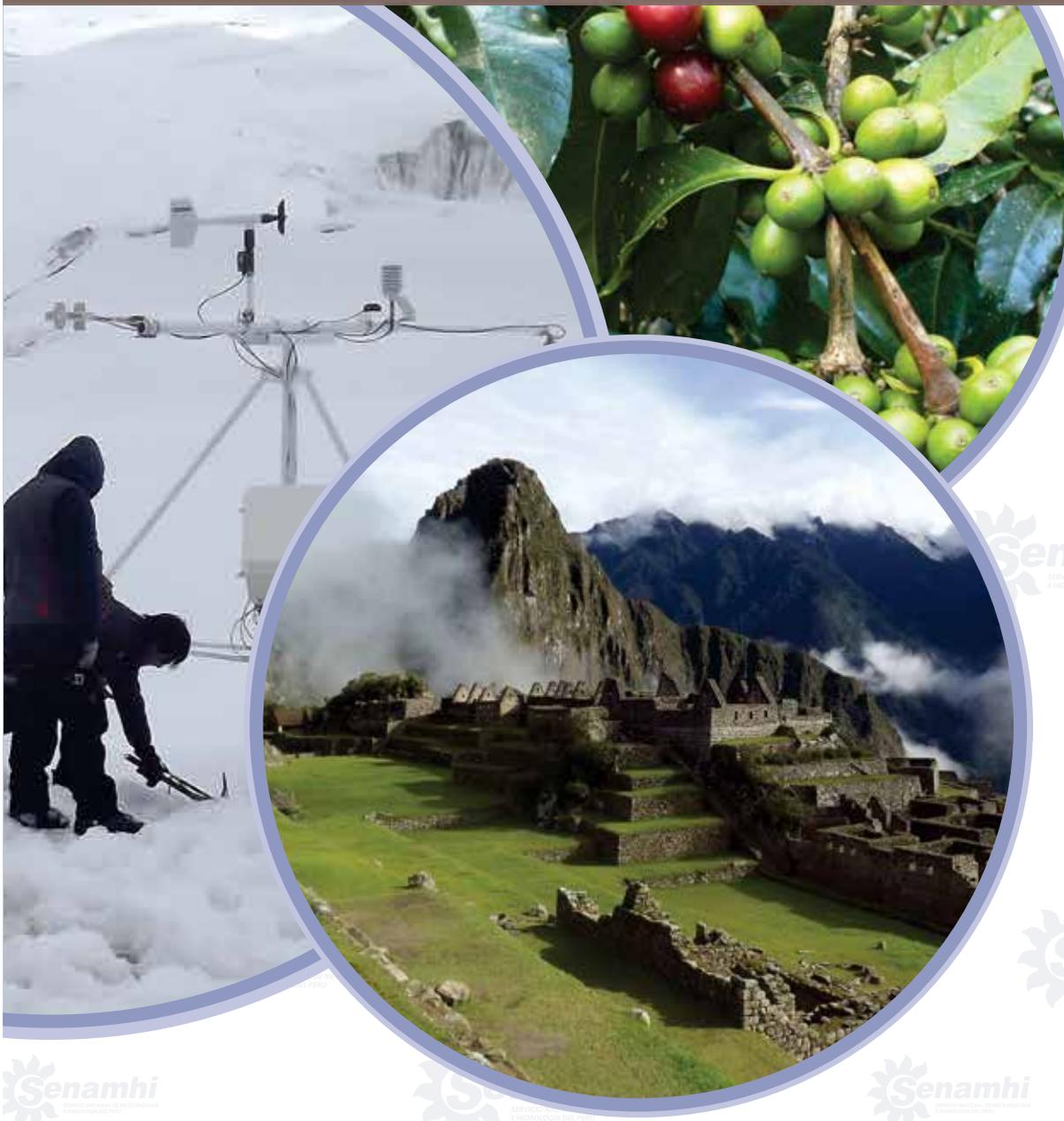


# Análisis del clima actual y futuro en la cuenca del río Urubamba y sus impactos en la disponibilidad hídrica y cultivos prioritizados en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

COMPENDIO



**PRAAPERÚ**

PROYECTO DE ADAPTACIÓN AL IMPACTO DEL RETROCESO ACCELERADO DE GLACIARES EN LOS ANDES TROPICALES

Esta es una publicación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en base a los estudios realizados en la cuenca del río Urubamba, en Cusco. Estos estudios, así como la impresión de esta publicación, forman parte de los resultados del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales, que fue implementado en los países de la región andina el año 2008 a través de una donación del Banco Mundial, con recursos del Fondo Mundial para el Medio Ambiente, y del Gobierno japonés, administrados por la Secretaría General de la Comunidad Andina y que en el Perú fue liderado por el Ministerio del Ambiente.



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

PROYECTO DE ADAPTACIÓN AL IMPACTO DEL RETROCESO  
ACELERADO DE GLACIARES EN LOS ANDES TROPICALES

**PRAA PERÚ**

Análisis del clima actual y futuro en la  
cuenca del río Urubamba y sus  
impactos en la disponibilidad hídrica y  
cultivos priorizados en la subcuenca de  
Santa Teresa, Cusco

**Ministro del Ambiente**  
Manuel Pulgar-Vidal Otálora

**Viceministro de Gestión Estratégica de Recursos Naturales**  
Gabriel Quijandría Acosta

**Director de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos**  
Eduardo Durand López-Hurtado

**Presidenta Ejecutiva del SENAMHI**  
Amelia Díaz Pabló

**Director Científico del SENAMHI**  
Esequiel Villegas Paredes

**Director General de Meteorología**  
Luis Alfaro Lozano

**Directora General de Hidrología y Recursos Hídricos**  
Gladys Chamorro de Rodríguez

**Directora General de Agrometeorología**  
Irene Trebejo Varillas

**Responsables del Compendio**  
Grinia Ávalos, Irene Trebejo, Oscar Felipe

**Secretaría General de la Comunidad Andina de Naciones**  
**Unidad Ejecutora del PRAA**

**Banco Mundial**  
**Departamento de Desarrollo Ambiental y Socialmente Sostenible (LCSES)**

**2013**

**CLIMA ACTUAL Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2030  
EN LA CUENCA DEL RÍO URUBAMBA, CUSCO**

**Autor del compendio**

Grinia Ávalos

**Equipo Técnico del SENAMHI Perú**

Grinia Ávalos, Clara Oria, Amelia Díaz, Nelson Quispe, Félix Cubas,  
Delia Acuña, Gerardo Jácome, Gabriela Rosas, Alan Llacza y Olimpio Solís

**Contribuciones**

Esequiel Villegas, Wilson Suárez, Oscar Felipe, Luis Vera y Héctor Vera

**Consultores**

Ángel Cornejo y Silvia Guerra

**Computación de alto rendimiento**

Otto Huiman, Gerardo Jácome y Alan Llacza

**Colaboradores**

Ever Castillo, Elizabeth Herrera, Sayuri Ramírez, Rocío Moscol y Reynaldo Navarrete

**Revisión**

Esequiel Villegas

**Corrección de estilo**

Lucinda Montañez

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA  
PRESENTE Y FUTURA: SUBCUENCA DEL RÍO SANTA TERESA**

**Autor del Compendio**

Oscar Felipe

**Equipo Técnico del SENAMHI Perú**

Julio Ordoñez, Wilson Suarez, Oscar Felipe, Fernando Arboleda, Jorge Carranza,  
Héctor Vera, Miriam Casaverde

**Consultores**

Karina Morales, Tannia Sánchez

**Revisión y edición**

Oscar Felipe

**CARACTERIZACIÓN Y APTITUD AGROCLIMÁTICA, IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO  
Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN LOS CULTIVOS DE CAFÉ, GRANADILLA Y PALTO EN LA  
SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO**

**Autores del Compendio**

Irene Trebejo

Luis Cruzado

**Equipo Técnico del SENAMHI Perú**

Irene Trebejo, Constantino Alarcón, Karim Quevedo, Luis Cruzado

**Asesor Científico Externo**

Guillermo Baigorria

**Consultores**

Juan Guerrero, Juan Chang Chang Fung

Rebeca Sanabria y José Flores

**Soporte computacional: SIG**

Orlando Quispe

César L. Rojas

**Revisión**

Esequiel Villegas Paredes

**Corrección de estilo**

Lucinda Montañez y Carlos Castillo

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-04563

DISEÑO E IMPRESIÓN: Zona comunicaciones S.A.C  
Jr. Neón 5665, Los Olivos

<b>PRESENTACIÓN</b>	13
<b>Capítulo 1</b>	
ÁMBITO DE ESTUDIO	15
1.1 Cuenca del río Urubamba	15
1.2 Zona de influencia	16
1.2.1 Ubicación geográfica	16
1.2.2 Fisiografía	16
1.2.3 Zonas de vida	16
1.2.3.1 Bosque húmedo-subtropical (bh-S)	16
1.2.3.2 Bosque muy húmedo-Montano Bajo Subtropical (bmh-MBS)	16
1.2.3.3 Páramo muy húmedo (pmh-SaS)	17
1.2.3.4 Bosque pluvial-Montano Subtropical (bp-MS)	17
1.2.4 Hidrografía	17
<b>Capítulo 2</b>	
CLIMA ACTUAL Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2030 EN LA CUENCA DEL RÍO URUBAMBA, CUSCO	19
2.1 El clima en la cuenca del río Urubamba	19
2.2 Tendencias recientes de temperatura del aire y precipitación	19
2.3 Escenarios de cambio climático	21
2.3.1 Modelos y escenarios de emisión	21
2.3.2 Escenarios climáticos regionales: La necesidad del downscaling	22
2.3.3 Construcción de escenarios regionales en la cuenca del río Urubamba	22
2.3.3.1 Evaluación de los modelos climáticos	22
2.3.3.2 Downscaling dinámico	24
2.3.3.3 Downscaling estadístico	25
2.3.4 Construcción de escenarios climáticos locales	25
2.3.5 Proyecciones de temperatura del aire y precipitación al año 2030	26
2.3.5.1 Proyecciones de la precipitación	26
2.3.5.2 Proyecciones de temperaturas del aire	28
2.3.6 La incertidumbre: Preparándonos para un futuro incierto	33
2.3.7 Recomendaciones sobre el uso de los escenarios climáticos	34
CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXOS	39
<b>Capítulo 3</b>	
DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA PRESENTE Y FUTURA: SUBCUENCA DEL RÍO SANTA TERESA, CUSCO	45
3.1 Disponibilidad hídrica presente	45
3.1.1 Calibración y validación de modelos hidrológicos en la cuenca Urubamba	45
3.1.2 Simulación de caudales	47
3.1.3 Determinación de la disponibilidad hídrica por balance hídrico simplificado	53
3.2 Disponibilidad hídrica futura	56
3.2.1 Escenarios climáticos a nivel de cuenca	56
3.2.1.1 Precipitación	56
3.2.1.2 Temperatura del aire	58
3.2.1.3 Escenarios de disponibilidad hídrica	58

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	62

## **Capítulo 4**

CARACTERIZACIÓN Y APTITUD AGROCLIMÁTICA, IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN LOS CULTIVOS DE CAFÉ, GRANADILLA Y PALTO EN LA SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO	65
4.1 Caracterización y aptitud agroclimática	65
4.1.1 Agricultura y producción	65
4.1.2 Cultivos priorizados	66
4.1.3 Caracterización agroclimática de los cultivos	66
4.1.3.1 Fenología de los cultivos	66
4.1.3.2 Calendario agrícola	69
4.1.3.3 Análisis edáfico de la zona de estudio	71
4.1.4 Evaluación agroclimática	74
4.1.4.1 Temperatura del aire	74
4.1.4.2 Precipitación	76
4.1.4.3 Sequías agrícolas	78
4.1.4.4 Balance hídrico agrícola	80
4.1.5 Aptitud agroclimática de los cultivos priorizados	81
4.2 Percepciones sobre la variabilidad climática	82
4.2.1 Análisis de la percepción de la población	82
4.2.2 Impacto de la variabilidad climática en el rendimiento de los cultivos priorizados	87
4.2.3 Impacto de los eventos el Niño/La Niña en el rendimiento de los cultivos	87
4.3 Impacto del cambio climático en los cultivos priorizados	87
4.4 Medidas de adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa	89
CONCLUSIONES	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

## Lista de Figuras

- Figura 1.1** Ubicación de la zona de estudio (cuenca del río Urubamba)
- Figura 1.2** Ubicación de la zona de estudio (Subcuencas de los ríos Sacsara, Santa Teresa y Aobamaba)
- Figura 1.3** Red hidrográfica de la subcuenca del río Santa Teresa
- Figura 2.1** Distribución temporal de las temperaturas del aire máxima (izquierda) y mínima (derecha) anual (1965-2010) en las estaciones Sicuani y Granja Kcayra
- Figura 2.2** Distribución temporal de la precipitación total anual (1965-2010) en mm de las estaciones Sicuani y Granja Kcayra
- Figura 2.3** Estructura de las cuatro líneas evolutivas con sus respectivos conjuntos de familias de escenarios de emisión, según el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones, IE-EE (después de Nakicenovic *et al.*, 2000)
- Figura 2.4** Diagramas de Taylor para el territorio nacional durante el periodo lluvioso DEF (izquierda) y periodo seco JJA (derecha), considerando versiones del modelo japonés en diferentes resoluciones
- Figura 2.5** Correlaciones entre la temperatura máxima (izquierda) y temperatura mínima (derecha) observada versus modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI/JMA en diferentes localidades de la región andina centro-sur del Perú
- Figura 2.6** El modelo climático regional (WRF3.2) de alta resolución está "anidado" al modelo climático global ECHAM5-OM, utilizando las condiciones de contorno de este modelo
- Figura 2.7** Cambios relativos de la precipitación (%) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano, (b) Otoño, (c) Invierno, (d) Primavera y (e) Anual
- Figura 2.8** Cambios relativos de la precipitación anual (%) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030, en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. Se muestra el ensamble multimodelo (EMM) (círculos cerrados) y los rangos de variación máximo y mínimo (círculos abiertos)
- Figura 2.9** Cambios de la temperatura máxima (°C) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano, (b) Otoño, (c) Invierno, (d) Primavera y (e) Anual
- Figura 2.10** Cambios de la temperatura mínima (°C) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano, (b) Otoño, (c) Invierno, (d) Primavera y (e) Anual
- Figura 2.11** Cambios estimados de la temperatura máxima anual y estacional centrados al 2030 relativo al periodo 1971-2000, de los modelos regionalizados CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y ECHAM5/WRF y el modelo global de alta resolución TL959L60
- Figura 2.12** Cambios estimados de la temperatura mínima anual y estacional centrados al 2030 relativo al periodo 1971-2000, de los modelos regionalizados CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y ECHAM5/WRF y el modelo global de alta resolución TL959L60
- Figura 2.13** Cambios proyectados para cuatro localidades de la cuenca del río Urubamba en temperatura mínima (°C, eje vertical) y precipitación (% , eje horizontal) para el time-slice centrado en el año 2030 respecto al periodo de referencia 1971-2000 en el escenario de emisión A1B, para verano (de diciembre a febrero, en rojo) e invierno (de junio a agosto, en azul)
- Figura 3.1** Plano de ubicación de las subcuencas
- Figura 3.2** Caudales observados y simulados: río Urubamba (calibración)
- Figura 3.3** Caudales observados y simulados: río Urubamba (validación)
- Figura 3.4** Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Sacsara
- Figura 3.5** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Sacsara
- Figura 3.6** Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Santa Teresa
- Figura 3.7** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Santa Teresa
- Figura 3.8** Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Aobamba
- Figura 3.9** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Aobamba
- Figura 3.10** Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Chaupimayo
- Figura 3.11** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Chaupimayo
- Figura 3.12** Mapa de precipitación anual (1969-2009)
- Figura 3.13** Mapa de temperatura mínima promedio anual (1969-2009)
- Figura 3.14** Mapa de temperatura máxima promedio anual (1969-2009)
- Figura 3.15** Mapa de evapotranspiración real anual (1969-2009)
- Figura 3.16** Mapa de evapotranspiración potencial anual (1969-2009)
- Figura 3.17** Mapa de escurrentía anual (1969-2009)

- Figura 3.18** Gráfico de barras de la precipitación mensual del escenario presente (1991-2008) y futuro (2030-39) en la cuenca del río Santa Teresa
- Figura 3.19** Distribución estacional de la precipitación anual para el periodo presente (1991-2008) y el escenario proyectado (2030-39)
- Figura 3.20** Ciclo anual de la temperatura media mensual para el periodo de referencia y el escenario proyectado 2030-39
- Figura 3.21** Gráfico de la lámina de escorrentía del periodo de referencia y el escenario proyectado
- Figura 3.A1** Vista satelital de las cuencas de estudio
- Figura 3.A2** Superficie glaciar para diferentes períodos en el nevado Salkantay
- Figura 4.1** Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.2** Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.3** Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.4** Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.5** Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.6** Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.7** Unidades de suelo identificadas en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.8** Capacidad de uso mayor de las tierras en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.9** Distribución espacial de la temperatura del aire mínima promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola
- Figura 4.10** Distribución espacial de la temperatura del aire máxima promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola
- Figura 4.11** Distribución espacial de la temperatura media del aire promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola
- Figura 4.12** Distribución de la precipitación total para el período agrícola en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.13** Variación multianual del índice de sequías agrícolas para Machu Pichu, Cusco
- Figura 4.14** Sequías agrometeorológicas en la estación de Machu Pichu, Cusco. a) Frecuencia; b) Variación anual de los índices de sequía
- Figura 4.15** Variación multianual del índice de sequías agrícolas para Quillabamba, Cusco
- Figura 4.16** Sequías agrometeorológicas en la estación de Quillabamba, Cusco: a) Frecuencia y b) Variación anual de los índices de sequía (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.17** Balance hídrico representativo para los cultivos priorizados en condiciones climáticas promedio para la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.18** Balance hídrico agrícola para cultivo de café en condiciones promedio de Quillabamba, Cusco
- Figura 4.19** Aptitud agroclimática del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.20** Aptitud agroclimática del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.21** Aptitud agroclimática del cultivo de palto Criollo en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.22** Aptitud agroclimática del cultivo de palto Fuerte en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.23** Percepción local sobre la frecuencia de los eventos extremos en Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.24** Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.25** Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.26** Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.27** Variedades de cultivo de café, granadilla y palto más sensibles a la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.28** Variedades de cultivo de café, granadilla y palto adaptados a la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.29** Medidas para mitigar el efecto de la sequía en los cultivos de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.30** Percepción sobre las estrategias de los productores de café (a), granadilla (b) y palto (c) ante la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.31** Estimación del rendimiento de café para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039)

- Figura 4.32** Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de café para escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.33** Estimación del rendimiento de granadilla para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039)
- Figura 4.34** Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de granadilla para escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Figura 4.35** Estimación del rendimiento de palto Criollo para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039)
- Figura 4.36** Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de palto Criollo para escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco

## Lista de Tablas

- Tabla 2.1** Outline de los MCGAOA de AR4 del IPCC
- Tabla 2.2** Variables evaluadas de los MCG del AR4 del IPCC versus los *Reanalysis*
- Tabla 2.3** Outline del modelo WRF
- Tabla 2.4** Estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Urubamba con series históricas extensas (1965-2010)
- Tabla 3.1** Caudales observados y simulados (mm) a nivel anual en el río Vilcanota
- Tabla 3.2** Lámina de escorrentía (mm) generada en las subcuencas
- Tabla 3.3** Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Sacsara
- Tabla 3.4** Caudales característicos del río Sacsara en años normales, húmedos y secos
- Tabla 3.5** Persistencia mensual de caudales del río Sacsara
- Tabla 3.6** Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Santa Teresa
- Tabla 3.7** Caudales característicos del río Santa Teresa en años normales, húmedos y secos
- Tabla 3.8** Persistencia mensual de caudales del río Santa Teresa
- Tabla 3.9** Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Aobamba
- Tabla 3.10** Caudales característicos del río Aobamba en años normales, húmedos y secos
- Tabla 3.11** Persistencia mensual de caudales del río Aobamba
- Tabla 3.12** Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Chaupimayo
- Tabla 3.13** Caudales característicos del río Chaupimayo en años normales, húmedos y secos
- Tabla 3.14** Persistencia mensual de caudales del río Chaupimayo
- Tabla 3.15** Precipitación mensual de referencia (mm) y el escenario proyectado para la subcuenca del río Santa Teresa
- Tabla 3.16** Cambios estacionales (%) de la precipitación por trimestre
- Tabla 3.17** Temperatura media mensual (°C) del escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa
- Tabla 3.18** Lámina de escorrentía mensual (mm) del escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa
- Tabla 3.19** Lámina de escorrentía (mm) trimestral para el escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa
- Tabla 3.20** Lámina de escorrentía mensual (mm) del escenario de referencia y el escenario proyectado considerando aporte del suelo
- Tabla 4.1** Estructura de la superficie agrícola en el distrito de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.2** Tamaño de las unidades agropecuarias y principales cultivos transitorios y permanentes en el distrito de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.3** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.4** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.5** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.6** Clasificación natural de los suelos en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.7** Clasificación de las tierras según su capacidad de uso mayor en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
- Tabla 4.8** Valores extremos de temperatura del aire para estaciones meteorológicas dentro y alrededor de la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

<b>Tabla 4.9</b>	Inicio y duración de la estación lluviosa en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
<b>Tabla 4.10</b>	Técnicas agroambientales de alta prioridad para la adaptación del cultivo de café al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
<b>Tabla 4.11</b>	Técnicas agroambientales de alta prioridad para la adaptación del cultivo de granadilla al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
<b>Tabla 4.12</b>	Técnicas agroambientales utilizadas como medidas de adaptación para cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
<b>Tabla 4.13</b>	Medidas sociales de alta prioridad para la adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco
<b>Tabla 4.14</b>	Medidas económicas de alta prioridad para la adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

## Lista de Mapas

<b>Mapa 01</b>	Relieve de la cuenca del río Urubamba
<b>Mapa 02</b>	Clasificación climática de la cuenca del río Urubamba, según Warren Thornthwaite
<b>Mapa 03</b>	Promedio multianual de la precipitación acumulada en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000
<b>Mapa 04</b>	Promedio multianual de la temperatura máxima en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000
<b>Mapa 05</b>	Promedio multianual de la temperatura mínima en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000

## Lista de Fotos

<b>Foto 3.1</b>	Vista frontal del nevado Salkantay
<b>Foto 3.2</b>	Aforo por vadeo en río Aobamba (08/07/2010), $Q = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$
<b>Foto 3.3</b>	Aforo por vadeo en río Sacsara (08/07/2010), $Q = 9,6 \text{ m}^3/\text{s}$
<b>Foto 3.4</b>	Aforo por vadeo en río Santa Teresa (08/07/2010), $Q = 9,6 \text{ m}^3/\text{s}$
<b>Foto 3.5</b>	Estación hidrológica instalada en el sector la Playa, cuenca media del río Santa Teresa
<b>Foto 4.1</b>	Sistema agroforestal: café-plátano-pacae. Santa Teresa, Cusco
<b>Foto 4.2</b>	Izquierda: variedad de café introducido cv Caturra (tamaño más pequeño) bajo sombra de pacae. Santa Teresa, Cusco
<b>Foto 4.3</b>	Sistema tradicional de producción de granadilla con tutor de pacae común (Yanatili, Sacsara, Cusco)

# PRESENTACIÓN

En el Cuarto informe científico AR4 del IPCC para América Latina (IPCC 2007 a, b) se indica que el Perú es uno de los países que se verán más afectados por las consecuencias del cambio climático. Los estudios realizados en el marco de SCNCC (SENAMHI 2009), muestran cambios en los patrones térmicos de la región sur del Perú (calentamiento) mientras que las lluvias no presentan un patrón definido; es decir, se advierten tendencias tanto de incremento como de reducción.

Ante la evidencia de cambios sistemáticos del clima a nivel mundial, la Organización de Naciones Unidas indica que la implementación de opciones de adaptación locales es el mecanismo para la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades en alto riesgo ante los efectos inevitables del clima, como es el caso del Perú.

Frente a este escenario, en el año 2009 el SENAMHI y el Ministerio del Ambiente del Perú, en el marco del Acuerdo Subsidiario del Banco Mundial con recursos del Fondo Mundial para el Medio Ambiente y del Gobierno de Japón, suscribieron un Acuerdo de Cooperación Interinstitucional para la ejecución de actividades en el marco de los componentes 1 y 3 del Proyecto Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA, proyecto que fuera administrado por la Secretaría General de la Comunidad Andina.

El presente documento es un compendio resumido, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en el marco del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), de los estudios, elaborados por las componentes meteorológica, hidrológica y agrometeorológica, "Clima actual y escenarios de cambio climático en la cuenca del Urubamba"; "Determinación de la disponibilidad hídrica superficial presente y futura: subcuenca del río Santa Teresa, y "Caracterización y aptitud agroclimática, impacto del cambio climático y medidas de adaptación en los cultivos de café, granadilla y palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco".

El ámbito de estudio es la cuenca del Urubamba, para la cual se ha desarrollado la Línea de base meteorológica y los escenarios climáticos futuros, en tanto que las aplicaciones para la disponibilidad hídrica y los impactos en los cultivos han sido desarrollados a nivel de la subcuenca del río Santa Teresa.

Los antecedentes de observación a lo largo del periodo instrumental 1965-2010 demuestran incrementos sistemáticos de la temperatura del aire en +0,3 a +0,5 °C por década en la estación Granja Kcayra (provincia del Cusco, 3219 msnm), así como un aumento de las precipitaciones en el sector medio de la cuenca y reducciones en la parte alta. Las tendencias de índices de eventos extremos indican creciente variabilidad climática en la cuenca, dado que eventos extremos locales como las heladas, lluvias intensas, veranillos, friajes, entre otros están siendo más frecuentes

e intensos, y afectan enormemente la productividad del sector agropecuario, la sostenibilidad del turismo, la biodiversidad y la seguridad energética y alimentaria.

Con respecto a la caracterización del escurrimiento superficial de la subcuenca del río Santa Teresa y cuencas vecinas de Sacsara y Aobamba, al igual que la cuenca de Santa Teresa reciben aportes hídricos del glaciar Salkantay. La oferta hídrica anual de los ríos Santa Teresa, Sacsara y Aobamba ha sido estimada en 11,0 m<sup>3</sup>/s; 8,0 m<sup>3</sup>/s y 5,7 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, para el periodo de referencia de 1970-2010. La simulación hidrológica de la oferta hídrica de estas cuencas en base a escenarios de cambio climático ha permitido obtener las proyecciones de caudal para estas cuencas para el periodo 2030-2039, lo cual indica una disminución de 41 %, para el escenario 2030-2039, y considerando el agua del suelo, esta pérdida se reduce a 21 %.

En la caracterización agroclimática de los cultivos prioritarios en las subcuencas Santa Teresa se registra la percepción local de los pobladores sobre un aumento de la frecuencia de eventos climáticos, como las sequías y veranillos, lluvias intensas y el incremento de la temperatura del aire; el exceso de calor afecta principalmente las fases de crecimiento vegetativo y floración en los cultivos de café y granadilla; en el palto es más afectada la floración. Las sequías y los veranillos afectan negativamente tanto las fases de floración y maduración de los tres cultivos. Las lluvias intensas afectan principalmente la maduración en el café, la floración en la granadilla y todas las etapas fenológicas del palto; aunque un mayor o menor grado de afectación depende de la variedad de cada cultivo. Por otro lado, como una forma de adaptarse a la variabilidad climática, se realizan asociaciones de los cultivos del café con paca o guaba, la granadilla asociada con paca y el palto con plátano o paca.

Ante un escenario futuro (2015-2039), se observan tendencias de incremento del rendimiento del cultivo de café entre los 1500 a 2500 msnm; tendencias a reducirse el rendimiento del cultivo de granadilla en las partes medias y a mantenerse en las partes altas; en tanto que el cultivo de palto presenta tendencias a incrementar su rendimiento más no su frontera agrícola.

Entre las técnicas agroambientales de adaptación al cambio climático se destacan la revalorización de los sistemas agroforestales; entre las medidas sociales y económicas se recomiendan la capacitación en técnicas agronómicas y el fortalecimiento de las organizaciones de productores respectivamente.

Los resultados que se muestran constituyen una herramienta esencial para la realización de estudios que permitan comparar y proyectar el impacto del cambio climático en la región, partiendo del establecimiento de una línea base para la determinación de la vulnerabilidad actual de la cuenca frente al clima y su variabilidad,

hasta la evaluación de los posibles patrones de riesgo y oportunidades ante posibles cambios del clima en un futuro no tan lejano, particularmente sobre cuencas hidroglaciares como la del río Urubamba. Asimismo, responden a la necesidad de reforzar la resiliencia de los ecosistemas y

economías locales ante los impactos del retroceso glaciar en los Andes Tropicales a través de la implementación de actividades piloto que muestren los costos y beneficios de la adaptación al cambio climático en las cuencas.



## 1.2 Zona de influencia

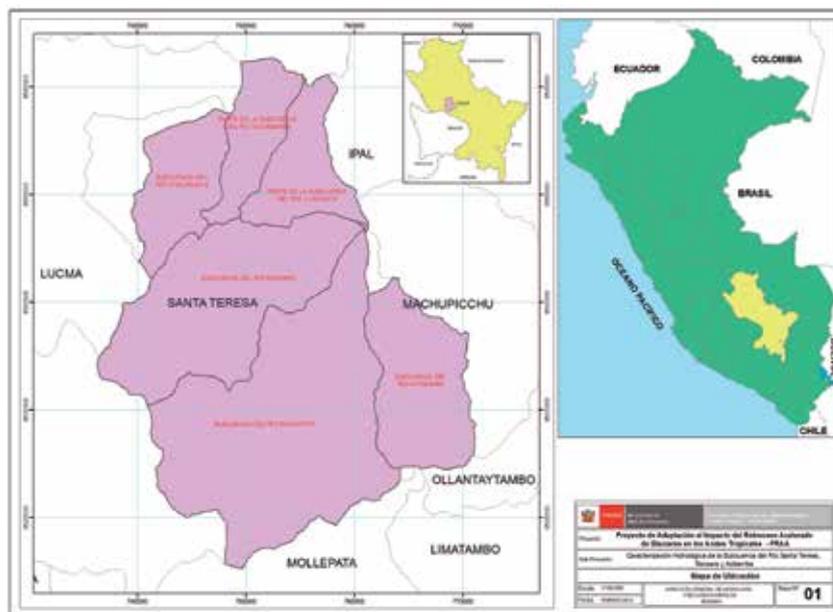
La zona de influencia corresponde a las subcuencas de los ríos Sacsara, Santa Teresa y Aobamba, cuyas características generales son las siguientes:

### 1.2.1 Ubicación geográfica

La zona de estudio está ubicada en el distrito de Santa Teresa, en la provincia de La Convención, a 130 km al

noroeste de Cusco; entre los paralelos geográficos 13° 14' y 13° 34' y los meridianos 75° 68' y 73° 22' (Figura 1.2).

Pertenece al sistema hidrográfico del río Urubamba, siendo tributario por su margen izquierda, cuya confluencia se produce en la cota 1487 msnm, en el pueblo del mismo nombre.



**Figura 1.2** Ubicación de la zona de estudio (subcuencas de los ríos Sacsara, Santa Teresa y Aobamba). **Fuente:** Elaboración propia

### 1.2.2 Fisiografía

Las subcuencas de los ríos Sacsara, Santa Teresa y Aobamba se caracterizan por presentar mayormente una superficie montañosa. En la parte central predominan superficies colinosas, frentes montañosos y una parte de superficies planas ubicadas en el fondo del valle, estos últimos son de origen deposicional y de acumulación de material fluvio aluvial.

El origen y las características de la forma de relieve de la subcuenca del río Santa Teresa se deben a diversos episodios de modelamiento tectónico del levantamiento de la cadena de los Andes, así como también a procesos erosivos; que han originado las diversas formas de paisajes.

La presencia de diversos pisos altitudinales, fuertes pendientes, desniveles y formaciones geológicas heterogéneas también determinan la ocurrencia de complejos patrones geomórficos en distancias muy cortas.

### 1.2.3 Zonas de vida

#### 1.2.3.1 Bosque húmedo-subtropical (bh-S)

Se localiza en el fondo del valle del río Urubamba y en las primeras elevaciones de las laderas de los cerros que lo circundan, comprendido entre 1850 y 2000 msnm (referencia: Puente San Miguel-Central Hidroeléctrica Machu Picchu). Presenta un relieve de plano a ondulado en el fondo de valle y empinado en las laderas, con pendientes de 50 %.

Presenta un clima cálido y húmedo, con un promedio de precipitación total anual de 1950 mm y una biotemperatura media anual de 15 a 18 °C. Según el diagrama bioclimático de Holdridge tiene un promedio de evapotranspiración potencial total anual variable entre la mitad (0,5) y (1,0) del promedio de precipitación total por año, lo que ubica a esta zona de vida en la provincia de humedad: Clima húmedo.

#### 1.2.3.2 Bosque muy húmedo-Montano Bajo Subtropical (bmh-MBS)

Se localiza a continuación del bh-S, entre el fondo de valle del río Urubamba y las primeras elevaciones de las laderas montañosas que lo circundan, comprendido aproximadamente entre 1000 y 3000 msnm. Incluye la localidad y la ciudadela de Machu Picchu, así como los grupos arqueológicos Intipunku, Chachabamba, Templo de la Luna y Andenes.

Presenta un relieve de plano a ondulado en el fondo de valle y empinado en las laderas, con pendientes hasta de 50 %. Presenta un clima templado y muy húmedo, con un promedio de precipitación total por año cercano a 1950 mm y una biotemperatura media anual de 12 a 15 °C. Según el diagrama bioclimático de Holdridge, tiene un promedio de evapotranspiración potencial total por año variable entre la cuarta parte (0,25) y la mitad (0,5) del promedio de precipitación total anual, lo que ubica a esta zona de vida en la provincia de humedad: Clima superhúmedo.

### 1.2.3.3 Páramo muy húmedo (pmh-SaS)

Se localiza a continuación del bmh-MBS, ocupa la porción media de las laderas montañosas, aproximadamente entre 3800 y 4400 msnm. Presenta un relieve de ondulado a empinado en las porciones inferiores de las laderas, con pendientes de hasta 50 %.

Presenta un clima frígido y muy húmedo, con un promedio de precipitación total anual alrededor de 1000 mm y una biotemperatura media anual de 3 a 6 °C.

### 1.2.3.4 Bosque pluvial-Montano Subtropical (bp-MS)

Está localizado a continuación del pmh-SaS, entre la porción media de las laderas montañosas, aproximadamente entre los 3000 y 3800 msnm. Incluye los grupos arqueológicos localizados en la margen izquierda del río Urubamba, como Intipata, Wiñay, Wayna, Phuylipatamarca, Cochamarca y Sayacmarca.

Presenta un relieve de plano a ondulado en el fondo del valle y empinado en las laderas con pendientes de más del 50 %. Clima frío y pluvial, con un promedio de precipitación total anual cercano a 1900 mm y una biotemperatura media anual de 6 a 12 °C.

Según el diagrama bioclimático de Holdridge, tiene un promedio de evapotranspiración potencial total por año variable entre la octava (0,125) y la cuarta parte (0,25) del promedio de precipitación total por año, lo que ubica a esta zona de vida en la provincia de humedad: Clima superhúmedo.

### 1.2.4 Hidrografía

La zona de influencia está conformada por tres ríos principales: Sacsara, Santa Teresa y Aobamba, cuyas características son:

- El río Sacsara es un afluente del río Santa Teresa y tiene su origen en los deshielos del nevado Salkantay. La longitud del curso del río principal es de 29,9 km hasta su confluencia con el río Santa Teresa. Los niveles de altitud de la cuenca están comprendidos entre los 1450 y 5950 msnm. Esta subcuenca registra una longitud total de ríos de 44,6 km; así como un orden de corriente de 2, una densidad de drenaje de 0,19 km/km<sup>2</sup> y una frecuencia de ríos de 0,02 ríos/km<sup>2</sup>.
- El río Santa Teresa, tiene una longitud promedio, desde su nacimiento en el glaciar de Salkantay hasta la desembocadura con el río Sacsara, de 36 km, alcanza en su curso superior una pendiente de 15,6 % y en su curso inferior 4,2 %. Esta subcuenca registra una longitud total de ríos de 107,6 km; así como un orden de corriente de 3; una densidad de drenaje de 0,29 km/km<sup>2</sup> y una frecuencia de ríos de 0,04 ríos/km<sup>2</sup>.
- El río Aobamba desemboca directamente al río Urubamba por su margen izquierda aguas arriba de la desembocadura del río Santa Teresa en el Urubamba. La longitud del río Aobamba hasta su desembocadura es de 21,3 km, la pendiente media de su curso principal es 11,8 %, llega a alcanzar hasta 16,7 % en la parte alta y 9,3 % en su curso bajo.

La zona de estudio se caracteriza por tener una componente glaciar importante dentro de su ciclo hidrológico; de esta manera la variable de ingreso a las subcuencas no sólo está sujeta al aporte de la precipitación horizontal y vertical, sino también al aporte del glaciar Salkantay, por desglaciación.

El nevado Salkantay es parte de la cordillera de Vilcabamba que se extiende a lo largo de 85 km, donde se encuentran diferentes tipos de paisajes: picos nevados con presencia de vegetación tropical. La parte alta de la Cordillera es de fisiografía muy abrupta, con escarpados cerros y entrecortada por innumerables cañones.

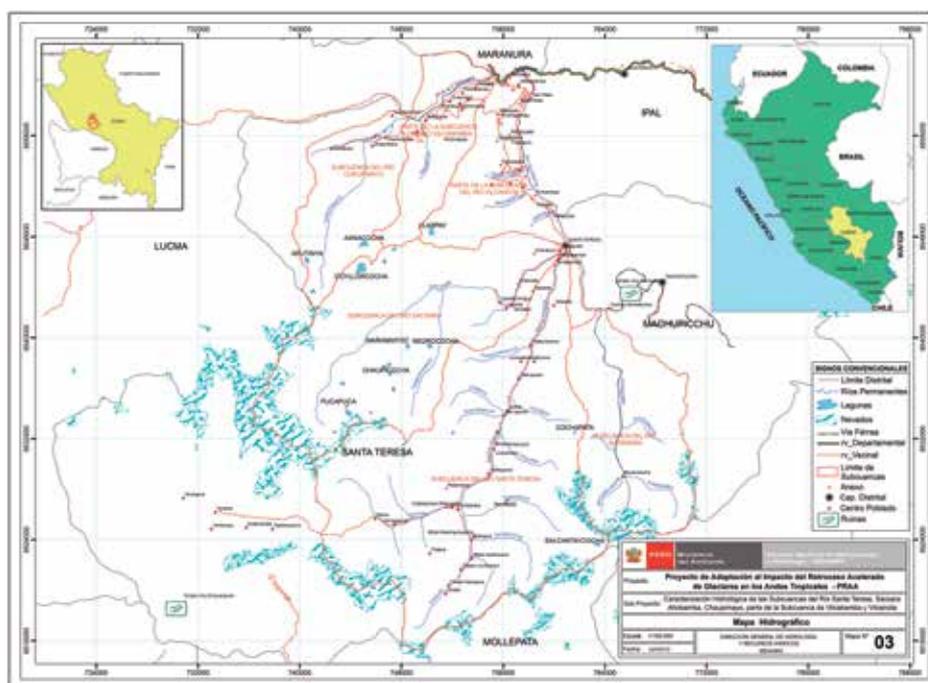


Figura 1.3 Red hidrogrática de la subcuenca del río Santa Teresa. Fuente: Elaboración propia



# Capítulo 2

## CLIMA ACTUAL Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2030 EN LA CUENCA DEL RÍO URUBAMBA, CUSCO

### 2.1 El clima en la cuenca del río Urubamba

En su conjunto, la cuenca del río Urubamba es una región andina y amazónica articulada internamente por el valle del río Urubamba (o Vilcanota). La cuenca, se caracteriza por presentar una compleja topografía, que favorece la presencia de una gran variedad de climas en distancias muy cortas (SENAMHI, 2011a). La cuenca presenta una "franja transicional" en el límite de las provincias de Urubamba y La Convención (12°30'S y 13°30'S), que se encuentra bajo la influencia de los Andes pero expuesta a la influencia cálida y húmeda de la Amazonía, con climas locales tan diversos con su propia geografía. Esta franja divide a la cuenca en dos regiones con climas diametralmente diferentes: la Parte Alta (al sur) entre los 2500 y 3730 msnm, y la parte baja conocida también como Bajo Urubamba (al norte) entre los 300-1000 msnm; mientras el primero presenta características climáticas predominantemente andinas, el Bajo Urubamba es más bien cálido y lluvioso. (Mapa 01 en Anexos).

Según la clasificación de climas de Thornthwaite (SENAMHI, 1988), en el sector centro-norte de la cuenca predomina una amplia extensión de selva con clima cálido húmedo a muy húmedo (A'H3-A'H4) durante gran parte del año. Es una zona muy lluviosa, especialmente entre noviembre y marzo. En este sector se emplazan localidades como Sepahua, Malvinas y Echarate, así como el entorno natural próximo a la ciudadela de Machu Picchu. A mayores altitudes (en el sur de la cuenca), las características climáticas van desde el semifrío húmedo D'H3 en el extremo sur y sur-occidental hasta el frío seco C'H2, donde las precipitaciones ocurren en verano y son fundamentalmente orográficas. En este sector de la cuenca se asientan localidades de gran población como Anta, Cusco, Urcos y Sicuani. (Mapa 02 en Anexos).

La distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca del río Urubamba, refleja dos hechos relevantes: la penetración de los vientos cálidos y húmedos provenientes de la Cuenca Amazónica, principalmente hacia el sector central-norte de la cuenca y en segundo lugar la dependencia constante de la topografía. La precipitación mensual promedio presenta dos regímenes pluviométricos bien diferenciados entre la parte alta y parte baja de la cuenca. Mientras en la parte alta las lluvias máximas se presentan en enero con acumulados de 140 mm, en la parte baja las lluvias máximas se dan en febrero con montos acumulados de hasta 310 mm. Las lluvias acumuladas en la región del Bajo Urubamba exceden en más del 100 % a las lluvias registradas en la región andina o parte alta de la cuenca. A finales de marzo y sobre todo entre abril y mayo, las lluvias disminuyen

drásticamente en ambos sectores. Son dos las estaciones que se definen con claridad: el verano (periodo lluvioso) y el invierno (periodo seco o de estiaje), sin embargo no hay que perder de vista las lluvias durante los periodos equinocciales de otoño y primavera, pues particularmente en esta última, inician las primeras lluvias y definen la temporada de siembra en toda la región andina del Perú. Las lluvias que recibe el Bajo Urubamba al año son del orden del 1980 mm, y excede en más del 200 % al acumulado anual que registra la parte altoandina de la cuenca (625 mm), pero además, este porcentaje de exceso es mucho mayor entre el otoño y la primavera (SENAMHI, 2011). (Mapa 03 en Anexos).

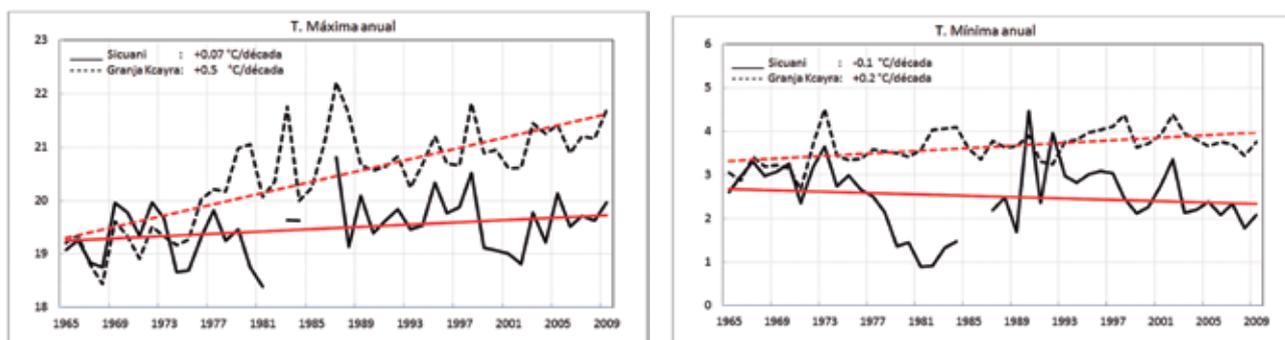
En cuanto al régimen térmico de la cuenca, las diferencias altitudinales propician la existencia de variados escenarios térmicos, que contrastan entre el temple del Bajo Urubamba y los fríos de la parte alta de la cuenca. Si para el conjunto de la cuenca se ha obtenido una temperatura media anual de 16 °C, los territorios correspondientes al Bajo Urubamba superan ampliamente ese valor promedio registrando hasta 25 °C, mientras que la parte alta de la cuenca presenta una temperatura media del orden de los 12 °C. De manera similar, la distribución espacial de las temperaturas extremas (máxima y mínima) exhibe una dependencia con el relieve de la cuenca. La temperatura máxima anual en toda la cuenca es 25 °C y la temperatura mínima 13 °C. Los valores más altos se dan en el Bajo Urubamba entre 20 °C (Tmín) y 30 °C (Tmáx), mientras que en el sector más altoandino de la cuenca los regímenes térmicos son del orden de 6 °C (Tmín) y 20 °C (Tmáx). El ciclo anual de la temperatura máxima refleja la ausencia de nubosidad cerca del mediodía durante los meses de invierno (época de estiaje), lo cual determina que dichas temperaturas sean mayores durante esta temporada que las correspondientes a las de verano. Posteriormente durante los meses de primavera, se conjugan dos factores que producen máximas temperaturas diurnas; en primer lugar debido a la posición solar, mayor energía en superficie, respecto a invierno, y en segundo lugar, menor nubosidad respecto a verano. Respecto a la temperatura mínima, los menores valores ocurren durante los meses de invierno, asociado a la menor presencia de nubosidad nocturna (SENAMHI, 2011). (Mapas 04 y 05 en Anexos).

### 2.2 Tendencias recientes de temperatura del aire y precipitación

Los antecedentes de observación a lo largo del periodo instrumental 1965-2010 demuestran que la cuenca, como parte de la región andina, está experimentando indudables signos de calentamiento, habiéndose estimado en promedio una tasa de calentamiento del

orden de  $+0,3$  °C/década en temperatura máxima del aire y  $+0,2$  °C/década en temperatura mínima del aire, siendo este incremento más acentuado en localidades como Granja Kcayra con  $+0,5$  °C/década (SENAMHI, 2011).<sup>1</sup> Estas tendencias se corresponden con el incremento de días y noches cálidas y la disminución de heladas en algunos puntos de la cuenca a razón de 0,33 días por año (aproximadamente 15 días en el periodo de estudio). Sin embargo, la evolución térmica en la cuenca no ha sido de un calentamiento gradual ni uniforme, ya que se puede observar que en algunos puntos de la cuenca se han sucedido episodios de incremento y

disminución, asociadas a los ciclos cálido y frío del ENOS (Figura 2.1), pero además se advierte que la tendencia de calentamiento es mayor en la temperatura máxima del aire que en la mínima, dado que estaciones como Sicuani y Santo Tomás, ambas ubicadas en la parte alta de la cuenca (sobre los 3200 msnm) presentan tendencias negativas de la temperatura mínima del aire (enfriamiento) del orden de  $-0,1$  °C/década, evidenciando una posible ampliación del rango térmico diurno en este sector de la cuenca, donde además los días con heladas se vienen incrementando a razón de 1,2 días por año (aproximadamente 53 días).

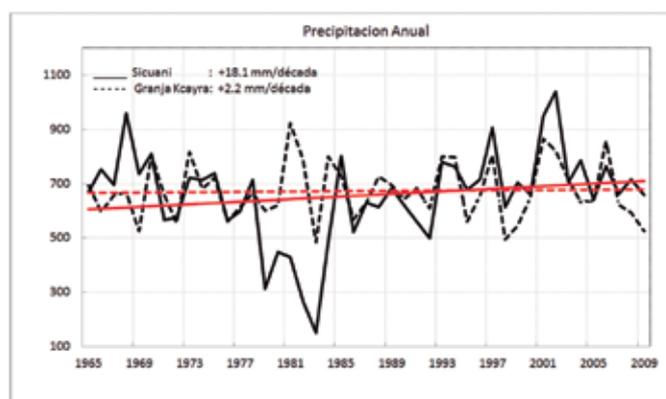


**Figura 2.1** Distribución temporal de las temperaturas del aire máxima (izquierda) y mínima (derecha) anual (1965-2010) en las estaciones Sicuani y Granja Kcayra. El mejor ajuste de las tendencias lineales es indicado por las líneas rojas. **Fuente:** Elaboración propia

La tendencia de la precipitación en la cuenca no muestra un comportamiento tan definido como la temperatura del aire, debido a la compleja distribución espacial que exhiben las lluvias en la región andina así como su elevada variabilidad temporal. En diferentes puntos de la cuenca las tendencias de la precipitación son generalmente de aumento (positivas) con incrementos muy marcados de hasta  $+22$  mm/década en la estación Cay Cay a un nivel de significancia del 99%. Este valor representa un aumento de la precipitación de hasta 90 mm en los últimos 46 años. Otros puntos de la cuenca (Granja Kcayra, Pisac, Ccatcca, Sicuani) presentan también un claro incremento de las lluvias (Figura 2.2), a pesar que no presentan altos niveles de significancia (menores al 87 %). Esta tendencia también se acompaña con el aumento de la intensidad de las lluvias y disminución del número de días secos

consecutivos, en algunas localidades de la cuenca como Granja Kcayra, Ccatcca y Cay Cay. Contrariamente, Pisac viene presentando disminución de lluvias y un aumento del número de días secos consecutivos.

La tendencia de la precipitación anual estimada por SENAMHI (2007) para el periodo 1965-2006 en estaciones como Urubamba, Granja Kcayra y Sicuani fueron positivas y del orden de  $+0,7$  a  $+2,9$  mm/año, mayores en relación al periodo reciente 1965-2010 que son del orden de  $+0,2$  a  $+2,2$  mm/año. Si bien es cierto se mantiene la tendencia positiva, ésta es de menor magnitud debido a que en la última década 2001-2010 se advierte una disminución de las lluvias principalmente en la parte alta de la cuenca<sup>2</sup>.



**Figura 2.2** Distribución temporal de la precipitación total anual (1965-2010) en mm de las estaciones Sicuani y Granja Kcayra. El mejor ajuste de la tendencia lineal es indicado por las líneas rojas. **Fuente:** Elaboración propia

1. Resultados similares fueron encontrados en un estudio de tendencias para el periodo 1965-2005 realizado por el SENAMHI (2007) en la misma cuenca
2. Este comportamiento de aparente disminución en la década reciente amerita estudios más detallados, dado que es coherente y consistente con lo encontrado in situ basado en entrevistas realizadas sobre percepción del clima del poblador en algunas localidades de la parte alta de la cuenca (Santo Tomás, Sicuani y Espinar). Las lluvias percibidas por la población tienen características de mayor intensidad, corto periodo de duración y además alternadas con periodos de sequedad o "veranillos", que en la escala mensual se reflejan con la disminución de lluvias en la década reciente

## 2.3 Escenarios de cambio climático

### 2.3.1 Modelos y escenarios de emisión

Para conocer los posibles impactos del cambio climático en la región andina es necesario tener información detallada de las proyecciones del clima futuro a una escala regional, y donde sea posible, a menor escala, con la finalidad de poder realizar los análisis de riesgos e implementar medidas de adaptación sectoriales.

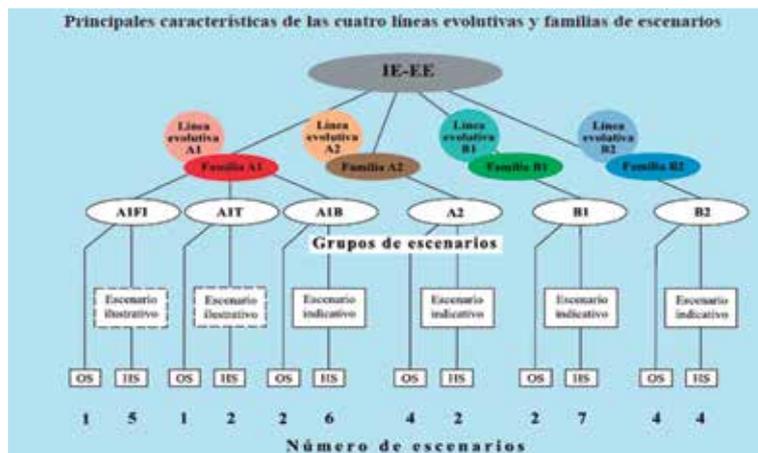
El IPCC distingue tres tipos de escenarios climáticos: escenarios incrementales o sintéticos, escenarios análogos y escenarios basados en los modelos climáticos globales (MCG), cada uno de ellos con ventajas y desventajas (TGICA-IPCC, 2007); sin embargo, son los escenarios basados en los modelos climáticos los que en la actualidad están experimentando un mayor desarrollo debido a que incorporan los forzamientos de las emisiones de GEI en el sistema climático.

Los modelos climáticos vienen a ser una representación numérica que explican la evolución del sistema climático<sup>3</sup> en el tiempo y se basan en ecuaciones fundamentales para simular sus características físicas, químicas y biológicas, pero además las interacciones y *feedbacks* de sus componentes, en una grilla geográfica global (IPCC, 2007a). Con el tiempo, estos modelos se han ido perfeccionando y complejizando, habiendo evolucionado en los últimos años hasta los modelos de circulación

general acoplados atmósfera/océano/hielo-marino (MCGAOA), que proporcionan una de las más completas representaciones del sistema climático actualmente disponibles.

Para la proyección del clima de largo plazo, los MCG requieren información de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y emisión de aerosoles futuros, información que es generada por modelos socio-económicos para explorar la posible evolución de las emisiones de GEI y aerosoles en el mundo. El marco general de estos escenarios de emisión lo proporciona el Informe Especial sobre los Escenarios de Emisión o IE-EE (SRES, por sus siglas en inglés) del IPCC (Nakicenovic *et al.*, 2000). Los escenarios de emisión constan de cuatro líneas evolutivas de emisión, con la etiqueta A1, A2, B1 y B2, que describen las relaciones entre las fuerzas motrices y las emisiones de GEI y aerosoles, y su evolución durante el siglo XXI en grandes regiones del mundo (Figura 2.3).

Cada línea histórica representa diferentes desarrollos demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales que divergen en formas cada vez más irreversibles (IPCC, 2007a). En suma, los escenarios de emisión se basan en pautas de desarrollo diferenciado de la sociedad humana en el futuro que podría influir en potenciales niveles de emisiones futuras; a su vez, dichos escenarios han sido utilizados para evaluar los posibles cambios en el clima a través del uso de los MCG.



**Figura 2.3** Estructura de las cuatro líneas evolutivas con sus respectivos conjuntos de familias de escenarios de emisión, según el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones, IE-EE (después de Nakicenovic *et al.*, 2000). **Fuente:** IPCC (2007a)

En el año 2010, el IPCC ha definido una nueva familia de escenarios, las Rutas de Concentraciones Representativas o Representative Concentration Pathways (RCP, por sus siglas en inglés (Moss *et al.*, 2010). Estos RCP comprenden de escenarios de mitigación y no-mitigación, y constituyen la base del nuevo trabajo de modelización que se está llevando a cabo para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

Los escenarios desarrollados en el PRAA para la cuenca del río Urubamba se basan en el escenario de emisión

A1B de la familia evolutiva A1 del IE-EE del IPCC, el cual describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, con tecnologías nuevas y más eficientes, y la convergencia entre las regiones. El escenario A1B adopta un equilibrio<sup>4</sup> entre todas las fuentes de energía (fósil y renovable) para el cambio tecnológico en el sistema energético (IPCC, 2007). Este escenario ha sido ampliamente utilizado en los últimos estudios regionales europeos de modelización del clima (Christensen *et al.*, 2011)<sup>5</sup>.

3. Sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales (atmósfera, hidrósfera, criósfera, superficie terrestre y biosfera) y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropogénicos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra (IPCC, 2007a)

4. El término "equilibrio" indica que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares

5. El escenario A1B refleja una trayectoria de emisiones medio-alto y conduce a una gama de incrementos de rango medio de la temperatura media global en comparación con los escenarios de emisión extremos A2 y B1; es decir, el cambio de la temperatura media global sería del orden de 3,4 °C para el año 2100 (IPCC, 2007a) en relación con los niveles preindustriales, o 2,8 °C para el 2080-2099 en comparación al periodo de referencia 1980-1999. Sin embargo, estas estimaciones centrales están delimitadas por un intervalo de incertidumbre de tamaño considerable. La mejor estimación de 2,8 °C (para 2090-2099, en relación a 1980-1999) se encuentra con un "probable" rango de 1,7 °C a 4,4 °C (según lo informado por el IPCC, 2007a)

### 2.3.2 Escenarios climáticos regionales: La necesidad del downscaling

Considerando que el cambio climático es global por naturaleza, el punto de partida para la evaluación de sus impactos son los MCG. Sin embargo, la evaluación de los impactos del cambio climático exige datos sobre el clima con una mayor resolución espacial de lo que pueden proporcionar los MCG, p. ej. para valorar los impactos económicos de eventos hidrometeorológicos extremos en el ámbito de una cuenca, se requiere información espacial más detallada. Si bien existen algunos enfoques para esta reducción de escala (downscaling), una de las técnicas más utilizada para obtener información más detallada es a través de la regionalización dinámica para lo cual es necesario forzar<sup>6</sup> al modelo climático regional (MCR) con un MCG. Los MCR de área limitada proveen información más realista de la topografía y la geografía y, por tanto, potencialmente las características de eventos de menor escala tales como eventos de precipitación extrema, tormentas de nieve, entre otros (Christensen *et al.*, 2007). Ambos tipos de modelos se basan en leyes y procesos físicos, pero los MCG representan descripciones de la atmósfera-oceano-hielo marino en una cuadrícula horizontal con una distancia típica entre los 150 km y 300 km (Meehl *et al.*, 2007), mientras que en los MCR la atmósfera es representada en una cuadrícula de mayor resolución (entre 20 km y 50 km).

Sin embargo, la modelización dinámica del clima regional requiere de intensivos recursos (computacionales y personal especializado) que no todos los países disponen, ante lo cual en años recientes algunos centros mundiales de investigación del clima han implementado técnicas para obtener mayor resolución de los MCG para periodos de tiempo definidos o "time-slice" (Cubash *et al.*, 1995; Bengtsson *et al.*, 1996; IPCC, 2001; Noda *et al.*, 2006). En comparación con los MCR, estos modelos globales de altísima resolución tienen la ventaja de poder evitar problemas con las condiciones de contorno, y además pueden incorporar las interacciones entre la escala global y escala regional en forma explícita (Mizuta *et al.*, 2006).

Otro método de regionalización es el llamado downscaling estadístico el cual se basa en la determinación de regresiones estadísticas entre las variables promedio de gran escala en la grilla del MCG y las observaciones puntuales. La desventaja de este método es que se asume que estas regresiones no cambiarán en el contexto del cambio climático.

### 2.3.3 Construcción de escenarios regionales en la cuenca del río Urubamba

#### 2.3.3.1 Evaluación de los modelos climáticos

Si bien los MCG han sido mejorados en los últimos años, aún existen deficiencias que es necesario diagnosticar, para lo cual resulta importante y necesario hacer una evaluación tan exhaustiva como sea posible antes de su utilización en la estimación de la evolución del clima futuro. Aunque la validación del clima futuro no es posible, siempre se puede aumentar la confianza en un determinado modelo cuando éste ha sido evaluado en determinados periodos instrumentales históricos, es decir, el clima observado versus el clima actual de los modelos. Los modelos climáticos serán fidedignos sólo en la medida en que sean capaces de proporcionar simulaciones realistas de las variables climáticas (ciclo diurno, ciclo anual, ciclo estacional, etc.) y de los patrones de circulación a gran escala. Un "skill" pobre en la simulación del clima actual indicará que ciertos procesos físicos o dinámicos del modelo son deficientes, y es, en teoría, un modelo potencialmente limitado para representar plausiblemente el clima futuro.

En el presente estudio la construcción de escenarios regionales se inicia con la evaluación de los MCG del AR4 del IPCC, para el periodo de referencia 1971-2000 (Tabla 2.1). De los veinticuatro modelos disponibles por el IPCC, por razones operacionales solamente pudieron ser evaluados ocho modelos, además del modelo japonés de alta resolución (Acuña *et al.*, 2011).

**Tabla 2.1** Outline de los MCGAOA del AR4 del IPCC

MCGAOA	Resolución horizontal (atmósfera)	País	Agencia
BCCR-BCM2.0, 2005	209 km x 209 km	Noruega	BCCR
CCSM3, 2005	154 km x 154 km	USA	NCAR
CGCM3 (T47), 2005	308 km x 308 km	Canadá	CCCMA
CSIRO-MK3.0, 2001	209 km x 209 km	Australia	CSIRO
ECHAM5-OM, 2005	209 km x 209 km	Alemania	MPLFM
GFDL-CM2.1, 2005	220 km x 275 km	USA	GDFL, NOAA
MIROC3.2, 2004	308 km x 308 km	Japón	CCSR/NIES/FRCGC
HadCM3, 2000	275 km x 413 km	Reino Unido	UKMO
*TL959L60 MRI/JMA, 2004	20 km x 20 km	Japón	MRI/JMA

\*: El modelo TL959L60 no forma parte del AR4 del IPCC

Fuente: Acuña, 2011

Marengo (2007) analizó cinco modelos del IPCC (TAR<sup>7</sup>) para Sudamérica y encontró que los modelos GFDL, CCCMA y CCSNIER tenían dificultades para simular la banda nubosa asociada a la ZCAS, mientras que el modelo HadCM3, no. Vera *et al.* (2006) evaluaron seis modelos acoplados del IPCC (AR4<sup>8</sup>) e identificaron características ya encontradas en los modelos del IPCC TAR. Bombardi

y Carvalho (2007) encontraron que la variabilidad del Monson Sudamericano es bien representada por el modelo MIROC, para el periodo 1981-2000. Un punto interesante, y que es documentado por varios autores (Grimm *et al.*, 2006; Guilyardi, 2009, entre otros) se refiere al hecho que los MCG acoplados tienen dificultad en representar adecuadamente los principales modos

6. Los MCR requieren condiciones de contorno de los MCG y están, por tanto, limitados por la capacidad de los MCG para simular de forma fiable la circulación a gran escala

7. Third Assessment Report – Tercer Informe de Evaluación

8. Fourth Assessment Report – Cuarto Informe de Evaluación

de variabilidad de baja frecuencia del sistema océano-atmósfera tales como las oscilaciones decadales y multi-decadales (Valverde y Marengo, 2010).

Si los escenarios futuros del clima, basados en los MCG, muestran cambios de la precipitación y temperatura del aire, esto se debe en gran medida a cambios de los patrones de circulación que modulan del clima regional, en consecuencia es importante hacer una evaluación objetiva de la dinámica de los modelos en el periodo de referencia o clima actual para un mejor entendimiento de los mecanismos físicos responsables de la generación de estas anomalías.

Presentamos de manera resumida los resultados de la evaluación de ocho modelos del IPCC AR4 realizado por el

SENAMHI (Acuña *et al.*, 2011), con la intención de mostrar la performance de estos MCG en la representación de los patrones de circulación de mesoescala, dado que cinco de ellos fueron utilizados para generar los escenarios regionales en la cuenca del río Urubamba. Se utilizó información de los *Reanalysis* NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) como referencia. El *Reanalysis* ERA-40 (Uppala *et al.*, 2005) fue utilizado a partir de los resultados de la evaluación anterior, para la validación de los modelos que representan mejor la circulación sudamericana en año El Niño, los que posteriormente fueron utilizados para la regionalización (Tabla 2.2). La métrica utilizada se basa en los estadísticos: raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y la correlación de anomalías asociado a un nivel de significancia de 0.05 (Acuña *et al.*, 2011).

**Tabla 2.2** Variables evaluadas de los MCG del AR4 del IPCC versus los *Reanalysis*

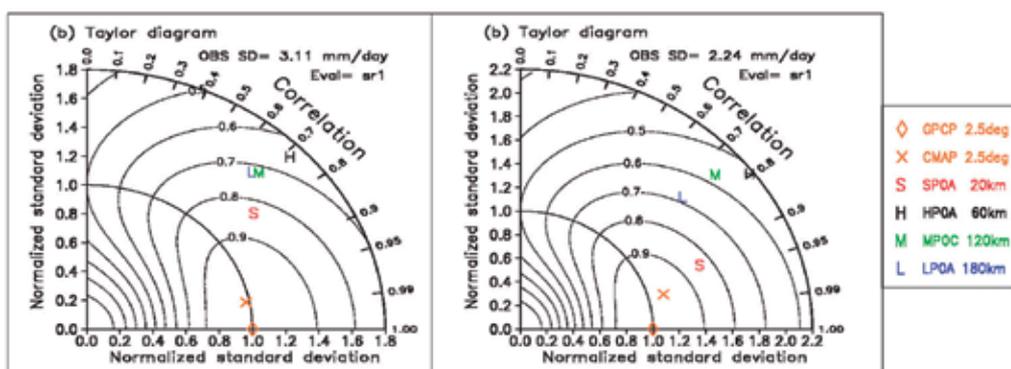
Variables/Modelos	BCCR-BCM2.0	CCCMA-CGCM3	CSIRO-MK3.0	GFDL-CM2.1	MPI-MECHAM5-OM	NCAR-CCSM3	NIES-MIROC3.2	TL959L60 JMA/MRI	UKMO HadCM2	Reanálisis NCEP	Reanálisis ERA40
Temperatura del aire ta (K)	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Altura geopotencial zg (m)	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Componente del viento zonal ua (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Componente del viento meridional va (m/s)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Humedad relativa Hur (%)	x		x	x	x	x	x		x	x	
Precipitación acumulada total pr (kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Presión a nivel del mar psl (Pa)	x	x	x	x	x	x	x		x		
Temperatura cerca de la superficie tas (K)	x	x	x	x	x	x	x		x		
Temperatura máxima (superficie) tasmax (K)	x		x				x	x			
Temperatura mínima (superficie) tasmin (K)	x		x				x	x			
Temperatura (Skin) ts (K)	x	x	x	x	x	x	x		x		

**Fuente:** Adaptado de Tabla 12 en Acuña *et al.*, 2011

De esta evaluación de MCG, se determinó que los modelos que representan mejor la estacionalidad del APS son ECHAM5 y CCSM3 (bias +/-1 hPa), mientras que casi todos los modelos tienen limitaciones en la representación de la magnitud del AAS (bias +/-9 hPa). En cuanto a la estacionalidad de la ZCIT, los modelos BCM2, MK3.0, CM2.1, MIROC3.2 y HadCM3 representan mejor este sistema sobre continente y Atlántico en verano; mientras que sobre el Pacífico, este sistema es mejor representado solo por los modelos MIROC3.2 y HadCM3. En verano, la AB (Lenters y Cook, 1997) es bien representada por los modelos CGCM3, ECCHAM5, CCSM3 y HadCM3, en su posición y configuración. En general, los modelos presentan bien los campos de temperatura del aire, altura geopotencial en 200 hPa

y la TSM (anomalías de correlaciones bajas y menores RMSE), siendo los mejores modelos el HadCM3, ECHAM5 y CCSM3.

Adicionalmente se ha evaluado la performance del modelo atmosférico global japonés de alta resolución (20 km) a través del Diagrama de Taylor<sup>9</sup> (Taylor, 2001) para la variable precipitación y los estadísticos utilizados fueron coeficiente de correlación y la desviación estándar normalizada (Avalos *et al.*, 2011). [En este informe se muestra sólo el periodo lluvioso DEF y periodo seco JJA]. Con la intención de conocer el efecto de la resolución en la simulación de las lluvias, se incluyó además otros modelos globales de baja resolución del MRI/JMA (Figura 2.4).

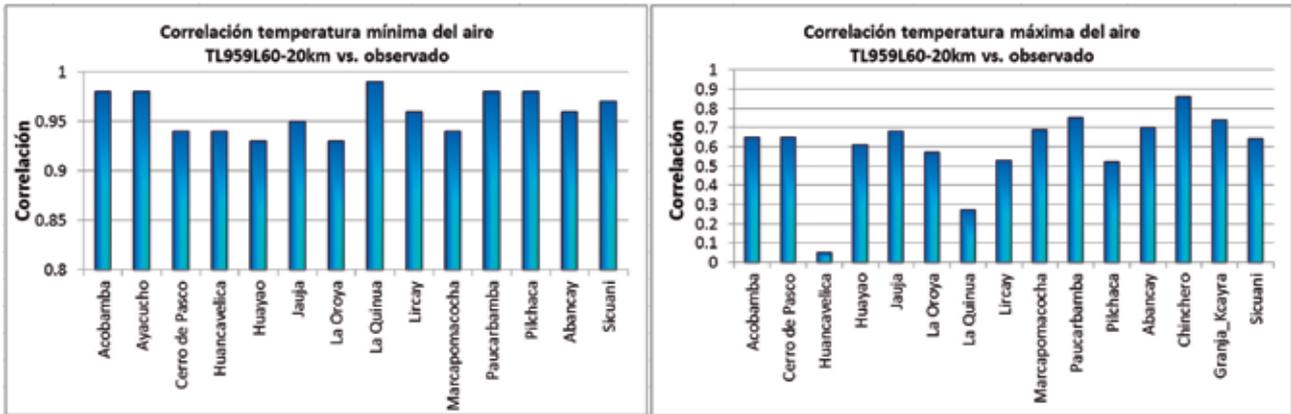


**Figura 2.4** Diagramas de Taylor para el territorio nacional durante el periodo lluvioso DEF (izquierda) y periodo seco JJA (derecha), considerando versiones del modelo japonés en diferentes resoluciones. **Leyenda:** GPCP: Global Precipitation Climatology Project (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wmo/wdcamet-ncdc.html>); CMAP: Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation (<ftp://ftp.prd.ncep.noaa.gov/pub/precip/cmap>); SPOA (time-slice 20 km), HPOA (times-slice 60 km), MPOC (mediano plazo 120 km), LPOA (largo plazo 180 km)

9. El Diagrama de Taylor tiene la particularidad de agrupar en un solo gráfico varios estadísticos

Por las características del Diagrama de Taylor, puede decirse que el modelo que presenta mejores estadísticos comparativos y en ambos periodos, es el de mayor resolución SPOA-20 km (TL959L60). Finalmente, en

la Figura 2.5 se muestra las correlaciones de las temperaturas extremas simuladas por el mismo modelo de alta resolución en diferentes puntos de la región centro-sur andina del Perú.



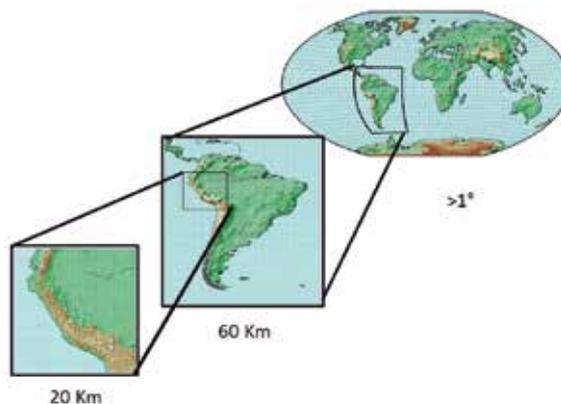
**Figura 2.5** Correlaciones entre la temperatura máxima (izquierda) y temperatura mínima (derecha) observada versus modelo japonés de alta resolución TL959L60 MRI/JMA en diferentes localidades de la región andina centro-sur del Perú. **Fuente:** Elaboración propia

### 2.3.3.2 Downscaling dinámico

Ya se había mencionado que los MCG por su baja resolución horizontal (entre 100-300 km) sólo pueden dar aproximaciones de cómo los cambios pueden manifestarse a gran escala. Sin embargo, para conocer cuáles serían los impactos del cambio climático a nivel regional y local, se debe tener acceso a información más detallada. Una forma de hacerlo es mediante el aumento de la resolución espacial de los MCG en el área de interés. La mayor resolución espacial proporciona una representación más realista de las características regionales como la topografía, vegetación y los procesos atmosféricos de pequeña escala. Por lo tanto, un modelo climático regional debe ser más eficiente en la representación del clima de un país que un modelo global.

La técnica del downscaling o regionalización dinámica impone forzar al modelo regional de área limitada con un modelo global, es decir, el modelo regional requiere de las condiciones de contorno del modelo global para iniciar la integración de largo plazo en una determinada

región (Figura 2.6). Para fines de este proyecto, se hicieron los arreglos necesarios para generar el conjunto de condiciones de contorno del modelo global ECHAM5-OM de quinta generación desarrollado por el Instituto de Meteorología Max Planck de Alemania, para la ejecución del modelo regional WRF (Weather Research and Forecast) versión 3.2 para dos time-slice: 1971-2000 (clima actual o periodo de control) y 2016-2044 (futuro cercano) con promedios centrados al 2030 (Hulme y Lu, 2000). El modelo WRF<sup>10</sup> es, junto con el modelo Eta-SENAMHI, un modelo para pronóstico del tiempo operacional, y fue implementado en el SENAMHI en el 2008, presentando una buena performance en la predicción de lluvias, así como resultados satisfactorios en el análisis sinóptico de escala diaria<sup>11</sup>. En el 2010 se implementó la versión 3.2 para la proyección del clima de largo plazo, y después de realizar algunas modificaciones que permitieran que el CO<sub>2</sub> varíe de acuerdo al modelo global de referencia, se realizaron las simulaciones del clima en dos dominios: Dominio 1 (Sudamérica con 60 km de resolución espacial) y Dominio 2 (Perú con 20 km de resolución espacial).



**Figura 2.6** El modelo climático regional (WRF3.2) de alta resolución esta "anidado" al modelo climático global ECHAM5-OM, utilizando las condiciones de contorno de este modelo. **Fuente:** Senamhi/CPN (Saavedra M.)

10. El Modelo Regional WRF es un modelo de mesoescala no hidrostático, aplicado tanto en pronóstico operativo como en investigación, presenta 18 niveles verticales en la estructura vertical de la atmósfera, fue construido por esfuerzo conjunto de la National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA). En [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/users\\_guide\\_chap5.htm](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/users_guide_chap5.htm)

11. El WRF fue sometido a la validación de sus esquemas de convección con los Reanalysis NCEP/NCAR para determinar la mejor parametrización de las lluvias (Acuña et al., 2011)

La configuración se detalla en la Tabla 2.3 (Acuña, *et al.*, 2011)

**Tabla 2.3** Outline del modelo WRF

Cúmulos	Microfísica	Superficie del suelo	Capa límite Planetaria	Capa de superficie	Onda larga	Onda corta
Grell-Devenvyi	WSM 3-class scheme	Pleim-Xiu LandSurface Model (EPA)	Asymmetrical Convective model Version 2 (ACM2) PBL (Pleim and Chang)	Pleim-Xiu Surfacerlayer	RRTM	MM5 (Dudhia)

**Fuente:** Acuña, 2011

El primer time-slice considera inherente la evolución observada del contenido global de CO<sub>2</sub> y de aerosoles sulfato, y el segundo time-slice considera la evolución correspondiente a los escenarios de emisiones antropogénicas en el contexto del escenario de emisión A1B del IE-EE del IPCC (Nakicenovic y Swart, 2000).

### 2.3.3.3 Downscaling estadístico

El downscaling o regionalización estadística se basa en que el clima regional es condicionado por dos factores: el estado del clima a gran escala y características fisiográficas locales (p. ej. distribución mar-tierra, uso del suelo, tipo de vegetación, entre otros). Desde esta perspectiva la información del clima actual local o regional se deriva de la relación estadística entre las variables de gran escala o predictores, con las variables locales de superficie o predictandos (Wilby *et al.*, 2004). En este contexto, los escenarios futuros del clima local se construyen aplicando esas relaciones a los campos de gran escala generados por los MCG's (Goodes *et al.*, 2007).

Todos los esquemas de regionalización estadística se basan en relaciones empíricas entre predictores y predictandos, solo que estos métodos difieren en la

forma de calcular la función matemática de transferencia y en el proceso de ajuste estadístico. En el presente estudio, la técnica de downscaling estadístico se basa en las relaciones empíricas espaciales entre la TSM del Pacífico Ecuatorial Central (predictor) y las variables de precipitación y temperatura extremas del aire en seis puntos de la cuenca del Urubamba (predictandos). Las funciones de transferencia fueron calculadas a partir de técnicas estadísticas multivariadas como el Análisis de Correlación Canónica (CCA, siglas en inglés) y el Análisis de Componentes Principales (PCA, siglas en inglés), para lo cual se hizo uso del Climate Predictability Tool (CPT), herramienta estadística desarrollada por el International Research Institute for Climate and Society – IRI<sup>12</sup> de los Estados Unidos (CCA-UNAM, 2008).

La información de TSM proviene de tres mejores MCG acoplados HadCM3 (Reino Unido), ECHAM5-OM (Alemania) y CCSM3 (Estados Unidos), modelos que fueron evaluados previamente (ver sección 2.3.3.1). Se estimaron las proyecciones y cambios de la precipitación y temperatura para la media centrada en el 2030 (a partir del periodo 2016-2044) relativo al periodo de referencia 1971-2000, en aquellas estaciones representativas de la cuenca con series históricas extensas (1965-2010). Ver Tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Urubamba con series históricas extensas (1965-2010)

Estación	Longitud (°W)	Latitud (°S)	Altitud (msnm)	Provincia
Cay-Cay	71°42'	13°36'	3150	Quispicanchis
Ccatca	71°33'	13°36'	3729	Quispicanchis
Granja Kcayra	71°52'	13°33'	3219	Cusco
Pisac	71°20'	13°24'	2950	Calca
Sicuani	71°14'	14°15'	3574	Canchis
Urubamba	72°07'	13°18'	2863	Urubamba

**Fuente:** Elaboración propia

Como en todo método estadístico empírico, la obtención de proyecciones climáticas futuras conlleva a la "aceptación" de que el modelo paramétrico ajustado tenga validez bajo condiciones futuras de cambio climático (Brunet *et al.*, 2009); es decir, que las relaciones entre las variables de gran escala y las variables locales en el clima actual se mantendrían en el futuro; pero además subyace el problema del "overfitting" o sobre-ajuste en algunas de las relaciones empíricas. Por otro lado, la técnica de la regionalización dinámica a través de los modelos regionales añaden fuentes de incertidumbre adicionales a los AOGCM con los que son forzados (p. ej. condiciones iniciales y de frontera, parametrizaciones en la subgrilla, etc.), y algunas incertidumbres específicas propias de la simulación a escala regional como: La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución

espacio-temporal de aerosoles que tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del forzamiento y la respuesta local (Brunet *et al.*, 2009).

### 2.3.4 Construcción de escenarios climáticos locales

En la actualidad es usual considerar, en la medida de lo posible, una amplia gama de modelos de simulación conocida como conjuntos o ensambles, para obtener información sobre las incertidumbres del clima. Trabajar con el mayor abanico de posibilidades permitirá una mejor cuantificación de la incertidumbre.

El proyecto PRAA ha utilizado una combinación de MCG y MCR, para lo cual se ha hecho una selección de los

12. (<http://iri.columbia.edu>)

modelos del IPCC (Ver sección 2.3.1), implementándose técnicas de regionalización dinámica y estadística, en el escenario de emisión A1B. Las proyecciones del clima futuro disponibles en la cuenca se basan en la media de dos modelos dinámicos de 20 km de resolución espacial, y en algunos puntos de la cuenca, éstos han sido complementados con los resultados de tres experimentos de downscaling estadístico (zonas de menor incertidumbre). Los cambios promedios anuales y estacionales en la precipitación y temperaturas del aire son expresados en términos porcentuales (%) y en grados (°C) respectivamente, en relación al periodo de referencia 1971-2000.

Los resultados son mapeados mediante una adecuada combinación de métodos de regresión múltiple y geoestadísticos con soporte del Sistema de Información Geográfica lográndose obtener mapas de alta resolución espacial (100 m) para el caso de escenarios de temperaturas máximas y mínimas del aire. Para el caso de los mapas de escenarios de precipitación, éstos se han trazado considerando el relieve, sin embargo subyace la incertidumbre sobre el probable cambio de la circulación local en el futuro, por lo que estos mapas son "referenciales", siendo su resolución espacial menor en relación a la temperatura. En cuanto a los cambios, éstos fueron interpolados espacialmente con el método de splines, debido a que a diferencia del método de inversa a la distancia y Kriging, no genera ruido en la interpolación (aparición de núcleos ficticios), más bien suaviza el trazado.

### 2.3.5 Proyecciones de temperatura del aire y precipitación al año 2030

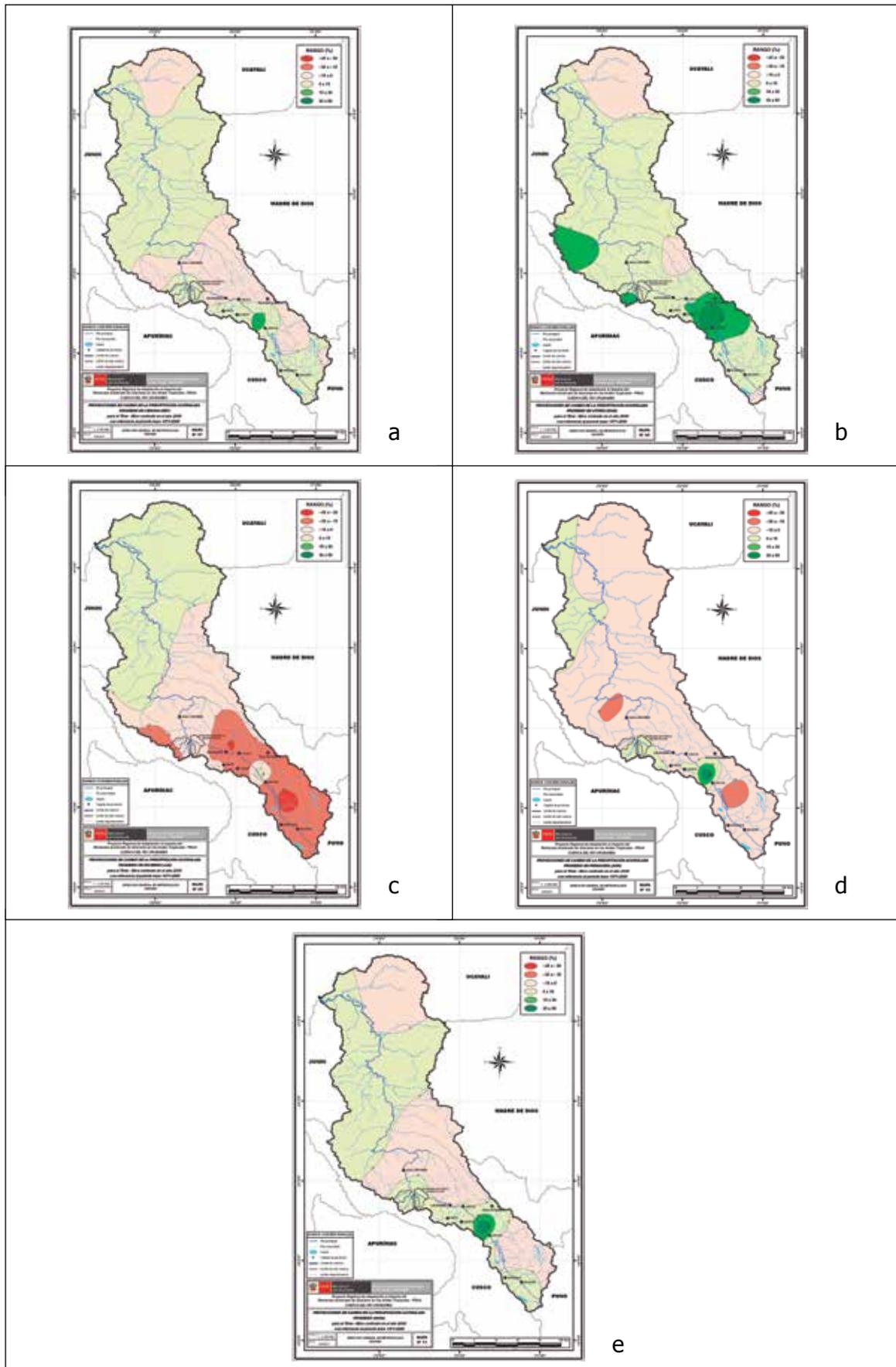
En esta sección se presenta los resultados de los cambios estacionales y anuales de la precipitación y las temperaturas máxima y mínima del aire en la cuenca del río Urubamba, proyectados para el time-slice 2020-2039 con promedios centrados en el año 2030, con referencia al periodo 1971-2000. Los escenarios se basan en dos modelos climáticos de escala regional (20 km de resolución horizontal), para el escenario de emisión A1B. Estos resultados se complementan con los tres experimentos de reducción de escala regional por el método estadístico para el mismo escenario de emisión en cinco puntos de la cuenca. Éstos se utilizaron para ilustrar los puntos clave en una mayor resolución espacial y para evaluar la incertidumbre.

#### 2.3.5.1 Proyecciones de la precipitación

En general, la precipitación es una variable no muy bien simulada como la temperatura debido a que involucra procesos locales complejos, en consecuencia, las proyecciones de la precipitación son menos robustas que las de la temperatura (Christensen *et al.*, 2011). En este contexto, la información proveniente de los modelos climáticos regionales, potencialmente deberían proveer información con más detalle espacial del comportamiento local de esta variable; sin embargo, la geodiversidad de la región andina es un factor limitante para dicho propósito, por lo que los resultados que a continuación se presentan deben ser tomados en el marco de estas consideraciones.

La discusión se restringe al cambio relativo promedio de la precipitación estacional y anual para el año 2030, expresado en términos porcentuales (%). Se ha considerado que los cambios dentro del rango  $\pm 15\%$  están dentro de la variabilidad de la precipitación en la región andina tropical (SENAMHI, 2011). La escala de tonalidad verde indica incrementos, mientras que la escala en naranja indica reducciones.

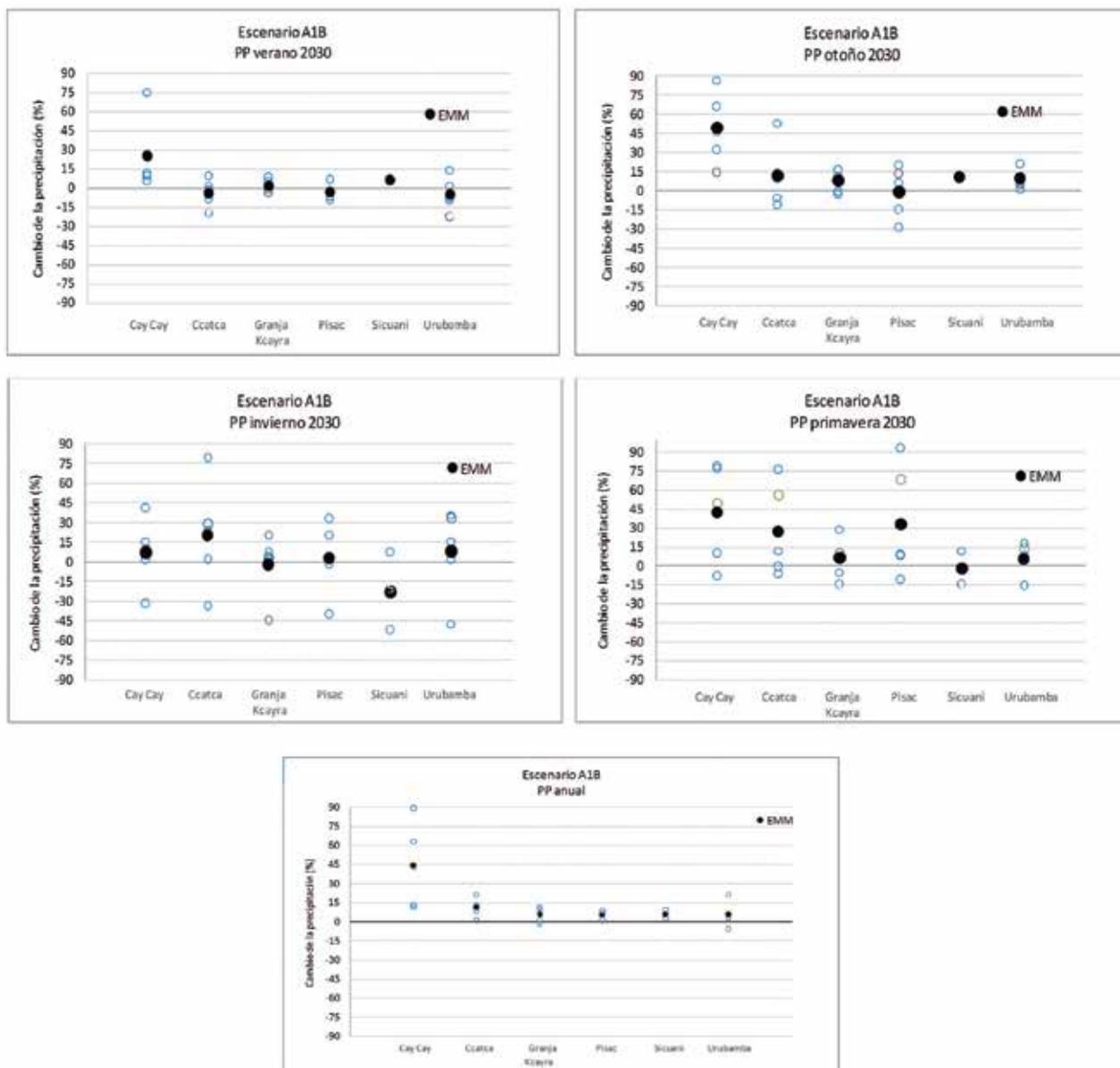
La Figura 2.7 resume el cambio estacional y anual de la precipitación en la cuenca del río Urubamba. No se observa un patrón definido de aumento o reducción en la escala interestacional, lo que indica la relativamente baja robustez de las proyecciones de esta variable; sin embargo, se advierte que los mayores cambios se presentarían principalmente en la parte media y alta de la cuenca. Entre el verano y otoño (de diciembre a mayo) los incrementos serían del orden de  $+15\%$  a  $+30\%$  en las proximidades de las localidades de Cay-Cay, Urcos y Paucartambo; mientras que en invierno (de junio a agosto) se destaca el predominio de zonas con reducción de la precipitación de hasta un  $-30\%$  en la parte alta de la cuenca y, aunque estas reducciones puedan no ser significativas en esta temporada del año por las reducidas cantidades de precipitación (en términos absolutos), es posible que si afecte al proceso de recarga estacional de los glaciares. Para primavera (de setiembre a noviembre) el patrón de reducciones se restringe sólo al extremo sur de la cuenca con  $-15\%$ . Finalmente, los cambios de la precipitación anual media dan cuenta de incrementos y reducciones moderados de las lluvias en la cuenca, excepto en las proximidades de la localidad de Cay-Cay donde el patrón de incremento es más definido y es del orden de hasta  $+30\%$ , de acuerdo a la media de los cinco modelos (ensamble multimodelo).



**Figura 2.7** Cambios relativos de la precipitación (%) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano, (b) Otoño, (c) Invierno, (d) Primavera y (e) Anual. **Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 2.8, se observa el cambio medio de la precipitación anual y estacional en algunos puntos de la cuenca, expresado en porcentajes (%). Debe entenderse que la capacidad de cada modelo de representar bien algunas características del clima actual está en función

de las metodologías y de sus características internas o estado de desarrollo, de modo que es esperable que las respectivas simulaciones de un clima modificado por una nueva composición de la atmósfera difieran, tal como puede verse en la Figura 2.8.



**Figura 2.8** Cambios relativos de la precipitación anual (%) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030, en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. Se muestra el ensamble multimodelo (EMM) (círculos cerrados) y los rangos de variación máximo y mínimo (círculos abiertos). **Fuente:** Elaboración propia

### 2.3.5.2 Proyecciones de temperaturas del aire

A diferencia de las precipitaciones, los patrones de cambio de las temperaturas extremas del aire anuales son más claros, homogéneos y progresivos; es decir, los resultados muestran un patrón de calentamiento en toda la cuenca de alrededor 0,8 °C (temperatura máxima) y 1 °C (temperatura mínima) en promedio, en relación al periodo de referencia 1971-2000.

Estacionalmente, se mantiene el patrón anual aunque no todas las regiones de la cuenca experimentarían el

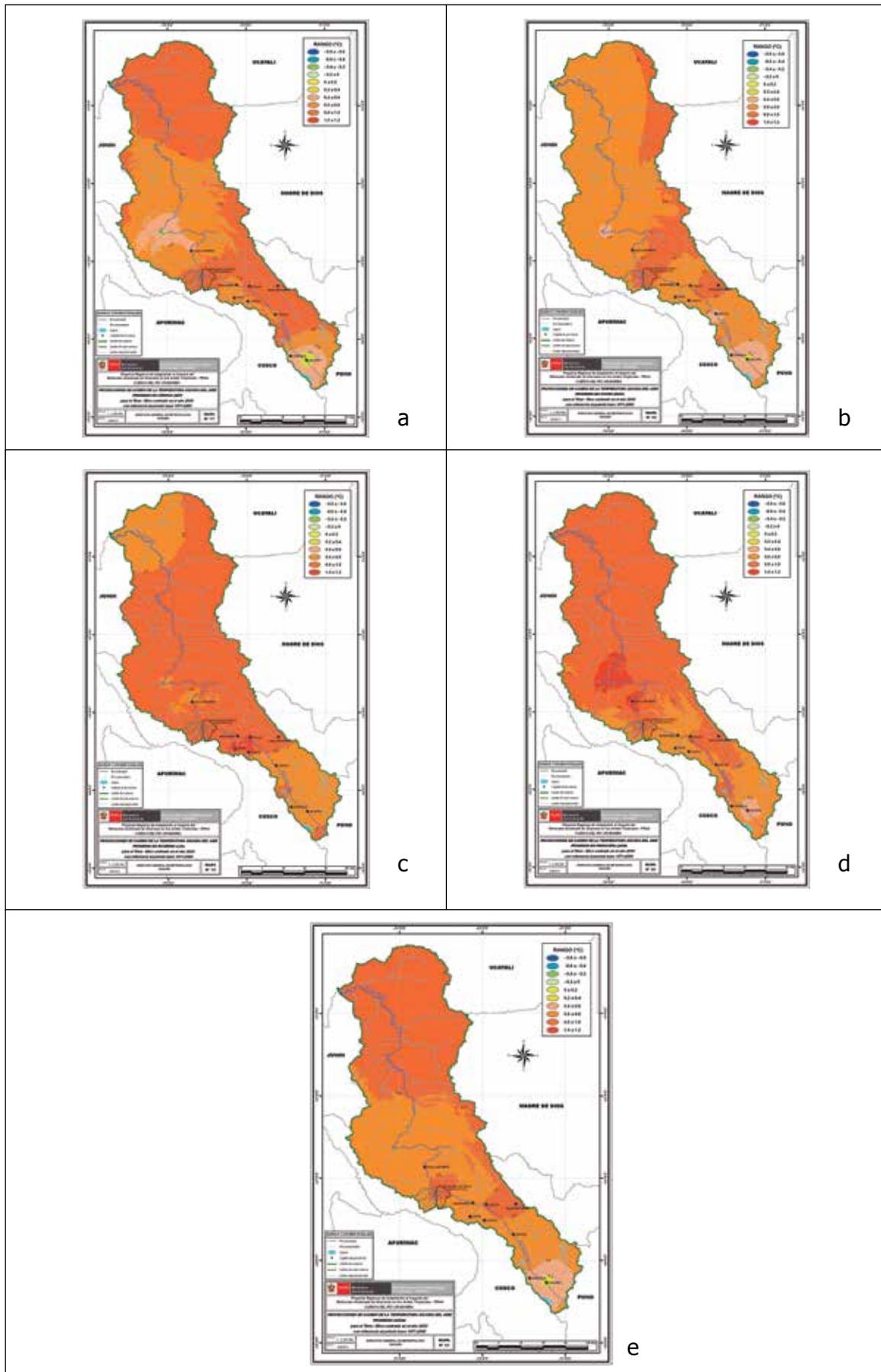
mismo grado de calentamiento. Para la temperatura máxima (Figura 2.9), el cambio sería más notable (~1 °C) en invierno (de junio a agosto) en la región andina de la cuenca, y en primavera (de setiembre a noviembre) en la franja transicional andino-amazónica, mientras que el resto de la cuenca experimentarían incrementos entre 0,6 a 0,8 °C. Entre verano (de diciembre a febrero) y otoño (de marzo a mayo), en general la cuenca experimentarían un calentamiento del orden de 0,6 a 0,8 °C excepto en la parte altoandina (Sicuani) donde los cambios serían sólo del orden de 0,4 °C. En cuanto a la temperatura mínima (Figura 2.10), un mayor incremento se daría en verano,

otoño y primavera, principalmente en la región andina de la cuenca, del orden de 1 °C; excepto en la parte alta (Sicuani) donde el cambio sería (0,8 °C).

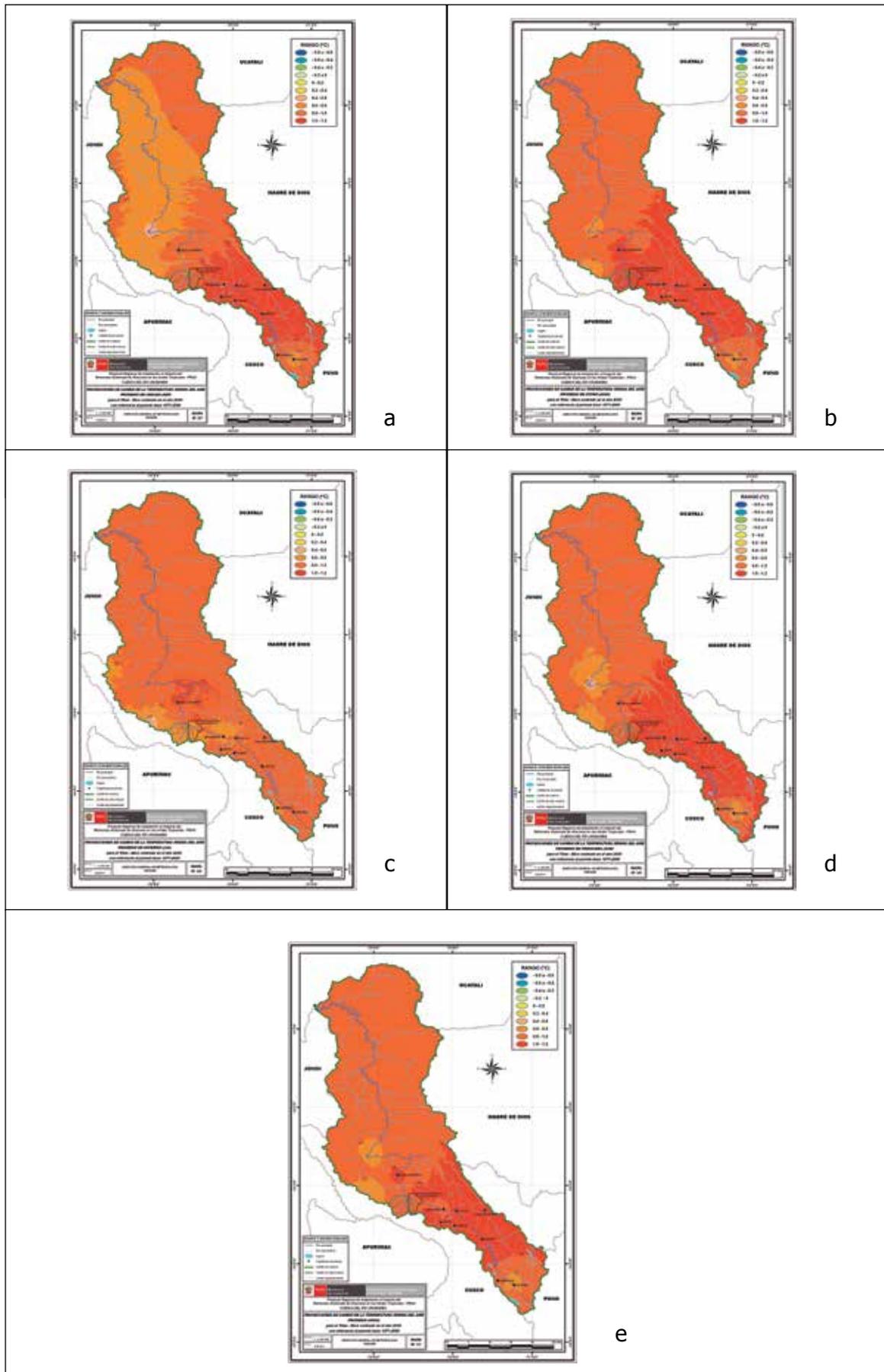
En toda la cuenca, la temperatura mínima tiende a incrementarse algo más que la temperatura máxima aproximadamente entre 0,2 y 0,4 °C más. Puede especularse entonces que hacia el 2030 el rango térmico (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) se acorte, dicho escenario sería más suave en invierno y más acusada en verano, principalmente en zonas altoandinas de la cuenca.

En las Figuras 2.11 y 2.12 se observa el sesgo de los modelos climáticos proyectando cambios de aproximadamente +1 °C, tanto en la temperatura máxima como en la mínima, en las estaciones de Ccatcca, Granja Kcayra Sicuani y Urubamba. En cuanto a la temperatura máxima anual, los modelos regionalizados estadísticamente proyectan cambios moderados del

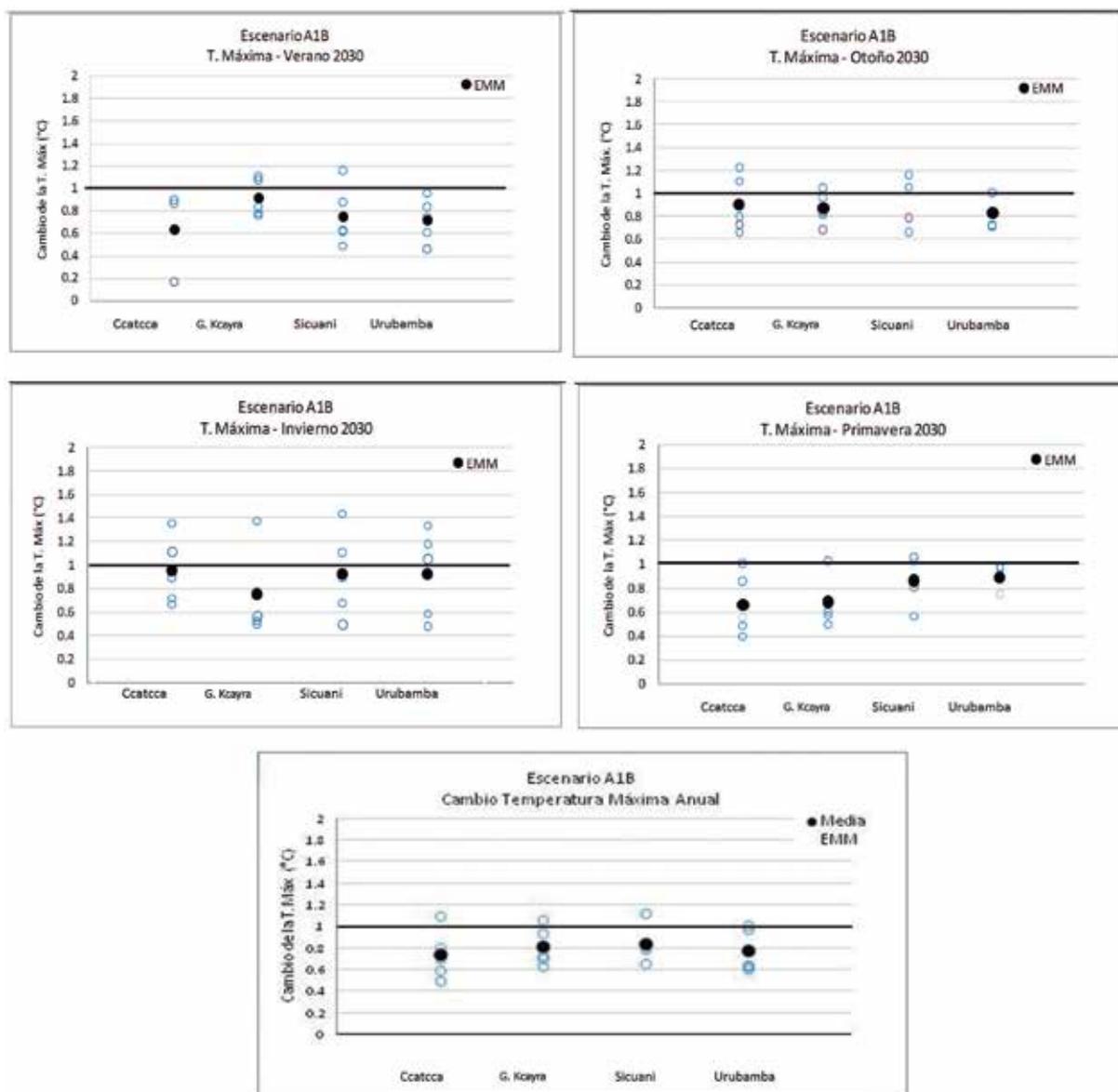
orden de +0,5 a +0,8 °C, mientras que los modelos dinámicos proyectan mayores cambios incluso por encima de 1 °C. Estacionalmente este patrón de calentamiento se mantiene, sin embargo, en invierno los cambios serían de mayor magnitud (cerca de 1 °C), temporada donde además, los modelos presentan una mayor discrepancia en los rangos de cambios proyectados. En cuanto a los cambios de la temperatura mínima anual, éstos son del orden de +1 °C, siendo mayores respecto a la temperatura máxima. Es notable la discrepancia de modelos principalmente entre el otoño e invierno en la estación Sicuani (parte alta de la cuenca), mientras las proyecciones estadísticas proyectan cambios bastante discretos (+0,2), los modelos dinámicos proyectan cambios entre +1 °C y +1,2 °C, evidentemente las proyecciones estadísticas están influenciados por la señal de la tendencia histórica observada en los últimos 45 años, la cual indica que la estación de Sicuani viene presentando tendencias negativas entre otoño e invierno.



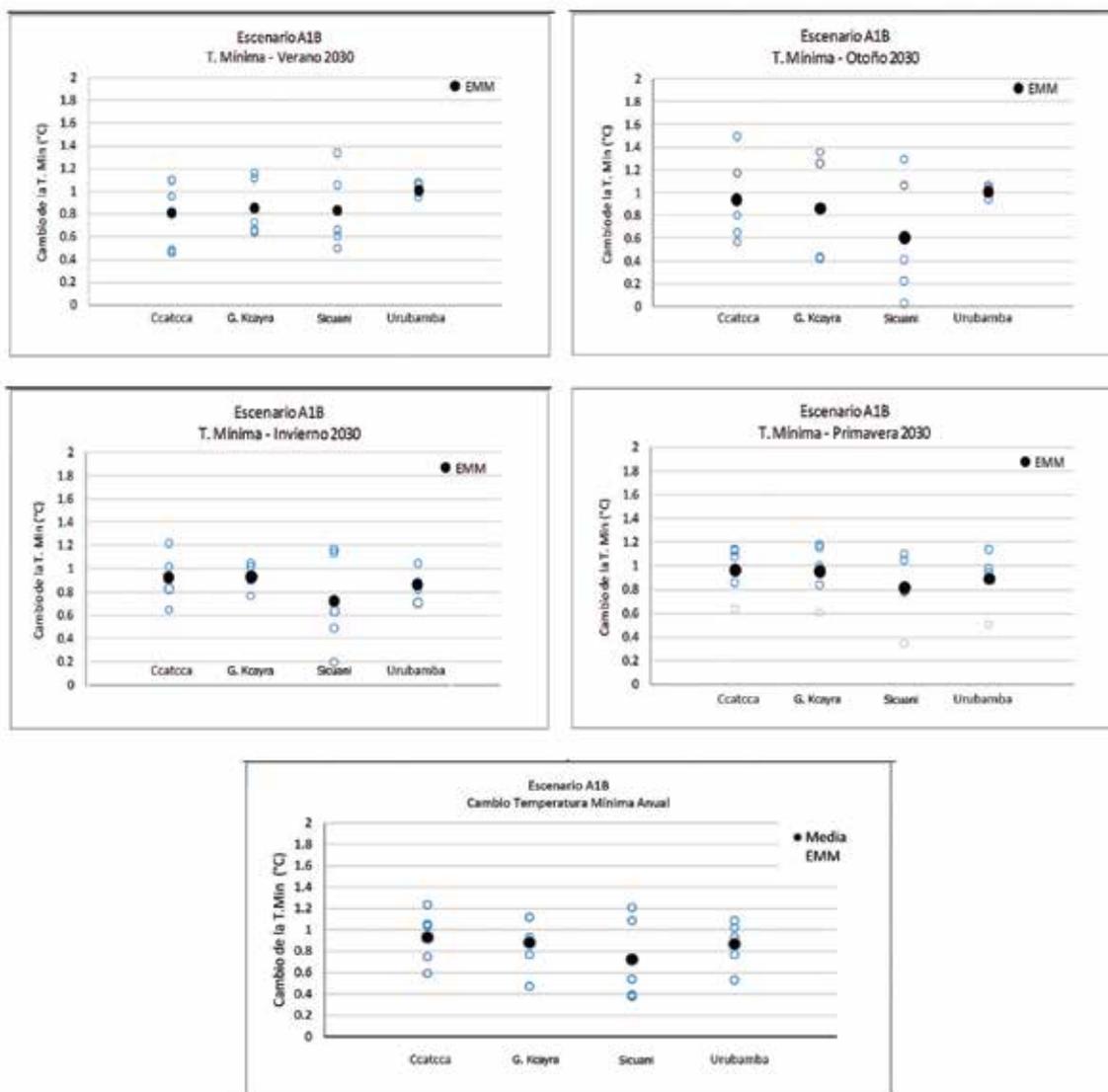
**Figura 2.9** Cambios de la temperatura máxima (°C) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano; (b) Otoño; (c) Invierno; (d) Primavera y (e) Anual. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.10** Cambios de la temperatura mínima (°C) en la cuenca del río Urubamba proyectados para el año 2030 en relación al periodo 1971-2000, para el escenario de emisión A1B. (a) Verano; (b) Otoño; (c) Invierno; (d) Primavera y (e) Anual. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.11** Cambios estimados de la temperatura máxima anual y estacional centrados al 2030 relativo al periodo 1971-2000, de los modelos regionalizados CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y ECHAM5/WRF y el modelo global de alta resolución TL959L60. El círculo negro indica el cambio promedio del ensamble multimodelo (EMM). **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 2.12** Cambios estimados de la temperatura mínima anual y estacional centrados al 2030 relativo al periodo 1971-2000, de los modelos regionalizados CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y ECHAM5/WRF y el modelo global de alta resolución TL959L60. El círculo negro indica el cambio promedio del ensamble multimodelo (EMM). **Fuente:** Elaboración propia

### 2.3.6 La incertidumbre: Preparándonos para un futuro incierto

Los escenarios de cambio climático son herramientas para evaluar el futuro comportamiento del clima, sistema que es inherentemente complejo e impredecible, aun insuficientemente entendido y con un alto grado de incertidumbre. Estas incertidumbres pueden representar serias dificultades para la toma de decisiones, sin embargo, el reto de los profesionales de la adaptación consiste en manejar la incertidumbre, no tanto en superarla (Kropp y Schoize, 2011).

Las fuentes de "incertidumbre asociadas" son principalmente debido: a. *evolución de las emisiones de GEI y aerosoles*; es decir, cada escenario de emisión tiene diferente composición atmosférica e implica diferente forzamiento radiativo; b. *estructura interna del modelo* o grado de complejidad para simular el clima futuro, y c. *interacciones internas del sistema climático*, debido

a su dinámica no-lineal. El IPCC (2007) recomienda representar la incertidumbre cuantitativamente mediante intervalo de valores calculados por diferentes modelos, diferentes escenarios de emisión, diferentes técnicas de regionalización o diferentes miembros "ensamble". El reconocimiento de la existencia de las incertidumbres en las proyecciones climáticas no elimina su utilidad. La incertidumbre no es lo mismo que ignorancia, y es un reto para los tomadores de decisión aprender a administrar la información para administrar el aprendizaje (Kropp y Schoize, 2011).

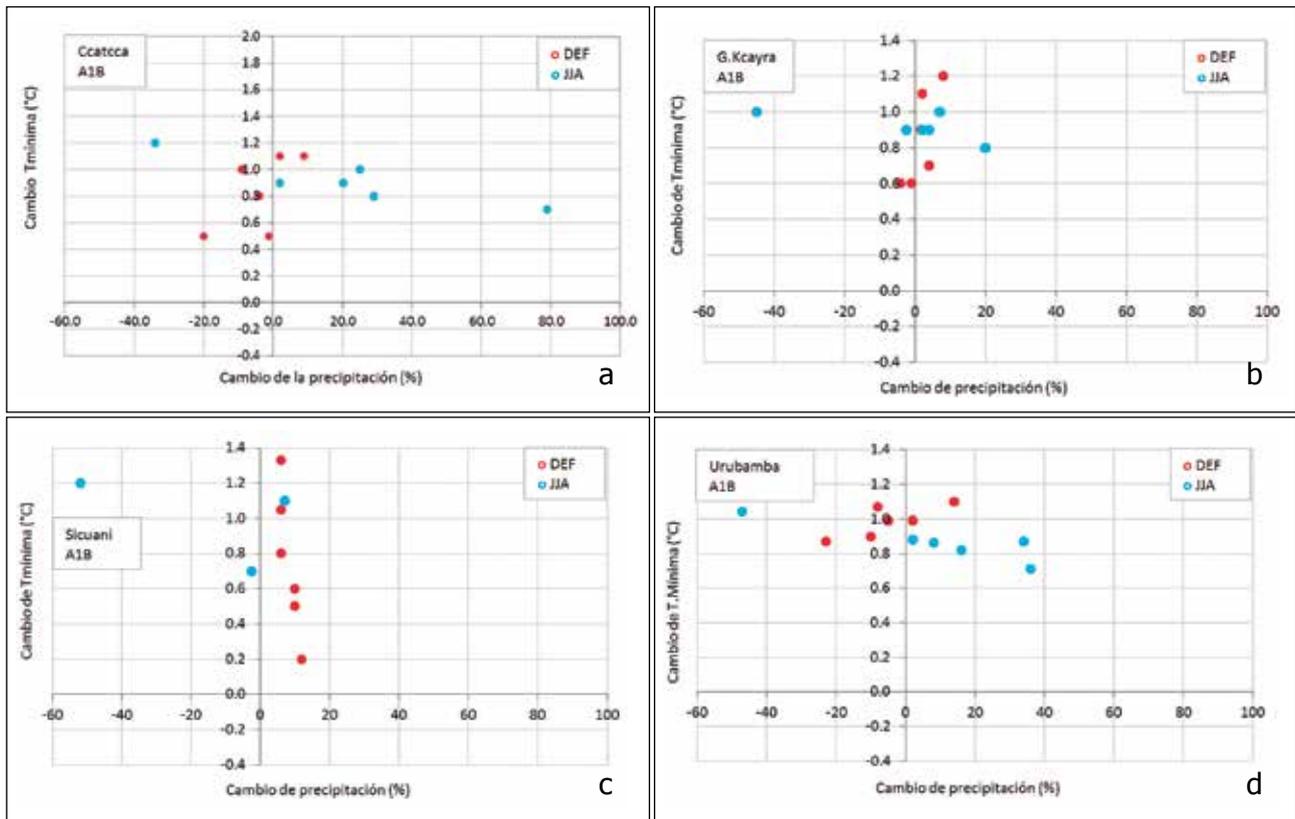
Como se observó en la sección anterior, existen importantes diferencias en los resultados de las proyecciones de precipitación y temperaturas del aire por los diferentes modelos o técnicas utilizadas. A nivel de la cuenca, la señal de cambio es más robusta<sup>13</sup> en el caso de la temperatura (aumento), no obstante que los rangos pueden diferir. En el caso de la precipitación la incertidumbre es mayor, principalmente entre invierno y

13. La mayor robustez que se alude a la temperatura, se basa en el hecho de que independientemente del modelo global y de la técnica de regionalización, la dirección de cambio de esta variable (aumento) se mantiene. No siendo lo mismo para la precipitación donde el rango de cambio es afectado parcialmente por la técnica de regionalización

primavera donde el signo de cambio es bastante incierto (de -45 % a +75 %).

Además de conocer la incertidumbre asociada con estos parámetros por separado, también es útil tener en cuenta la incertidumbre cuando se combinan, porque esto nos conduce a una mayor gama de escenarios futuros. En la Figura 2.13 se presenta los cambios promedio proyectados para el año 2030 en cuatro localidades de la cuenca del Urubamba por cinco diferentes modelos regionalizados, para el verano (de diciembre a febrero [DEF]) e invierno (de junio a agosto [JJA]). Cada punto representa diferentes proyecciones de los modelos y el promedio de éstas para un mismo escenario de emisión, para la temperatura<sup>14</sup> (eje vertical) y la precipitación (eje

horizontal). Esta figura muestra que la incertidumbre local tanto en dirección como en la magnitud del cambio es muy grande, particularmente para la precipitación en invierno, p. ej. en localidades como Ccatcca y Urubamba, en donde algunos modelos proyectan un incremento más allá de su variabilidad (+/-15 %), otros dentro de esa variabilidad y sólo uno de ellos proyecta un escenario de reducción de lluvias de más del 20 %. Si bien es cierto el potencial de cambio de la precipitación es de mayor magnitud en invierno en los cuatro puntos analizados, incluso en Granja Kcayra y Sicuani, en el verano los cambios proyectados estarían dentro de sus patrones normales en Granja Kcayra y Sicuani y de normal a inferior en Urubamba y Ccatcca.



**Figura 2.13** Cambios proyectados para cuatro localidades de la cuenca del río Urubamba en temperatura mínima (°C, eje vertical) y precipitación (%), eje horizontal) para el time-slice centrado en el año 2030 respecto al periodo de referencia 1971-2000 en el escenario de emisión A1B, para verano (de diciembre a febrero, en rojo) e invierno (de junio a agosto, en azul). **Fuente:** Elaboración propia

Para una mejor ilustración del tamaño del potencial de cambio de la precipitación en invierno, el ensamble medio de los modelos para la estación Cay-Cay y Ccatcca es de +20 mm; sin embargo, el rango es de -45 % a +70 %, aun considerando el promedio de las proyecciones, siempre la señal de cambio será incierto.

El análisis de incertidumbre en estas localidades de la cuenca nos indica, en general, dos tipos de escenarios: en verano o temporada de máximas lluvias, el escenario predominante sería *cálido/seco* en Ccatcca y Urubamba y *cálido/lluvia normal* en Sicuani y Granja Kcayra; mientras que en invierno los escenarios serían *cálido/húmedo* en Ccatcca y Urubamba y escenario *cálido/lluvia normal* en Sicuani y Granja Kcayra.

Finalmente, es importante tomar en cuenta el hecho de que las incertidumbres difieren en relación al espacio

(regiones de mayor o menor predictabilidad) y a las variables climáticas (cambios de la temperatura son más robustos que la precipitación). Comparar los modelos es una de las maneras de manejar este tipo de incertidumbres y constituye una buena base para la evaluación del riesgo. Es importante que los tomadores de decisión aprendan a tomar decisiones en el marco de un escenario incierto.

### 2.3.7 Recomendaciones sobre el uso de los escenarios climáticos

La ciencia no ofrece pronósticos exactos del futuro clima y nunca podrá hacerlo. Los modelos continúan teniendo limitaciones significativas, tales como en la representación que se hace de las nubes, así como en los detalles regionales del clima actual. No obstante, en el transcurso de varias décadas de desarrollo, los

14. Se ha considerado graficar sólo la temperatura mínima por presentar un mayor cambio

modelos han brindado sistemáticamente una idea clara e inequívoca del calentamiento significativo del clima como respuesta al incremento de los gases de efecto invernadero y han sido capaces de simular climas y cambios climáticos observados.

Aunque el cambio climático es de carácter global, no se puede esperar que los cambios potenciales sean globalmente uniformes; más bien, puede haber diferencias regionales dramáticas. En este contexto, los MCG no pueden representar explícitamente detalles regionales que caracterizan el clima de una región, a una escala que sea de utilidad para estudios de impactos y evaluación de vulnerabilidad, debido a su aún baja resolución horizontal (aproximadamente 100-300 km); de allí la necesidad de regionalizar. Los Modelos Regionales de Clima (RCM), el downscaling estadístico o modelos globales de alta resolución (p. ej. el modelo japonés TL959L60, 20 km) son útiles para generar escenarios climáticos con una resolución espacial más alta para estudios de impactos, siendo importante considerar los modelos globales que mejor representen el clima actual de gran escala. La recomendación útil es: combinación de downscaling dinámico y estadístico para llegar a resoluciones aún mayores.

En el ítem anterior se han descrito algunas de las incertidumbres que afectan al proceso de generación de proyecciones regionalizadas de cambio climático. Tal y como allí se ha escrito, algunas de ellas pueden explorarse mediante la utilización de varios escenarios de emisión, varios modelos globales, varias técnicas de regionalización o un solo modelo global forzando varios modelos regionales. Este estudio no presenta un análisis riguroso basado en ensembles de proyecciones por la limitación de recursos y tiempo. Sin embargo, se ha intentado mostrar los resultados de una variedad de modelos globales y de métodos de regionalización<sup>15</sup>, para mostrar al tomador de decisión por lo menos un rango de variación de las proyecciones regionalizadas de cambio climático en algunas localidades de la cuenca. En última instancia, la responsabilidad de los tomadores de decisión está en evaluar la incertidumbre asociada a los escenarios, juzgando su magnitud y averiguando sus orígenes.

En el marco de la SCNCC, el SENAMHI (2009) hacía hincapié en la necesidad de más y mejor información climática en importantes zonas del país, como p. ej. la parte alta y baja de la cuenca del Urubamba, por ello es necesario recopilar mayor cantidad de información,

incluyendo la red privada, que tengan registros con períodos largos de información, verificar la calidad de éstas con la finalidad de complementar el análisis desarrollado en el presente trabajo y explicar de manera más plausible las características decadales y multidecadales que modulan el clima de largo plazo. En ese sentido, es importante fomentar la implementación de un mayor número de estaciones que permitan, en el mediano plazo, contar con series climáticas suficientes para cubrir la mayor parte de la cuenca. Esto ayudará a tener un conocimiento mayor y claro del efecto de estas oscilaciones en el clima actual y en los futuros escenarios climáticos. Contar con más observaciones del clima permitiría evaluar y mejorar el entendimiento de los procesos físicos climáticos e identificar los procesos de retroalimentación y, principalmente, en un futuro cercano servir de base para determinar, mediante los modelos climáticos, la proporción de la variabilidad de largo plazo atribuida a los efectos antropogénicos en varias regiones del Perú.

Es necesario tener presente que los resultados regionalizados y grillados aquí descritos, son más representativos en los puntos donde hay información observada, debido a la regionalización estadística que complementa a los resultados de la regionalización dinámica.

Finalmente, la recomendación para los usuarios es la utilización de todos los rangos de variación proyectados, basados en diferentes modelos globales y en diferentes técnicas de regionalización, para explorar el efecto de estas incertidumbres en sus modelos de impacto. Entiéndase que los mayores rangos estarán asociados a mayores incertidumbres y los rangos más estrechos a estimaciones más robustas y con menor incertidumbre.

Al considerar las limitaciones de la información histórica disponible, la representación limitada y simplificada del clima regional por los modelos y conociendo además que existen incertidumbres asociadas, los resultados del presente estudio deben ser considerados sólo como una aproximación del clima futuro, haciéndose énfasis en las señales de cambios potenciales identificados más que en los valores absolutos, y en base a estos cambios evaluar las vulnerabilidades al cambio climático de aspectos importantes de la biodiversidad, características del hábitat altoandino o amazónico, régimen de recarga de los glaciares, y las actividades productivas como la agricultura, la ganadería, la generación de energía eléctrica y el turismo.

15. La selección de modelos globales y de técnicas de regionalización utilizadas en este estudio ha seguido no solamente criterios de calidad, sino también criterios eminentemente prácticos de accesibilidad y disponibilidad de datos de modelos globales así como de técnicas de regionalización (previamente utilizadas y evaluadas para otros fines)

# Conclusiones

Las conclusiones principales de este capítulo se refieren a dos aspectos, por un lado al aspecto metodológico, y por el otro, al aspecto netamente climático.

## En cuanto al aspecto metodológico: incertidumbres

- La existencia de incertidumbres no significa ignorancia, por el contrario, saber de su existencia, conocer las fuentes que la originan y aprender a administrarlas, es el valor agregado al conocimiento del tomador de decisiones.
- Se presentan los resultados de cinco modelos globales y dos técnicas de regionalización. Como ya se ha mencionado en otras partes de este capítulo, los rangos de variación de los cambios proyectados por los cinco modelos son promediados como un ensemble multimodelo (en algunos puntos de la cuenca) y luego grillados en mapas. La relativa robustez de las proyecciones de temperatura se basa en una menor dispersión de los resultados que, independientemente del modelo o de la técnica de regionalización, indican un claro patrón de calentamiento, no así en la precipitación, donde los valores de cambio muestran una mayor dispersión, principalmente en el otoño e invierno.

## En cuanto al aspecto climático: señales de cambio

- Los cambios de la precipitación son menos regulares que los de la temperatura del aire. No obstante la incertidumbre, los resultados evidencian un patrón de reducción de lluvias en la región altoandina del orden de **-15 % y -40 % durante el invierno** (periodo de estiaje o escasas lluvias), excepto en Ccatcca (+20 %). Es posible que esta reducción en la precipitación, se manifieste también como reducciones en el volumen de la nieve que precipita, especialmente durante el invierno. En el verano

(periodo de máximas lluvias), las precipitaciones parecen no variar mucho respecto al presente, la media de los modelos indica cambios dentro de su variabilidad (+/-15 %) con un sesgo a ser moderadamente superior en Cay Cay (+25 %). En la estación transicional de otoño (periodo de finalización de lluvias) los cambios de precipitación serían mayores, con un exceso de +30 % a +49 % entre Ccatcca, Urcos y Paucartambo, muy posiblemente debido al ya observable "desfase del periodo lluvioso"; es decir, que las lluvias del verano se estarían prolongando hasta el otoño debido al retraso de la temporada de lluvias durante la primavera. Durante la primavera (inicio del periodo lluvioso) predominaría un escenario tanto de reducciones como de aumentos de -15 % a +30 %.

- En todas las regiones de la cuenca se proyecta un aumento de la **temperatura del aire** en un rango de **+0,4 a +0,8 °C (temperatura máxima)** y de **+0,6 a +1,0 °C (temperatura mínima)**. Sin embargo, no todas las regiones de la cuenca experimentarían el mismo grado de calentamiento medio, que será más notable en invierno para el caso de la temperatura máxima (+0,8 a +1,0 °C) y primavera para la temperatura mínima (+0,8 a +1,2 °C), principalmente en la región altoandina.
- En todas las regiones de la cuenca, **las temperaturas mínimas tienden a incrementarse algo más que las máximas**, excepto en Sicuani donde se presentaría un calentamiento más discreto, más acorde con la tendencia actual observada, que es ligeramente negativa. Este cambio diferenciado de las temperaturas extremas podría conducir a un **escenario de disminución del rango térmico** (diferencia entre temperatura máxima y mínima), lo cual implicaría algún grado de afectación en las actividades agrícolas.

# Referencias Bibliográficas

- Acuña *et al.*, 2011. Escenarios de cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac al 2030 y 2050. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del Programa de Adaptación al Cambio climático (PACC). 124 pp.
- Avalos *et al.*, 2011. Performance of a high resolution global model over the Andean region of Peru. Manuscrito finalizado en mayo 2012. 22 pp (artículo en revisión para someter).
- 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.
- Bombardi R., y Carvalho L., 2007. Variability of the monsoon regime over Brazil: the present climate and projections for a 2xCO<sub>2</sub> scenario using the MIROC model. *Rev. SBMET*, V. 23, No.1, p. 58-72.
- BRUNET, M. *et al.* (2009): Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid.
- Christensen OB, Goodess CM, Harris I. Watkiss P. (2011) European and Global Climate Change Projections: Discussion of Climate Change Model Outputs, Scenarios and Uncertainty in the EC RTD ClimateCost Project. In Watkiss, P (Editor), 2011. The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe. Published by the Stockholm Environment Institute, Sweden, 2011. ISBN 978-91-86125-35-6.
- Christensen, J. *et al.*, (2007) Regional Climate Projections. In: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [S. Solomon, *et al.*, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CCA-UNAM, 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Autónoma de México. 105 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.
- Guilyardi, and Coauthors. 2009. Understanding El Niño in Ocean-Atmosphere General Circulation Models -Progress and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, p. 325-340.
- Goodess, C.M., Anagnostopoulou, C., Bárdossy A., Frei C., Harpham C., Haylock M. R., Hundedcha Y., Maheras P., Ribalaygua, J., Schmidli J., Schmith T., Tolika K., Tomozeiu R., and Wilby R. L., 2007. An intercomparison of statistical downscaling methods for Europe and European regions -assessing their performance with respect to extreme temperature and precipitation events. *Climate Change*.
- Grimm, A. M., Sahai, A. K., Ropelewski, C. F., 2006. Interdecadal variations in AGCM simulation skills. *Journal of Climate*, v. 19, p. 3406-3419.
- Hulme, M., Lu, X., 2000: How to factor interannual climate variability into Climate Scenarios. A note prepared for the DETR Fast-Track Impacts Group.
- 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, 2007a. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers*, Working Group 1 IPCC, Geneva, 2007.
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007: Impacts and Vulnerability, Summary for Policy Makers*, Working Group 2 IPCC, Geneva, 2007.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, B. 1996, The NCEP/NCAR Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77: 437-471.
- Kropp J. y M. Schoize (2011). Cambio climático: información para una adaptación eficaz. Giacomotti Comunicaciones gráficas. Berlín Alemania.
- Lenters J. D., Cook K. H., 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 54, p. 656-677.
- Marengo J. A., 2007. Mudanzas climáticas globales y sus efectos sobre la biodiversidad: características del clima actual y definición de las alteraciones climáticas para el territorio brasilero a lo largo del siglo XXI. Brasilia, Ministerio del Ambiente. Serie Biodiversidad, v.26, 2007.

Meehl, G.A., *et al.* (2007) Global Climate Projections. In: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [S. Solomon, *et al.*, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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.

Moss, R.,H., Edmonds, J.,A., Hibbard, K.,A., Manning, M.,R., Rose, S.,K., van Vuuren, D.,P., Carter, T.,R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.,A., Mitchell, J.,F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.,J., Stouffer, R.,J., Thomson, A.,M., Weyant, J.,P., Wilbanks, T.,J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature. 463 (7282):747-56.

Nakicenovic N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E. Lebre La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi. (2000). Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Nakicenovic, N., y R. Swart, (eds.), 2000. Special Report on Emission Scenarios, pp. 1-599. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Noda, A., Kusunoki, S. y Yoshizaki, M. 2006: Development of Super High Resolution Global and Regional Climate Models. Atmospheric and Oceanic Simulation, Cap. I.

SENAMHI, 1988. Mapa de clasificación climática del Perú. Método de Thornthwaite. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. 14 pp.

SENAMHI. 2007. Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del proyecto PRAA. 124 pp.

SENAMHI. 2009. Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030. Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio del Ambiente. 136 pp.

SENAMHI, 2011 [Avalos G., Cubas F., Oria C., Díaz A., Quispe N., Acuña D., Rosas G., Solís O.]. Atlas de precipitación y temperatura del aire en la cuenca del río Urubamba. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Ministerio de Ambiente. En el marco del proyecto PRAA. 157 pp.

Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research, 106 (D7): 7183–7192.

TGICA – IPCC, 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Versión 2. Preparado por Carter T. R. IPCC. 66 pp.

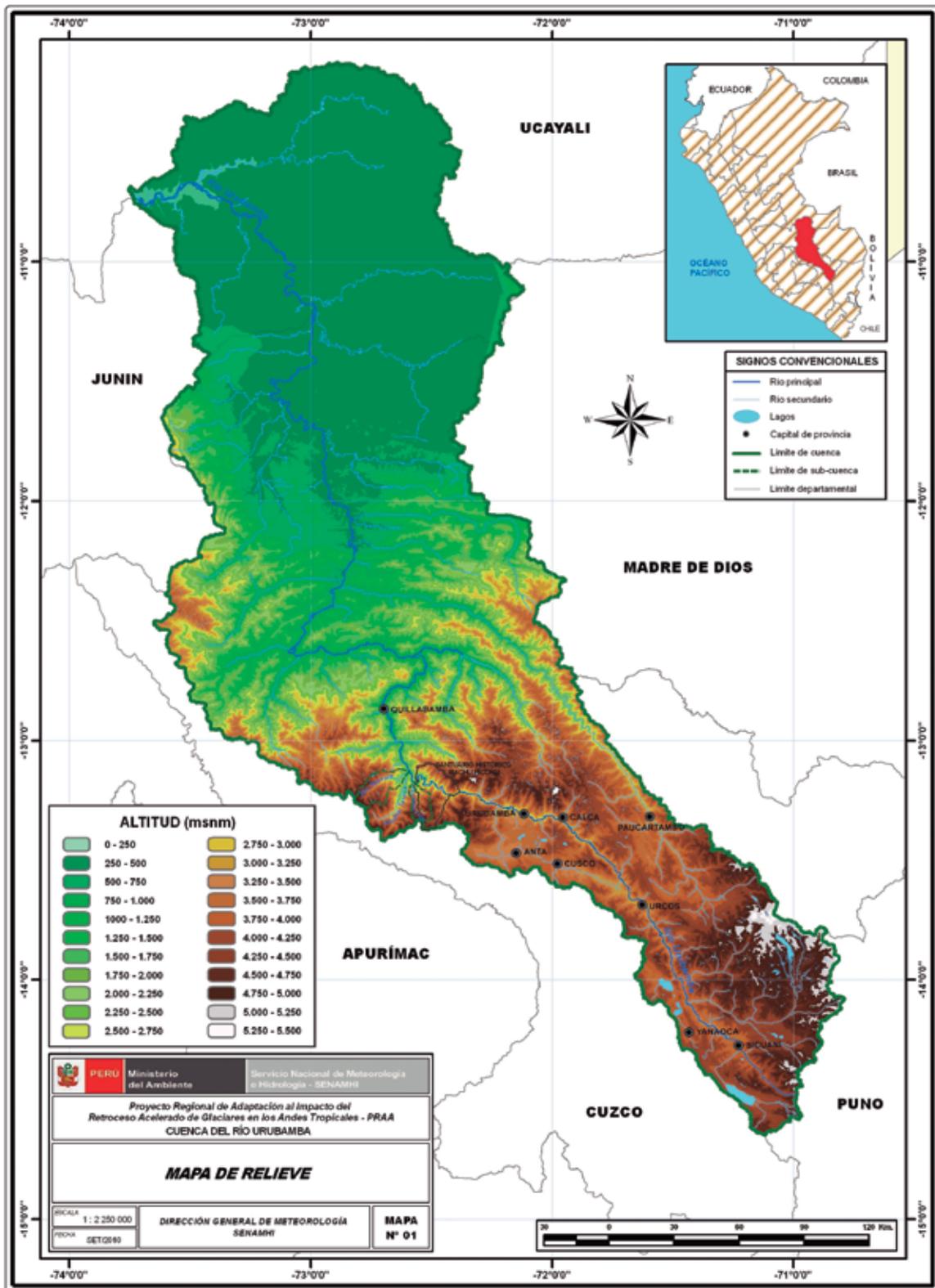
Uppala *et al.*, 2005: The ERA-40 re-analysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., 131, 2961-3012.

Valverde C. M., y Marengo J., 2010. Mudanzas de circulación atmosférica sobre América del Sur para escenarios futuros del clima proyectados por los modelos globales del IPCC AR4. Rev. SBMET, V. 25, N.º 1, p. 125-145.

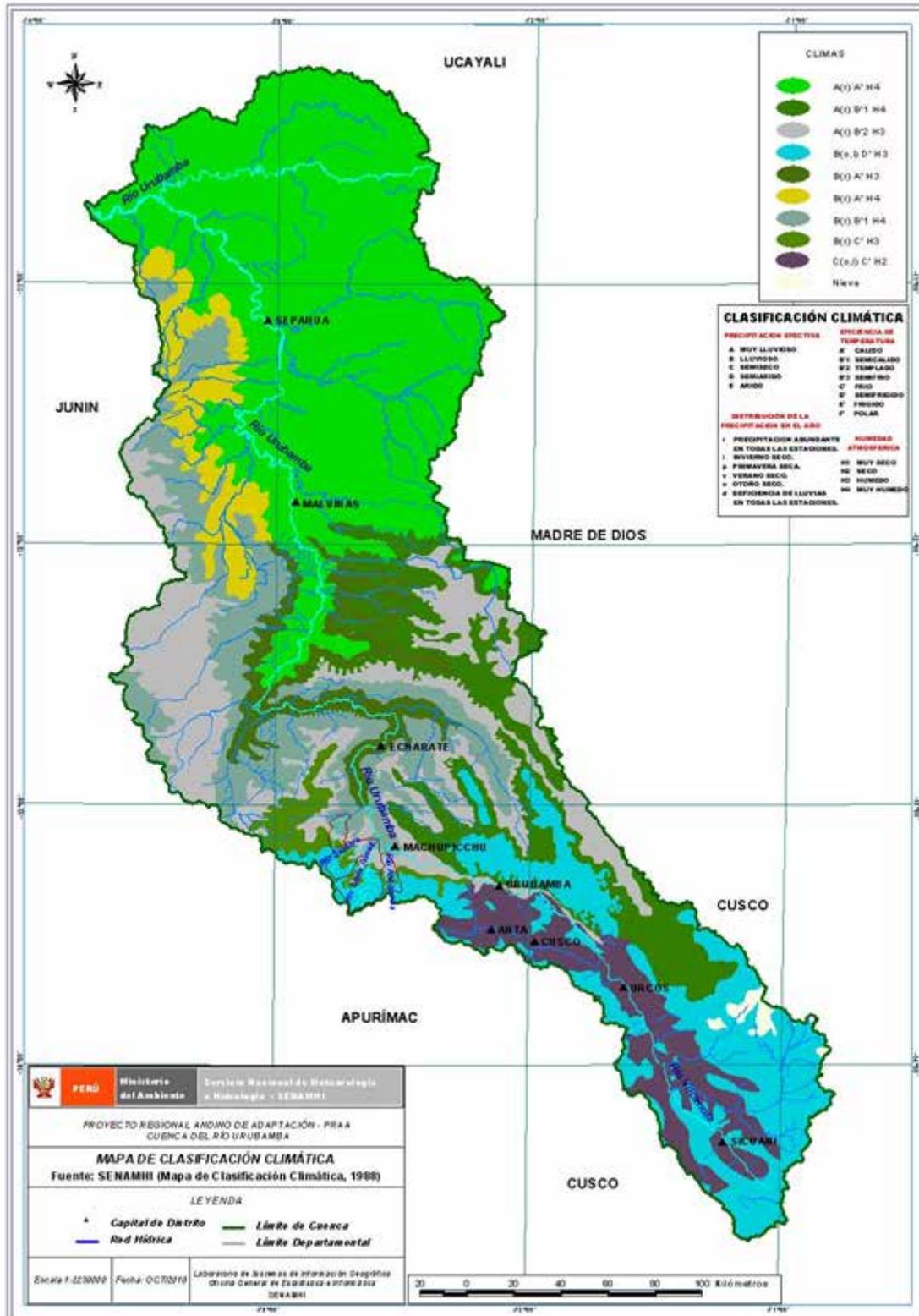
Vera *et al.*, 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC AR4 models. Geophysical Research Letters, v.33, L13707, doi 10.1029/2006GL025759.

Wilby *et al.*, 2004: Guidelines for the use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods.

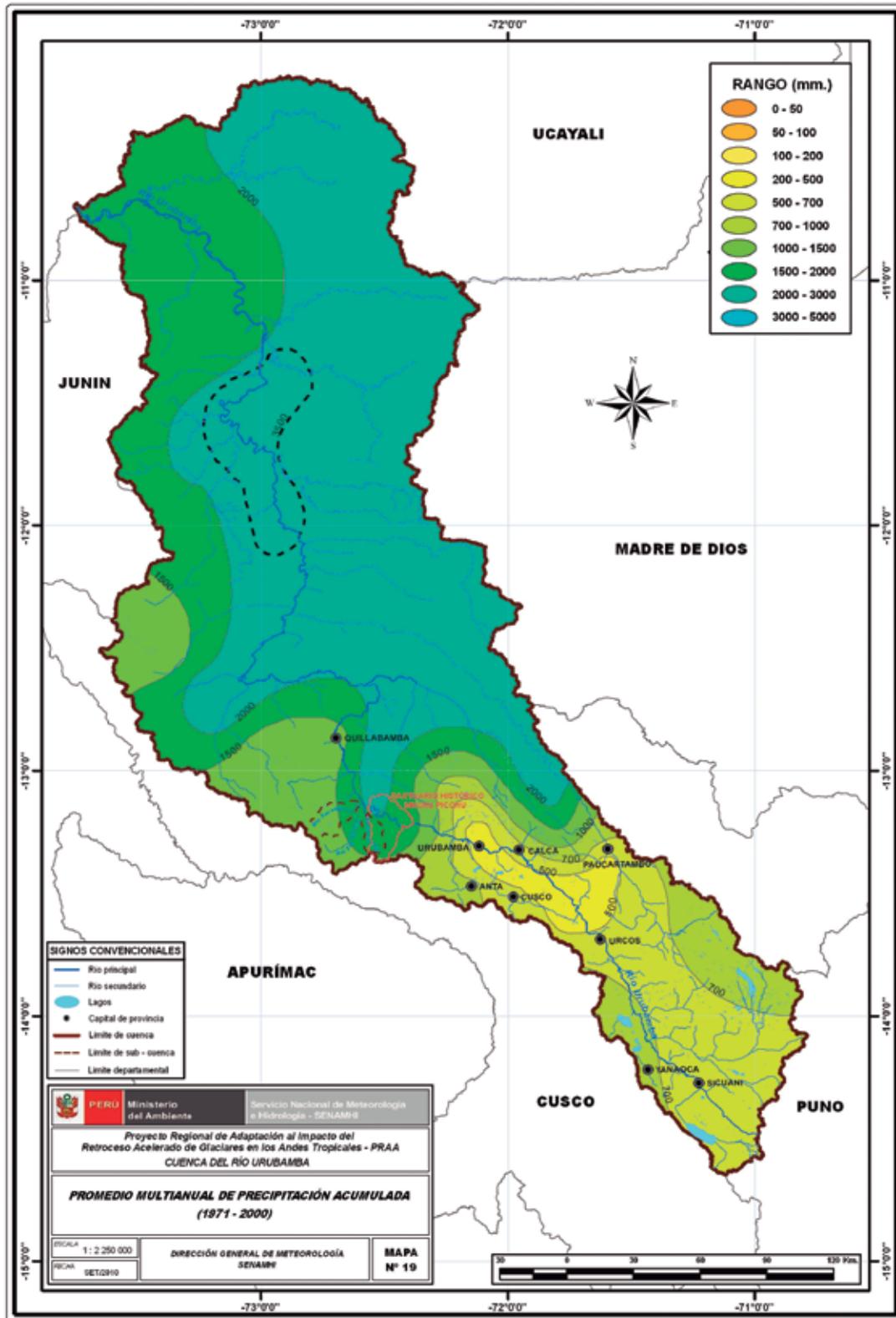
# Anexos



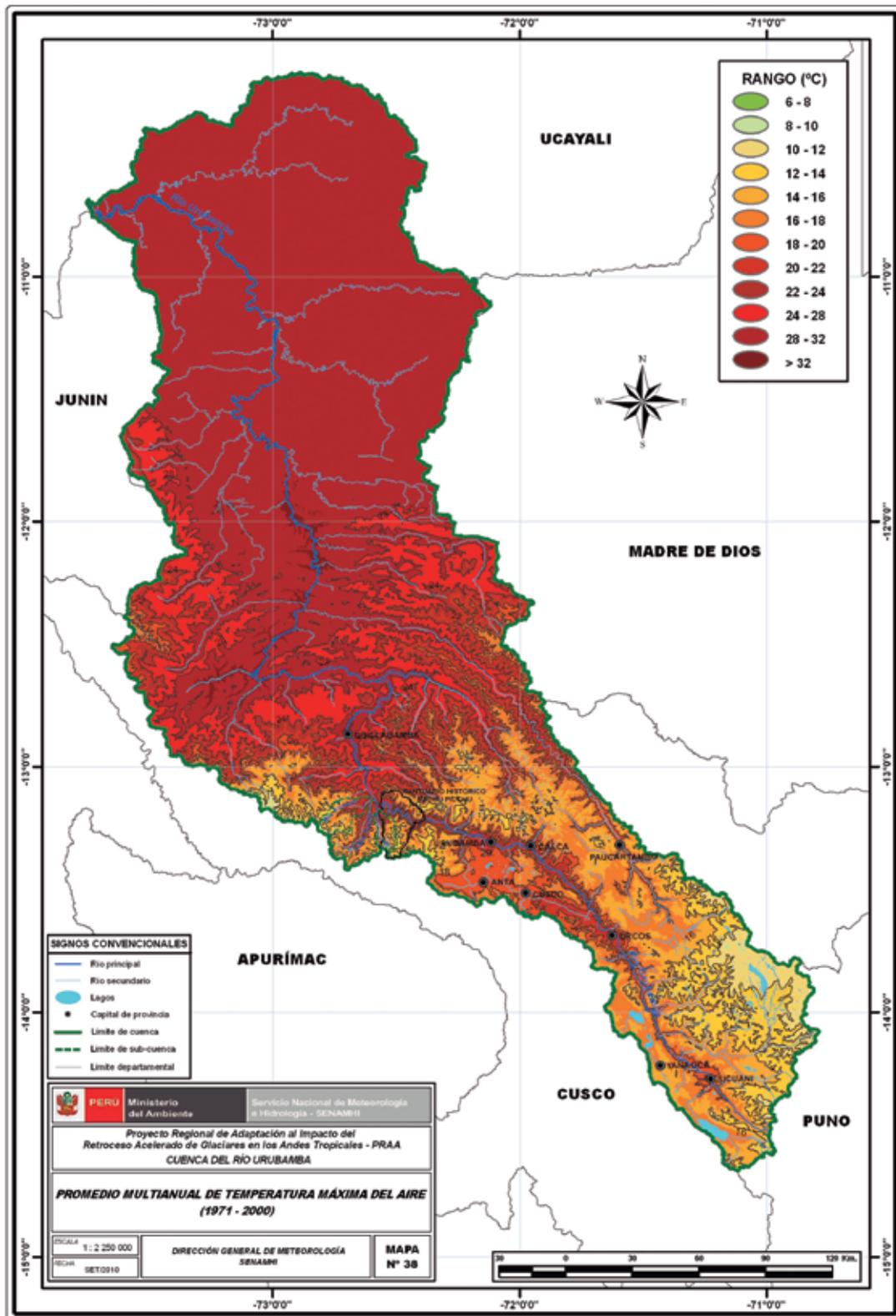
Mapa 01 Relieve de la cuenca del río Urubamba. Fuente: Elaboración propia



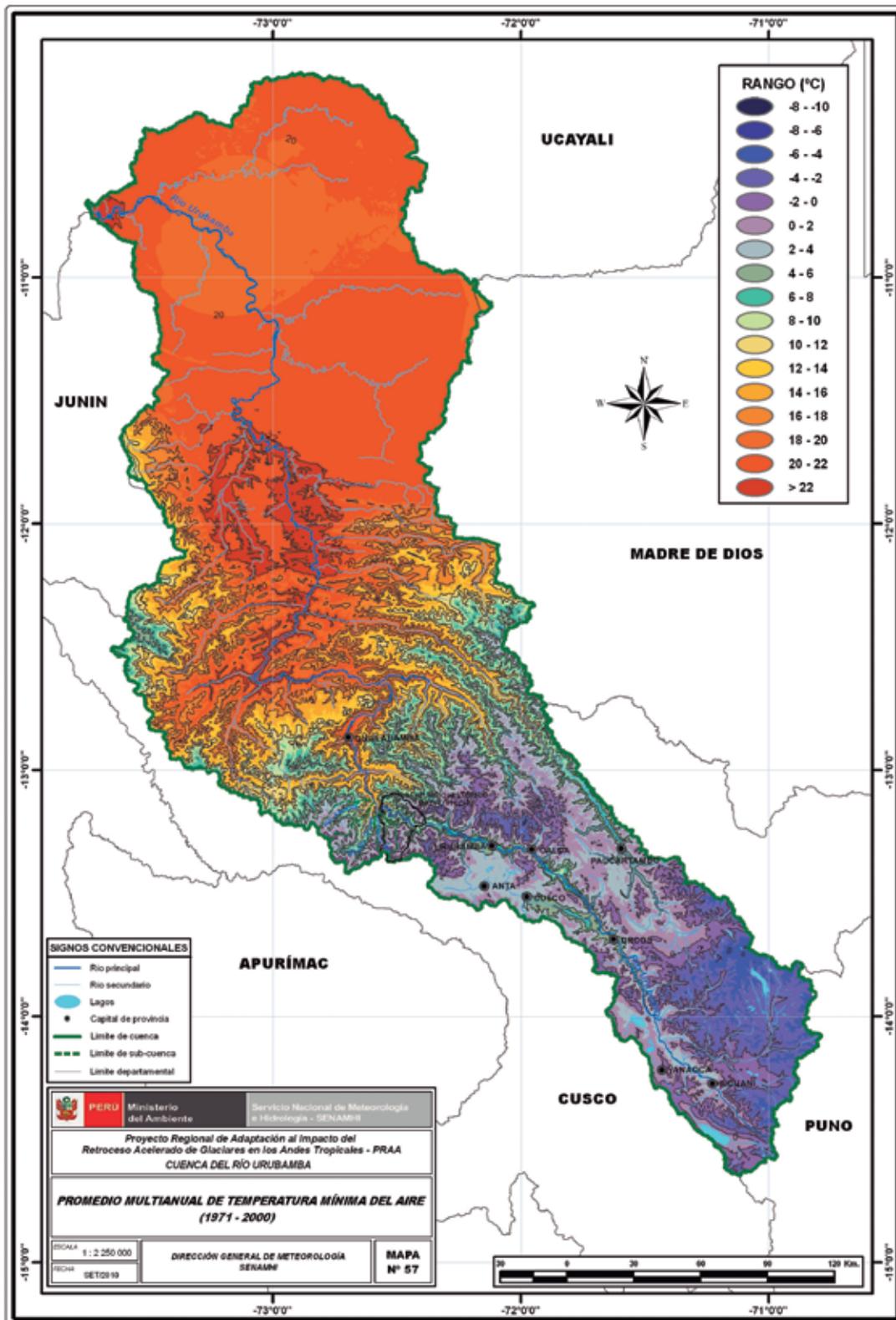
**Mapa 02** Clasificación climática de la cuenca del río Urubamba, según Warren Thornthwaite. **Fuente:** SENAMHI, 1988



**Mapa 03** Promedio multianual de la precipitación acumulada en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000. **Fuente:** Elaboración propia



**Mapa 04** Promedio multianual de la temperatura máxima en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000. **Fuente:** Elaboración propia



**Mapa 05** Promedio multianual de la temperatura mínima en la cuenca del río Urubamba. Periodo de referencia 1971-2000. **Fuente:** Elaboración propia



# Capítulo 3

## DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA PRESENTE Y FUTURA: SUBCUENCA DEL RÍO SANTA TERESA, CUSCO

### 3.1 Disponibilidad hídrica presente

Los estudios hidrológicos realizados estuvieron orientados en un primer momento a la estimación de los caudales medios mensuales de la cuenca del río Santa Teresa; sin embargo, los estudios complementarios del PRAA se extendieron hacia las cuencas vecinas de Sacsara, Aobamba y Chaupimayo (Figura 3.1), para los cuales también se tuvo que generar información, mediante procedimientos de transferencia de información

hidrológica de cuencas aforadas. Para estimar los caudales se ha utilizado información hidroclimática regional de las cuencas de Apurímac y Urubamba, ya que en la zona de estudio no se dispone de información climática, ni hidrológica, por tanto se ha recurrido a métodos de generación hidrológica extrapolando los parámetros de un modelo hidrológico lluvia-escorrentía que fue calibrado y validado en la cuenca del Urubamba y luego aplicado a las cuencas de interés para la simulación de series históricas de caudal para el periodo de 1969-2010.

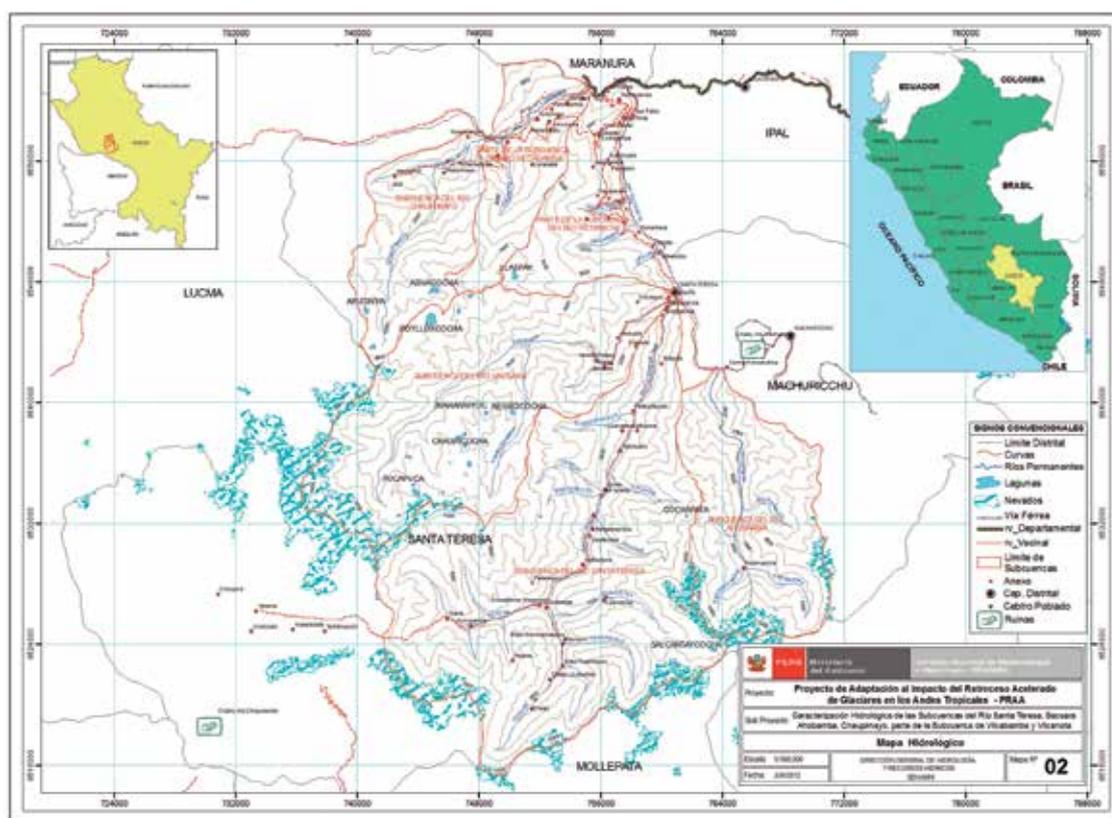


Figura 3.1 Plano de ubicación de las subcuencas. Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.1 Calibración y validación de modelos hidrológicos en la cuenca Urubamba

Se calibraron dos modelos hidrológicos a paso de tiempo mensual en la cuenca del río Urubamba, en la estación hidrológica km-105. El desempeño de los modelos fue

evaluado a través del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Los resultados encontrados indican que el modelo de Lutz-Sholtz es más eficiente en la calibración con una eficiencia de Nash de 86 %, pero en la validación el modelo GR2m es más confiable con una eficiencia de 86 %. Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Caudales observados y simulados (mm) a nivel anual en el río Vilcanota

Modelo	Calibración (1969-1994)			Validación (1995-2008)		
	Qobs (mm)	Qsim (mm)	Nash (%)	Qobs (mm)	Qsim (mm)	Nash (%)
Lutz-Sholtz	411	405	86	418	526	45
GR2m	411	390	81	418	383	86

**Leyenda:** Qobs = Caudales observados

Qsim = Caudales simulados

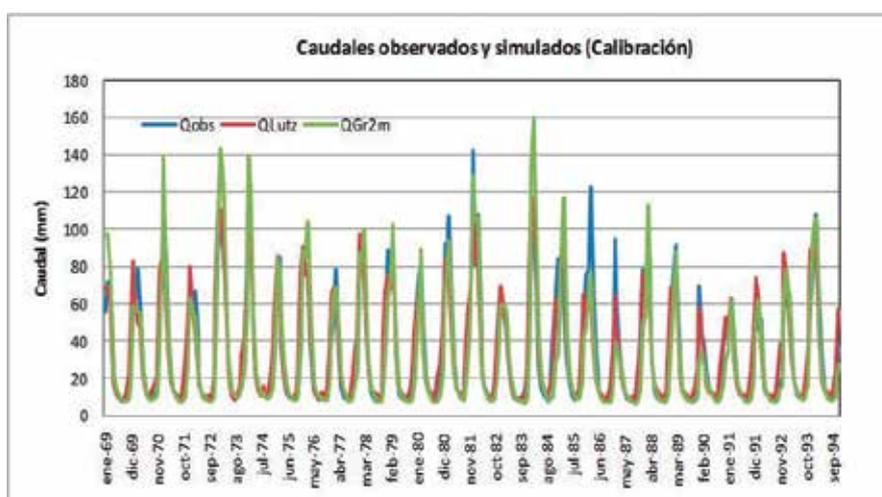
**Fuente:** Elaboración propia

Por otro lado, se ha determinado, mediante el mapeo del coeficiente de escorrentía de la cuenca, que la lámina de escorrentía media de la cuenca del río Urubamba para los periodos de 1969-1994 y 1995-2008 está en el orden de 392 mm/año y 454 mm/año, respectivamente, resultados que son más coherentes con la lámina anual simuladas con el modelo GR2m para estos dos periodos.

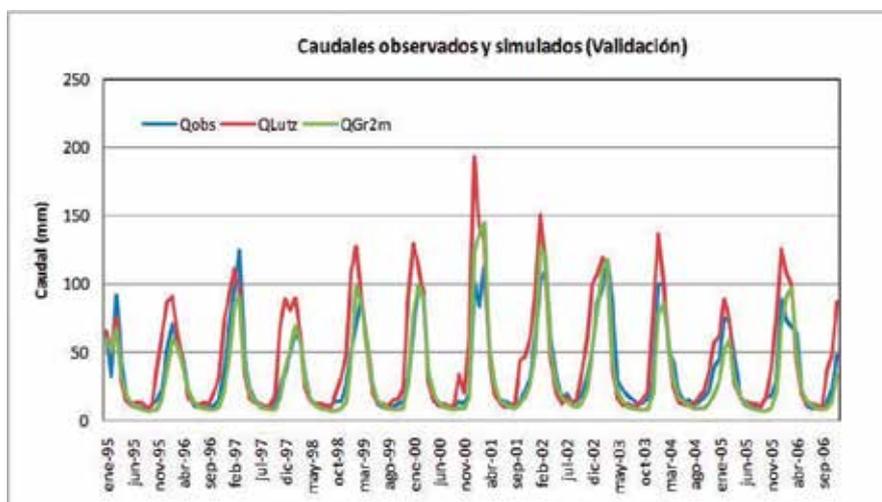
En las Figuras 3.2 y 3.3 se ilustran las salidas mensuales de los caudales observados y simulados por los modelos de Lutz-Scholtz y GR2m, en la cuenca del río Urubamba

en etapa de calibración y validación, observándose lo siguiente:

- En la calibración se aprecia que los modelos reflejan bien el comportamiento durante el período de estiaje; sin embargo, a nivel de caudales máximos se observa una cierta discrepancia para el período 1986/87.
- En la validación se observa que el modelo Lutz-Scholtz no se ajusta al comportamiento de los caudales en el período de avenidas.



**Figura 3.2** Caudales observados y simulados: río Urubamba (calibración). **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.3** Caudales observados y simulados: río Urubamba (validación). **Fuente:** Elaboración propia

Una primera aproximación al caudal anual de las subcuencas de estudio se presenta en la Tabla 3.2, con estimaciones hechas en base al coeficiente de escorrentía

de las cuencas y simulación hidrológica mensual con el modelo GR2m.

**Tabla 3.2** Lámina de escorrentía (mm) generada en las subcuencas

Escorrentía anual generada a nivel de subcuencas (mm)				
Modelo	Sacsara	Sta Teresa	Aobamba	Chaupimayo
GR2m	1032	881	1263	863
Coef_esc	977	795	1141	786

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.2 Simulación de caudales

Para la simulación de los caudales en las subcuencas de estudio se ha utilizado el modelo GR2m, generándose series mensuales y asumiendo los mismos parámetros de calibración de la cuenca del Urubamba, se obtuvo finalmente la caracterización hidrológica de las subcuencas:

### Subcuenca del río Sacsara

Se ha determinado la oferta de agua superficial para un área de drenaje de 229,7 km<sup>2</sup>, en una estación ficticia ubicada en el río Sacsara, aguas arriba de su confluencia con el río Santa Teresa. Se ha estimado un módulo anual de caudal promedio de 7,6 m<sup>3</sup>/s (Tabla 3.3). En años secos la disponibilidad de agua puede alcanzar 1,93 m<sup>3</sup>/s, mientras que en años húmedos el caudal promedio anual alcanza los 12,0 m<sup>3</sup>/s en promedio. Figura 3.4.

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km <sup>2</sup>	229.7
Caudal promedio anual	m <sup>3</sup> /s	7.6
Caudal máximo	m <sup>3</sup> /s	45.1
Caudal mínimo	m <sup>3</sup> /s	0.64
Caudal promedio anual en años secos	m <sup>3</sup> /s	1.93
Caudal promedio anual en años húmedos	m <sup>3</sup> /s	12.0
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m <sup>3</sup> /s	7.9
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m <sup>3</sup> /s	3.3
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m <sup>3</sup> /s	2.4
Caudal promedio anual en años "Niño"	m <sup>3</sup> /s	6.7
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m <sup>3</sup> /s	9.1



**Figura 3.4** Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Sacsara. **Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.3** Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Sacsara

Parámetro	Parámetros estadísticos de caudal												
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	ANUAL
Promedio	2,8	3,6	6,5	10,1	14,5	18,7	15,1	8,0	4,0	2,9	2,3	2,3	7,6
Mediana	3,1	3,7	6,3	11,0	15,1	19,5	16,1	7,6	3,9	3,0	2,3	2,2	7,9
DS	1,8	2,4	5,7	7,1	9,5	11,7	9,4	4,8	2,0	1,4	1,1	1,3	4,3
CV	0,65	0,66	0,87	0,71	0,66	0,62	0,62	0,59	0,49	0,49	0,50	0,58	0,57
Máx	7,7	9,3	28,3	24,3	34,2	45,1	40,0	19,5	8,7	6,5	5,2	5,1	18,3
Min	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	1,3	1,2	1,2	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9

**Leyenda:** DS = Desviación estándar  
Máx = Máximo valor

CV = Coeficiente de variación  
Min = Mínimo valor

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.4** Caudales característicos del río Sacsara en años normales, húmedos y secos

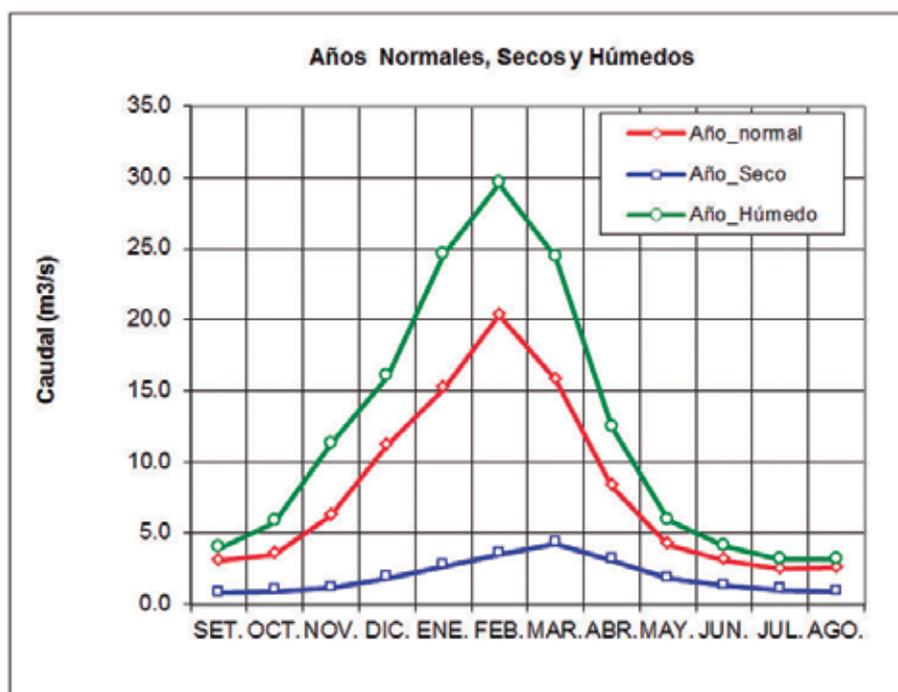
Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s) en años secos, normales y húmedos													
Año	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOTAL
Seco	0,8	0,9	1,1	1,8	2,7	3,5	4,3	3,1	1,8	1,3	1,0	0,9	1,9
Normal	3,0	3,5	6,2	11,2	15,2	20,3	15,8	8,3	4,2	3,1	2,5	2,6	8,0
Húmedo	3,9	5,8	11,2	16,0	24,6	29,6	24,4	12,4	5,9	4,0	3,1	3,1	12,0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.5** Persistencia mensual de caudales del río Sacsara

Persistencia de caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)													
Persistencia	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOTAL
P - 50 %	3,1	3,7	6,3	11,0	15,1	19,5	16,1	7,6	3,9	3,0	2,3	2,2	7,9
P - 75 %	0,9	0,9	1,5	3,0	5,6	6,3	6,9	4,9	2,4	1,6	1,2	1,0	3,3
P - 80 %	0,9	0,8	1,0	1,7	3,0	4,8	5,4	3,7	2,0	1,4	1,1	0,9	2,4
P - 90 %	0,8	0,7	0,8	0,8	1,5	2,4	3,1	2,3	1,5	1,2	0,9	0,8	1,8

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.5** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Sacsara. Fuente: Elaboración propia

### Subcuenca del río Santa Teresa

Se ha determinado la oferta de agua superficial para un área de drenaje de 371,2 km<sup>2</sup>, en una estación ficticia ubicada en el río Santa Teresa, aguas arriba de su

confluencia con el Sacsara. Se ha estimado un módulo anual de caudal promedio de 10,4 m<sup>3</sup>/s. (Tabla 3.6). En años secos la disponibilidad de agua alcanza 2,9 m<sup>3</sup>/s en promedio, mientras que en años húmedos el caudal promedio anual alcanza 16,4 m<sup>3</sup>/s. Figura 3.6.

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km <sup>2</sup>	371.2
Caudal promedio anual	m <sup>3</sup> /s	10.4
Caudal máximo	m <sup>3</sup> /s	62.3
Caudal mínimo	m <sup>3</sup> /s	1.02
Caudal promedio anual en años secos	m <sup>3</sup> /s	2.88
Caudal promedio anual en años húmedos	m <sup>3</sup> /s	16.4
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m <sup>3</sup> /s	10.7
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m <sup>3</sup> /s	4.7
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m <sup>3</sup> /s	3.5
Caudal promedio anual en años "Niño"	m <sup>3</sup> /s	9.3
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m <sup>3</sup> /s	12.4



Figura 3.6 Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Santa Teresa. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Santa Teresa

Parámetro	Parámetros estadísticos de caudal												ANUAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
Promedio	3,8	4,8	8,6	13,4	19,5	25,5	21,3	11,4	5,8	4,2	3,3	3,2	10,4
Mediana	4,1	4,9	8,1	14,9	19,8	26,3	23,0	10,9	5,7	4,3	3,3	3,1	10,7
DS	2,3	3,0	7,2	9,3	12,8	15,8	12,5	6,5	2,7	1,9	1,5	1,7	5,8
CV	0,60	0,63	0,84	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,46	0,46	0,47	0,53	0,56
Máx.	10,2	12,6	35,9	32,7	47,4	62,3	55,1	27,2	12,4	9,3	7,3	6,7	25,0
Min.	1,1	1,0	1,1	1,1	1,2	1,9	1,8	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,4

**Leyenda:** DS = Desviación estándar  
Máx = Máximo valor

CV = Coeficiente de variación  
Min = Mínimo valor

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Caudales característicos del río Santa Teresa en años normales, húmedos y secos

Año	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s) en años secos, normales y húmedos												ANUAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
Seco	1,3	1,4	1,8	2,6	3,8	5,2	6,2	4,6	2,7	2,0	1,6	1,4	2,9
Normal	4,1	4,7	8,2	14,6	20,1	27,5	22,6	11,9	6,1	4,5	3,6	3,6	10,9
Húmedo	5,3	7,5	14,5	21,2	33,2	40,3	33,7	17,5	8,4	5,8	4,5	4,4	16,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Persistencia mensual de caudales del río Santa Teresa

Persistencia	Persistencia de caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)												TOTAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
P - 50 %	4,1	4,9	8,1	14,9	19,8	26,3	23,0	10,9	5,7	4,3	3,3	3,1	10,7
P - 75 %	1,4	1,5	2,1	4,2	7,6	9,1	10,3	7,3	3,7	2,5	1,9	1,6	4,7
P - 80 %	1,4	1,3	1,7	2,4	4,0	6,5	8,6	6,1	3,2	2,3	1,7	1,5	3,5
P - 90 %	1,3	1,2	1,3	1,3	2,0	4,8	5,7	4,2	2,5	1,9	1,5	1,3	2,7

Fuente: Elaboración propia

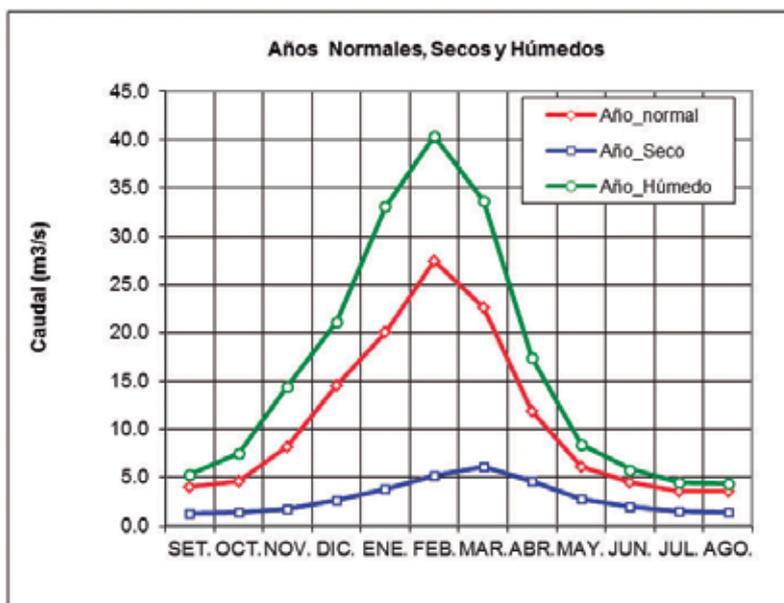


Figura 3.7 Hidrograma de caudal promedio mensual del río Santa. Fuente: Elaboración propia

### Subcuenca del río Aobamba

Se ha determinado que la oferta de agua superficial en la cuenca de río Aobamba para un área de drenaje de

129,5 km<sup>2</sup> es de 5,2 m<sup>3</sup>/s. (Tabla 3.9); en años secos la disponibilidad de agua llega a 1,14 m<sup>3</sup>/s en promedio; mientras que años húmedos la disponibilidad es de 8,4 m<sup>3</sup>/s de promedio anual. Figura 3.8.

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km <sup>2</sup>	129.5
Caudal promedio anual	m <sup>3</sup> /s	5.2
Caudal máximo	m <sup>3</sup> /s	28.4
Caudal mínimo	m <sup>3</sup> /s	0.38
Caudal promedio anual en años secos	m <sup>3</sup> /s	1.14
Caudal promedio anual en años húmedos	m <sup>3</sup> /s	8.4
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m <sup>3</sup> /s	5.7
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m <sup>3</sup> /s	1.8
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m <sup>3</sup> /s	1.4
Caudal promedio anual en años "Niño"	m <sup>3</sup> /s	4.6
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m <sup>3</sup> /s	6.3

Figura 3.8 Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Aobamba. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Aobamba

Parámetro	Parámetros estadísticos de caudal												
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	ANUAL
Promedio	2,0	2,6	4,9	7,5	10,3	12,8	9,9	5,1	2,5	1,8	1,4	1,5	5,2
Mediana	2,2	2,7	4,9	8,4	11,2	13,6	9,7	4,6	2,4	1,9	1,4	1,4	5,7
DS	1,4	1,9	4,4	5,4	6,9	8,1	6,5	3,3	1,3	1,0	0,8	1,0	3,0
CV	0,71	0,72	0,88	0,72	0,67	0,63	0,66	0,64	0,54	0,53	0,56	0,64	0,59
Máx.	5,9	6,8	21,0	16,9	23,3	28,4	25,9	12,6	5,8	4,2	3,5	3,7	12,3
Min.	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6

Leyenda: DS = Desviación estándar  
Máx = Máximo valor

CV = Coeficiente de variación  
Min = Mínimo valor

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10** Caudales característicos del río Aobamba en años normales, húmedos y secos

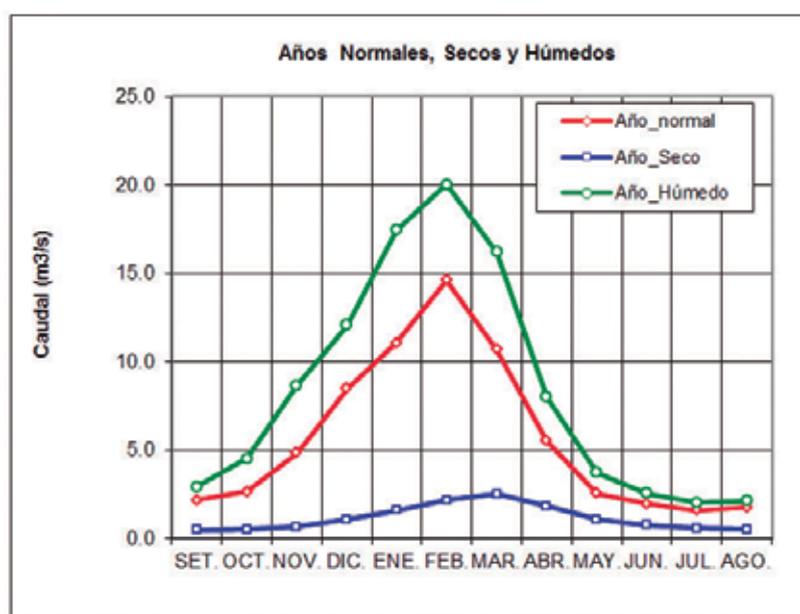
Año	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s) en años secos, normales y húmedos												TOTAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
Seco	0,5	0,5	0,6	1,0	1,6	2,2	2,5	1,8	1,0	0,8	0,6	0,5	1,1
Normal	2,2	2,6	4,8	8,5	11,1	14,6	10,7	5,5	2,6	2,0	1,6	1,7	5,7
Húmedo	2,9	4,5	8,7	12,1	17,4	20,0	16,2	8,0	3,7	2,5	2,0	2,1	8,4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.11** Persistencia mensual de caudales del río Aobamba

Año	Persistencia de caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)												TOTAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
P - 50 %	2,2	2,7	4,9	8,4	11,2	13,6	9,7	4,6	2,4	1,9	1,4	1,4	5,7
P - 75 %	0,5	0,5	0,9	2,0	3,0	3,6	3,8	2,8	1,3	0,9	0,7	0,6	1,8
P - 80 %	0,5	0,5	0,6	1,0	1,8	2,8	3,3	2,1	1,1	0,8	0,6	0,5	1,4
P - 90 %	0,5	0,4	0,5	0,5	1,0	1,6	1,8	1,5	1,0	0,7	0,6	0,5	1,1

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.9** Hidrograma de caudal promedio mensual del río Aobamba. Fuente: Elaboración propia

### Subcuenca del río Chaupimayo

Se ha determinado la oferta de agua superficial para un área de drenaje de 84 km<sup>2</sup>, en una estación ficticia ubicada en el río Chaupimayo, aguas arriba de su confluencia con el río Urubamba.

Se ha estimado para esta cuenca un caudal promedio anual de 2,3 m<sup>3</sup>/s. (Tabla 3.12); en años secos la disponibilidad de agua llega a 0,66 m<sup>3</sup>/s en promedio; mientras que años húmedos la disponibilidad es de 3,7 m<sup>3</sup>/s en promedio anual. Figuras 3.10 y 3.11.

Parámetro	Unidad	Valor
Area drenaje	Km <sup>2</sup>	84.0
Caudal promedio anual	m <sup>3</sup> /s	2.3
Caudal máximo	m <sup>3</sup> /s	14.8
Caudal mínimo	m <sup>3</sup> /s	0.24
Caudal promedio anual en años secos	m <sup>3</sup> /s	0.66
Caudal promedio anual en años húmedos	m <sup>3</sup> /s	3.7
Caudal promedio anual al 50% persistencia	m <sup>3</sup> /s	2.3
Caudal promedio anual al 75% persistencia	m <sup>3</sup> /s	1.1
Caudal promedio anual al 90% persistencia	m <sup>3</sup> /s	0.9
Caudal promedio anual en años "Niño"	m <sup>3</sup> /s	2.1
Caudal promedio anual en años "La Niña"	m <sup>3</sup> /s	2.8

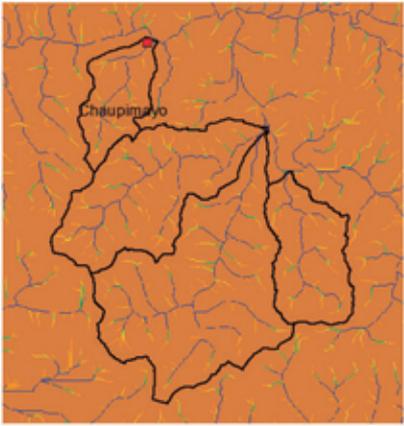


Figura 3.10 Síntesis de los caudales generados en la cuenca del río Chaupimayo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Parámetros estadísticos de las series generadas de caudal en la cuenca Chaupimayo

Parámetro	Parámetros estadísticos de caudal												ANUAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
Promedio	0,8	1,0	1,8	2,8	4,3	5,7	4,9	2,7	1,4	0,9	0,7	0,7	2,3
Mediana	0,9	1,1	1,6	2,9	4,2	5,8	5,0	2,6	1,4	1,0	0,7	0,7	2,3
DS	0,5	0,6	1,6	2,0	2,8	3,7	3,0	1,6	0,6	0,4	0,3	0,4	1,3
CV	0,58	0,60	0,92	0,71	0,66	0,65	0,62	0,60	0,47	0,44	0,46	0,52	0,58
Máx.	2,0	2,3	8,9	7,8	10,7	14,8	13,7	7,1	2,9	2,1	1,7	1,5	6,0
Min.	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Leyenda: DS = Desviación estándar  
Máx = Máximo valor

CV = Coeficiente de variación  
Min = Mínimo valor

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Caudales característicos del río Chaupimayo en años normales, húmedos y secos

Año	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s) en años secos, normales y húmedos												TOTAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
Seco	0,3	0,3	0,4	0,7	0,9	1,2	1,4	1,0	0,6	0,4	0,3	0,3	0,7
Normal	0,9	1,0	1,6	2,9	4,4	5,9	5,0	2,8	1,5	1,0	0,8	0,8	2,4
Húmedo	1,2	1,7	3,3	4,6	7,1	9,6	7,9	4,2	1,9	1,3	1,0	1,0	3,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Persistencia mensual de caudales del río Chaupimayo

Año	Persistencia de caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s)												TOTAL
	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	
P - 50 %	0,9	1,1	1,6	2,9	4,2	5,8	5,0	2,6	1,4	1,0	0,7	0,7	2,3
P - 75 %	0,3	0,3	0,5	1,0	2,1	2,2	2,4	1,5	0,8	0,5	0,4	0,4	1,1
P - 80 %	0,3	0,3	0,4	0,7	1,0	1,6	1,9	1,4	0,7	0,5	0,4	0,3	0,9
P - 90 %	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,9	1,2	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,6

Fuente: Elaboración propia

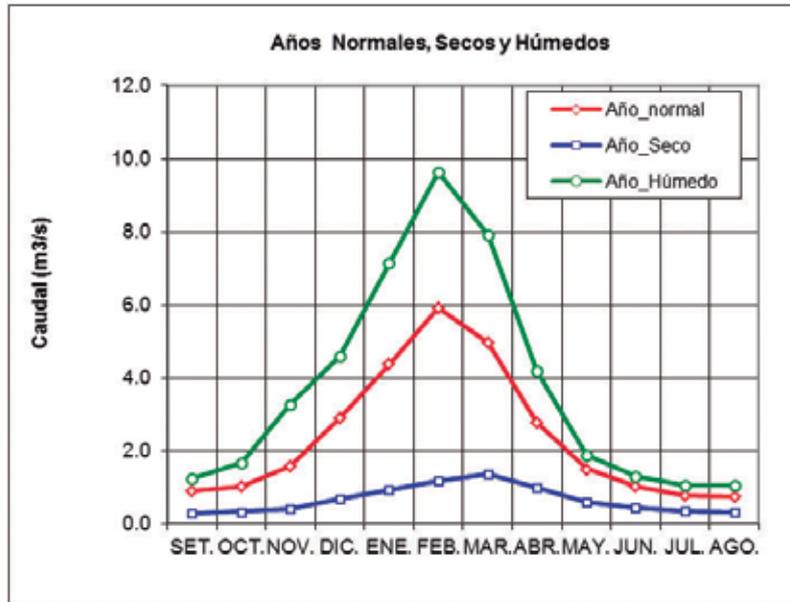


Figura 3.11 Hidrograma de caudal promedio mensual del río Chaupimayo. Fuente: Elaboración propia

**3.1.3 Determinación de la disponibilidad hídrica por balance hídrico**

Se realizó el análisis de cada una de las variables que gobiernan el ciclo hidrológico, con el fin de caracterizar su comportamiento y variabilidad espacial y temporal; mediante las variables de precipitación y temperatura (máxima y mínima) para estimar la evapotranspiración y luego poder determinar el escurrimiento superficial por la ecuación general de balance hídrico simplificado de largo plazo, entre la diferencia algebraica de precipitación y la evapotranspiración real.

La información de precipitación generada, promediada según rangos altitudinales, indica un comportamiento pluviométrico muy diferenciado según zonas. Es así que en la zona baja (entre los 1450 msnm y 3500 msnm) la precipitación media es de 1633,0 mm/año; en la zona media (entre los 3500 y 4000 msnm) la precipitación alcanza los 1395,0 mm/año y en la zona alta (> 4000 msnm), la precipitación media alcanza los 1403,0 mm/año.

La información de precipitación acumulada promediada indica un comportamiento pluviométrico que fluctúa entre valores de 700,0 a 1963,0 mm/año, como se ve representado en la Figura 3.12.

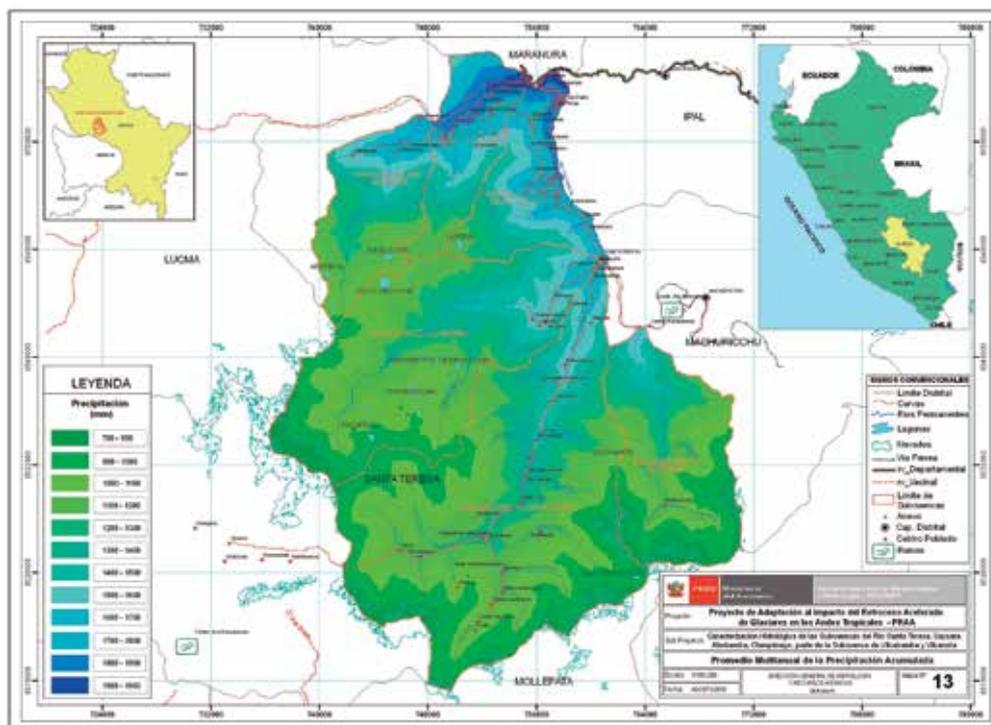
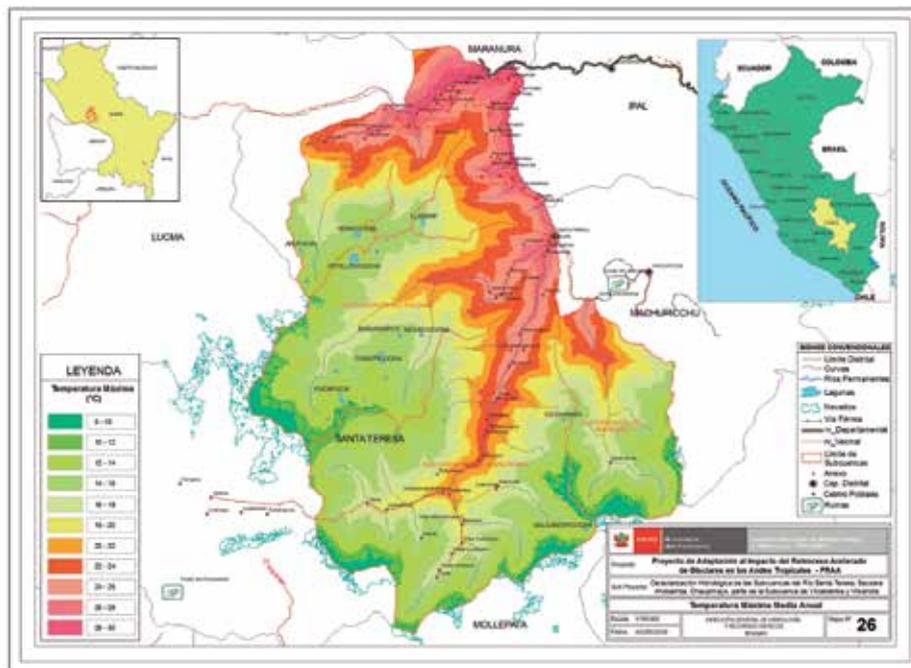
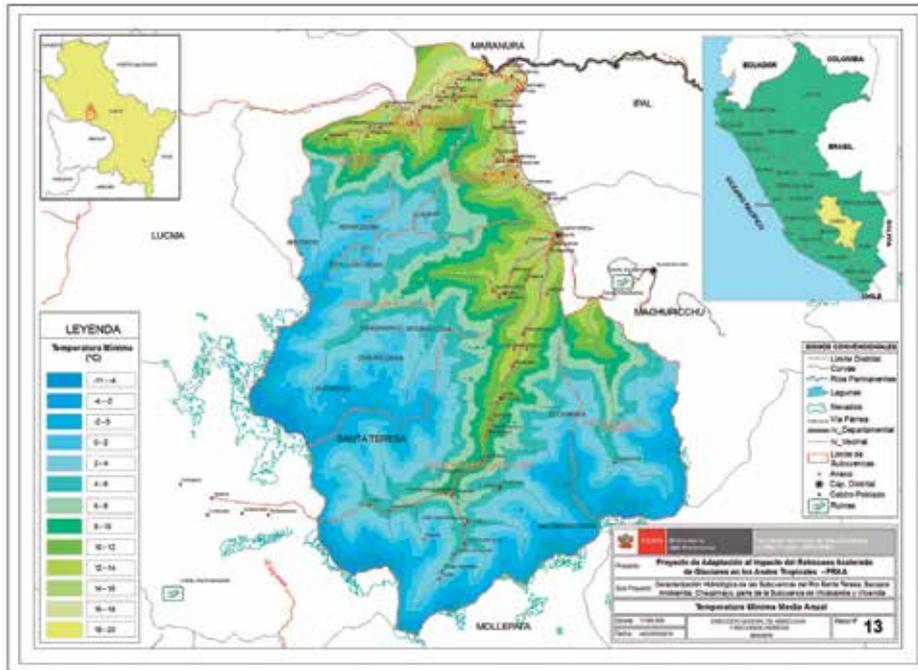


Figura 3.12 Mapa de precipitación anual (1969-2009). Fuente: Elaboración propia

Del análisis regional de la temperatura para la zona de estudio se obtuvo una variabilidad espacial y temporal casi uniforme y homogéneo donde la temperatura media fluctúa entre 0 y 24 °C, habiéndose determinado para la zona baja de la subcuenca una temperatura media anual

de 12,4 °C, para la zona media 9,1 °C y para la zona alta 4,2 °C. La temperatura máxima fluctúa entre 8 y 30 °C y la temperatura mínima fluctúa entre -8 y 10 °C. Figura 3.13 y Figura 3.14.



El mapa de evapotranspiración real, obtenida mediante el método empírico de Turc, muestra una distribución espacial decreciente de esta variable con la altitud; sus valores mínimos alcanzan 184 mm/año en las partes altas y sus valores máximos llegan a 2058 mm/año en la zona baja de la cuenca. Figura 3.15.

Para el caso de la variable evapotranspiración potencial, estimada mediante la metodología de Hargreaves-Samani, se observa que su comportamiento anual varía en relación inversa a la altitud, y ésta alcanza valores mínimos de 676 mm/año en la parte alta y 1693 mm/año en la parte baja de la cuenca. Figura 3.16.

El mapa de escorrentía superficial de la cuenca, obtenida mediante balance hídrico, indica excedentes hídricos en niveles altos y medios de la cuenca, mientras que en

niveles bajos se visualiza deficiencias hídricas. Figura 3.17.

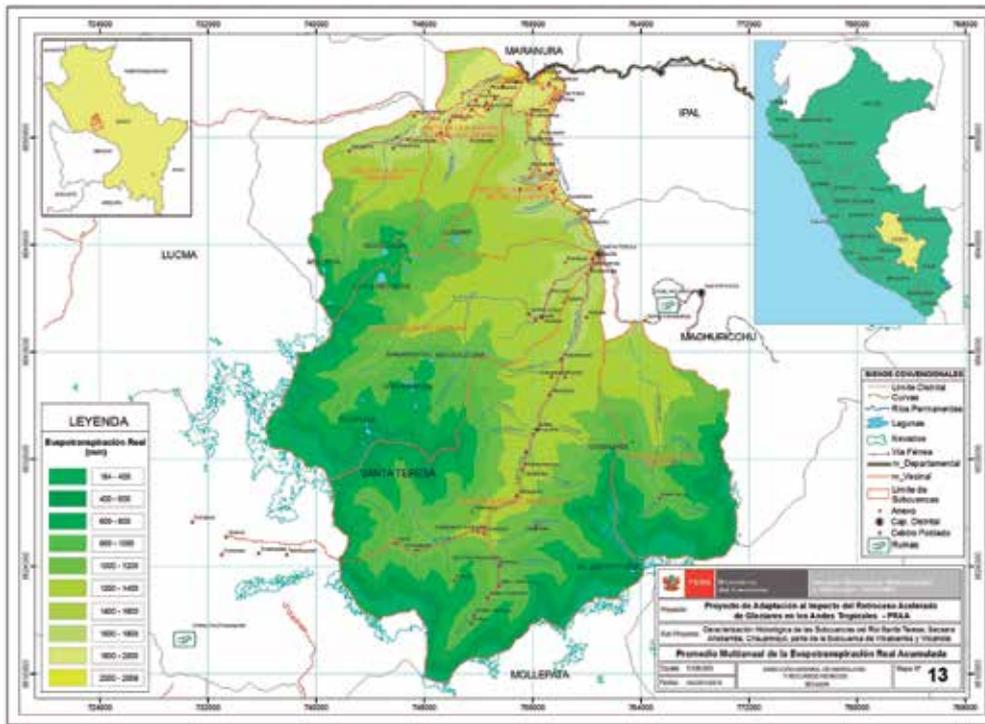


Figura 3.15 Mapa de evapotranspiración real anual (1969-2009). Fuente: Elaboración propia

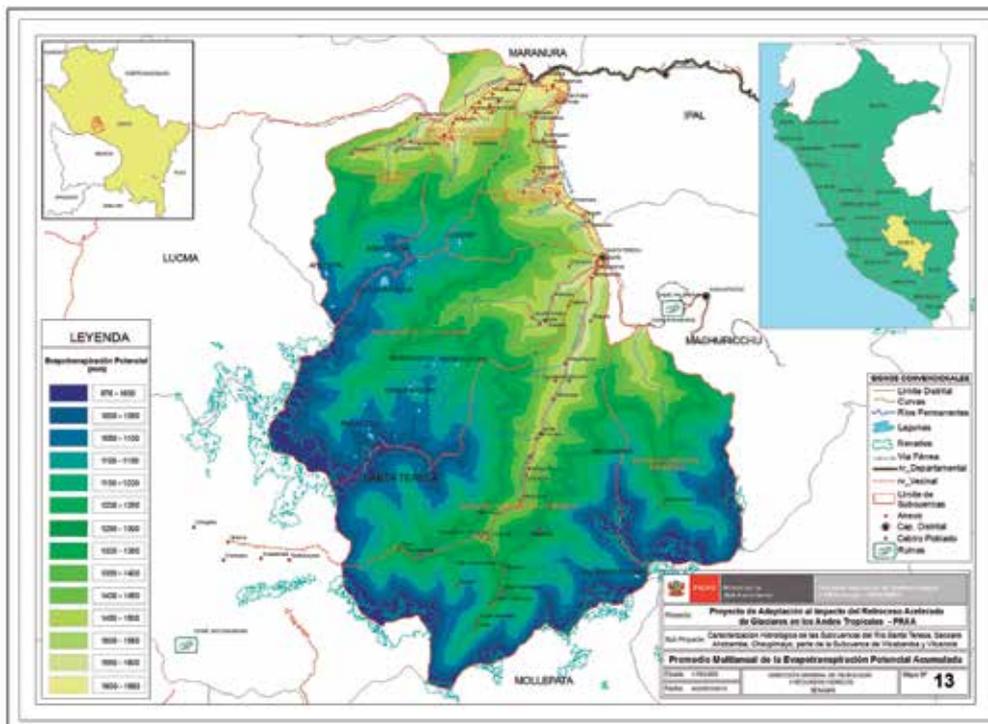


Figura 3.16 Mapa de evapotranspiración potencial anual (1969-2009). Fuente: Elaboración propia

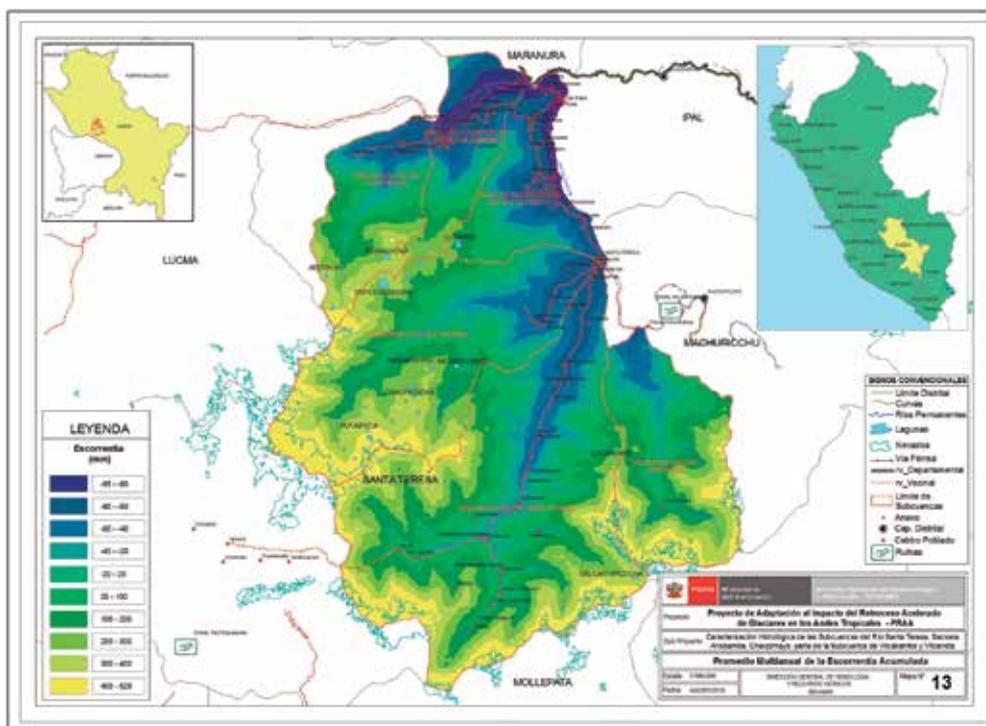


Figura 3.17 Mapa de escorrentía anual (1969-2009). Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Disponibilidad hídrica futura

La disponibilidad de agua futura ha sido analizada exclusivamente para la cuenca del río Santa Teresa, de interés para los objetivos del PRAA. La oferta hídrica ha sido estimada mediante la utilización del modelo hidrológico GR2m con un procedimiento similar al desarrollado en la estimación de la oferta hídrica presente, donde se utiliza como variables de entrada la precipitación proyectada para el periodo 2030-2039 y la evapotranspiración obtenida por el método de Hargreaves Samani, que utiliza como insumo la temperatura máxima y mínima, proyectada por el escenario climático para el mismo periodo.

El modelo climático utilizado es el MACG<sup>16</sup> TL959L60 MRI/JMA del Instituto de Investigación de Meteorología y la Agencia Meteorológica de Japón. Presenta un truncamiento de 959 con una grilla gaussiana lineal TL959 que corresponde a una resolución horizontal del 20 km, actualmente es la resolución más alta de los

MACG utilizados en los experimentos de calentamiento global.

#### 3.2.1 Escenarios climáticos a nivel de cuenca

Los escenarios climáticos fueron generados por el SENAMHI a nivel de la cuenca del Urubamba y bajados al centroide de la cuenca del río Santa Teresa mediante interpolación, se determinó la climatología de la cuenca para el periodo 2030-2039 y el escenario A1B.

##### 3.2.1.1 Precipitación

En la Tabla 3.15 y Figura 3.18 se presenta los valores referentes al escenario de precipitación en la cuenca del río Santa Teresa para el periodo 2030-2039; se observa una disminución de 5,1 % de la precipitación anual respecto al periodo de referencia (1991-2008), lo que en términos absolutos equivale a una reducción de la lámina precipitada anual de 64,2 mm.

Tabla 3.15 Precipitación mensual de referencia (mm) y el escenario proyectado para la subcuenca del río Santa Teresa

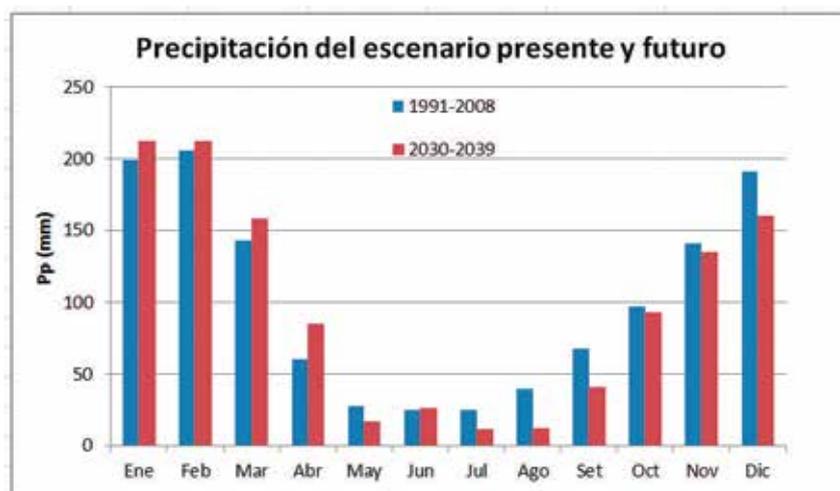
Periodo	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
1991-2008	199,2	206	142,7	60,5	27,4	25,2	25,1	39,8	68,1	97,1	141	191,2	1223,2
2030-2039	212,3	211,8	157,9	84,6	16,6	26	11,5	11,9	40,7	92,6	134,7	160,2	1160,8
Variación (%)	6,58	2,82	10,65	39,83	-39,42	3,17	-54,18	-70,10	-40,23	-4,63	-4,47	-16,21	-5,11

Fuente: Elaboración propia

A nivel mensual, se puede observar un comportamiento diferenciado de la precipitación futura en relación al periodo de referencia; el mes que presenta el mayor incremento corresponde a abril, con 39,8 %; que en

términos absolutos equivale a un incremento de 24,1 mm. Por otro lado, el mes que presenta disminución más importante corresponde a agosto, con un 70 %; que equivale a 27,9 mm de reducción de la precipitación.

16. Modelo Atmosférico de Circulación General



**Figura 3.18** Gráfico de barras de la precipitación mensual del escenario presente (1991-2008) y futuro (2030-39) en la cuenca del río Santa Teresa. **Fuente:** Elaboración propia

Cuando se analiza estacionalmente la precipitación, proyectada al 2030-39, se observa, Tabla 3.16, que la precipitación acumulada del trimestre JJA (periodo de estiaje) experimentaría cambios más relevantes, con una disminución de -45,17 % con respecto al escenario de referencia; lo cual tendría un fuerte impacto en los

caudales de estiaje de la cuenca del río Santa Teresa. En el trimestre húmedo DEF se observa una disminución leve de la precipitación del orden de -2 %; mientras que para el trimestre MAM la precipitación experimentaría un incremento de 12,3 % con respecto al escenario de referencia.

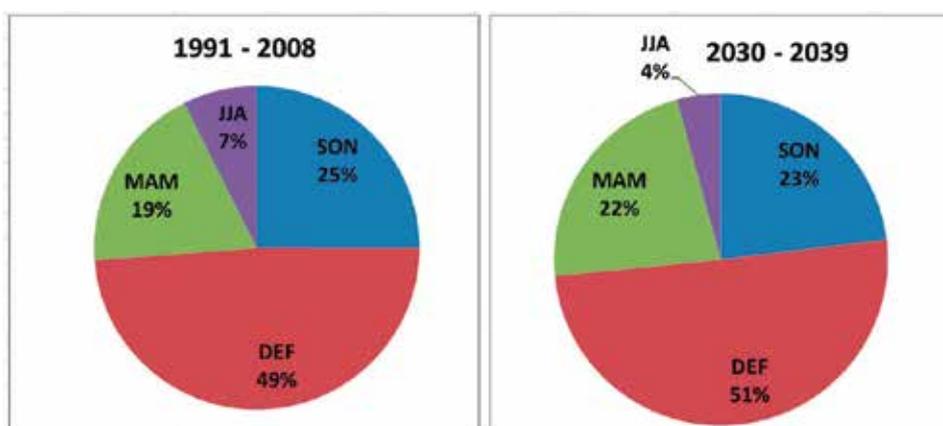
**Tabla 3.16** Cambios estacionales (%) de la precipitación por trimestre

Periodo	SON	DEF	MSM	JJA
1991-2008	306,2	596,4	230,6	90,1
2030-2039	268	584,3	259,1	49,4
Variación (%)	-12,48	-2,03	12,36	-45,17

**Fuente:** Elaboración propia

La distribución estacional de la precipitación anual para el escenario 2030-2039, que se ilustra en la Figura 3.19, indica que la concentración de lluvias mantiene su ciclo estacional; es decir, mayor precipitación en el trimestre DEF y menor en el trimestre JJA. Sin embargo, se observa

variaciones en la magnitud de la distribución de lluvias: un incremento de la concentración de lluvias de 2 % para el trimestre DEF y 3 % para el trimestre MAM; para los trimestres JJA y SON se esperaría una disminución de la concentración de lluvias de -3 % y -2 %, respectivamente.



**Figura 3.19** Distribución estacional de la precipitación anual para el periodo presente (1991-2008) y el escenario proyectado (2030-39). **Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.1.2 Temperatura del aire

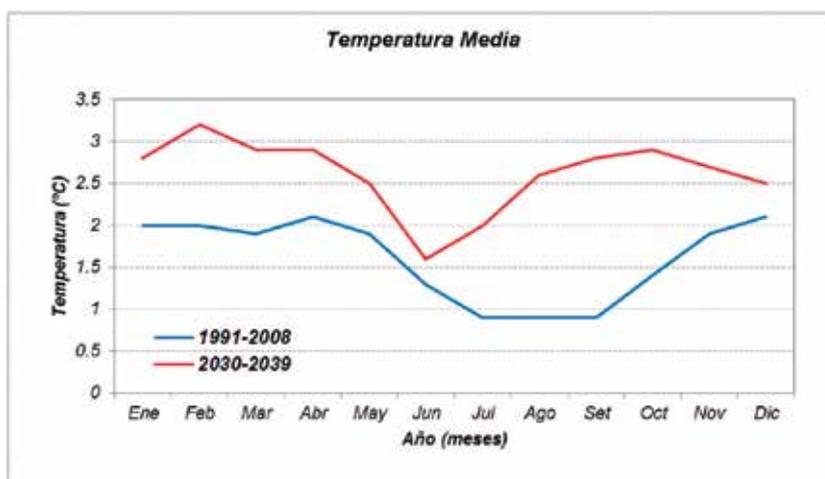
Para el caso de la temperatura del aire, el escenario proyectado para la década 2030-39, se observa un

incremento de 1 grado en la temperatura media anual; a nivel mensual se observa que el incremento de la temperatura se encuentra comprendido entre 0,3 °C en el mes de junio y 1,9 °C en el mes de setiembre.

**Tabla 3.17** Temperatura media mensual (°C) del escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa

Periodo	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
1991-2008	2,0	2,0	1,9	2,1	1,9	1,3	0,9	0,9	0,9	1,4	1,9	2,1	1,6
2030-2039	2,8	3,2	2,9	2,9	2,5	1,6	2,0	2,6	2,8	2,9	2,7	2,5	2,6
Variación (°C)	0,80	1,20	1,00	0,80	0,60	0,30	1,10	1,70	1,90	1,50	0,80	0,40	1,00

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.20** Ciclo anual de la temperatura media mensual para el periodo de referencia y el escenario proyectado 2030-2039. **Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.1.3 Escenarios de disponibilidad hídrica

Respecto a la lámina de escorrentía anual, Tabla 3.18, se observa que esta disminuiría en un 41,1 % con respecto al escenario de referencia (1991-2008), lo que significa pasar de 1119 mm a 659 mm, resultados bastantes críticos considerando que la precipitación sólo disminuiría un 5,1 %. A nivel mensual, observamos que los valores generados muestran un rango de variabilidad de 9,7 mm a 137,7 mm; valores que se encuentran por debajo del período de referencia. El mayor déficit se registraría en mayo con 72 % y el menor en enero con 27,5 %.

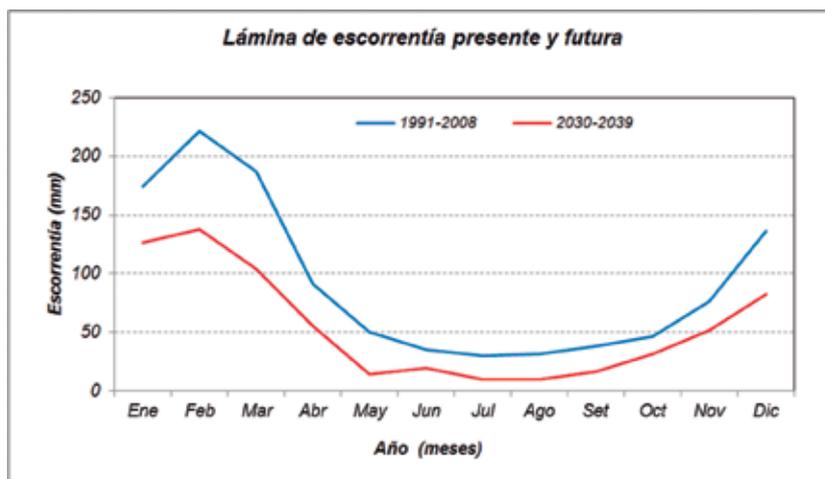
De los parámetros de calibración del modelo se observa que los parámetros vinculados a la fusión glaciaria se encuentran en sus límites superiores, y no obstante a ello, en la calibración no se lograron índices de optimización fiables.

Otro elemento que se debe tener en cuenta es la cantidad de acuíferos kársticos de la zona que influye en los escurrimientos en los meses secos, además son reservorios de agua.

**Tabla 3.18** Lámina de escorrentía mensual (mm) del escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa

Periodo	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
1991-2008	174,5	221,4	187,3	91,7	50,4	35,5	29,8	31,6	38,1	46,6	76,1	136,1	1119
2030-2039	126,5	137,7	104,4	55,1	14,1	19,3	10,1	9,7	16,6	31,1	51,8	82,6	659
Variación (%)	-27,5	-37,8	-44,3	-39,9	-72	-66,1	-69,3	-69,3	-56,4	-33,3	-31,9	-39,3	-41,1

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.21** Gráfico de la lámina de escorrentía del periodo de referencia y del escenario proyectado. **Fuente:** Elaboración propia

Con respecto al comportamiento estacional de la lámina de escorrentía se verifica que para el trimestre JJA se produciría el mayor déficit en la disponibilidad hídrica con

una disminución de  $-59,7\%$  con respecto al trimestre de referencia. El menor déficit hídrico se produciría en el trimestre DEF con una anomalía de  $-34,8\%$ .

**Tabla 3.19** Lámina de escorrentía (mm) trimestral para el escenario de referencia y el escenario proyectado en la subcuenca del río Santa Teresa

Periodo	SON	DEF	MSM	JJA
1991-2008	160,8	532	329,4	96,9
2030-2039	99,5	346,8	173,6	39,1
Variación (%)	-38,12	-34,81	-47,30	-59,65

**Fuente:** Elaboración propia

Es importante indicar que en los cálculos anteriores no se toma en cuenta el 39,4 % de aporte del suelo (partiendo de la hipótesis que esta no cambia en porcentaje durante el paso del tiempo); al momento que se toma en cuenta

este factor, la lámina anual para el periodo 2030-2039 es de 883,2 mm y representa una pérdida de 21,1 %. Tabla 3.20.

**Tabla 3.20** Lámina de escorrentía mensual (mm) del escenario de referencia y el escenario proyectado considerando aporte del suelo

Periodo	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
1991-2008	174,5	221,4	187,3	91,7	50,4	35,5	29,8	31,6	38,1	46,6	76,1	136,1	1119
2030-2039	169,5	184,5	139,9	73,8	18,9	25,9	13,5	13,0	22,3	41,7	69,5	110,7	883,2
Variación (%)	-2,87	-16,7	-25,3	-19,5	-62,5	-27	-54,7	-58,9	-41,5	-10,5	-8,67	-18,7	-21,1

**Fuente:** Elaboración propia

Para este estado hidrológico, el déficit hídrico se mantiene de manera similar al resultado anterior, pero la magnitud disminuye; en los meses de mayor y menor déficit, este baja de  $-72\%$  a  $62,5\%$  en el mes de mayo y de  $-27,5\%$  a  $2,9\%$  en el mes de enero, respectivamente.

lámina de escorrentía anual en  $-21\%$ , resultaría el más apropiado para la subcuenca del río Santa Teresa, ya que los cambios en la precipitación proyectados para el mismo periodo no indican una disminución de la precipitación anual con características extremas.

Este nuevo escenario de disponibilidad hídrica proyectado para el periodo 2030-39, con una disminución de la

# Conclusiones y Recomendaciones

- Se ha realizado la caracterización del escurrimiento superficial de las subcuencas de los ríos Aobamba, Santa Teresa, Sacsara, mediante la metodología del balance hídrico superficial, con un enfoque semiespacializado, lo cual ha permitido tener una representación a detalle de las principales variables del balance hídrico: Precipitación, evapotranspiración y escurrimiento.
- La metodología utilizada permite obtener de manera automática los valores medios areales de las variables climáticas en las unidades hidrológicas de interés.
- La información hidroclimática a nivel de las subcuencas ha sido generada a partir de la información climática regional (grandes cuencas de los ríos Pampas, Apurímac y Urubamba), para lo cual se generaron modelos de regresión lineal múltiple que permiten representar las variables del clima en función a las características topográficas de las cuencas.
- En la subcuenca del río Aobamba el caudal fluctúa entre 0,5 y 20,0 m<sup>3</sup>/s, y alcanza en promedio un módulo de 5,7 m<sup>3</sup>/s.
- Para la subcuenca del río Santa Teresa, el caudal fluctúa entre 1,3 y 40,3 m<sup>3</sup>/s, alcanzando en promedio un módulo de 10,9 m<sup>3</sup>/s.
- Para la subcuenca del río Sacsara, el caudal fluctúa entre 0,8 y 29,6 m<sup>3</sup>/s, y alcanza en promedio un módulo de 8,0 m<sup>3</sup>/s.
- Para la subcuenca del río Chaupimayo, el caudal fluctúa entre 0,3 y 9,6 m<sup>3</sup>/s, y alcanza en promedio un módulo de 2,4 m<sup>3</sup>/s.
- Para el caso de Santa Teresa la serie observada podría presentar valores incoherentes durante el periodo de calibración debido a que fue generada por un modelo hidrológico puro (no considera los acuíferos kársticos y los glaciares), y además durante el periodo de calibración genera caudales difíciles de simular, por lo tanto la simulación de Santa Teresa o de su serie considerada como "observada" deben ser revisadas o replanteadas debido a que presentarían graves errores cuando se analizan los escenarios generados.
- El régimen de precipitación en la subcuenca, presenta una disminución de 5,1 % a nivel anual. A nivel mensual, el mayor incremento se presenta en abril con 39,8 % (24,1 mm), mientras que en agosto se registra una disminución de 70,1 % (27,9 mm).
- A nivel estacional se ha determinado dos periodos característicos en función del aporte de la precipitación en la subcuenca del río Santa Teresa:
  - a. Periodo húmedo, corresponde al intervalo mensual desde noviembre hasta abril; se registra un incremento de 2,2 %, con respecto al valor referencial.
  - b. Periodo seco, corresponde al intervalo mensual desde mayo hasta octubre. Registra un descenso de 29,5 %, en agosto mayor disminución.
- Con referencia a la temperatura del aire, se aprecia un incremento uniforme a lo largo del año, aunque se observa un mayor incremento en el período de julio a octubre; y un menor aumento en diciembre. A nivel anual el incremento es del orden de 62,5 %.
- En lo referente al análisis estacional, para ambos periodos (húmedo y seco), se registra un incremento de 41,7 y 97,3 %, debido principalmente al incremento de la temperatura durante el período julio a octubre.
- A nivel de escurrimiento superficial, a nivel mensual se registra una variabilidad de 9,7 a 137,7 mm; valores que se encuentran por debajo del período de referencia. El mayor déficit se registra en mayo con 72 % y el menor en enero con 27,5 %.
- Santa Teresa tiene una disminución de 41 %, para el escenario 2030-2039, lo cual es una pérdida de lámina importante (no considera el agua del suelo); considerando el agua del suelo esta pérdida se reduce a 21 %. Un análisis más detallado de este resultado sería muy complejo, debido a las condiciones de los datos (todos generados) y al sistema hidrológico de la cuenca (lluvia-karts-glaciares).
- La cuantificación sistemática del escurrimiento superficial en las microcuencas de estudio permitirá validar los mapas de escorrenría superficial generados. Por otro lado esta información de caudales permitirá conocer la contribución glaciaria al escurrimiento total de las microcuencas, porque la metodología del balance hídrico no permite tener este tipo de discretización del escurrimiento.
- La instalación de tres estaciones hidrométricas en puntos estratégicos de la cuenca del río Santa Teresa: una lo más cerca del nevado Salkantay, otra en la parte media a la altura del sitio conocido como La Playa y otra en la parte baja, aguas arriba de la confluencia con el río Sacsara.
- La instalación de por lo menos una estación climática en la cuenca alta para poder ajustar los datos de precipitación y temperatura de la cuenca generados vía interpolación.
- Medir una serie de por lo menos un año de datos observados; lo cual es necesario para realizar una aproximación al comportamiento hídrico de cada cuenca.

# Referencias Bibliográficas

BCOM (1998). Estudio Hidrológico-Meteorológico del Perú con fines de evaluación y pronósticos del fenómeno El Niño para prevención y mitigación de desastres. Lima.

Baker, D., Escher-vetter, H., Moser, H., Oerter, H. & Reinwarth, O. (1982). "A glacier discharge model based on results from field studies of energy balance, water storage and flow." International Association of Hydrological Sciences 138.

IPCC, (2007): Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). C. U. Press. Cambridge: 944.

Jasson, P., Hock, R. & Schneider, T. (2003). "The concept of glacier storage: a review." Journal of Hydrology: 116-129.

L'Hôte, Y., Chevallier, P., Coudrain, A., Lejeune, Y. & Etchevars, P. (2005). "Relationship between precipitation phase and air temperature: comparison between the Bolivian Andes and the Swiss Alps." Hydrological Sciences Journal 50 (6): 989-997.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." Journal of Hydrology 10: 282-290.

Pouyaud, B., Zapata, M., Yerrén, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W. & Ribstein, P. (2005). "Devenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche." Hydrological Sciences Journal 50: 999-1022.

Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M. & Musy, A. (2005). "A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments." Hydrology and Earth System Sciences 9: 95-109.

Schweblin, M. (2004). Modélisation Conceptuelle de dynamiques lacustres sur l'altiplano andin. Grenoble, Institut de Recherche pour le Développement: 41.

# Anexos



Foto 3.1 Vista frontal del nevado Salkantay. Fuente: Senamhi

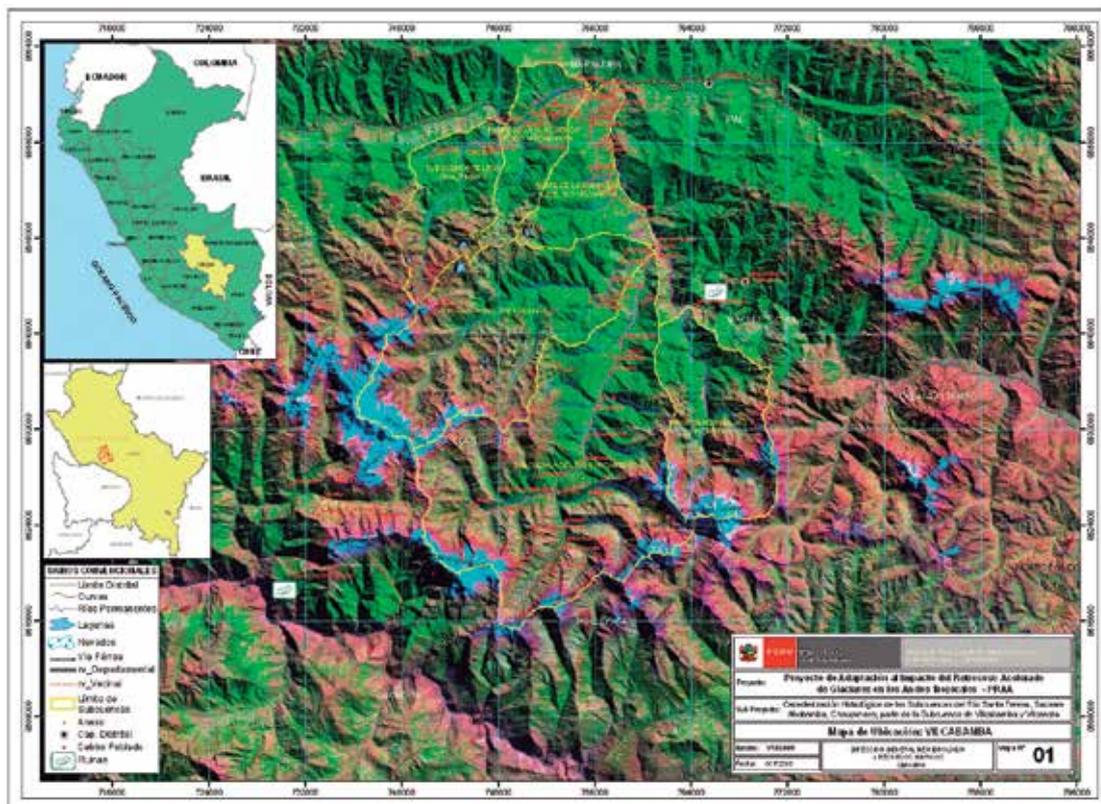
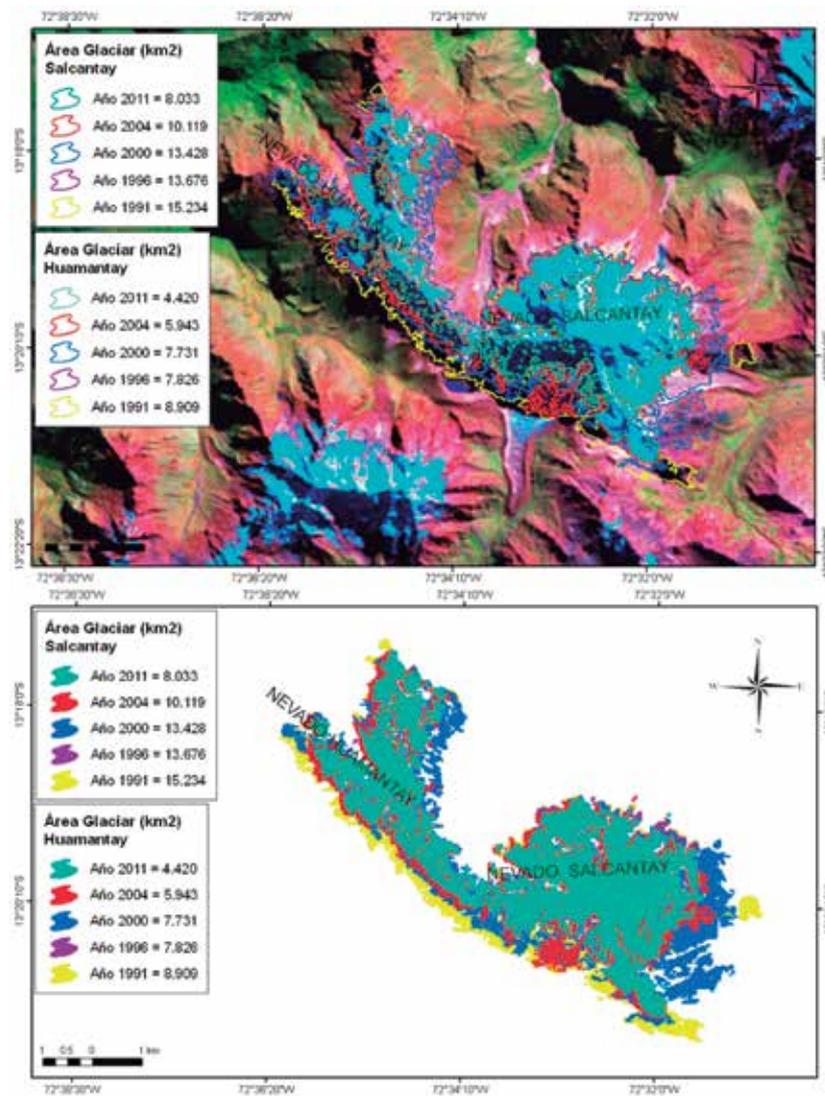


Figura 3.A1 Vista satelital de las cuencas de estudio. Fuente: Elaboración propia



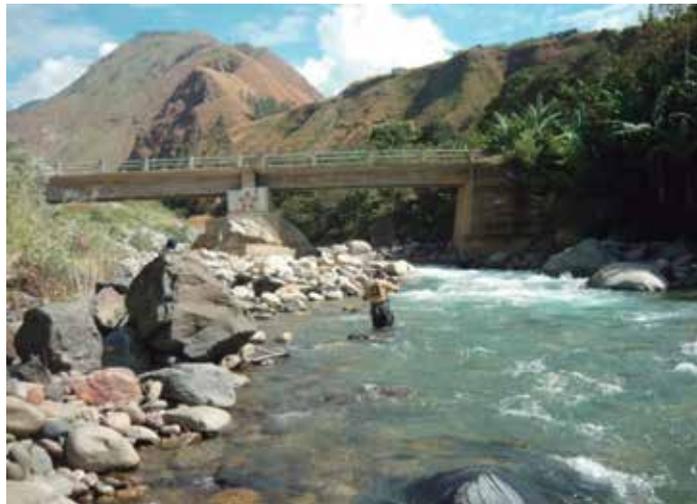
**Figura 3.A2** Superficie glaciar para diferentes períodos en el nevado Salkantay. **Fuente:** Elaboración propia



**Foto 3.2** Aforo por vadeo en río Aobamba (08/07/2010),  $Q = 3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ . **Fuente:** Senamhi



**Foto 3.3** Aforo por vadeo en río Sacsara (08/07/2010),  $Q = 9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . **Fuente:** Senamhi



**Foto 3.4** Aforo por vadeo en río Santa Teresa (08/07/2010),  $Q = 9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . **Fuente:** Senamhi



**Foto 3.5** Estación hidrológica instalada en el sector la Playa, cuenca media del río Santa Teresa. **Fuente:** Senamhi

# Capítulo 4

## CARACTERIZACIÓN Y APTITUD AGROCLIMÁTICA, IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN LOS CULTIVOS DE CAFÉ, GRANADILLA Y PALTO EN LA SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO

### 4.1 Caracterización y aptitud agroclimática

#### 4.1.1 Agricultura y producción

La mayor parte de la subcuenca de Santa Teresa forma parte del distrito del mismo nombre, por lo tanto es conveniente concentrarse en abordar los aspectos agropecuarios que forman parte de este distrito como representativo de la subcuenca de Santa Teresa.

La agricultura es una de sus principales actividades (INEI, 1994), a pesar de registrar mayor superficie

no agrícola (91,1 %) y con predominancia de pastos naturales no manejados. La superficie agrícola corresponde al 8,9 % del área total, con agricultura bajo secano (98,1 %) y principalmente tierras de labranza (Tabla 4.1). Dada la diversidad de pisos ecológicos y microclimas existentes, el distrito de Santa Teresa presenta por un lado pequeños sistemas de agricultura con escasa capacidad de producción y básicamente de autoconsumo; así como cultivos orientados al mercado nacional e internacional.

**Tabla 4.1** Estructura de la superficie agrícola en el distrito de Santa Teresa, Cusco

Distrito Santa Teresa	Superficie (ha).	Porcentaje (%)
<b>Total</b>	<b>71 429,29</b>	<b>100,00</b>
<b>Superficie agrícola</b>	<b>6 349,35</b>	<b>8,90</b>
Bajo riego	121,43	1,90
Bajo secano	6 227,92	98,10
- Tierras de labranza	3 358,20	52,90
- Cultivos permanentes	1 047,92	16,50
- Cultivos asociados	1 943,21	30,60
<b>Superficie no agrícola</b>	<b>65 074,94</b>	<b>91,10</b>
Pastos naturales	54 858,95	84,30
a. Manejados	339,78	0,60
b. No manejados	54 519,17	99,40
Montes y bosques	5 957,37	9,20
Otra clase de tierra	4 258,62	6,50

**Fuente:** INEI (1994). Elaboración propia

De acuerdo al Censo del INEI (1994), los principales cultivos transitorios fueron el maíz amiláceo, yuca, papa, granadilla y plátano, totalizando el 87 %. Dentro de los cultivos permanentes se registran el café, como

principal actividad agrícola en la zona (75,72 %), seguido de la coca (16,86 %), el achiote y el palto (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2** Tamaño de las unidades agropecuarias y principales cultivos transitorios y permanentes en el distrito de Santa Teresa, Cusco

<b>Distrito Santa Teresa</b>			
<b>Principales cultivos transitorios</b>			
Cultivo	Unidad Agropecuaria	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Maíz amiláceo	464	295,20	29,40
Yuca	311	123,44	12,30
Papa	239	161,30	16,10
Granadilla	174	176,08	17,50
Uncucha	129	29,61	2,90
Plátano o guineo	79	117,72	11,70
<b>Principales cultivos permanentes</b>			
Cultivo	Unidad Agropecuaria	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Café	494	790,70	75,72
Coca	230	176,01	16,86
Vergel frutícola	47	38,81	3,72
Achiote	20	14,70	1,41
Palto	10	5,50	0,53

**Fuente:** INEI (1994). Elaboración propia

#### 4.1.2 Cultivos priorizados

Para el estudio agroclimático de la subcuenca de Santa Teresa se priorizaron los cultivos de café, granadilla y palto, seleccionados en función a la importancia socioeconómica en la zona.

#### 4.1.3 Caracterización agroclimática de los cultivos

En este punto se presenta los aspectos fenológicos y las condiciones del suelo donde se establecen los cultivos, así como un análisis del calendario agrícola de las últimas campañas. Información que permitirá mayor comprensión de la interrelación del clima con los cultivos priorizados.

##### 4.1.3.1 Fenología de los cultivos

###### Cultivo de café

El rango altitudinal donde se encuentra ubicado las plantaciones de café permite a los especialistas de la zona diferenciar tres pisos ecológicos donde se produce el cultivo. Los pisos ecológicos se encuentran en la parte baja (1300 a 1500 msnm), parte media (1500 a 1800 msnm) y parte alta (1800 a 2500 msnm). Cada piso ecológico presenta características agroclimáticas muy distintas que hacen que el comportamiento fenológico del cultivo sea muy diferente en ellas.

La etapa de reposo vegetativo se caracteriza porque las yemas vegetativas y florales, ubicadas en el tallo y ramas laterales, se encuentran en estado de latencia. Esta etapa tiene un promedio de duración de 15 a 90

días (90 días en la parte baja, 30 días en la parte media y 15 días en la parte alta) y normalmente coincide con el período de escasa presencia de lluvias en la zona.

La etapa vegetativa ocurre de manera casi simultánea con la etapa reproductiva en la planta de café. Se inicia con el brotamiento de las yemas vegetativas y finaliza cuando los brotes o ramas alcanzan su máximo crecimiento, siendo mayor durante el periodo de lluvias. Esta etapa tiene un promedio de duración de 90 a 120 días.

La etapa reproductiva, en el cultivo de café, presenta dos procesos bien definidos: floración y llenado de frutos. El proceso de floración se inicia con el hinchamiento y posterior brotamiento de las yemas florales y culmina antes del cuajado de frutos. El tiempo promedio de duración de este proceso es de 45 a 75 días.

El proceso de llenado de frutos se inicia inmediatamente después del cuajado y finaliza cuando los frutos alcanzan el máximo tamaño de la variedad. Al final de este proceso, los frutos tienen una coloración verde con una consistencia dura e internamente la semilla se encuentra completamente formada. El tiempo promedio de duración de este proceso es de 120 a 150 días.

La etapa de maduración se caracteriza porque los frutos empiezan a cambiar de consistencia haciéndose cada vez más blandos. Asimismo, la cáscara cambia de coloración hasta alcanzar una tonalidad rojo vinoso (Typica, Catimore, Borbón) o amarillo brillante (Caturra). El promedio de duración de esta etapa varía entre 45 a 60 días (Tabla 4.3).

**Tabla 4.3** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

ETAPAS	SUBETAPAS		DURACIÓN (días)	Fuente de información
	INICIO	FIN		
			15 - 90	
Vegetativa	Yema vegetativa brotada	Máximo crecimiento de los brotes	90 - 120	Entrevista a profesionales y técnicos agropecuarios del Departamento de Desarrollo Económico de la Municipalidad distrital de Santa Teresa (octubre del 2010)
Reproductiva	Yema floral hinchada	Yema floral alargada	10 - 15	
	Yema floral alargada	Botón floral	20 - 30	
	Botón floral	Flor abierta	5 - 10	
	Flor abierta	Flor fecundada	2 - 4	
	Flor fecundada	Cuajado	10 - 15	
Maduración	Cuajado	Fructificación	120 - 150	
	Fructificación	Maduración	46 - 60	

Fuente: Elaboración propia

### Cultivo de granadilla

En la subcuenca de Santa Teresa, la granadilla es una de las alternativas productivas con mayor rentabilidad; siendo la variedad con mayor superficie cosechada la Criolla. Las plantaciones de granadilla se encuentran distribuidas en las microcuencas de Salkantay, Sacsara, Chaupimayo y Aobamba; entre los 2000 a 3000 msnm.

Los especialistas de la zona manifiestan que el comportamiento fenológico de la granadilla, al igual que el café, varía según el piso ecológico donde se encuentra instalado el cultivo. Los pisos ecológicos se encuentran en la parte baja (2000 a 2200 msnm), parte media (2200 a 2600 msnm) y parte alta (2600 a 3000 msnm); siendo esta última, la zona donde se encuentran nuevas plantaciones del cultivo. Estas nuevas áreas de producción están siendo instaladas por los productores porque están percibiendo el efecto del incremento de la temperatura en las partes más bajas.

La etapa de reposo vegetativo da inicio a la campaña agrícola del cultivo, tiene un promedio de duración de 30 a 60 días. El tiempo de duración varía según el piso ecológico: en la parte baja es de 60 días y en la parte media de 30 a 45 días. En la parte alta, la

granadilla no presenta una etapa de descanso porque las condiciones agroclimáticas de la zona favorecen el constante crecimiento y producción del cultivo.

La etapa vegetativa se caracteriza por el brotamiento de las yemas vegetativas, las cuales se encuentran ubicadas en la parte apical de las ramas. Estas yemas durante su crecimiento, en la campaña agrícola actual, darán origen a un nuevo brote; el cual contiene las yemas florales que, una vez desarrolladas, darán origen a nuevos frutos en la siguiente campaña del cultivo. La etapa vegetativa, al igual que la del café, se inicia casi simultáneamente con la etapa reproductiva, siendo el tiempo promedio de duración de 150 a 180 días.

La etapa reproductiva tiene un promedio de duración de 130 a 160 días, siendo la duración del proceso de floración de 50 a 70 días y del proceso de llenado de frutos de 80 a 90 días.

La etapa de maduración se inicia una vez culminado el proceso de máximo llenado del fruto y se caracteriza por el cambio de coloración de la cáscara hasta alcanzar el color típico de la variedad (amarillo claro). Esta etapa tiene un promedio de duración de 15 a 25 días (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

ETAPAS	SUBETAPAS		DURACIÓN (días)	Fuente de información
	INICIO	FIN		
Descanso			30 - 60	
Vegetativa	Yema vegetativa brotada	Máximo crecimiento de los brotes	150 - 180	
Reproductiva	Yema floral hinchada	Botón floral	10 - 15	Entrevista a profesionales y técnicos agropecuarios del Departamento de Desarrollo Económico de la Municipalidad distrital de Santa Teresa (octubre del 2010)
	Botón floral	Cartucho floral	20 - 25	
	Cartucho floral	Flor abierta	5 - 10	
	Flor abierta	Flor fecundada	1	
	Flor fecundada	Cuajado	15 - 20	
	Cuajado	Fructificación	80 - 90	
Maduración	Fructificación	Maduración	15 - 25	

Fuente: Elaboración propia

### Cultivo de palto

En la subcuenca de Santa Teresa, el palto es un cultivo que está teniendo gran expectativa entre los productores, dada la alta demanda de los frutos en los mercados regionales. Las plantaciones de palto se encuentran principalmente ubicadas en las microcuencas de Sacsara y Chaupimayo; en mayor proporción se cultiva el palto Criollo. Sin embargo, en estos últimos años, se han instalado nuevas áreas de producción con cultivares comerciales de palto como Hass y Fuerte.

La etapa vegetativa se caracteriza por el brotamiento de las yemas vegetativas, las cuales se localizan en la parte apical o lateral de las inflorescencias del palto, el tiempo promedio de duración de 120 a 150 días.

La etapa reproductiva, al igual que la del café y granadilla, presenta dos procesos bien definidos:

floración y llenado de frutos. En el proceso de floración, las yemas florales, ubicadas en la parte apical o lateral de los brotes, inician su hinchamiento y posterior brotamiento hasta que finalmente forman las inflorescencias; siendo el tiempo promedio de duración de 30 a 50 días. Una vez que las flores han sido fecundadas, éstas comienzan a desarrollar "pequeños frutitos, los cuales dan inicio al proceso de llenado de frutos. Este proceso tiene un promedio de duración de 90 a 110 días y se caracteriza porque se inicia la acumulación de reservas en los frutos y culmina cuando éstos alcanzan su máximo tamaño.

La etapa de maduración tiene un promedio de duración de 40 a 50 días y se caracteriza porque los frutos tienen el tamaño y color característico de la variedad; así mismo, al igual que el café, la semilla se encuentra completamente formada (Tabla 4.5).

**Tabla 4.5** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

ETAPAS	SUBETAPAS		DURACIÓN (días)	Fuente de información
	INICIO	FIN		
Vegetativa	Yema vegetativa brotada	Máximo crecimiento de los brotes	120 - 150	
Reproductiva	Yema floral hinchada	Máxima elongación de la panícula	15 - 25	Entrevista a profesionales y técnicos agropecuarios del Departamento de Desarrollo Económico de la Municipalidad distrital de Santa Teresa (octubre del 2010)
	Máxima elongación de la panícula	Flor abierta	20 - 30	
	Flor abierta	Cuajado	10 - 20	
	Cuajado	Fructificación	80 - 90	
Maduración	Fructificación	Maduración	40 - 50	

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.3.2 Calendario agrícola

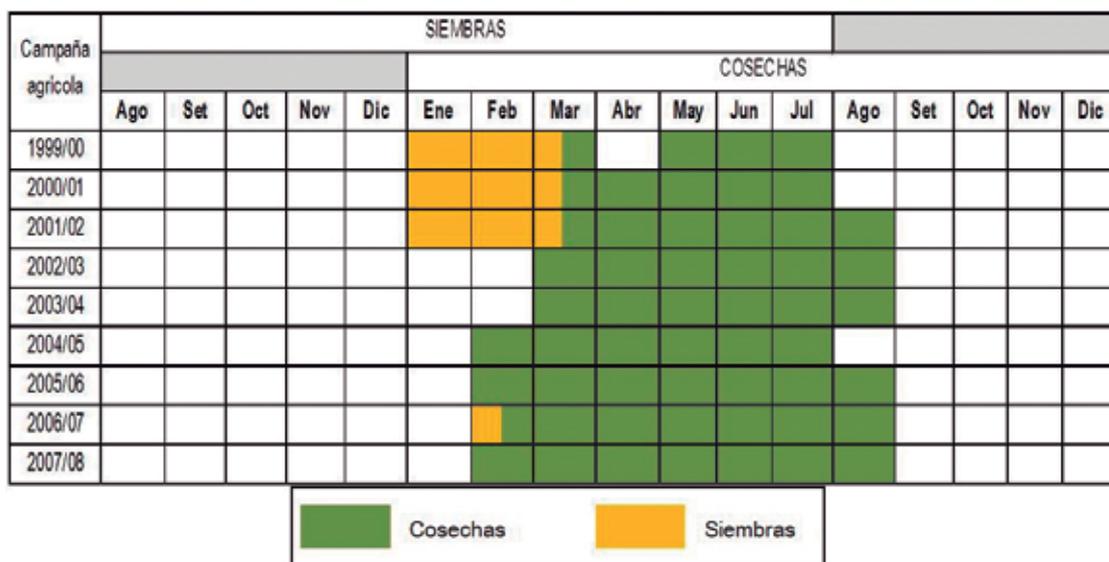
Se muestra el análisis del calendario de siembras y cosechas para los cultivos de café, granadilla y palto en la subcuenca de Santa Teresa, registradas durante las campañas agrícolas 1999/2000 al 2007/2008, a partir de las estadísticas agrarias de la DRA-Cusco (2011).

#### Cultivo de café

La plantación de nuevos campos de producción de café se realiza entre los meses de enero y marzo, según muestra el calendario histórico del cultivo. En el período comprendido entre las campañas 2002/03 al 2005/06 y 2007/08, no se implementaron áreas de producción

posiblemente porque no se produjo plantones en la zona de estudio o no se acondicionó nuevas parcelas para su plantación.

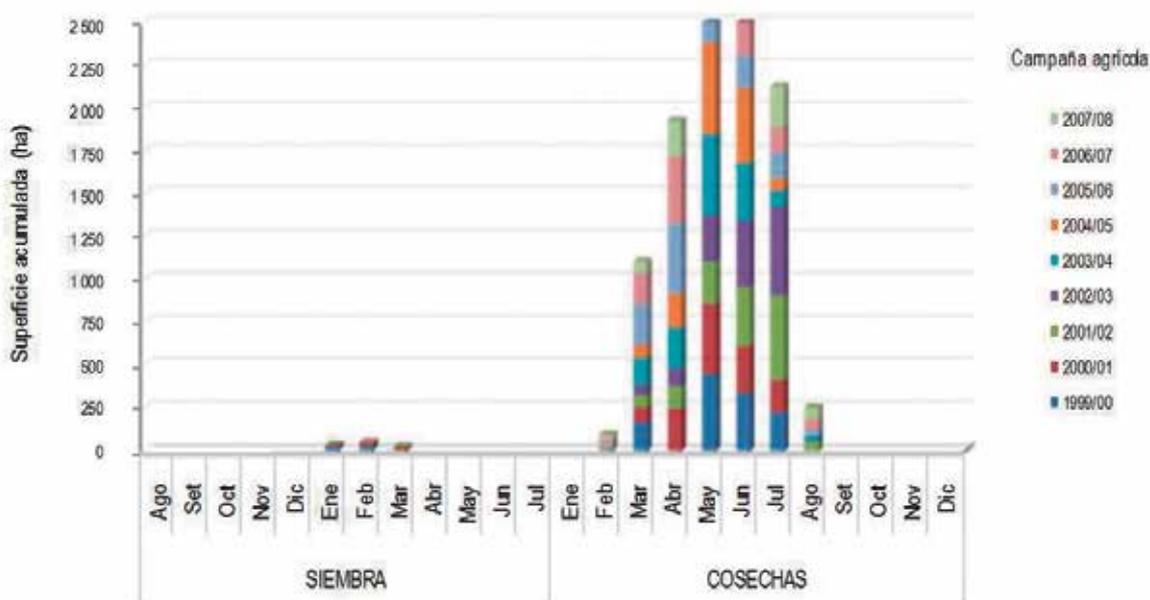
Respecto a la cosecha, esta labor se desarrolló entre los meses de febrero y agosto, con una tendencia, en las últimas cuatro campañas, de adelantar las cosechas en el mes de febrero. La variabilidad en los meses de cosecha está en relación con la época de floración, la cual es muy variable en la subcuenca. Las cosechas tempranas (febrero y marzo) corresponden al café producido en las partes más bajas, y las cosechas tardías (julio y agosto) al café producido en las partes más altas (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

El calendario histórico señala que el 83,8 % (88 ha) de las nuevas áreas de café se han plantado en los meses de enero y febrero. Asimismo, el 97,1 % (11 511,32

ha) de las áreas en producción han sido cosechadas entre los meses de marzo y julio, siendo menor entre febrero y agosto (349,04 ha) (Figura 4.2).

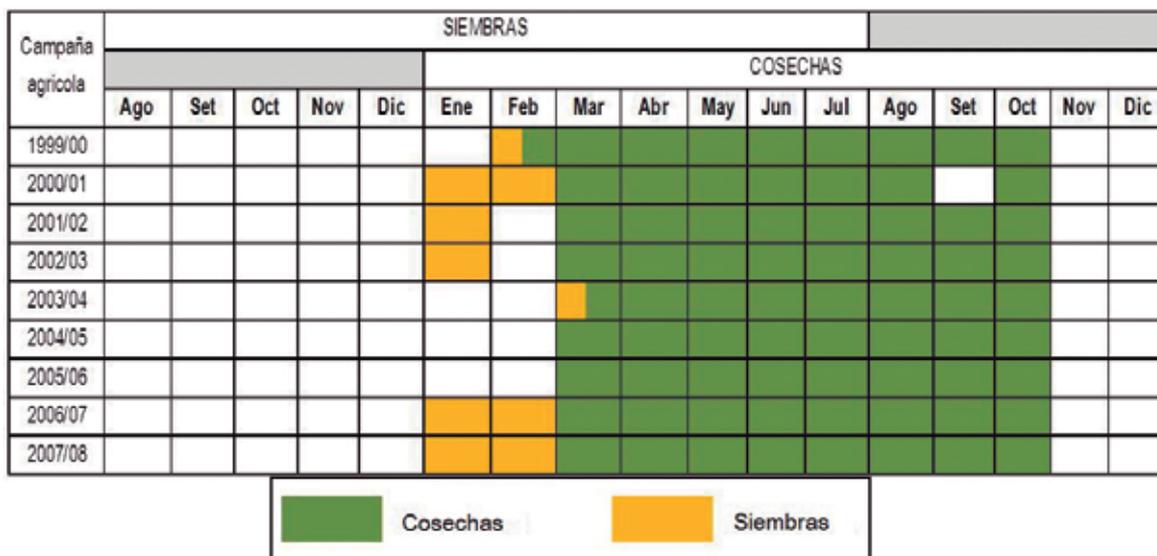


**Figura 4.2** Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

### Cultivo de granadilla

El calendario histórico de siembras y cosechas indica que las nuevas plantaciones de granadilla se han instalado significativamente en los meses de enero y febrero, sólo en la campaña 2003/04 esta labor se ha ejecutado casi a finales del período de lluvias. En las campañas 2004/05 y 2005/06 no se han instalado nuevas áreas de producción.

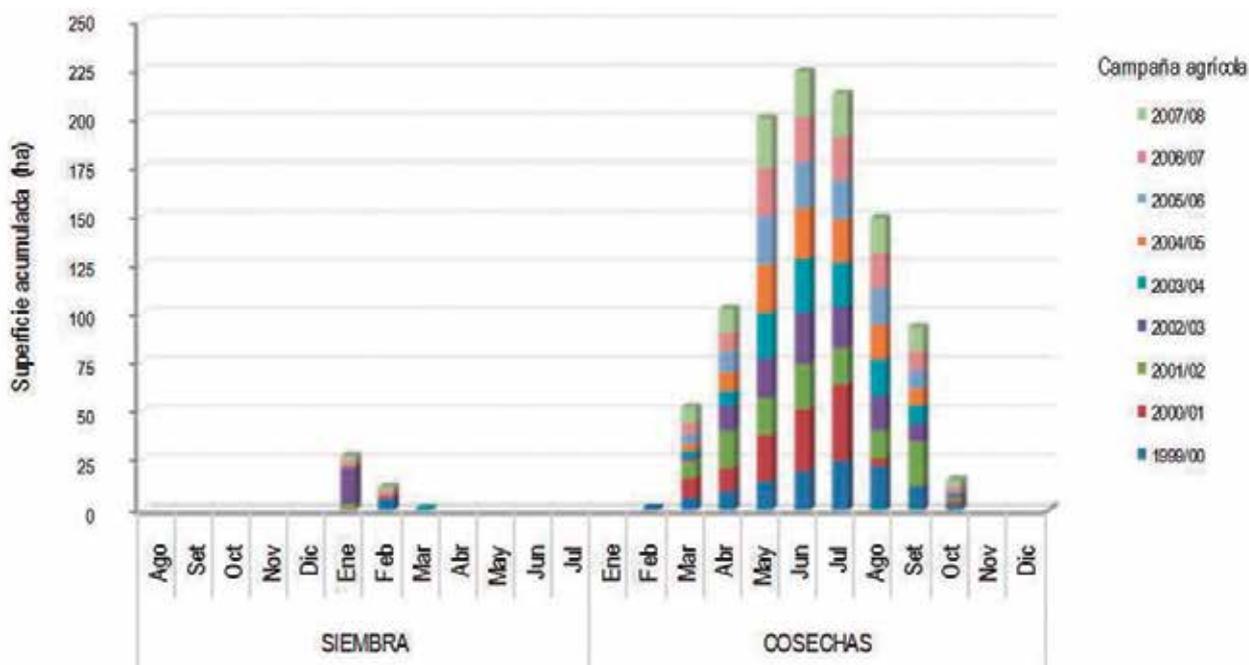
Respecto a la cosecha, el comportamiento es muy parecido entre todas las campañas del calendario histórico, a excepción del mes de setiembre (campaña 2000/01) donde no se ha realizado esta actividad posiblemente porque en este mes aún no habían madurado los frutos. Al igual que el café, la variabilidad en los meses de cosecha depende de la época de floración, ya que este cultivo tiene un comportamiento productivo muy diferente en cada piso ecológico (Figura 4.3).



**Figura 4.3** Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

El calendario histórico indica que el 68,3 % (28 ha) de las nuevas plantaciones de granadilla se han instalado en el mes de enero. En relación a la cosecha,

esta actividad se realiza entre los meses de marzo y setiembre. En este período se han cosechado alrededor del 98,4 % (1039,18 ha) (Figura 4.4).



**Figura 4.4** Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

### Cultivo de palto

El calendario de siembras indica que las plantaciones del palto, en la subcuenca, se han efectuado frecuentemente entre los meses de enero y febrero. El calendario histórico muestra que en la campaña 2000/01 se ha realizado plantaciones casi a finales del período de lluvias, y en las campañas 2001/02 y 2003/04 no se han instalado nuevas plantaciones.

Respecto a la cosecha, el calendario histórico muestra que esta labor es muy variable en el tiempo. Esta labor se realizó a inicios, mediados y finales del período de cosecha, la cual tiene mucha relación con la época de floración que presenta el cultivo en la zona de estudio (Figura 4.5).

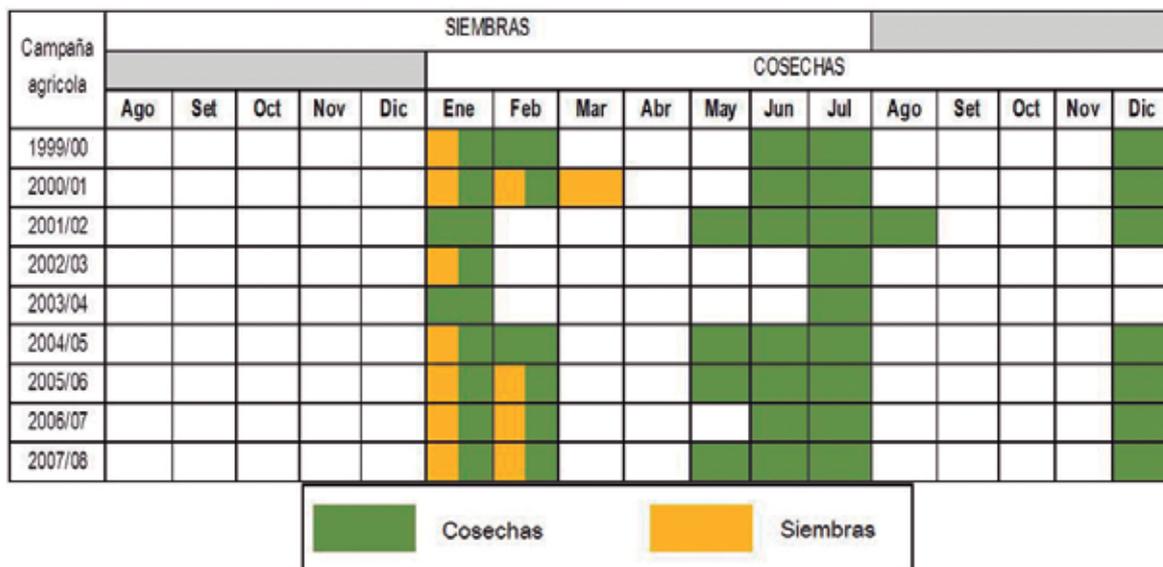


Figura 4.5 Calendario histórico de siembras y cosechas del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

El calendario histórico muestra que el 75 % (15 ha) de las nuevas plantaciones de palto se han realizado en el mes de enero. La labor de cosecha se ha efectuado en tres momentos significativos: a inicios (enero y marzo),

mediados (junio y julio) y finales (diciembre); siendo las primeras cosechas las más significativas (79,2 %) (Figura 4.6).

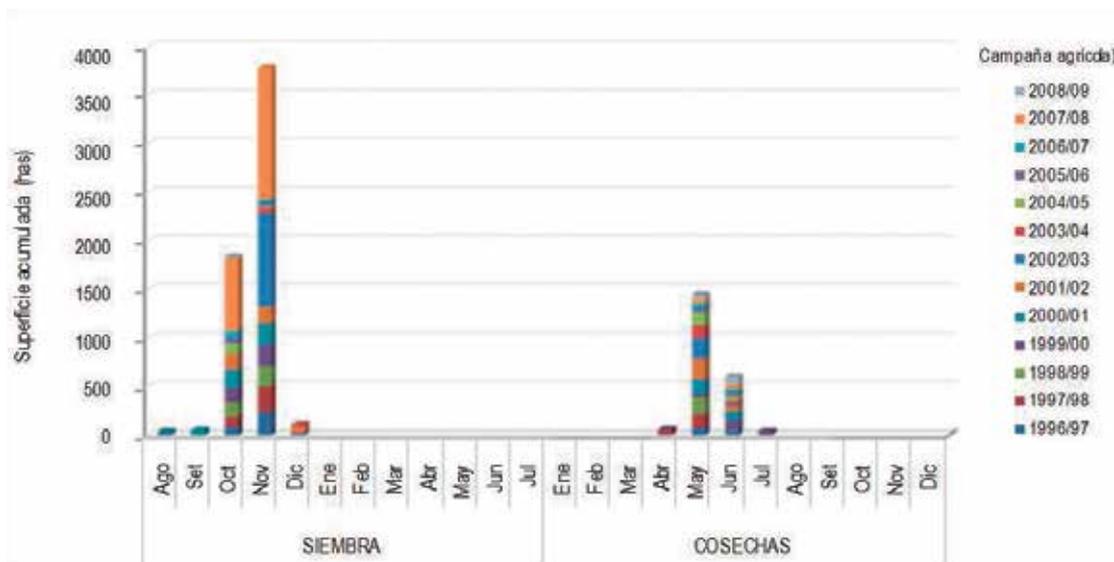


Figura 4.6 Estacionalidad histórica de las siembras y cosechas de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: DRA-Cusco (2011). Elaboración propia

#### 4.1.3.3 Análisis edáfico de la zona de estudio

##### Unidades de suelo

Según Soil Taxonomy y la clasificación de la FAO, se identifican las siguientes unidades taxonómicas de

suelos: Maingo Misceláneo, Saniriato y Vilcabamba-Coline (Altet, 2007; IMA, 2007) (Tabla 4.6).

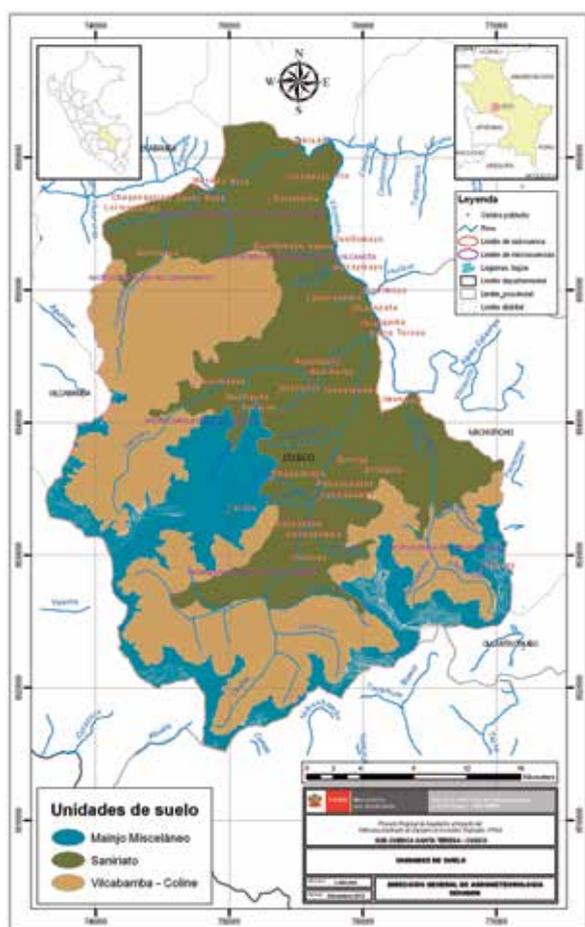
**Tabla 4.6** Clasificación natural de los suelos en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

Suelo	Simbología	Clasificación Soil Taxonomy		Clasificación FAO
		Orden	Suborden	
Maingo misceláneo	Ma - Mi	Entisol Inceptisol	Orthents Tropepts	Regosol Cambisol
Saniriato	Sa	Entisol	Orthents	Regosol
Vilcabamba - Coline	Vil - Co	Entisol	Orthents	Regosol

**Fuente:** Altet (2007), IMA (2007). Elaboración propia

Las unidades de suelo identificadas en los suelos de la subcuenca de Santa Teresa a partir de los estudios

realizados por Altet (2007) e IMA (2007) se representan espacialmente en el Figura 4.7.



**Figura 4.7** Unidades de suelo identificadas en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Altet (2007), IMA (2007). Elaboración propia

La unidad **Maingo Misceláneo** agrupa suelos del Gran Grupo TROPORTHENTS EUTROPEPTS, propio de zonas tropicales y subtropicales. Los suelos presentan desarrollo genético de superficiales a moderadamente profundos, una textura moderadamente gruesa a fina, presenta buen drenaje a algo excesivo. Los contenidos de materia orgánica en la capa superficial es bajo a medio, siendo el contenido de fósforo bajo, mientras que el potasio oscila en niveles bajo a medio. Presenta CIC muy bajo a bajo, saturación de bases de bajo a alto y contenidos de aluminio bajos. La reacción del suelo es de moderadamente ácida a extremadamente ácida, cuya fertilidad de los suelos en la capa superficial es baja

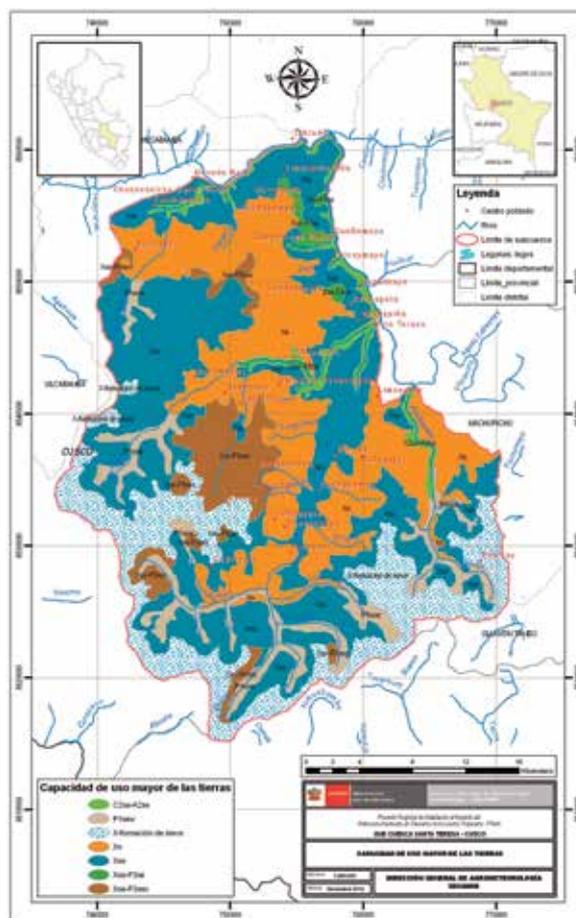
a media. Se localiza sobre las unidades fisiográficas de vertientes de montaña allanada y vertientes de montaña disectada empinada a escarpada, con pendientes de 15 % a 25 % y mayores de 50 %, en las cuencas medias.

La unidad **Saniriato** agrupa suelos del Gran Grupo TROPORTHENTS. La profundidad efectiva es de superficial a moderadamente profundo. Presenta una textura media a fina, con drenaje natural bueno a algo excesivo. El contenido de materia orgánica y potasio son altos, siendo el fósforo medio, con reacción neutra a extremadamente ácida, cuya fertilidad natural de la capa superficial es baja a media, son suelos muy ligeramente salinos y bajos en carbonatos totales, contenido de aluminio bajo. Presenta CIC y saturación de bases alto. Estos suelos se ubican en unidades fisiográficas como colinas altas moderadas y fuertemente disectadas, vertientes de montaña allanada, otras vertientes de montaña disectada empinada a escarpada, con pendientes de 15 % a mayores de 50 %.

La unidad **Vilcabamba-Coline** agrupa suelos del Gran Grupo USTORTHENTS. Tiene una textura moderadamente gruesa a media, moderado a buen drenaje, la profundidad efectiva es moderadamente profundo a muy superficiales. Los contenidos de materia orgánica son de bajo a alto, y alto en fósforo y potasio. Presenta CIC alto, con conductividad eléctrica muy ligeramente salino, cuya saturación de bases es baja y contenido de aluminio que restringe el desarrollo de los cultivos; la reacción del suelo es extremadamente ácida, siendo la fertilidad de los suelos baja en la capa superficial. Vertiente de montaña moderadamente empinada y otras disectadas empinadas a escarpadas con pendientes de 15 a 25 % y mayores de 50 %.

**Capacidad de uso mayor**

La distribución espacial de las capacidades de uso mayor de las tierras en la subcuenca se presenta en la Figura 4.8, fue elaborado tomando como fuente base el estudio de ADERCONSULT SRL (2010) y el Reglamento de clasificación de tierras, según su capacidad de uso mayor establecido por el Ministerio de Agricultura del Perú (MINAG, 2009). Las características del uso mayor de tierras, en cada microcuenca se muestra en la Tabla 4.7.



**Figura 4.8** Capacidad de uso mayor de las tierras en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco.  
**Fuente:** ADERCONSULT SRL (2010). Elaboración propia

**Tabla 4.7** Clasificación de las tierras según su capacidad de uso mayor en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

Microcuenca	Símbolo	Descripción	Área (ha)	Porcentaje (%)
Salkantay	C2se - A2se	Suelos de cultivo permanente, calidad agrológica media, con limitaciones de suelo y erosión asociado a cultivo en limpio.	226.04	0.61
	X Nevados	Formación nival.	8293.30	22.37
	P1seW	Pastos, calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y drenaje.	3735.00	10.08
	Xn	Protección, bosque nublado.	8801.00	23.74
	Xse	Protección por suelo y erosión.	13469.66	36.33
	Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión asociado a pastos de calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo, erosión y clima.	2546.79	6.87
	TOTAL		37071.79	100.00
Sacsara	C2se - A2se	Suelos de cultivo permanente, calidad agrológica media, con limitaciones de suelo y erosión asociado a cultivo en limpio.	965.75	4.21
	X Nevados	Formación nival.	3595.85	14.34
	P1seW	Pastos, calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y drenaje.	1146.57	4.98
	Xn	Protección, bosque nublado.	5594.25	24.33
	Xse	Protección por suelo y erosión.	8565.42	37.26
	Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión asociado a pastos de calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo, erosión y clima.	3421.25	14.88
	TOTAL		22989.09	100.00

Microcuenca	Símbolo	Descripción	Área (ha)	Porcentaje (%)
Vilcanota	C2se - A2se	Suelos de cultivo permanente, calidad agrológica media, con limitaciones de suelo y erosión asociado a cultivo en limpio.	706.07	10.09
	Xn	Protección, bosque nublado.	2695.00	38.53
	Xse	Protección por suelo y erosión	2592.20	37.05
	Xse - F3se	Protección por suelo y erosión asociado a Forestal, calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión.	790.58	11.3
	Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión y asociado a pastos de calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo, erosión y clima.	212.27	3.03
	TOTAL		6996.12	100.00
Vilcabamba	Xn	Protección, bosque nublado.	2150.97	37.14
	Xse	Protección por suelo y erosión	288.88	49.88
	Xse - F3se	Protección por suelo y erosión asociado a Forestal, calidad agrológica baja con limitaciones de suelo y erosión.	98.00	1.69
	Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión y asociado a pastos de calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo, erosión y clima.	341.88	5.89
	TOTAL		5792.65	100.00
Chaupimayo	C2se - A2se	Suelos de cultivo permanente, calidad agrológica media, con limitaciones de suelo y erosión asociado a cultivo en limpio.	331.08	3.95
	P1seW	Pastos, calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y drenaje.	377.27	4.50
	Xn	Protección, bosque nublado.	2453.73	29.30
	Xse	Protección por suelo y erosión.	4888.27	58.38
	Xse - P3sec	Protección por suelo y erosión y asociado a pastos de calidad agrológica baja, con limitaciones de suelo, erosión y clima.	324.66	3.87
	TOTAL		8375.01	100.00
Aobamba	C2se - A2se	Suelos de cultivo permanente, calidad agrológica media, con limitaciones de suelo y erosión asociado a cultivo en limpio.	496.39	3.84
	X Nevados	Formación nival.	3567.82	27.57
	P1seW	Pastos, calidad agrológica alta con limitaciones de suelo, erosión y drenaje.	1402.84	10.84
	Xn	Protección, bosque nublado.	3902.61	30.15
	Xse	Protección por suelo y erosión.	3573.50	27.60
	TOTAL		12943.16	100.00

Fuente: ADERCONSULT SRL (2010). Elaboración propia

#### 4.1.4 Evaluación agroclimática

Se analiza el comportamiento de los principales parámetros climáticos que influyen en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (temperatura del aire y precipitación), así como una evaluación de las sequías agronómicas registradas y la disponibilidad hídrica para los cultivos priorizados.

##### 4.1.4.1 Temperatura del aire

En la Tabla 4.8 se muestran promedios de temperaturas extremas y media del aire, décadas más cálidas y más frías para estaciones climatológicas dentro y fuera del área de estudio; las estaciones de Machu Picchu y Huyro, ubicadas al este/noreste de Santa Teresa y a altitudes de 2563 y 1700 msnm respectivamente,

presentan en promedio temperaturas del aire medias entre 15,5 a 19,4 °C; temperaturas máximas entre 21,3 a 25, 2 °C y mínimas entre 10,8 a 13,6 °C.

Quillabamba y Maranura, ubicadas al norte de Santa Teresa y a 990 y 1500 metros de altitud respectivamente, se presentan como las zonas de mayor temperatura del aire, en promedio con temperaturas medias entre 24,6 y 23,4 °C; temperaturas máximas entre 30,6 y 29,5 °C y mínimas entre 19,0 y 17,4 °C respectivamente.

Santa Teresa, estación instalada recientemente (2010-2012) a 1520 msnm, en promedio, registra una temperatura media de 20,2 °C; máxima de 27,8 °C y mínima de 15,5 °C.

**Tabla 4.8** Valores extremos de temperatura del aire para estaciones meteorológicas dentro y alrededor de la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

Estaciones	Temperatura del aire (°C) Periodo agrícola agosto - julio						
	Media	Máxima	Mínima	Valor y década más cálida		Valor y década más fría	
Machu Picchu 1998-2011	15,5	21,3	10,8	23,0	2º de setiembre	9,4	3º de julio
Huyro 1965-1981	19,4	25,2	13,6	26,4	1º de noviembre	11,1	2º de julio
Quillabamba 1996-2011	24,6	30,6	19,0	32,3	1º de octubre	17,3	3º de julio
Maranura 1970-1978	23,4	29,5	17,4	31,1	3º de octubre	17,4	3º de julio
Santa Teresa 2010-2012	20,2	27,8	15,5	30,0	1º de setiembre	12,4	3º de julio

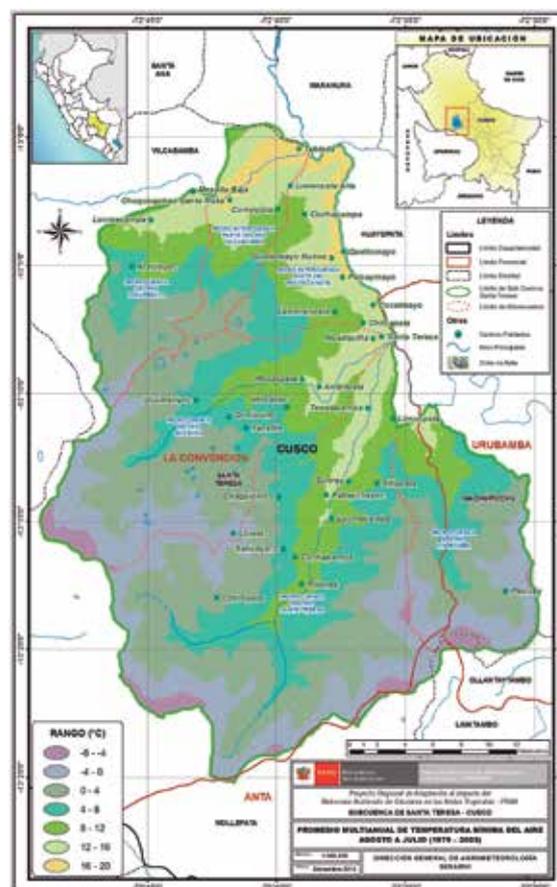
Fuente: Elaboración propia

### Temperatura del aire mínima

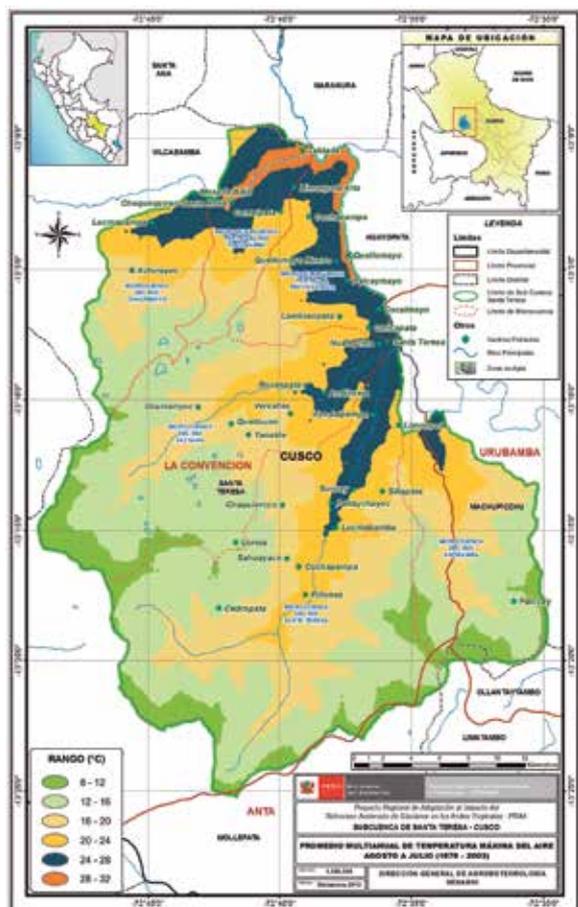
Las partes más bajas de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota también presentan los mayores valores de temperaturas mínimas del aire (16 a 20 °C).

En las partes más bajas de las microcuenca del Sacsara, Salkantay, Aobamba y partes bajas de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota la temperatura mínima del aire varía entre los 12 a 16 °C, temperaturas apropiadas para la producción del café y el palto. En las partes medias y altas las mínimas varían entre los 8 a 12 °C, temperaturas que permiten aún las plantaciones de café; aunque son más apropiadas para el cultivo de granadilla (Figura 4.9).

En altitudes superiores donde se limitan los cultivos permanentes y predominan los cultivos transitorios, las temperaturas mínimas fluctúan entre los 4 a 8 °C, reduciéndose a temperaturas inferiores a 0 °C hacia las partes más elevadas y los nevados.



**Figura 4.9** Distribución espacial de la temperatura del aire mínima promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola. Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.10** Distribución espacial de la temperatura del aire máxima promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola. **Fuente:** Elaboración propia

### Temperatura del aire media

En las partes más bajas de la subcuenca de Santa Teresa donde predominan los cultivos de café y palto, la temperatura media del aire varía entre los 20 a 24 °C; en las partes medias entre 16 a 20 °C y en las partes altas, donde aún se cultiva café y el cultivo de granadilla en mayores extensiones, la temperatura media del aire varía entre 12 a 16 °C (Figura 4.11).

A mayores altitudes donde se ubican principalmente los cultivos de seguridad alimentaria, las temperaturas medias varían entre los 8 a 12 °C, descendiendo a temperaturas medias inferiores a 4 °C en la zona básicamente de pasturas y nevados.

#### 4.1.4.2 Precipitación

##### Inicio del período lluvioso

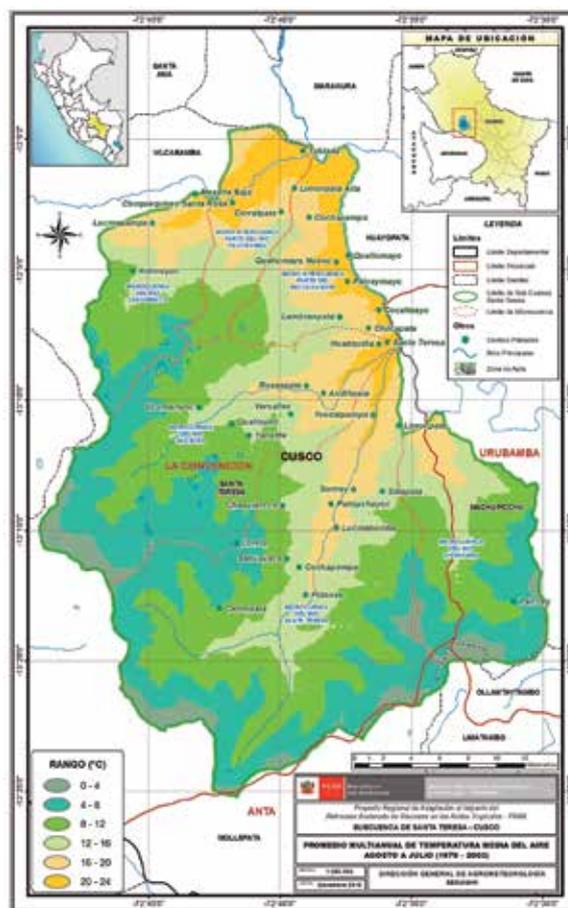
El inicio del período lluvioso en la región amazónica está asociado con el desplazamiento de los sistemas atmosféricos hacia el sur, condiciones que facilitan la intensificación de los vientos del este, el ingreso de aire cálido y húmedo del Atlántico, la generación e intensificación de mecanismos que favorecen la inestabilidad atmosférica y el origen a las primeras lluvias primaverales (Trebejo y Díaz, 1998; SENAMHI, 2013b).

### Temperatura del aire máxima

En la parte más baja de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota se registran las mayores temperaturas máximas del aire (28 a 32 °C).

En las partes más bajas de las microcuencas de Salkantay (Santa Teresa), Sacsara y Aobamba, así como en partes bajas de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota, con predominancia de cultivos de palto y café, las temperaturas máximas varían entre 24 a 28 °C; hacia las partes medias y altas, donde aún se presentan zonas de cultivo de café y con mayores extensiones de granadilla, las temperaturas máximas bordean los 20 a 24 °C en promedio (Figura 4.10).

En zonas de mayor altitud donde las condiciones climáticas y fisiográficas limitan la producción de cultivos permanentes e incrementan los pequeños sistemas de agricultura transitoria básicamente de autoconsumo (papa blanca, papa nativa, oca, olluco, haba, tarwi, olluco), las temperaturas máximas pueden variar entre 16 a 20 °C, reduciéndose a valores inferiores a 16°C en las zonas más elevadas y donde predomina la actividad pecuaria básica.



**Figura 4.11** Distribución espacial de la temperatura media del aire promedio en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco, para el período agrícola. **Fuente:** Elaboración propia

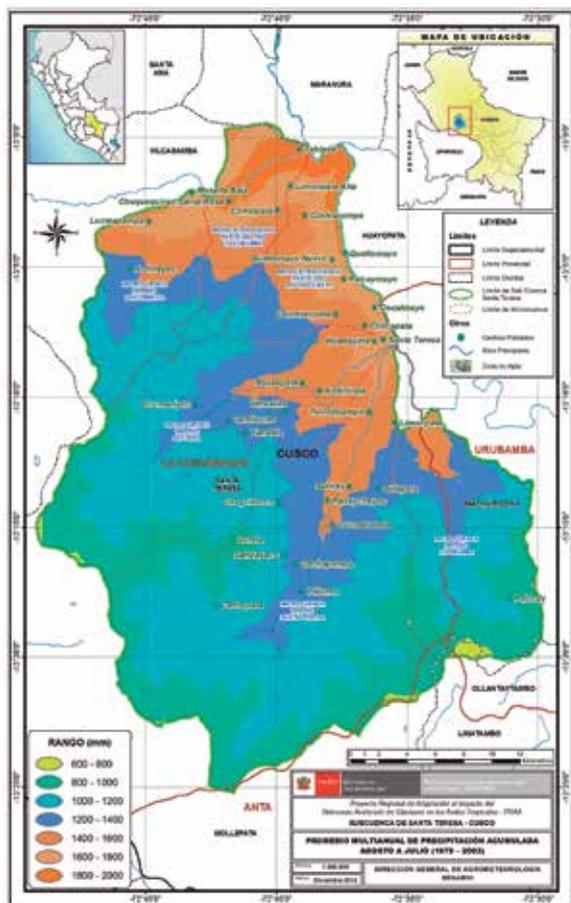
En promedio para las estaciones meteorológicas evaluadas como representativas de la subcuenca de Santa Teresa, la estación lluviosa tiene una duración de 5 a 6 meses, se inicia entre noviembre y diciembre de un año y culmina entre marzo y abril del año siguiente (Tabla 4.9), totalizando durante éste período el 70 % de las lluvias en Machu Picchu y Maranura y entre el 81 % al 88 % en Huyro y Quillabamba.

Para el período agrícola (agosto a julio), las estaciones al noreste de la subcuenca de Santa Teresa (Machu Picchu y Huyro) acumulan mayor precipitación anual y las estaciones ubicadas al norte (Quillabamba y Maranura) menor precipitación.

**Tabla 4.9** Inicio y duración de la estación lluviosa en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	MESES												ESTACIÓN LLUVIOSA	
	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	INICIO FINAL	TOTAL ANUAL (mm)
Machu Picchu	2,7	3,5	7,8	7,9	12,4	16,3	15,2	16,8	8,9	3,4	2,4	2,8	DIC/ABR	2075
Huyro	2,5	3,9	6,2	8,2	12,7	17,6	17,8	15,6	9,2	3,3	1,4	1,6	DIC/ABR	1777
Quillabamba	2,9	3,6	8,7	7,3	12,1	17,1	18,1	16,0	8,4	2,4	1,3	1,9	DIC/ABR	1178
Maranura	3,8	5,5	7,2	9,3	12,8	19,4	14,3	14,5	7,0	2,8	1,5	1,8	NOV/FEB	933

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.12** Distribución de la precipitación total para el período agrícola en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

### Distribución temporal

En la Figura 4.12 se muestra el comportamiento espacial de la precipitación total para el período agosto a julio en la subcuenca de Santa Teresa.

En la parte más baja de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota se registran en promedio las mayores precipitaciones (1800 a 2000 mm); en tanto, en las partes más bajas de las microcuenca de Sacsara, Salkantay, Aobamba y partes bajas de las microintercuenca de los ríos Vilcabamba y Vilcanota, donde se cultivan café y palta, las precipitaciones acumulan entre 1600 a 1800 mm/período, cantidades dentro del rango de precipitación óptima para los cultivos; hacia las partes medias y altas, donde se tienen sembríos de café y grandes extensiones de granadilla, las lluvias totalizan entre 1200 a 1400 mm/período, cantidades dentro del rango mínimo óptimo para ambos cultivos.

En tanto que a mayores altitudes, donde predominan los cultivos transitorios para la seguridad alimentaria se registran cantidades entre 1000 a 1200 mm/período. Cerca a los nevados las precipitaciones son inferiores a los 800 mm.

Con respecto a la variación de la precipitación con la altura, es importante mencionar que no existe una relación universal entre la precipitación anual media y la altitud, dada la complejidad de los procesos que la originan (FAO, 1975), en las zonas tropicales y subtropicales el valor de la precipitación es máximo por debajo de la cima de las montañas, a un determinado nivel, a partir del cual disminuye a medida que se asciende hacia los toques (Barry y Chorley, 1972).

#### 4.1.4.3 Sequías agrícolas

La variación interanual de episodios secos (índices negativos) y húmedos (índices positivos) en Machu Picchu, destacan las sequías agrícolas severas registradas entre los años 2005 al 2009, prolongándose por más de 65 meses e incluyendo las sequías de

las campañas 2004/2005, 2007/2008 y parte de la campaña 2009/2010 donde se observan condiciones extremadamente secas registradas durante los 10 primeros meses del 2009. Destacan asimismo eventos húmedos como los de las campañas 1998/1999, 2002/2003 y la más reciente 2010/2011 (Figura 4.13).

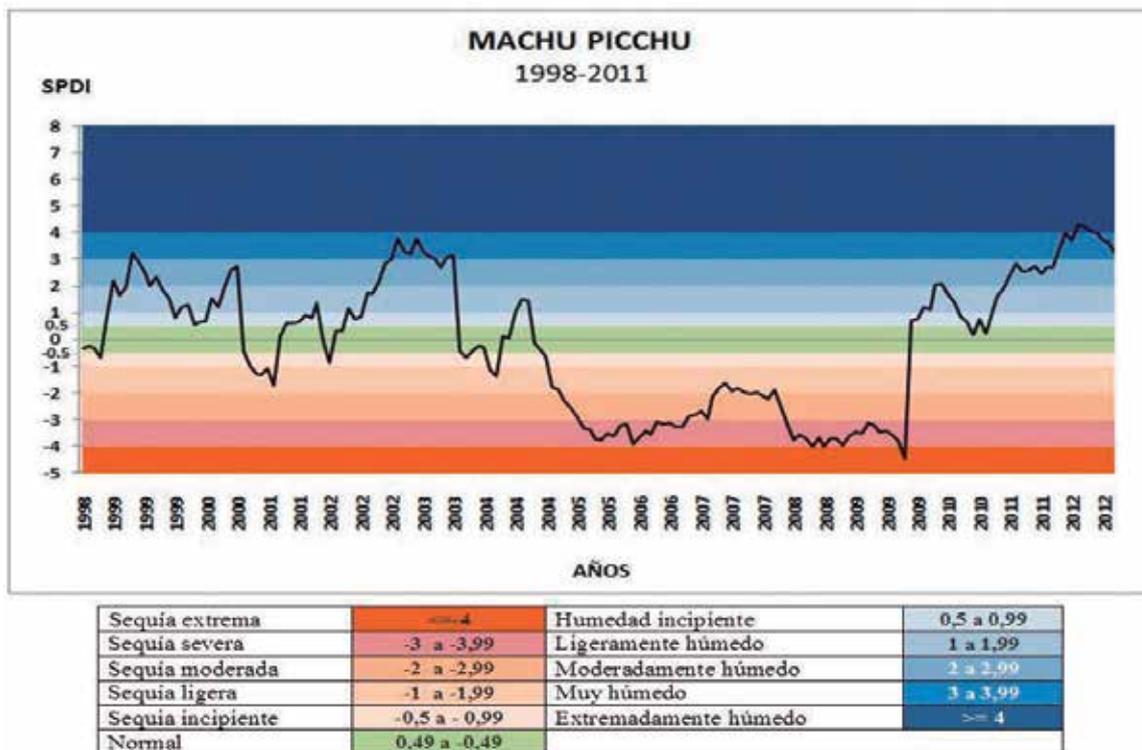


Figura 4.13 Variación multianual del índice de sequías agrícolas para Machu Pichu, Cusco. Fuente: Elaboración propia

De todo el registro histórico analizado para Machu Picchu, alrededor del 41 % de los casos se presentaron casos de sequía agrícola de distinto grado de intensidad, predominando la frecuencia de sequías severas (21 %) y entre ligeras a moderadas (9 y 7 %); sólo el 1 % de los casos presentó una sequía extrema (Figura 4.14a).

Asimismo, en la Figura 4.14b se muestra que los índices de sequía más extremos se han registrado entre los meses de setiembre y octubre (2009), pudiendo haber afectado la floración y crecimiento vegetativo de los cultivos. En tanto que episodios de sequía severa se han registrado durante el resto del año.

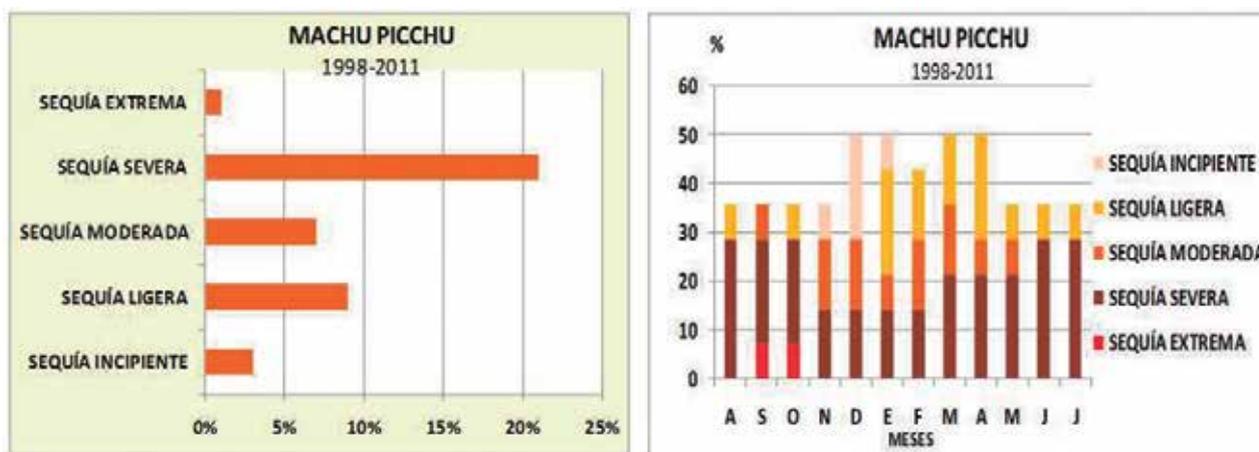


Figura 4.14 Sequías agrometeorológicas en la estación de Machu Pichu, Cusco. a) Frecuencia; b) Variación anual de los índices de sequía. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.15 se muestra la variación interanual de episodios secos (índices negativos) y húmedos (índices positivos) registrados para Quillabamba, destacando el evento de sequía agrícola prolongado desde el 2004 al 2009, con una duración de 73 meses e incluyendo las sequías de las campañas 2004/2005, 2007/2008 y un

período extremadamente seco desde mayo a octubre 2009. Se destacan los eventos extremadamente húmedos como los del 1998/1999 y los eventos húmedos de la última década (campañas 2003/2004 y 2010/2011).

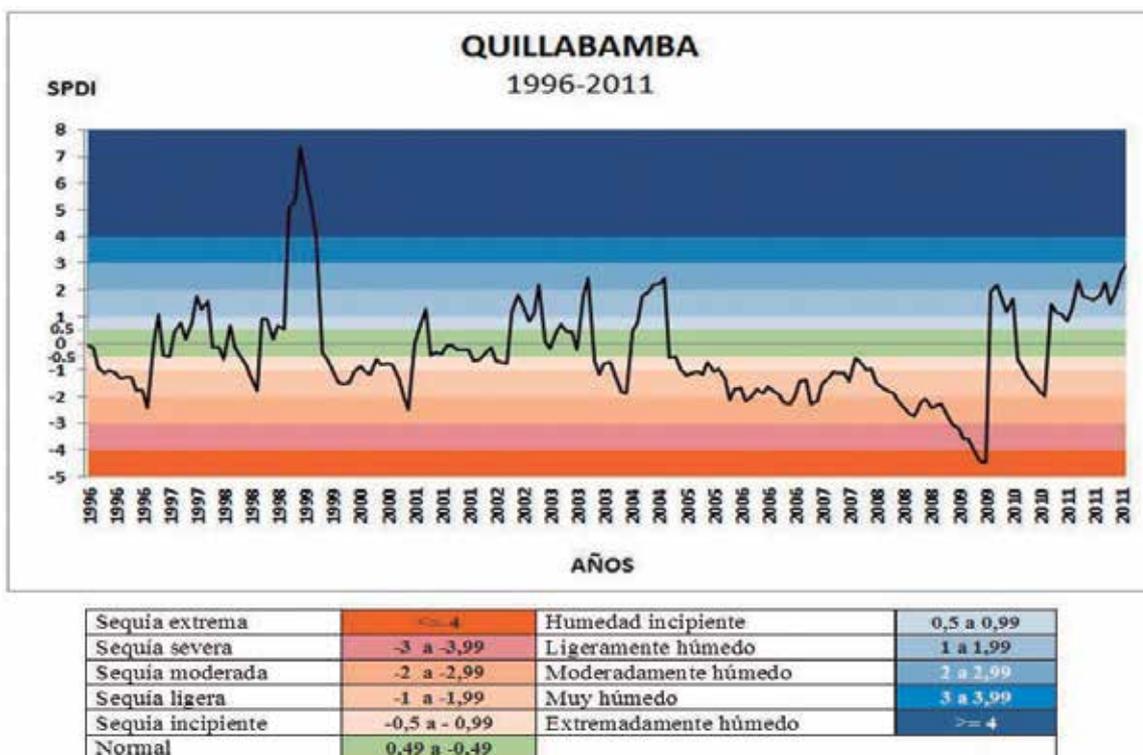


Figura 4.15 Variación multianual del índice de sequías agrícolas para Quillabamba, Cusco. Fuente: Elaboración propia

De la información que se cuenta para Quillabamba, más del 56 % de los casos se presentaron casos de sequía agrícolas de distinto grado de intensidad, predominando la frecuencia de sequías ligeras (29 %) e incipientes (14 %), 9% de moderadas; sólo un 2 % de los casos presentaron sequías severas y extremas (Figura 4.16a). Asimismo, en la Figura 4.16b se muestra que los índices

de sequía más extremos se han registrado durante los meses de agosto a octubre, épocas que podrían haber impactado sobre la floración y crecimiento vegetativo de los cultivos. Episodios de sequía severa se han registrado también entre los meses de abril a julio, cuando gran parte de los cultivos se encuentran entre maduración y cosecha.

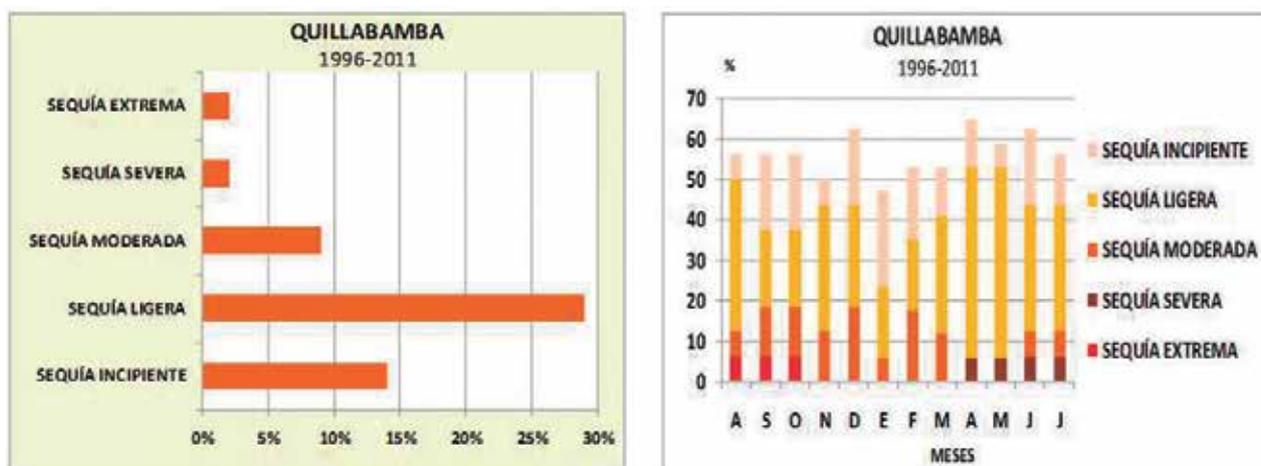


Figura 4.16 Sequías agrometeorológicas en la estación de Quillabamba, Cusco: a) Frecuencia y b) Variación anual de los índices de sequía. Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.4.4 Balance hídrico agrícola

Se analizó la disponibilidad hídrica representativa para los cultivos priorizados, bajo condiciones agroclimáticas promedio tomando como base la información climática de la estación meteorológica de Machu Picchu.

Adicionalmente se analizó el balance hídrico para la estación de Quillabamba, por su gran importancia en la producción agroexportadora del cultivo de café.

#### Condiciones promedio

En general, la precipitación promedio que se registra en Machu Picchu durante la campaña agrícola cubre los requerimientos hídricos para los cultivos de café, granadilla y palto durante todo su ciclo vegetativo, incluso con excesos durante las fases de llenado del fruto e inicios de maduración (Figura 4.17).

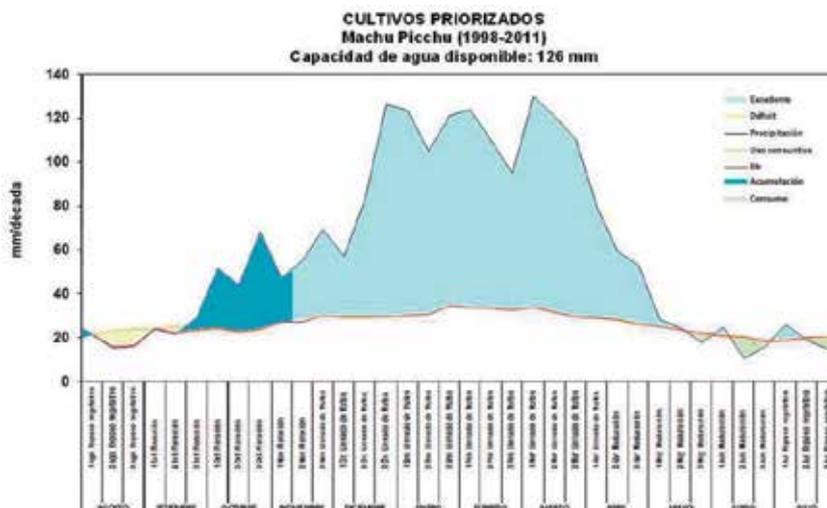


Figura 4.17 Balance hídrico representativo para los cultivos priorizados en condiciones climáticas promedio para la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

En Quillabamba, climáticamente las lluvias son inferiores a las de Machu Picchu y en promedio no alcanzan a cubrir completamente las necesidades de agua, en este caso para el cultivo de café.

llenado del fruto, recargándose a partir de diciembre hasta mayo con algunos excesos entre febrero y marzo. Es importante contar con riego complementario durante el inicio de la campaña (Figura 4.18).

Las lluvias en promedio se presentan ligeramente deficientes durante las fases de floración e inicios del

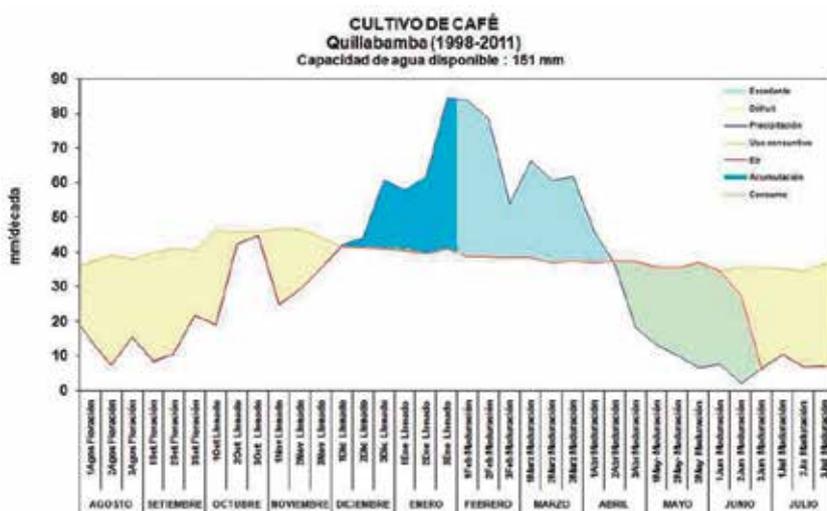


Figura 4.18 Balance hídrico agrícola para cultivo de café en condiciones promedio de Quillabamba, Cusco. Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.5 Aptitud agroclimática de los cultivos priorizados

La aptitud agroclimática permite evaluar de forma especializada la potencialidad de los recursos existentes e identificar áreas críticas de intervención, contribuyendo al uso ordenado del territorio, desde la perspectiva de la sustentabilidad ecológica, económica, social y ambiental (Carbalho et al., 2009).

La aptitud agroclimática para los cultivos de café, granadilla y palto en la subcuenca de Santa Teresa, se basa en la evaluación de la aptitud climática y la aptitud edáfica, donde se definen umbrales climáticos, fisiográficos y edáficos para cada uno de los cultivos en estudio.

##### Cultivo de café

En la Figura 4.19 se puede apreciar que las mayores zonas con aptitud agroclimática para el cultivo de café se encuentran ubicadas en una parte de la subcuenca del río Vilcanota (quebradas de Quellomayo y Pacaymayo); así como, en las microcuencas del río Sacsara (sectores de Andihuela, Versailles y Yanatile) y Salkantay (quebrada de Tunquihuayco y Loreta). Asimismo, en menor proporción se tiene áreas aptas en las microcuencas de los ríos Chaupimayo (sectores de Achirayoc, Lucmapampa y Chaupimayo) y Aobamba. Las zonas moderadamente aptas se encuentran localizadas en toda la zona de estudio. Estas áreas se encuentran más concentradas en una parte de la subcuenca del río Vilcanota, parte de la microcuenca del río Vilcabamba y la microcuenca del río Chaupimayo.

Las zonas no aptas se encuentran en mayor extensión en las microcuencas de los ríos Sacsara y Salkantay, así como en gran parte de la microcuenca del río Aobamba.

##### Cultivo de granadilla

En la Figura 4.20 se puede observar que las zonas aptas se presentan en mayor superficie en la microcuenca del río Chaupimayo (sectores de Achirayoc y Chaupimayo), en parte de la microcuenca del río Vilcabamba (quebrada Yanantín) y parte de la subcuenca del río Vilcanota (sectores de Cochapampa, Sapanmarca y Quellomayo). Las zonas moderadamente aptas se encuentran en mayor extensión en las microcuencas de los ríos Sacsara (sectores de Santo Domingo, Ucumarilloc, Condorhuachana, Rosaspata), Salkantay (Chaquiorco, Loreta, San Ignacio, Cedropata) y Aobamba.

Al igual que el café, las zonas no aptas se encuentran en mayor superficie en las microcuencas de los ríos Sacsara, Salkantay y Aobamba.

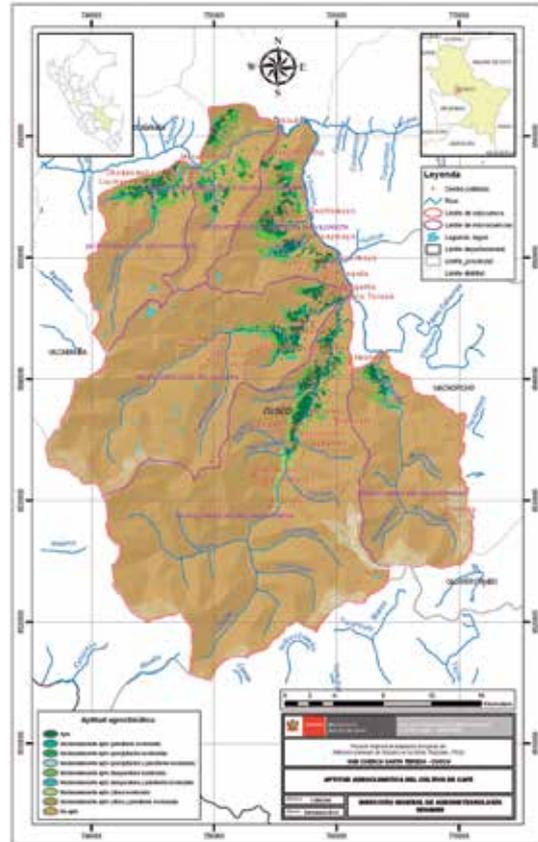


Figura 4.19 Aptitud agroclimática del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

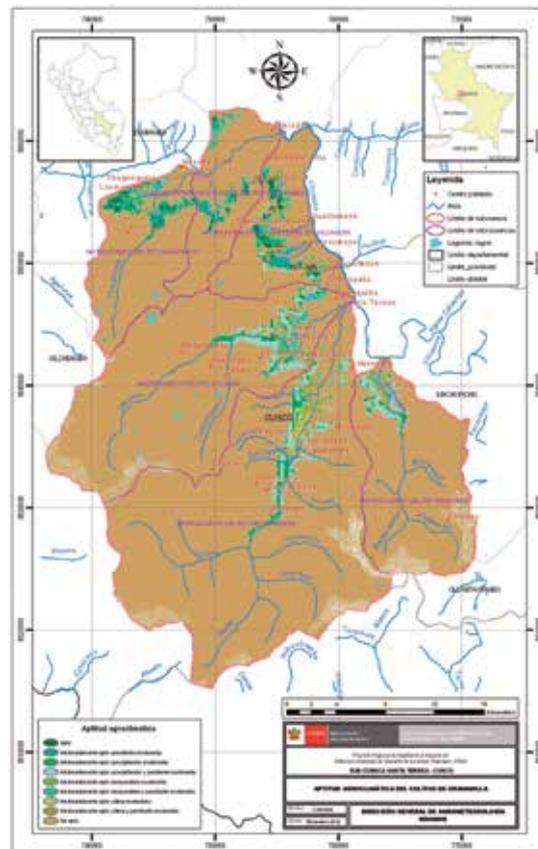
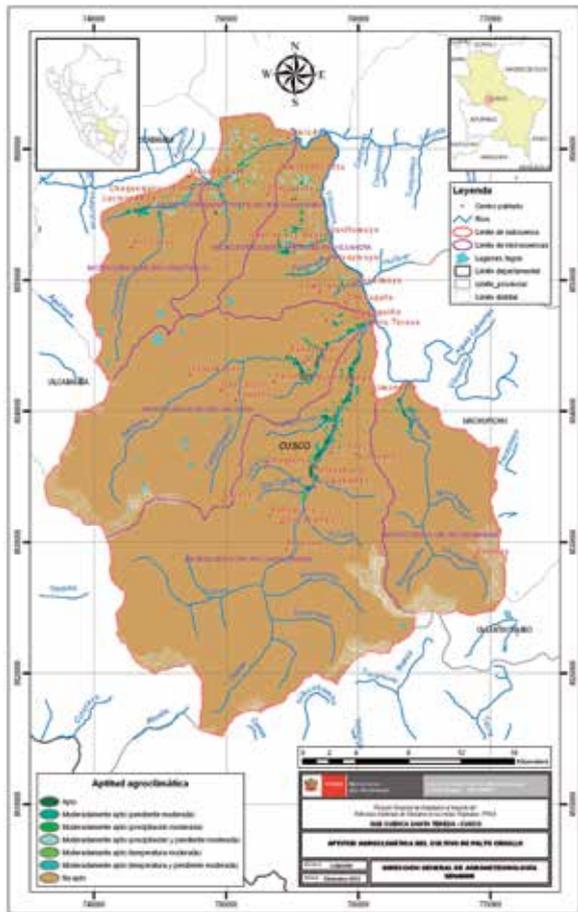


Figura 4.20 Aptitud agroclimática del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.21** Aptitud agroclimática del cultivo de palto Criollo en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

### Cultivo de palto Fuerte

En la Figura 4.22 se observa que las zonas moderadamente aptas se encuentran distribuidas en todas la microcuencas de la zona de estudio, siendo mayor en las microcuencas de los ríos Sacsara y Salkantay, lugares donde las condiciones agroclimáticas son muy favorables para el establecimiento del cultivo.

Al igual que para el café, granadilla y palto Criollo, las zonas no aptas se encuentran en mayor superficie en todas las microcuencas de la zona de estudio. Según la Capacidad de uso mayor de tierras, a estos lugares les corresponden las tierras de protección asociadas a tierras aptas para pastoreo con calidad agrológica baja limitadas por suelo, erosión y clima.

## 4.2 Percepciones sobre la variabilidad climática

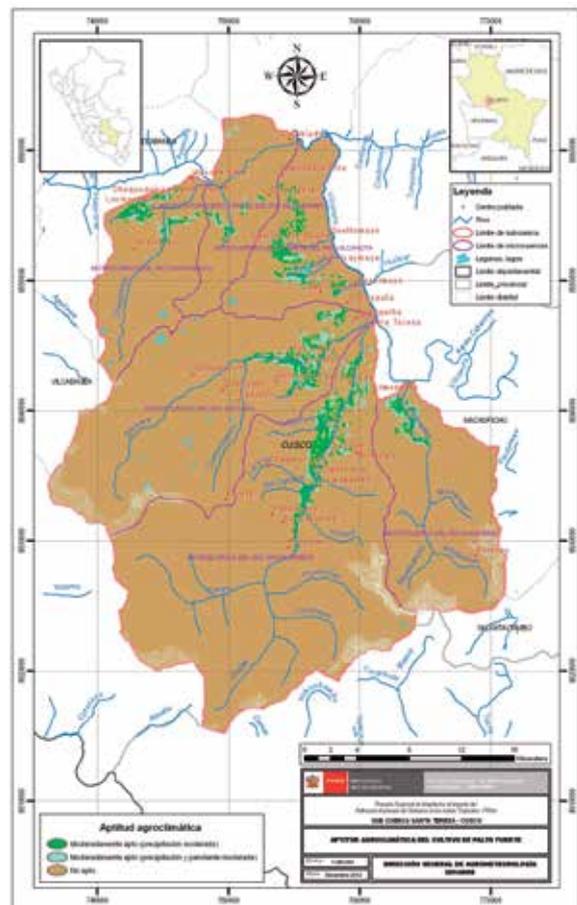
### 4.2.1 Análisis de la percepción de la población

La población de la subcuenca de Santa Teresa manifiesta que la ocurrencia de eventos climáticos extremos cada vez son más frecuentes y ocasionan daños no sólo en sus cultivos sino también en su actividad cotidiana diaria: comercio, turismo, entre otros.

### Cultivo de palto Criollo

En la Figura 4.21 se observa que las zonas aptas ocupan una menor superficie en la zona de estudio siendo muy concentradas en los cauces de los ríos Sacsara, Salkantay y Aobamba. En menor extensión se ubican zonas aptas en la microcuenca del río Chaupimayo y parte de la subcuenca del río Vilcanota. Las zonas moderadamente aptas se presentan en mayor extensión en las microcuencas de los ríos Sacsara (sector Versailles, Yanatile y Antiguo Yanatile), Salkantay (sector de Sahuayaco y Paltaychayoc), parte de la microcuenca del río Vilcabamba (sector Mesada y Limonpata) y Chaupimayo (sectores de Achirayoc, Chaupimayo y Lucmapampa).

Al igual que para el café y granadilla, las zonas no aptas se encuentran en mayor superficie en las microcuencas de Sacsara, Salkantay y Aobamba. Según la Capacidad de uso mayor de tierras, a estos lugares les corresponden las tierras de protección asociadas a tierras aptas para pastoreo con calidad agrológica baja limitadas por suelo, erosión y clima.



**Figura 4.22** Aptitud agroclimática del cultivo de palto Fuerte en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

### Percepción de la ocurrencia de los eventos climáticos extremos

Según la percepción agrícola de la subcuenca de Santa Teresa, los eventos climáticos que más frecuentemente ocurren en la zona son las sequías y veranillos

(33 %), lluvias intensas en períodos cortos (31 %) y el incremento de la temperatura del aire (31 %). Adicionalmente, un 3,4 % de los entrevistados señalan que los vientos fuertes son también un evento climático que se presenta pero con menor frecuencia (Figura 4.23).

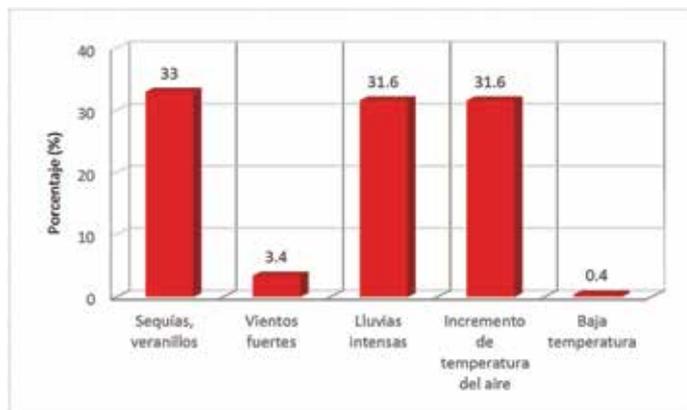


Figura 4.23 Percepción local sobre la frecuencia de los eventos extremos en Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

### Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos en los cultivos

Los frecuentes eventos extremos que se vienen registrando durante las campañas agrícolas en la zona están impactando de igual modo a los cultivos en las diferentes fases fenológicas del café, la granadilla y el palto.

### Cultivo de café

El incremento de temperatura del aire afecta en mayor proporción la floración y el crecimiento vegetativo (54,3 y 25,7 % respectivamente). Las sequías/veranillos y las lluvias intensas pueden afectar tanto las fases de floración (36,6 y 26 %) y maduración (39,4 y 52 %), respectivamente (Figura 4.24).

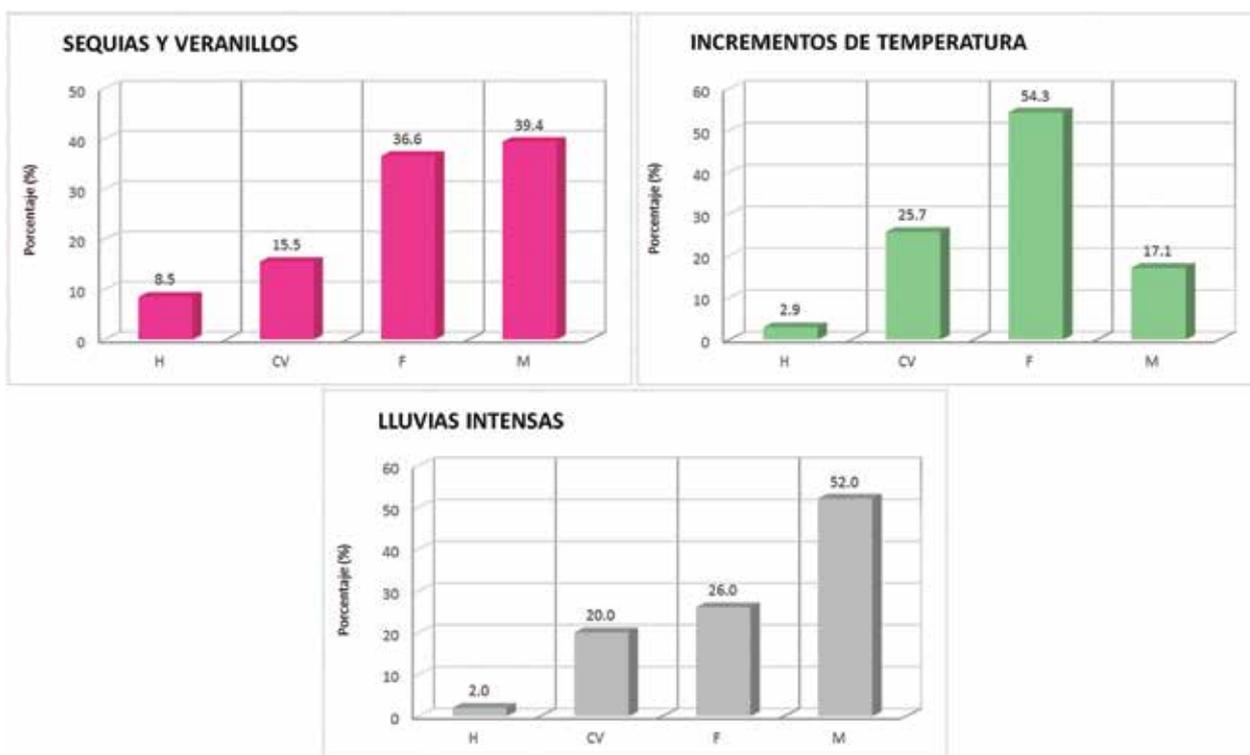
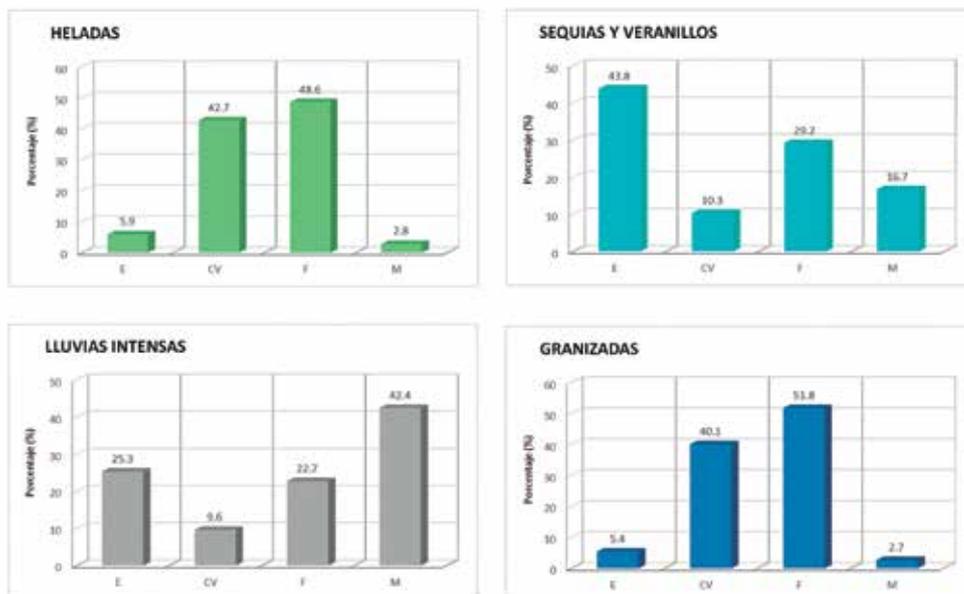


Figura 4.24 Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de café en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

### Cultivo de granadilla

El incremento de temperatura del aire afecta principalmente las fases fenológicas de floración y de crecimiento vegetativo del cultivo de granadilla en un

33 y 43,6 % respectivamente. Las sequías/veranillos y las lluvias intensas pueden afectar tanto la floración (33,3 y 73,2 %) como la maduración del cultivo (47,5 y 24,4 %), respectivamente (Figura 4.25).

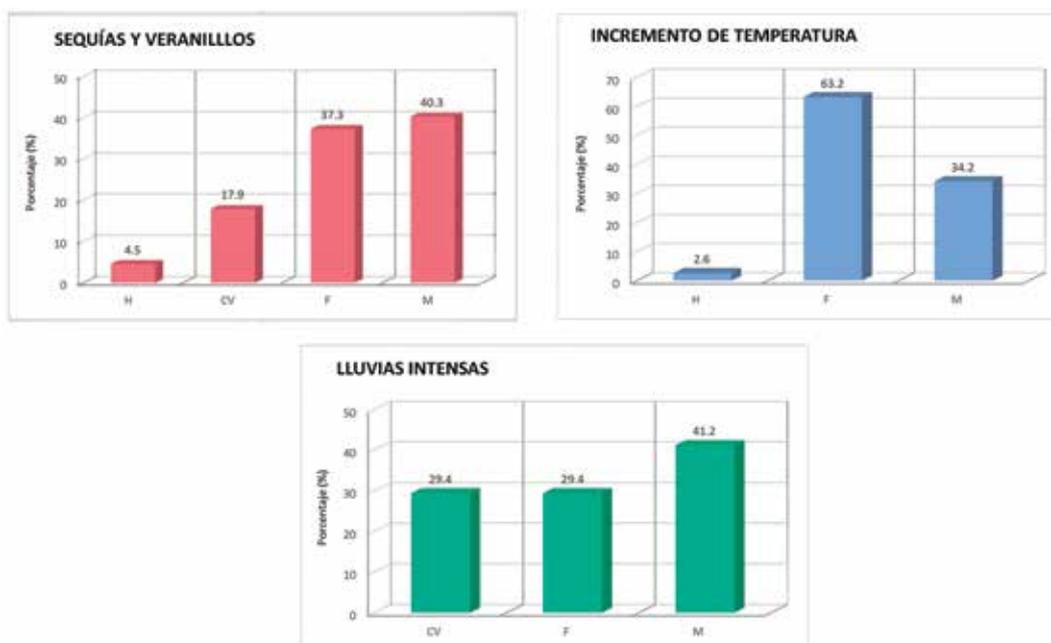


**Figura 4.25** Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

### Cultivo de palto

El incremento de temperatura del aire afecta principalmente la floración (63,2 %) y maduración (34,2 %) del cultivo de palto. Las sequías/veranillos

y las lluvias intensas afectan en mayor proporción la floración (37,3 y 29,4 %) y la maduración (40,3 y 41,2 %), respectivamente y en menor magnitud los procesos de crecimiento vegetativo (17,9 y 29,4 %) (Figura 4.26).

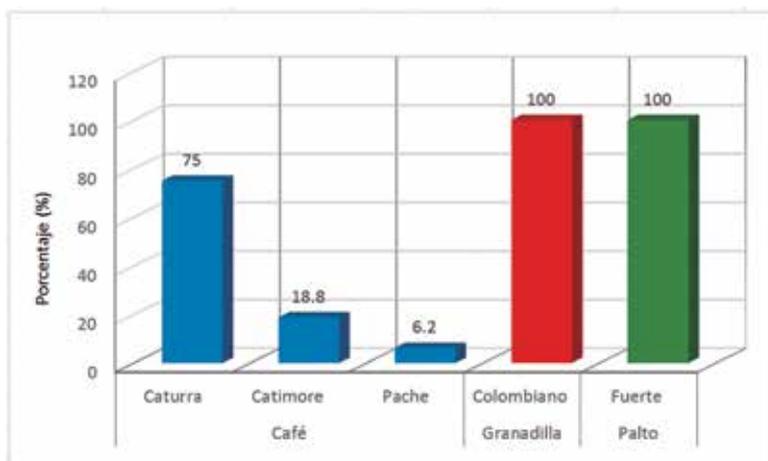


**Figura 4.26** Percepciones del impacto de los eventos climáticos extremos sobre la hinchazón de yemas (H), el crecimiento vegetativo (CV), la floración (F) y la maduración (M) del cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

### Percepción sobre variedades de cultivos sensibles y adaptados a la variabilidad climática

Ante la evidente percepción de los cambios en el comportamiento de las variables climáticas, la vulnerabilidad de los cultivos depende del tipo de

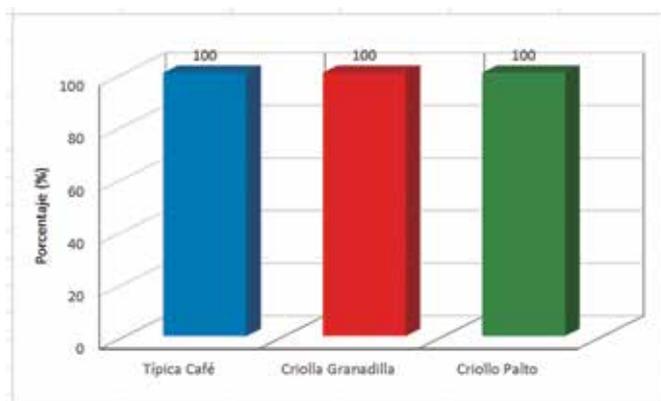
cultivo, la variedad o cultivar, entre otros aspectos. En Santa Teresa, la variedad de café más sensible a estas variaciones es la Caturra (75 %); en el cultivo de granadilla es la Colombiana (100 %) y en el cultivo de palto es la variedad Fuerte (Figura 4.27).



**Figura 4.27** Variedades de cultivo de café, granadilla y palto más sensibles a la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a las variedades adaptadas a las condiciones climáticas más desfavorables se tienen: la variedad

Típica en el café; la variedad Criolla tanto en granadilla como en palto (Figura 4.28).

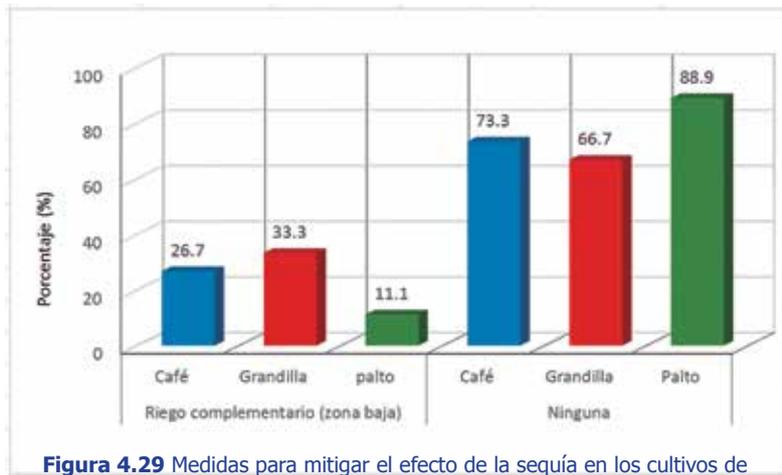


**Figura 4.28** Variedades de cultivo de café, granadilla y palto adaptados a la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

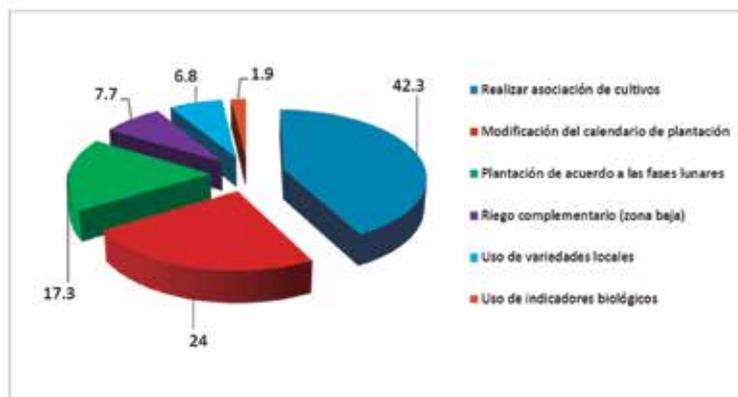
### Percepciones sobre respuestas y estrategias del productor agrícola ante los eventos climáticos extremos

Algunos productores agrícolas de la subcuenca de Santa Teresa manifiestan utilizar algunas medidas preventivas ante la presencia de un evento climático que puede afectar a sus cultivos; sin embargo, la gran mayoría manifiesta no efectuar ninguna medida (Figura 4.29).

Por ejemplo, para el caso de la sequía, en promedio, un 76 % de productores de café, granadilla y palto manifiestan que no toman ninguna medida para mitigar su impacto, comparado con un 24 % que sí manifiesta aplicar el riego complementario en sus cultivos; una de las razones podría ser la falta de infraestructura de canales de riego (zona media y alta) o reservorios para la instalación de un sistema de riego tecnificado.



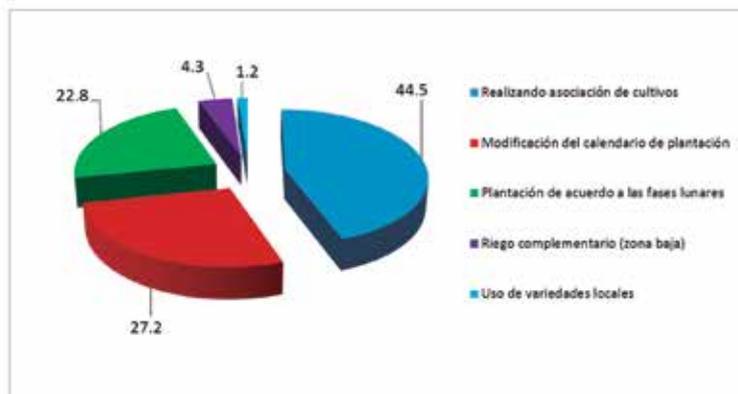
**Figura 4.29** Medidas para mitigar el efecto de la sequía en los cultivos de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia



a) Estrategias del productor del cultivo de café ante eventos climáticos extremos.



b) Estrategias del productor del cultivo de granadilla ante eventos climáticos extremos.



c) Estrategias del productor del cultivo de palto ante eventos climáticos extremos.

**Figura 4.30** Percepción sobre las estrategias de los productores de café (a), granadilla (b) y palto (c) ante la variabilidad del clima en Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.2 Impacto de la variabilidad climática en el rendimiento de los cultivos prioritarios

Con respecto al impacto de la variabilidad climática en los cultivos, estadísticamente, más del 90 % de la variación de los rendimientos de los cultivos de café, granadilla y palto son explicados por la variabilidad del clima. En el caso del café, la variable que más afecta es la temperatura del aire; en el caso de la granadilla y palto la temperatura del aire y precipitación.

En condiciones normales, los cultivos disponen de suficiente agua de lluvia para completar su ciclo fenológico.

La poca innovación tecnológica puede haber contribuido a estos resultados, no obstante, se recomienda continuar las investigaciones, dado el reducido período de información agronómica y climática que se cuenta en la zona, lo cual podría sobreestimar los niveles de predictibilidad del modelo.

#### 4.2.3 Impacto de los eventos el Niño/La Niña en el rendimiento de los cultivos

De acuerdo a los análisis de regresión con el índice ENOS Multivariado, no se ha encontrado evidencia estadística del efecto de los eventos El Niño y La Niña en los rendimientos de los cultivos de café, granadilla y palto.

#### 4.3 Impacto del cambio climático en los cultivos prioritarios

Para analizar el impacto del cambio climático a futuro se tomaron en consideración los resultados del estudio de SENAMHI (2013) sobre escenarios climáticos futuros para la cuenca del río Urubamba al 2030 interpolados para la zona de estudio. Estos cambios en el clima futuro se manifiestan en incrementos en la temperatura del aire entre 0,4 °C a +1,2 °C con un escenario de disminución del rango térmico debido al mayor incremento de la temperatura mínima y una mayor incertidumbre para las lluvias, con patrón de reducciones e incrementos variables del orden del -15 % a +45 %.

#### Cultivo de café

Ante un escenario futuro 2015-2039, el rendimiento promedio estimado para el cultivo de café en la subcuenca, en comparación con el rendimiento estimado promedio para el período 1997-2003, tiende a incrementarse y con mayor probabilidad hacia las zonas donde se produce el cultivo (1500 a 2500 msnm). Estimándose para estas zonas, valores entre los 0,65 a 0,75 t/ha, especialmente en las microcuencas de Sacsara, Santa Teresa, Aobamba y parte de la subcuenca del río Vilcanota (Figura 4.31).

Es importante mencionar que el modelo de rendimiento de café ha sido desarrollado para condiciones de secano, por tanto los resultados mostrados están en función principalmente de la temperatura del aire que se registren a futuro, disponibilidad hídrica de las lluvias y en parte al manejo tecnológico.

La Figura 4.32 muestra que bajo un escenario futuro, el área potencial de siembra del cultivo de café (frontera agrícola) en la subcuenca de Santa Teresa tiende a reducirse en las zonas bajas y a desplazarse hacia mayores altitudes, donde la tendencia es también a alcanzar los mayores rendimientos.

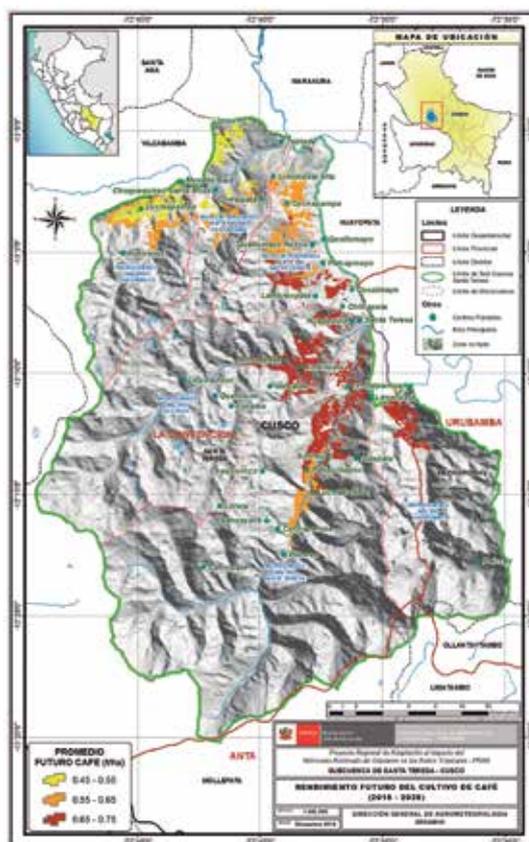


Figura 4.31 Estimación del rendimiento de café para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039). Fuente: Elaboración propia

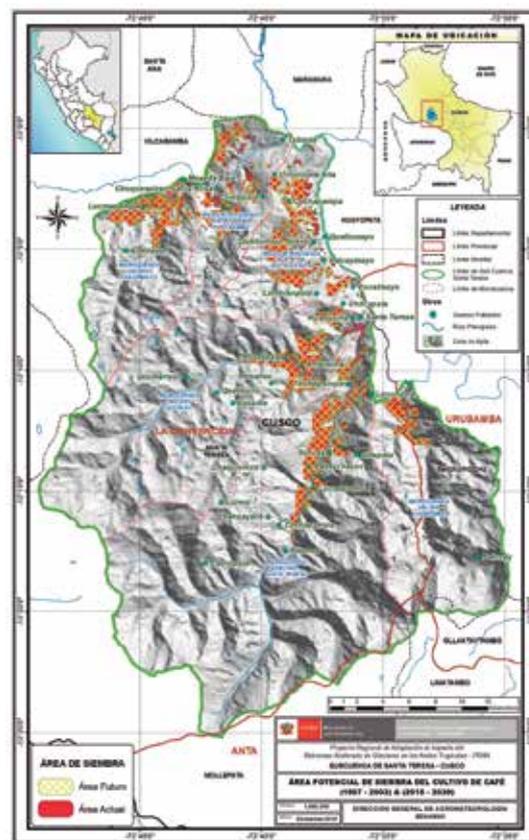


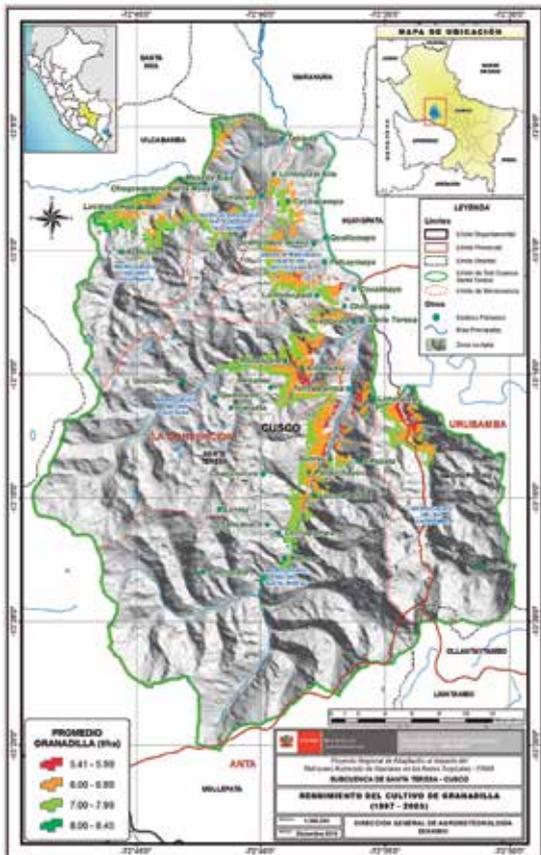
Figura 4.32 Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de café para el escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco. Fuente: Elaboración propia

### Cultivo de granadilla

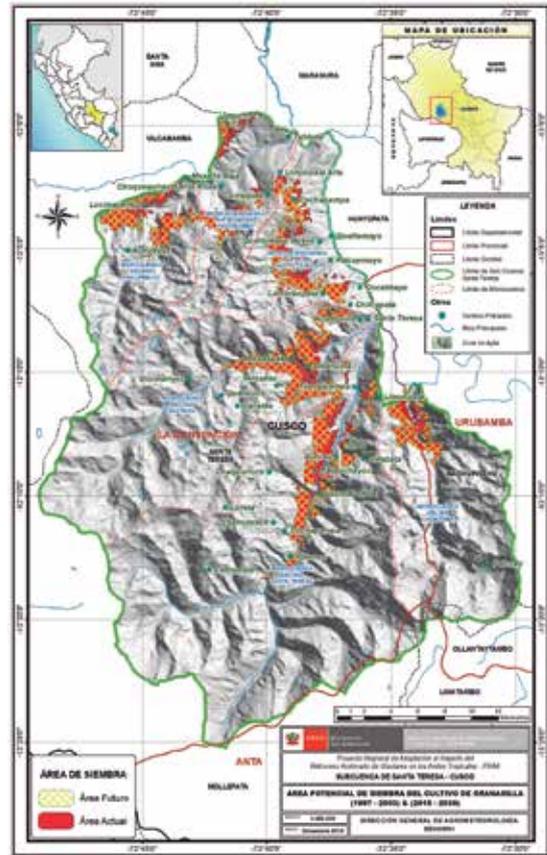
Para un escenario futuro 2015-2039, en comparación a los promedios de rendimiento estimados para el período 1997-2003, por lo general no se muestra la tendencia a incrementar el rendimiento. La tendencia es a reducir la producción de granadilla en las partes medias de la subcuenca y a mantenerse en las zonas superiores de a los 2400 msnm por efecto del incremento térmico. De tal forma, que el mayor rendimiento de granadilla tiende a ser más frecuente entre los 2400 a 2700 msnm

y con rendimientos entre 6 a 7,9 t/ha (Figura 4.33).

La Figura 4.34 muestra que para un escenario futuro (2015 al 2039) con incrementos en la temperatura del aire (SENAMHI, 2013), el área potencial de siembra del cultivo de granadilla en la subcuenca de Santa Teresa presenta una tendencia a reducirse en las partes medias de la subcuenca y a desplazarse hacia zonas más elevadas (2700 a 3000 msnm) por efecto del incremento de la temperatura del aire.



**Figura 4.33** Estimación del rendimiento de granadilla para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039). **Fuente:** Elaboración propia

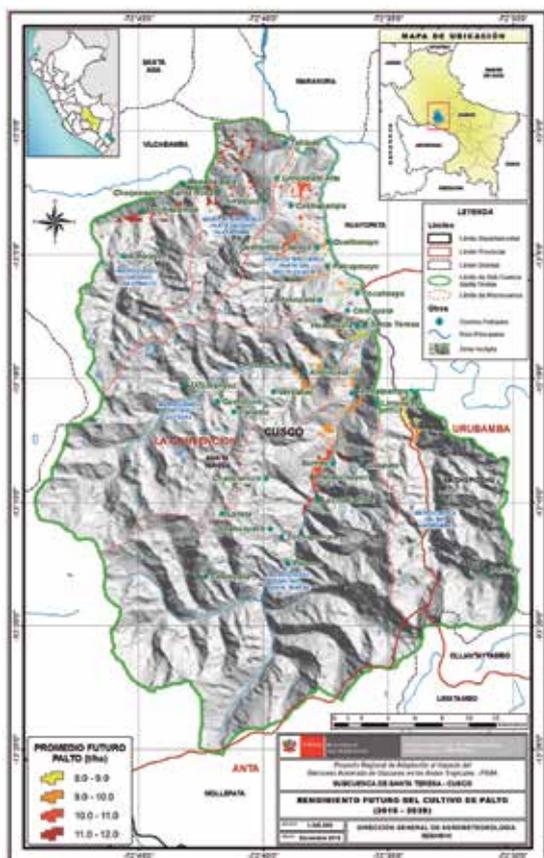


**Figura 4.34** Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de granadilla para escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

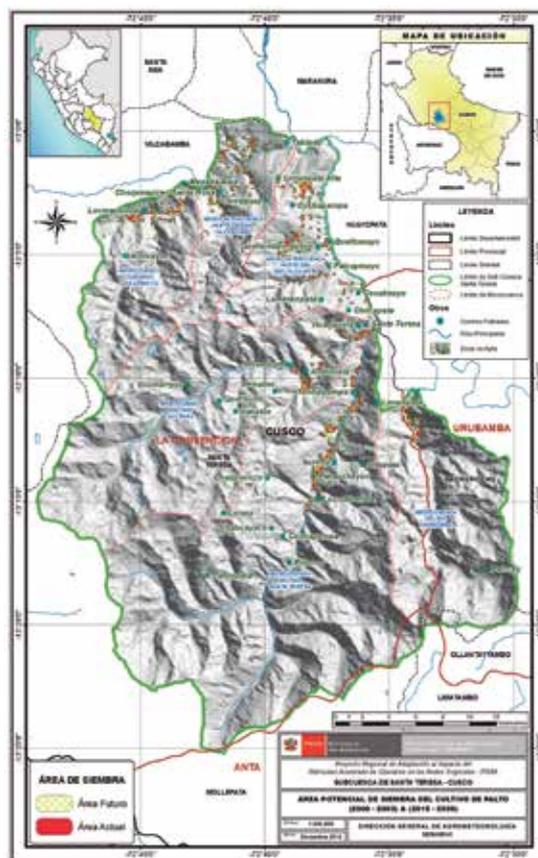
### Cultivo de palto Criollo

Ante un escenario futuro 2015-2039 el rendimiento promedio estimado de cultivo de palto criollo en la subcuenca de Santa Teresa, en comparación con el rendimiento estimado promedio para el período 2000-2003, muestra una tendencia de incrementarse en gran parte de la subcuenca. Los rendimientos estimados entre 7 a 10 t/ha podrían alcanzarse en las microcuencas de los ríos Sacsara, Santa Teresa, Aobamba y parte del río Vilcanota (Figura 4.35).

La Figura 4.36 muestra que bajo un escenario de clima futuro 2015-2039, a diferencia de los cultivos de café y granadilla, el cultivo de palto Criollo según el modelo evaluado no desplazaría sus zonas de producción, aun cuando existe la tendencia de incrementarse la temperatura del aire a futuro (SENAMHI, 2013), posiblemente debido a que las exigencias térmicas del palto Criollo son de mayor amplitud (18 a 25 °C).



**Figura 4.35** Estimación del rendimiento de palto criollo para Santa Teresa, Cusco, bajo escenario de clima futuro (2015-2039). **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 4.36** Estimación del desplazamiento del área potencial de siembra del cultivo de palto criollo para escenario futuro (2015-2039), subcuenca de Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Elaboración propia

#### 4.4 Medidas de adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa

En relación a las medidas de adaptación, se han identificado un mayor número de propuestas de técnicas agroambientales que medidas sociales y económicas.

Entre las técnicas agroambientales de alta prioridad para un escenario futuro se proponen los sistemas agroforestales de siembra de café bajo sombra: Café Típica-pacae del mono, Café Típica-plátano, Café Caturra-palto; sembrar variedades de café de acuerdo al piso ecológico: variedad Típica entre 1500 a 2200

msnm; variedad Caturra roja entre 1200 a 1500 msnm y Caturra amarillo entre 900 a 1200 msnm. Promover la siembra de granadilla sobre patrón de maracuyá y en sistema de espalderas; sembrar granadilla de acuerdo a pisos ecológicos: parte baja (2000 a 2200 msnm), parte media (2200 a 2600 msnm) y parte alta (2600 a 3000 msnm); promover los cultivos agroforestales: palto-frijol; palto-plátano; palta-café; promover la siembra de palta de acuerdo a pisos ecológicos: 900 a 1500 msnm; producir plantones de las variedades de palta Hass y Fuerte certificados para garantizar la sanidad de las plantaciones (Tablas 4.10, 4.11 y 4.12).

**Tabla 4.10** Técnicas agroambientales de alta prioridad para la adaptación del cultivo de café al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

	TÉCNICAS AGROAMBIENTALES DE ALTA PRIORIDAD PARA EL CULTIVO DE CAFÉ EN LA SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO	Puntaje acumulado
1	Revalorar los sistemas agroforestales de siembra de café bajo sombra: café Típica-pacae del mono, café Típica-plátano, café Caturra-palto.	27
2	Sembrar variedades de café de acuerdo al piso ecológico: variedad Típica: 1500 a 2200 msnm, variedad Caturra roja: 1200 a 1500 msnm y Caturra amarillo: 900 a 1200 msnm, la variedad Catimor es muy delicada y casi no se siembra en Santa Teresa.	25

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.11** Técnicas agroambientales de alta prioridad para la adaptación del cultivo de granadilla al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

	TÉCNICAS AGROAMBIENTALES DE ALTA PRIORIDAD PARA EL CULTIVO DE GRANADILLA EN LA SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO	Puntaje acumulado
1	Promover la siembra de granadilla sobre patrón de maracuyá y en sistema de espalderas.	<b>26</b>
2	Revalorar el sistema agroforestal de granadilla con tutor de pacaes del mono, tecnificando el sistema de poda.	<b>26</b>
3	Sembrar granadilla de acuerdo a los pisos ecológicos; parte baja (2000 a 2200 msnm), parte media (2200 a 2600 msnm) y parte alta (2600 a 3000 msnm); siendo esta última, la zona donde se encuentra nuevas plantaciones de cultivo. Estas nuevas áreas de producción están siendo instaladas por los productores porque están percibiendo el efecto del incremento de la temperatura en las partes más bajas.	<b>24</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.12** Técnicas agroambientales utilizadas como medidas de adaptación para cultivo de palto en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

	TÉCNICAS AGROAMBIENTALES PARA EL CULTIVO DE PALTO DE ALTA PRIORIDAD EN LA SUBCUENCA DE SANTA TERESA, CUSCO	Puntaje acumulado
1	Promover los cultivos agroforestales: palta - frijol; palta - plátano; palta - café.	<b>26</b>
2	Promover la siembra de palta de acuerdo a pisos ecológicos: 1000 a 2500 msnm.	<b>24</b>
3	Producir plántones de las variedades de palta Hass y Fuerte certificados para garantizar la sanidad de las plantaciones.	<b>21</b>

**Fuente:** Elaboración propia



**Foto 4.1** Sistema agroforestal: café-plátano-pacaes. Santa Teresa, Cusco.  
**Fuente:** Senamhi



**Foto 4.2** Izquierda: variedad de café introducido cv Caturra (tamaño más pequeño) bajo sombra de pacaes. Santa Teresa, Cusco. **Fuente:** Senamhi



**Foto 4.3** Sistema tradicional de producción de granadilla con tutor de pacaes común (Yanatile, Sacsara, Cusco). **Fuente:** Senamhi

Dentro de las medidas sociales calificadas como de alta prioridad, se mencionan la capacitación a los agricultores en las técnicas agronómicas necesarias para lograr una buena producción de café, granadilla y

palta: propagación, podas, fertilización, riego, cosecha, postcosecha y el fortalecimiento de los programas de comunicación para agricultores: radio y televisión en la subcuenca de Santa Teresa (Tabla 4.13).

**Tabla 4.13** Medidas sociales de alta prioridad para la adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

	MEDIDAS SOCIALES DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE ALTA PRIORIDAD PARA EL SECTOR AGRÍCOLA (CULTIVOS DE CAFÉ, GRANADILLA Y PALTO) EN LA SUBCUENCA SANTA TERESA, CUSCO	Puntaje acumulado
1	Capacitar a los agricultores en las técnicas agronómicas necesarias para lograr una buena producción de café, granadilla y palta: propagación, podas, fertilización, riego, cosecha, postcosecha.	<b>27</b>
2	Fortalecer los programas de comunicación para agricultores: radio y televisión en la subcuenca de Santa Teresa.	<b>24</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, las medidas económicas calificadas como de alta prioridad fueron las de fortalecer a las organizaciones de productores para poder comercializar el cultivo de café, granadilla y palto en la modalidad de comercio justo y por estar sembradas por pequeños productores; fortalecer las capacidades organizativas para la comercialización del café a través

de cooperativas, como café orgánico, convencional o sostenible; fortalecer los corredores agroecoturísticos por la "ruta del café" parada en Santa Teresa y organizar corredores agroecoturísticos y de biodiversidad por la "ruta de la granadilla" parada en Santa Teresa (Tabla 4.14).

**Tabla 4.14** Medidas económicas de alta prioridad para la adaptación al clima futuro en la subcuenca de Santa Teresa, Cusco

	MEDIDAS ECONÓMICAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SANTA TERESA, CUSCO	Puntaje acumulado
1	Fortalecer las organizaciones de productores para poder comercializar el cultivo de café, granadilla y palto en la modalidad de comercio justo y por estar sembradas por pequeños productores.	<b>25</b>
2	Fortalecer las capacidades organizativas para la comercialización del café a través de COCLA, como café orgánico, convencional o sostenible.	<b>25</b>
3	Fortalecer los corredores agroecoturísticos por la "ruta del café" parada Santa Tresa.	<b>21</b>
4	Organizar corredores agroturísticos y de biodiversidad por la "ruta de la granadilla" parada Santa Teresa.	<b>21</b>

**Fuente:** Elaboración propia

# Conclusiones

## Percepciones sobre la variabilidad climática

- Los eventos climáticos extremos que más frecuentemente se presentan en Santa Teresa son las sequías y veranillos (33,1 %), las lluvias intensas (31,6 %) y el incremento de la temperatura (31,6 %); siendo asimismo los eventos que mayor impacto negativo causan a los cultivos.
- El exceso de calor afecta principalmente las fases de crecimiento vegetativo y floración en los cultivos de café y granadilla, en el palto es más afectada la floración. Las sequías y los veranillos afectan negativamente tanto las fases de floración y maduración de los tres cultivos. Las lluvias intensas afectan principalmente la maduración en el café, la floración en la granadilla y todas las etapas fenológicas del palto.
- Las variedades más sensibles a la variabilidad climática son la Caturra en el café, la Colombiana en granadilla y la Fuerte en el palto. En tanto, como las variedades mejor adaptadas se presentan la Típica en el café, la Criolla en la granadilla y el palto.
- La gran mayoría de la población entrevistada (76%) manifiesta no tomar ninguna medida para mitigar los impactos de los eventos extremos; sólo un 24 % manifiesta aplicar riego complementario.
- Con respecto a las asociaciones de los cultivos como una forma de adaptarse a la variabilidad climática se mencionan a las del café con paca o guaba (42 %), granadilla asociada con paca (41%) y palto con plátano o paca (45 %).
- Ante la ocurrencia de eventos extremos, las principales instituciones que brindan apoyo son la Municipalidad Distrital de Santa Teresa (58 %) y CARE (16 %); a través de la entrega de plántones, asistencia técnica, sistemas de riego, entre otros.

## Impacto de la variabilidad climática en el rendimiento de los cultivos priorizados

- En Santa Teresa, los cultivos de café, granadilla y palto se presentaron altamente sensibles a la variabilidad del clima, dado que ésta explica más del 90 % de la variación de los rendimientos de los cultivos.
- Por lo general, el efecto de la temperatura puede ser positivo o negativo dependiendo de la fase fenológica de los cultivos; en el caso del café, la variable que más le afecta es la temperatura; presentando la temperatura del mes de setiembre un mayor efecto sobre el rendimiento; en granadilla, el efecto es negativo en la formación de los frutos, y positivo para el llenado; en palto, un incremento prolongado y para todo el ciclo podría perjudicar el rendimiento del cultivo.
- En condiciones normales, los cultivos disponen de suficiente agua de lluvia para completar su ciclo

fenológico; en la granadilla las ligeras lluvias de abril son fundamentales para el llenado del fruto; en palto el exceso de lluvias puede afectar su rendimiento.

- La elevada respuesta de rendimiento de los cultivos a la variabilidad del clima, podría también deberse a la poca innovación tecnológica de la zona, aunque la reducida longitud de la serie histórica de clima y rendimiento de los cultivos podría sobreestimar los niveles de predictabilidad de los modelos.

## Impacto de los eventos el Niño/La Niña en el rendimiento de los cultivos

De acuerdo a los análisis de regresión con el índice ENOS Multivariado, no se ha encontrado evidencia estadística del efecto del evento Oscilación del Sur en los rendimientos de los cultivos de café granadilla y palto en Santa Teresa.

## Impacto del cambio climático en los cultivos priorizados

### Cultivo de café

El rendimiento promedio de café en la subcuenca de Santa Teresa para el período (1997-2003) fluctúa entre 0,35 y 0,55 t/ha. En las partes medias y altas donde se cultiva mayormente el café (1500 a 2500 msnm), las condiciones climáticas, fisiográficas y de cobertura vegetal favorecen su producción. En estos lugares, el rendimiento promedio de café en la campaña agrícola varía entre los 0,45 y 0,55 t/ha. Las zonas de producción con rendimientos promedios superiores a los 0,55 t/ha no son muy frecuentes.

Ante un escenario futuro de cambio climático al 2015-2039, el rendimiento promedio de café tiende a incrementarse mayormente hacia las zonas donde se produce el cultivo (1500 a 2500 msnm), hasta llegar a valores entre 0,65 a 0,75 t/ha, especialmente en las microcuencas de Sacsara, Santa Teresa, Aobamba y parte de la subcuenca del río Vilcanota.

Asimismo, bajo un escenario futuro, la frontera agrícola para cultivo de café en Santa Teresa tiende a reducirse en las partes bajas y a desplazarse hacia mayores altitudes, donde la tendencia es también a alcanzar los mayores rendimientos.

### Cultivo de granadilla

Para el período 1997-2003 el rendimiento promedio de granadilla varió entre los 5,4 y 8,4 t/ha. Los menores rendimientos (5,4 a 6,9 t/ha) se encuentran mayormente localizados en las partes bajas de las microcuencas de Sacsara, Santa Teresa, Aobamba y parte de la microintercuenca del río Vilcanota (2000 a 2200 msnm) y en menor proporción en la microcuenca de Chaupimayo, y parte de la subcuenca de Vilcabamba y Vilcanota.

El mayor rendimiento promedio de granadilla (7,0 a 7,9 t/a) se presenta en altitudes superiores a los 2400 msnm y abarca gran parte de las zonas de estudio. Rendimientos superiores a 8 t/ha no son muy frecuentes,

microcuenca de Chaupimayo.

Con respecto al cambio climático, para un escenario futuro (2015-2030), la tendencia es a reducir la producción de granadilla en las partes medias de la subcuenca de Santa Teresa y a mantenerse en las zonas superiores a los 2400 msnm por efecto del incremento térmico. Asimismo, el mayor rendimiento tiende a ser más frecuente en las zonas entre los 2400 a 3000 msnm, con rendimientos entre 6 a 7,9 t/ha. La tendencia no muestra incremento del rendimiento del cultivo.

### **Cultivo de palto**

Las áreas de producción del palto Criollo son más reducidas en la subcuenca. El rendimiento promedio del palto Criollo para el período 2000-2003 varía entre los 5,5 y 9 t/ha. En las microcuencas de Sacsara, Santa Teresa y Chaupimayo el rendimiento promedio varía entre 5,5 y 8 t/ha, mostrándose zonas potenciales de producción de palto Criollo (superior a 8 t/ha) en la microcuenca de Chaupimayo y parte de la subcuenca de Vilcabamba debido al clima favorable; sin embargo, la pendiente se constituye en un factor fuertemente limitante para su producción en la zona.

Ante un escenario futuro 2015-2039 se muestra una tendencia de incrementar los rendimientos en las microcuencas de Sacsara, Santa Teresa y Chaupimayo hasta en 11 t/ha. A diferencia de los cultivos de café y granadilla, de acuerdo a los modelos evaluados, el palto no desplazaría sus zonas de producción aun cuando exista la tendencia de incrementarse la temperatura del aire a futuro, posiblemente debido a que las exigencias térmicas del palto Criollo son de mayor rango (18 a 25°C).

### **Medidas de adaptación al clima futuro en la subcuenca del río Santa Teresa**

En la subcuenca de Santa Teresa se han identificado un total de 23 medidas de adaptación, de las cuales 12 son técnicas agroambientales, 5 son medidas sociales y 6 económicas. De las 12 técnicas agroambientales, 8 han sido calificadas como de alta prioridad: 2 para cultivo de café, 3 para granadilla y 3 para palto.

En el caso de las medidas sociales y económicas se identificaron un total de 11 técnicas, de las cuales 6 medidas han sido consideradas de alta prioridad: 2 sociales y 4 económicas.

### **Técnicas agroambientales priorizadas para escenario futuro**

- Revalorar los Sistemas agroforestales de siembra de café bajo sombra: Café Típica-pacae del mono, Café Típica-plátano, Café Caturra-palto.
- Sembrar variedades de café de acuerdo al piso ecológico: Variedad Típica entre 1500 a 2200 msnm; variedad Caturra roja entre 1200 a 1500 msnm y Caturra amarillo entre 900 a 1200 msnm, la variedad Catimor es muy delicada y casi no se siembra en Santa Teresa.

- Promover la siembra de granadilla sobre patrón de maracuyá y en sistema de espalderas.
- Revalorar el sistema agroforestal de granadilla con tutor de pacae del mono, tecnificando el sistema de poda.
- Sembrar granadilla de acuerdo a pisos ecológicos: parte baja (2000 a 2200 msnm), parte media (2200 a 2600 msnm) y parte alta (2600 a 3000 msnm), siendo esta última, la zona donde se encuentra nuevas plantaciones del cultivo.
- Promover los cultivos agroforestales: palta-frijol; palta-plátano; palta-café.
- Promover la siembra de palta de acuerdo a pisos ecológicos: 1000 msnm a 2500 msnm.
- Producir plantones de las variedades de palta Hass y Fuerte certificados para garantizar la sanidad de las plantaciones.

### **Medidas sociales para favorecer la adaptación al cambio climático**

- Capacitar a los agricultores en las técnicas agronómicas necesarias para lograr una buena producción de café, granadilla y palta: propagación, podas, fertilización, riego, cosecha, postcosecha.
- Fortalecer los programas de comunicación para agricultores: radio y televisión en la subcuenca de Santa Teresa.
- Fortalecer las organizaciones de productores para poder comercializar el cultivo de café, granadilla y palta en la modalidad de comercio justo y por estar sembradas por pequeños productores.
- Fortalecer las capacidades organizativas para la comercialización del café a través de COCLA, como café orgánico, convencional o sostenible.
- Fortalecer los corredores agroecoturísticos por la "ruta del café" parada en Santa Teresa.
- Organizar corredores agroecoturísticos y de biodiversidad por la "ruta de la granadilla" parada en Santa Teresa.

# Referencia Bibliográfica

ADERCONSULT SRL (2010). Expediente técnico del proyecto: Fortalecimiento de capacidades para la adaptación al cambio climático en áreas asociadas a los nevados Salkantay y Sacsara, en el distrito de Santa Teresa. Lima, Perú. 140 pp.

Altet, G. (2007). Estudio de adaptación a los impactos del cambio climático en la región Cusco, subcuenca de Santa Teresa: Caracterización del área de trabajo. Proyecto de medidas de adaptación al cambio climático en áreas asociadas a los nevados Salkantay y Sacsara en Cusco. 27 pp.

Barry, R.C. y Chorley, R.J. (1972). *Atmósfera, tiempo y clima*. Editorial Omega. España. 395 pp.

Carbalho, S., Anschau, A., Flores, N. & Hilbert, J. (2009). Argentina potentiality to develop sustainable bioenergy projects. Methodology to determine driving forces of land use changes using GIS tools. Presentado en el 3rd International Conference on Energy Sustainability ASME. San Francisco, California USA. Paper N° ES2009-90353.

DRA-Cusco (2011). Estadísticas agrarias del distrito de Santa Teresa. Dirección de Estadística e Información Agraria- Unidad de Estadística.

FAO (1975). Estudio agroclimático de la zona andina. Autores: M. Frere, J.Q. Rijks y J. Rea. Proyecto FAO/UNESCO/ OMM. Informe técnico. 375 pp.

IMA (2005). Aproximación a la zonificación ecológica económica de la provincia La Convención. Propuesta de ordenamiento territorial y programa de desarrollo sostenible de la provincia de La Convención. Quillabamba, Cusco. Volumen II. 152 pp.

INEI (1994). III Censo Nacional Agropecuario. Uso de la tierra, destino de la producción y régimen de tenencia. Lima, Perú. Disponible en: <http://www1.inei.gob.pe/bancocuadros/bancocuadro.asp?p=3> (fecha de consulta: octubre del 2010).

MAXIMIZE (2011). Diagnóstico de línea base Santa Teresa. Cusco. Proyecto PRAA.

MINAG (2009). Reglamento de clasificación de tierras según su capacidad de uso mayor. Decreto Supremo N° 017-2009-AG. Lima, Perú. 12 pp.

SENAMHI (2013a). Caracterización y variabilidad climática en las regiones de Cusco y Apurímac: Precipitación y temperatura. Proyecto PACC-COSUDE. 140 pp.

Trebejo, I. y Díaz, A. (1998). Análisis de la precipitación en el Perú durante 1993 a 1997. SENAMHI. 108 pp.

# PRAA PERÚ

PROYECTO DE ADAPTACIÓN AL IMPACTO DEL RETROCESO  
ACCELERADO DE GLACIARES EN LOS ANDES TROPICALES

