

Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa



Serie: Cambio Climático



Serie Cambio Climático

Sub serie: Evaluación Local Integrada de Cambio Climático para la Cuenca del Río Mantaro

Volumen I: Atlas Climático de precipitación y temperatura del aire en la Cuenca del Río Mantaro

Volumen II: Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático

Volumen III: Vulnerabilidad Actual y Futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la Cuenca del Río Mantaro

Sub serie: Evaluación Local Integrada de Cambio Climático para la Cuenca del Río Piura

Evaluación Local Integrada y Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en la Cuenca del Río Piura

Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050 - Cuenca del Río Piura

Otros títulos publicados

Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa

Consejo Nacional del Ambiente - CONAM

Av. Guardia Civil 205, San Borja

Teléfono: (51-1) 225-5370, telefax: (51-1) 225-5369

Correo electrónico: conam@conam.gob.pe

<http://www.conam.gob.pe>

Comité Editorial CONAM:

Mariano Castro

César Cervantes

María Paz Cigarán

Andrés Millones

Cesar Villacorta

Título: Escenarios Climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa

Autor: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Editor: Consejo Nacional del Ambiente - CONAM

ISBN: 9972-824-19-5

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2005-9643

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

Jr. Cahuide 785 Jesús María – Lima, Perú

Teléfono: (51-1) 614-1414

Correo electrónico: webmaster@senamhi.gob.pe

<http://www.senamhi.gob.pe>

Diseño: Enrique Limaymanta Sulca

Diagramación e Impresión: TYPOGraphics E.I.R.L.

Copyright © Fondo Editorial del CONAM

Primera edición: Diciembre de 2005

Tiraje: 1000 ejemplares

Impreso en el Perú

2005

El contenido de este documento puede ser reproducido mencionando la fuente.

Su contenido no representa en su totalidad el punto de vista del CONAM.

ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

y Disponibilidad del Recurso Hídrico

en la Cuenca del Río Santa

Consejo Nacional del Ambiente - CONAM

Presidente	Carlos Loret de Mola
Secretario Ejecutivo	Mariano Castro
Jefa de la Unidad de Cambio Climático	Patricia Iturregui

Unidad Ejecutora del Programa PROCLIM (UEP), CONAM

Dirección	Maria Paz Cigarán
Componente de Vulnerabilidad y Adaptación	Julio García (Coordinador) Carla Encinas Laura Avellaneda
Componente de Inventarios y Mitigación	Francisco Avendaño (Coordinador) Jorge Álvarez David García
Componente de Difusión y Capacitación	Leopoldo Macera (Coordinador) Pía Zevallos
Administración	Viviana Zaldívar Ana María Cerrón
Asistencia	Carmen Wilson

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI

EQUIPO TÉCNICO

Jefe del Senamhi	Mayor General FAP Juan Oviedo Motta
Dirección General de Meteorología	Mayor FAP Julio Villafuerte Osambela
Coordinación General	Mayor FAP Juan Coronado Lara
Coordinación Local	Gabriela Rosas
Equipo Escenarios Climáticos	Amelia Díaz Ángel Cornejo Clara Oria Delia Acuña Gabriela Rosas Gonzalo Fano Grinia Avalos Luis Metzger Mauricio Carrillo
Equipo SIG	Ever Castillo Carmen Vassallo Guillermo Tataje Oscar Barrenechea
Infraestructura del Sistema Computacional	Richard Miguel
Revisión	Ph. D. Eugenia Kalnay University of Maryland - UMD, USA
Consultorías:	Ph. D. Nicholas Graham Hydrological Research Center - HRC, USA M Sc. Ángel Cornejo National Service of Meteorology and Hydrology -SENAMHI, Perú
Edición:	Grinia Avalos
Asistentes de edición:	Cristina Amiel Clara Oria Jenny Roca
Diseño:	Juan Ulloa Cristina Amiel

ÍNDICE

Presentación	6
Agradecimientos	7
Introducción	8
I. Cambio Climático y los Glaciares Tropicales	10
II. Los Escenarios Climáticos	12
2.1 Los Escenarios de Emisiones	
2.2 Emisiones de CO ₂ Global	13
2.3 Concentración de CO ₂ en los diferentes escenarios	14
III. Análisis de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (Mcg)	15
3.1 Descripción de los Modelos de Circulación General	
3.1.1 Modelos utilizados en este estudio	
IV. Metodología	18
4.1 Regionalización dinámica	
4.1.1 Simulación regional	
V. Resultados	21
5.1. Temperatura en el Nivel 500 HPA	26
5.2. Estimación de disponibilidad de recurso Hídrico en base a la Temperatura en 500 HPA	
VI. Conclusiones	29
VII. Referencias Bibliográficas	30

PRESENTACIÓN

El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), Autoridad Ambiental Nacional y rector del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, es responsable de la ejecución en el país de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). La Estrategia Nacional de Cambio Climático aprobada por D.S. 086-2003-PCM, fue desarrollada multisectorialmente y expresa el nivel de prioridad política que el país le viene dando a los serios problemas del cambio climático en el Perú.

En este contexto, gracias al aporte de la Cooperación Holandesa, el CONAM ha dirigido el Programa de Fortalecimiento de Capacidades Nacionales para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire (PROCLIM), articulando la participación de trece instituciones públicas y privadas con el objetivo de lograr una gestión efectiva de los recursos humanos y financieros ante los posibles efectos del Cambio Climático en el Perú.

Dentro del componente temático de Vulnerabilidad y Adaptación (V&A), el Programa identificó tres áreas focales de estudio: la Cuenca del Río Mantaro, la Cuenca del Río Piura y la Cuenca del Río Santa. El trabajo realizado en estas áreas se orientó a sistematizar y ampliar el conocimiento sobre las condiciones climáticas actuales y generación de escenarios de cambio climático futuros.

La cuenca del Río Santa se caracteriza por ser una de las más grandes regiones glaciares tropicales del país y del mundo. Dichos sistemas glaciares representan una importante fuente del recurso hídrico para el desarrollo de actividades como la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, desde los últimos veinte años sus glaciares tropicales se encuentran en un progresivo retroceso debido al calentamiento global.

En esta cuenca, el trabajo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) se orientó a generar información climática y de escenarios climáticos futuros que fueron complementados con el Instituto para la Investigación del Desarrollo de Francia (IRD, por sus siglas en francés), quienes venían desarrollando diversos estudios de balance de masa glaciar en dicha cuenca.

Esta sinergia de esfuerzos entre instituciones nacionales e internacionales ha permitido contar con la estimación de la disponibilidad de recursos hídricos en función a la deglaciación como producto del calentamiento global del planeta, información que estamos seguros será tomada en cuenta por los gestores de los recursos de la cuenca del Río Santa y del desarrollo nacional para asegurar la seguridad alimentaria y energética del país, hacia un desarrollo sostenible.

Finalmente el CONAM desea expresar su agradecimiento al equipo técnico y científico al SENAMHI por los resultados de la presente investigación, la cual constituye una importante herramienta de análisis del proceso de calentamiento de las zonas glaciares peruanas como consecuencia del cambio climático.

CARLOS LORET DE MOLA
Presidente del CONAM

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo desea expresar su agradecimiento:

Al Instituto de Investigación para el Desarrollo - IRD de Francia en la persona del Dr. Bernard Pouyaud y al Instituto Nacional de Recursos Naturales del Perú - INRENA, con quienes se hizo posible la articulación de capacidades para el logro de la estimación futura de recurso hídrico en la Cuenca del Santa a nivel regional, nuestro profundo agradecimiento por compartir su experiencia técnica y científica con este Centro de Predicción Numérica y hacernos parte de su continuo esfuerzo por fomentar la investigación sobre glaciares en el Perú.

Al Dr. Nicholas Graham, Investigador Científico Senior del Centro de Investigación Hidrológica – HRC, de los Estados Unidos, por su acertado asesoramiento y consejos impartidos para que el presente estudio tenga la validez científica necesaria.

Al Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera – NCAR de los Estados Unidos, en las personas del Dr. Lawrence Buja y Srta. Rene Muñoz del Grupo de Trabajo para Manejo de Datos, quienes brindaron un importante apoyo a nuestros profesionales que realizaron pasantías en NCAR y pusieron a nuestra disposición la información base para la generación de escenarios regionales.

Al Dr. Bryan Gross del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de los Estados Unidos.

A la Administración Nacional de Océano y la Atmósfera – NOAA de los Estados Unidos, al Laboratorio de Sistemas de Pronóstico - FSL, al Dr. Alexander E. MacDonald y Sra. Kathleen G. Stewart y al Grupo Reynolds.

A la Universidad de East Anglia del Reino Unido, en especial al Climate Research Unit en la persona de la Dra. Clare Goodess por sus sabios consejos y asesoramiento.

Al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático - IPCC por la disponibilidad de información a través de su página web.

A Tecnologías Atmosféricas, Meteorológicas y Medioambientales – ATMET, Boulder Colorado - Estados Unidos, en las personas del Dr. Robert Walko y Dr. Craig Treback por su constante soporte técnico en el manejo del Modelo RAMS.

Al Centro Canadiense para el Modelamiento y Análisis del Clima del Servicio Meteorológico de Canadá, en la persona del Dr. Greg M. Flato, por la información proporcionada.

Al Consejo Nacional del Ambiente – CONAM por las facilidades brindadas en los aspectos técnico-administrativos para el desarrollo del proyecto como coordinador del PROCLIM.

A la Jefatura y Dirección Técnica del SENAMHI, por la confianza depositada en nuestras capacidades, y su invaluable apoyo para la ejecución de los compromisos asumidos en la elaboración de este estudio.

MAYOR FAP JUAN CORONADO LARA
Director General de Meteorología
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SENAMHI

INTRODUCCIÓN

La humanidad está siendo protagonista de los efectos que las condiciones extremas del Cambio Climático Global (CC) están ocasionando en el planeta. Podemos ver cómo el incremento de la temperatura global en este siglo está tomando la forma de sequías, inundaciones, huracanes, tifones, olas de frío, entre otros, e incluso los procesos de tropicalización y desertificación que muchos países están experimentando acarrear serias consecuencias en el plano económico.

Aunque sin duda, el retroceso de los glaciares tropicales del mundo es una de las manifestaciones más preocupantes del calentamiento global. Éstos han retrocedido dramáticamente en los últimos 27 años, de acuerdo a los estudios desarrollados por el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD) en conjunto con el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Así es como el 70% de los glaciares tropicales andinos se hallan en el Perú y los de la Cordillera Blanca representan sólo el 25% del total.

En nuestro país, los glaciares, además de ser muy buenos indicadores de la evolución del clima, son importantes reservas de agua. En la cuenca del Río Santa, durante los periodos secos, la población hace uso de estas reservas para el desarrollo de sus actividades socioeconómicas, tanto como los enormes proyectos de irrigación al norte de nuestro territorio. Sin embargo, la vulnerabilidad en la cuenca del Río Santa -asociada a avalanchas, deslizamientos, desborde de lagunas, etc.- es muy alta. Razón por la cual se hace imprescindible una adecuada planificación de desarrollo regional que considere la variable climática como un factor prioritario para evitar catástrofes similares a las que ocurrieron años atrás en esta región.

Conocer en qué medida el retroceso glaciar se asocia al calentamiento global es la razón que llevó al IRD (1991), SENAMHI (1994, 2003), CONAM (2001) entre otros, a realizar mediciones y estudios sobre este fenómeno. Es así como los resultados demuestran que existe una fuerte correlación entre el escurrimiento glaciar y la temperatura atmosférica.

Los estudios recientes del IRD determinan que la temperatura del aire en el nivel isobárico de 500 hPa (aproximadamente a 5000 m.s.n.m.), estimada de los Reanalysis del National Center Environmental – National Center Atmospheric Research NCEP/NCAR (Kalnay, 1996), presenta una correlación extremadamente alta, en escala mensual, con el proceso de escurrimiento. Por lo tanto, se espera que las proyecciones de la temperatura del aire en esos niveles puedan ser un factor de estimación del comportamiento del escurrimiento glaciar en el futuro que permita evaluar lo que sucederá con los sistemas glaciares de la cuenca del río Santa.

En el año 2003, el SENAMHI propone la realización de un estudio y modelamiento numérico para generar escenarios de cambio climático regionales sobre cuencas específicas usando, como condiciones iniciales, los escenarios climáticos globales de Modelos de Circulación General (MCG) basados en los escenarios de emisión del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 1997), con lo cual se generarían también escenarios de temperatura del aire a una resolución alta y a nivel de Cordillera Blanca. Esto permitiría tener proyecciones de la temperatura del aire en los próximos 50 años y con ello estimar el impacto del escurrimiento glaciar. Cabe mencionar que este estudio se realizó en el marco del Programa de Fortalecimiento de Capacidades Nacionales para Manejar el Impacto del Cambio Climático y la Contaminación del Aire (PROCLIM).

Los MCG, además de trabajar con resoluciones horizontales gruesas, alrededor de 200 Km., lo que representa una seria limitación para una simulación más detallada de una determinada región, poseen incertidumbres propias de su formulación y de aquellas asunciones que adopta de los procesos físicos que aún desconocemos (parametrizaciones). Por lo que tomar los resultados directamente de los modelos globales para una evaluación de detalle podría llevar a errores mayúsculos de apreciación. En este caso, la metodología aplicada para el desarrollo del estudio estuvo basada en el modelamiento climático regionalizado que permite obtener una mejor aproximación del comportamiento del clima futuro a nivel de regiones específicas tomando en cuenta los aspectos topográficos locales. Por ello es tan importante el trabajo de regionalización a través del uso de métodos dinámicos y estadísticos que nos permitan tomar las decisiones más pertinentes.

Este estudio comprende el análisis de los escenarios disponibles de los escenarios A2 y B2 de modelos MCG para la temperatura del aire en los niveles medios de la atmósfera, representado por el nivel de 500 hPa., para el periodo 2000-2050. Los escenarios A2 y B2 representan las condiciones extremas de alto y bajo nivel de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), respectivamente. Este análisis se realizó tanto a nivel regional (Sudamérica) como a nivel local (en el punto más alto de la Cordillera Blanca). Asimismo, se ha desarrollado el modelamiento regional a través del procesamiento del modelo RAMS.

Los resultados del análisis y salidas del modelamiento regional han sido trasladados a un sistema de base de datos sobre escenarios futuros de la temperatura del aire a 5000 m.s.n.m. para luego ser aplicados como predictores de la disponibilidad hídrica en base al escurrimiento glaciar a través de un modelamiento estadístico que correlaciona ambas variables. Este modelamiento ha sido previamente diseñado y ejecutado por el IRD. Finalmente, este instituto ha desarrollado las previsiones del escurrimiento glaciar en base a las proyecciones de temperatura generadas, y con ello las tendencias del comportamiento glaciar en los próximos 50 años, lo cual ha permitido precisar mejor la tendencia hacia una deglaciación inminente.

El principal objetivo de este estudio es determinar la disponibilidad de recursos hídricos en base a la generación de escenarios climáticos globales y regionales de temperatura en aproximadamente 5000 m.s.n.m. y su correlación con el retroceso glaciar. El escenario de emisión utilizado es el A2, el cual se considera uno de los escenarios extremos sobre calentamiento climático global.

CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS GLACIARES TROPICALES

Por su gran sensibilidad al cambio climático, los glaciares tropicales son excelentes indicadores de la evolución del clima; el dramático retroceso que estos vienen sufriendo en todo el mundo podría sugerirnos que otros parámetros hidrometeorológicos podrían estar también sufriendo cambios significativos en la actualidad y probablemente, podrían acentuarse en las próximas décadas.

Asimismo, diversos estudios demuestran que, en los últimos decenios, importantes cordilleras nevadas del Perú han sufrido acelerados retrocesos lo que implica una reducción del recurso hídrico. Incluso, en algunos casos se menciona que cuando la pendiente del lecho es muy pronunciada se forman glaciares colgantes que por su inestabilidad han caído sobre lagunas originando violentos desembalses (Portocarrero, 1995). De otro lado, en otras partes del país se han producido avalanchas, como la ocurrida en el Cuzco en el año 1998 sobre la Hidroeléctrica del Machu Picchu, que podrían atribuirse también a deshielos en las cumbres nevadas.

Tratar de encontrar respuestas a los probables impactos que el cambio climático está ocasionando sobre los glaciares tropicales en nuestro país es una tarea a la que se han abocado distintos centros de investigación internacionales con la participación de investigadores peruanos. Por ejemplo, el Impacto Indirecto sobre la Disponibilidad del Recurso Hídrico ha sido realizado por Marengo (1995) quien desarrolló un estudio tratando de determinar las tendencias significativas en las descargas de los ríos en Perú. No obstante, los resultados del trabajo no muestran cambios importantes. Las series de datos utilizadas no han sido lo suficientemente extensas como para obtener respuestas definitivas, por lo que consideramos que un estudio más detallado, incluyendo toda la información disponible, podría dar respuestas más concluyentes.

Cabe destacar que en otras zonas de América ya se están identificando cambios climáticos significativos en los regímenes hídricos de algunos ríos. Como por ejemplo, en los ríos Paraná, Paraguay, Uruguay y Negro al sureste de Sudamérica por Genta et.al. (1998).

Por ello, es importante aplicar el conocimiento de los escenarios climáticos en el modelamiento de sistemas de glaciares, a fin de determinar cómo es que los cambios en la distribución de temperaturas podrían afectar nuestros glaciares,

y en lo que respecta a los regímenes de lluvias, estimar la disponibilidad hídrica de los próximos 50 años.

Los glaciares tropicales cubren una superficie de 2.500 kilómetros cuadrados, y son particularmente importantes. En primer lugar por los recursos hídricos con que benefician a los poblados próximos y en segundo lugar porque a nivel científico son excelentes indicadores de la evolución del clima. El mayor porcentaje de glaciares tropicales en el mundo se halla en la Cordillera de los Andes, 71% está en el Perú, 20% en Bolivia, 4% en Ecuador y otro 4% en Colombia. Las mediciones directas y las estimaciones de la variación de la masa glaciaria, es decir la diferencia entre la acumulación de nieve y hielo y lo que se fusiona, realizadas en las últimas décadas, confirman que los glaciares tropicales han sufrido un retroceso acelerado en los últimos 30 años. Según expertos e investigadores, de seguir esta tendencia, se estima que en los próximos 20 ó 30 años, los glaciares ubicados por debajo de los 5000 m.s.n.m. habrán desaparecido.

En 1981, el IRD y los institutos hidrológicos de Ecuador y Bolivia realizaron diversos estudios para encontrar la posible relación entre el evento El Niño y la evolución de los glaciares andinos. Como resultado de estos trabajos se determinó la existencia de una relación directa entre el balance de la masa de los glaciares y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este estudio incluyó el establecimiento de una red de observación de glaciares a lo largo de la cordillera de los Andes.

Francuo et al. (2004) realizó una evaluación del impacto de la circulación atmosférica anómala del ENOS sobre el balance de masa del glaciar Antizana en Ecuador. La evaluación se centró en el periodo 1995 y 2002, durante el cual tuvo lugar el Fenómeno El Niño (FEN) (1997-1998) y un prolongado periodo de La Niña (1998-2000). El estudio mostró que durante el FEN se produjo un balance negativo de la masa glaciaria, mientras que durante La Niña, el balance estuvo cerca al equilibrio. Esto se explica por la escasez de precipitación que predomina durante los eventos El Niño sobre la región de glaciares originando un recalentamiento de la atmósfera, lo que reduce la nieve y disminuye paralelamente su albedo. Bajo estas condiciones, la pérdida de masa se intensifica, y si a esto le adicionamos el calentamiento global, el efecto es más prolongado e intenso.

Un efecto directo de la pérdida de masa glaciaria se refiere al régimen hidrológico de las cuencas que

dependen de glaciares. Monitoreos permanentes de los caudales y volúmenes escurridos, durante diez años, en diversas cuencas de la cordillera Blanca, muestran un aumento significativo de los volúmenes escurridos, a pesar de una disminución de las precipitaciones. Casassa (2004) evaluó las descargas de las cuencas glaciares del centro y sur de Chile en los últimos 30 años, y encontró que aquellas en las que es evidente el retroceso glaciar habían incrementado su descarga, a la vez que mostró las tendencias de disminución de precipitaciones durante el mismo periodo. Los análisis de correlaciones realizados indican que el incremento de descargas está relacionado con el incremento de retroceso glaciar debido al calentamiento regional. Así es como se sustenta el hecho de que un permanente calentamiento atmosférico termine por agotar las reservas de agua dulce de los glaciares y en un escenario futuro no disponer del recurso hídrico glaciar principalmente en regiones semiáridas, dependiendo de la tasa de deglaciación considerada en cada cuenca.

Los análisis de series históricas de temperatura del aire de estaciones de superficie dan cuenta que en diferentes regiones del país se evidencia una tendencia al calentamiento atmosférico. El IRD realizó el análisis histórico en niveles de mayor altitud a través del re-análisis del Nacional Center for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos (Kalnay 1996) dado que casi no se cuenta con registros meteorológicos por encima de los 5000 m.s.n.m. Esta información de aproximaciones en la temperatura del aire, ha sido comparada con el escurrimiento glaciar proveniente de datos hidrológicos (desde 1953) de la cuenca vertiente de Llanganuco (80 Km², 40% superficie glaciar) y de la cuenca pequeña del glaciar Artesoncocha (8,2 Km², 80% superficie glaciar), encontrándose una fuerte correlación entre ambos parámetros. Por lo tanto, es evidente la posibilidad de utilizar la temperatura a 5000 m.s.n.m. (500 hPa) como predictor de futuros cambios en la disponibilidad de recurso hídrico proveniente de sistemas glaciares utilizando este modelamiento estadístico desarrollado por el IRD.

LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC¹ (siglas en inglés), los “escenarios” son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro.

La metodología empleada para la construcción de escenarios varía de acuerdo al propósito de la evaluación. Por muchos años, los escenarios han sido utilizados por los gobiernos en los ámbitos empresariales y militares como base para el planeamiento estratégico. Estos escenarios socioeconómicos proporcionan un marco para el pensamiento estructurado de cómo el futuro se puede revelar. Por ejemplo, los escenarios pueden requerirse para:

- Ilustrar el cambio climático (en términos del clima presente)
- Proyección de las consecuencias potenciales del cambio climático, como por ejemplo, estimar el cambio futuro de la vegetación natural e identificar especies en riesgo.
- Planeamiento estratégico ante riesgos de incrementos de nivel del mar y de inundaciones.
- Políticas de control de las emisiones, etc.

2.1 LOS ESCENARIOS DE EMISIONES

Existen escenarios del “posible clima futuro”, que son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de asunciones sobre las emisiones futuras de los gases de invernadero y otros agentes contaminantes; es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones. Un panorama en el cual la emisión de gases de invernadero es baja, debe conllevar a un cambio menos rápido del clima que uno en el cual las emisiones son altas. Un panorama del cambio del clima por lo tanto es una descripción coherente de un cambio futuro del clima bajo asunciones específicas sobre el crecimiento de emisiones de gases de invernadero y de otros agentes contaminantes y sobre otros factores que puedan influenciar en el clima futuro.

Tyndall Centre (2002), señala que los escenarios son una descripción del clima futuro, el cual depende de asunciones acerca de futuras emisiones de gases de efecto invernadero y otros

contaminantes, dependiendo de las opciones de los escenarios de emisiones.

En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (REEE) ideados por Nakicenovic y otros. Estos nuevos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto bruto interno. Los escenarios REEE se han utilizado como base de las proyecciones climáticas de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) y modelo acoplados.

Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico y está constituido de cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2.

Escenario A1

La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

Escenario A2

La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo y constante de la población.

¹ Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001
Impactos Adaptación y Vulnerabilidad

El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

Escenario B1

La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

Escenario B2

La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 Y A1. Aunque el escenario también esta orientado hacia la protec-

ción ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas: local y regional.

2.2 EMISIONES DE CO2 GLOBAL

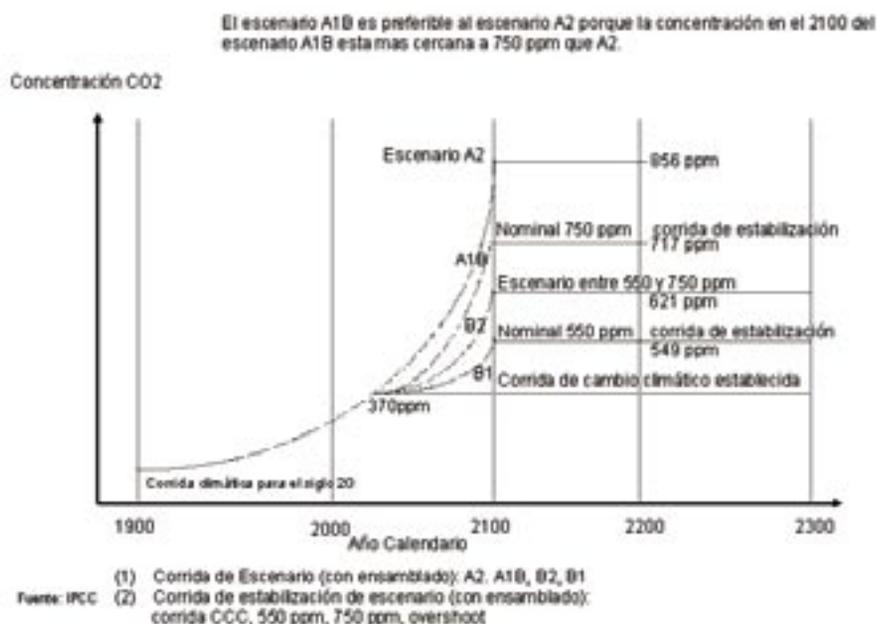
En el gráfico 2 (página siguiente, arriba), se muestra las emisiones globales de CO₂ provenientes de la energía e industria desde 1900 a 1990 y en los 40 escenarios desde 1990 a 2100 indicados en forma de índice (1990=1).

Las líneas punteadas muestran los escenarios individuales y el área sombreada de azul denota la diversidad de escenarios aparecidos en las publicaciones, conforme se documenta en la base de datos del REEE.

Los 40 escenarios son clasificados en 6 grupos, las barras coloreadas verticales indican el rango de emisiones en el 2100 de estos 6 grupos, asimismo se muestran los escenarios que incluyen iniciativas climáticas adicionales designados como “intervención”, aquellas que no tienen intervención y aquellas que no pueden ser asignadas a ninguna de las 2 categorías anteriores denominada “no clasificada”

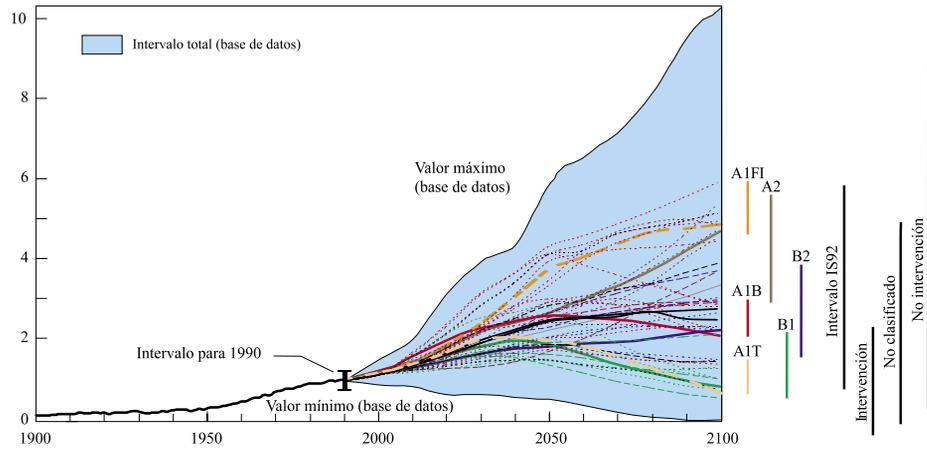
En el gráfico 3 (página siguiente, abajo), se muestra el total global anual de las emisiones de CO₂ de las diferentes fuentes (energía, industria y cambio de uso de la tierra) desde 1990 al 2100 en giga toneladas de carbono (GTn/año) por las familias en los 6 grupos de escenarios. Los 40 escenarios

Gráfico 1
Estabilización de escenarios propuesta por IPCC WG1 TSU



² Relación coherente entre población mundial, producto bruto mundial y consumo de energía

Gráfico 2
Emisiones de dióxido de carbono mundiales
Escenarios IE-EE e intervalos de valores de la base de datos (Índice 1990 = 1)



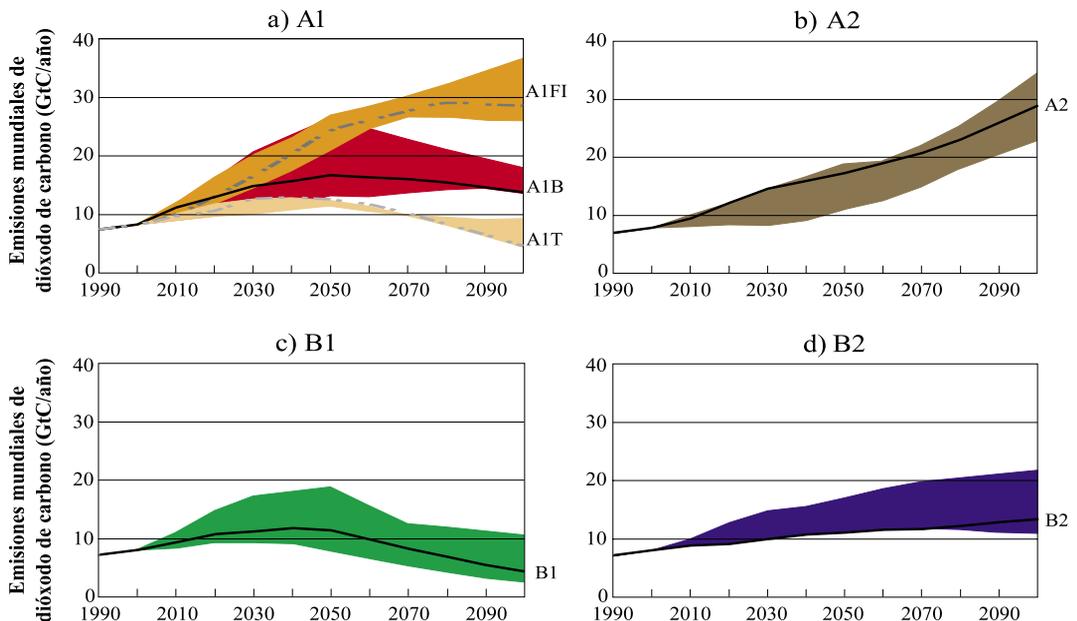
son presentados en 4 familias (A1, A2, B1 y B2) y los 6 grupos de escenarios: A1F1 uso intensivo de combustible fósil, A1T predomina el uso de combustible no fósil y un balanceado uso en A1B, A2, B1 y B2. Cada banda coloreada de emisión muestra el rango de los escenarios armonizados²; y no armonizados dentro de cada grupo y se muestra el promedio marcado en líneas sólidas para las familias principales así como para A1F1 y A1T en líneas punteadas. Se puede observar que el escenario A2 emitiría 28Gtn el 2100, mientras

que el A1 14Gtn, el B2 13Gtn y B1 5Gtn para el año 2100.

2.3 CONCENTRACIÓN DE CO2 EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS

De acuerdo a las concentraciones de CO2 se puede observar en el gráfico 1 (en la página anterior) que el escenario A2 tendrá una concentración de 850 ppm (partes por millón) en el año 2100, mientras que el escenario A1 750 ppm, B2 621 ppm y B1 549 ppm en el año 2100.

Gráfico 3
Total global anual de las emisiones de CO2



ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA (MCG)

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

Los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra. Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un mayor tiempo. Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, topografía, y parámetros de la vegetación. Estas expresiones son basadas en las leyes físicas tales como la conservación de energía y masa así como las relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas, tales como fórmulas que relacionen temperatura y humedad con la formación de la nube.

Los MCG utilizan las mismas ecuaciones de movimiento que un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT), siendo su propósito simular numéricamente cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera (tales como la constante solar) o parámetros físicos (tal como la concentración de los gases de efecto invernadero). Los modelos PNT se utilizan para predecir el tiempo futuro a corto plazo (1-3 días) y medio plazo (de 4-10 días). Los modelos MCG corren para mayor tiempo, años; tiempo suficiente para aprender sobre el clima en un sentido estadístico (es decir la media y la variabilidad).

Los MCG por ser globales tienen una menor resolución por lo cual no son muy indicados para

estudios e investigación de zonas específicas. En ese sentido es necesario el uso de un modelo regional el cual puede tomar mayores resoluciones y ser más hábil en la determinación del clima de una zona. Entonces, para determinar el clima de una zona con mayor resolución se utilizan dos modelos; uno global que da las condiciones de frontera a otro modelo regional denominándose a este proceso regionalización dinámica.

Una comparación entre los modelos MCG y los modelos PNT están resumidos en la tabla 1 (página siguiente).

3.1.1 Modelos utilizados en este estudio

Los modelos utilizados para la determinación de los escenarios de Temperatura del aire sobre la zona del Huascarán provienen de cinco Centros de Predicción del Clima y Cambio Climático y un resumen se encuentra en la tabla 2 (página 17).

- **Instituto de Max Planck -Alemania**

Cuyo modelo es el ECHAM4/OPYC3 que fue desarrollado en cooperación entre el Instituto de Meteorología Max Planck (MPI) y Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) en Hamburgo, Alemania. El modelo MPI ECHAM4 (T42 L19) puesto en funcionamiento desde el año 1996 es el cuarto de una serie de los modelos desarrollados en MPI que originalmente derivaron del modelo de rango medio para Europa (ECMWF).

En la representación horizontal utiliza el modo espectral (funciones armónicas esféricas) con transformaciones a la grilla gauseana para el cálculo de cantidades no lineales y de alguna variable física. Usa la truncación triangular 42 (T42) o equivalente a 2.8 x 2.8 grados latitud-longitud. En el dominio vertical, va desde la superficie hasta los 10 hPa. Para una superficie de 1000 hPa, el más bajo nivel atmosférico es en 996 hPa. Utiliza la coordenada híbrida sigma-presión en la vertical con 19 niveles.

Tabla 1. Comparación de los modelos PNT y MCG

Contrastes	PNT	MCG
Objetivo	Para predecir el tiempo	Simular la evolución del clima
Cobertura espacial	regional o global	global
Rango temporal	días	años
Resolución espacial	Variable (20-100 km)	Usualmente 3 a 5°
Importancia de las condiciones iniciales	alta	baja
Importancia de la radiación nubosidad	baja	alta
Importancia de la superficie (suelo, hielo, océano...)	baja	alta
Importancia de la dinámica y termodinámica oceánica	baja	alta
Importancia del modelo de estabilidad	baja	alta
Similitudes		
física	Ecuaciones de movimiento	
método	Diferencias finitas, o representación espectral	
salidas	Variables de estado y movimiento de la atmósfera en 3 dimensiones	
Máximo tiempo de cada integración	Controlado por la resolución espacial	

- **Hadley Centre para la predicción climática e investigación - Inglaterra**

El modelo es el denominado HADCM3 el cual es un modelo acoplado océano-atmósfera MCG descrito por Gordon (1999). Este modelo tiene una climatología de control estable.

La componente atmosférica del modelo tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2.5° de latitud con 3.75° de longitud, los cuales producen una grilla global de 96 x 73; esto es equivalente a una resolución de 417 Km X 278 Km sobre el ecuador, reduciéndose a 295 Km X 278 Km en 45° de latitud, comparable con una resolución T42.

La componente atmosférica del modelo opcionalmente permite la emisión, transporte, oxidación y deposición de los componentes sulfúricos para ser simulados interactivamente.

La componente oceánica del HadCM3 tiene 20 niveles con una resolución horizontal de 1.25° X 1.25°, la cual es una resolución que hace posible la representación de importantes detalles de la estructura normal oceánica.

El modelo es inicializado directamente del estado observado del océano (Levitus, 1994) en reposo con un adecuado estado atmosférico y del hielo oceánico. La atmósfera y el océano intercambian información una vez por año. Los flujos de calor y de agua son conservados exactamente en la transferencia entre sus diferentes puntos de grilla.

- **Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization de Australia**

El modelo utilizado es el CSIRO-Mk2, el cual es acoplado y espectral con una resolución horizontal R21, cuya grilla es aproximadamente 625 Km X 350 Km. Tiene 9 niveles en la atmósfera vertical.

Los flujos de calor ajustados son aplicados al océano para representar el calor desde las profundidades del océano y el efecto de las corrientes. Los flujos son determinados por un experimento de 10 años de las temperaturas de agua de mar observadas el cual es manejado separadamente.

El modelo no toma en cuenta todos los procesos (natural y antropogénico) los cuales afectan la variabilidad climática y el cambio climático. Algunos procesos no son bien entendidos y otros deben estar representados en una manera simplificada que pueda asegurar una eficiencia computacional.

Este modelo no incluye el efecto de enfriamiento regional producido por los sulfatos lo cual ha sido identificado por el IPCC como un importante elemento antropogénico para el cambio climático.

- **NCAR-CSM de Estados Unidos**

Este modelo acoplado CCSM (Community Climate System Model) es un modelo para simular el sistema climático de la tierra. Integrado por cuatro componentes separados que simulan simultáneamente la atmósfera, océano, la super-

ficie y hielo marino, y un componente central acoplador, el CCSM permite a los investigadores conducir la investigación fundamental del pasado, presente y futuros estados del clima.

El proyecto de CCSM es un esfuerzo cooperativo de los investigadores del clima de los Estados Unidos apoyado principalmente por el National Science Foundation (NSF) y centrado en el National Center for Atmospheric Research (NCAR) en Boulder Colorado. El desarrollo científico de este modelo CCSM es dirigido por los grupos de trabajo del CCSM, que se reúnen dos veces al año. El taller principal de CCSM se realiza cada año en junio para mostrar los resultados de los grupos de trabajo y coordinar el futuro del CCSM.

Las componentes modelos del CCSM son:

cpl	El acoplador
atm	Componente atmosférica
ocn	Componente oceánica
ice	Componente de hielo marino
lnd	Componente de la superficie terrestre

Durante el curso de una integración de CCSM, cada uno de los cuatro modelos componentes integra hacia adelante en tiempo simultáneamente y periódicamente se detiene para intercambiar la información por el acoplador. El acoplador recibe campos de los modelos, cálculos, mapas y fusiona esta información y envía de regreso los campos a las componentes del modelo. Para manejar esta secuencia de los intercambios de comunicación, el acoplador maneja el tiempo de proceso del modelo acoplado.

El modelo atmosférico utilizado se denomina Community Atmosphere Model (CAM), el cual es un modelo atmosférico de circulación general desarrollado a partir de NCAR- CCM3. Tiene una resolución horizontal de T42 con 26 niveles en la vertical, posee una coordenada vertical híbrida unida a una coordenada sigma cercana a la superficie y una coordenada de presión en el tope de la atmósfera.

El modelo oceánico es una extensión del Parallel Ocean Program (POP) de los Alamos National Laboratory (LANL). Las grillas del POP tienen 1° X 3.6° de resolución horizontal.

La componente de hielo marino del CCSM se denomina Community Sea-Ice Model (CSIM4), que incluye esquemas dinámicos, espesores de la distribución de hielo, conservación y termodinámica de la energía, y un modelo de una capa de mezcla. Este modelo tiene la habilidad de correr usando concentraciones de hielo prescritas anteriormente.

- [Center for Climate System Research \(CCSR\) National Institute for Environmental Studies \(NIES\) - JAPON/USA](#)

Este modelo CCSR/NIES es un modelo acoplado con truncación triangular en el número de onda 21. En la componente atmosférica la resolución horizontal es cerca de 5.6° x 5.6° y 20 niveles en la atmósfera vertical. En la parte oceánica la resolución es de 2.8° x 2.8° y 17 niveles en la vertical. Flujos de ajustes son aplicados para el intercambio del calor sensible y latente entre la atmósfera y el océano para prevenir una deriva en el clima modelado.

Tabla 2:

Características generales de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG) utilizados

Centro	País	Acrónimos	Modelo	Resolución	Escenarios	Años
Max Planck Institute für Meteorologie	Alemania	MPIfM	ECHAM4 / OPYC3	T42	A2, B2	1970-2050
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Inglaterra	HCCPR	HADCM3	3.75° x 2.5°	A2, B2	1970-2050
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	CSIRO	CSIRO-Mk2	R21	A1, A2, B1, B2	1970-2050
National Centre for Atmospheric Research	EEUU	NCAR	NCAR-CSM	T42	A2	2000-2050
Center for Climate System Research (CCSR) National Institute for Environmental Studies (NIES)	Japón / EEUU	CCSR/NIES	CCSR/NIES AGCM + CCSR OGCM	T21	A1, A2, B1, B2	1970-2050

Fuente: REEE escenarios IPCC-DDC

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente estudio se basa en el análisis de los escenarios de la temperatura del aire a 500 hPa (aproximadamente a 5000 m.s.n.m.) simulados por los modelos MCG anteriormente mencionados (Tabla 2, página anterior), corridos bajo los Reportes Especiales de Escenarios de Emisión (REEE) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

La temperatura del aire a 500 hPa, se ha analizado a escala regional comprendiendo todo el continente sudamericano en dos periodos, uno entre el 2000-2025 y el otro entre el 2026 - 2050 en los dos escenarios extremos, A2 y B2. Se ha dividido en dos periodos para ver si hay incrementos significativos en cada uno de ellos.

Por otro lado, a nivel local, se ha analizado las salidas de todos los modelos para el punto de grilla más cercano a la zona de Huascarán (9.2°S, 77.5°W), en este punto también se adiciona el resultado de la regionalización dinámica realizada por el RAMS hasta el año 2050 en sus dos escenarios.

4.1 REGIONALIZACION DINAMICA

Los datos usados en la regionalización de escenarios climáticos en el Perú fueron generados por la National Center for Atmospheric Research (NCAR), según los escenarios climáticos de IPCC. El modelo fue NCAR-CSM en sus dos escenarios A2 y B2 que corresponden a los escenarios de alta emisión y de menor emisión de contaminantes respectivamente.

La información del NCAR describe los escenarios del sistema climático futuro de la Tierra, estos datos proporcionados al Centro de Predicción Numérica (CPN) del SENAMHI, están disponibles como archivos temporales con una frecuencia diaria entre el periodo 2000-2020 y de 6 horas entre el periodo 1983-2000. Esta información fue usada para generar las condiciones iniciales y de frontera de un modelo regional climático.

Normalmente, el acoplamiento entre un modelo global (como el de NCAR) y un modelo regional es llevado a cabo estableciendo las variables estado del modelo (vientos, temperatura, densidad y humedad) en los puntos grilla a lo largo de las fronteras laterales del modelo regional, y en las grillas internas del modelo al inicio del tiempo

de simulación. Para la simulación en este caso, una de las condiciones de frontera como la altura geopotencial en los diferentes niveles verticales de la atmósfera no estuvieron disponibles, por lo que fue necesario extrapolarla usando la ecuación hidrostática (relacionando temperatura y cambios de presión en la vertical), con una razón de cambio de temperatura asumido en la vertical dada la temperatura y presión en la superficie en los niveles mandatarios de la atmósfera, por lo tanto es factible el cálculo de las alturas geopotenciales.

4.1.1 Simulación Regional

El modelo regional utilizado en estos experimentos fue el Regional Atmosphere Modeling System (RAMS) versión 4.4. El RAMS, originalmente desarrollado en Colorado State University (Pielke et.al. 1992), es un modelo tridimensional, no-hidrostatico, con capacidad para anidamientos de dominios, ofrece varios esquemas de turbulencia, radiación, inicialización y condiciones de frontera.

En la simulación realizada se han determinado 3 dominios, el primero con una resolución de 60 kilómetros que cubre todo el Perú, y los otros dos en la zona norte que cubre la cuenca de Piura (ver gráfico 4) y en la zona central sobre la cuenca del Mantaro con una resolución de 20 kilómetros. A esta configuración se denomina anidamiento, la cual es una técnica que aumenta la resolución de la simulación en un área de interés.

El periodo de simulación del modelo es de 1983 al 2050, siendo el “model timestep” o paso de tiempo de 50 segundos. Esto significa hacer una integración³ de las ecuaciones gobernantes⁴ de la atmósfera cada 50 segundos. Por tanto, el número total de integraciones en este periodo de simulación es aproximadamente 1198368000, esto sólo para cada uno de los puntos de grilla del dominio. Al dominio de Perú le corresponde un arreglo de 47 x 47 y para los otros dominios fueron de 50 x 35 y con 30 niveles en la vertical.

Existen dos maneras generales de proceder con una simulación en un periodo de tiempo extendido. La primera consiste en la simple actualización de las forzantes laterales con los datos del modelo de larga escala. La circulación interior y las condiciones superficiales de suelo evolucionan libremente. En el segundo caso, el modelo regional

³ La integración se realiza al resolver una ecuación diferencial

⁴ Sistema de ecuaciones diferenciales que rigen la dinámica de un fluido geofísico.

puede hacer la integración numérica en grupos de “sub-simulaciones” en el cual las variables internas del modelo RAMS (dentro del dominio) son periódicamente re-inicializadas, estas variables internas pueden incluir condiciones de superficie y humedad de suelo.

En esta simulación se han utilizado los siguientes esquemas de acoplamiento entre el modelo de larga escala y el modelo regional:

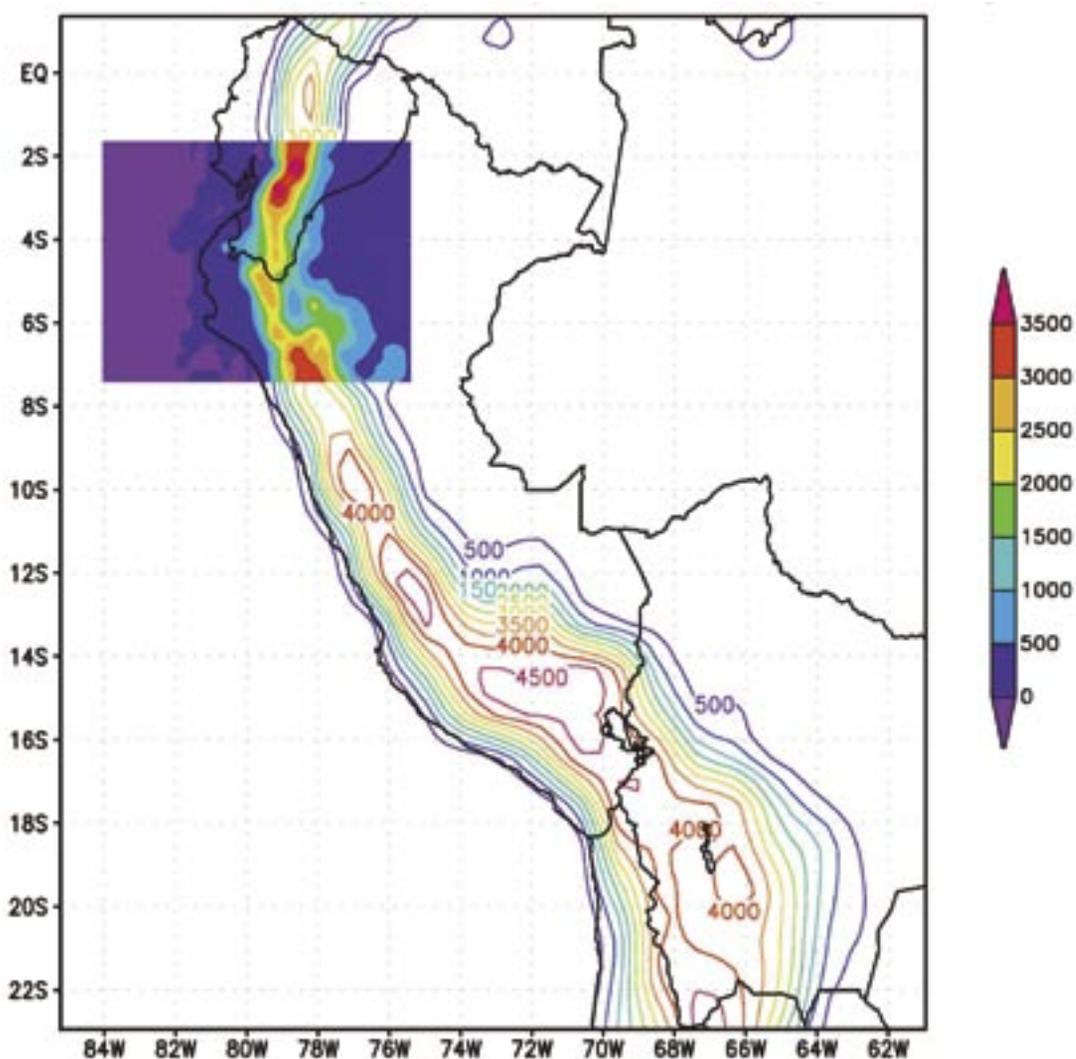
- Cada 10 días los dominios de 60 y 20 km del modelo regional fueron reinicializados en las grillas internas y en la frontera con

condiciones de atmósfera y suelo del modelo global de NCAR. En la atmósfera, los datos de altura geopotencial fueron aproximados tal como se indicó anteriormente. Los datos de temperatura superficial del mar (TSM) fueron inicializados de los valores climáticos mensuales estándar de RAMS que tiene para todo el globo. La humedad de suelo fue inicializada usando un esquema similar, el cual usa la condición inicial (temperatura, humedad) de atmósfera (i.e. del modelo de larga escala) para inicializar los perfiles de humedad de suelo.

Gráfico 4:

Representación de los dominios de simulación. El área mayor es el dominio madre (Perú, 60 Km.) y el área sombreada es el dominio anidado (Norte, 20 Km.)

Dominio PERU (60 Km) - PERU NORTE (20 km)



- El dominio madre (60 km) del modelo regional fue “corrido” por 10 días usando condiciones de frontera laterales del modelo de gran escala con la aproximación de las alturas geopotenciales acotadas al inicio. La humedad de suelo le permitió evolucionar libremente durante los 10 días y la TSM permaneció fija desde el inicio al fin de este periodo. El dominio anidado fue también re-inicializado de la misma manera que el dominio madre y el tiempo de integración para los siguientes 10 días usó condiciones de frontera del dominio madre del modelo regional.

Con el esquema de acoplamiento así definido se han obtenido los resultados, pero considerando que las condiciones atmosféricas globales que alimentaron la regionalización climática (modelo regional) no son reales, algunos posibles problemas pueden derivarse de esta simulación como la continuidad del acoplamiento de la TSM, la re-inicialización de la humedad del suelo y los choques de la re-inicialización atmosférica, las que contribuyen a incrementar el grado de la incertidumbre.

Como el dominio del modelo regional incluyó el océano fue necesario definir la TSM del modelo global para que pueda ser empleada por el modelo regional, la cual fue fija, con valores apropiados para la última mitad del siglo XX. Una evaluación de los cambios de TSM a lo largo de la costa de Ecuador y la costa norte del Perú, tal como aparecen en los escenarios climáticos,

sugiere incrementos consistentes del orden de 0.3°C durante el periodo 2000-2020. Asumiendo que esto fuera real, implicaría que el contenido de humedad troposférica en niveles bajos simulados serían pequeños dado la condición de TSM fija, resultando posiblemente en un ligero sesgo en la simulación de precipitación.

La re-inicialización de la humedad de suelo del modelo regional es calculada en base a las condiciones iniciales del modelo de larga escala, la cual representa una aproximación poco usual, la mas adecuada pudo haber sido la de transportar de manera continua los datos de humedad de suelo hacia el fin de la simulación. Sin embargo, se puede esperar que los cambios en las condiciones de larga escala (MCG) sean reflejados en la re-inicialización de la humedad de suelo en el modelo regional.

El esquema de re-inicialización de los dominios internos del modelo regional con condiciones de larga escala cada 10 días, produce significativas perturbaciones debido al acople en la inicialización, las que afectan los primeros 1-2 días en cada 10 días de periodo, dichos datos de este periodo “spin-up” no fueron removidos de los resultados. Un método sugerido a futuro sería la evolución continua de la circulación del modelo regional, pero no hay garantía que este método produzca aceptables resultados. Alternativamente, un periodo de tiempo mas largo podría probablemente ser usado entre re-inicialización con los datos de un apropiado modelo de “spin-up” removido.

RESULTADOS

5.1 TEMPERATURA EN EL NIVEL DE 500 HPA.

5.1.1 A nivel Perú

En el gráfico 5 (página siguiente) se muestran las diferencias de la temperatura en 500 hPa (aproximadamente 5000 msnm), durante el periodo 2000 - 2025 respecto al 1990 - 2000, llamado también periodo de referencia, para el Escenario A2. En dicha figura podemos observar que todos los modelos en este escenario indican una tendencia ascendente de la temperatura en todo Sudamérica, presentando los mayores incrementos el modelo Australiano CSIRO A2, el cual oscila entre 0.7° a 0.9°. Los demás modelos tienen incrementos entre 0.1 a 0.5 con respecto al periodo de referencia.

En forma indirecta también se puede observar los gradientes los cuales nos podrían indicar la presencia de las Corrientes en Chorro las cuales son importantes para el desarrollo de las precipitaciones. En este caso, podemos observar, que la mayoría de los modelos indican que el Chorro Subtropical estaría localizado más al sur de su posición normal, lo cual indicaría que las tormentas pueden afectar nuestro territorio sur y central con mayores precipitaciones. El modelo Max Planck indica un chorro más al norte lo mismo que el modelo del Hadley Centre, con lo cual es bastante probable que las precipitaciones sean menores en el sur y centro de nuestro país, tal como lo indica el modelo de Hadley en sus dos escenarios extremos, cuyas figuras se muestran en el Resumen Ejecutivo de los Escenarios de Cambio Climático en el Perú al 2050 para la Cuenca del río Piura⁵.

En el gráfico 6 (página 23) se muestran las diferencias de la temperatura en promedio para 500 hPa (aproximadamente a 5000 m.s.n.m.) durante los años 2026 y 2050 para el escenario A2. Se puede observar notablemente que estos últimos 25 años la temperatura incrementará con mayor intensidad; todos los modelos indican esa tendencia, siendo el más conservador el modelo Alemán que indica un incremento entre 0.3° a 1.3° en todo Sudamérica, en este periodo el modelo que indica mayor incremento es el japonés con incrementos entre 1.4° a 2.1°. La tendencia de la posición de la corriente en chorro es similar al primer periodo.

El gráfico 7 (página 24) muestra la diferencia de la temperatura en 500 hPa para el periodo 2000-

2025 en el escenario B2. Los modelos indican incrementos en toda Sudamérica oscilando entre 0.2° a 0.7°. La posición de la corriente en chorro es similar al escenario A2.

El gráfico 8 (página 25) muestra la diferencia de la temperatura en 500 hPa durante el año 2026 -2050 para el escenario B2. Similar al escenario A2 para este mismo periodo, los modelos indican un incremento mayor de la temperatura en todo Sudamérica siendo mayor en el modelo Japonés con incrementos de 1.2° a 2.0°, mientras los otros modelos indican un incremento entre 0.5° a 1.5°. La posición de la corriente en chorro es muy similar al periodo anterior.

5.1.2 A nivel de la cuenca del Río Santa

En el estudio de investigación “Glaciares y recursos hídricos en la Cuenca del Santa” realizado por el IRD-SENAMHI en Feb-2003, se encontró una buena relación entre los caudales del río Santa y la temperatura del aire en 500 hPa con los datos obtenidos de los Reanálisis, producidos por NCEP. Esto es importante ya que conociendo la tendencia de la temperatura en ese nivel es posible conocer el comportamiento del caudal y de esta forma aprovechar las relaciones de las láminas escurridas y el porcentaje de cobertura glaciar en esta zona. En ese sentido se confeccionó la fig. 6 que muestra todos los escenarios de la temperatura en 500 hPa para la zona de Huaraz en la cual, podemos observar que todos tienen una tendencia creciente con el tiempo.

Por otro lado es notable ver que las tendencias se agrupan en dos grupos con similares valores, esto es debido a las resoluciones de los modelos ya que el grupo de los modelos del Instituto Hadley y del Max Planck tienen mayores resoluciones comparadas con los otros modelos. De igual forma, se observa también la tendencia positiva del modelo regionalizado con RAMS para un periodo corto del 2004 al 2035 en el escenario A2 y de similar tendencia hasta el año 2050 para el escenario B2.

La tendencia de incremento durante los próximos 50 años en la zona de Huaraz estaría oscilando entre 1.02°C a 2.15°C, este rango puede observarse en el gráfico 9 (página 26) en la cual el modelo HCCPR (Inglaterra) estima el menor valor, mientras el modelo CCSR (Japón) estima los mayores valores.

⁵ El resumen mencionado es parte de la serie “Evaluación Local Integrada de Cambio Climático para la cuenca del Río Piura”.

Gráfico 5:

Patrones del cambio de temperatura en 500 hPa para el periodo 2000 -2025, como resultado de cuatro modelos climáticos globales para el escenario de emisión A2. Los nombres de los modelos están listados en la Tabla 2.

Periodo 2000 – 2025: Escenario A2

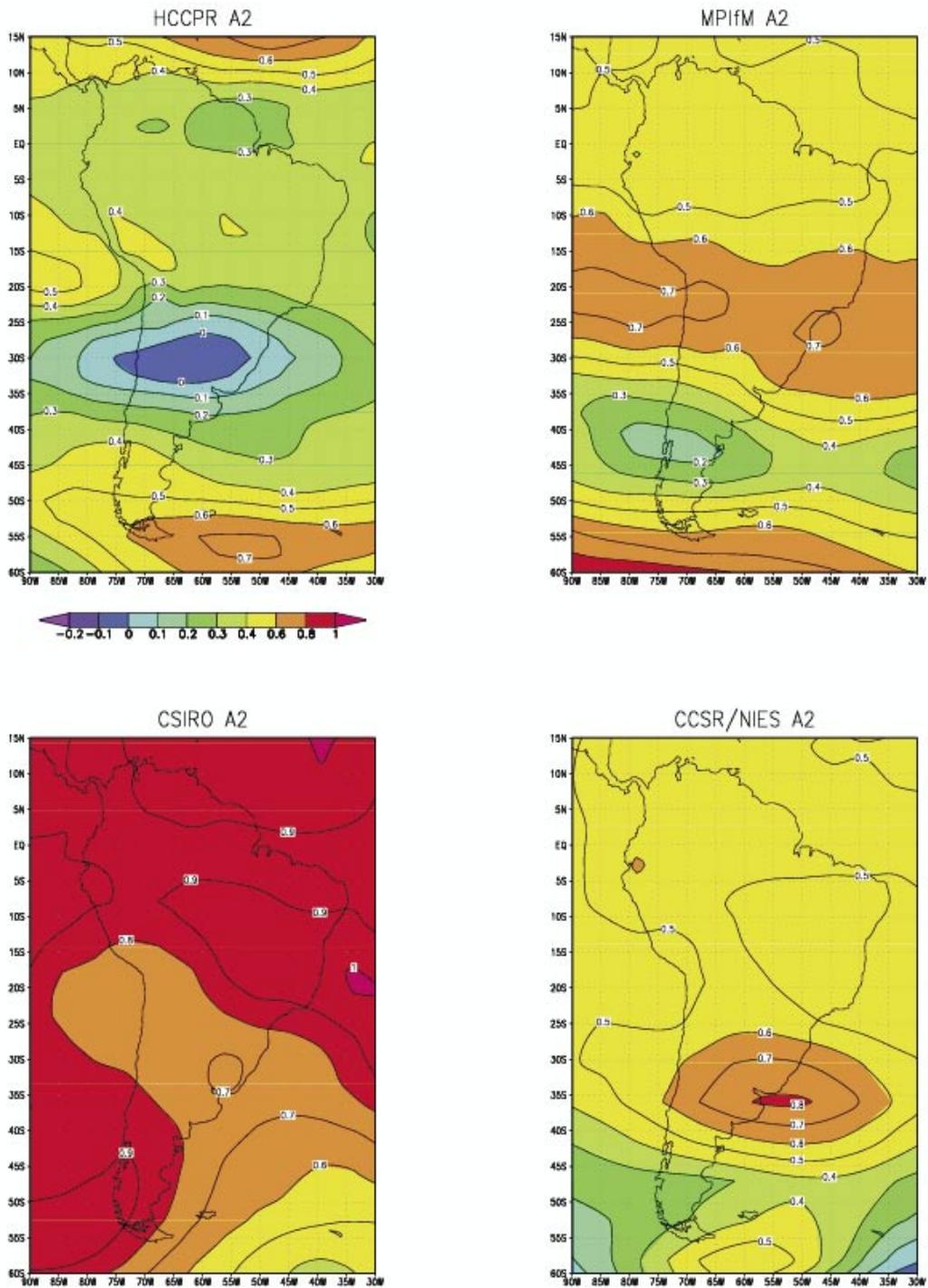


Gráfico 6:

Patrones del cambio de temperatura en 500 hPa para el periodo 2026 -2050, como resultado de cuatro modelos climáticos globales para el escenario de emisión A2. Los nombres de los modelos están listados en la Tabla 2

Periodo 2026 – 2050: Escenario A2

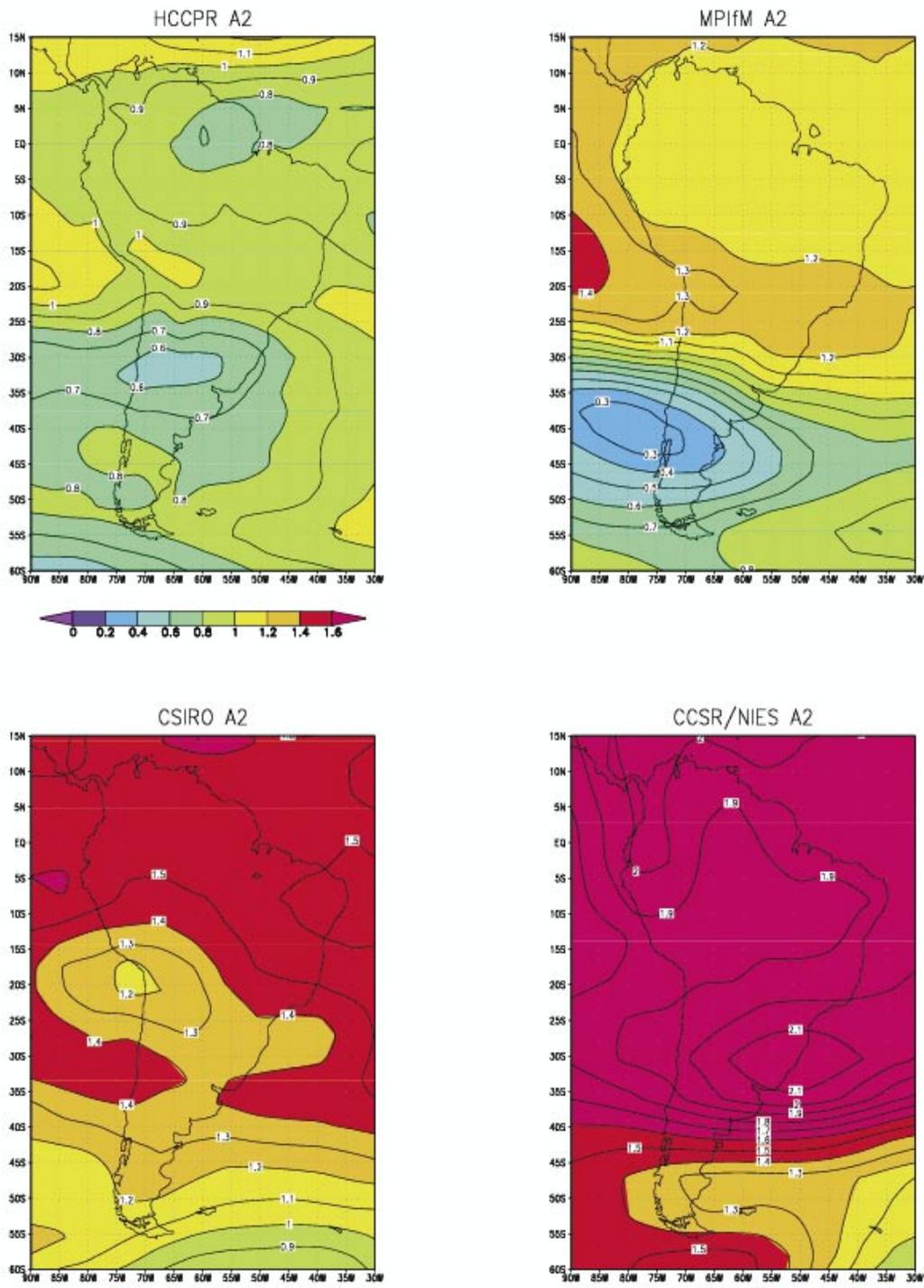


Gráfico 7:

Patrones del cambio de temperatura en 500 hPa para el periodo 2000 -2025, como resultado de cuatro modelos climáticos globales para el escenario de emisión B2. Los nombres de los modelos están listados en la Tabla 2

Periodo 2000 – 2025: Escenario A2

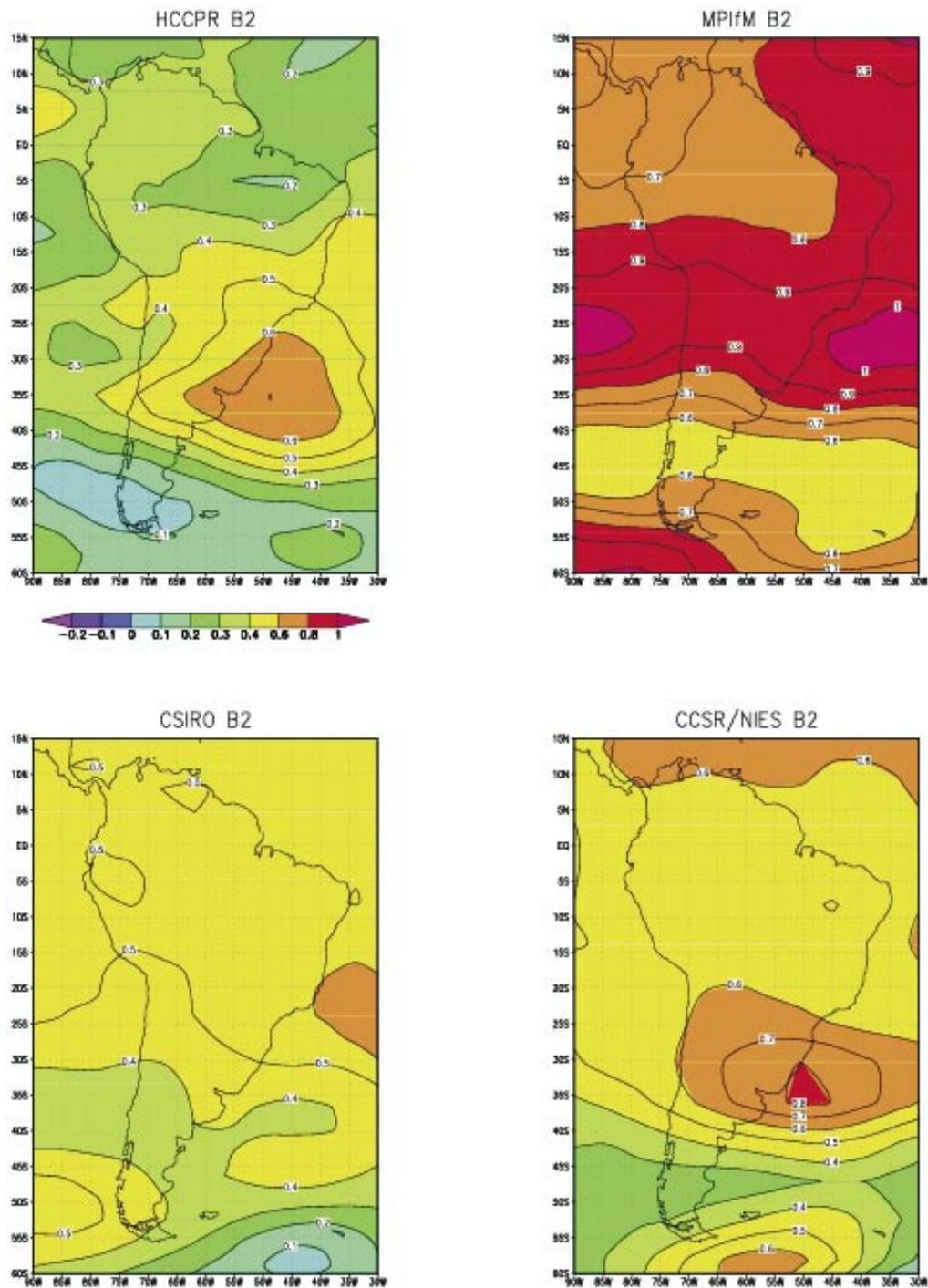


Gráfico 8:

Patrones del cambio de temperatura en 500 hPa para el periodo 2026 -2050, como resultado de cuatro modelos climáticos globales para el escenario de emisión B2. Los nombres de los modelos están listados en la Tabla 2.

Periodo 2026 – 2050: Escenario A2

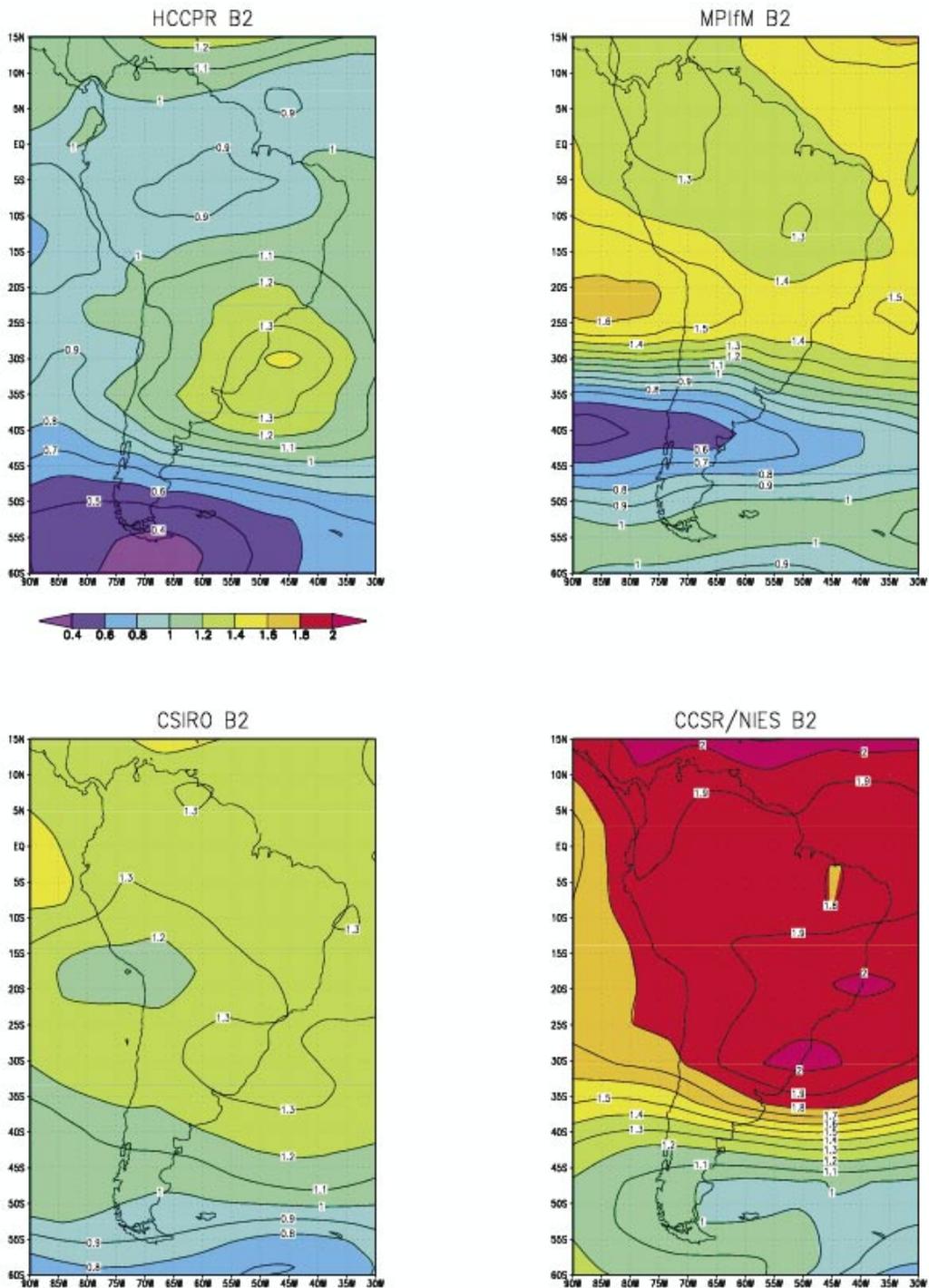
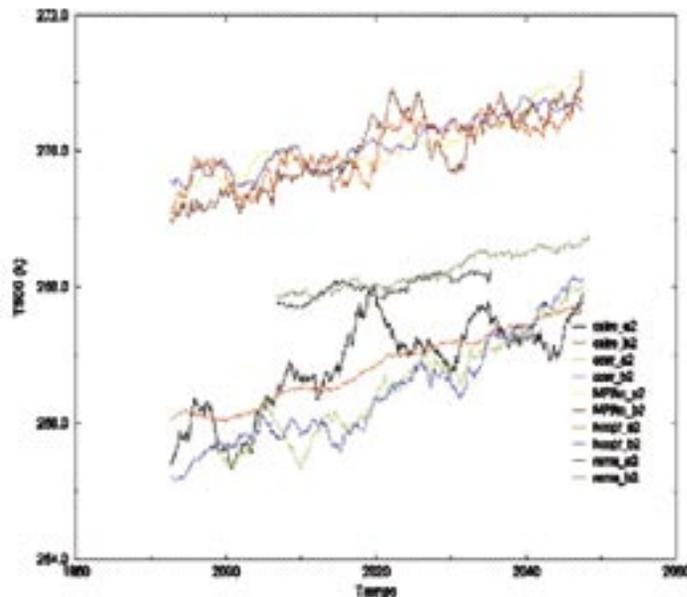


Gráfico 9:

Escenarios de temperatura en 500 hPa para Huaraz.

ESCENARIOS DE TEMPERATURA DEL AIRE
Temperatura en 500 hPa - Zona de Huaraz



5.2 ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO EN BASE A LA TEMPERATURA EN 500 HPA

La estimación de la disponibilidad hídrica sobre la Cordillera Blanca consideró el análisis de los datos hidrológicos disponibles desde 1953 de la cuenca de Llanganuco (87.0 km², el 39% glaciar), lo que muestra un aumento del retroceso glaciar durante el último trimestre del siglo XX. Asimismo, se complementó dicha información con datos de la cuenca del Artesoncocha (8,4 km², el 79% glaciar), existentes desde el 2000. El modelamiento de la evolución futura del recurso glaciar estuvo basado en relaciones encontradas entre el porcentaje de cobertura glaciar y la temperatura atmosférica regional, según estudios publicados (Pouyaud et al, 2003), los cuales mostraron una alta correlación. La temperatura atmosférica sobre la Cordillera Blanca fue extraída de los reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay, 1996).

En el gráfico 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura del nivel de 500 hPa (aproximadamente 5 000 msnm) y la distribución de los caudales de las cuencas Parón y Llanganuco, ubicados en la Cordillera Blanca; observándose una alta correlación entre ellas; con lo cual se establece que la temperatura de 500 hPa puede ser considerada como un buen predictor del escurrimiento glaciar y predecir su evolución futura en base a los escenarios propuestos.

La forzante del modelo (temperatura en 500 hPa) para obtener las estimaciones futuras de disponibilidad hídrica fue la obtenida de la regionalización del modelo RAMS con los modelos climáticos globales, explicadas anteriormente.

En el gráfico 11 (página 28), se muestra la alta correlación entre la T° de 500 hPa y las láminas de agua escurridas de la Cordillera Blanca, ya evaluada anteriormente y luego del año 2000

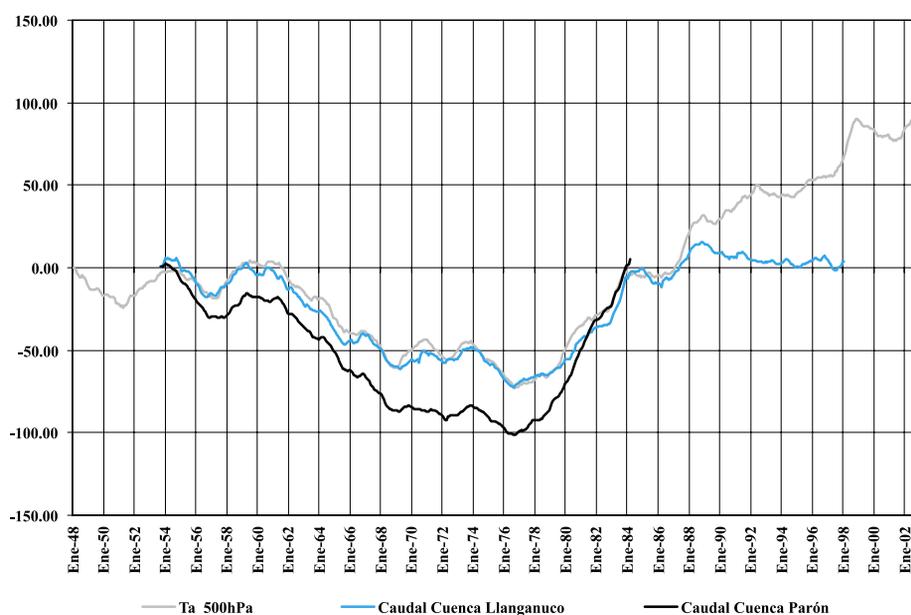
las proyecciones de la temperatura en 500 hPa obtenidos de los escenarios regionalizados del modelo RAMS hasta el 2020 y la correspondiente proyección del escurrimiento, lo cual indica una continuidad de la tendencia al incremento de la disponibilidad del recurso hídrico hasta el 2020 por lo menos.

En el gráfico 12 (página siguiente) se observan las proyecciones en los próximos 250 años para la disponibilidad hídrica basados en el modelamien-

to del sistema de glaciares de la cordillera Blanca realizado por el IRD (Pouyaud, 2005) que indica un progresivo incremento de la disponibilidad del recurso agua hasta por unos 25 a 50 años, luego del cual la tendencia según el modelamiento sería a una inevitable disminución del recurso hídrico, pudiendo incluso llegar a una anulación del aporte de agua de glaciar en el escurrimiento anual total, siendo sólo alimentado por las precipitaciones de los periodos lluviosos, limitando la disponibilidad de agua durante los periodos secos.

Gráfico 10:

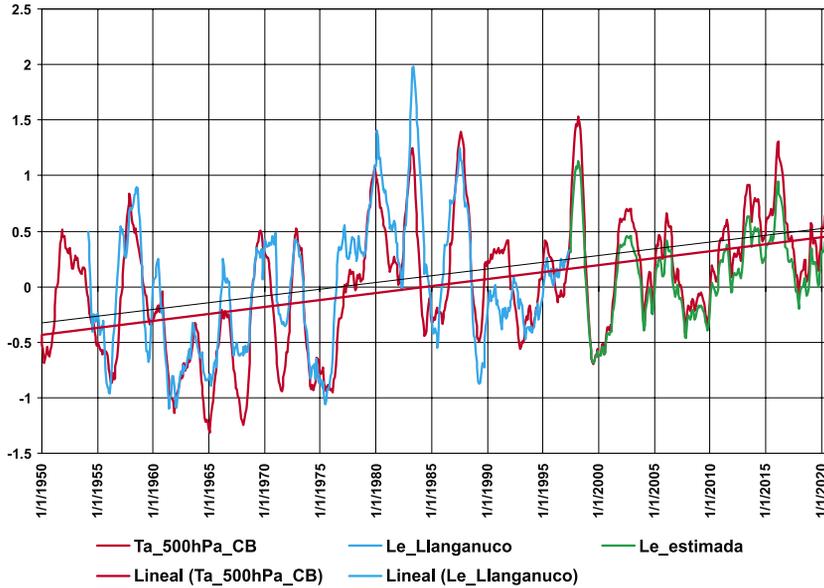
Caudales de las cuencas Llanganuco (línea celeste) y Parón (línea verde) y temperaturas de la atmósfera sobre la Cordillera Blanca en 500 hPa (línea roja), obtenidos del re-análisis del NCEP-NCAR-NOAA. Los valores han sido centrados y reducidos para una mejor comparación.



Fuente: Pouyaud et al, 2005

Gráfico 11:

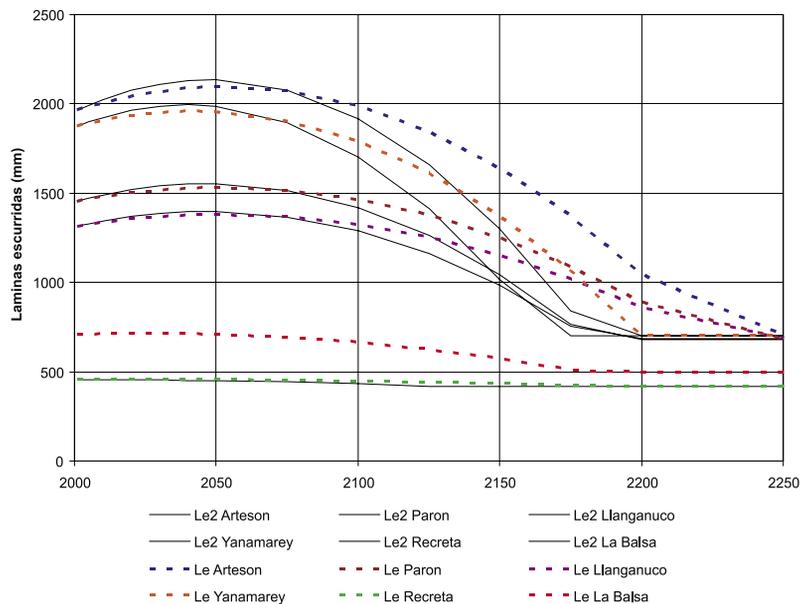
Láminas escurridas (Le) y temperatura atmosférica (Ta_500hPa_CB) de Reanálisis. A partir del año 2000 se tiene la temperatura en base a la proyección de modelo RAMS (SENAMHI) (línea roja) conjuntamente con la estimación del modelamiento glaciar (IRD) de lamina escurrida (línea azul). Los valores han sido centrados y reducidos para una mejor comparación.



Fuente: Pouyaud et al, 2005

Gráfico 12:

Láminas escurridas (mm) proyectadas al 2250, mediante el modelamiento glaciar en base a escenarios climáticos globales. En líneas continuas las que usaron una base de 1980-2000 y en líneas punteadas con una base de 1950-2000.



Fuente: Pouyaud et al, 2005

CONCLUSIONES

El modelamiento desarrollado en el presente trabajo se constituye como una aproximación de la estimación del comportamiento del recurso hídrico de fuente glaciar en el mediano y largo plazo sobre la Cordillera Blanca.

Esta aproximación tiene su base en las proyecciones que los diferentes modelos MCG sobre el clima futuro consideran en cuanto a las diferentes tasas de emisión de CO₂ asumidos por el IPCC; sin embargo, las evidencias de un actual incremento de la temperatura promedio global y del retroceso glaciar le dan mayor confianza a las proyecciones presentadas.

Mejores aproximaciones que permitan cuantificar con mayor detalle las deficiencias futuras del recurso hídrico dependerían de diferentes aspectos, desde la generación de nuevos escenarios climáticos regionales que consideren nuevas proyecciones de nuevas versiones de modelos MCG, mayores resoluciones horizontales o nuevos escenarios de emisión de CO₂ y otros gases GEI futuros.

Por otro lado, es necesario considerar también la aplicación de técnicas que incorporen al modelamiento glaciar una geografía más exacta de la cuenca de estudio con el uso de modelos digitales, la geometría de la unidad glaciar (Pouyaud, 2005), todo ello a fin de contribuir a una mejor estimación del comportamiento del recurso glaciar futuro y disponer de una herramienta para la mejor gestión de este recurso en las cuencas glaciares tropicales.

Los resultados más significativos del presente estudio se resumen en las siguientes conclusiones:

- Se observa mayor incremento de las temperaturas en 500 hPa en el periodo 2026-2050 en ambos escenarios, para la zona regional (Sudamérica), presentando el modelo Japonés los mayores incrementos con valores que oscilarían entre 1.4 a 2.1°C en el escenario A2 y 1.2 a 2.0°C en el escenario B2.
- Sobre la zona de Huaraz, el 100% de los modelos MCG indican que la temperatura en 500 hPa tendría una tendencia ascendente, cuyos valores estarían en el rango de 1 a 2°C al año 2050 con valores que oscilarían entre 1.5 a 2.5°C en los próximos 50 años.
- La regionalización dinámica estima para la zona de Huaraz un incremento de 0.7°C para el escenario A2 y de 0.98°C para el escenario B2.
- La comparación entre los escurrimientos glaciares y la temperatura atmosférica en 500 hPa de los reanálisis de NCEP/NCAR, presentan una correlación extremadamente buena a escala mensual durante el periodo 1950-2000.
- Con ello se establece un modelo de previsión para estimar el comportamiento de los glaciares, usando como forzante la temperatura proyectada por el modelamiento regional de la temperatura del aire en 500 hPa con el modelo RAMS.
- El modelo de glaciares fue calibrado usando el periodo de información 1950-2000 con lo cual se prevé que en 25 o 50 años se alcanzará un máximo de disponibilidad de recurso hídrico, luego del cual se iniciara una progresiva disminución.
- Los resultados del modelamiento regional de RAMS en base a escenarios de cambio climático permiten precisar las previsiones proyectadas según el comportamiento actual de los glaciares tropicales.
- Los resultados obtenidos demuestran la alta correlación entre el proceso de calentamiento global, el incremento de temperaturas en las zonas altoandinas de la cuenca del río Santa y el retroceso glaciar, con el consecuente impacto sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Esto podría afectar el abastecimiento y uso de dicho recurso para consumo poblacional (rural y urbano), la agricultura tradicional en los valles interandinos y agricultura de exportación de alta tecnología en la cuenca extendida de uso de los Proyectos Chavimochic (La Libertad) y Chincas (Ancash), así como la generación de energía, por lo que sería necesario profundizar las investigaciones en materia de impactos de la disponibilidad hídrica.
- Los resultados señalan un incremento del proceso de deglaciación, el que se refleja significativamente en las cuencas de los ríos con componente glaciar, con tendencia a caudales máximos cuyo pico se estima en el año 2050, para luego ingresar a una curva decreciente de caudales, los que dependerán principalmente de las precipitaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arntz, W. y Fahrbach, E.: El Niño, experimento climático de la naturaleza, Editorial Fondo de Cultura económica, t 309 (1996), 11-63.
- Brinkmann A: Local versus Remote Grid points in Climate Downscaling. *Climate Res.* Vol. 21 (2002), 27-42.
- Cambio climático 2001 La base Científica, Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- Casassa, G., (2004): Increased Runoff in Basins with Negative Glacier Mass Balance: Examples from the Chilean Andes. II Symposium International "Glacier Shrinkage in the Andes and Consequences for Water Resources". Huaraz-Perú.
- CONAM (Consejo Nacional del Ambiente), 2001: Comunicación Nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Lima-Perú. GEF.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V. y Cáceres, B., 2004: New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *J. Geophys. Res.*, 109, D18106.
- Genta, J.L., G. Pérez y C.R. Mechoso, 1998: A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America. *J. of Climate*, 11, 2858-2862
- Goodess C, Hanson C, Hulme M y Osborn T.: Representing Climate and Extreme Weather Events in Integrated Assessment Models: A review of Existing Methods and Options for Development. *Integrated Assessment*, Vol. 4 N° 3 (2003), 145-171.
- Goodess C.: The construction of daily rainfall scenarios for Mediterranean sites using a circulation-type approach to downscaling. PhD. Tesis University of East Anglia, 2000.
- Hewitson B. C y Crane, R.: Climate Downscaling: Techniques and Application. *Climate Res.* 7 (1996), 85 -95.
- IPCC: Informe especial del grupo III Escenarios de emisiones, Resumen para responsables de políticas, 2000.
- Kalnay E.: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77,437-431.
- Levitus, S., R. Burgett, T. Boyer, 1994: World Ocean Atlas 1994, Vol. 1, 2, 3 y 4. NOAA Atlas NESDIS 3, U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Marengo, J., 1995: Variations and change in South American streamflow. *Climatic Change*, 31, 99-117.
- Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee, y J. H. Copeland,: A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, 49, (1992), 69-91.
- Portocarrero, C. 1995: The construction of a drainage tunnel as part of glacial lake hazard mitigation at Hualcán, Cordillera Blanca, Perú. *Geohazards and Engineering Geology Conference (10-14 Setiembre 1995)*, Coventry University, Reino Unido.
- Pouyaud, B., Vignon, F., Yerren, J., Suarez, W., Vegas, F., Zapata, M., Gomez, J., Tamayo, W. & Rodriguez, A. (2003) Glaciares y recursos hídricos en la cuenca del río Santa. Reporte gráfico IRD-SENAMHI-INRENA, versión impresa y CD Rom.
- Pouyaud, B. y coautores: Dvenir de Ressources en eau Glaciaire de la Cordillere Blanche. IRD-SENAMHI-INRENA-Universidad de París, aceptado para su publicación en el *Hydrological Sciences Journal*, 2005.
- SENAMHI (1994-1997) – Boletines de Paleoclima
- Vignon, F. (2002) Glaciares y recursos hídricos en el valle alto del río Santa. DED Report, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.

ANEXO

Páginas Web visitadas:

- <http://www.vision.net.au/~daly/elnino.htm>
- <ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices/>
- http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html
- <http://www.dar.csiro.au/analysis/index.html>: Modelo CSIRO
- http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/GCM_thematic_guide.html: Descripción de Modelos MCG
- <http://www.physionet.org/physiotools/wfdb/psd/lomb.c> : Periodograma Lomb
- http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/474.htm : Grupo I, Base Científica, Cambio climático 2001



CONAM
POR EL DESARROLLO SOSTENIBLE

El Consejo Nacional del Ambiente - CONAM es la Autoridad Ambiental Nacional creada mediante Ley N° 26410 en 1994 para promover el Desarrollo Sostenible, propiciando un equilibrio entre el desarrollo socio económico, la protección del ambiente y el bienestar social. Su finalidad es planificar, promover, coordinar, controlar y velar por el ambiente y el patrimonio natural de la Nación.

ISBN 9972-824-19-5



9 789972 824197



La Cuenca del río Santa posee un extenso territorio caracterizado por una de las más grandes regiones glaciares tropicales del país y del mundo. Dichos sistemas glaciares representan una importante fuente de recurso hídrico para el desarrollo de actividades como la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, desde los últimos veinte años se encuentra en un progresivo retroceso debido al cambio climático.

Esta investigación, coordinada por Consejo Nacional del Ambiente - CONAM en el marco del Programa de Cambio Climático y Calidad de Aire - PROCLIM, se constituye en una importante herramienta de análisis del proceso de calentamiento en la región de las zonas glaciares y su relación con la disponibilidad de recursos hídricos, a fin de incorporar la variable climática en los procesos de planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca hacia un verdadero desarrollo sostenible.

En esta investigación se presenta información base respecto a los escenarios climáticos utilizados, la metodología, el análisis y las conclusiones de los resultados futuros de la disponibilidad del recurso hídrico glaciar.



Este trabajo se realizó en el marco del PROCLIM, Programa de Cambio Climático y Calidad del Aire que fue desarrollado entre 14 instituciones públicas y privadas en 3 regiones priorizadas del país. El programa fortaleció capacidades nacionales para una gestión efectiva de los recursos humanos y financieros ante el Cambio Climático. El PROCLIM contó con el apoyo de la Cooperación Holandesa y fue coordinado por el CONAM.