTACIONES	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON
Anta Ancachuro	870.4	501.2	191.0	16.0	162.2
Calca	539.6	299.8	123.7	15.2	101.0
Cay Cay	330.9	183.1	85.2	8.6	54.1
Chitapampa	682.9	384.1	141.6	18.3	139.0
Cusco	707.0	385.0	158.3	18.5	145.1
Granja Kayra	666.9	367.9	145.1	12.4	141.5
Pisac	586.2	312.9	161.8	15.9	95.6
Quillabamba	1283.0	602.7	354.6	73.0	252.7
Sicuani	594.1	318.6	151.0	14.4	110.2
Urubamba	435.0	242.1	95.9	13.9	83.1
Machu Picchu	2009.6	870.3	557.2	166.0	416.2

El trimestre DEF es el más lluvioso en la cuenca, seguido del trimestre MAM y con valores muy similares el trimestre SON, mientras el trimestre menos lluvioso es JJA. Los valores acumulados de las precipitaciones en cada trimestre varían ligeramente en la parte alta de la cuenca sobrepasando los 300 mm en el trimestre lluvioso, a excepción de la estación Cay Cay (183.1 mm), mientras que en el trimestre de menos precipitación los acumulados no sobrepasan los 20 mm a excepción de Quillabamba y la zona que comprende desde Machu Picchu hasta la parte baja de la cuenca en donde los acumulados de precipitación totalizan más de 70 mm en el trimestre JJA y más de 600 mm en el trimestre DEF.

En la figura 16, se observa que el ciclo anual de la precipitación en las estaciones de la cuenca del Urubamba, tienen un comportamiento similar, no obstante, se aprecia marcadas diferencias, por ejemplo, entre la zona de Machu Picchu, en donde se presentan mayores precipitaciones de aprox. 300 mm mes⁻¹ en el periodo de lluvias y 50 mm mes⁻¹ en el periodo de estiaje, en relación con las estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca, las mismas que registran entre 50 a 100 mm mes⁻¹ en el periodo lluvioso y menos de 10 mm mes⁻¹ en el periodo de estiaje, siendo precisamente estas estaciones las que presentan mayor estacionalidad en las lluvias. Este comportamiento diferenciado de la precipitación obedece a la configuración geográfica de la cuenca, siendo el factor altitud el más importante, es por ello que estaciones que se encuentran a menor altitud (cuenca baja del Urubamba) están más expuestas al flujo predominante del este que arriban al valle cargados de humedad procedente del Atlántico y la Amazonia y, que al chocar con el contrafuerte andino, se desencadenan precipitaciones orográficas de gran magnitud y que son re-alimentadas por condiciones térmicas favorables de la zona baja de la cuenca.

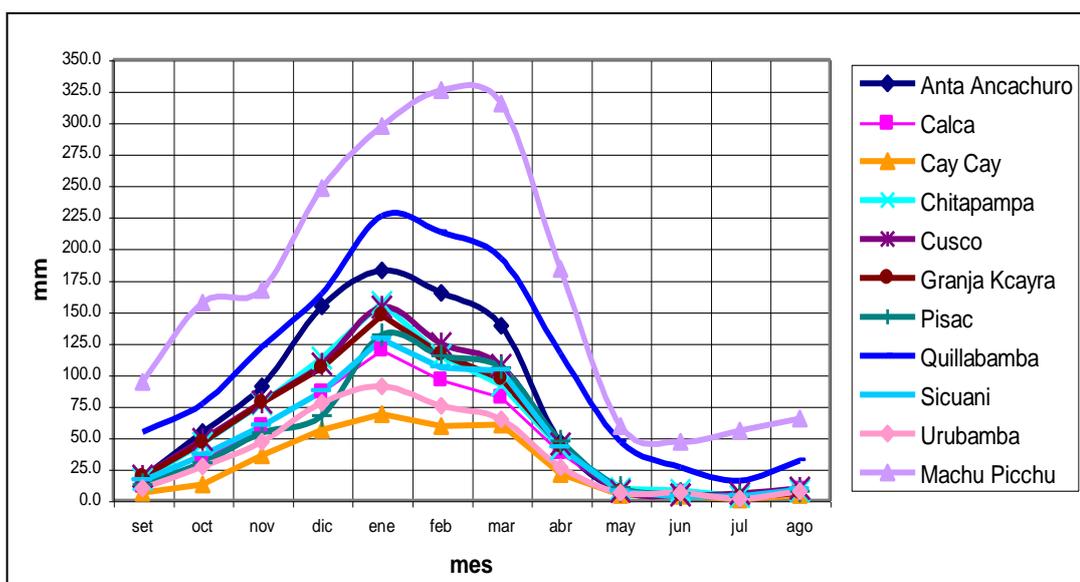


Figura N° 16. Ciclo anual de la precipitación en diferentes sectores de la cuenca del río Urubamba (mm mes⁻¹)

La concentración de las precipitaciones significativas se dan entre octubre y abril, representando entre el 94% del total anual en la parte alta de la cuenca, mientras en las zonas cuya altitud son menores de los 2600 msnm, representa el 85% del total anual. Asimismo, entre enero y marzo el porcentaje de las precipitaciones representan entre el 60 y 64% del total del periodo comprendido entre octubre a abril.

3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación

En el mapa 04 (Apéndice 2), correspondiente al promedio multianual de la precipitación acumulada, se observa que los valores más altos se presentan en la región conocida como Bajo

Urubamba, esto es, en el sector central norte de la cuenca, en donde las precipitaciones totales anuales superan los 1000 mm año⁻¹, siendo la vecindad del distrito de Malvinas donde se registra en promedio un total anual de más de 4000 mm año⁻¹. Estos valores son coherentes con los encontrados en la Red de Monitoreo Pluviométrico de la empresa Techint S.A. en el Ducto del Gas de Camisea (operada por SENAMHI entre 2002 – 2003), encontrándose que en Paratori (aprox. 20 Km al sur de Malvinas) la precipitación de un mes (febrero 2003) totalizó más de 1000 mm mes⁻¹, considerándosele una región de alta pluviosidad.

Un núcleo con precipitaciones anuales superiores a 2000 mm año⁻¹, se extiende en las inmediaciones de los distritos de Echerate y Machu Picchu, ubicados en la parte central de la cuenca; así mismo, se observa otro núcleo con precipitaciones del mismo orden en el extremo más norte de la cuenca, en el distrito de Sepahua.

Hacia el sector sur, correspondiente a las partes medias y altas de la cuenca, los acumulados anuales son de menor cuantía, del orden de 400 a 800 mm año⁻¹, siendo la estación de Cay Cay, ubicada en el sector este de la cuenca la que totaliza sólo 330 mm año⁻¹. Otro sector importante de precipitaciones se encuentra en el sector más oriental y más occidental de la cuenta alta; es decir, los sectores colindantes con el Altiplano y la cuenca del río Apurímac respectivamente, con valores entre 800 y 1100 mm año⁻¹.

3.4.2 Temperatura Máxima

3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima

El comportamiento de la temperatura máxima durante el año para algunas estaciones ubicadas en la cuenca del Urubamba se aprecia en la figura 17. La temperatura del aire está directamente relacionada con la altitud, observándose diferencias significativas de esta variable en zonas ubicadas en diferentes altitudes, así como por la exposición de la cuenca al movimiento solar diario. Podemos inferir entonces que en zonas ubicadas a mayores altitudes (encima de los 2500 m.s.n.m.) las temperaturas máximas del aire oscilan entre 18 a 23 °C, mientras en las zonas ubicadas a debajo de 1000 msnm oscilan entre 28 a 33°C.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos máximos, uno generalmente en mayo y el más intenso en octubre, mientras los valores mínimos se dan en los meses de verano. Este comportamiento de la temperatura más alta en el mes de octubre es debido a que durante esta temporada se recibe la máxima radiación incidente y no se tiene cobertura nubosa, mientras en el verano se registran los valores menores de la temperatura máxima debido a que el cielo presenta mayor cobertura nubosa, por ser una época de lluvias.

En localidades ubicadas en la parte alta de la cuenca (por encima de los 2500 msnm), se advierte con mayor notoriedad este comportamiento de los dos picos máximos, mientras que en zonas ubicadas en la parte baja (menores de 1000 msnm) sólo es notable el máximo que se da en octubre. En la zona de Machu Picchu el primer máximo se da en mayo, pero el segundo máximo se da en agosto y no en octubre debido a que en esta temporada la zona presenta mucha nubosidad debido que se registran los vientos del noreste cargados de humedad y se producen convección orográfica y generación de lluvias, constituyendo una de las zonas más lluviosas de la cuenca.

El rango anual de las temperaturas máximas durante el año presenta valores entre 2.0 y 2.5°C en zonas por debajo de los 2500 msnm (excepto Sicuani que está a mayor altura). En el resto de la cuenca el rango varía entre 1.4 a 1.8°C, observándose que la variación interestacional es muy ligera, por lo cual la temperatura máxima promedio anual puede ser representativa de la temperatura máxima para cualquier época del año.

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.

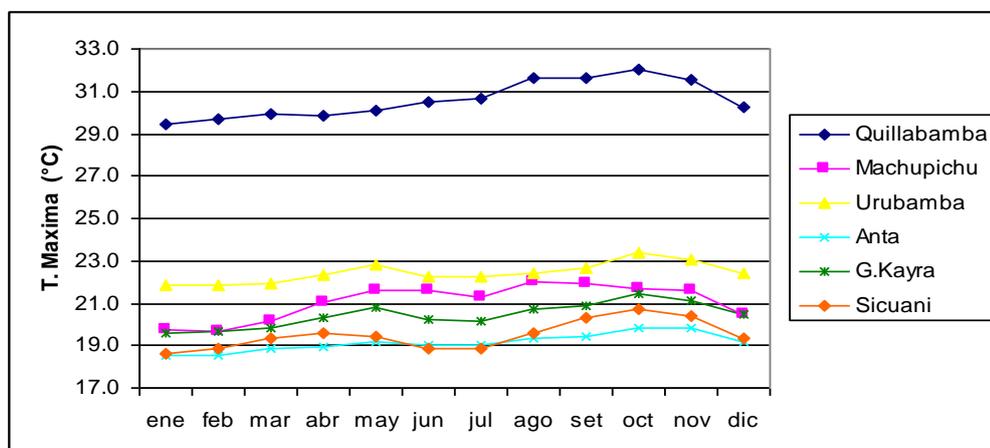


Figura N° 17. Ciclo anual de la temperatura máxima en la cuenca del río Urubamba

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

Estaciones	T. anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Quillabamba	30.6	2.5	29.8	30.0	30.9	31.7
Machu Picchu	21.1	2.3	20.0	20.9	21.6	21.7
Urubamba	22.4	1.6	22.0	22.4	22.3	23.0
Anta Ancachuro	19.2	1.4	18.8	19.0	19.1	19.7
Granja Kayra	20.4	1.8	19.9	20.3	20.4	21.2
Sicuani	19.5	2.1	18.9	19.4	19.1	20.5

3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima

El mapa 05 (ver apéndice 2), muestra la distribución espacial del promedio multianual de la temperatura máxima en la cuenca del Urubamba. El gradiente térmico va de norte a sur; es decir, desde la cuenca baja hacia (mayores temperaturas) hacia la cuenca alta (menores temperaturas), por lo que la altitud es un factor determinante. Un núcleo cálido importante, coincidente con la región de máxima pluviosidad (Malvinas y Sepahua), presenta valores del orden de 31°C. En la parte central de la cuenca las máximas oscilan entre 21°C y 25°C, mientras que en el extremo sur, en las cercanías del nevado Salkantay (provincia de Anta) los valores fluctúan entre 17°C y 19°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 Urubamba se aprecia en la figura 18, observándose una mayor estacionalidad en comparación con la temperatura máxima. Las temperaturas mínimas oscilan durante el año entre 10 y -5 °C

en localidades ubicadas entre los 2800 y 3800 msnm, mientras que en localidades por debajo de esa altitud (Quillabamba y Machu Picchu) las temperaturas mínimas varían entre 9 y 19 °C.

La temperatura mínima durante el año presenta los valores más bajos en el mes de julio, lo cual está asociado al máximo enfriamiento debido a la escasez de nubosidad y baja humedad durante este periodo. La ocurrencia de los valores más altos de la temperatura mínima ocurre entre octubre y marzo, asociado a la temporada de lluvias, época en la que el contenido de humedad en la atmósfera se incrementa y la mayor presencia de nubes impide el enfriamiento nocturno, hecho que es más acentuado en localidades por encima de los 2500 m. En la zona de Machu Picchu y en toda la parte baja de la cuenca (Bajo Urubamba), las temperaturas mínimas más altas se dan en noviembre, manteniendo similares valores durante los meses lluviosos.

La temperatura mínima presenta un rango anual más amplio en comparación con la temperatura máxima, tal como puede observarse en la Tabla 6. Hay una similitud en los rangos en localidades ubicadas debajo de los 2600 m, los cuales varían entre 2.9 y 3.2 °C, mientras que en localidades por encima de este nivel, los rangos anuales varían entre 7.7 y 9.5 °C, debido a una marcada estacionalidad.

En la misma Tabla 6 se observa las temperaturas mínimas estacionales por trimestres para algunas localidades representativas de la cuenca del Urubamba, en la que se observan que el trimestre más frío se presenta en JJA, mientras que el trimestre más cálido se da en DEF, los otros dos trimestres tienen valores muy similares. Asimismo se puede observar que en localidades mayores a 3300 m, en el trimestre JJA, predominan las temperaturas mínimas por debajo de los 0°C.

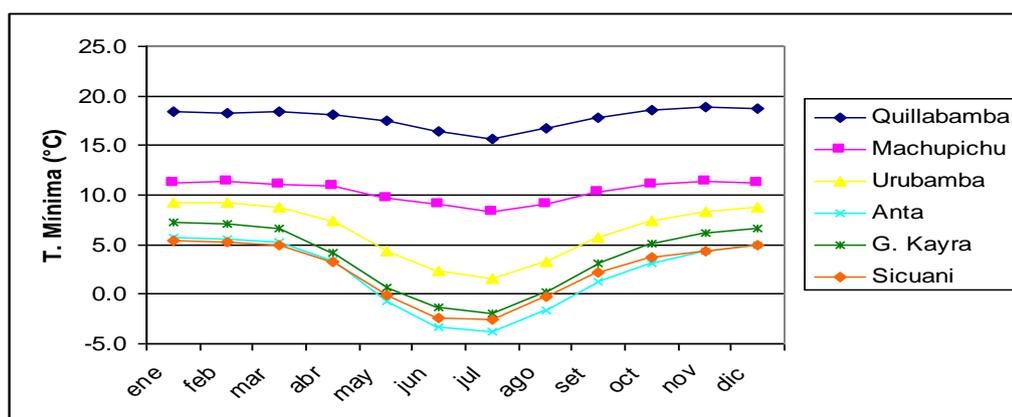


Figura N° 18. Ciclo anual de la temperatura mínima en la cuenca del Urubamba

Tabla N° 6. Temperaturas mínimas estacionales en °C, promedio 1965-2000

Estaciones	Media Anual	Rango anual	DEF	MAM	JJA	SON
Quillabamba	17.8	3.2	18.5	18.0	16.3	18.4
Machu Picchu	10.4	2.9	11.3	10.6	8.8	10.9
Urubamba	6.4	7.7	9.1	6.9	2.4	7.1
Anta Ancachuro	2.0	9.5	5.4	2.7	-2.9	2.9
Granja Kayra	3.7	9.2	7.0	3.8	-1.0	4.8
Sicuani	2.4	8.0	5.2	2.7	-1.8	3.5

3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima

En el mapa 06 (Apéndice 2) tenemos la distribución espacial de la temperatura mínima del aire anual en la cuenca del Urubamba. Las temperaturas más bajas se presentan en los sectores centrales y sur occidental de la cuenca, entre las provincias de Anta, Cusco y Canas, con valores entre los 0 y 3° C en promedio, observándose que en las inmediaciones del nevado Salkantay (provincia de Anta), los valores son cercanos a los 0 grados. En la parte central de la cuenca los valores de la temperatura mínima fluctúan en un rango de 5 a 9 °C, correspondiéndole un clima más templado durante el año (provincias de Urubamba, Paucartambo y Calca); mientras que en el sector norte de la cuenca o Bajo Urubamba (provincia de La Convención), la temperatura mínima anual oscila entre de 11 a 21 °C, siendo los distritos de Quellouno, Quimbiri y Echerate, los que registran las temperaturas mínimas más altas de la cuenca. De manera similar a la temperatura máxima, el gradiente térmico se configura de norte a sur; estimándose un máximo gradiente de norte a sur del orden de $-0.21^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ entre la parte norte y central de la cuenca.

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).

La cuenca del Urubamba presenta una topografía muy abrupta especialmente desde Machu Picchu hasta Sicuani, con un valle bastante estrecho y laderas que están orientadas en diferentes direcciones. Las heladas que se presentan en esta cuenca (en localidades por encima de los 2500 de altitud), son debido mayormente a procesos irradiativos; es decir, 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 19 (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.

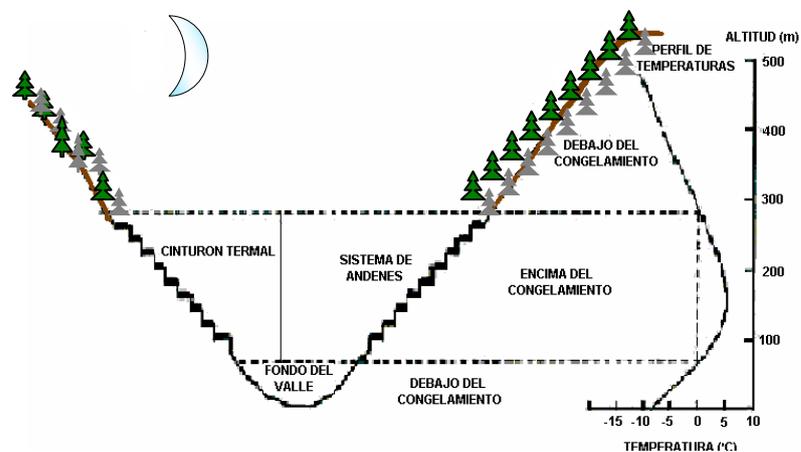


Figura N° 19. Esquema del enfriamiento irradiativo nocturno

3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas

En la figura 20 se muestra la frecuencia mensual de las heladas para algunas localidades de la cuenca del Urubamba ubicadas por encima de los 2600 msnm. Se observa a nivel estacional, que la mayor frecuencia de las heladas se registra en los meses de invierno (junio-agosto), con un máximo en julio, que es explicado por la ausencia de nubosidad y baja humedad. En función a la altitud, las localidades ubicadas entre 2600 a 3000 msnm, la frecuencia de heladas no supera los 10 días de heladas por mes. En tanto, en localidades superiores a los 3000 msnm la frecuencia es mayor a 20 días por mes.

En verano, la frecuencia de heladas es muy baja o nula, debido a la presencia de cobertura nubosa y alta humedad atmosférica proveniente de la Amazonia; parte de esta época comprende el periodo libre de heladas.

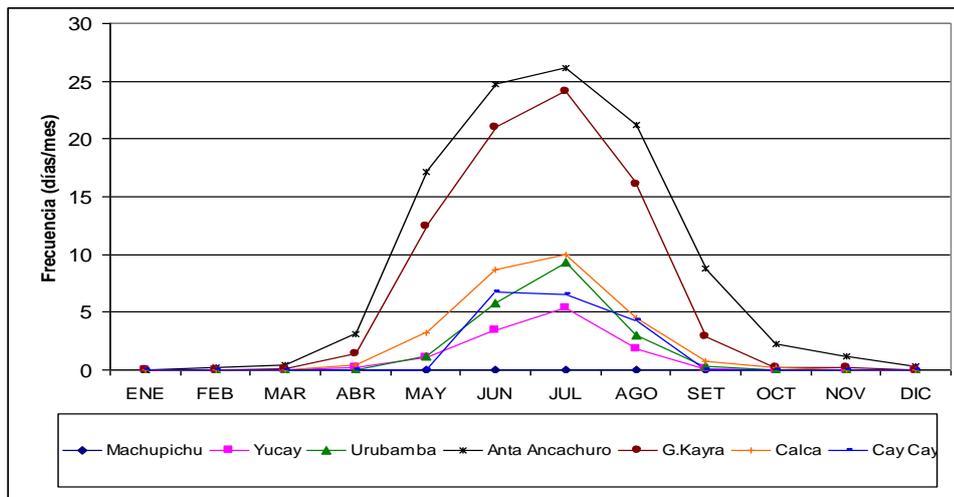


Figura N° 20. Frecuencia mensual de las heladas (días mes⁻¹)

El periodo libre de heladas es el número de días que transcurren desde la última helada de un periodo hasta la primera helada del siguiente periodo. Existe entonces una relación entre el periodo libre de heladas y la altitud, relación que ha sido evaluada para localidades ubicadas en Cuzco, Apurímac y Puno (figura 21); dicho en otras palabras existe una dependencia lineal entre la ocurrencia de heladas y la altitud justificado estadísticamente con un coeficiente de correlación de 0.73, esto es a mayores altitudes, menor periodo libre de heladas (mayor número de días con heladas).

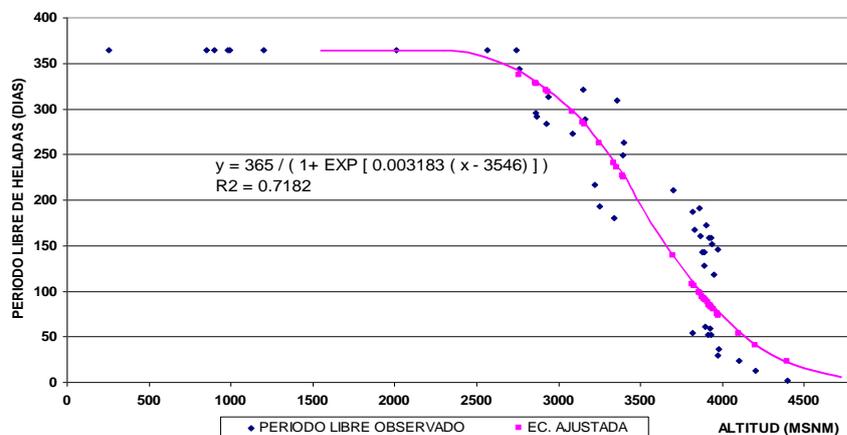


Figura N° 21. Variación del periodo libre de heladas con la altura

De la figura 21 se obtiene el periodo promedio libre de heladas para alturas entre 2500 a 4000 msnm, cuya ecuación ha sido validada para las localidades anteriormente descritas, con un 0.85 de coeficiente de correlación Pearson (Huamani, 2005).

3.5.1.2 Distribución espacial de las heladas

En la cuenca del Urubamba, a nivel espacial las heladas están relacionadas con la altitud, 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. La frecuencia de heladas¹⁷ se incrementa desde la provincia de Urubamba con dirección al sur, hasta la parte alta de la cuenca (provincias de Anta, Cusco, Canchis, Acomayo y Canas), observándose frecuencias entre 120 y 180 días por año, principalmente en la localidad de Sicuani (provincia de Canchis). La parte norte, correspondiente a la parte baja de la cuenca, no presentan heladas meteorológicas.

El mapa 08 (Apéndice 2) muestra el periodo libre de heladas¹⁸ que se presenta en la cuenca. El mayor periodo libre de heladas se encuentra hacia la zona baja de la cuenca (Bajo Urubamba), asociado a la menor altitud, mientras en las partes altas (sector central y sur de la cuenca), se ubican las zonas de menor periodo libre de heladas.

El comportamiento anual de las heladas en los últimos 35 años no ha presentado una tendencia uniforme en la cuenca, presentando una tendencia decreciente, menores días con heladas, en Urubamba y Granja Kayra, siendo significativa en Granja Kayra y por otro lado presenta una tendencia creciente en Anta y Sicuani con un alto nivel de significancia en Sicuani.

3.5.2 Periodos secos

Las precipitaciones en la cuenca del Urubamba 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 definición de sequía depende del lugar en que nos encontremos, así como de la demanda hídrica, 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.

¹⁷ Número de días al año con temperaturas por debajo de los 0 °C

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

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 periodo 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).

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 parte alta de la cuenca (encima de los 2800 m de altitud) en los últimos cuarenta años. Los resultados indican periodos largos de sequías y deficiencias de características moderadas y extremas en localidades como Urubamba, Anta, Granja Kayra y Sicuani, entre 1976 y 1984, siendo particularmente más recurrentes en Urubamba (2863 msnm) y Sicuani (3574 msnm). En tanto, periodos cortos y discontinuos de sequías mayormente de intensidad severa y extrema se presentaron en Anta (3340 msnm) y Granja Kayra (3219 msnm) durante la década de los noventa.

En el año 1976/77 (ENOS débil), se presentaron sequías severas en Anta y Granja Kayra, mientras que en Urubamba y Sicuani las lluvias se presentaron con normalidad. El año 1982/83 (ENOS fuerte) fue un año crítico para la cuenca, las precipitaciones se presentaron muy por debajo de lo normal, registrándose sequías entre severas y extremas en Urubamba, Anta y Sicuani. No obstante, en el año 1997/98 (ENOS extraordinario), no se presentaron deficiencias en la cuenca.

Es importante resaltar que el año 1987/88 fue un año particularmente húmedo en toda la cuenca, la mayoría de las estaciones presentaron lluvias por encima del percentil 80, y a partir de ese año hasta la actualidad los periodos lluviosos anuales en la cuenca se han presentado dentro de lo normal y/o por encima de lo normal (periodos lluviosos húmedos) con presencia de periodos secos episódicos y muy localizados, tal como ocurrió en Anta (1988 – 1992) y Granja Kayra (1994 – 1999), que presentaron episodios de sequías de severas a extremas en medio de un panorama húmedo a nivel de cuenca.

El periodo 2004/05, entre Urubamba y Anta se presentó deficiencias de lluvias, mientras que en el resto de la cuenca alta, las lluvias estuvieron dentro de su variabilidad normal.

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

AÑOS	UBMBA	ATA	GJAKY	SCNI
1964/65				
1965/66		15		
1966/67				
1967/68				
1968/69				
1969/70	10			
1970/71				
1971/72				
1972/73				
1973/74				
1974/75				
1975/76				
1976/77		10	10	
1977/78				
1978/79				15
1979/80	15			15
1980/81	10			
1981/82	30			5
1982/83	5	10		5
1983/84	15			15
1984/85				
1985/86				
1986/87		15		
1987/88				
1988/89				
1989/90		5		
1990/91				
1991/92		10		
1992/93				
1993/94				
1994/95			10	
1995/96			15	
1996/97				
1997/98				
1998/99			5	
1999/00				
2000/01				
2001/02				
2002/03				
2003/04				
2004/05				
2005/06				

UBMBA	Urubamba
ATA	Anta
GJAKY	Granja Kayra
SCNI	Sicuani

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

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, observándose que durante el periodo 1965 - 1987 las temporadas de lluvia superiores a sus valores normales y que están por encima del percentil 80 o 90 fueron muy episódicos y se presentaron en forma muy localizada. Por ejemplo, en el año 1966/67 se presentaron periodos húmedos moderados en las localidades de Urubamba y Sicuani, situación que continuó el año siguiente con mayor intensidad pero sólo en Sicuani.

De otro lado, el año 1981/82 fue húmedo extremo sólo en Granja Kayra y el año 1987/88 fue un año que se puede catalogar como año húmedo moderado en toda la cuenca, en donde la mayoría de las estaciones analizadas ²⁰ presentaron lluvias por encima del percentil 80. A partir de ese año hasta la actualidad, los periodos lluviosos anuales en la cuenca se han presentado entre normales y por encima de lo normal (predominan periodos lluviosos) con presencia de periodos secos muy localizados.

El año 1993/94 es considerado como uno de los periodos lluviosos más fuertes a nivel de toda la cuenca, así como los años comprendidos entre 2000 – 2003. Los años 1998/99 y 1999/00 (Niña fuerte) fueron húmedos moderados, particularmente desde Anta hacia la parte baja de la cuenca (zona de Quillabamba).

En la actualidad (a partir del 2003) los periodos húmedos se vienen presentando de forma muy localizada, alternando con episodios de ligeras deficiencia (también muy localizadas), predominando en general un panorama de periodos lluviosos normales.

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 1976/1977 y 1982/1983 son considerados como años de sequía moderada en toda la cuenca, no obstante sequías severas se presentaron en Sicuani (1981/82), Anta (1989/90) y Granja Kayra (1998/99); mientras que los años 1993/94 y 2000-2003 fueron los más lluviosos o húmedos.

²⁰ En la tabla 8 sólo se muestran las estaciones meteorológicas con información completa entre 1965-2006, sin embargo para el análisis general se consideró todas la red de estaciones dentro y cercanas a la cuenca del Urubamba.

Tabla N° 8. Periodos húmedos moderados y extremos en la Cuenca del río Urubamba, para el periodo 1965 –2006

AÑOS	UBMBA	ATA	GJAKY	SCNI
1964/65				
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				

UBMBA	Urubamba
ATA	Anta
GJAKY	Granja Kayra
SCNI	Sicuani

Percentil	Excesos
80	Moderado
90	Fuerte

Tabla N° 9. Resumen de los periodos extremos en la cuenca del Urubamba

Periodo	Nivel de cuenca	Nivel zonal
Sequías	1976/77 ++,	1965/66+ (Anta)
	1978/79 +,	1969/70++ (Urubamba)
	1979/80 +	1978/79+ (Sicuani)
	1982/83 ++	1979/80+ (Urubamba y Sicuani)
	1986/87 +	1980/81+ (Urubamba)
		1981/82+++ (Sicuani)
		1983/84+ (Urubamba y Sicuani)
		1986/87+ (Anta)
		1989/90+++ (Anta)
		1991/92++ (Anta)
		1994/95++ (Granja Kayra)
		1995/96+ (Granja Kayra)
		1998/99+++ (Granja Kayra).
Años húmedos	1987/88 *	1966/67* (Urubamba y Sicuani)
	1993/94 **	1981/82** (Granja Kayra)
	2000/01 **	1987/88** (Urubamba y Granja Kayra)
	2001/02 **	1989/90* (Urubamba)
	2002/03 **	1995/96* (parte central Anta)
		1996/97** (sur -Sicuani)
		1997/98* (central, Granja Kayra)
		1998/99* (Anta)
		1999/00** (Desde Anta hasta Quillabamba)
		2005/06* (central - Granja Kayra)

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

3.5.4 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 ó temperatura superficial del 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 22, 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 (OLR²¹, 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.

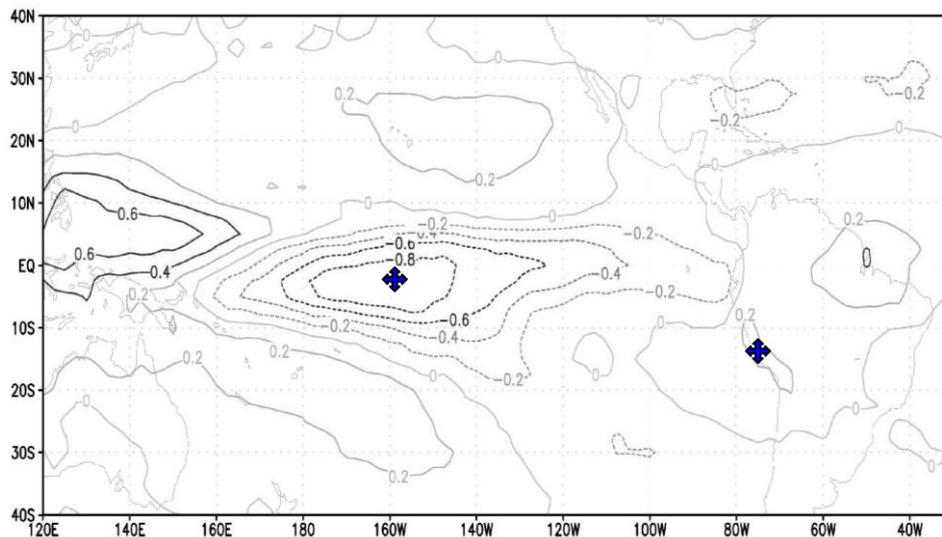


Figura Nº 22. Mapa de la Primera componente de las Funciones Ortogonales Empíricas de OLR para el trimestre enero – febrero – marzo, en el periodo 1975-2001. Fuente: SENAMHI, 2002

De otro lado, Díaz A. (2005), encontró que existe una relación entre la TSM y la OLR en el Pacífico Ecuatorial (especialmente en el Pacífico Central y Occidental) y las precipitaciones en la sierra del Perú; ambas variables pueden explicar su variabilidad. A diferencia de la cuenca del Mantaro en donde se encontraron mejores correlaciones entre la OLR y las precipitaciones, para la cuenca del Urubamba es la TSM quien explica mejor la variabilidad de la precipitación a través de relaciones inversas; es decir, mayores valores de TSM están asociados a menores precipitaciones en la cuenca. En la Tabla 10 se presenta los valores de las correlaciones entre la TSM de la región Niño-3 y las precipitaciones en las partes altas de la cuenca del Urubamba

²¹ Outgoing Longwave Radiation

(sector sur-), para la temporada lluviosa, trimestre de enero a marzo, época en que se presentaron los valores más altos de correlación. Se encontró correlaciones mas altas en Urubamba, Anta y Sicuani, 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).

Tabla N° 10: Valores de las correlaciones entre TSM del Niño-3 y las precipitaciones en la cuenca del río Urubamba durante EFM

Estaciones	Región Niño-3 con OLR (SENAIM, 2006)
Urubamba	-0.41
Pisac	-0.24
Anta Ancachuro	-0.33
Granja Kayra	-0.21
Sicuani	-0.42

La teleconexión sobre la cuenca del Urubamba 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 durante años catalogados como Niño y Niña, según Trenberth (1997), en dos estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca (Urubamba y Sicuani), sector de alta variabilidad no sólo por la compleja topografía sino por el ingreso permanente de sistemas convectivos. En la figura 23 a,c puede observarse que en los años Niño las precipitaciones tienden a presentarse con mucha variabilidad, así por ejemplo en Sicuani (extremo sur de la cuenca), las precipitaciones durante los años Niño tienden a ser normales a excepción de El Niño 1982/83 que fueron muy deficientes. En la mayoría de los Niños, el mes más deficiente es enero, mientras que en la localidad de Urubamba que está más al norte y a menor altitud, las precipitaciones en año Niño mayormente se presentan deficitarias por varios meses durante el periodo de máximas lluvias (enero a marzo), similar comportamiento lo tiene Anta Ancachuro (no se presenta en este informe). En años Niña (figura 23 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 de diciembre a Marzo.

En conclusión, durante años Niño es más probable que la parte central y sur de la cuenca del río Urubamba presenten precipitaciones menores a sus valores normales, con una gran irregularidad durante el periodo lluvioso, mientras que en años Niña las precipitaciones son menos variadas y tienden a ser de normales a ligeramente superiores.

Las correlaciones obtenidas, indican que gran parte de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca está asociada a la variabilidad interanual (ENOS) y que ésta se complementa con la variabilidad intraestacional.

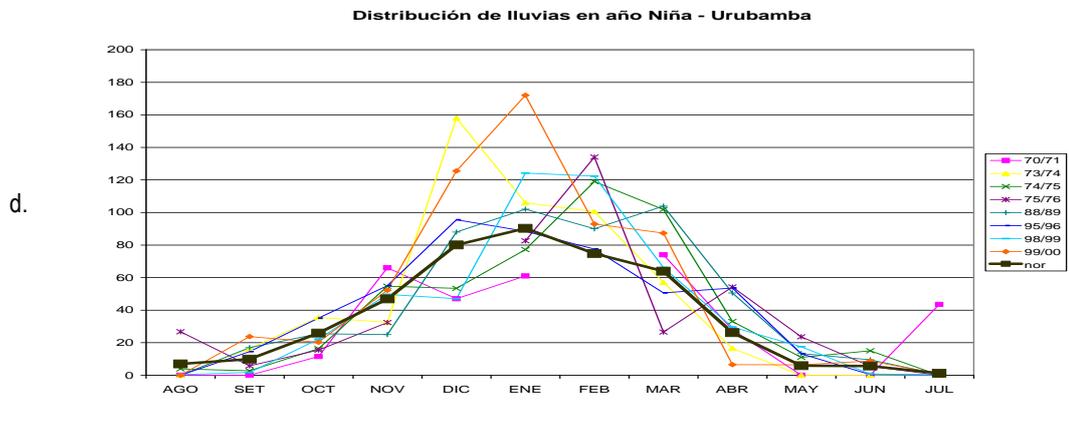
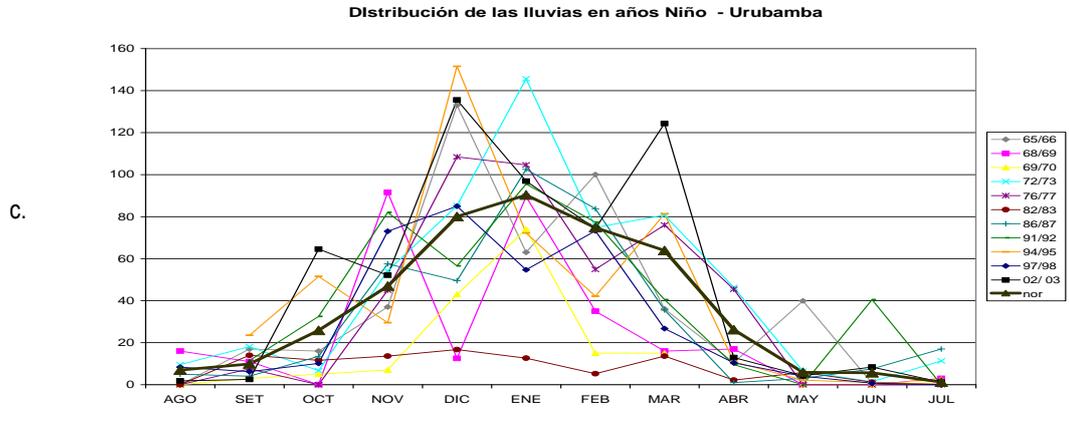
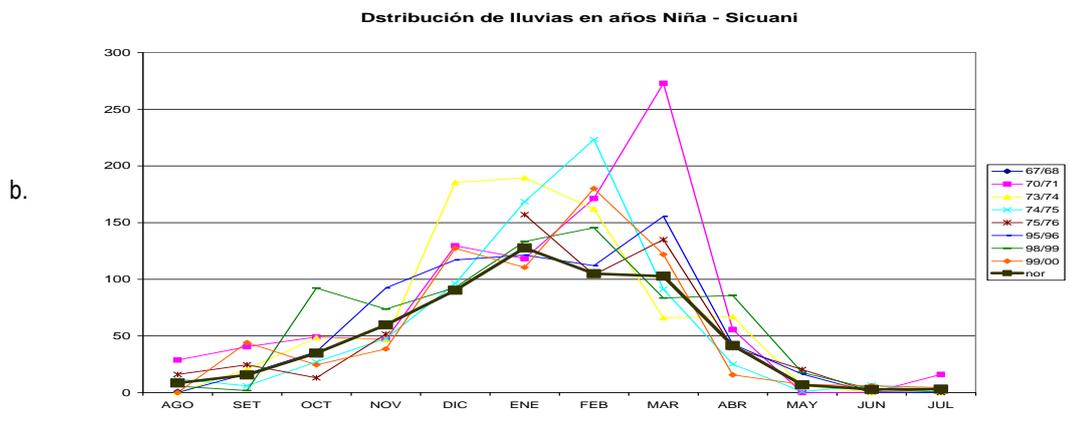
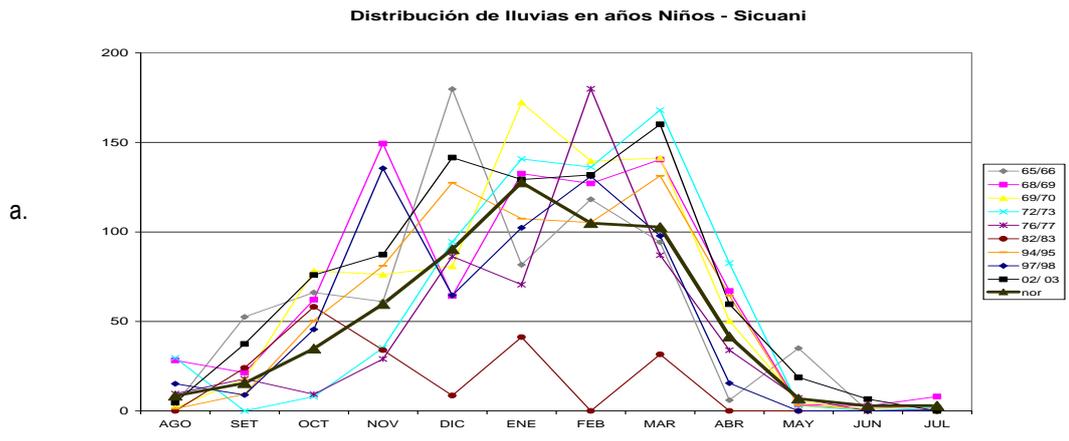


Figura N° 23. Distribución temporal de las lluvias en años Niño (a,c) y Niña (b,d), en la parte alta de la cuenca.

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 resumen 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. Sólo cinco estaciones meteorológicas tienen series largas con información climática, de las cuales cuatro están ubicadas en la parte alta de la cuenca; en la parte baja no se cuenta con series climáticas largas a excepción de Quillabamba (provincia de La Convención) ubicada a 990 msnm. 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 Urubamba

Sector	Estaciones	PERIODO	Tendencia (mm año ⁻¹)	SIGNIFICANCIA (%)
Pare Baja	Quillabamba	1965-2006	3.8	94.4
Parte Alta	Urubamba	1969-2006	2.9	96.6
	Anta Ancachuro	1965-2006	8.5	99.1
	Granja Kayra	1969-2006	0.7	65.4
	Sicuani	1965-2006	0.8	64.9

En el mapa 09 (apéndice 2), se observa la tendencia de la precipitación en diferentes puntos de la cuenca, la cual viene siendo positiva particularmente en algunas zonas de las provincias de La Convención, Urubamba y Anta, con valores del orden de 2.9 – 8.5 mm año⁻¹ y con un nivel de significancia del 96% en promedio.

Las mayores tasas de incremento se vienen dando en Anta con 8.5 mm año⁻¹, seguido de Quillabamba y Urubamba. En el resto de estaciones analizadas las tasas son inferiores a 1 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 estacionales de la precipitación (mm) y significancia (%) en la Cuenca del Urubamba

SECTOR	LUGAR	DEF		MAM		JJA		SON	
		TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig	TP	Sig
Parte Baja	Quillabamba	2.3	86	2.0	98	0.3	67	-1.1	83
Parte Alta	Urubamba	1.9	97	0.3	70	0.1	82	0.7	96
	Anta Ancachuro	6.1	99	0.6	75	0.2	90	0.8	78
	Granja Kayra	1.3	87	-0.2	64	0.1	68	-0.2	71
	Sicuani	1.0	80	0.4	70	0.1	66	0.8	82

Legenda: 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 con niveles de significancia mayores a 85% tiende a ser positiva. La acentuada tendencia positiva que se viene observando en Anta (6.1 mm año⁻¹) es altamente significativo (99%) en comparación al resto de estaciones analizadas (ver Tabla 12).

En otoño, (Mapa 11, apéndice 2) la tendencia de las precipitaciones sigue siendo positiva a excepción de Granja Kayra que presenta una ligera reducción del orden de -0.2 mm año⁻¹ y que además estadísticamente no es significativa (64%); sólo en la vecindad de Quillabamba la tendencia ascendente es significativa con 2.0 mm año⁻¹ (ver Tabla 12).

En invierno (Mapa 12, apéndice 2), época de mínimas precipitaciones, la tendencia sigue siendo positiva, pero estadísticamente significancia sólo en la estación de Anta con 0.2 mm año⁻¹ (ver Tabla 12).

Finalmente en primavera (Mapa 13, apéndice 2), época de inicio del periodo lluvioso, continúa la incertidumbre, presentándose sólo en forma localizada tendencias significativas, tal como ocurre en Urubamba con 0.7 mm año⁻¹ (ver Tabla 12). La tendencia decreciente se presenta en Quillabamba y Granja Kayra con valores entre -0.2 y -1.1 mm año⁻¹, pero con valores menores al 85% de significancia.

3.6.2 Tendencias promedio de la Temperatura Máxima

La tendencia anual y estacional de la temperatura máxima en la cuenca, 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, aunque con valores muy discretos, a excepción de Quillabamba con $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$. La tendencia positiva varía entre $0.01 - 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$.

Tabla N° 13. Tendencia anual de las Temperaturas Máxima y Mínima ($^{\circ}\text{C}$) y las significancias (%) en la cuenca del Urubamba

SECTOR	LUGAR	PERIODO	TMAX ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$)	SIGNIFI. (%)	TMIN ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$)	SIGNIFI. (%)
Parte Baja	Quillabamba	1965-2005	-0.02	99	0.06	100
Parte Alta	Urubamba	1967-2005	0.01	92	0.02	100
	Anta	1965-2005			0.05	99
	Granja Kayra	1965-2006	0.04	100	0.02	100
	Sicuani	1964-2006	0.01	96	-0.01	89

3.6.2.2 Tendencias estacionales

La tendencia estacional de la temperatura máxima es muy similar a la tendencia anual, es decir, mayormente positiva. En el verano (Mapa 15), la tendencia observada oscila entre $0.01 - 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$, a excepción de Quillabamba (La Convención) en donde se observa una tendencia negativa del orden de $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$. En otoño y primavera (Mapas 16 y 18), los rangos de la tendencia positiva son muy similares a los encontrados en verano, y en el invierno (Mapa 17), los valores de la tendencia positiva son aún menores ($0.001 - 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$).

Quillabamba viene presentando tendencias anuales y estacionales negativas del orden de $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ año}^{-1}$ (ver Tabla 14).

Tabla N° 14. Tendencia estacional de las Temperaturas Máxima y Mínima ($^{\circ}\text{C}$) y significancias (%) en la cuenca del Urubamba

LUGAR	Unidades	DEF (verano)		MAM (otoño)		JJA (invierno)		SON (primavera)	
		TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN
Quillabamba	$^{\circ}\text{C}/\text{año}$	-0.02	0.06	-0.02	0.06	-0.03	0.05	-0.02	0.04
	%	82	100	98	100	100	100	92	100
Urubamba	$^{\circ}\text{C}/\text{año}$	0.01	0.02	0.02	0.03	0.001	0.03	0.01	0.03
	%	83	100	98	100	55	99	94	100
Anta	$^{\circ}\text{C}/\text{año}$	-----	0.08	-----	0.05	-----	-0.01	-----	0.06
	%		100		83		60		90
Granja Kayra	$^{\circ}\text{C}/\text{año}$	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02
	%	100	100	100	97	100	100	100	98
Sicuani	$^{\circ}\text{C}/\text{año}$	0.01	0.01	0.01	-0.01	0.02	-0.03	0.01	-0.02
	%	89	97	86	86	96	100	96	96

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 Urubamba 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 Sicuani (extremo sur de la cuenca), en donde predomina la tendencia negativa. Los valores positivos oscilan entre 0.02-0.06 °C año⁻¹, siendo más acentuada en Quillabamba; los valores negativos son del orden de -0.01 °C año⁻¹.

3.6.3.2 Tendencia estacional

En verano, la tendencia de la temperatura mínima es positiva en todas las estaciones analizadas y varía entre 0.01 - 0.08 °C año⁻¹. La tendencia positiva de mayor valor se presenta en Anta con 0.08 °C año⁻¹ (ver tabla 14 y Mapa 20). En otoño, la tendencia positiva continúa en gran parte de la cuenca con un rango de 0.02 – 0.06 °C año⁻¹ y Sicuani presenta una tendencia negativa del orden de -0.01 °C año⁻¹ (ver tabla 14 y Mapa 21). Tanto en invierno como en primavera (Tabla 14 y Mapas 22 - 23), el nivel de significancia sigue siendo alto, dicho en otras palabras, la tendencia tiene alta certidumbre, a excepción de Anta en invierno (60%).

La tendencia de la temperatura mínima en Sicuani se viene presentando negativa con valores del orden de -0.01 °C año⁻¹ (anual) y entre -0.01 y -0.02 °C año⁻¹ (estacional). Ver Tabla 14.

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 Urubamba, 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 Urubamba 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 y figura 24.

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 \geq 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 \geq 1mm	días
R10mm	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP \geq 10mm	días
R20mm	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que PRCP \geq 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 Urubamba

ÍNDICES / ESTACIONES	PRCPTOT	SDII	CDD	CWD	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RX1day	RX5day
Quillabamba	+	+	+	O	+	+	+	+	+	+
Urubamba	+	O	O	+	+	+	+	+	+	+
Anta Ancachuro	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Pisac	O	O	+	+	O	O	O	O	+	O
Granja Kayra	+	+	O	+	+	+	+	+	O	+
Sicuani	+	O	O	O	+	+	+	+	+	+

Leyenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+), Tendencia negativa sin significancia (O), Tendencia negativa con significancia (O).

En general en la mayoría de estaciones analizadas en esta cuenca, excepto en la estación de Pisac (provincia de Calca) presentan tendencias positivas en todos los índices analizados, es decir aumento de las precipitaciones, y muchas veces estas tendencias son significativas, así se tiene el índice PRCPTOT es positivo en todas las estaciones analizadas, excepto en la estación Pisac. También se tienen los índices de intensidad diaria (SDII) y de días húmedos consecutivos (CWD) cuyas tendencias concuerdan mucho con el índice PRCPTOT, principalmente en las estaciones de Anta-Ancachuro y Granja Kayra, con alto nivel de significancia en la primera.

Los patrones de tendencia para los índices de frecuencia de extremos R10mm y R20mm presentan igualmente que el índice PRCPTOT una tendencia positiva. Los dos índices de intensidad de precipitaciones máximas en 1 y 5 días, RX1day y RX5day, respectivamente, muestran también tendencias positivas. En relación, a los índices de excedencia de percentiles R95p (días muy húmedos) y R99p (días extremadamente húmedos), también guarda una

relación directa con el índice de PRCPTOT, es decir de tendencia positiva. Caso contrario, pero en concordancia con todo lo anteriormente analizado se obtiene con el índice máximo consecutivo de días secos (CDD), el cual es negativo, principalmente en las estaciones de Urubamba, Granja Kayra y Sicuani.



Figura N° 24. 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 $p < 0.1$.

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 y su distribución espacial en la figura 25.

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 diurno 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
Quillabamba		O	+	+	+	O				
Urubamba	O	+	O	O	+	O				
Anta	+	+	+	O	O	+				
Granja Kayra	O	+	O	+	+	+	O	+	O	+
Sicuani	+	+	O	+	O	+				

Leyenda: Tendencia positiva sin significancia (+), Tendencia positiva con significancia (+), Tendencia negativa sin significancia (O), Tendencia negativa con significancia (O).

Los resultados no muestran un patrón claro en relación al índice que determina los días de heladas (fdo), ya que se tiene tendencias negativas (disminución de los días con heladas) en las estaciones de Urubamba y Granja Kayra; mientras que en las estaciones de mayor altura como Anta y Sicuani estas tendencias son positivas (incremento de los días con heladas), sólo con valores significativos en las estaciones Granja Kayra y Sicuani.

Analizando la estación Granja Kayra, se tiene que existe una relación inversa entre los días cálidos (Tx90p) y días fríos (Tx10p), ambas con significancia estadística al 99%, ya que cuando la tendencia en los días cálidos aumenta, la tendencia en los días fríos decrece. En relación a los índices de días y noches calientes (basados en percentiles por encima de 90th, Tx90p y Tn90p, respectivamente), se tiene que éstos presentan tendencia positiva; comparando estos índices con los basados en percentiles inferiores a 10th que representan días y noches frías (Tx10p y Tn10p, respectivamente), se observa una relación inversa, ya que estos últimos presentan tendencia negativa.



Figura N° 25. 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 $p < 0.1$.

El índice de rango diario de temperaturas (dtr) se ve incrementado en las zonas de mayor altura, como Anta, Granja Kayra y Sicuani, ya que se observa tendencias crecientes de temperatura máxima (Txx) y tendencias decrecientes de temperatura mínima (Tnn), excepto en Granja Kayra donde la temperatura mínima presenta tendencia positiva. Caso contrario, ocurre con las estaciones de Quillabamba y Urubamba, donde este índice es decreciente.

CAPITULO 4

CAUDAL DEL RIO URUBAMBA 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.

En 1940 la cuenca del río Vilcanota o Urubamba, albergaba alrededor de 240 000 habitantes; en 1993, esa cifra aumentó a 533 338 habitantes; es decir, en 53 años la población se multiplicó 2.2 veces; para el 2015 se espera una población que supere los 750 000 habitantes, y de esta población, el 73% vivirá en aglomeraciones urbanas, el resto en zonas rurales, por tanto, ejercerán fuertes presiones sobre el abastecimiento del agua, alimentos y otros bienes; así mismo, significará un aumento de aguas servidas y desechos sólidos, especialmente, de centros urbanos. En todo el recorrido del río Vilcanota, de sureste a noreste, el espacio forma su columna económica demográfica y productiva incluyendo más del 80% de los suelos cultivables que son a la vez los más fértiles del Cusco.

Considerando lo anterior y, en medio de un mundo cada vez más cálido que altera la variabilidad natural del clima, 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 Urubamba en la estación de control Pisac (en sector 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

La generación de caudales en el punto de interés se realizó con el modelo hidrológico SAMS (Stochastic Analysis Modeling and Simulation), el cual se basa en el análisis estocástico, el modelamiento y la simulación de series de tiempo hidrológicas. Su código está 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 Pisac ($13^{\circ} 36' S$; $71^{\circ} 51' W$; 2970 msnm), ubicada en el distrito de Pisac, provincia de Calca en la Región Cusco (ver figura 26). De esta estación se obtuvieron los caudales a nivel mensual y para el periodo 1965-2006 (ver figura 27).

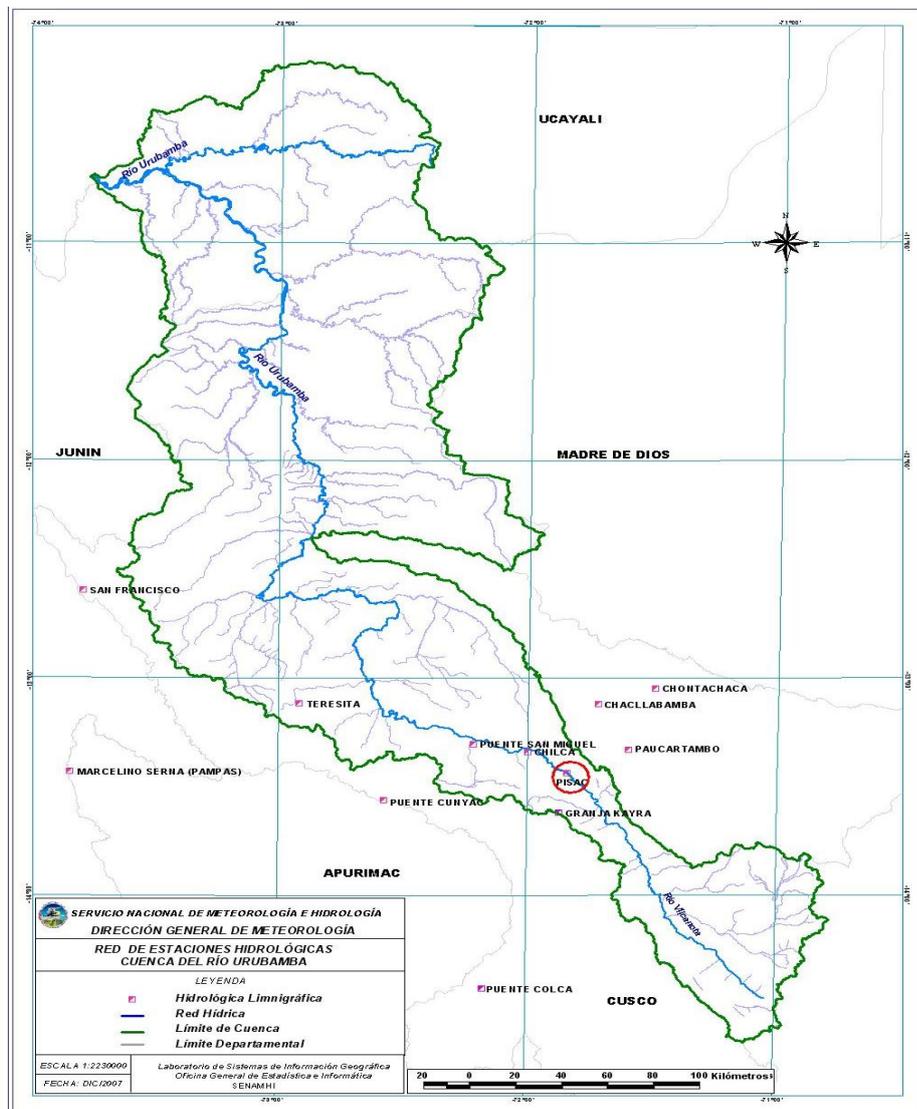


Figura N° 26. Ubicación de la estación Pisac

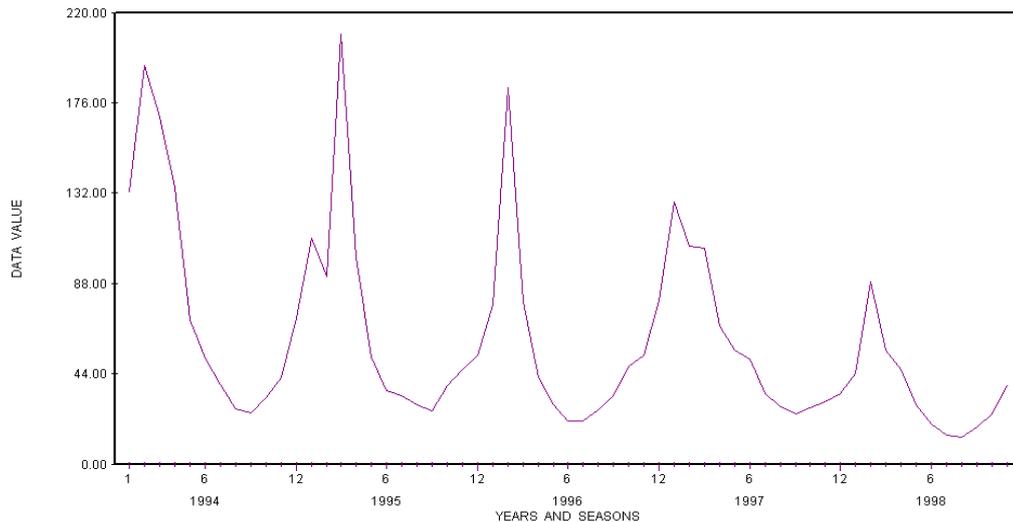


Figura N° 27. Gráfica de caudales medios mensuales en la estación Pisac

4.3 Metodología

Se trabajó la estadística básica de los caudales mensuales de la estación Pisac 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:

$$\text{Limite Sup Normal} = \text{Caudal mensual promedio} + 0.3 * \text{Desviación estándar}$$

$$\text{Limite Inf Normal} = \text{Caudal mensual promedio} - 0.3 * \text{Desviación estándar}$$

Según la Tabla 19 se consideró como **año normal** a los caudales medios anuales dentro del rango 54.08 - 71.76; **año seco** a los caudales medios anuales menores a 54.08 m³s⁻¹ y **año húmedo** a los caudales medios anuales mayores a 71.76 m³s⁻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	105.46	147.00	154.19	93.38	48.60	33.64	25.75	21.49	21.57	25.93	32.09	45.95	62.92
Desviación Estándar	43.35	65.71	104.67	44.60	17.86	12.98	8.57	7.43	7.53	9.18	11.02	20.51	29.45
Limite Sup Normal	118.46	166.72	185.59	106.76	53.96	37.53	28.32	23.72	23.83	28.68	35.40	52.10	71.76
Limite Inf Normal	92.45	127.29	122.79	80.00	43.24	29.74	23.18	19.26	19.31	23.17	28.79	39.80	54.08

De acuerdo a esta clasificación, de los 42 años que se tiene registrada la información de caudales en la estación Pisac, se ha encontrado que: 13 años han sido secos, 19 años ha sido normal y 10 años han sido húmedos, tal como se muestra en el figura 28.

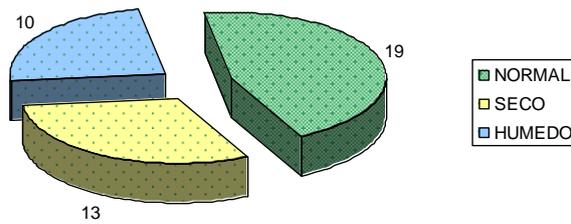


Figura N° 28. Clasificación en base al comportamiento de los caudales en la estación de control Pisac (cuena del Urubamba)

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 29, la comparación de la distribución teórica generada basada en la transformación y la distribución histórica de la muestra. Se observó que los datos en el punto de control no se ajustaban a una distribución normal por lo que se tuvo que realizar pruebas para ver cual de las tres funciones de transformación que tiene SAMS (potencia, box cox y logarítmica), se ajustaba mejor a nuestros datos. Se determinó que la función de transformación que cumplía con estas condiciones era la función de potencia.

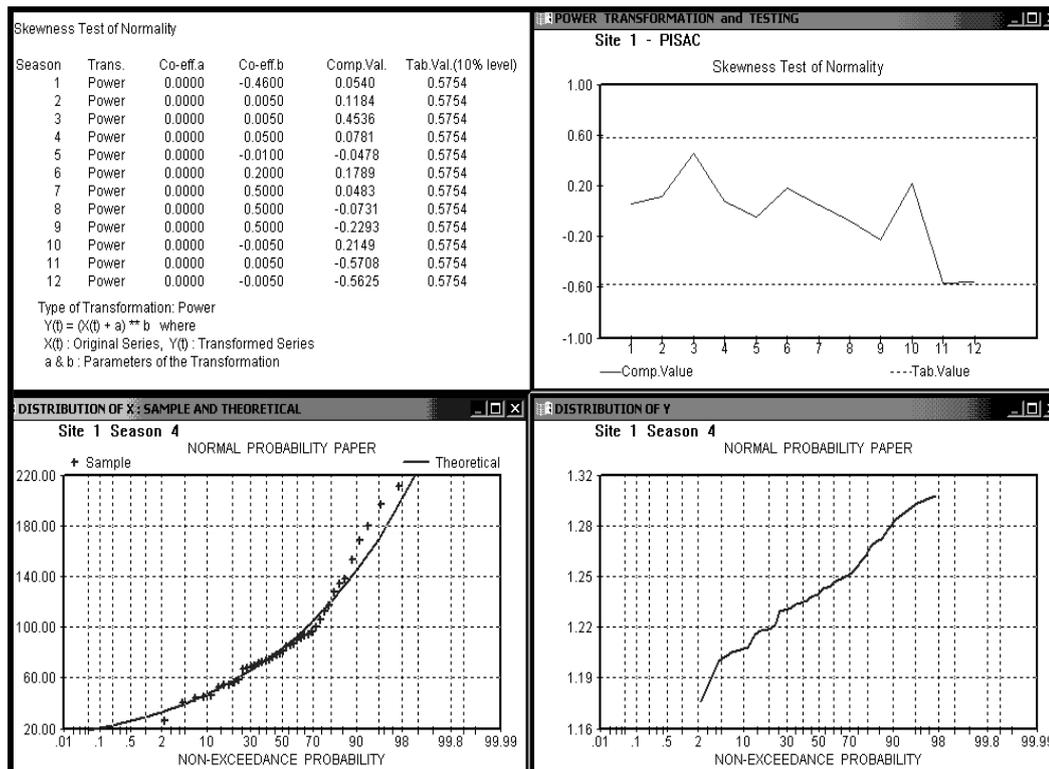


Figura N° 29. Test del sesgo de la normalidad

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 30 y 31). 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.

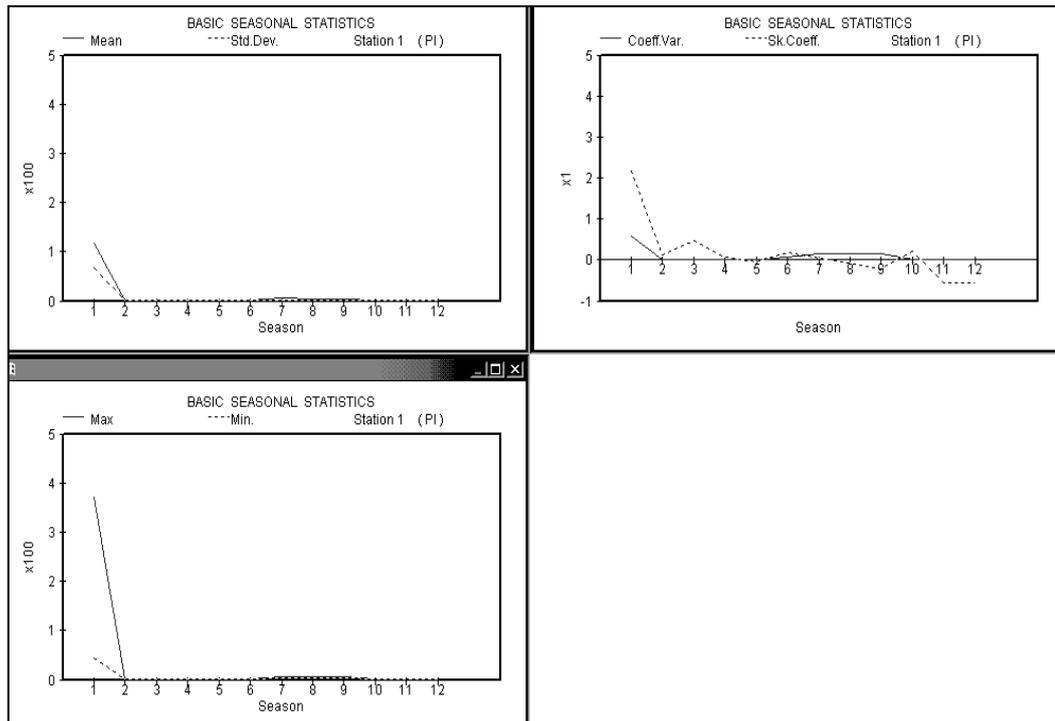
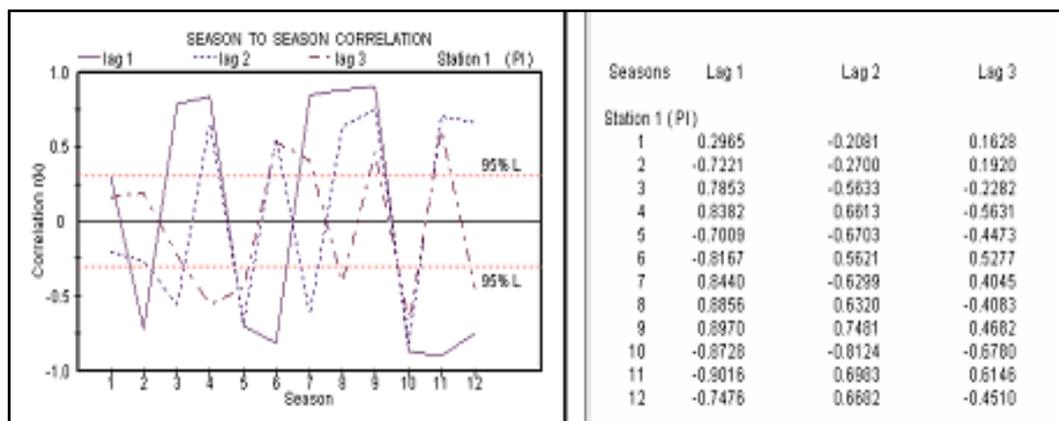


Figura N° 30. Estadísticas básicas estacionales de la data transformada



a.

b.

Figura N° 31. 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 32 y 33).

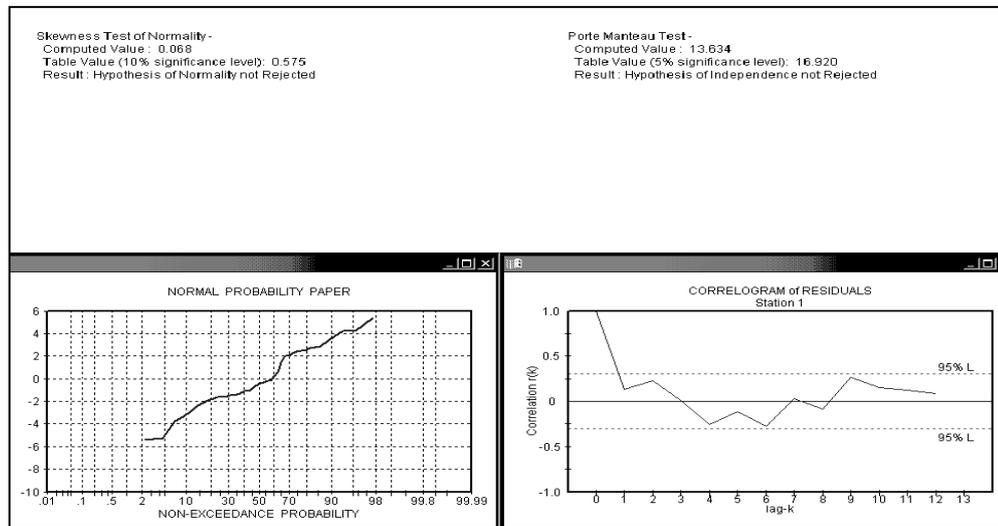


Figura N° 32. Prueba de los residuos para el modelo PARMA (1,0)

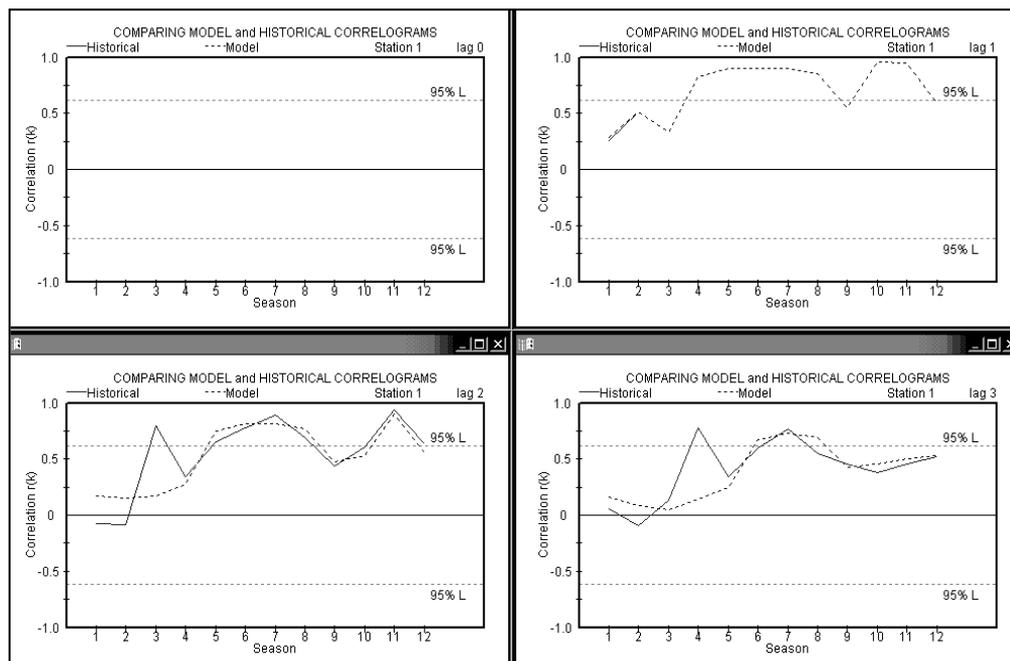


Figura N° 33. Comparación de los correlogramas del modelo vs. Histórico

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 34).

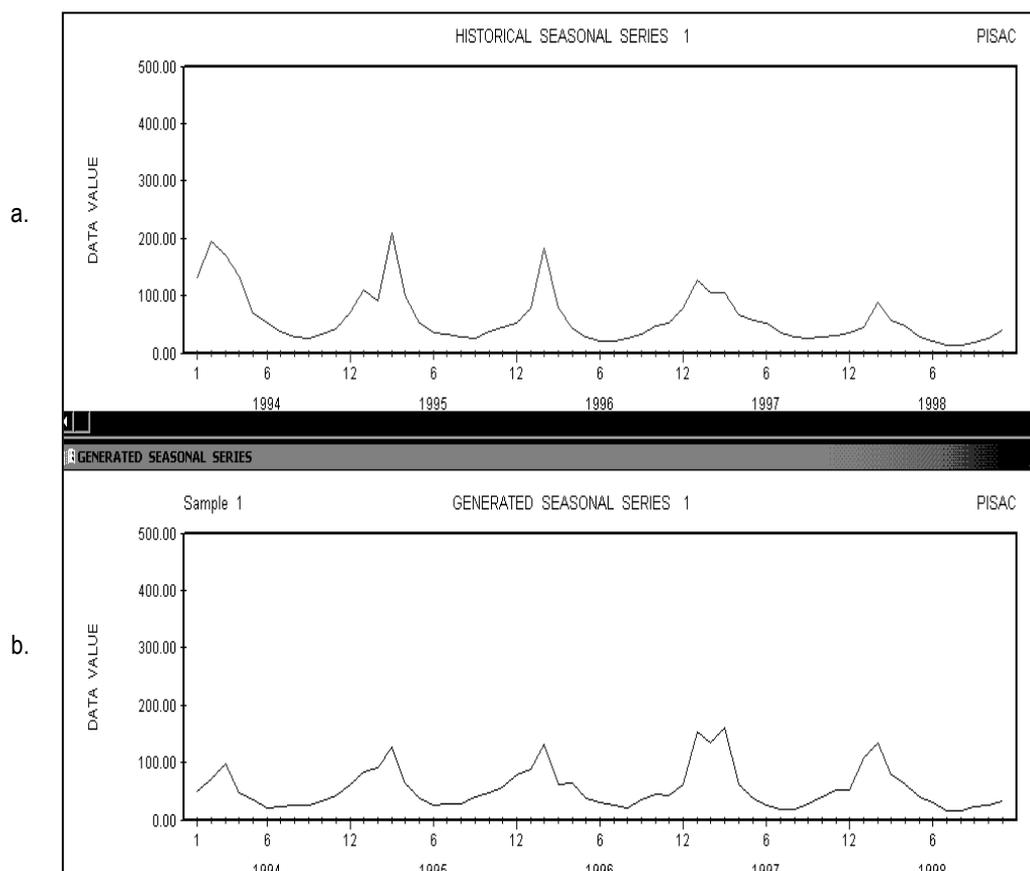


Figura N° 34. Series sintéticas generadas con el modelo SAMS: (a) Histórico y (b) modelo SAMS

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 35 y 36.

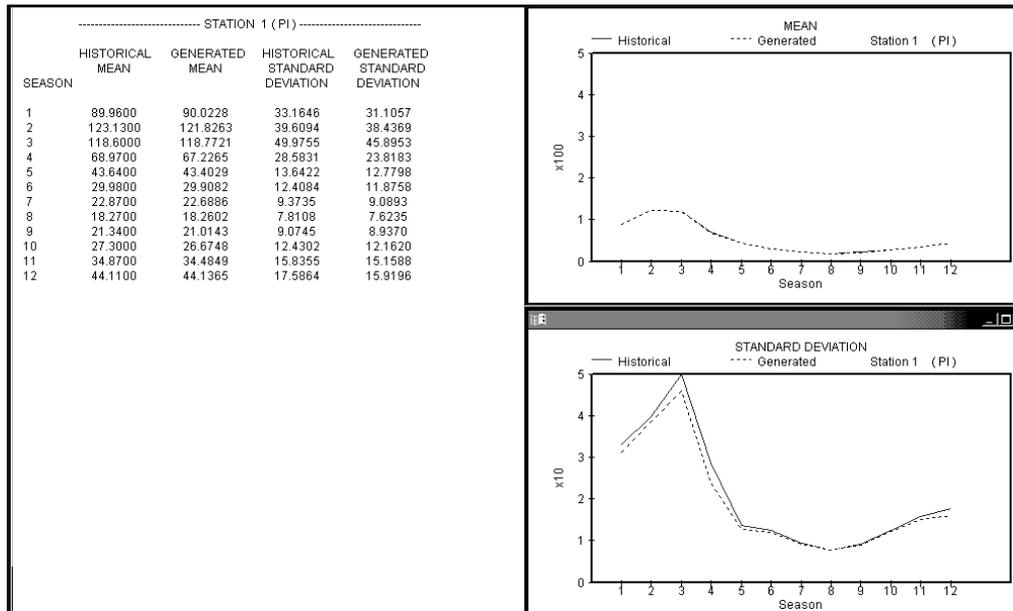


Figura N° 35. Estadísticas básicas estacionales (Media y Desviación Estándar)

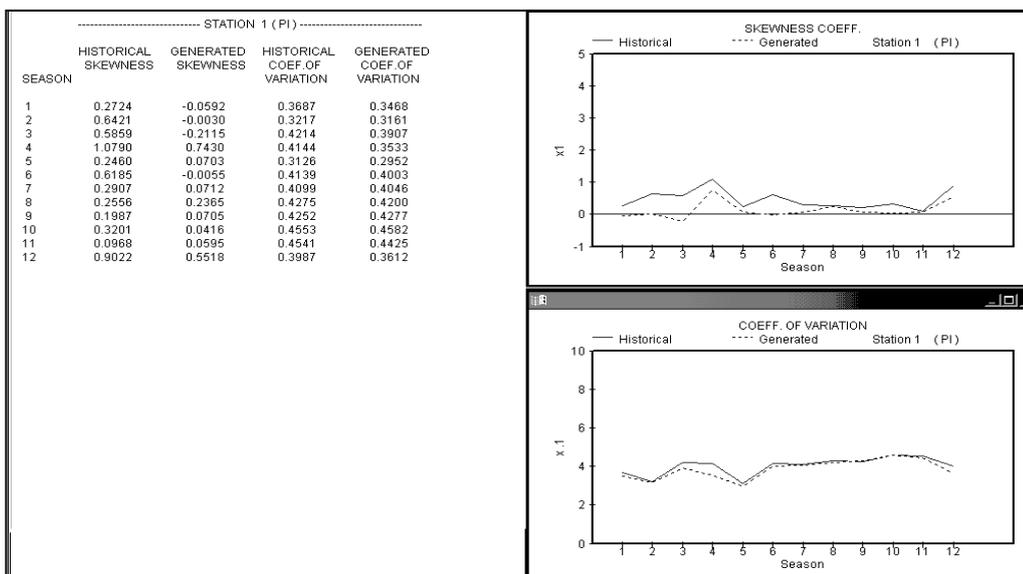


Figura N° 36. Estadísticas básicas estacionales (Coeficiente de sesgo y de variación)

Para cada juego de parámetros se generaron cincuenta series de caudales mensuales, para el periodo de enero 2007 hasta diciembre del 2035. Estas series mensuales se promediaron obteniéndose cincuenta 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 cincuenta series anuales para cada juego de parámetros (ver Tabla 20), 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 21), mediante el conteo de la ocurrencia para cada caso.

Tabla Nº 20

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

Tabla Nº 21

ANOS	POTENCIA Jgo Param1	LOG Jgo Param2	BOX-COX Jgo Param3
2007	48	38	40
2008	40	42	40
2009	46	44	42
2010	34	46	36
2011	40	40	44
2012	44	40	36
2013	46	42	46
2014	40	56	44
2015	38	48	44
2016	42	38	44
2017	38	40	38
2018	36	42	40
2019	40	40	44
2020	38	42	42
2021	38	38	40
2022	36	38	42
2023	36	46	50
2024	40	46	38
2025	42	38	38
2026	46	38	44
2027	46	44	44
2028	44	36	42
2029	46	38	36
2030	44	44	42
2031	42	36	44
2032	34	48	44
2033	40	42	42
2034	36	42	40
2035	44	48	40

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 37 b) hay una probabilidad del 60% que el caudal medio anual no exceda los $71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que para el 2011 y 2012 (figuras 37 e,f), la probabilidad de que los caudales sobrepasen este umbral varía entre 35% y 40% respectivamente. De igual forma se puede hacer extensivo el mismo análisis para las demás figuras.

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 Pisac estimado en la Tabla 19.

Tabla Nº 22. Probabilidad de exceder o no exceder un caudal de $62.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

AÑOS	Probabilidades de	
	No Excedencia	Excedencia
2007	0.5828	0.4172
2008	0.4901	0.5099
2009	0.5695	0.4305
2010	0.5762	0.4238
2011	0.4834	0.5166
2012	0.5894	0.4106

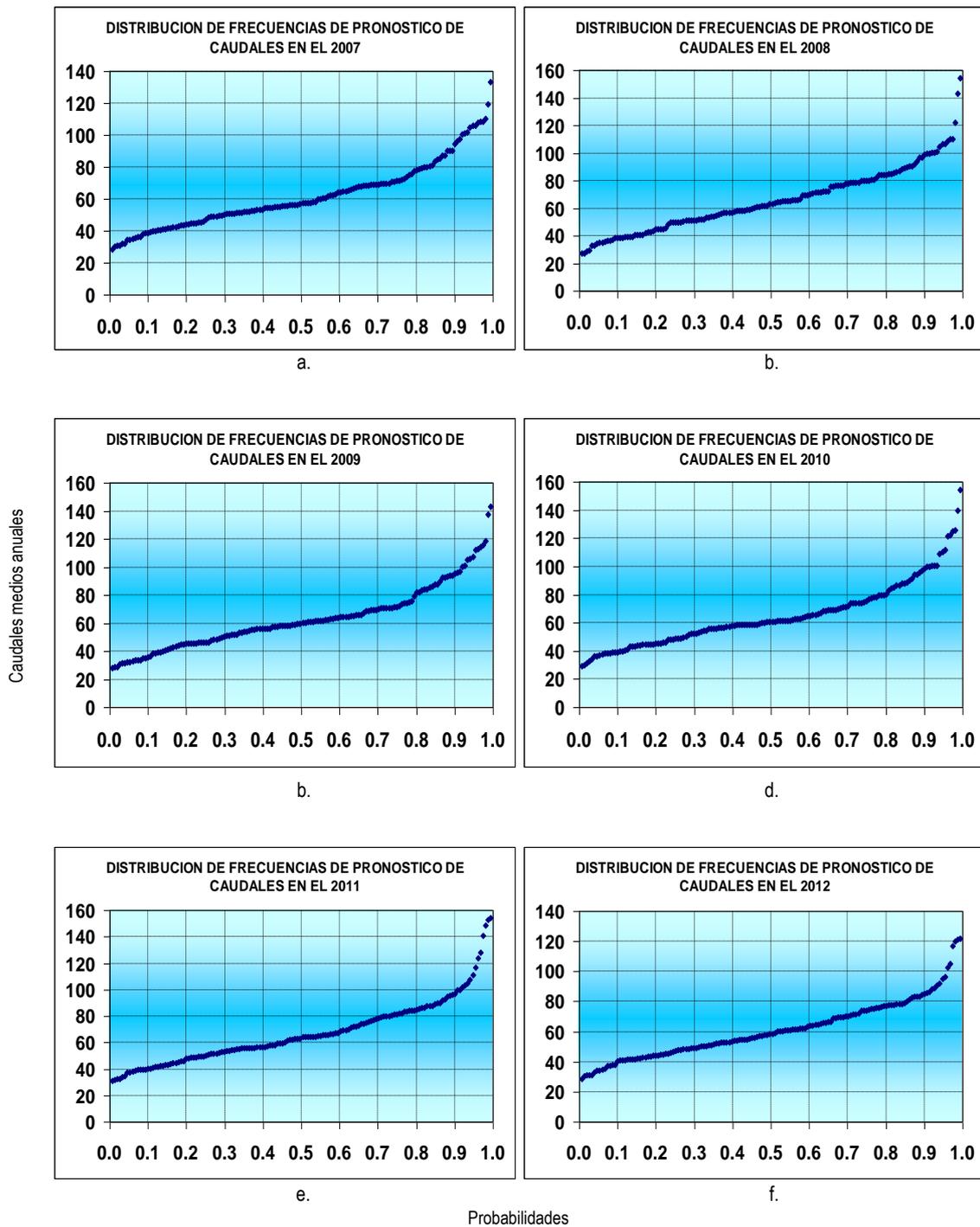


Figura N° 37. Distribución de frecuencias de caudales pronosticados al 2012 en la estación Pisac.

4.5 Conclusiones

- Los caudales históricos registrados en la estación Pisac (sector sur del río Urubamba), indican que de los 42 años de datos observados, 13 años han sido secos, 19 años han sido normales y 10 años han sido húmedos.

- Los caudales generados muestran una gran variabilidad para el periodo proyectado (2008-2035), sin embargo es importante mencionar que los años 2012, 2023, 2024 y 2027 se presentarían como años secos (caudales menores que su promedio normal), mientras que el 2015 se le espera como un año con caudal normal.
- 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%.
- En el periodo del 2030 - 2035, los caudales se presentarían mayormente normales, pero con un sesgo a ser deficientes, excepto el año 2032 que podría presentarse como un año de normal a húmedo.

CAPITULO 5

ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

“Para fines del Siglo XXI, las temperaturas máxima y mínima en la cuenca del río Urubamba se habrán incrementado, en promedio 2.9 °C y 2.7 °C respectivamente; el incremento de las precipitaciones se acentuará en verano y primavera y la reducción en invierno”.

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 23)

Tabla Nº 23. 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 24 (Noda et al., 2006).

Tabla Nº 24. 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
 MIROC²² (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 Urubamba

5.2.1 Metodología

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;

²² Model for Interdisciplinary Research on Climate

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 Urubamba 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:

$$X_{k,j} = \overline{X_{o,j}} + \Delta X_{k,j}$$

Donde:

$X_{k,j}$	=	Es el valor del mes j^{avo} de la variable X para el año k;
$\overline{X_{o,j}}$	=	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:

$$P_{futura}(t) = P_{fut}(t) \times (\overline{P_{obs}} / \overline{P_{control}})$$

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
$\overline{P_{obs}}$	=	Es la precipitación promedio multianual observada de 30 años para el tiempo t
$\overline{P_{control}}$	=	Es la precipitación del escenario actual del modelo en un tiempo t

El cambio proyectado se ha estimado de manera puntual en las estaciones de mejor calidad de información y record histórico completo, (ver tabla 25). Para la confección de los mapas de escenarios climáticos al 2100, se ha extrapolado información de las estaciones de la Tabla 25 con información de estaciones dentro y fuera de 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° 25. Estaciones meteorológicas en la cuenca del río Urubamba

Estaciones	Altitud (msnm)	Variable
Anta-Ancachuro	3340	T y PP
Cay-Cay	3100	PP
Urubamba	2863	T Y PP
Chitapampa	3600	PP
Pisac	2950	PP
Granja Kayra	3219	T Y PP
Sicuani	3574	T Y PP

Leyenda: T (temperatura) y PP (precipitación)

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 un ligero sesgo de sobrestimación de los valores a lo largo del año. 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 entre 1.9 - 3.4 °C.

En la misma figura (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 que el mayor cambio se da entre invierno y primavera, en las cuatro estaciones analizadas. Así mismo, el límite superior del cambio podría eventualmente sobrepasar el umbral de los 4 °C en algún mes del año, particularmente en localidades como Sicuani y Urubamba.

El análisis anterior se complementa con la Tabla 26 y la figura 39 en donde se presenta los valores estacionales de la temperatura máxima proyectados 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 cambio o incremento en Sicuani (provincia de Canchis) con valores de hasta 2.6 °C para finales del Siglo XXI, mientras que en Anta-Ancachuro (provincia de Anta) el cambio es de 1.9 °C. En el Cusco y Urubamba el cambio varía entre 2.3 - 2.4 °C.

Un mayor cambio sin embargo puede observarse a partir del otoño, siendo el invierno, la 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.

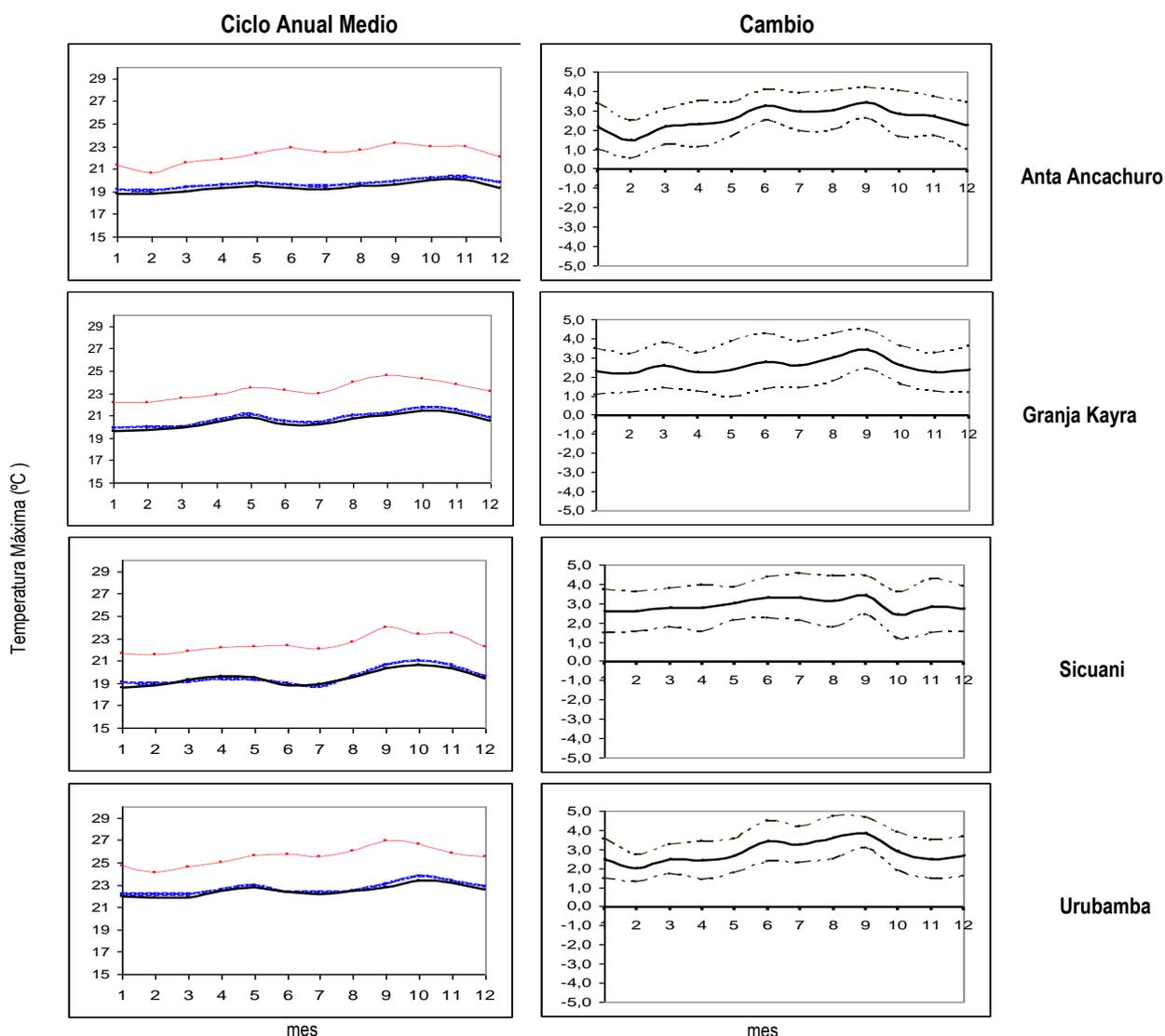


Figura N° 38. (Izquierda) Ciclo medio anual de la temperatura máxima (°C) en la cuenca del río Urubamba en los dos time-slice (líneas gruesa en azul primer time-slice y entrecortado en rojo segundo time-slice) y data histórica (línea sólida oscura). (Derecha) Cambios de la temperatura máxima entre los dos time-slice (la línea sólida) y umbrales de cambio con un 95% de confianza (líneas entrecortadas).

Según la misma tabla y la figura 39, todo indica que el mayor cambio (>3.0°C) se producirá entre invierno y primavera, y particularmente en Anta (3340 msnm) y Urubamba (2863 msnm), provincias productoras de maíz amiláceo. Asimismo, incrementos promedio de 2.5 se presentarían en localidades ubicadas por encima de los 3200 msnm como Sicuani y Granja Kayra, calentamiento que será sostenido a lo largo del año.

En los mapas de la figura 39 se observa que el área de mayor cambio corresponde al sector alto del Urubamba, es decir, al tramo altoandino ubicado entre las provincias de Canchis y Urubamba, esto es entre los 4330 y 2800 msnm, variando tal incremento entre 2.4 – 3.6 °C en invierno y primavera principalmente, advirtiéndose además una tendencia hacia un mayor incremento en el lado occidental (partes altas de la provincia de Canchis, límite con la región Puno).

De todo lo anterior, podemos inferir que la tasa incremental de la temperatura máxima en la cuenca del río Urubamba tendría, en promedio, un rango de 0.2 °C a 0.3 °C por década a partir de ahora, lo cual es coherente con la tendencia histórica observada entre 1965 - 2000 que es de 0.01 – 0.04 °C año⁻¹ (Capítulo 3).

Esta tasa incremental proyectada al 2100 en la cuenca del río Urubamba es ligeramente superior a lo esperado a partir de ahora en la cuenca del Mantaro (SENAMHI, 2007).

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

Nº	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	Anta Ancachuro	Anta	Cusco	1.9	1.1	2.3	1.0	3.0	0.9	3.0	1.0
2	Granja Kayra	Cusco	Cusco	2.3	1.1	2.4	1.2	2.8	1.3	2.7	1.0
3	Sicuani	Canchis	Cusco	2.6	1.1	2.8	1.0	3.2	1.2	2.9	1.2
4	Urubamba	Urubamba	Cusco	2.4	0.9	2.5	0.9	3.4	1.0	3.0	0.9

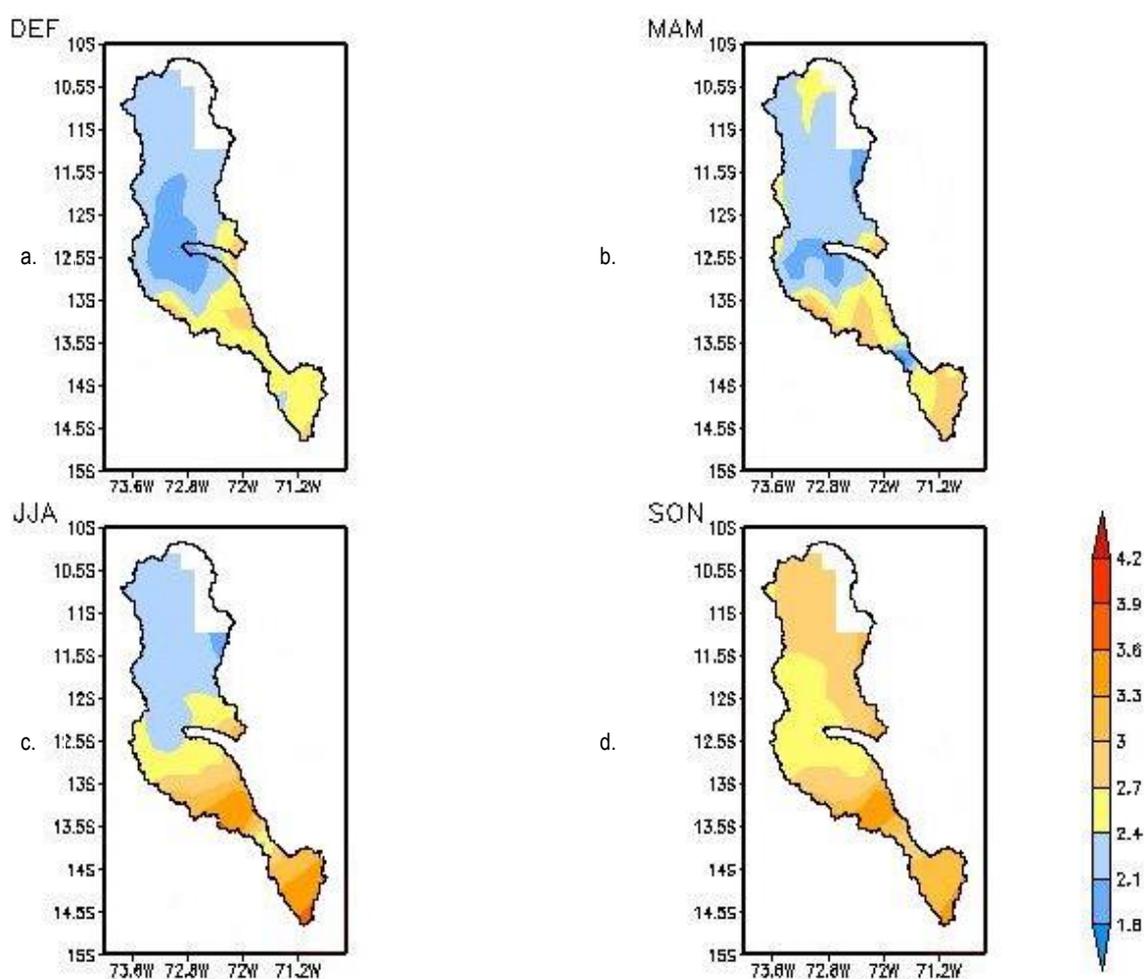


Figura N° 39. Distribución del cambio de la temperatura máxima (°C) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del río Urubamba

El escenario proyectado para finales de siglo, es coherente con la tendencia actual de la temperatura máxima anual, sin embargo, localidades como Quillabamba en la provincia de La Convención (990 msnm), actualmente experimentan una tendencia negativa entre -0.02 y -0.03 °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 observada en este sector de la cuenca, es consistente con la tendencia negativa proyectada de algunos índices climáticos como el Txn (valor mensual mínimo de la temperatura máxima diaria) analizados en el Capítulo 3. Esta tendencia actual podría eventualmente invertirse, o acentuarse, toda vez que los cambios del clima a nivel regional son modulados en buena parte por procesos no lineales de la dinámica local.

Con la información anterior, se han confeccionado los mapas de escenario de temperatura máxima estacionales en la cuenca del Urubamba, 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 40, 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 sobrestimación en primavera y verano. Para finales de siglo (figura 40, derecha), los mayores cambios se presentarían al término del otoño (mayo) e inicio de la primavera (septiembre), a excepción de Sicuani en donde el cambio es uniforme en el año. El rango del cambio varía entre 1.8 – 3.2 °C, rango ligeramente mayor al proyectado en la cuenca del Mantaro para finales de siglo (SENAMHI, 2007).

En la variación estacional puntual y areal del cambio de la temperatura mínima para fines de siglo (Tabla 27 y figura 41 respectivamente), el rango de cambio predominante es de 2.5 – 3.1 °C, observándose el mayor cambio en Anta durante la primavera (3.1 °C), seguido de Granja Kayra y Urubamba (2.9 °C). Así mismo, un centro de mayor incremento se ubica en el sector centro/oeste de la cuenca (provincia de La Convención), situación que se inicia a partir del otoño y se acentúa en el invierno. En primavera el incremento supera los 2.7 °C.

Los incrementos proyectados de la temperatura mínima guardan relación con lo actualmente observado. En la Tabla 13 (Capítulo 3) se aprecia que la tendencia media anual varía entre 0.02 – 0.06 °C año⁻¹, acentuándose en el verano (Tabla 14) con un valor medio de 0.04 °C año⁻¹, lo cual extrapolado a finales de siglo, coincide con el incremento proyectado por el Modelo Japonés de Alta Resolución. 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. 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 40, derecha) oscila entre 1.8 - 3.2 °C, y considerando el intervalo de variación, el rango se amplía hasta 1.0 - 4.3 °C.

La tendencia anual y estacional observada es coherente con la tendencia positiva del indicador Tnx (temperatura mínima máxima) en localidades como Quillabamba y Anta.

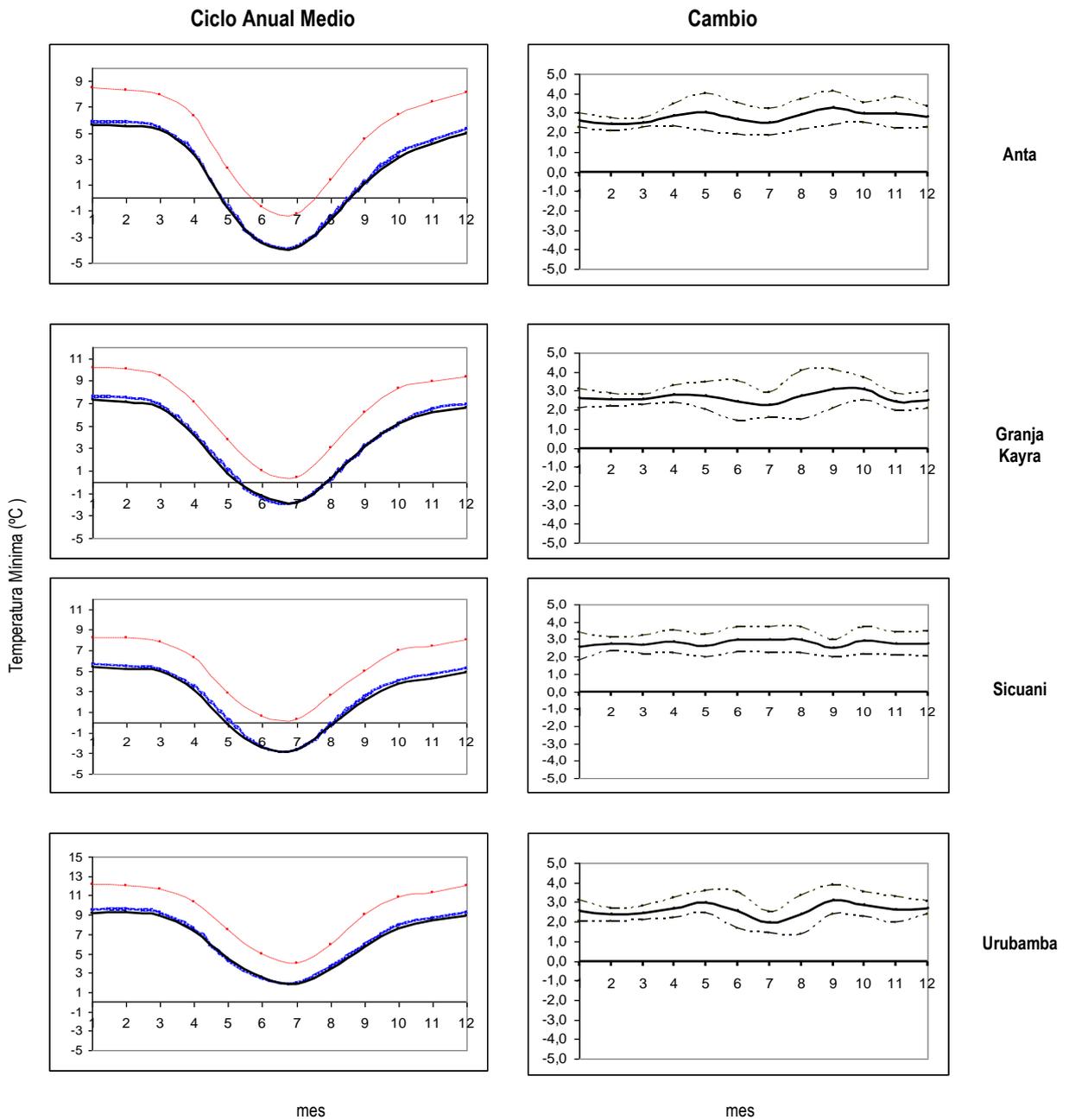


Figura N° 40. (Izquierda) Ciclo medio anual de la temperatura mínima (°C) en la cuenca del Urubamba en los dos time-slice (líneas entrecortadas en azul primer time-slice y en rojo segundo time-slice) y data histórica (línea sólida). (Derecha) Cambios de la temperatura mínima entre los dos time-slice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

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

N°	Estación	Provincia	Región	DEF (°C)	+/- (°C)	MAM (°C)	+/- (°C)	JJA (°C)	+/- (°C)	SON (°C)	+/- (°C)
1	Anta Ancachuro	Anta	Cusco	2.6	0.4	2.8	0.5	2.7	0.8	3.1	0.7
2	Granja Kayra	Cusco	Cusco	2.5	0.4	2.7	0.5	2.5	1.0	2.9	0.7
3	Sicuani	Canchis	Cusco	2.7	0.6	2.7	0.6	2.9	0.7	2.7	0.7
4	Urubamba	Urubamba	Cusco	2.5	0.4	2.7	0.5	2.3	0.8	2.9	0.7

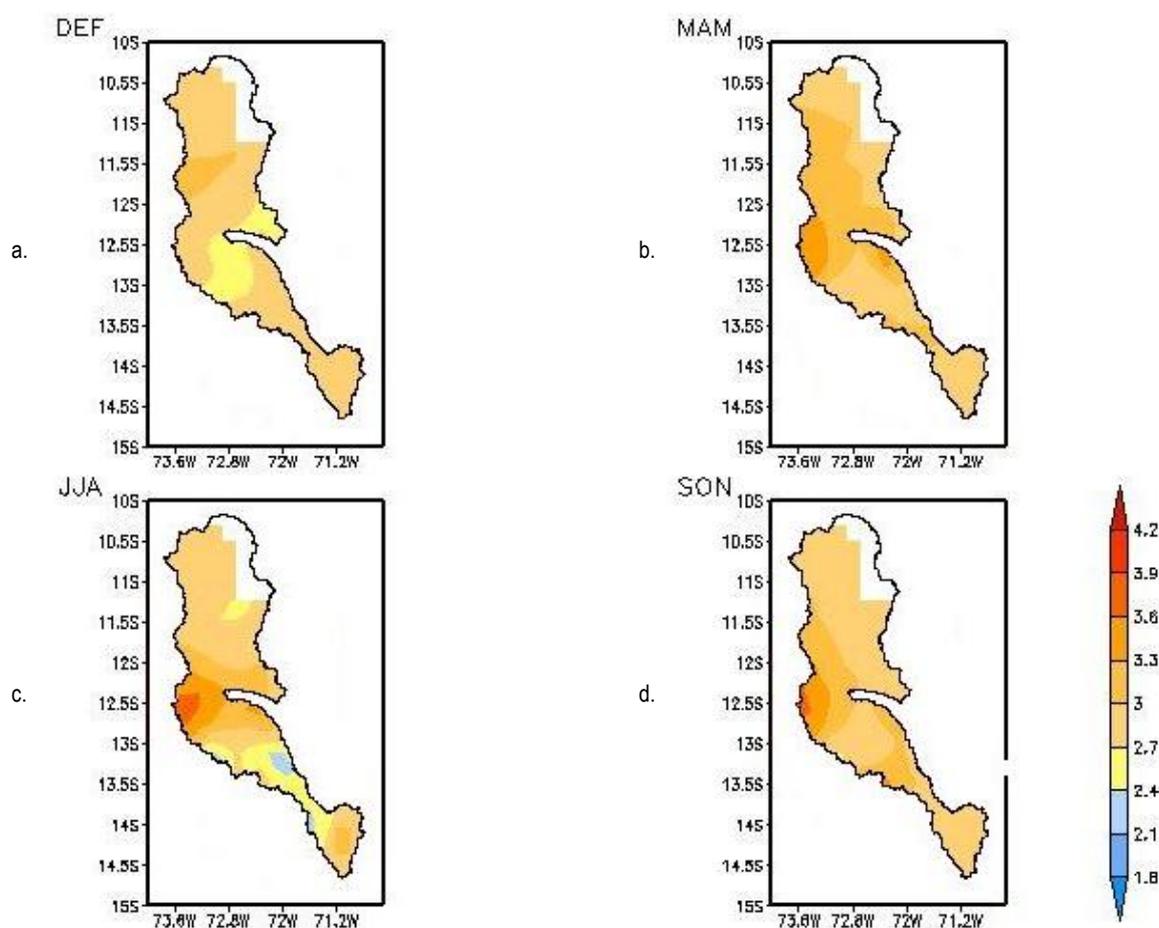


Figura N° 41. Distribución del cambio de la temperatura mínima (°C) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del Urubamba

En el contexto anterior, los cambios en la temperatura máxima y mínima en la cuenca del Urubamba proyectados para finales de siglo, vislumbran un panorama de calentamiento que afectaría 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 el 54% de la población se dedica a la actividad agropecuaria²³. Además, cultivos en pequeña escala de plantas aromáticas han incursionado exitosamente en años recientes en las partes altoandinas de la cuenca, 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.

²³ III Censo Nacional Agropecuario 1994, INEI

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 42, izquierda), pese a ello, el modelo sobrestima ligeramente los montos acumulados durante el periodo de lluvias.

En relación a lo anterior, Mizuta et al. (2006), dan cuenta de sobrestimaciones sistemáticas del modelo en la simulación de la precipitación total ²⁴ 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 el invierno 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, esperándose una ligera reducción de las lluvias en invierno e incrementos en primavera y verano (periodo lluvioso).

A diferencia de las temperaturas extremas, el cambio de la precipitación proyectado para el periodo 2090-2100 (figura 42, derecha) si presenta una marcada estacionalidad. En la misma figura se observa incrementos importantes durante el periodo de lluvias y reducciones significativas en el invierno, excediendo moderadamente la variabilidad normal.

En el sector centro/oeste de la cuenca, sector donde se ubican las subcuencas de Santa Teresa, Sacsara y Chaupimayo (provincia de La Convención) que se alimentan de los deshielos de los nevados Salkantay (6271 msnm), Sacsarayoc (5936 msnm) y Chaupimayo (provincia de Anta, límite con La Convención), se proyecta un incremento de la precipitación entre 10 - 30% durante el periodo de lluvias, y una reducciones de hasta 40% en invierno.

²⁴ Precipitación total: suma de la precipitación convectiva y de gran escala

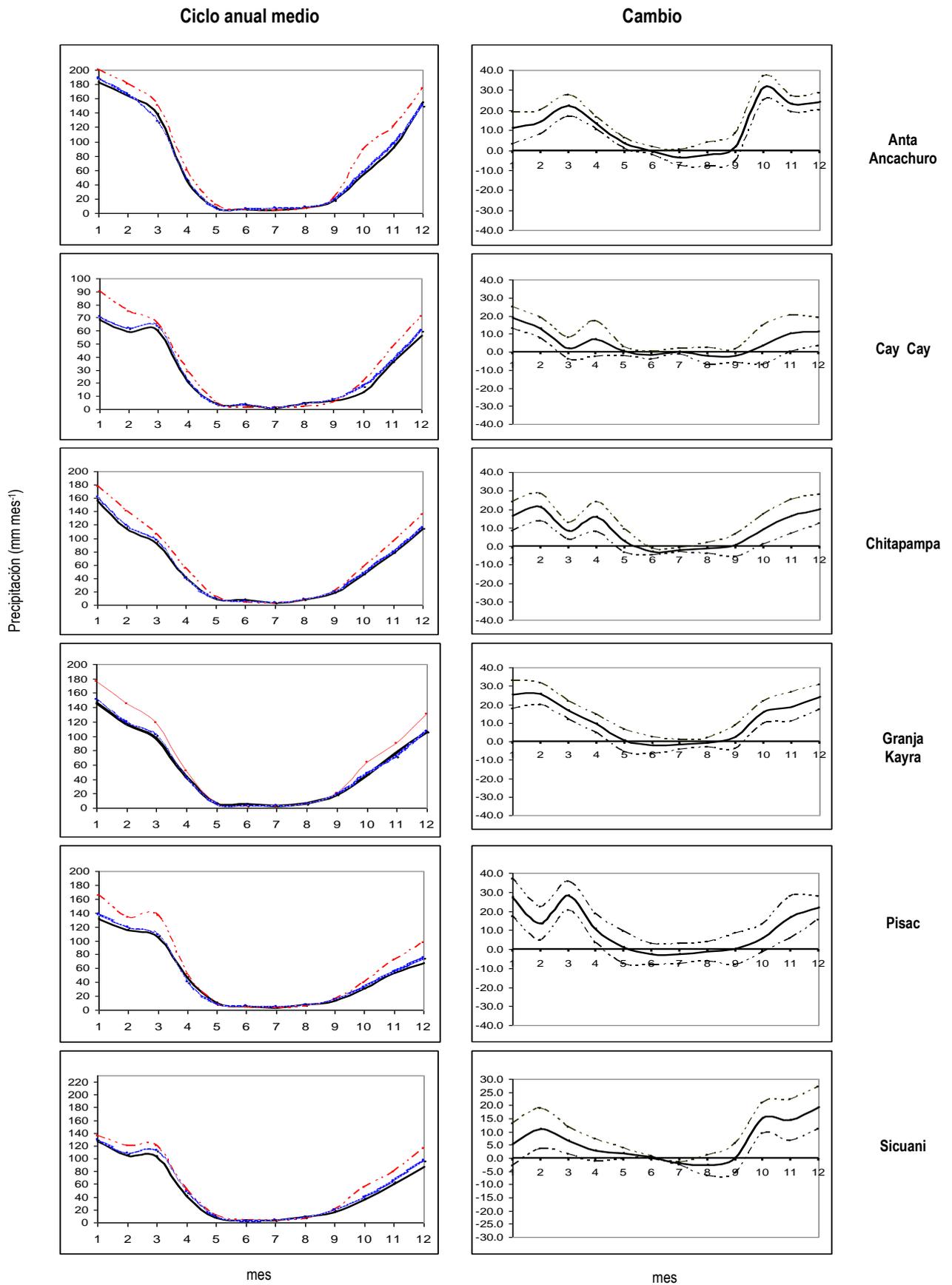
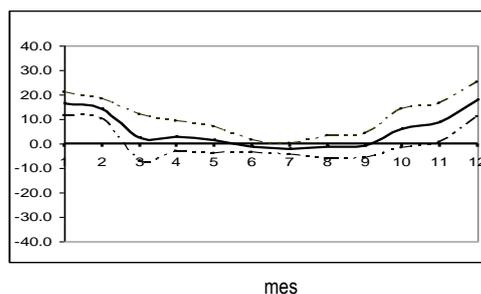
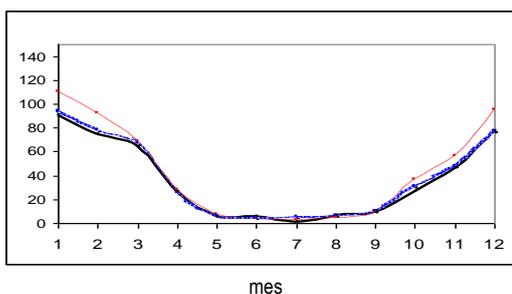


Figura N° 42. (Izquierda) Ciclo medio anual de la precipitación (mm mes⁻¹) en la cuenca del río Urubamba en los dos time-slice (líneas entrecortadas en azul primer time-slice y en rojo punteado segundo time-slice) y data histórica (línea sólida). (Derecha) Cambios en la precipitación en los dos time-slice (la línea sólida) y umbrales de cambio con un 95% de confianza (líneas punteadas).



Urubamba

... Continúa de fig.42

Según la Tabla 28, en localidades de las provincias de Paucartambo, Cusco, Calca y Urubamba, las lluvias se incrementarían entre 15-25% en el verano, mientras que en provincias como Canchis y Anta, los incrementos serían mayores en primavera con 27% y 34% respectivamente.

En general todas las estaciones analizadas presentarían importantes reducciones de lluvias durante el invierno del orden de 30 – 50%.

Estos resultados difieren de lo proyectado en la cuenca del Mantaro (SENAMHI, 2007), donde las reducciones predominan en gran parte de la cuenca, y 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 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, el proyectado incremento de lluvias en el largo plazo en toda la cuenca son particularmente consistentes con el incremento del número de días húmedos consecutivos (CWD) y el incremento de días de precipitación intensa y muy intensa (R10mm y R20mm) que se viene observando actualmente en esta cuenca (Capítulo III). Los datos históricos revelan una tasa de crecimiento altamente significativa específicamente en el caso de Anta (8.5 mm año⁻¹), Quillabamba (3.8 mm año⁻¹) y Urubamba (2.9 mm año⁻¹), tendencia que se acentúa en verano hasta con 6.1 mm año⁻¹ en el caso de Anta.

En la Tabla 28 y figura 43, 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° 28. Cambio estacional de la precipitación (porcentual y en mm) en algunos puntos de la cuenca del río Urubamba.

Nº	Estación	Provincia	Región	DEF (%)	(mm)	MAM (%)	(mm)	JJA (%)	(mm)	SON (%)	(mm)
1	Anta-Ancachuro	Anta	Cusco	10	49.0	20	39.0	-42	-7.0	34	55.0
2	Cay Cay	Paucartambo	Cusco	24	43.0	11	9.5	-50	-4.3	21	11.2
3	Chitapampa	Cusco	Cusco	15	57.0	19	27.0	-35	-6.0	18	25.0
4	Granja Kayra	Cusco	Cusco	20	75.0	18	27.0	-38	-5.0	26	36.0
5	Pisac	Calca	Cusco	20	62.0	24	39.0	-43	-7.0	23	22.0
6	Sicuani	Canchis	Cusco	11	35.0	7	11.0	-33	-5.0	27	29.0
7	Urubamba	Urubamba	Cusco	20	48.0	7	6.3	-36	-5.0	17	14.0

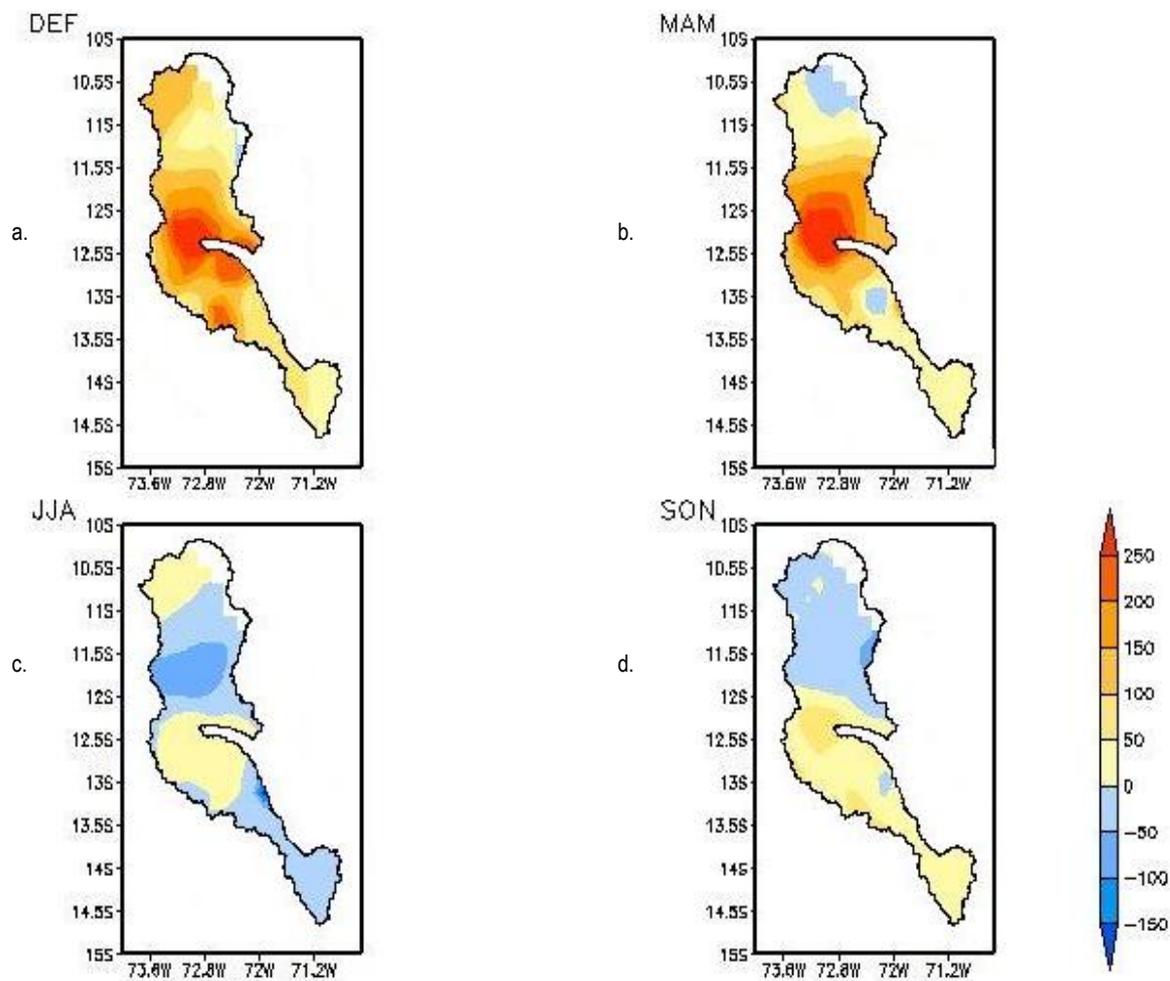


Figura N° 43. Distribución del cambio de la precipitación (mm) para el periodo 2090-2100 respecto de 1982-1991, en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d), en la cuenca del Urubamba.

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 segundo caso, específicamente en las subcuencas de los ríos Santa Teresa, Sacsara, Ahobamba y Chaupimayo (vertiente izquierda del río Urubamba, en las proximidades del nevado Salkantay), que involucra al distrito de Santa Teresa con sus anexos y comunidades campesinas, que en conjunto representan una población de 1422 habitantes.

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 6 estaciones meteorológicas, con un record promedio de 40 años; así como una aproximación del caudal en un sector del río Urubamba (Pisac) 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 Servicio²⁵ 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 0.04 °C año⁻¹ en promedio, lo cual es consistente con la tendencia positiva del índice de temperaturas extremas máximas, observado principalmente en las regiones altoandinas de Anta y Sicuani. No obstante algunas localidades como Quillabamba (La Convención) actualmente presentan una tendencia anual de decrecimiento de la temperatura máxima del orden de 0.02 °C año⁻¹, además de un incremento del índice del número de días fríos para el caso de Granja Kayra (Cusco).
- La tendencia de las precipitaciones en los últimos 40 años no es uniforme y es espacialmente diferenciada, presentando una tendencia anual creciente entre 0.7 – 8.5 mm año⁻¹. La señal de este aparente incremento de las precipitaciones en los últimos 40 años es más evidente en verano y menor en primavera guardando consistente coherencia con el significativo incremento del número de días húmedos consecutivos y de la intensidad de las lluvias en toda la cuenca. Quillabamba y Granja Kayra experimentan en los últimos años una reducción de lluvias en la primavera del orden de 0.2 – 1.1 mm año⁻¹.

²⁵ 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.

- La mayor frecuencia de temperaturas menores de 0 °C (heladas) se presenta en invierno con 5 - 10 días por mes en la zona de Yucay, Urubamba, Calca y Cay Cay, mientras en sectores más altos como Anta y Cusco, la frecuencia es de 24 - 26 días por mes. En el verano la frecuencia de heladas se reduce significativamente en toda la cuenca. Localidades como Machu Picchu y Quillabamba presentan una menor frecuencia de heladas durante el año, no superando los 01 días por mes durante el invierno. El comportamiento anual de las heladas en los últimos 35 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 altoandino de las provincias de Urubamba y Cusco, no obstante, algunos sectores de las provincias de Anta y Canchis vienen presentando mayor número de días con heladas.
- Desde la segunda mitad de la década de los ochenta, las lluvias en la cuenca presentan un comportamiento irregular, predominado sin embargo, situaciones de excesos de lluvias, las mismas que se han presentado con mayor incidencia en la década de los noventa y principios de siglo. Estos periodos húmedos importantes corresponden a los años 1993/94 y 1999/2003, siendo el más intenso éste último el cual tuvo una duración de tres años consecutivos a nivel de cuenca. Respecto a las sequías éstas se han presentado en periodos largos y con mayor frecuencia hasta antes de 1985, siendo más recurrentes entre 1976 y 1984, particularmente en Urubamba y Sicuani.
- Las correlaciones obtenidas, nos indican que gran parte de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca está asociada a la variabilidad interanual (El Niño), y que además es complementada con la variabilidad intraestacional. Durante un año Niño, las precipitaciones tienden a ser de deficientes a normales, mientras que en años la Niña las precipitaciones tienden a ser de normales a excesivas.

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

- Los caudales generados para el periodo 2008-2035 a partir de la estación hidrológica de control Pisac, se presentarían dentro de sus valores normales; existiendo la posibilidad que se presente entre 1 a 4 años secos, un año normal pero en ningún caso años húmedos. El periodo 2030-2035, serían mayormente años secos por lo que los caudales de río Urubamba serían deficientes.

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

Las proyecciones del clima en la cuenca del Urubamba 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 2.9 °C y 2.7 °C respectivamente con respecto al clima actual; incremento de las precipitaciones durante el verano y primavera entre 17 y 24%, así como reducciones generalizadas en invierno del orden de 40%.

Del análisis estacional, arribamos a las conclusiones siguientes:

- En el caso de la temperatura máxima, el cambio fluctúa entre 1.9 – 2.6 °C en verano; en otoño el incremento varía entre 2.3 – 2.8 °C; en invierno el cambio es mayor y generalmente está por encima de los 3.0 °C y en primavera el cambio fluctúa entre 2.7-3.0 °C. Se estima además que estos cambios serán más acentuados durante el invierno y primavera y en regiones ubicadas por encima de los 2800 msnm, no obstante se observa una actual tendencia de decrecimiento anual en Quillabamba (990 msnm).

- El rango de variación proyectado de la temperatura mínima es de 2.5 – 2.7 °C en verano y de 2.7 – 2.8 °C en otoño, dicho cambio será más acentuado entre las provincias de Anta y La Convección (cerca de las subcuencas de interés); en el invierno el incremento varía en un rango de 2.3 – 2.9 °C, siendo el sector sur el que experimentaría un mayor cambio; en primavera el cambio es del orden de 2.7 – 3.1 °C, con mayor incidencia en la proximidades de Santa Teresa.
- En lo que respecta a las precipitaciones, en el largo plazo se proyecta un escenario de más lluvias en toda la cuenca. En verano se esperan moderados incrementos del orden de 10 – 24% en relación al clima actual. En otoño se espera un cambio similar al descrito en verano pero en menor proporción. En invierno hay reducciones importantes principalmente en pisos altitudinales encima de los 3000 msnm, donde se espera una reducción de las lluvias de hasta un 50%. En primavera se proyecta un incremento generalizado en toda la cuenca del orden de 17 – 34%, aunque algo superiores en el sector centro/occidental (cerca de la subcuenca de Santa Teresa) y sur.
- Superponiendo los escenarios antes mencionados, se prevé que las zonas más vulnerables de la cuenca corresponden a los sectores próximos a la subcuenca de Santa Teresa y a las partes altas de la cuenca (encima de los 2800 msnm), en otras palabras, el calentamiento e incremento de lluvias se manifestarán más explícitamente en estos dos sectores de la cuenca.

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

- Alarcón, C., 1991: Caracterización agroclimática del departamento del Cusco. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. 207 pp., UNALM.
- 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., Martinez, 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.
- EGEMSA, Estudio de Impacto Ambiental de la Línea de Transmisión Machu Picchu - Cotaruse 220 kV.
- 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. and 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, 2004: Tendencia de la precipitación en la cuenca hidrológica del Lago Titicaca. Diaz, P. A., 20 pp
- SENAMHI, 2005: Climate change scenarios in Peru to 2050: Piura river basin. Autores: 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 - MINAG, 2005: Atlas de Heladas. Autor: Huamaní, J. C., 37 pp.
- SENAMHI, 2007: Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro 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.
- 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".

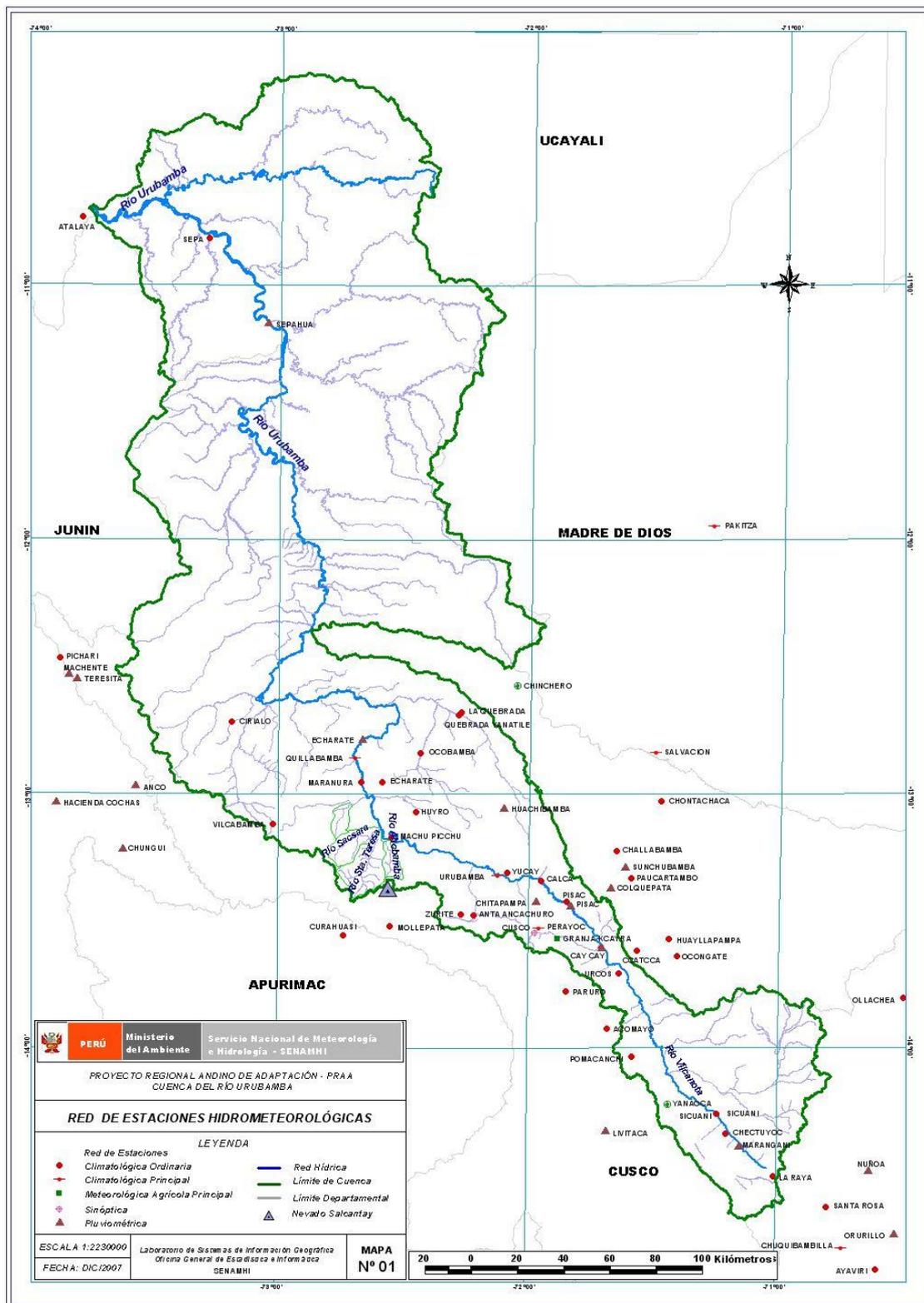
Páginas Web consultadas

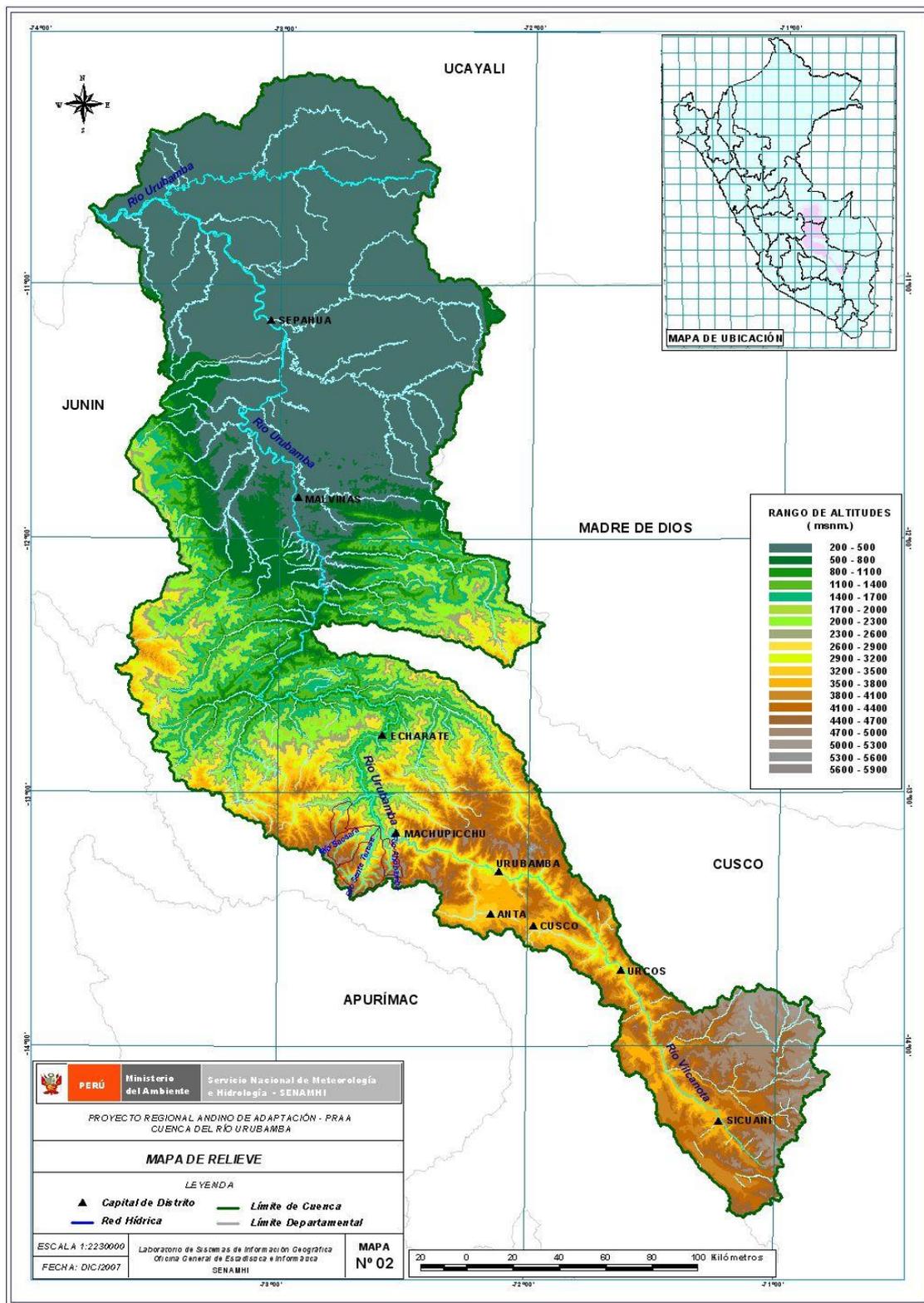
<http://www.met.inf.cu/sequia/amigo.asp> Proyecto Friend Amigo Eventos hidrológicos mínimos (Sequías):
http://sepiensa.org.mx/contenidos/2005/l_calenta/calentamiento_1.htm
http://www.distiluz.com.pe/electrocentro/01_empresa/resena.html
<http://www.sumaqueru.com.pe>
<http://www.lennotech.com/greenhouse-effect.html>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

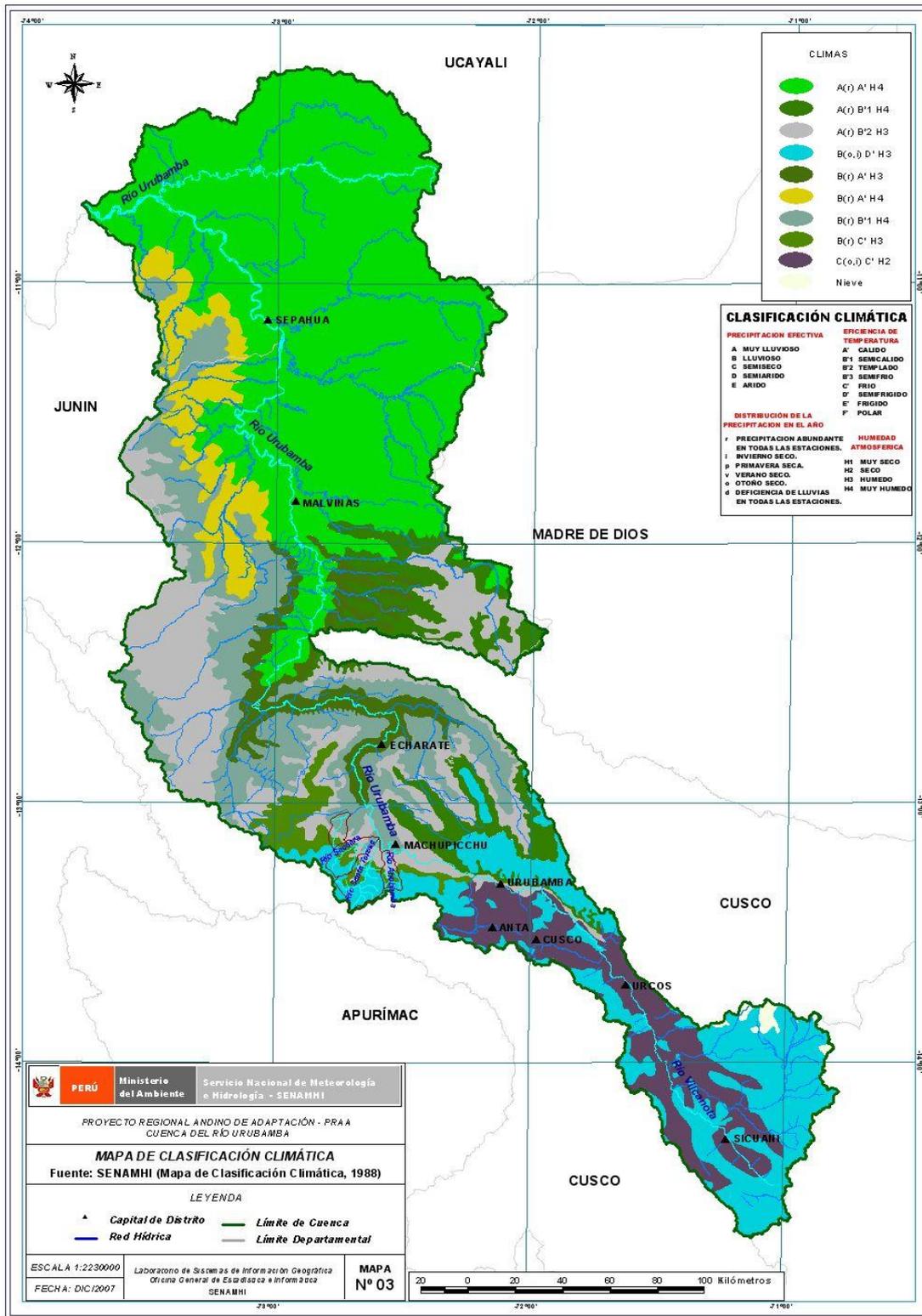
APENDICE 1

Red hidrometeorológica, Mapas de relieve y clasificación climática

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



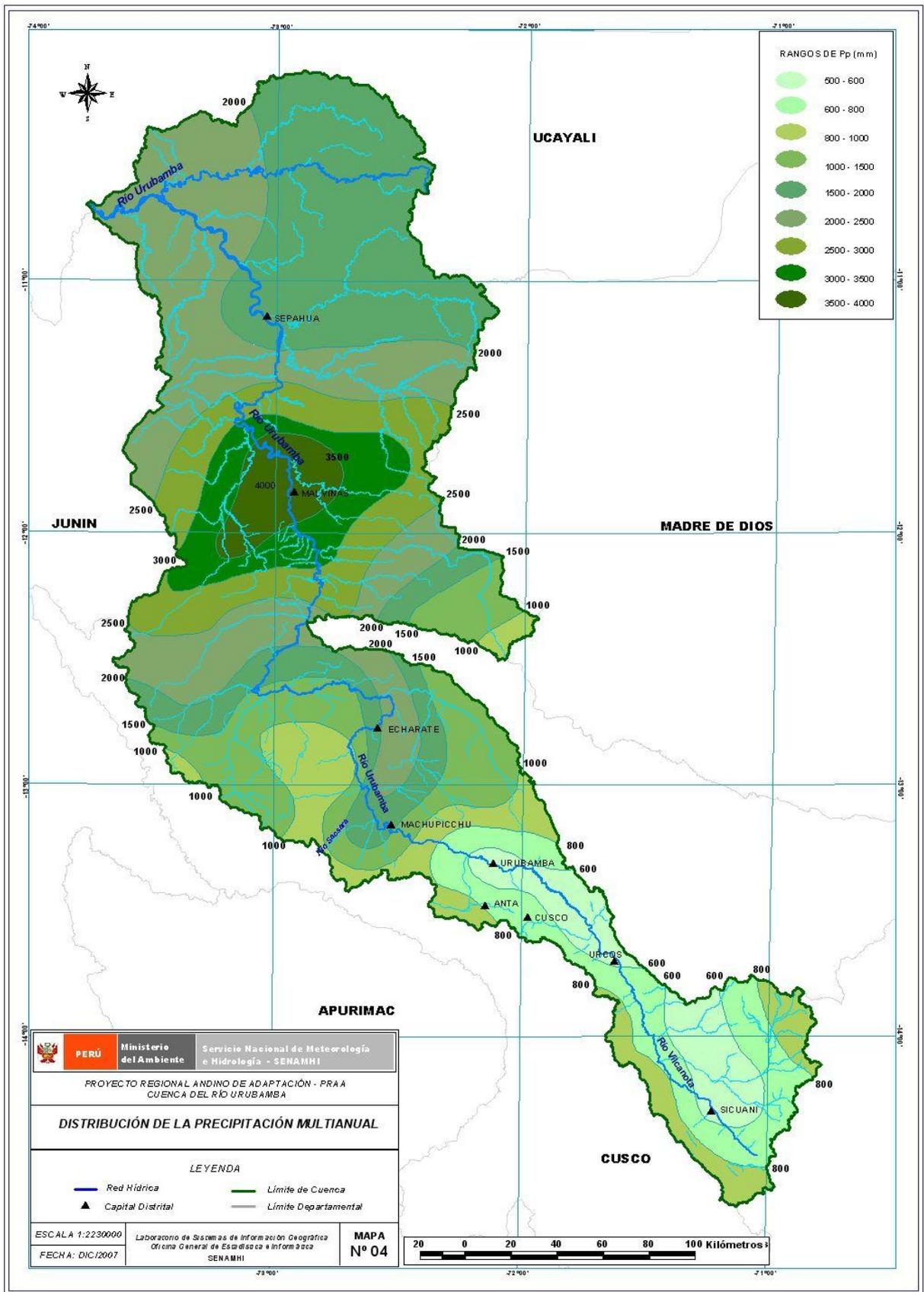


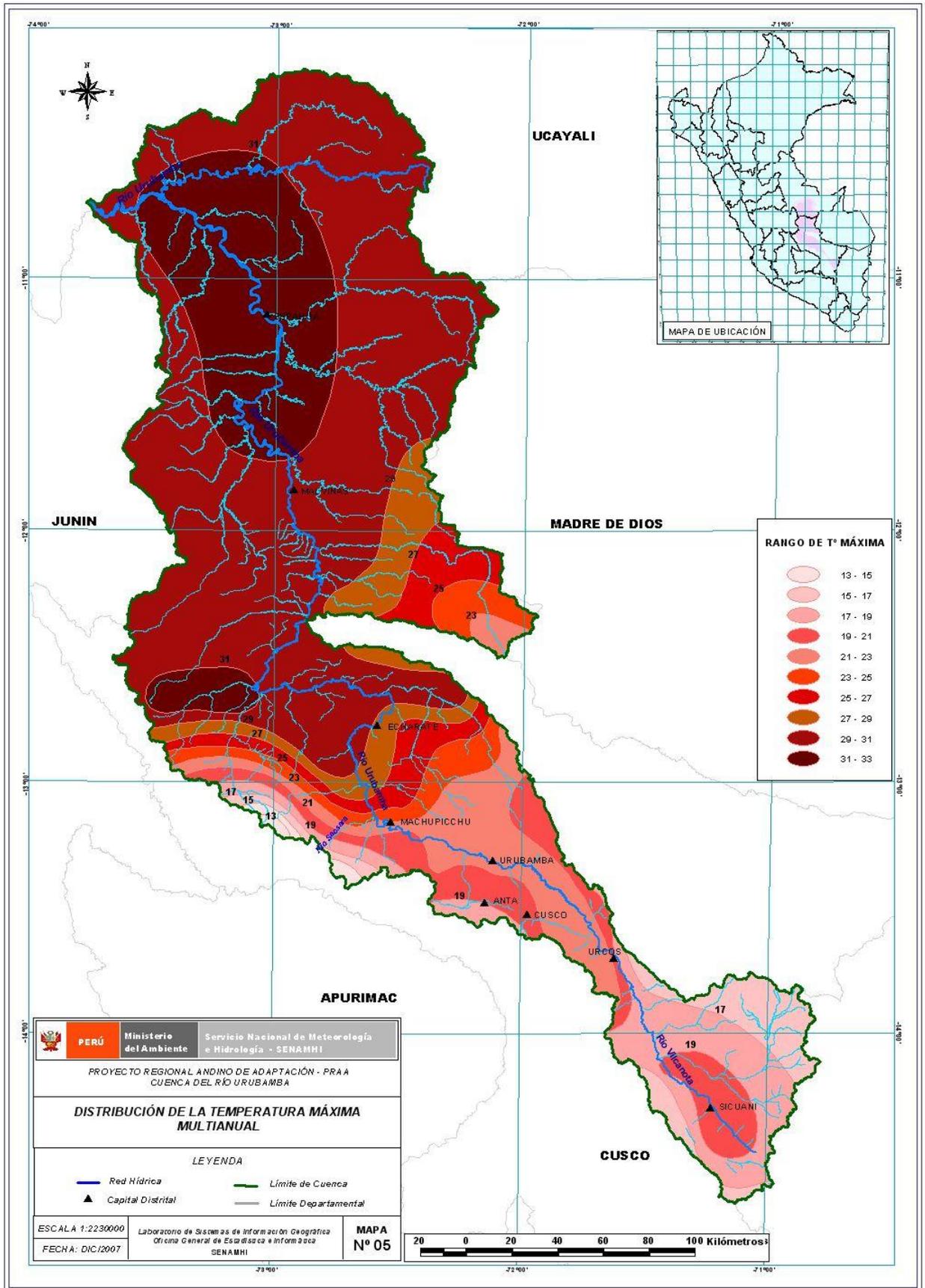


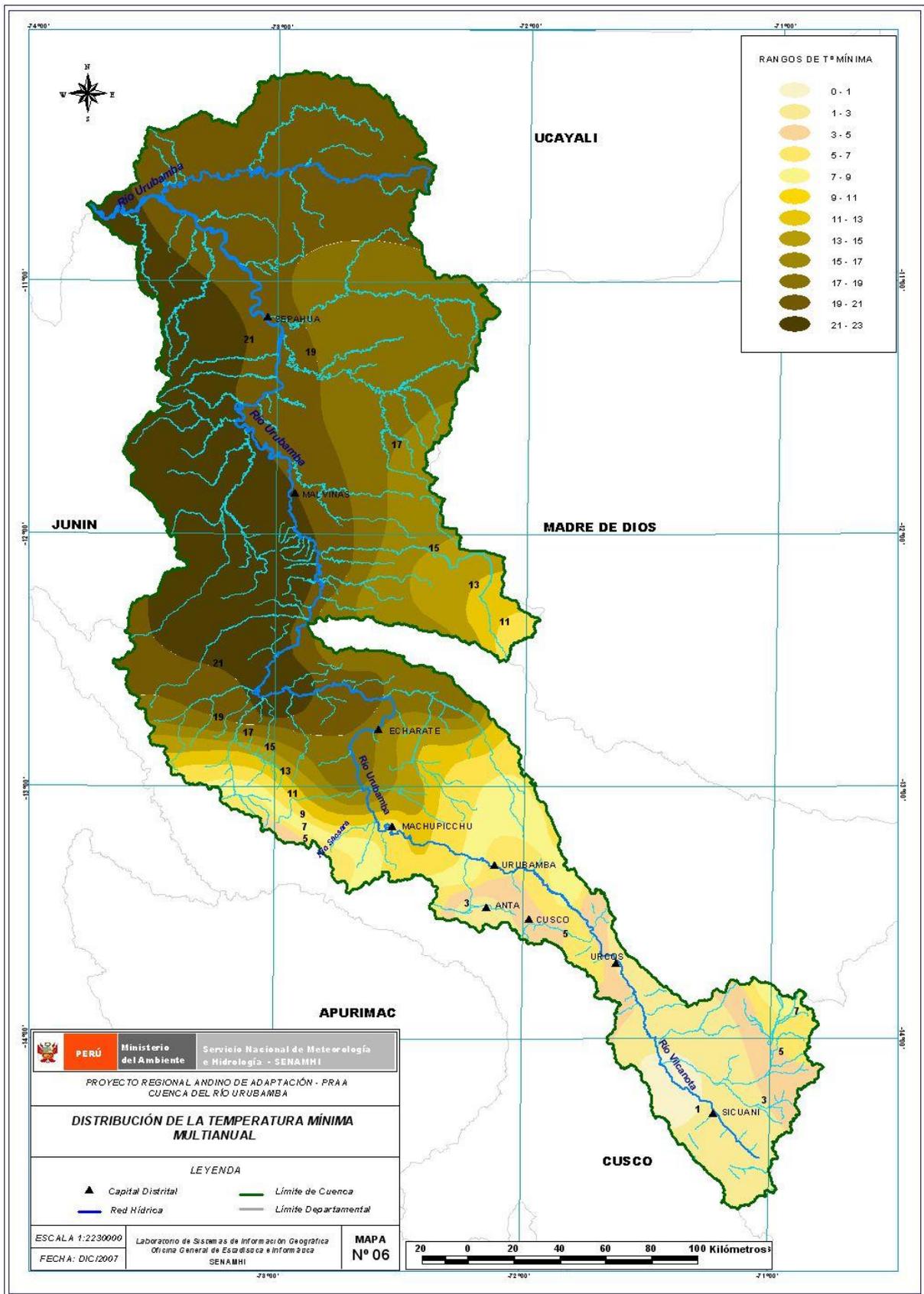
APENDICE 2

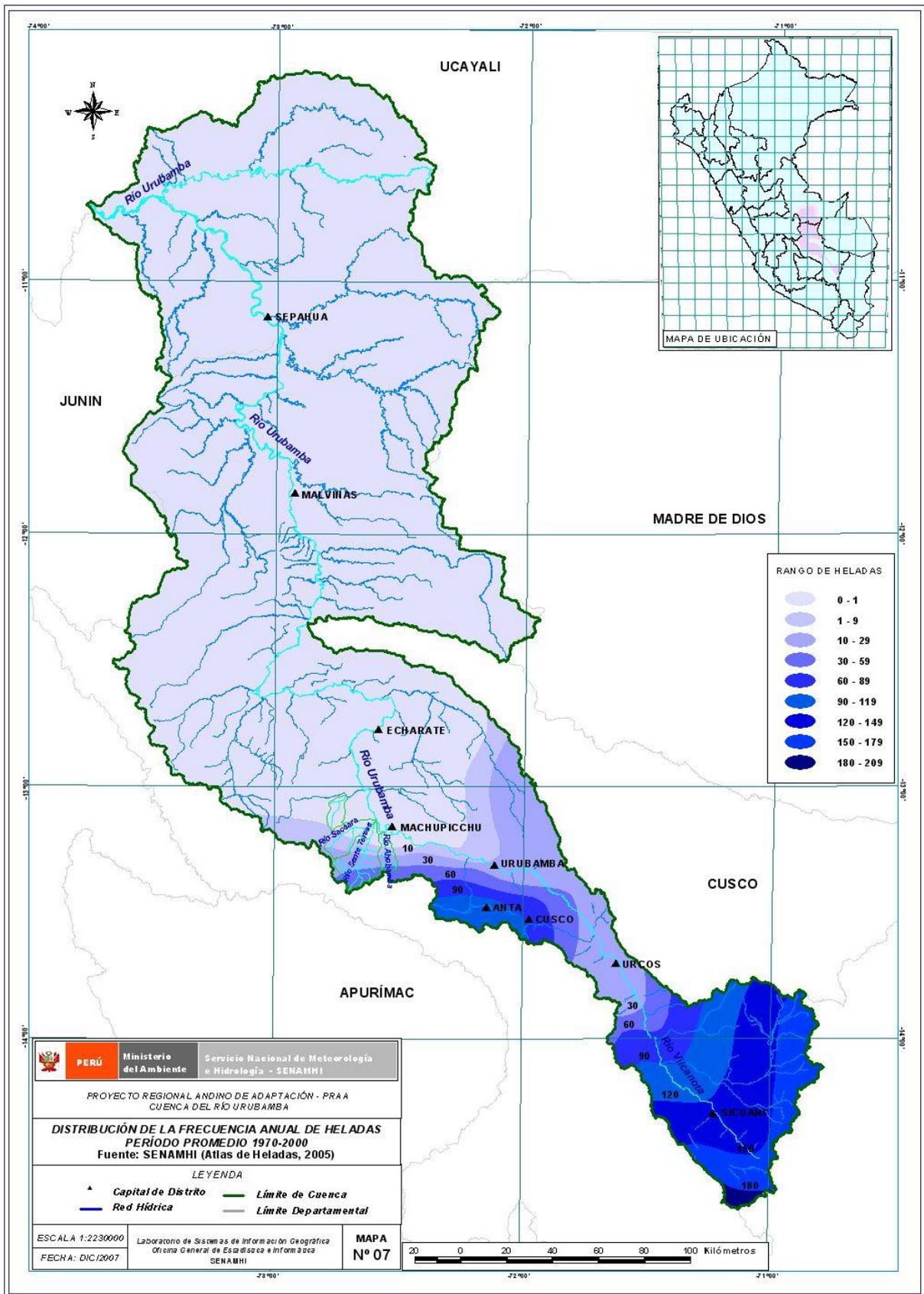
Mapas de promedios multianuales, eventos extremos y tendencias actuales

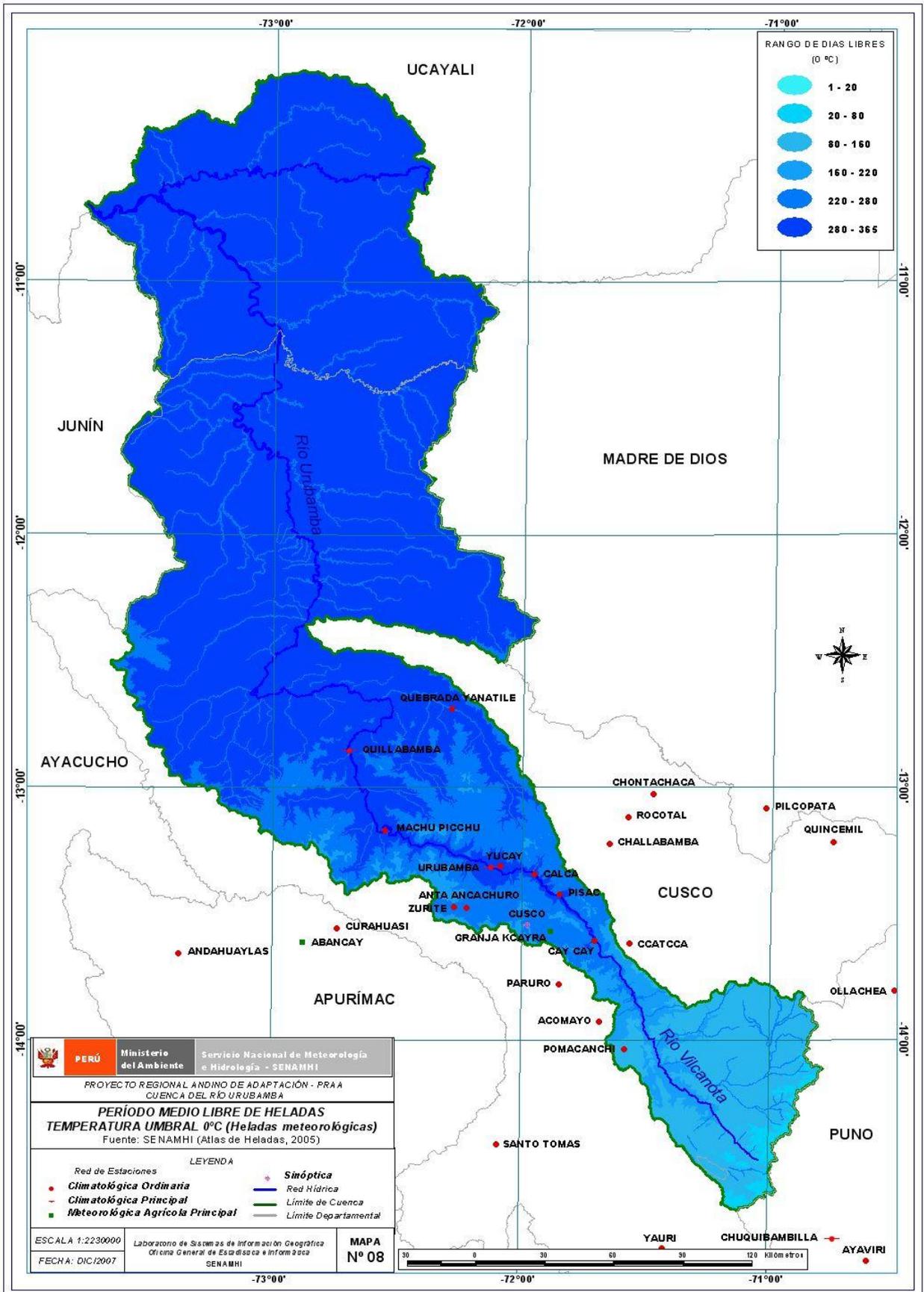
- Mapa 04: Distribución de la Precipitación multianual de la cuenca del Urubamba
- Mapa 05: Distribución de la Temperatura máxima multianual de la cuenca del Urubamba
- Mapa 06: Distribución de la Temperatura mínima anual de la cuenca del Urubamba
- Mapa 07: Distribución espacial de la frecuencia anual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

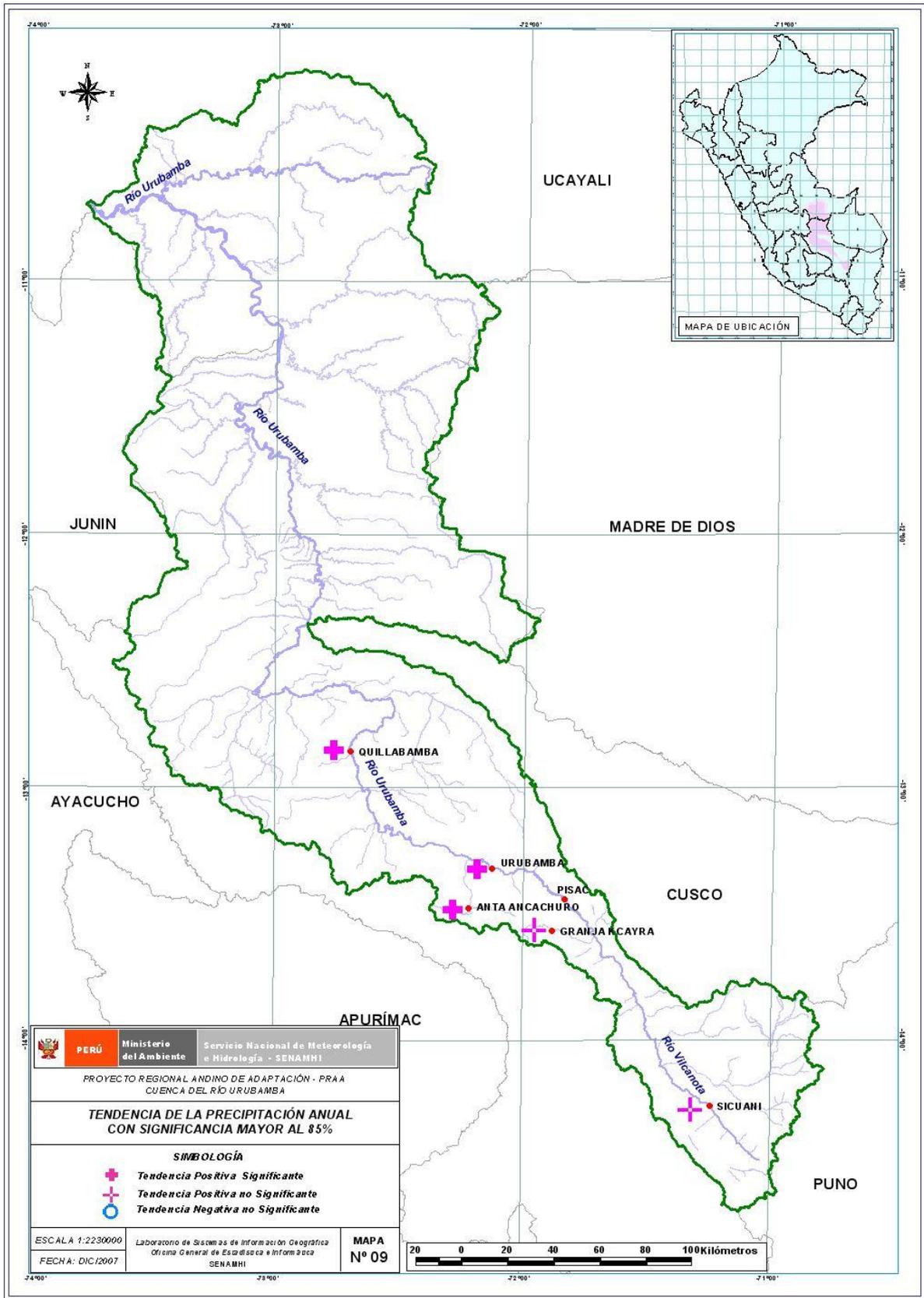


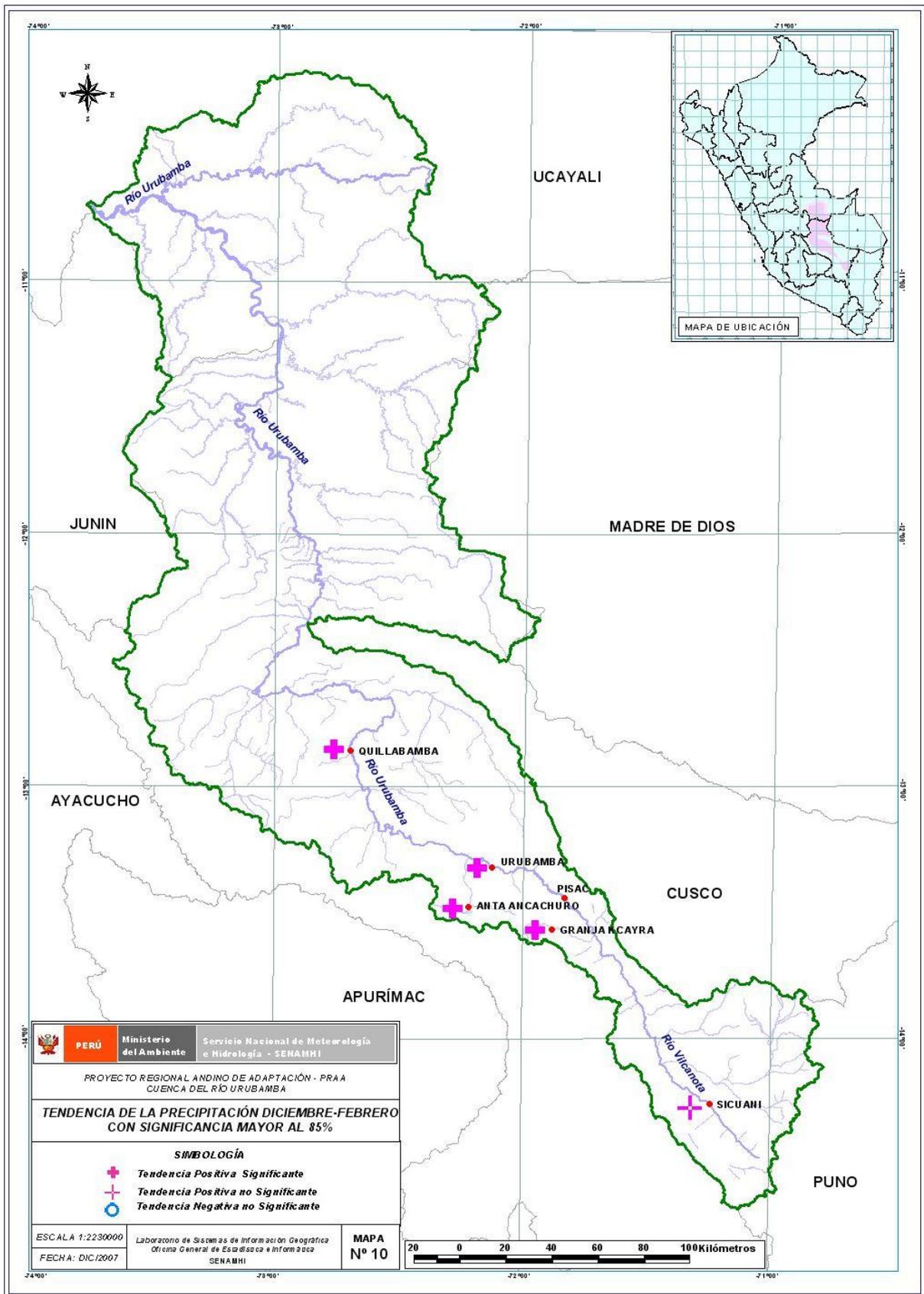


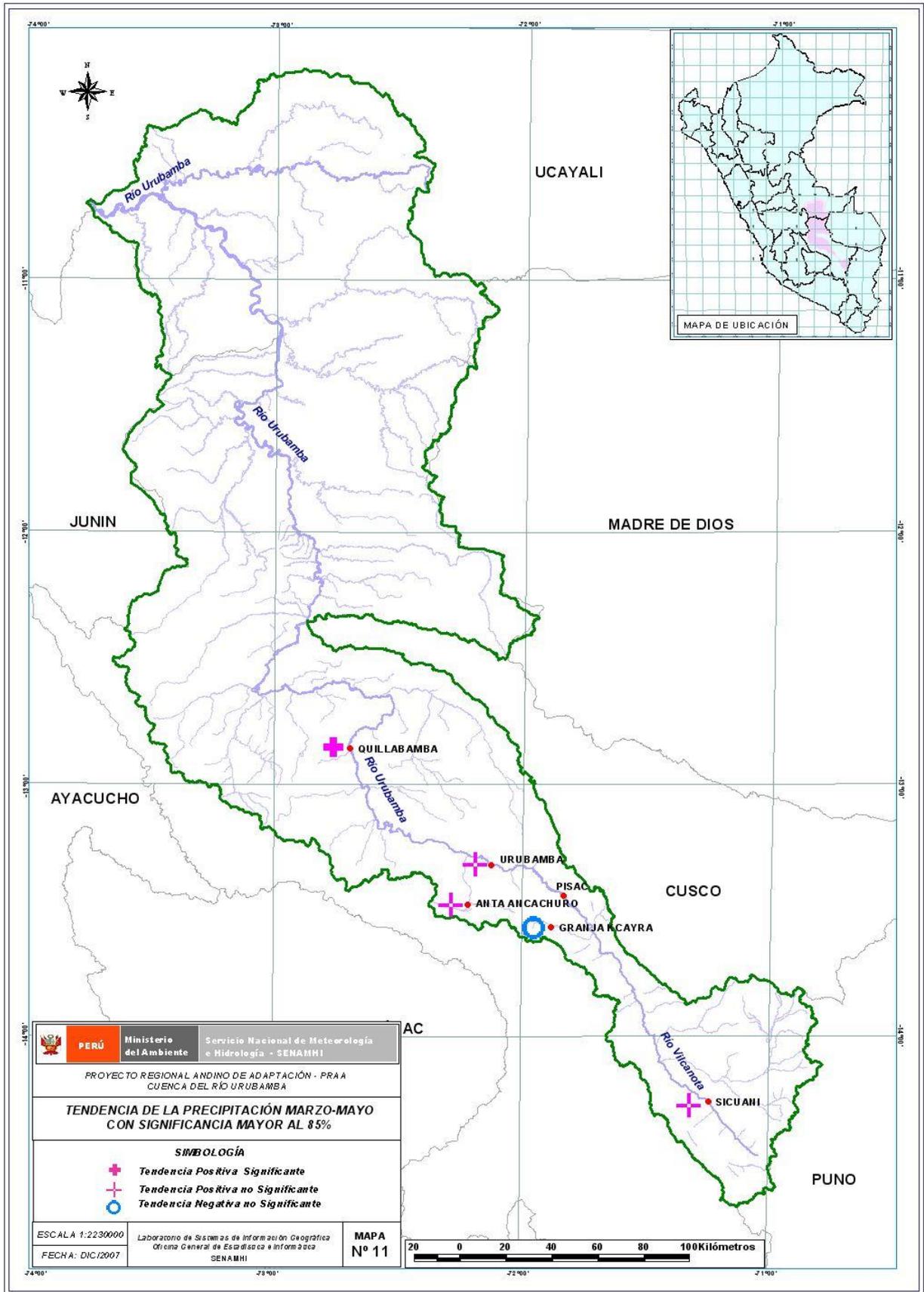


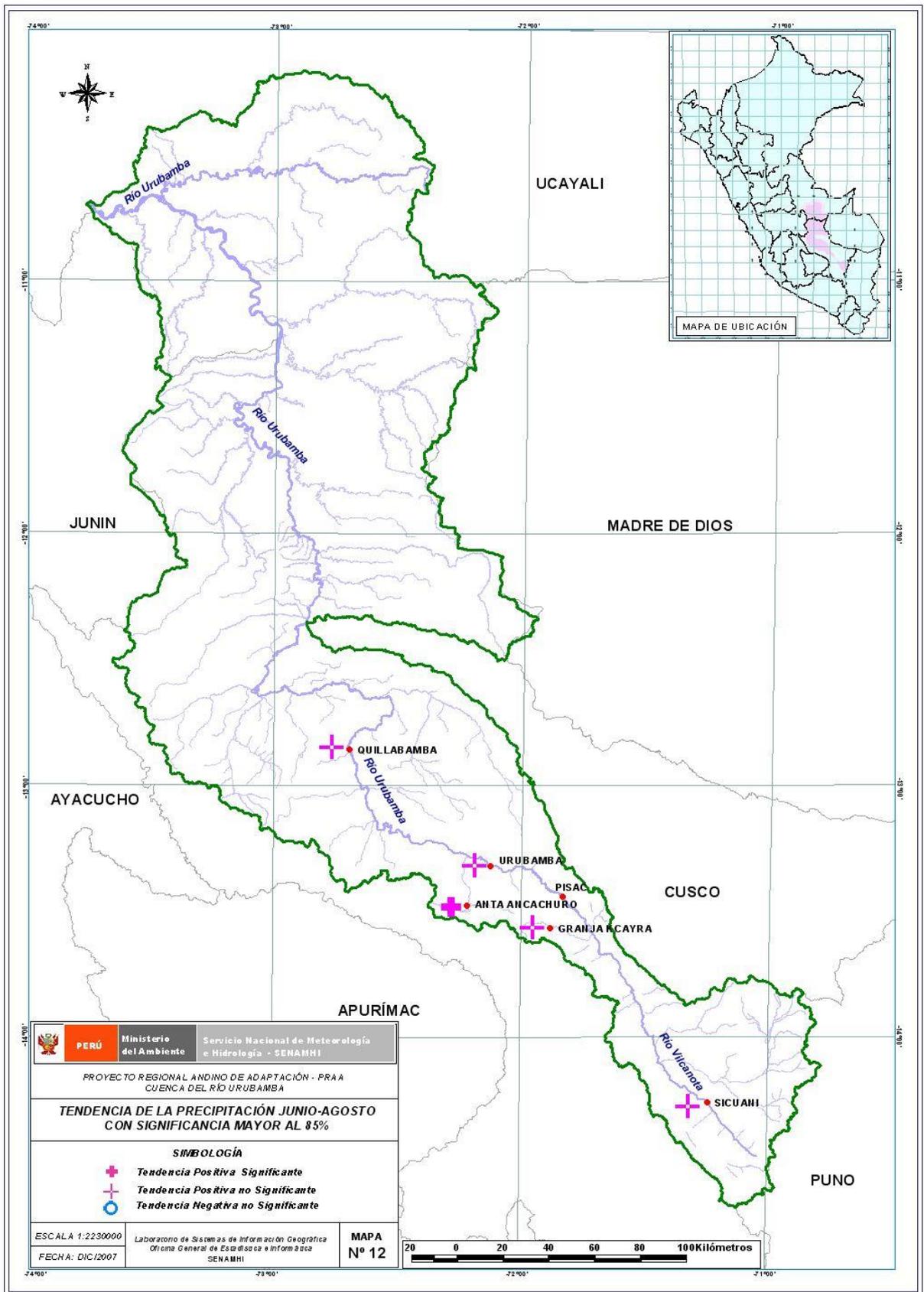


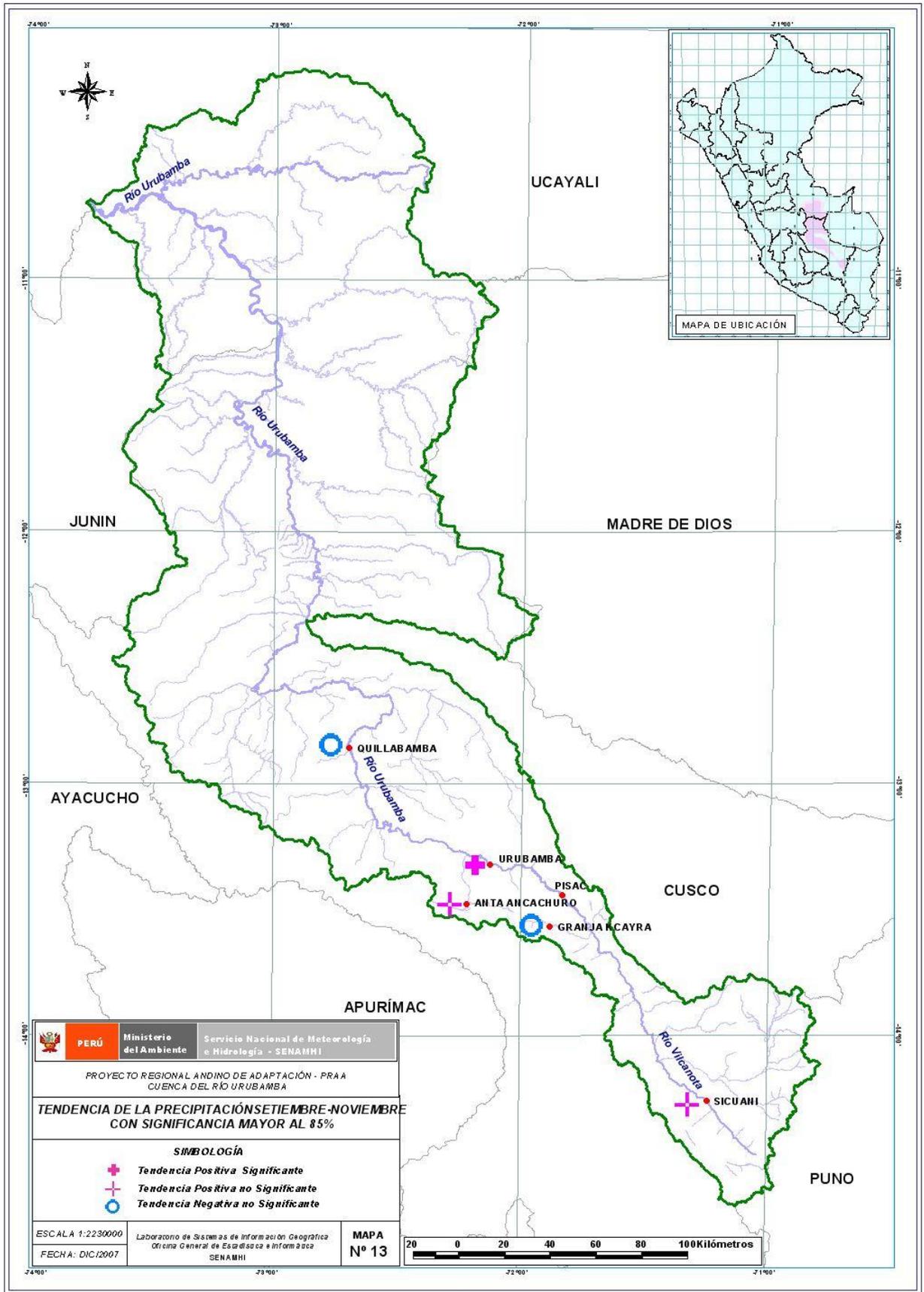


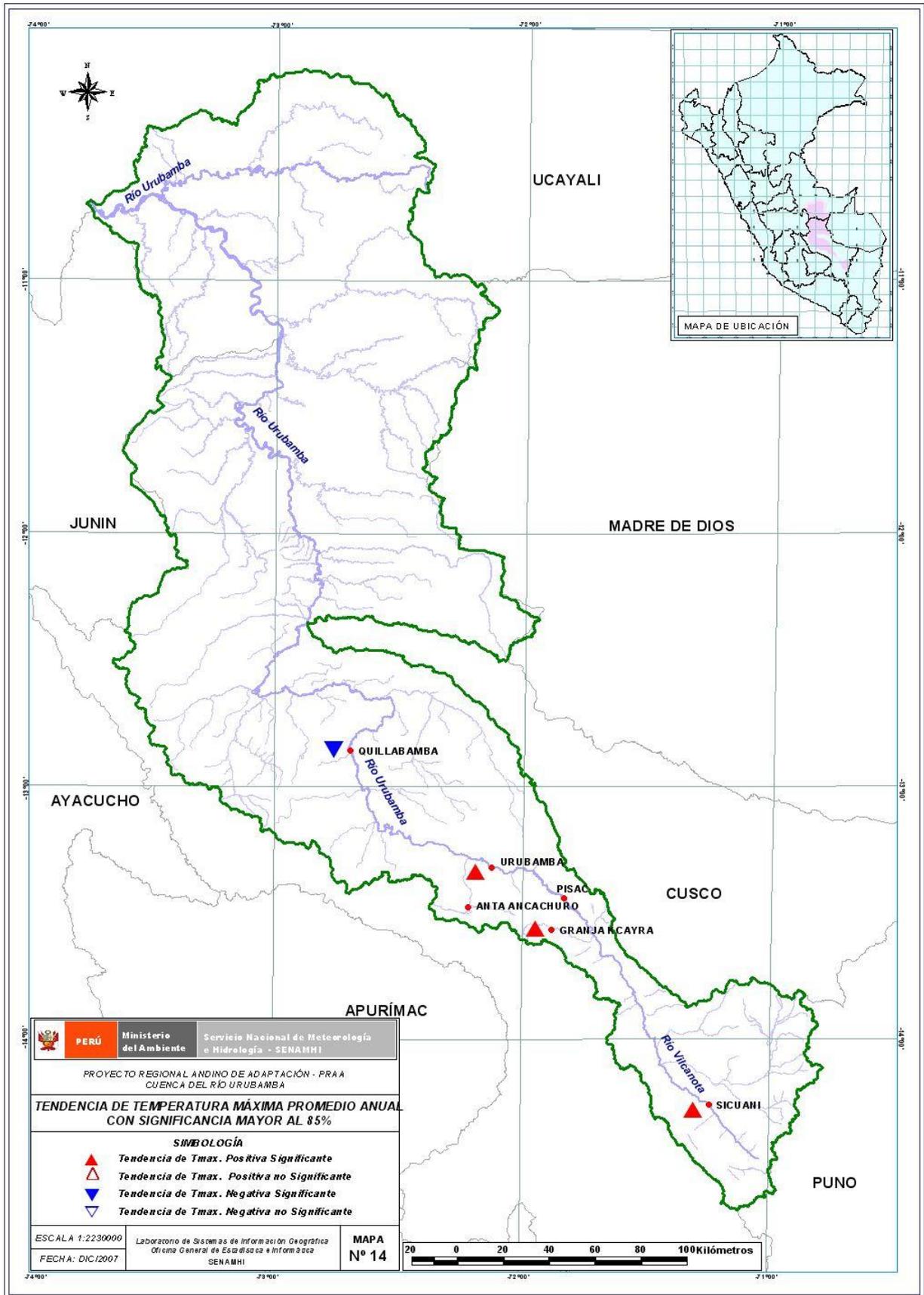


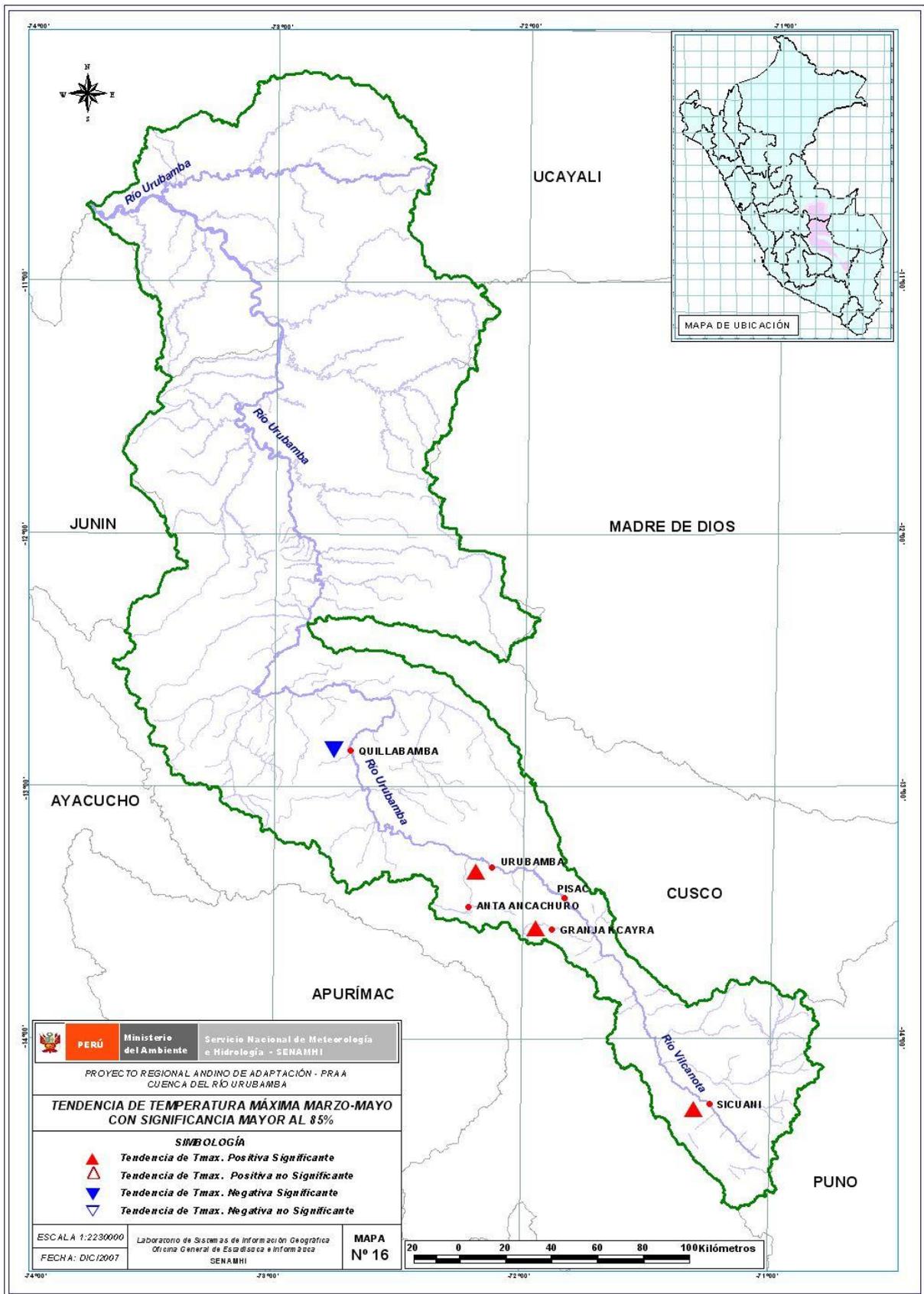


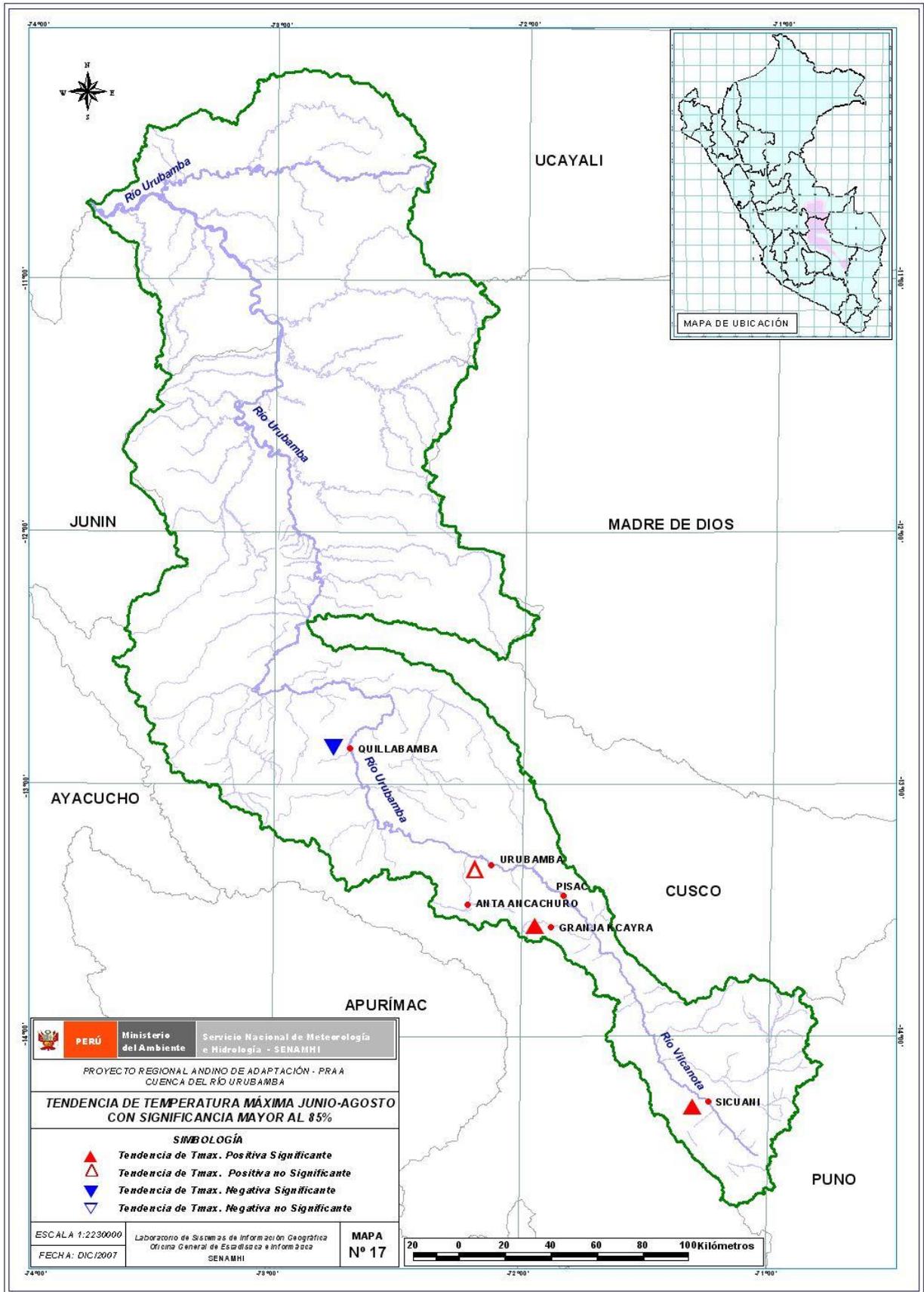


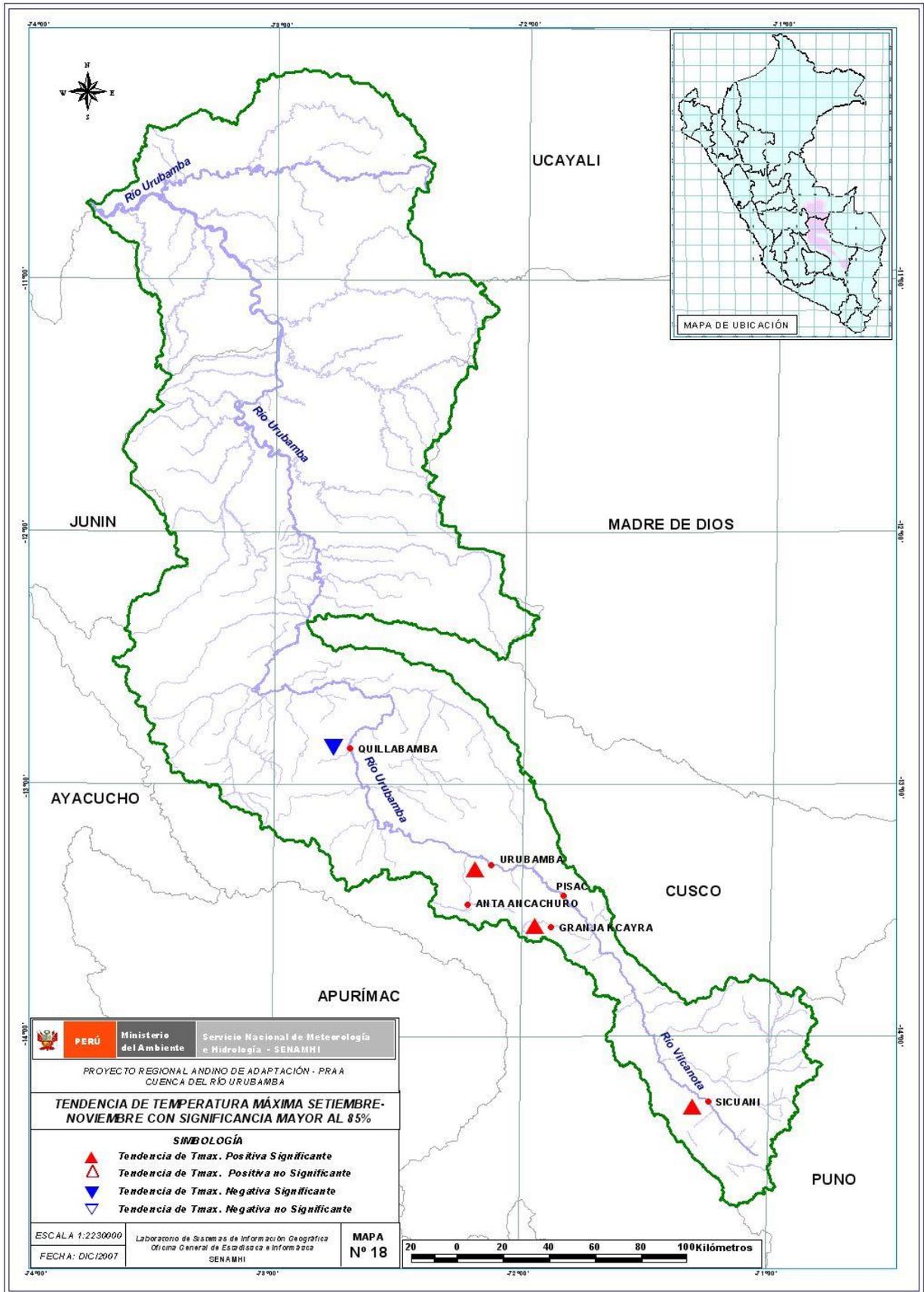


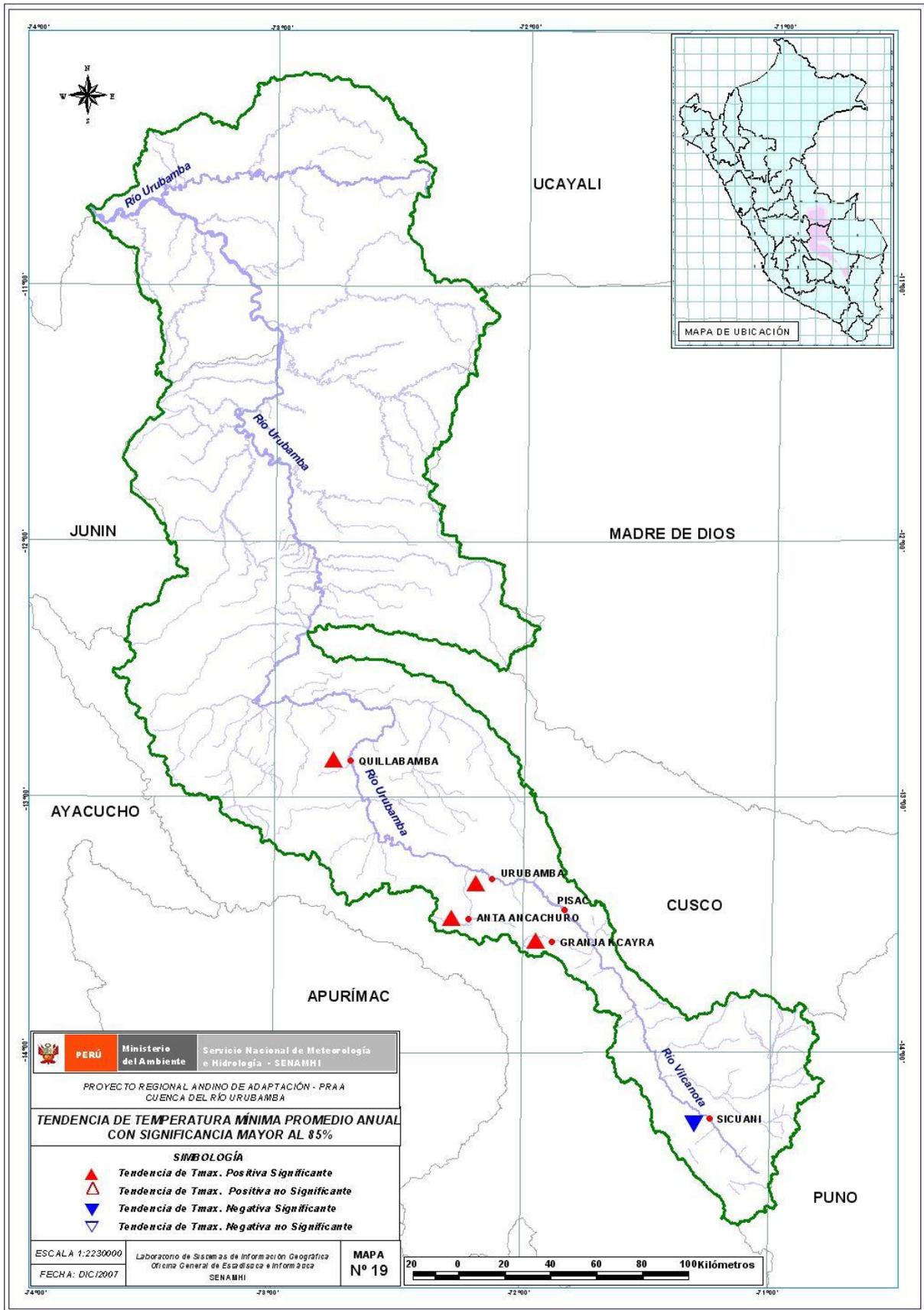


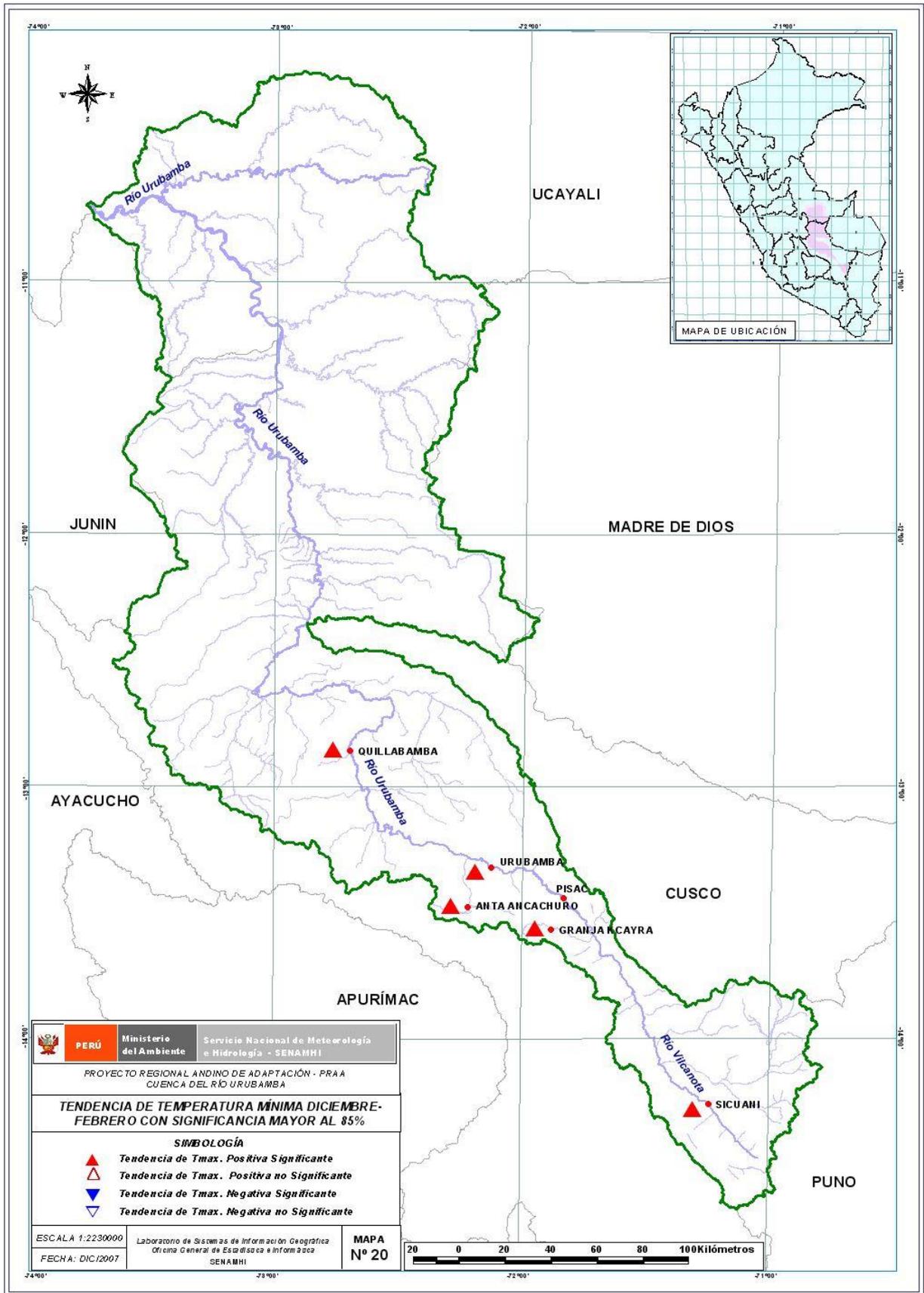


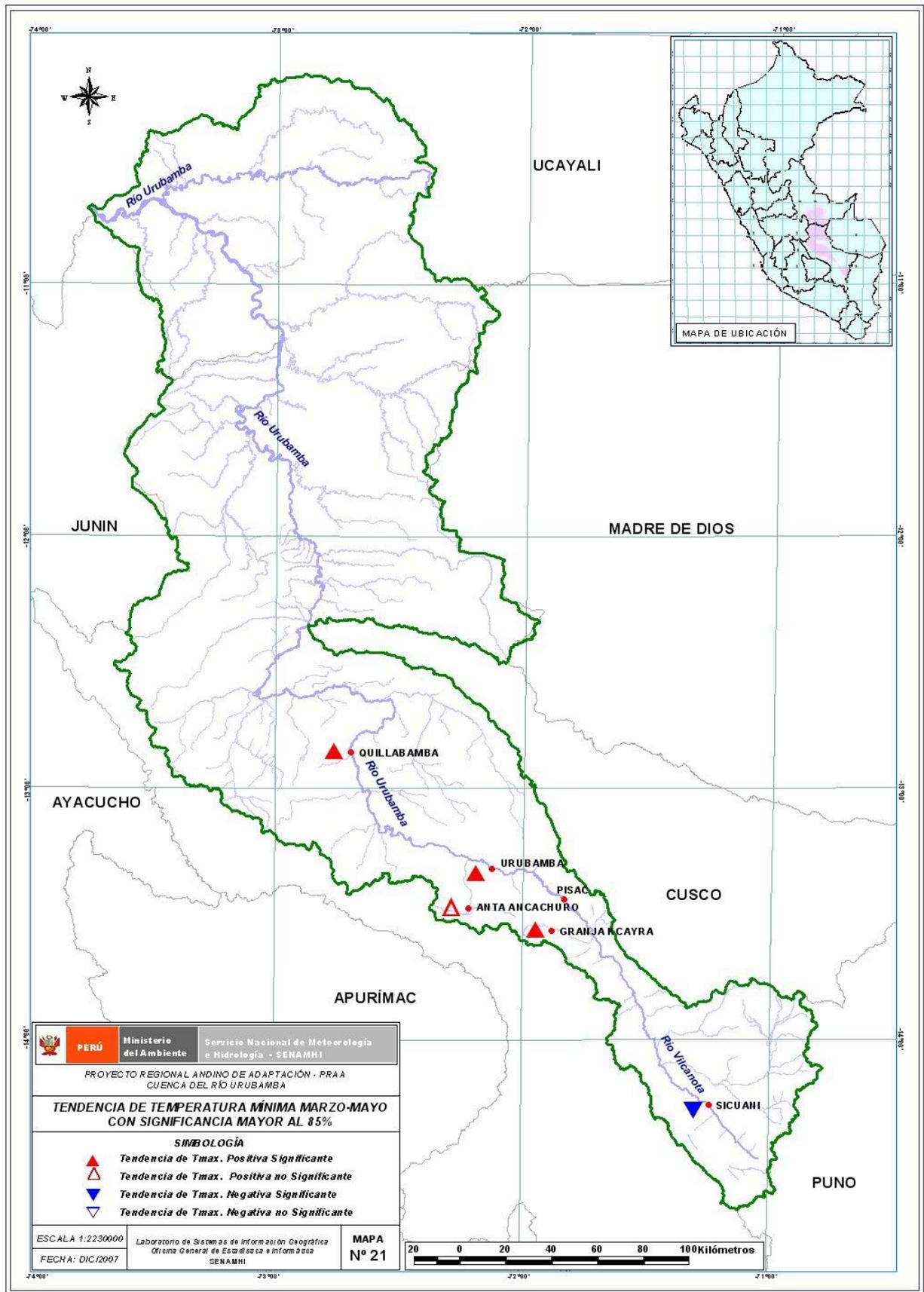


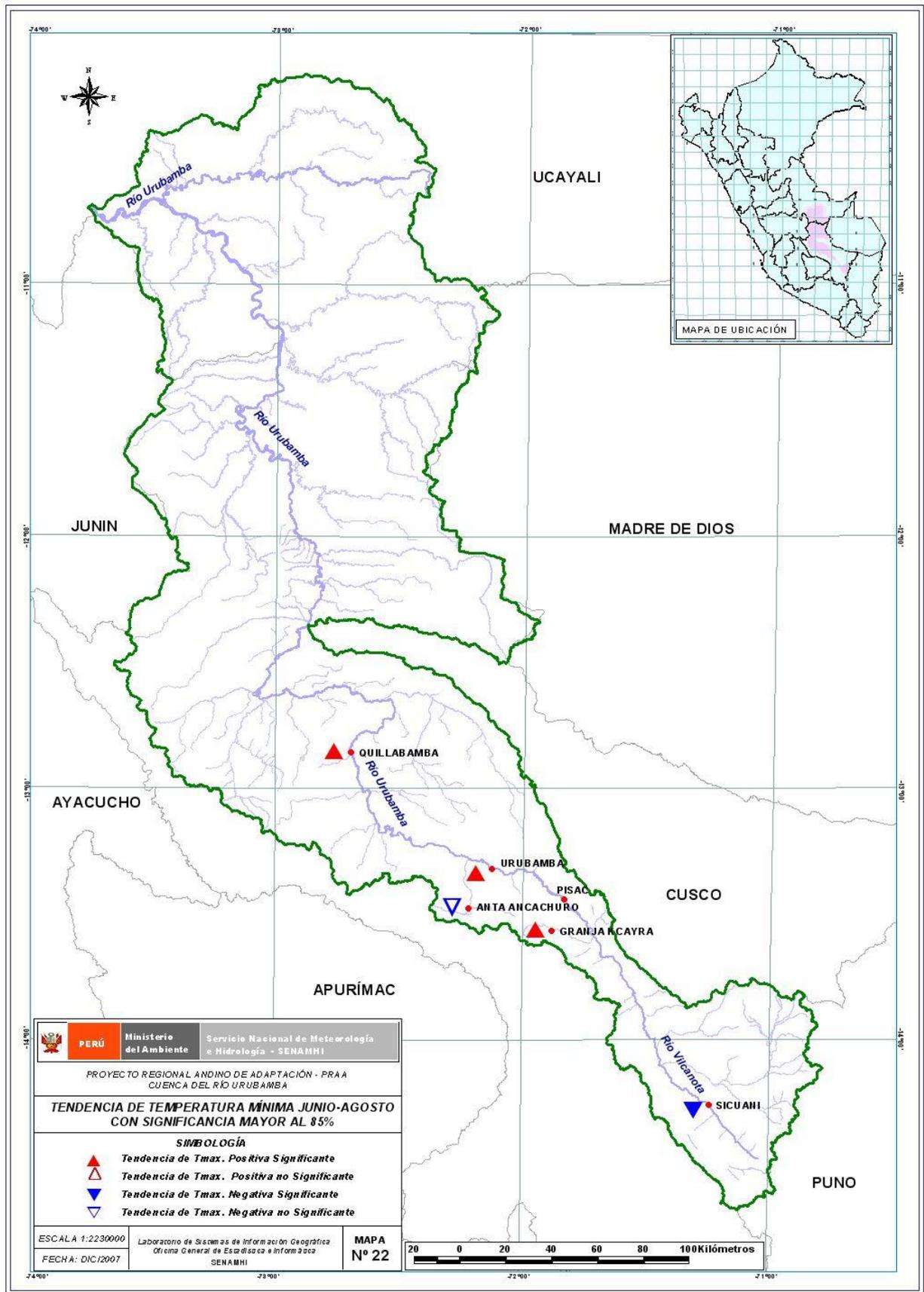


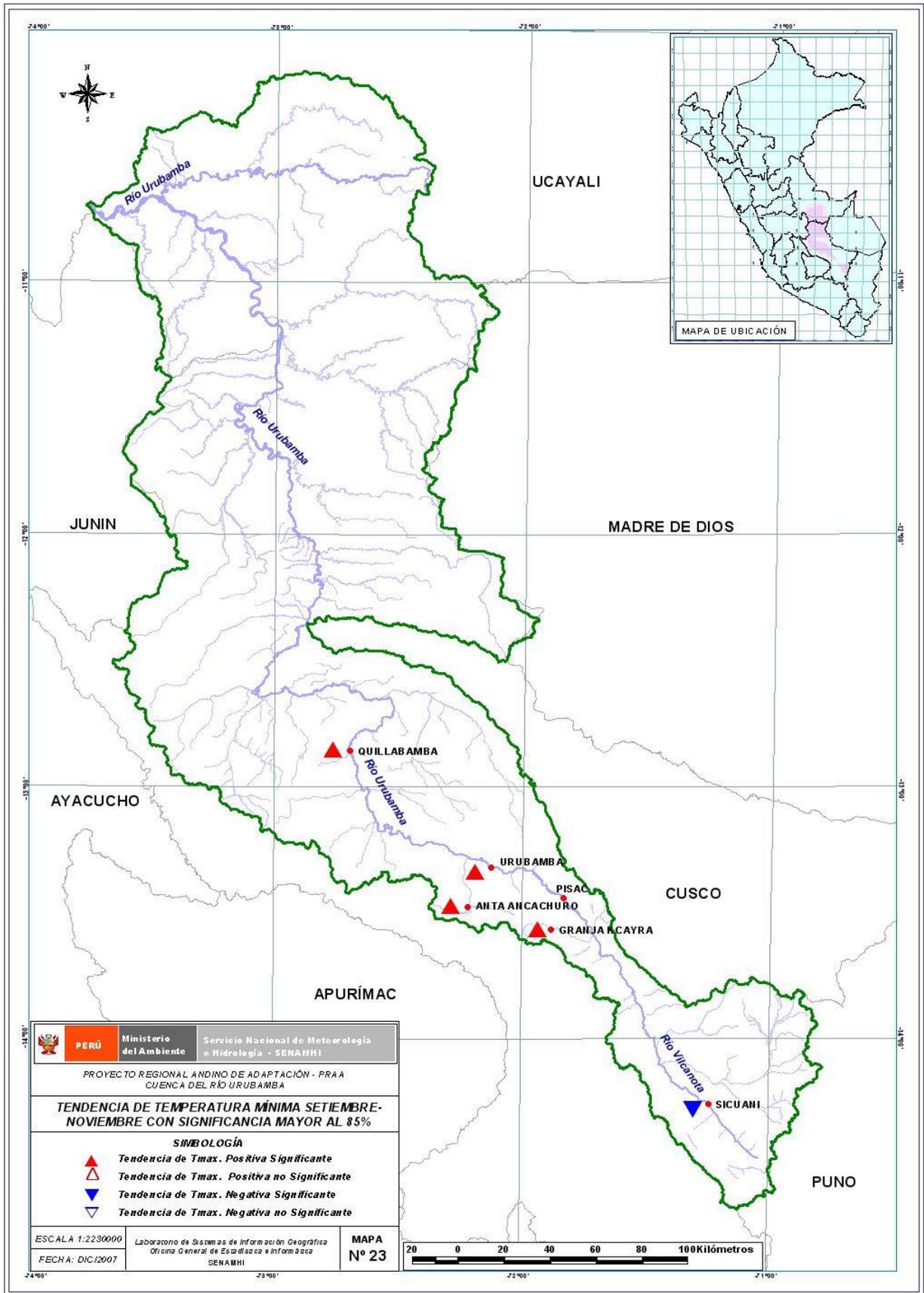








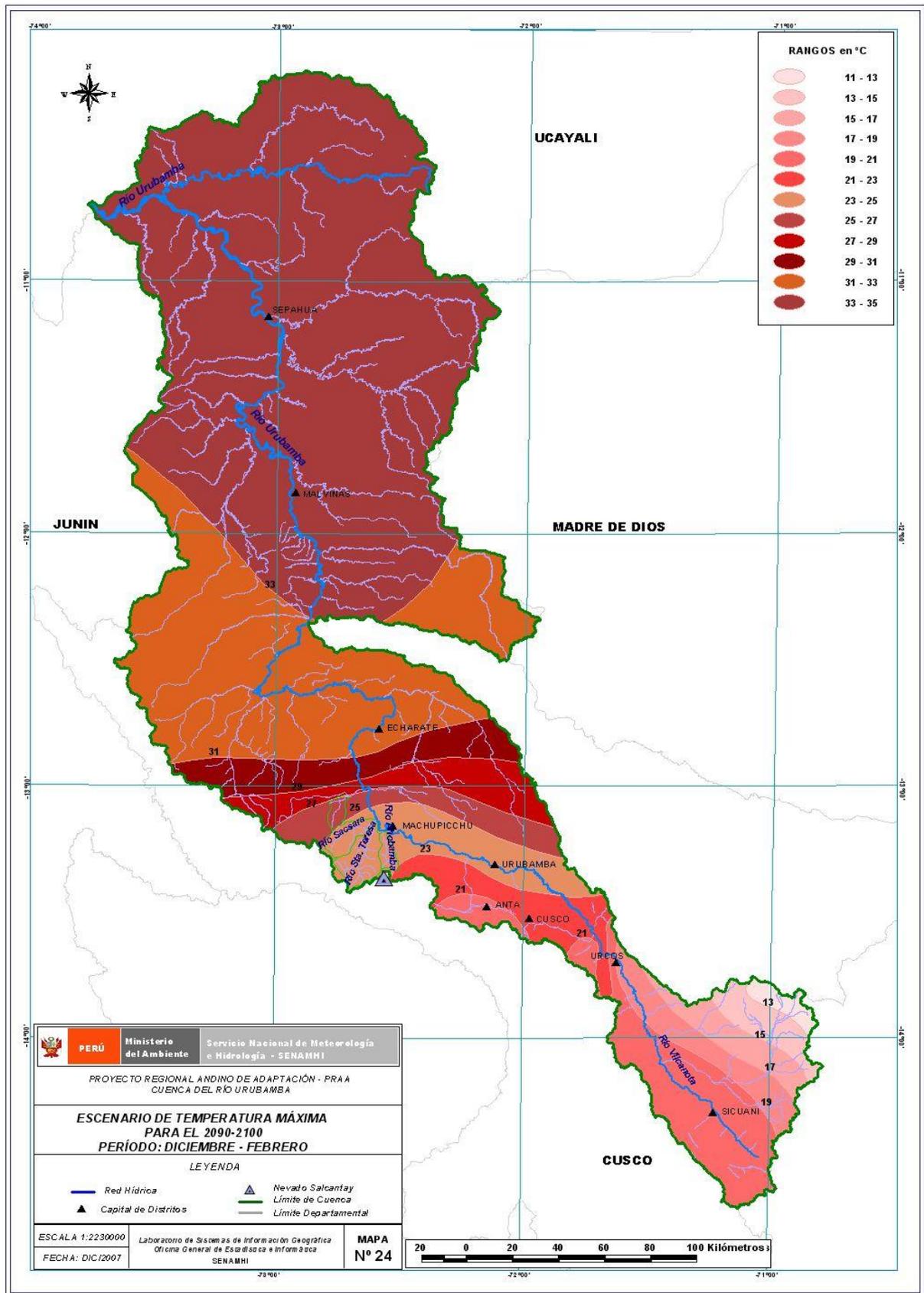


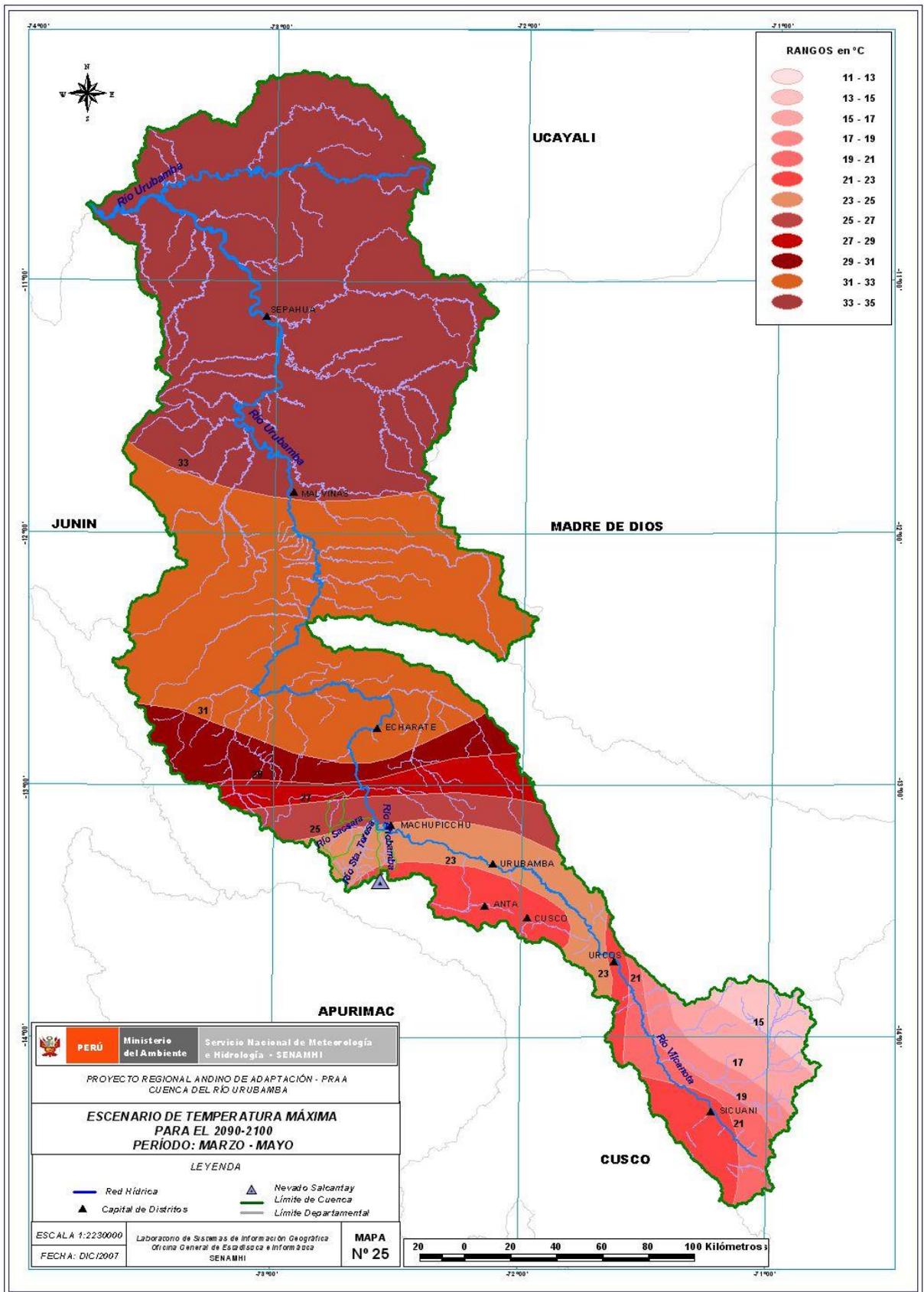


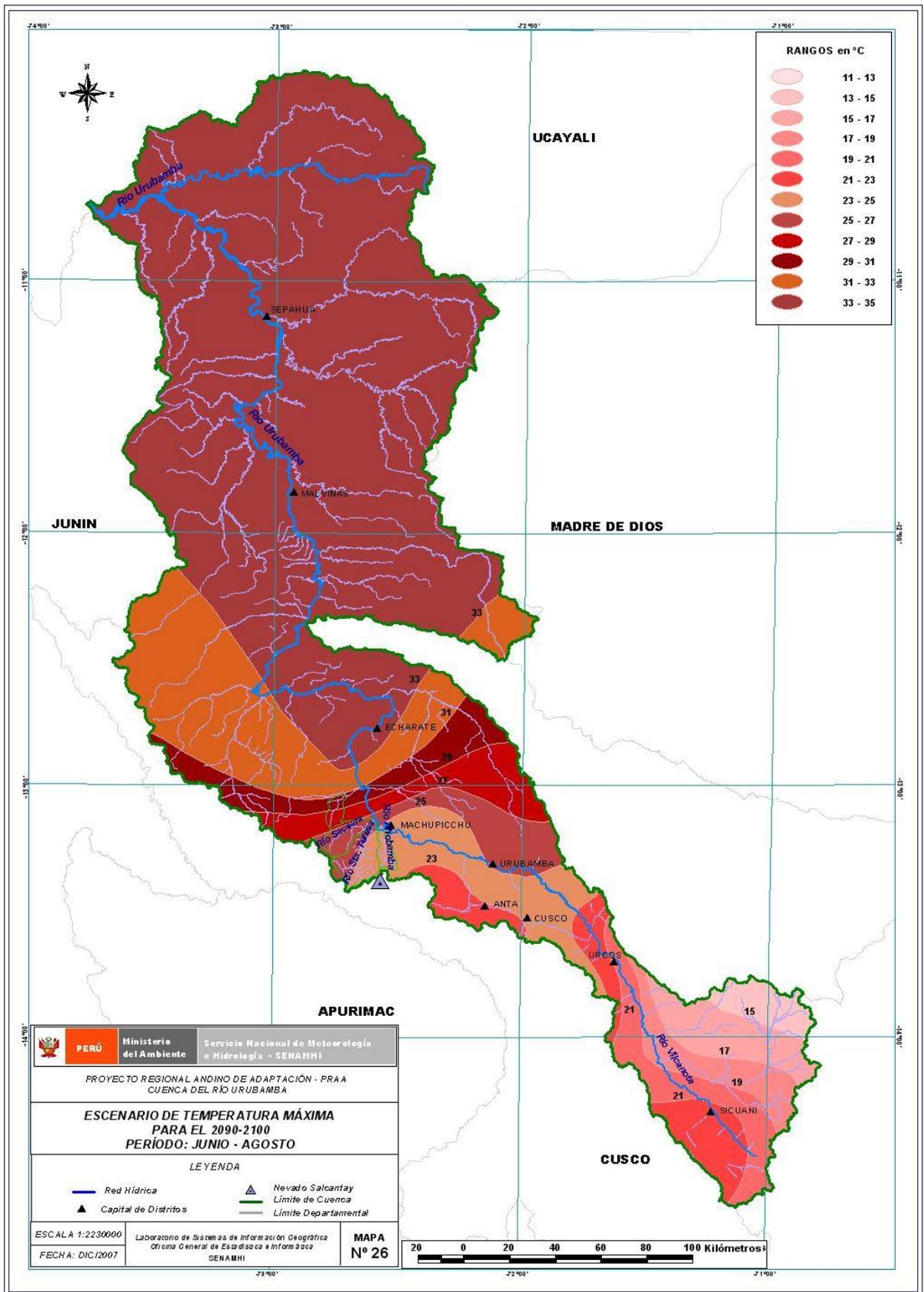
APENDICE 3

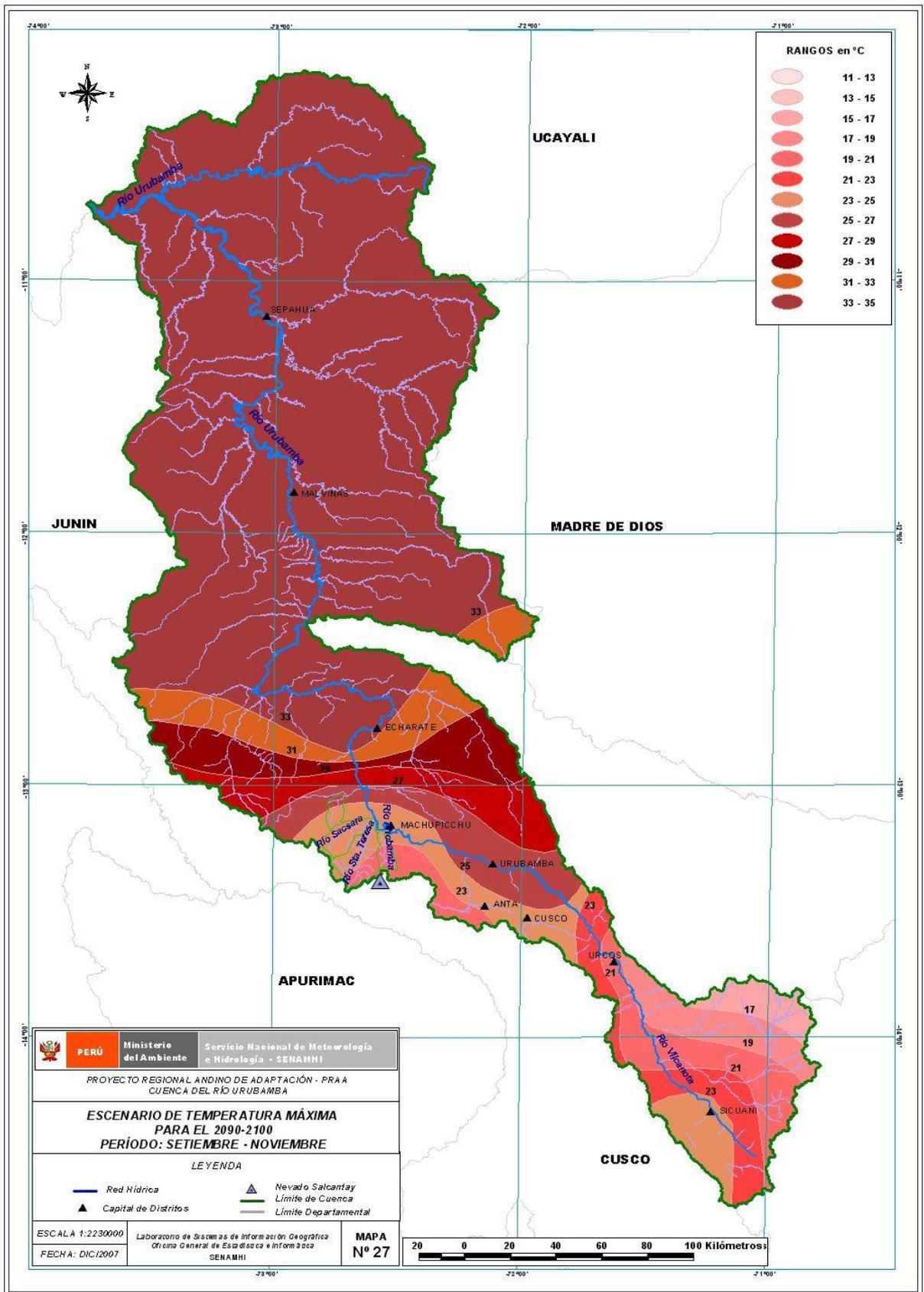
Escenarios climáticos al año 2100

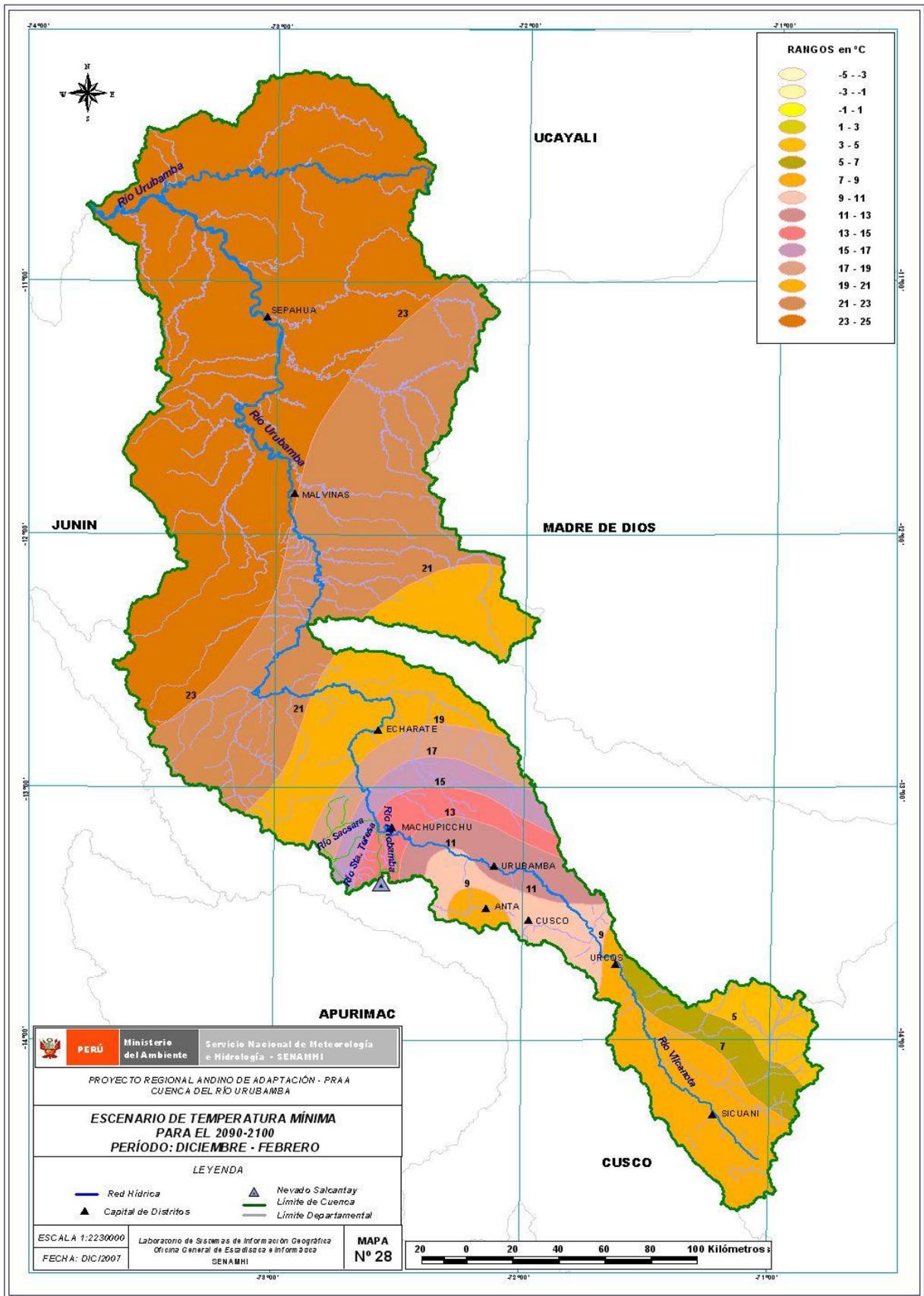
- Mapa 24: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre DEF).
- Mapa 25: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre MAM).
- Mapa 26: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (Trimestre JJA).
- Mapa 27: Escenario de la temperatura máxima para el 2090-2100 (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).

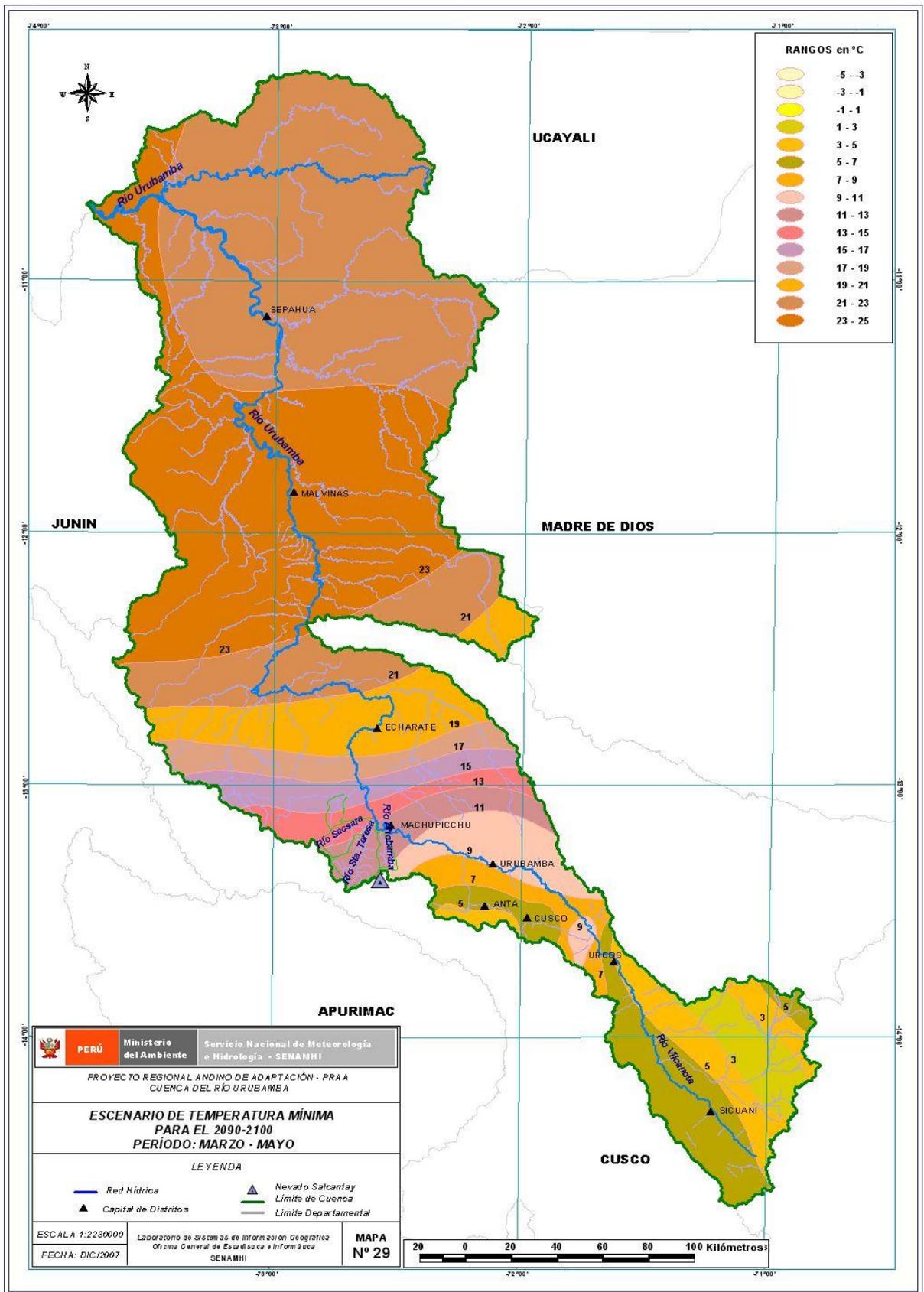


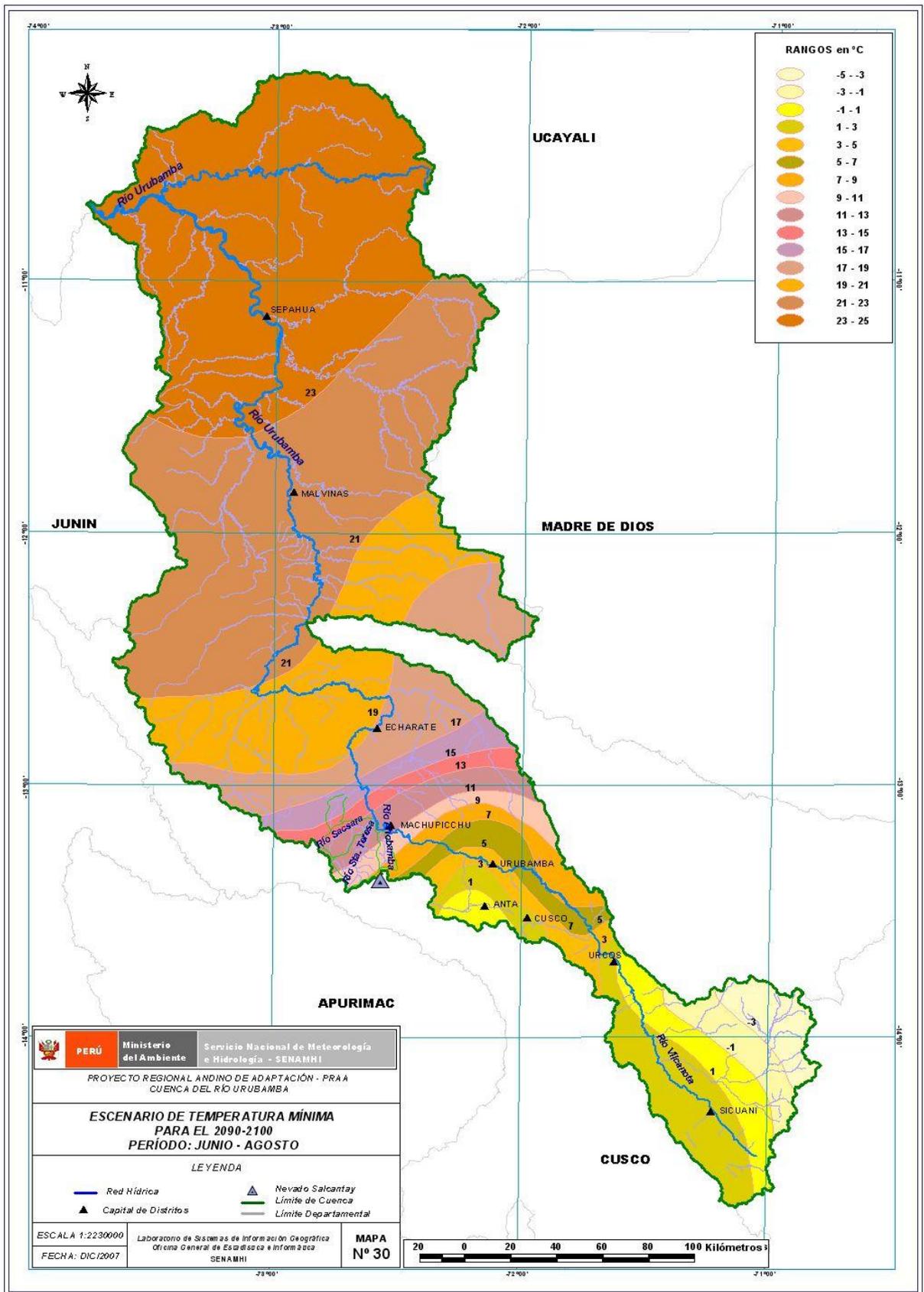


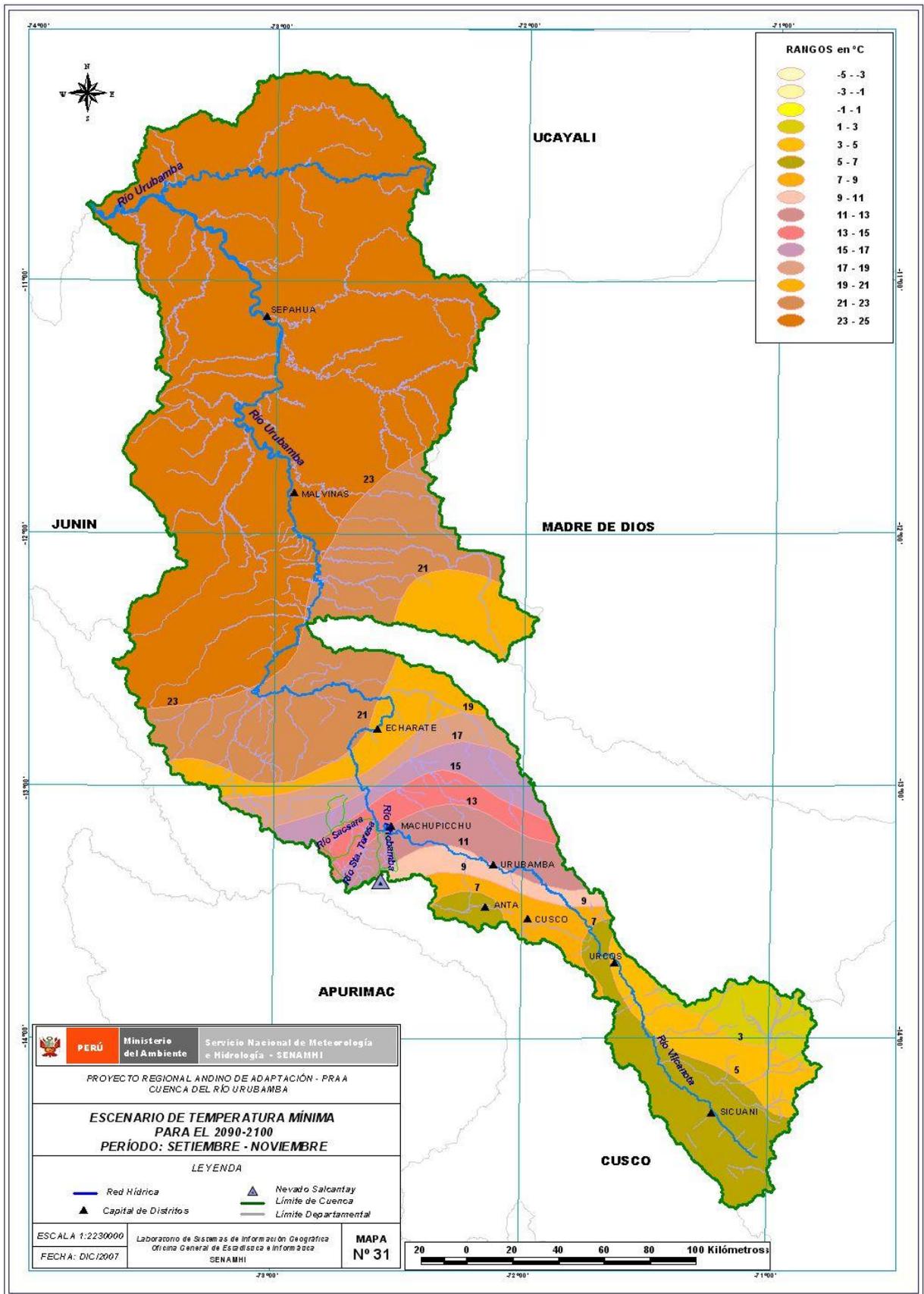


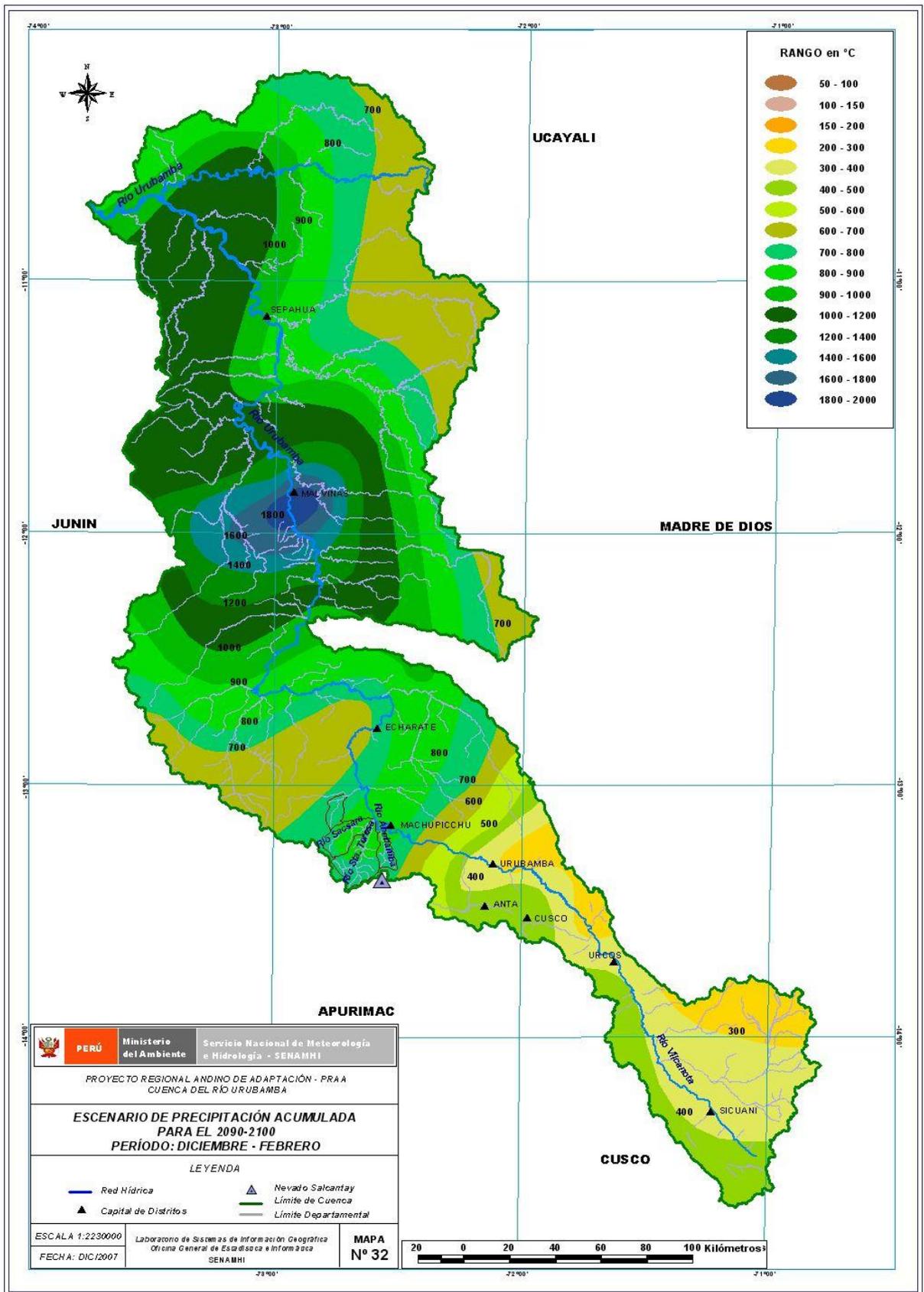


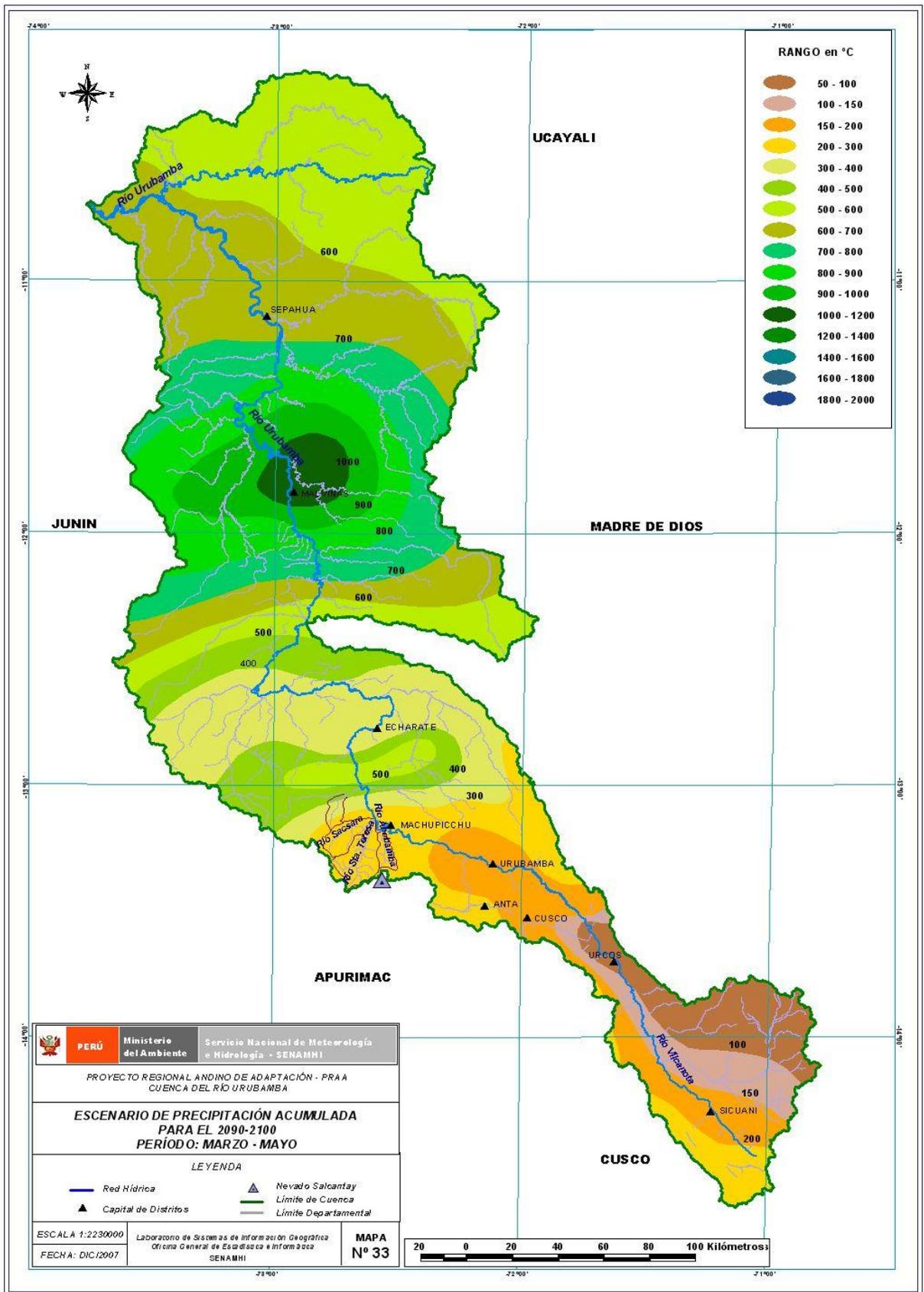


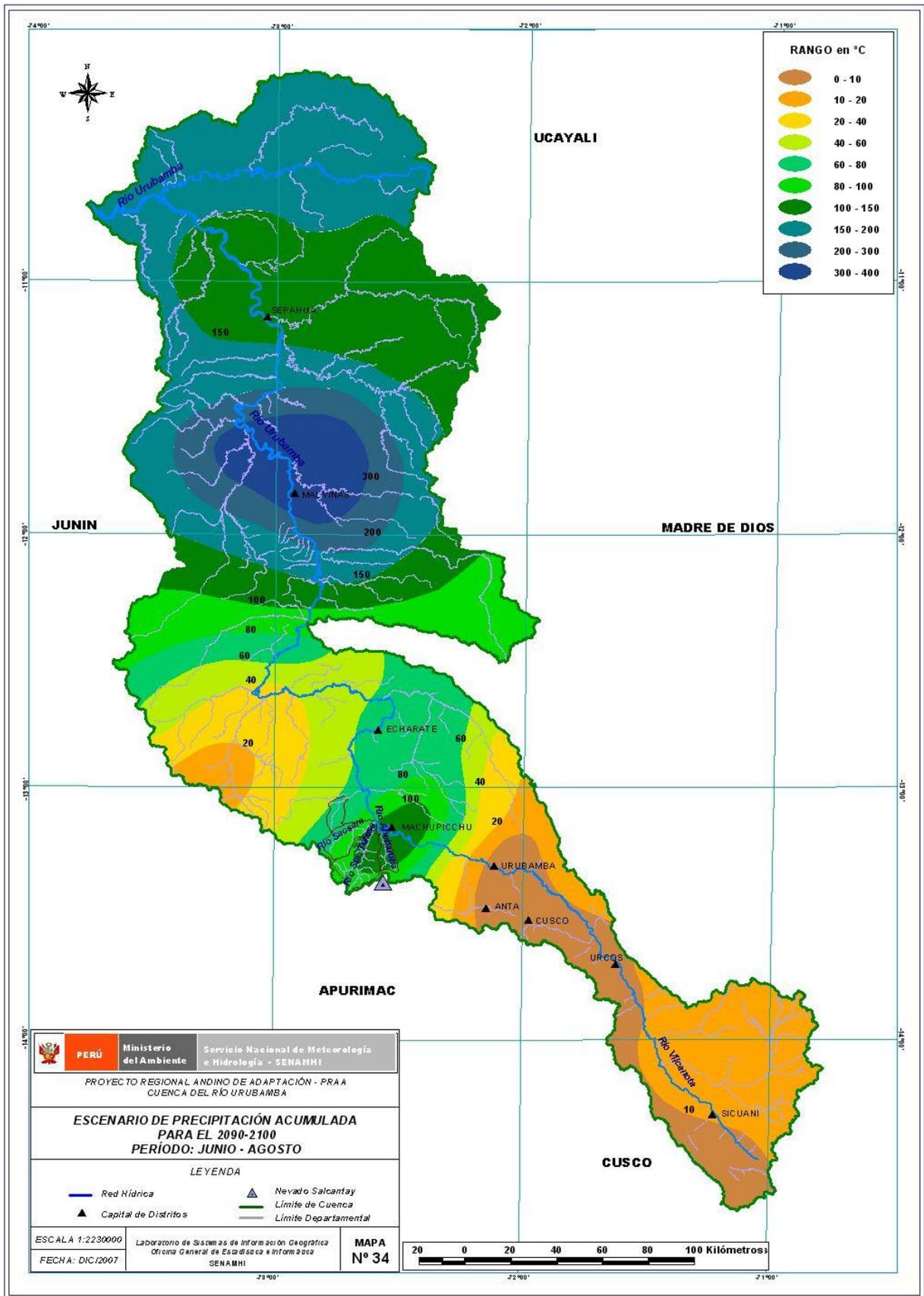


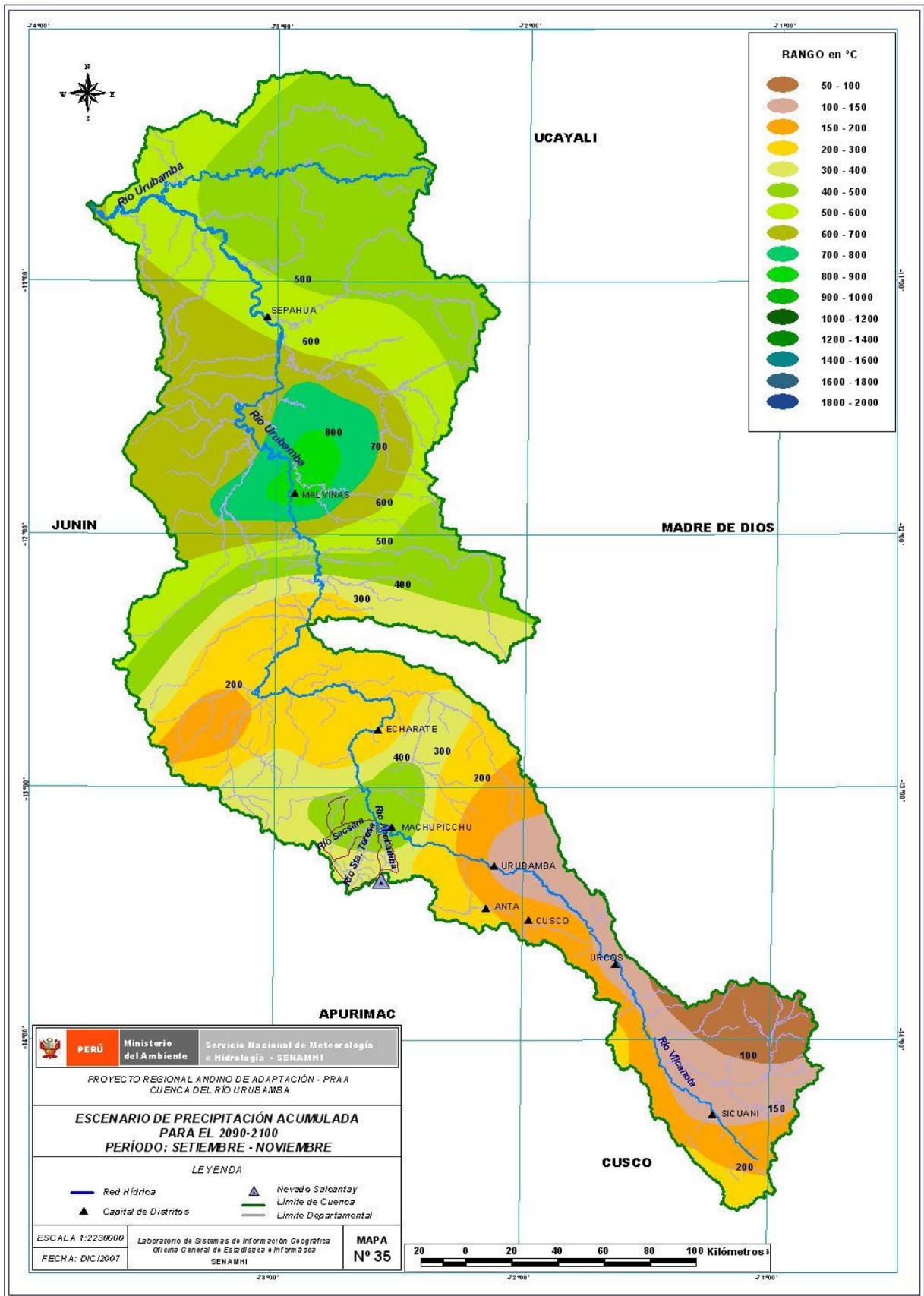












APENDICE 4

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 atiene 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.