



Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Urubamba para el año 2100

RESUMEN TÉCNICO



Banco Mundial



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Higiología - SENAMHI

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: 2009

El presente estudio se realizó en el año 2007, como parte de la fase de preparación del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), el cual es implementado en Bolivia, Ecuador y Perú con financiamiento del Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) a través del Banco Mundial, coordinado por la Secretaría General de la Comunidad Andina e implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

Ministerio del Ambiente – MINAM

Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro, Lima.
Teléfono: (511) 6116000
<http://www.minam.gob.pe>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)

Jr. Cahui de 785 Jesús María
Teléfonos: (51 – 1) 6141414 (central) y 6141408 (CPN)
<http://www.senamhi.gob.pe>

Diseño: Q&P Impresores
Ricardo Eslava Escobar

Impresión: Omega Representaciones y Servicios S.R.L.
Av. Francisco Pizarro # 544 - Int. "J" - Rimac

Primera Edición: Marzo 2010

Tiraje: 400 Ejemplares

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

Fotos: Prom Perú.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del río Urubamba para el año 2100

Resumen Técnico

Ministro del Ambiente

Antonio Brack Egg

Viceministra de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales

Rosario Gómez Gamarra

Director General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos

Eduardo Durand López-Hurtado

Especialista Técnico Nacional PRAA

Ana Iju Fukushima

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Presidente Ejecutivo

May. General FAP (r) Wilar Gamarra Molina

Directora Científica

Dra. Elizabeth Silvestre Espinoza

Directora General de Meteorología

Ing. Amelia Díaz Pabló

EQUIPO TÉCNICO SENAMHI

Autores:	Grinia Avalos - Responsable Amelia Díaz Clara Oria Luis Metzger Delia Acuña
Coordinación local:	Gabriela Rosas
Apoyo en programación: Especialista analista SIG: Consultas técnicas:	Gerardo Jácome Elizabeth Herrera Marcia Valdez Wilfredo Yzarra Juan Carlos Huamaní Nelson Quispe Héctor Vera Félix Cubas
Soporte computacional:	Richard Miguel San Martín
Recopilación:	Jorge Dávila
Edición:	Grinia Avalos, Jorge Dávila, Dante Bracamonte, Rusbel Galán.

PRESENTACIÓN

El Ministerio del Ambiente (MINAM) es el organismo del Poder Ejecutivo rector del sector ambiental, que desarrolla, dirige, supervisa y ejecuta la política nacional del ambiente, siendo el punto focal en el Perú de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el 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 Medio Ambiente (GEF), a través del Banco Mundial, el CONAM (fusionado actualmente al Ministerio del Ambiente), coordinó la fase de preparación del Proyecto Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), 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 la Subcuenca de Santa Teresa perteneciente a la Cuenca del Vilcanota-Urubamba en la región Cusco, que es alimentada por el nevado Salkantay. Con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre las condiciones climáticas actuales y futuras se desarrollaron escenarios de cambio climático para ambas cuencas.

El desarrollo de los escenarios de cambio climático 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 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. Los resultados de este trabajo aparecen en el presente documento.

El Ministerio del Ambiente expresa su felicitación al equipo técnico-científico del SENAMHI por los muy buenos resultados del 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.

Antonio Brack Egg
Ministro del Ambiente

AGRADECIMIENTOS



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 Ministerio del Ambiente (MINAM)

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	3
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	7
1.1 Tendencias actuales y futuras del clima global	8
1.1.1 Tendencia actual del clima global	8
1.1.1.1 Temperatura global	8
1.1.1.2 Nivel del mar	8
1.1.2 Tendencias futuras del clima global	9
1.1.2.1 Temperatura global del aire	9
1.1.2.2 Nivel y temperatura superficial del mar	9
CAPÍTULO 2	
LA CUENCA DEL RÍO URUBAMBA	10
2.1 Ubicación y características geográficas	10
2.1.1 Economía	10
2.1.2 El río Santa Teresa	11
CAPÍTULO 3	
DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO DE LA CUENCA	12
3.1 Sistemas atmosféricos predominantes durante el periodo lluvioso	12
3.2 Mecanismos físicos de la precipitación en la Cuenca del Río Urubamba	13
3.3 Clasificación climática de la cuenca	14
3.4 Climatología de la cuenca	15
3.4.1 Precipitación	15
3.4.1.1 Distribución temporal de la precipitación	15
3.4.1.2 Distribución espacial de la precipitación	17
3.4.2 Temperatura máxima	17
3.4.2.1 Distribución temporal de la temperatura máxima	17
3.4.2.2 Distribución espacial de la temperatura máxima	18
3.4.3 Temperatura mínima	18
3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima	18
3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima	19
3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas	20
3.5.1 Heladas	20
3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas	20
3.5.1.2 Distribución espacial de las heladas	21
3.5.2 Periodos secos	21
3.5.3 Periodos húmedos	24
3.5.4 ENOS	24

3.6	Tendencias climáticas observadas	27
3.6.1	Tendencias promedio de las precipitaciones observadas	27
3.6.1.1	Tendencia anual	27
3.6.1.2	Tendencias estacionales	27
3.6.2	Tendencias promedio de la temperatura máxima	28
3.6.2.1	Tendencia anual	28
3.6.2.2	Tendencias estacionales	28
3.6.3	Tendencias promedio de la temperatura mínima	29
3.6.3.1	Tendencia anual	29
3.6.3.2	Tendencias estacionales	29
3.7	Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático	30
3.7.1	Precipitación	30
3.7.2	Temperatura	31
 CAPÍTULO 4		
	ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA	35
4.1	El modelo y el experimento del Time-Slice	35
4.1.1	El modelo	35
4.1.2	El experimento del Time-Slice	36
4.2	Escenarios climáticos en la Cuenca del Río Urubamba	36
4.2.1	Escenarios proyectados	37
4.2.1.1	Temperatura máxima	37
4.2.1.2	Temperatura mínima	39
4.2.1.3	Precipitación	41
4.3	Proyecciones del caudal del río Urubamba al año 2035	42
 RESUMEN Y CONCLUSIONES		45
 BIBLIOGRAFÍA		47
 CONCEPTOS Y TÉRMINOS BÁSICOS		50

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

***“En los últimos cien años (1906-2005)
la temperatura mundial se ha incrementado
en 0,74 °C, IPCC (2007)”.***

El Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), financiado por el Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) a través del Banco Mundial, implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente y contando con el apoyo de instituciones científicas especialistas en cambio climático del Perú, Ecuador y Bolivia, realizó su fase de preparación desde finales del año 2006 a diciembre del año 2007, durante la cual se desarrollaron diversos estudios que constituyeron la línea base del proyecto.

En el Perú, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (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; además se constituyeron en información importante para la toma de decisiones y la planificación futura de las diversas actividades económicas de las cuencas.

Alcance y estructura del informe

En el presente documento se presentan los resultados de la tendencia y los extremos climáticos observados en la Cuenca del Urubamba; así como los escenarios futuros de la temperatura y precipitación para finales del Siglo XXI. Para un mejor entendimiento del presente documento, éste 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 Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (AR4, 2007) y generalidades socioeconómicas de la cuenca de interés.

En el Capítulo 3 se realiza un análisis diagnóstico de las series históricas de la temperatura y la 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. Este capítulo también incluye un análisis de la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (sequías, heladas y ENOS) en los últimos cuarenta años.

El Capítulo 4 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 (MRI) y la Agencia Meteorológica Japonesa (JMA). Este modelo TL959L60 fue procesado en uno de los supercomputadores más veloces del mundo, el Earth Simulator. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

El Resumen Técnico de los Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Urubamba para el año 2100, una de las principales regiones agrícolas y arqueológicas de nuestro país, constituye una herramienta estratégica para realizar proyecciones de los impactos potenciales socioeconómicos. Esto permitirá una adecuada planificación por parte de los tomadores de decisión, con el afán de mitigar posibles daños en la región e implementar eficientemente medidas de adaptación frente al cambio climático. Con ese propósito, el presente documento presenta información con una base científica y lenguaje sencillo para la comprensión del mismo.

1.1 Tendencias actuales y futuras del clima global

Todo indica que existe una relación directa entre el calentamiento global y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provocado principalmente por las sociedades industrializadas. En los siguientes párrafos se 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).

1.1.1 Tendencia actual del clima global

Muchas observaciones constatan el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo, así como el aumento del nivel del mar. En suma, desde que las temperaturas de la superficie de la Tierra comenzaron a registrarse en 1850, once de los doce años más cálidos se han producido en los últimos doce años (1995-2006). En los últimos cien años (1906-2005), la temperatura mundial se ha incrementado en 0,74 °C y 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%.

1.1.1.1 Temperatura global

El IPCC menciona que las recientes variaciones del clima en diversas regiones, en especial los incrementos de la temperatura, ya han afectado muchos sistemas físicos y biológicos; añade además que entre 1901 y el 2005 la temperatura ha aumentado 0,74 °C.

Según las observaciones realizadas desde 1961, el promedio global de la temperatura del océano se ha incrementado hasta en profundidades de 3 000 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.

1.1.1.2 Nivel del mar

El 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 el 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.

1 Assessment Report 4.

2 Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

1.1.2 Tendencias futuras del clima global

El IPCC, haciendo uso de diversos 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 presentan las diferentes tendencias futuras en los siguientes aspectos:

1.1.2.1 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. Aunque los niveles de concentración de todos los gases de efecto invernadero (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.

Asimismo, el 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 es fatal por la vulnerabilidad de dichos sistemas.

1.1.2.2 Nivel y temperatura superficial del mar

Según el último informe del IPCC, también se estima 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.

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. 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.

CAPÍTULO 2

LA CUENCA DEL RÍO URUBAMBA

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

2.1 Ubicación y características geográficas

La Cuenca del Río Urubamba está ubicada entre las latitudes 10°10', 14°37' y las longitudes 70°48', 73°45' Oeste. Cuenta con una extensión aproximada de 76 200 km². Tiene el punto más alto en el nevado Auzangate a 6 384 msnm y el punto más bajo a 240 msnm en la localidad de Atalaya, entre los departamentos de Cusco 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 Amazonas.

El río Urubamba, cuyo recorrido es de 862 km, con un área de 76 200 km², nace en los deshielos del nevado Cururana, a 5 443 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 1 000 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.

2.1.1 Economía

La cuenca se ubica dentro de la Región Cusco, capital arqueológica de América, por lo que el turismo es una primordial fuente económica. Las condiciones del clima y el uso del 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, la energética y la turística las actividades económicas más importantes de esta cuenca. En la agricultura, el 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 existen dos ricos yacimientos de hidrocarburos. 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 del Gas de Camisea y las variaciones del clima han generado cambios drásticos que afectan los ecosistemas. Estos impactos han afectado la Cuenca del Urubamba, que por su fragilidad y condiciones muy especiales amerita una propuesta de gestión integral.

2.1.2 El río Santa Teresa

El río Santa Teresa nace con el nombre de río Chalán a una altitud de 4 650 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 4 350 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, Saucepampa, Santa Teresa entre otros, cuyos cultivos de café, maíz, palta y plátano son irrigados por aguas del río Santa Teresa.

CAPÍTULO 3

DIAGNÓSTICO CLIMÁTICO 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 periodo 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. Esto produce un rápido enfriamiento de la masa de aire, con lo cual se reduce, en gran parte, su capacidad de sostener la humedad inicial, originándose fuertes precipitaciones que se extienden longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes (Avalos, 2005).

La AB (Figura N° 01 a) y ZCAS son sistemas típicos de verano y la ZCIT, APS y AAS son sistemas cuasi estacionarios, con desplazamientos meridionales estacionales.

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 cuáles de estos sistemas son bien caracterizados por el modelo y cuáles merecen más atención y, finalmente, determinar cuán confiables podrían ser las proyecciones del modelo para estudios de cambio climático.

Durante el verano del Hemisferio Sur, la intensidad promedio del APS oscila entre 1020 hPa y 1023 hPa; su centro se ubica entre los 20°-40°S, 80°-120°W aproximadamente (Satyamurty, 1999). En la Figura N° 01 c (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 muestran resultados de invierno).

FIGURA 01

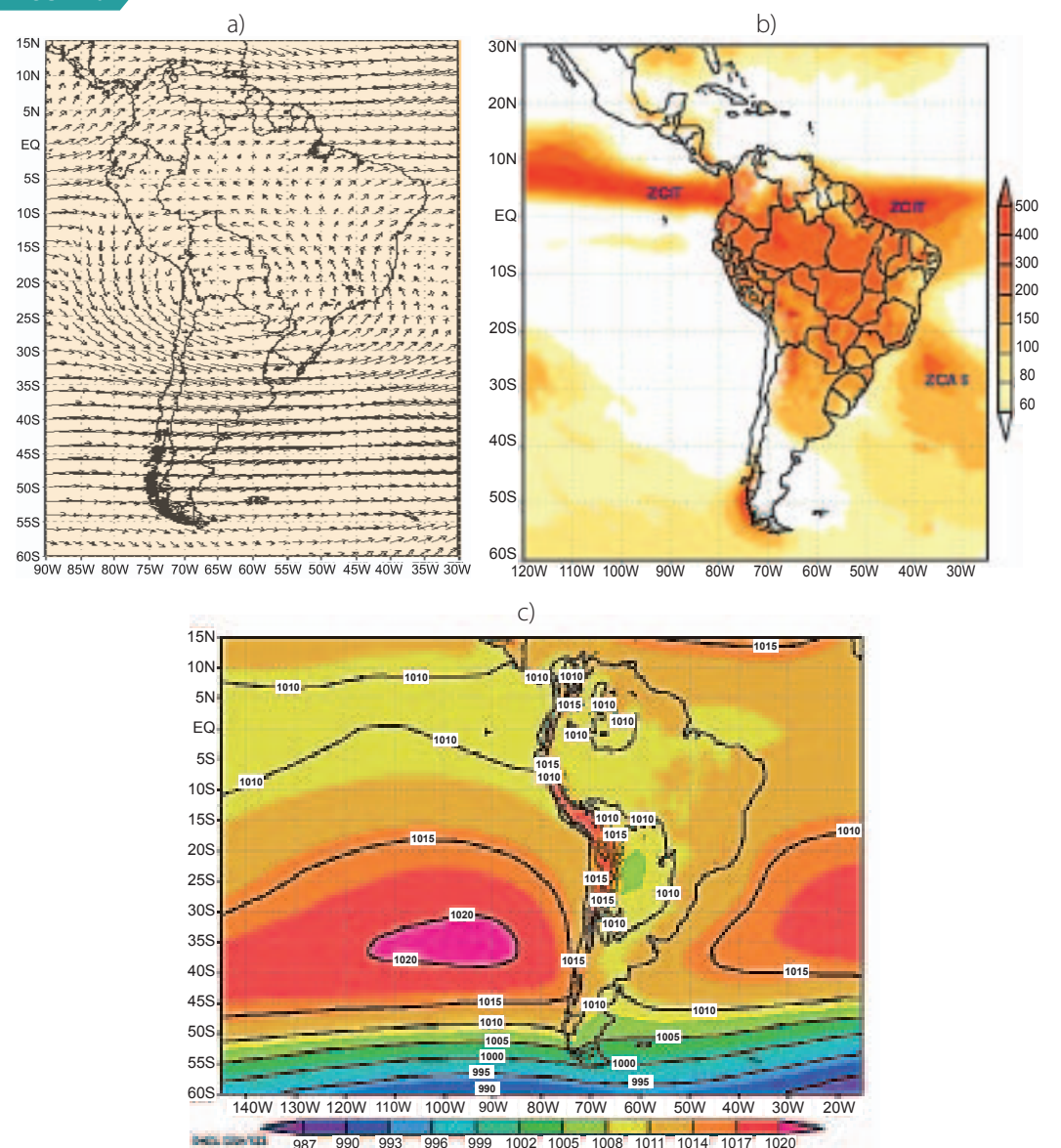
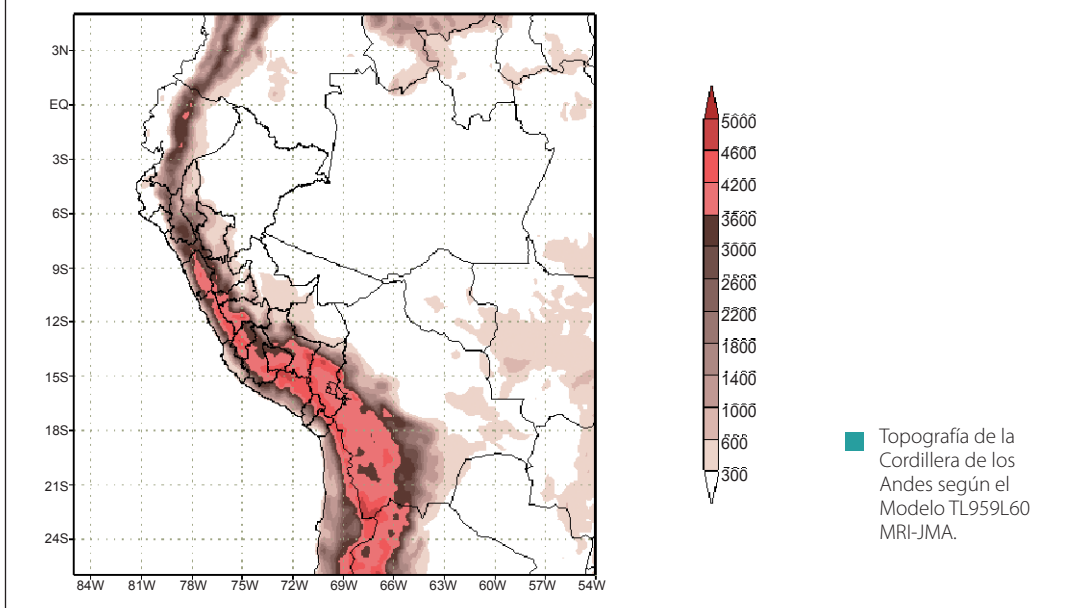


Figura N° 01: a: Campo de viento medio en 200 hPa en ms^{-1} durante el verano del Hemisferio Sur, simulado por el modelo global T42CGCM/MRI. La AB se centra en promedio sobre los 19°S y 21°S , mostrando vientos comparativamente más intensos sobre los subtrópicos con una marcada curvatura anticiclónica (30°S - 40°S); b: 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; c: 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

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 ello 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).

FIGURA 02

Considerando que las características topográficas juegan un rol importante en la determinación del clima local en función de la pendiente, aspecto y exposición de la superficie montañosa a los elementos del clima (Beniston, 2000), se evaluó la simulación de la topografía andina provista por el modelo TL959L60 MRI-JMA. Una correcta representación de la topografía en un modelo numérico asegura el éxito de la simulación de procesos físicos ligados a la precipitación orográfica (ver Figura N° 02).

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).

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; esto da 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 clasificación climática en la Cuenca del Río Urubamba se basa en el Mapa de Clasificación Climática del Perú (SENAMHI, 1988).

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 4 326 msnm (provincia de Canchis) hasta Machu Picchu (provincia de Urubamba) en una superficie de 8 939,2 km² donde 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.

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 de 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 dominio de la Subcuenca de Santa Teresa (1 830 msnm) predomina un clima lluvioso, pero con otoño e invierno secos, presencia de humedad y un régimen térmico semifrío. 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 comprenden 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 del verano, siendo enero el mes 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.

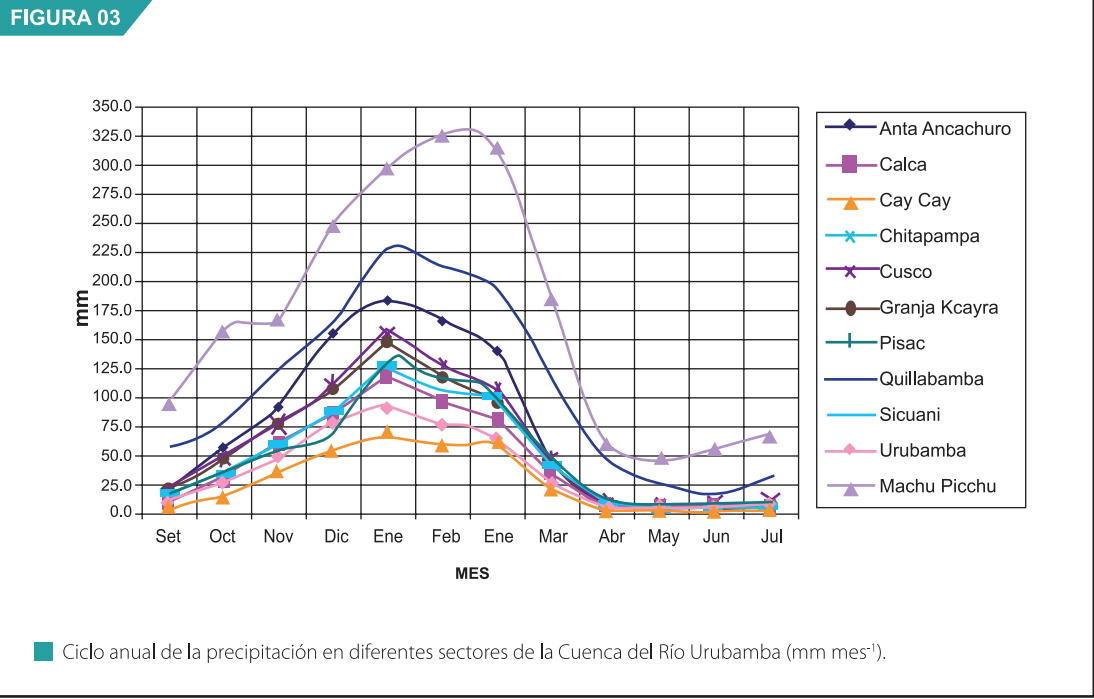
En la Tabla N° 01 se presentan los valores climatológicos a nivel estacional y anual en las estaciones meteorológicas que cuentan con información de mayor récord (1971-2000). El análisis se ha enfatizado en la parte alta y media de la cuenca, por ser de interés en los aspectos de disponibilidad hídrica y retroceso glaciar.

En la Figura N° 03 se observa el ciclo anual de la precipitación en diferentes puntos de la Cuenca del Urubamba. La zona de Machu Picchu (2 500 msnm), por ejemplo, registra aproximadamente 300 mm mes⁻¹ en el periodo de lluvias y 50 mm mes⁻¹ en el periodo de estiaje; mientras que localidades ubicadas en la parte alta de la cuenca 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, las estaciones que se encuentran a menor altitud (cuenca baja del Urubamba) están más expuestas al flujo predominante del Este, que arriba al valle cargado de humedad procedente del Atlántico y la Amazonía, que al chocar con el contrafuerte andino se desencadenan precipitaciones orográficas de gran magnitud y que son realimentadas por condiciones térmicas favorables de la zona baja de la cuenca.

Tabla N° 01: 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	2 009,6	870,3	557,2	166,0	416,2

Leyenda: DEF: Diciembre-Enero-Febrero (verano).
MAM: Marzo-Abril-Mayo (otoño).
JJA: Junio-Julio-Agosto (invierno).
SON: Septiembre-October-Noviembre (primavera).



La concentración de las precipitaciones significativas se dan entre octubre y abril, representan entre el 94% del total anual en la parte alta de la cuenca; mientras que en las zonas cuya altitud son menores de los 2 600 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

Las mayores precipitaciones se presentan en la región conocida como Bajo Urubamba, esto es, en el sector central norte de la cuenca, donde las precipitaciones totales anuales superan los 1 000 mm año⁻¹, siendo la vecindad del distrito de Malvinas donde se registra en promedio un total anual de más de 4 000 mm año⁻¹, considerándosele una región de alta pluviosidad.

Un núcleo con precipitaciones anuales superiores a 2 000 mm año⁻¹ se extiende en las inmediaciones de los distritos de Echarate y Machu Picchu, ubicados en la parte central de la cuenca. Asimismo, 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 1 100 mm año⁻¹.

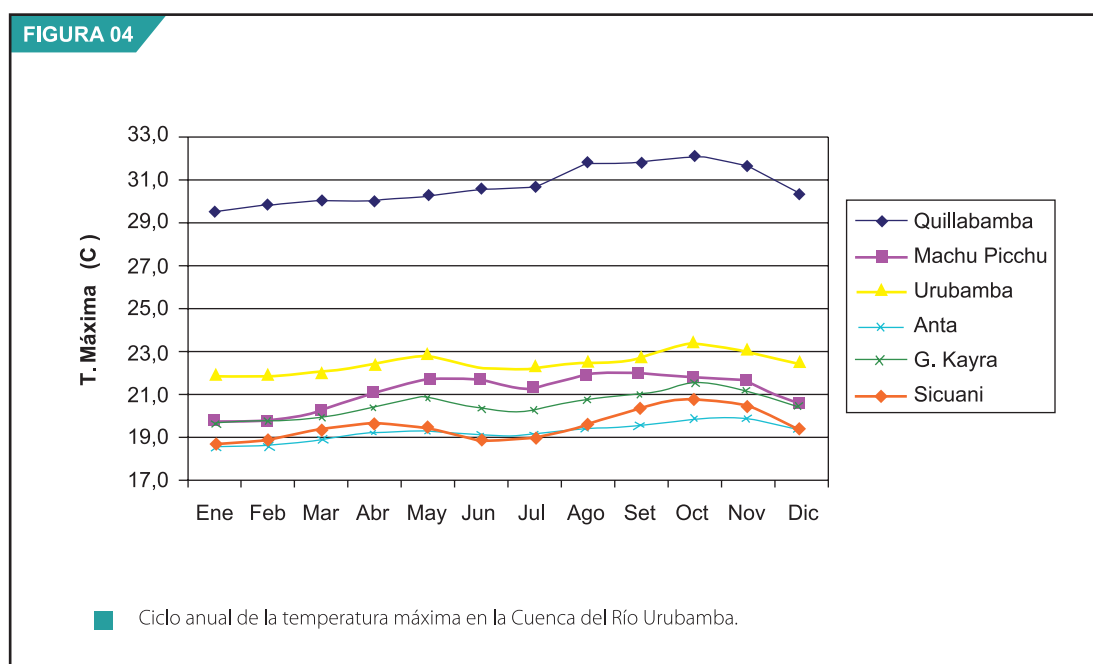
3.4.2 Temperatura máxima

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 N° 04. La temperatura del aire está directamente relacionada con la altitud, así como por la exposición de la cuenca al movimiento solar diario. En zonas ubicadas a mayores altitudes (encima de los 2 500 msnm) las temperaturas máximas del aire oscilan entre 18 a 23 °C, mientras en las zonas ubicadas por debajo de 1 000 msnm oscilan entre 28 a 33 °C.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos máximos, uno en mayo y el más intenso en octubre; mientras los valores mínimos se dan en los meses de verano.

En localidades ubicadas en la parte alta de la cuenca (por encima de los 2 500 msnm) se advierte con mayor notoriedad este comportamiento de los dos picos máximos, mientras que en zonas ubicadas



en la parte baja (menores de 1 000 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 porque en esta temporada la zona presenta mucha nubosidad debido a 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 2 500 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 N° 02 muestra también la temperatura máxima estacional o por trimestres, siendo la primavera la estación más cálida en toda la cuenca, asociado a la máxima insolación durante este periodo; mientras que los mínimos valores de temperatura máxima, en gran parte de la cuenca, ocurren en el verano (DEF), asociado a la mayor cobertura nubosa. Los valores de la temperatura máxima en los otros trimestres son muy similares.

Tabla N° 02: Temperaturas máximas estacionales °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 gradiente térmico va de Norte a Sur, es decir, desde la cuenca baja (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.

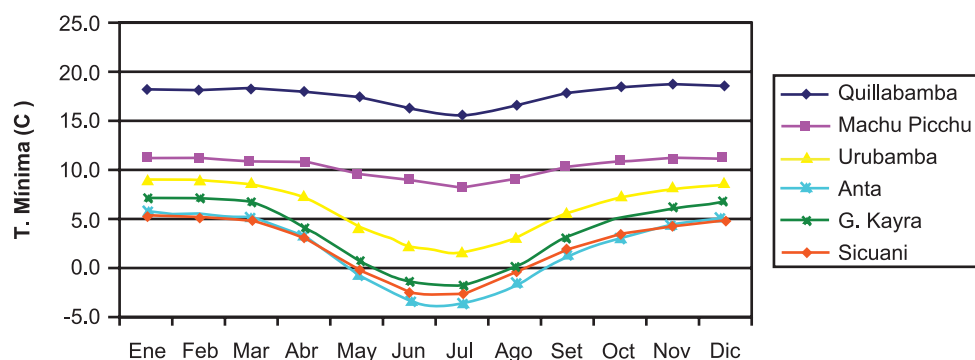
3.4.3 Temperatura mínima

3.4.3.1 Distribución temporal de la temperatura mínima

Las temperaturas mínimas oscilan durante el año entre 10 y -5 °C en localidades ubicadas entre los 2 800 y 3 800 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 se da entre octubre y marzo, asociado a la temporada de lluvias, época en la cual el contenido de humedad en la atmósfera se incrementa y la

FIGURA 05



Ciclo anual de la temperatura mínima en la Cuenca del Urubamba.

mayor presencia de nubes impide el enfriamiento nocturno; este hecho es más acentuado en localidades por encima de los 2 500 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 N° 03. Hay una similitud en los rangos en localidades ubicadas debajo de los 2 600 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 N° 03 se observan las temperaturas mínimas estacionales por trimestres para algunas localidades representativas de la Cuenca del Urubamba, donde se indica que el trimestre más frío se presenta en JJA, mientras que el trimestre más caliente se da en DEF, los otros dos trimestres tienen valores muy similares. Asimismo, se puede observar que en localidades mayores a 3 300 m, en el trimestre JJA, predominan las temperaturas mínimas por debajo de los 0 °C.

3.4.3.2 Distribución espacial de la temperatura mínima

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. Se observa que en las inmediaciones del nevado Salkantay (provincia de Anta), los valores son cercanos a los cero grados. En la parte central de la cuenca los valores de la temperatura mínima fluctúan en un rango de 5 a 9 °C, corres-

Tabla N° 03: 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

pondiéndole 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 los 11 a 21 °C, siendo los distritos de Quellouno, Quimbiri y Echarate 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; se estima un máximo gradiente de norte a sur del orden de -0,21 °C/km entre la parte norte y central de la cuenca.

3.5 Condiciones meteorológicas y climáticas extremas

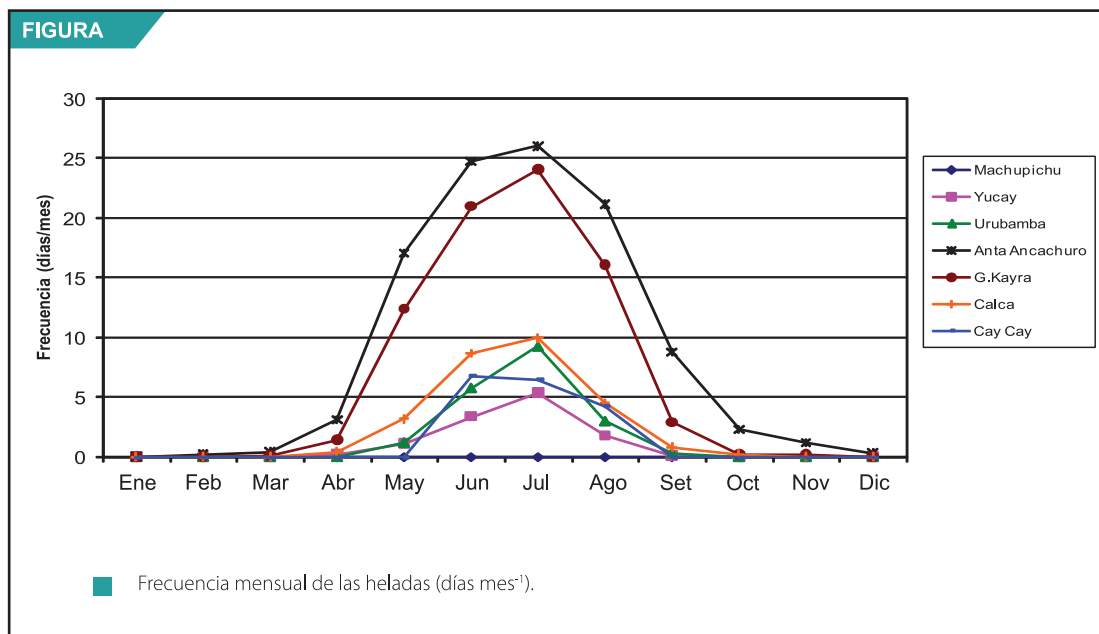
3.5.1 Heladas

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 2 500 de altitud) son debido mayormente a procesos irradiativos (Atlas de Heladas, SENAMHI 2005).

3.5.1.1 Distribución temporal de las heladas

En la Figura N° 06 se muestra la frecuencia mensual de las heladas para algunas localidades de la Cuenca del Urubamba ubicadas por encima de los 2 600 msnm. Se observa 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 2 600 a 3 000 msnm la frecuencia de heladas no supera los 10 días por mes. En tanto, en localidades superiores a los 3 000 msnm la frecuencia es mayor a 20 días por mes.

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



La relación entre el periodo libre de heladas y la altitud ha sido evaluada para localidades ubicadas en Cusco, Apurímac y Puno existiendo una dependencia lineal entre la ocurrencia de heladas y la altitud. La ecuación para determinar el periodo promedio libre de heladas, para alturas entre 2 500 a 4 000 msnm, 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

La frecuencia de heladas³ 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); se observan 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 presenta heladas meteorológicas. El mayor periodo libre de heladas se encuentra hacia la zona baja de la cuenca (Bajo Urubamba), asociado a la menor altitud, mientras que en las partes altas (sector central y sur de la cuenca) se ubican las zonas de menor periodo libre de heladas.

3.5.2 Periodos secos

Para la caracterización de los periodos secos se utilizó la metodología de los percentiles⁴ (Valiente, 2001) para el periodo septiembre – agosto entre 1965-2006.

En la Tabla N° 04 se muestra de manera esquemática los periodos secos (deficiencias y sequías) en localidades representativas de la parte alta de la cuenca (encima de los 2 800 m de altitud) durante 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; son particularmente más recurrentes en Urubamba (2 863 msnm) y Sicuani (3 574 msnm). En tanto, se presentaron periodos cortos y discontinuos de sequías, mayormente de intensidad severa y extrema en Anta (3 340 msnm) y Granja Kayra (3 219 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.

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. 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 sequías de severas a extremas en medio de un panorama húmedo a nivel de cuenca. En 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.

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

4 A través de los percentiles 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).

Tabla N° 04: 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

Tabla N° 05: 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
	Moderado
	Fuerte

3.5.3 Periodos húmedos

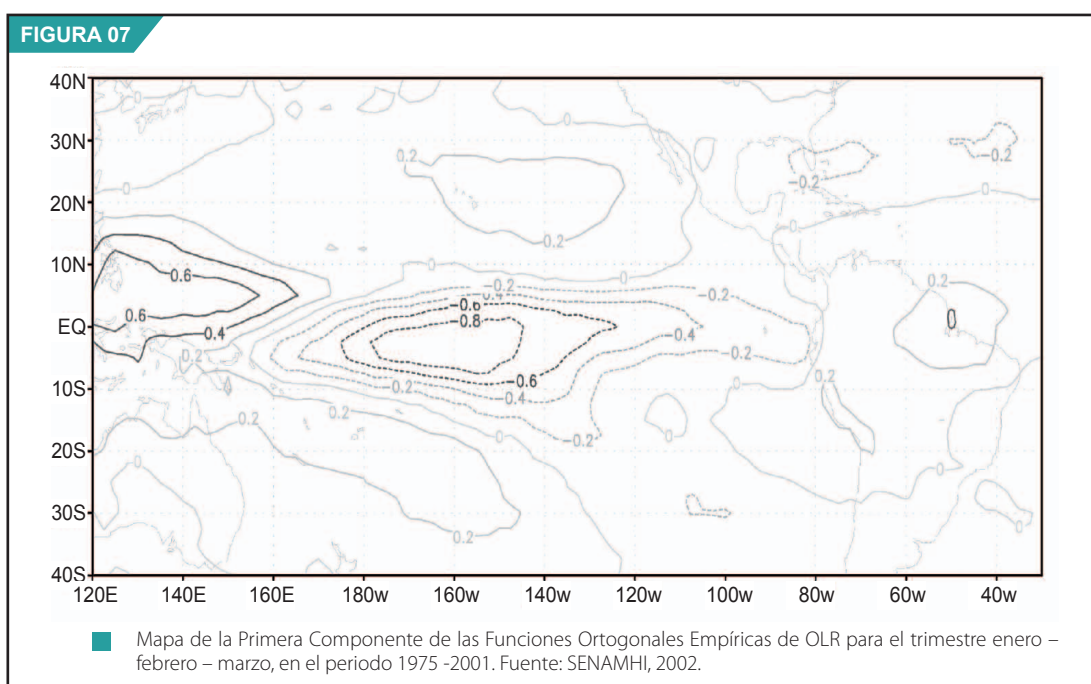
Similar a los periodos secos, las lluvias han sido totalizadas en un año desde septiembre a agosto, en el periodo 1965-2006, siguiendo la metodología de Valiente (2001).

En la Tabla N° 05 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 ó 90, fueron muy episódicas 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. Por 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 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 deficiencias (también muy localizadas), predominando en general un panorama de periodos lluviosos normales.

3.5.4 ENOS

En la Figura N° 07 se muestra la teleconexión entre el Pacífico y las cuencas del Mantaro y Urubamba a través de la primera componente de las funciones ortogonales empíricas de la radiación en onda larga (OLR⁵, siglas en ingles) sobre el Pacífico Tropical, variable utilizada como indicador de nubosidad/convectivida. La figura indica que la primera componente o campo más dominante ha capturado la



5 Outgoing Longwave Radiation.

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), quien 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.

Por 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, 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 mediante relaciones inversas; es decir, mayores valores de TSM están asociados a menores precipitaciones en la cuenca. En la Tabla N° 06 se presentan 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 (sector sur) para la temporada lluviosa, trimestre de enero a marzo, época en que se presentaron los valores más altos de correlación. Se encontraron correlaciones más 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° 06: 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
Urubamba	-0,41
Pisac	-0,24
Anta Ancachuro	-0,33
Granja Kayra	-0,21
Sicuani	-0,42

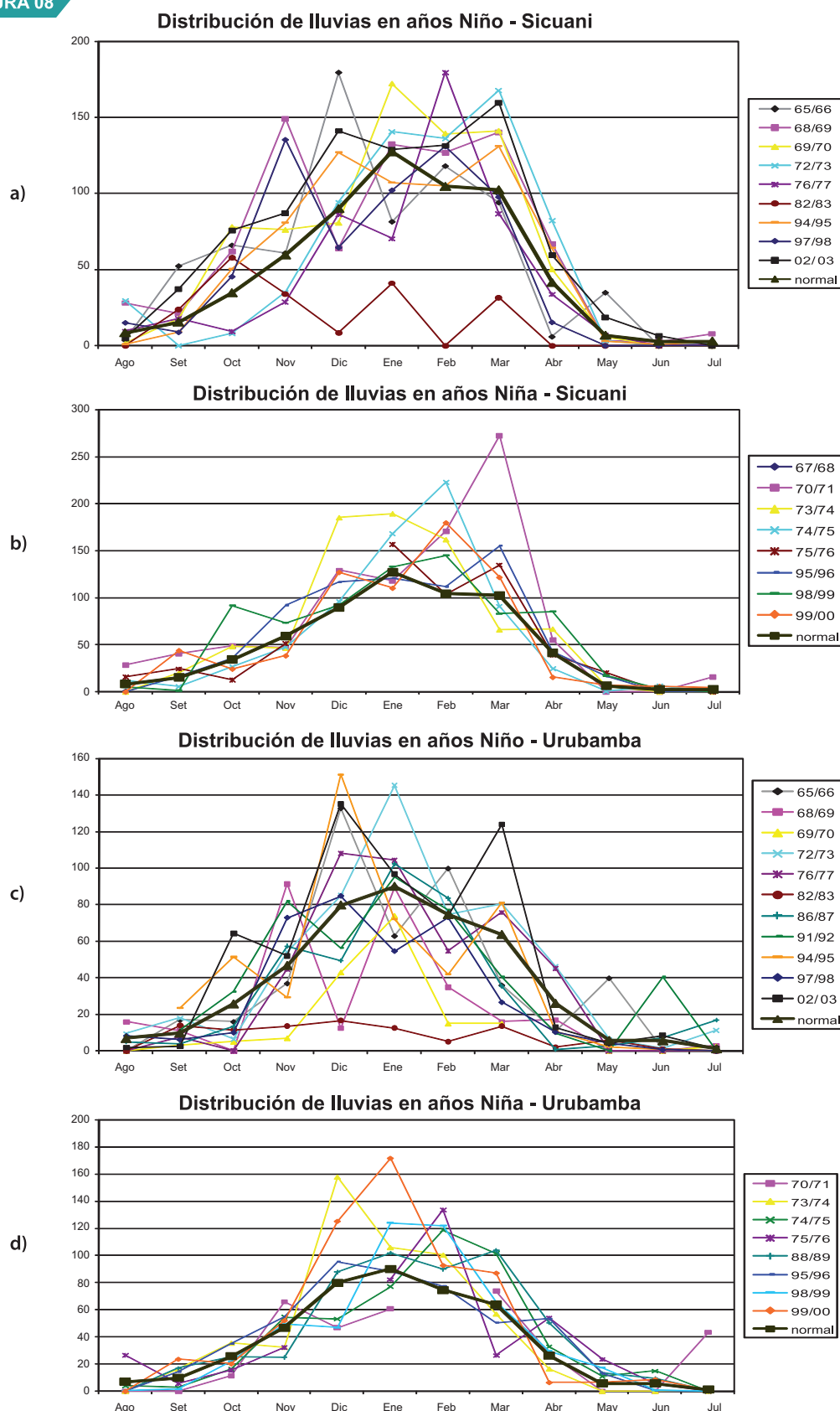
La teleconexión sobre la Cuenca del Urubamba, durante los años Niño, físicamente se explica de la siguiente manera: la posición de la Zona de Convergencia del Pacífico Sur (ZCPS) es desviada hacia el Este por ondas Rossby atmosféricas, teniendo efectos con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) (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 modulada por el gradiente de la TSM en el Atlántico Ecuatorial, por lo que la correlación en esta zona es menor.

En la Figura N° 08 a, c puede observarse que en los años Niño las precipitaciones tienden a presentarse con mucha variabilidad. 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 años Niño, el mes más deficiente es enero, sin embargo 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 N° 08 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.

FIGURA 08



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).

3.6.1.1 Tendencia anual

Se ha considerado como periodo anual 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 N° 07 muestra las estaciones utilizadas, la tendencia estimada y su significancia.

Tabla N° 07: Tendencia anual de la precipitación (mm) y significancia (%) en la Cuenca del Urubamba

Sector	Estaciones	Periodo	Tendencia (mm año ⁻¹)	Significancia (%)
Parte 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

La tendencia de la precipitación en diferentes puntos de la cuenca 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 dan 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

En la Tabla N° 08 se indican las tendencias y su significancia.

Tabla N° 08: 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

TP: Tendencia de la precipitación.

Sig.: Significancia.

En el verano, 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 ($6,1 \text{ mm año}^{-1}$) es altamente significativa (99%) en comparación al resto de estaciones analizadas (ver Tabla N° 08). En otoño, la tendencia de las precipitaciones sigue siendo positiva, a excepción de Granja Kayra que presenta una ligera reducción del orden de $-0,2 \text{ mm año}^{-1}$ y que además estadísticamente no es significativa (64%); sólo en la vecindad de Quillabamba la tendencia ascendente es significativa con $2,0 \text{ mm año}^{-1}$ (ver Tabla N° 08). En invierno, época de mínimas precipitaciones, la tendencia sigue siendo positiva, pero estadísticamente significativa sólo en la estación de Anta con $0,2 \text{ mm año}^{-1}$ (ver Tabla N° 08).

Finalmente en primavera, época de inicio del periodo lluvioso, continúa la incertidumbre, presentándose sólo en forma localizada tendencias significativas, tal como ocurre en Urubamba con $0,7 \text{ mm año}^{-1}$ (ver Tabla N° 08). La tendencia decreciente se presenta en Quillabamba y Granja Kayra con valores entre $-0,2$ y $-1,1 \text{ mm año}^{-1}$, 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 N° 09 y 10, respectivamente, para el periodo 1965-2006.

3.6.2.1 Tendencia anual

En la Tabla N° 09 se observa que la tendencia de la temperatura máxima en la cuenca es ascendente, aunque con valores muy discretos, a excepción de Quillabamba con $-0,02 \text{ °C año}^{-1}$. La tendencia positiva varía entre $0,01$ - $0,04 \text{ °C año}^{-1}$.

Tabla N° 09: Tendencia anual de las temperaturas máxima y mínima (°C) y las significancias (%) en la Cuenca del Urubamba

SECTOR	LUGAR	PERIODO	TMAX (°C/año)	SIGNIFI. (%)	TMIN (°C/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, la tendencia observada oscila entre $0,01$ - $0,04 \text{ °C año}^{-1}$, a excepción de Quillabamba (La Convención) donde se observa una tendencia negativa del orden de $-0,02 \text{ °C año}^{-1}$. En otoño y primavera los rangos de la tendencia positiva son muy similares a los encontrados en verano; en el invierno, los valores de la tendencia positiva son aún menores ($0,01$ - $0,03 \text{ °C año}^{-1}$). Quillabamba presenta tendencias anuales y estacionales negativas del orden de $-0,02 \text{ °C año}^{-1}$ (ver Tabla N° 10).

Tabla N° 10: Tendencia estacional de las temperaturas máxima y mínima (°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	°C/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	°C/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	°C/año	-----	0,08	-----	0,05	-----	-0,01	-----	0,06
	%		100		83		60		90
Granja Kayra	°C/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	°C/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 las Tablas N° 09 y 10, respectivamente.

3.6.3.1 Tendencia anual

La tendencia anual de la temperatura mínima (Tabla N° 09) 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 Tendencias estacionales

En el 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 N° 10). En otoño, la tendencia positiva continúa en gran parte de la cuenca, con un rango de 0,02-0,06 °C año⁻¹; Sicuani presenta una tendencia negativa del orden de -0,01 °C año⁻¹ (ver Tabla N° 10). Tanto en invierno como en primavera (Tabla N° 10), 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 presenta 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 N° 14.

3.7 Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático

El análisis de extremos de la data observada diaria de temperaturas y precipitaciones en la Cuenca del Río Urubamba se ha realizado haciendo uso del RCLimDex (recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para el Climate Change Detection, Monitoring and Indices - ETCCDMI), el cual se basa en el diagnóstico de eventos extremos propuesto por Frich et al. (2002), el cual es usado en estudios a nivel mundial; además ha sido adoptado como salida estándar de datos para el reciente 4to Reporte de Evaluación del IPCC (Kamiguchi et al., 2006). Se ha utilizado información del periodo 1965-2006 considerando las tendencias significantes a un $p < 0,1$.

3.7.1 Precipitación

Los índices climáticos para evaluar el comportamiento de las precipitaciones son definidos en la Tabla N° 11 y los resultados se muestran en la Tabla N° 12 y en la Figura N° 09.

Tabla N° 11: 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 ($RR \geq 1\text{mm}$)	mm
SDII	Índice simple de intensidad de lluvia	Precipitación total anual dividida por el número de días húmedos en un año	mm día^{-1}
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{mm}$	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{mm}$	días
R10mm	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 10\text{mm}$	días
R20mm	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 20\text{mm}$	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 cinco días consecutivos	mm

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. Muchas veces estas tendencias son significativas, así se tiene que el índice PRCPTOT es positivo en todas las estaciones analizadas, excepto en la estación Pisac. También se tienen los índices de intensidad diaria de lluvia (SDII) y de días húmedos consecutivos (CWD), cuyas tendencias concuerdan mucho con el índice PRCPTOT, principalmente en las estaciones de Anta Ancahuro 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 tiene una tendencia positiva. Los dos índices de intensidad de precipitaciones máximas en 1 y 5 días, RX1day y RX5day, respectivamente, muestran también tendencias positivas.

Con 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 localidades de Urubamba, Granja Kayra y Sicuani.

Tabla N° 12: 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).

3.7.2 Temperatura

Los diez índices que explican las tendencias de la temperatura son definidos en la Tabla N° 13. Los valores y niveles de significancia de estos índices se presentan en la Tabla N° 14 y su distribución espacial en la Figura N° 10.

Tabla N° 13: 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	Número 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

Los resultados no muestran un patrón claro en relación con el 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 encontró 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.

Con 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 tienen tendencia negativa.

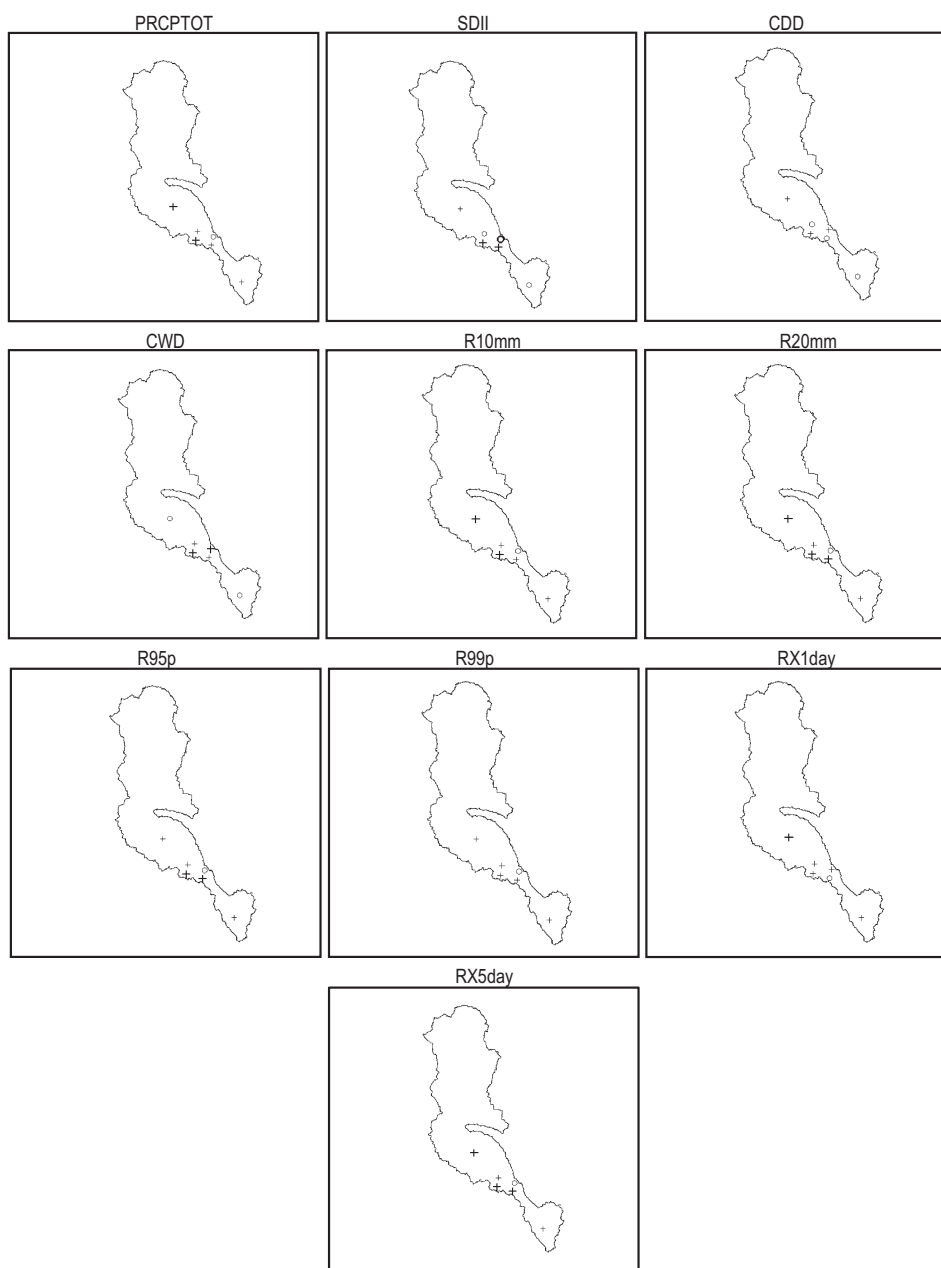
El índice de rango diurno de temperaturas (dtr) se ve incrementado en las zonas de mayor altura, como Anta, Granja Kayra y Sicuani, ya que se observan tendencias crecientes de temperatura máxima (Txx) y tendencias decrecientes de temperatura mínima (Tnn), excepto en Granja Kayra donde la temperatura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

Tabla N° 14: 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).

FIGURA 09



■ 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 $p < 0,1$.

FIGURA 10



■ 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 $p < 0,1$.

CAPÍTULO 4

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”.

4.1 El modelo y el experimento del Time-Slice

4.1.1 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. También se introdujo un esquema de radiación incluyendo los efectos de los aerosoles y gases de efecto invernadero (GEI) en la estratopausa; así como un esquema de biosfera simple, desarrollado por el MRI. Se introdujo, además, un nuevo esquema Semilagrangiano cuasi conservativo, el cual resulta ser más eficaz que el esquema convencional Euleriano, en los cálculos a mayores tiempos de integración (ver Tabla N° 15).

Tabla N° 15: Outline del Modelo Japonés TL959L60 de Alta Resolución

Características	Referencias
Resolución	TL959 (20 km) y 60 niveles en la vertical
Tiempo de integración	Esquema semilagrangiano (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 el Earth Simulator (ES), el supercomputador más poderoso del mundo para cuando se hizo el experimento.

4.1.2 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). Toma como condiciones iniciales la temperatura superficial del mar (TSM) y la 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 generadas 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 generadas 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 (Noda et al., 2006).

4.2 Escenarios climáticos en la Cuenca del Río Urubamba

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

En el presente estudio, la construcción de los escenarios futuros de temperaturas máxima y mínima en la Cuenca del 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. 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.

El cambio proyectado se ha estimado de manera puntual (a nivel de punto de estación) y a nivel espacial.

Considerando que las proyecciones climáticas no son perfectas, es necesario incluir alguna forma de apreciar la 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 mediante la estimación del intervalo de confianza con un nivel del 95% (Cubasch, 2003).

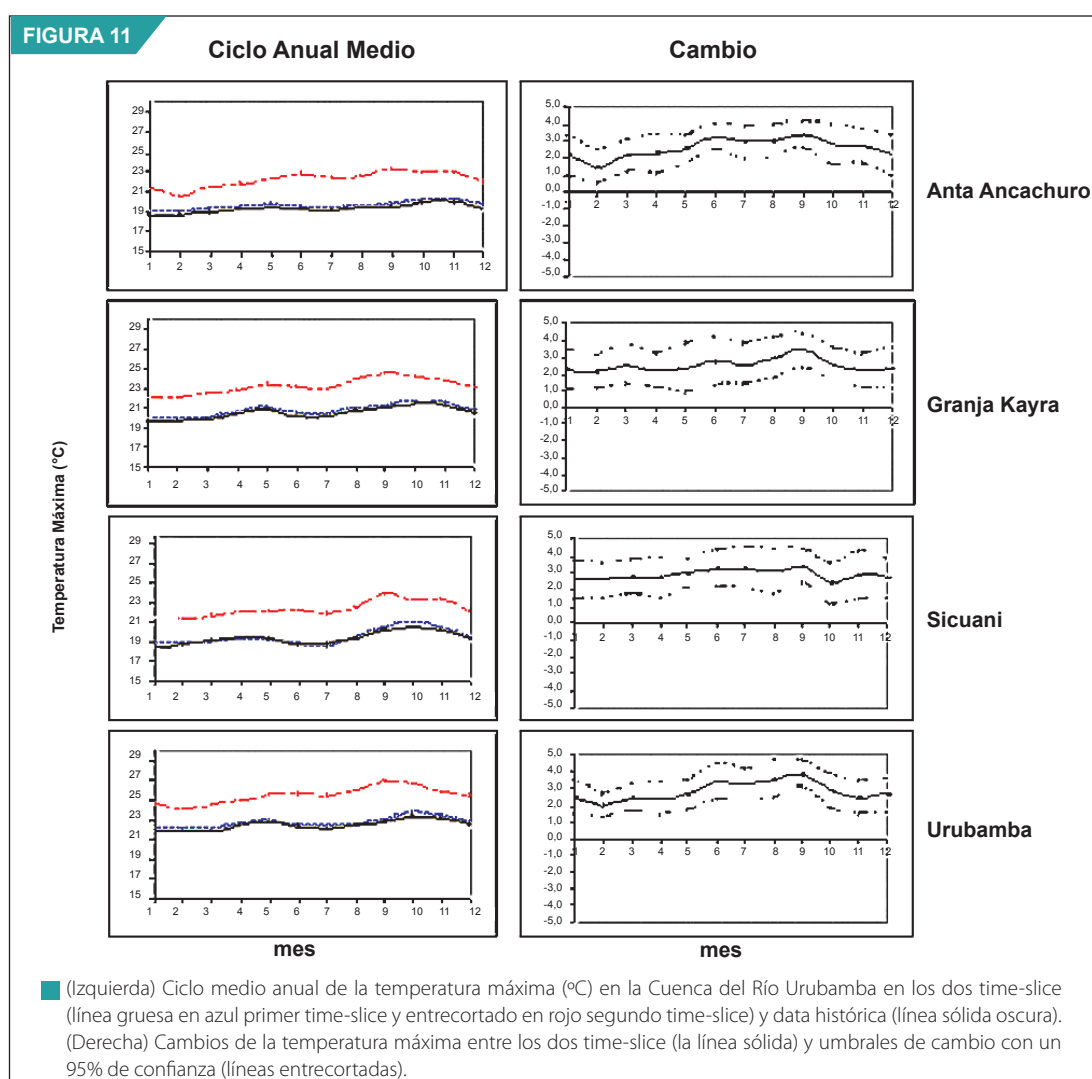
Finalmente, se construyeron mapas estacionales de escenarios de precipitación y temperaturas extremas para finales del Siglo XXI.

4.2.1 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 por el escenario A2; mientras que el escenario B1 proyecta la mitad del calentamiento del escenario A2. Tanto los escenarios optimistas como pesimistas proyectan un mismo patrón de calentamiento, sólo difiere la amplitud del rango.

4.2.1.1 Temperatura máxima

El ciclo anual de la temperatura máxima sobre los sectores norte, centro y sur de la cuenca se muestra en la Figura N° 11 (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 (entre líneas en rojo) se aprecian 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.

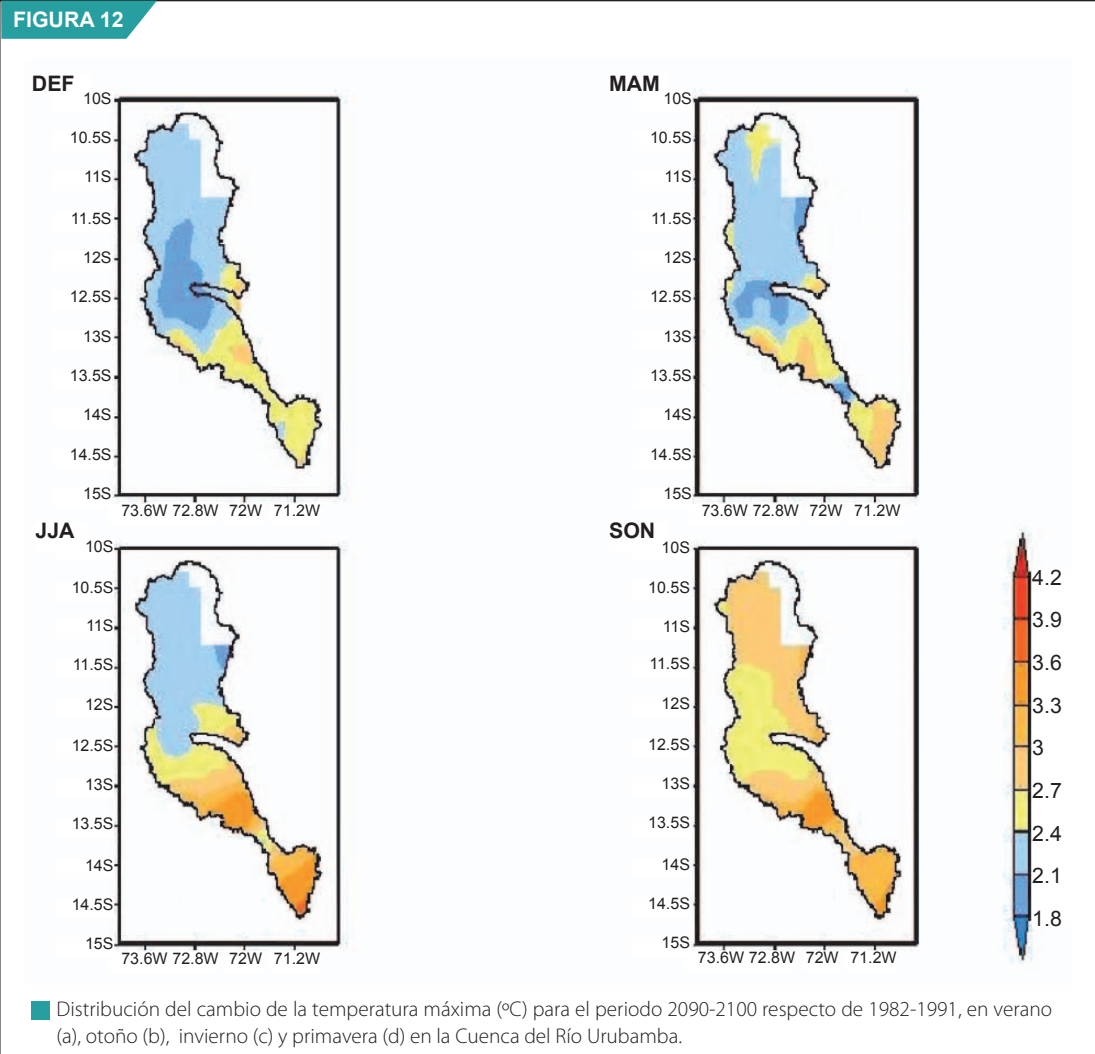


En la misma figura (derecha) se observa el cambio de la temperatura máxima entre los dos time-slice, el cual varía entre las bandas de 95% de confianza estimados. Dicho de otro modo, el cambio esperado de la temperatura máxima fluctuaría entre esos dos límites con una probabilidad de 95%. No se aprecian 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. Asimismo, 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 N° 16 y la Figura N° 12 donde se presentan 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.

Tabla N° 16: Cambio estacional de la temperatura máxima en algunos puntos de la Cuenca del Río 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	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



En el 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. Sin embargo, puede observarse un mayor cambio 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.

Según la misma tabla y la Figura N° 12, todo indica que el mayor cambio (>3,0 °C) se producirá entre invierno y primavera, particularmente en Anta (3 340 msnm) y Urubamba (2 863 msnm), provincias productoras de maíz amiláceo. Asimismo, se presentarían incrementos promedio de 2,5 en localidades ubicadas por encima de los 3 200 msnm como Sicuani y Granja Kayra.

En los mapas de la Figura N° 12 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 4 330 y 2 800 msnm, variando tal incremento entre 2,4-3,6 °C en invierno y primavera principalmente. Además se advierte una tendencia hacia un mayor incremento en el lado occidental (partes altas de la provincia de Canchis, límite con la región Puno).

Por 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).

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.

4.2.1.2 Temperatura mínima

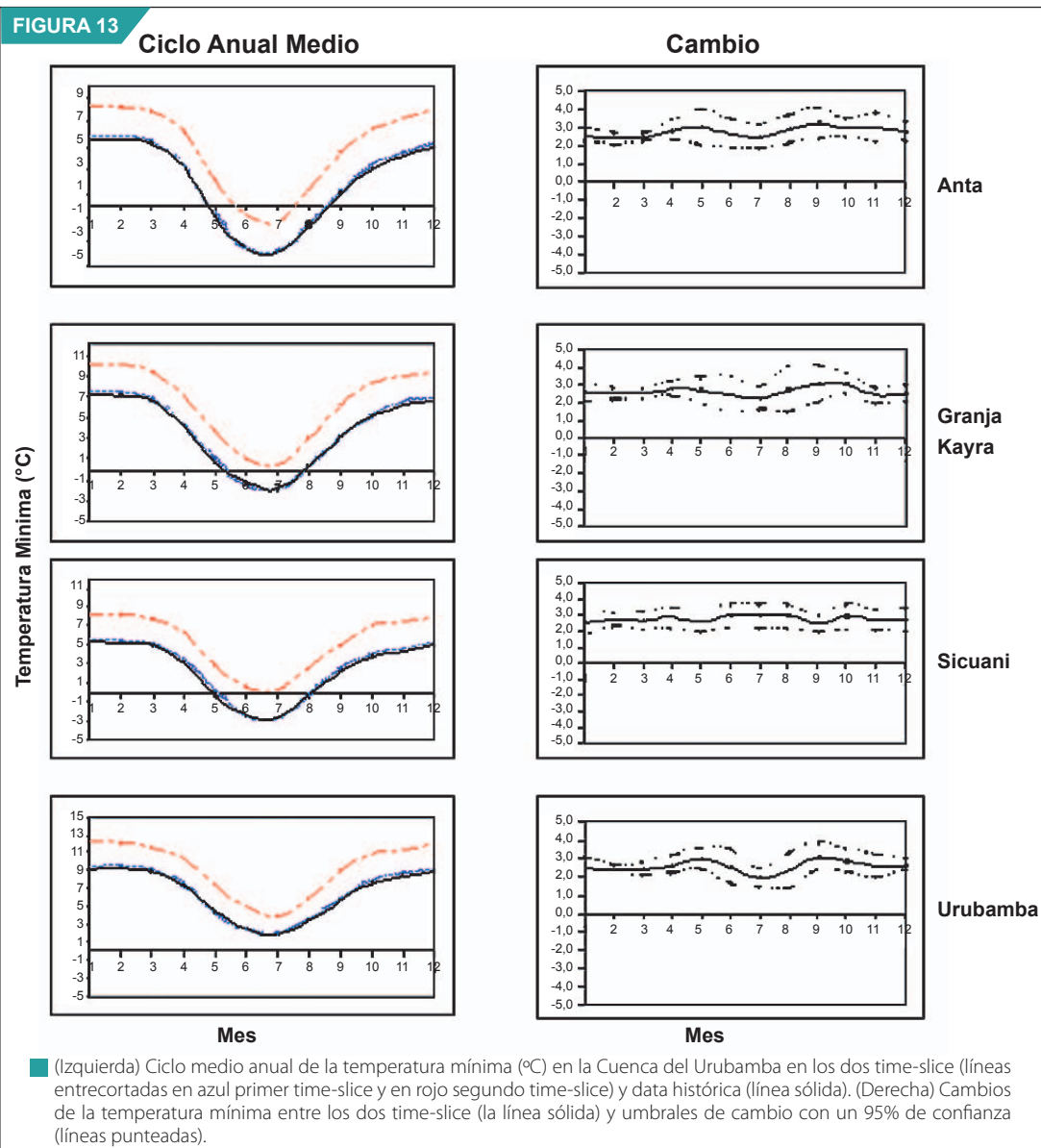
Al igual que en la temperatura máxima, las proyecciones a largo plazo de la temperatura mínima presentarán incrementos relativamente uniformes a lo largo del año. En la Figura N° 13 se aprecia el ciclo anual de la temperatura mínima (izquierda) y el cambio de ésta para finales del presente siglo (derecha).

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 N° 13, derecha), los mayores cambios se presentarían al término del otoño (mayo) e inicio de la primavera (septiembre), a excepción de Sicuani 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).

Los incrementos proyectados de la temperatura mínima para finales de siglo varían entre 1,8-3,2 °C y considerando el intervalo de variación, el rango podría ampliarse hasta 1,0-4,3 °C. Estos incrementos guardan relación con lo actualmente observado en la cuenca (ver Capítulo 3). Investigaciones recientes que tienen como base los escenarios extremos de emisión 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); así como un rango de variación de 3-7 °C en sectores ubicado por encima de los 4 000 msnm en la región Arequipa, para el año 2100 (Marengo et al., 2007).

FIGURA 13



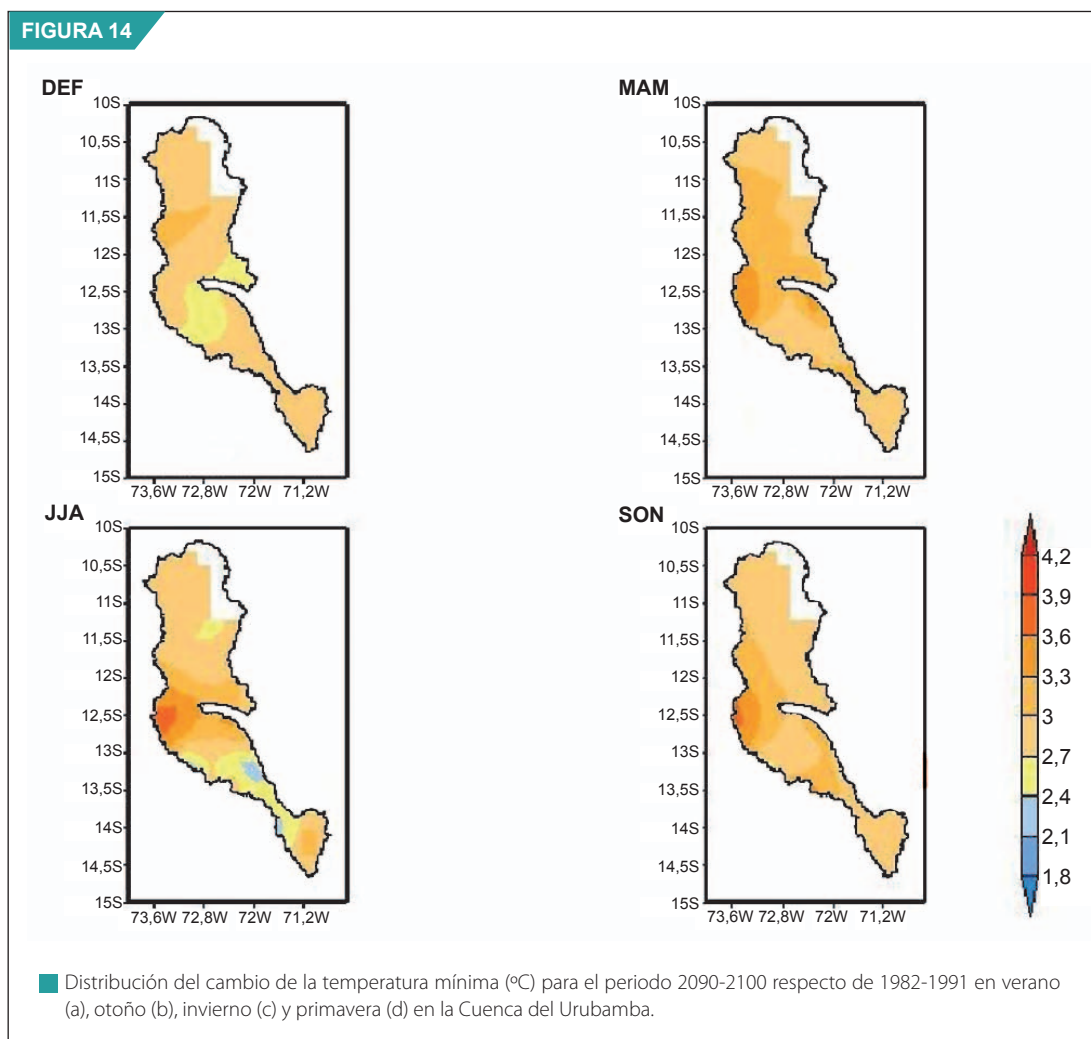
La tendencia anual y estacional observada es coherente con la tendencia positiva del indicador T_{nx} (temperatura mínima máxima) en localidades como Quillabamba y Anta.

En la variación estacional puntual y areal del cambio de la temperatura mínima para fines de siglo (Tabla N° 17 y Figura N° 14 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).

Tabla N° 17: Cambio estacional de la temperatura mínima en algunos puntos de la Cuenca del 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	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

Asimismo, 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.



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, 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 agropecuaria⁶. 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.

4.2.1.3 Precipitación

El modelo presenta un buen skill en la representación del clima actual, al simular correctamente el ciclo anual de la precipitación (Figura N° 15, izquierda); a pesar de ello, el modelo sobrestima ligeramente los montos acumulados durante el periodo de lluvias.

En relación con lo anterior, Mizuta et al. (2006) dan cuenta de sobrestimaciones sistemáticas del modelo en la simulación de la precipitación total⁷ sobre los trópicos (tanto en verano como en invierno), lo cual

⁶ III Censo Nacional Agropecuario 1994, INEI.

⁷ Precipitación total: suma de la precipitación convectiva y de gran escala.

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 la grilla. La estructura espacial de la humedad también es 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, sobre todo en el periodo lluvioso. En la misma figura también se percibe 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 N° 15, derecha) sí presenta una marcada estacionalidad. En la misma figura se observan 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 (6 271 msnm), Sacsarayoc (5 936 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 reducción de hasta 40% en invierno.

Según la Tabla N° 18 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; asimismo, difieren 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 4 000 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.

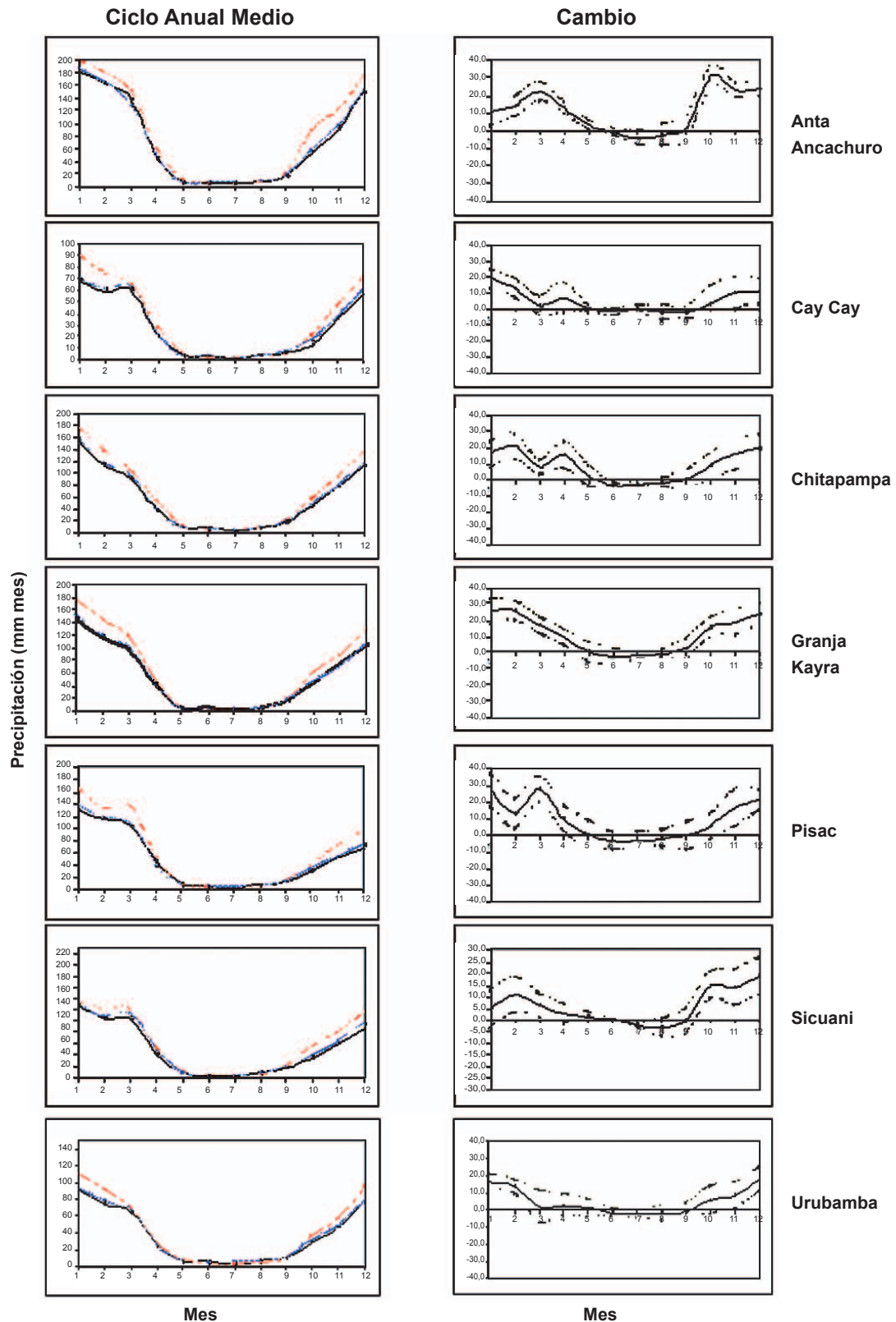
En relación con lo anterior, el proyectado incremento de lluvias en el largo plazo en toda la cuenca es particularmente consistente con el incremento del número de días húmedos consecutivos (CWD) y el incremento de días de precipitación intensa y muy intensa (R10mm y R20mm), que se viene observando actualmente en esta cuenca (Capítulo 3). 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 N° 18 y Figura N° 16 se aprecian con mayor claridad las áreas de mayor y menor cambio de la precipitación que se discute líneas arriba.

4.3 Proyecciones del caudal del río Urubamba al año 2035

Considerando que la alteración de la oferta y la demanda del recurso hídrico en la región andina como consecuencia del calentamiento global podría desencadenar conflictos sociales en el corto y mediano plazo (mucho antes del 2100), se ha analizado el caudal histórico del río Urubamba en la estación de control Pisac (en sector sur de la cuenca); su proyección al año 2035 se basa en un análisis estocástico de dicha información (con el modelo SAMS).

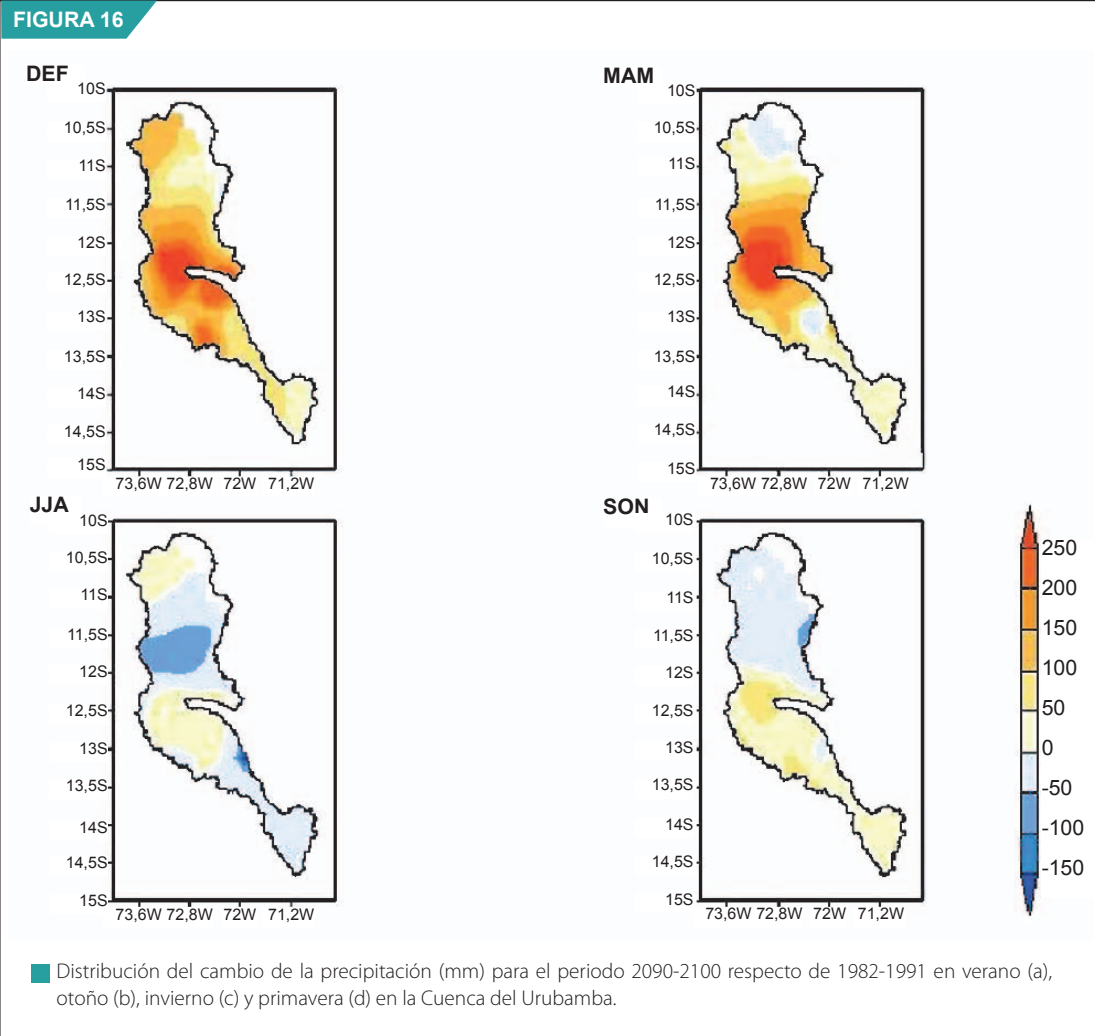
FIGURA 15



Los caudales generados al 2035 se presentarían dentro de sus valores normales; existe la posibilidad que se presenten entre 1 a 4 años secos. El periodo 2030-2035 serían mayormente años secos debido a que los caudales del río Urubamba serían deficientes.

Tabla N° 18. Cambio estacional de la precipitación (porcentual y en mm) en algunos puntos de la Cuenca del Río Urubamba

N°	Estación	Provincia	Región	DEF		MAM		JJA		SON	
				(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(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



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 enfrenten 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 Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA). 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 1 422 habitantes.

La construcción de los escenarios de precipitación y temperaturas máxima y mínima se basó 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 récord 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); además de la permanente participación del Servicio 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 $0,04$ $^{\circ}\text{C}$ 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 $0,02$ $^{\circ}\text{C}$ 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; además guarda 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} .
- La mayor frecuencia de temperaturas menores de 0 $^{\circ}\text{C}$ (heladas) se presenta en invierno con 5-10 días por mes en la zona de Yucay, Urubamba, Calca y Cay Cay; mientras que 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 01 día 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, predominando, 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 este 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 Niña, las precipitaciones tienden a ser de normales a excesivas.

2. 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 siguientes conclusiones:

- 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, 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; así como en regiones ubicadas por encima de los 2 800 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 Convención (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 las 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 3 000 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 2 800 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 objetiva del clima futuro. Es importante tener en cuenta que éste es el primer trabajo realizado sobre cuencas altoandinas 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; asimismo, 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.

BIBLIOGRAFÍA

Alarcón, C. (1991). Caracterización agroclimática del departamento del Cusco. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. Lima: UNALM, 207 pp.

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. Lima: UNALM, 98 pp.

Avalos, G. (2007). Projected Climate over the central Andes Countries caused by Global Warming. En Vergara, W.; Perez, E.; Méndez, J.; Magaña, V.; Martínez, M.; Ruiz, F.; Avalos, G.; Palacios. Visualizing Future Climate in Latin America: Results from the Application of the Earth Simulator. Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper 30, The World Bank, Washington DC. Pp. 61-81.

Australian Bureau of Meteorology (1992). Drought Review, Number 249.

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 kW.

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.; Nobre, C. (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. Díaz, 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: Avalos, G.; Rosas, 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>

http://sepiensa.org.mx/contenidos/2005/I_calenta/calentamiento_1.htm

http://www.distriluz.com.pe/electrocentro/01_empresa/resena.html

<http://www.sumaqperu.com.pe>



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Ministerio del Ambiente - MINAM
Av. Javier Prado Oeste 1440 - San Isidro - Lima - Perú
Telf.: (511) 6116000
www.minam.gob.pe