



PERÚ Ministerio del Ambiente



PERÚ Ministerio de Agricultura

Autoridad Nacional del Agua



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Agencia Suíza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE



# LÍNEA de BASE CLIMÁTICA - PARTE II: ESCENARIOS CLIMÁTICOS CORDILLERA BLANCA Y SANTA TERESA



## PROYECTO GLACIARES

Adaptación al cambio climático y reducción de riesgos de desastres por el retroceso de los glaciares en la Cordillera de los Andes

Consorcio Ejecutor:



University of Zurich UZH



CARE



## Índice

1	Introducción y Objetivos .....	3
2	Nuevos Escenarios Climáticos (RCP) del IPCC .....	4
2.1	Introducción .....	4
2.2	Características de las Vías Representativas de Concentraciones (RCP) .....	4
3	Proyecciones estacionales de temperatura y precipitación .....	7
4	Proyecciones de temperatura en resolución diaria .....	10
4.1	Los modelos climáticos GFDL-CM3 y CCSM4.0 .....	11
4.2	Selección de puntos de malla adecuados .....	12
4.3	Calidad de los datos diarios de la temperatura superficial del aire de los GCM.....	13
5	Conclusiones.....	16
6	Bibliografía.....	17

## **1 Introducción y Objetivos**

En el marco del Proyecto Glaciares se realizaron dos estudios. Uno sobre el clima en las regiones de la Cordillera Blanca y Cordillera Negra (Departamento de Áncash), el otro sobre el clima en la región de Santa Teresa. El objetivo de estos estudios fue contribuir al conocimiento del clima en las dos regiones y desarrollar una línea de base para el Proyecto Glaciares.

Este informe es la continuación de los dos informes anteriores sobre el clima actual y sitúa el enfoque en las tendencias futuras de la temperatura y la precipitación en las dos regiones mencionadas. Además se efectúa una estimación de la calidad de proyecciones de la temperatura diaria, generadas por modelos globales.

El capítulo 2 proporciona una visión general de los nuevos escenarios de emisión, las llamadas “*vías representativas de concentraciones*” de gases invernaderos (en inglés: *Representative Concentration Pathways* (RCP)). El capítulo 3 se refiere a las tendencias estacionales de la temperatura y la precipitación para el periodo 2010 -2095. El capítulo 4, finalmente, presenta un análisis de proyecciones de la temperatura diaria provenientes de dos modelos globales seleccionados.

## 2 Nuevos Escenarios Climáticos (RCP) del IPCC

### 2.1 Introducción

A fines del año 2013, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicará su Quinto Informe (AR5) sobre el estado del arte del entendimiento científico sobre el cambio climático. Para esto, los grupos que desarrollan modelos climáticos, han ejecutado la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP5). Existen una veintena de grupos internacionales, todos desarrollando modelos acoplados Atmósfera-Océano (AOGCM) que están participando en este ejercicio.

Los nuevos Modelos Climáticos Globales (GCM) del quinto informe del IPCC (AR5) en el marco del CMIP5 tienen los siguientes objetivos (Taylor, 2012):

- Un enfoque en la adaptación y mitigación del cambio climático
- La retroalimentación del ciclo del carbono: Modelos del Sistema Terrestre
- Una mejor evaluación de los aspectos ciertos - e inciertos - del cambio climático
- Facilitar la evaluación del modelo en comparación con las observaciones para evaluar la confiabilidad de las proyecciones de los modelos

Los modelos AOGCM son forzados principalmente por concentraciones de gases atmosféricos - antropogénicos y naturales – como gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, o contaminación. También son forzados por cambios de uso de suelo y por supuesto por radiación solar. Como la trayectoria de emisiones de GEI para el futuro no es conocida se utilizan distintos escenarios de desarrollo económico-social.

Las características de los nuevos escenarios del quinto informe del IPCC (AR5) son descritas en el capítulo siguiente.

### 2.2 Características de las Vías Representativas de Concentraciones (RCP)

En el marco del quinto informe del IPCC (AR5) se han desarrollado 4 posibles “*vías representativas de concentraciones*” de gases invernaderos (en inglés: *Representative Concentration Pathways* (RCP)) que son los sucesores de los escenarios SRES del cuarto informe del IPCC (AR4). La denominación “representativas” significa que se trata de representaciones para un mayor número de escenarios. La diferencia la más importante entre los escenarios SRES y RCP es que para los nuevos escenarios se han considerado la realización de objetivos de la política climática y energética. Por eso los escenarios RCP dan una imagen del desarrollo socio-económico más realística que los escenarios SRES. Por el contrario a los escenarios SRES que son caracterizados por las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> que se alcanzarán al fin del siglo XXI, los RCP tienen su nombre de acuerdo al forzamiento radiativo (antropogénico *entre 1850 y 2100*) que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>, RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>, RCP 6.0 W/m<sup>2</sup> y RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>. A continuación se describen brevemente los principales supuestos y características de estas 4 vías de concentraciones (véase también **Tabla 1**).

**Tabla 1:** Visión de conjunto de los “**Representative Concentration Pathways**” (RCP). La tercera columna muestra la concentración estimada de los gases de efecto invernadero (GEI) en el año 2100 expresada en concentración de CO<sub>2</sub>. La cuarta columna indica el aumento estimado de la temperatura global en el año 2100 con respecto al periodo 1980-1999. (Van Vuuren et al., 2011)

	Descripción	Concentración de CO <sub>2</sub> en el año 2100	Aumento de temperatura global estimada en el año 2100
<b>RCP 8.5</b>	Pathway con forzamiento radiativo alto, llegando a <b>8.5 W/m<sup>2</sup></b> en 2100. Continuación del <b>aumento</b> después de 2100.	~1370 ppm CO <sub>2</sub>	3.4 – 5.5 °C
<b>RCP 6</b>	Pathway con forzamiento radiativo medio, llegando a <b>6 W/m<sup>2</sup></b> en 2100. <b>Estabilización</b> después de 2100.	~850 ppm CO <sub>2</sub>	
<b>RCP 4.5</b>	Pathway con forzamiento radiativo medio, llegando a <b>4.5 W/m<sup>2</sup></b> en 2100. <b>Estabilización</b> después de 2100.	~650 ppm CO <sub>2</sub>	1.5 – 2.5 °C
<b>RCP2.6</b>	Pathway con forzamiento radiativo bajo. Llegará a <b>3 W/m<sup>2</sup></b> antes de 2100. Después <b>disminución</b> a <b>2.6 W/m<sup>2</sup></b> en 2100	~490 ppm CO <sub>2</sub> ~400 ppm CO <sub>2</sub>	0.7 – 1.4 °C

**RCP8.5:** El pathway RCP8.5 representa una vía de emisiones y concentraciones relativamente altas. Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento demográfico, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a importantes demandas energéticas y consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático. Por eso el escenario RCP8.5 también es llamado “*business as usual*”-escenario que significa “todo sigue como hasta ahora”. Basado en este escenario se calcula para el año 2100 un aumento de la temperatura global entre 3.4 y 5.5 °C respecto a la temperatura media global en el periodo 1980-1999 (Tabla 1).

**RCP6:** Esta vía representa emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y cambio de uso de suelo que se traducen en un forzamiento radiativo de 6 W/m<sup>2</sup> al año 2100. Esto requiere disminuciones significativas a partir del año 2060. Se debe resaltar que sin políticas que limiten las emisiones, en esta vía se llegaría a mayores valores de forzamiento radiativo al año 2100.

**RCP4.5:** Como el pathway RCP6, también el RCP4.5 es un escenario de estabilización, que llega a un forzamiento radiativo de 4.5 W/m<sup>2</sup> al año 2100, sin haberlo excedido antes. El RCP4.5 es más ambicioso que el RCP6 y resulta en un calentamiento global de aproximado 2 °C, lo que corresponde con el objetivo climático de limitar el calentamiento global a 2 °C.

**RCP2.6:** La cuarta vía o ruta de emisiones y concentraciones es representativa sobre escenarios de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C a fin de siglo. La vía es caracterizada por un forzamiento radiativo que llegará a 3 W/m<sup>2</sup> antes de 2100 y que disminuirá a 2.6 W/m<sup>2</sup> en 2100. Alcanzar esta meta requiere reducciones netas en emisiones bastante drásticas. Por eso este escenario se considera más bien utópico.



### 3 Proyecciones estacionales de temperatura y precipitación

Los modelos climáticos (GCM) son representaciones matemáticas de las leyes físicas y de los procesos que rigen el clima. Los GCM constituyen la herramienta fundamental para los estudios relativos a la futura evolución del clima. Como el sistema climático es no lineal - y enormemente complejo - las proyecciones provenientes de los GCM son afectadas de una variedad de incertidumbres. Una posibilidad de estimar el rango de la incertidumbre es comparar proyecciones de diferentes GCM que son lo más independiente posible.

Dado que los escenarios de los diferentes GCM son afectados de incertidumbres y pueden mostrar grandes diferencias, se han analizado las proyecciones de 5 GCM independientes. Los GCM elegidos proceden todos de un otro grupo de modelación como el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los Estados Unidos (NCAR) o del Instituto de Investigaciones Meteorológicas del Japón (MRI) (Tabla 2) y son modelos climáticos frecuentemente usados.

**Tabla 2:** Modelos Globales del CMIP5 usados en este estudio para visualizar las tendencias estacionales.

Nombre del GCM	Centro de Modelación	País
CESM1-BGC	NCAR National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigación Atmosférica)	Estados Unidos
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Laboratorio Geofísico de Dinámica de fluidos)	Estados Unidos
HadGEM2-CC	UK Met Office Hadley Center (Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del R. U.)	Inglaterra
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Instituto Max Planck de Meteorología)	Alemania
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institut (Instituto de Investigaciones Meteorológicas)	Japón

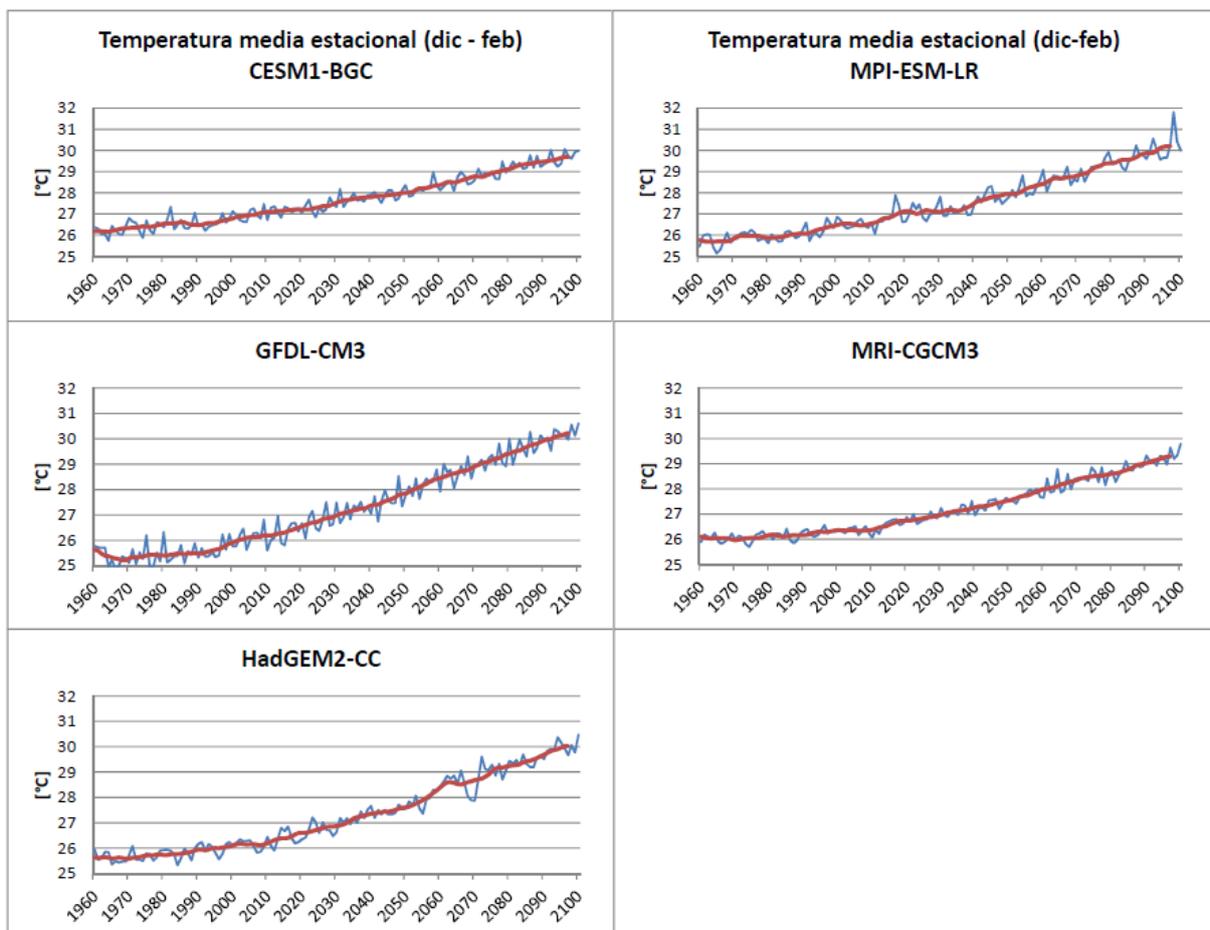
Para dar una primera impresión sobre el desarrollo futuro de la temperatura y la precipitación en la región de la Cordillera Blanca y la Cordillera Negra se han examinado escenarios producidos con diferentes GCM de la última generación, desarrollados en el marco del IPCC CMIP5. Como primer paso se han analizado datos mensuales que hasta hoy son disponibles de numerosos GCM y que son accesibles por ejemplo a través del *Climate Explorer* del Real Instituto Meteorológico Neerlandés (KNMI).

Este capítulo enfoca en el desarrollo de la temperatura y la precipitación estacional durante los tres meses diciembre, enero y febrero que forman parte de los meses los más lluviosos en la Cordillera Blanca. La principal razón por este enfoque es que en la Cordillera Blanca dicha estación (diciembre – febrero) es caracterizada por la presencia de precipitación. Además de la temperatura también la precipitación es muy importante para el comportamiento de los glaciares. Si la temperatura aumenta, la precipitación cambia su estado y cae en forma de lluvia en vez de nieve. Una falta de nieve tiene dos importantes efectos para un glaciar. Primero, menos nieve significa menos material para acumular el volumen del glaciar. Segundo, el cambio de nieve a lluvia también provoca una reducción en el albedo que a la vez acelera aún más el retroceso del glaciar.

La Figura 2 y la Figura 3 muestran el desarrollo de la temperatura y la precipitación estacional durante los tres meses diciembre, enero y febrero. Las curvas representan medias espaciales para un dominio con longitud 77-78° Oeste y latitud 8-10° Sur, que corresponde aproximadamente con la región de la Cordillera Blanca y Negra. Como mencionado en el capítulo 2.2, las proyecciones de los GCM del CMIP5 están basando en llamadas “vías representativas de concentraciones” de gases invernaderos (RCP). En este estudio se trabajó con el escenario de emisión RCP8.5. EL RCP8.5 es un escenario fuerte pero realístico, que representa una vía con “business-as-usual”.

Las proyecciones de la temperatura media estacional para el periodo 1960-2100 se encuentra en la Figura 2. Las curvas azules son las proyecciones de los diferentes GCM basadas en el RCP8.5 y las rojas son las medias móviles correspondientes de 10 años. En el periodo 2010 -2100 todos los modelos muestran una tendencia positiva. Para el periodo 2010 - 2095 el aumento de la temperatura estacional varía entre aproximadamente 2.8°C (MRI-CGCM3) y 4.2°C (GFDL-CM3). Además llama la atención que la variabilidad interanual del GCM japonés (MRI-CGCM3) es muy pequeña.

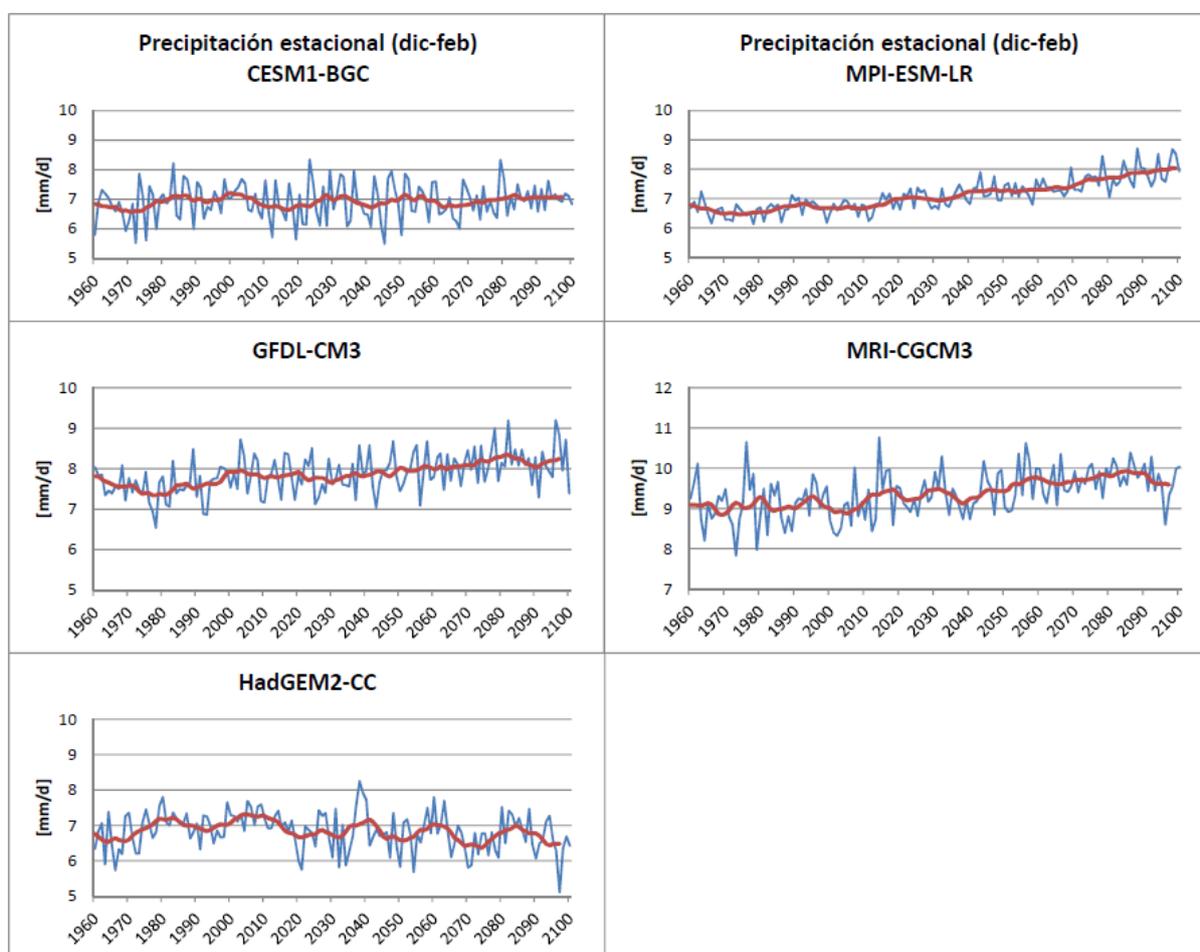
Para los años 1980 -2010 los GCM también muestran un aumento pequeño de la temperatura. Esto contrasta con los resultados del análisis de la climatología de la Cordillera Blanca (wie zitieren?) que constata ninguna tendencia significativa en este periodo para la mayoría de las estaciones examinadas.



**Figura 2:** Tendencias de la temperatura media estacional (diciembre – febrero) proveniente de 5 modelos globales de CMIP5 para la región Cordillera Blanca basando en el escenario de emisión RCP8.5. Las líneas rojas son las medias móviles de 10 años. Para el periodo 2010 – 2095 el aumento de la temperatura (dic-feb) para las diferentes modelos varía entre aproximadamente 2.8 °C y 4.2 °C. (Fuente: IPCC).

En cuanto a la precipitación no hay tendencias tan claras (Figura 3). Todas las proyecciones de la precipitación estacional muestran o ninguna tendencia o un aumento pequeño para la Cordillera Blanca y Negra en el siglo XXI. Como ya hemos visto en el caso de la temperatura también para la precipitación los modelos dan una imagen bastante consistente.

Cabe señalar que el sistema atmósfera- océanotierra tiene una variación interna con fenómenos como el ENOS, la oscilación de Madden-Julian o Decadal del Pacífico que tienen periodos de ocurrencia de años o décadas. Se recomienda tener en cuenta las posibles consecuencias de la variabilidad climática de estos fenómenos que pueden interferir con el calentamiento de la atmósfera debido a los gases de invernadero. En parte por estas variaciones, que a menudo se caracterizan como oscilaciones, eventos extremos pueden ocurrir preferentemente agrupados en el dominio del tiempo.



**Figura 3:** Proyecciones de precipitación durante el verano austral (diciembre – febrero) proveniente de 5 modelos globales del CMIP5 para la región Cordillera Blanca basando en el escenario de emisión RCP8.5. Las líneas rojas son las medias móviles de 10 años. Los modelos dan un imagen bastante consistente y muestran o ninguna tendencia o un aumento pequeño en el siglo XXI. (Fuente: IPCC).

Para escenarios futuros del clima en las cuencas del Río Santa y del Río Urubamba se remite también a los informes del SENAMHI (2009 y 2007). En estas estudios se han generado proyecciones de la temperatura y de la precipitación utilizando un modelo regional (RCM) y un modelo global de alta resolución (MRI-TL959L60). En contraste del informe actual, dichas proyecciones están basando en escenarios de emisión elaborados en el marco del cuarto informe del IPCC (AR4).

## 4 Proyecciones de temperatura en resolución diaria

Las posibles consecuencias del cambio climático sobre los seres humanos y los sistemas naturales son muy variadas. Cambios en temperatura y precipitación pueden afectar por ejemplo los ciclos hidrológicos de manera significativa, comprometiendo la disponibilidad espacio-temporal de los recursos hídricos y, consecuentemente, la sustentabilidad de diversas actividades humanas como agricultura, industria y desarrollo urbano. El calentamiento global y sus impactos no son uniformes, pero muestran una gran variabilidad espacial. Por eso es muy importante disponer de información relativa al cambio climático a escalas que van desde el ámbito regional a local.

Hasta hoy, la mayor parte de la información regional o local relacionada con el cambio climático está basada en la utilización de modelos climáticos (GCM). Los GCM son capaces de simular realísticamente las características de la circulación global en gran escala y la respuesta de la circulación global a algunos forzamientos del sistema climático – por ejemplo el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Una desventaja de los GCM es su baja resolución espacial que era en el orden de unos cientos kilómetros para los GCM usados en el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC. Por dicha baja resolución espacial los GCM tienen dificultad de reproducir procesos y patrones regionales debido a que no representan los forzantes regionales que modulan la estructura espacial y temporal del clima regional (por ej. topografía, tipo de suelo, etc.). Con el fin de sortear este problema se han desarrollado diversas técnicas de “regionalización” o “downscaling” para generar informaciones regionales o locales partiendo de las proyecciones de los GCM.

Principalmente existen dos grandes categorías de downscaling: el *downscaling dinámico* y el *downscaling estadístico*. Para el downscaling dinámico se usan Modelos de Clima Regional (RCM) que son similares a los GCM pero de mayor resolución espacial (~10 -50 km). El downscaling estadístico consiste en establecer relaciones empíricas entre las variables climáticas de gran escala, que son los resultados de los GCM y las variables climáticas de superficie locales (datos observados). Ambas técnicas tienen ventajas y desventajas. Unas desventajas importantes son que el downscaling dinámico es computacionalmente muy demandante, es decir que necesita superordenadores. Por el contrario, el downscaling estadístico requiere grandes cantidades de datos observados para establecer las relaciones estadísticas.

Dado que para este estudio ni salidas de modelos regionales ni largas series homogéneas de datos observados de las regiones Cordillera Blanca y Santa Teresa eran disponibles, se ha decidido de trabajar con salidas diarias provenientes de GCM. Otro motivo importante para el uso de salidas diarias es que para poder llevar a cabo estudios de impacto y adaptación a nivel regional se usan por ejemplo modelos hidrológicos o modelos de cultivos que necesitan datos diarios como datos de entrada.

Por estas razones fue un objetivo de este estudio analizar la calidad de realizaciones de los GCM a nivel diario e investigar si existen realizaciones fiables de la temperatura diaria para las regiones Cordillera Blanca y Santa Teresa. A ese fin se han comparado realizaciones de la temperatura proveniente de modelos climáticos recientes - desarrollados en el marco de CMIP5 (véase capítulo 2) – con series de tiempo observadas en estaciones meteorológicas de la Cordillera Blanca.

#### 4.1 Los modelos climáticos GFDL-CM3 y CCSM4.0

Como ya razonado antes era una meta de este estudio examinar la calidad de realizaciones diarias provenientes de GCM. Si la calidad de las realizaciones es suficiente, se puede usar directamente las proyecciones, por ejemplo como datos de entrada para modelos hidrológicos o modelos de cultivos en estudios de impacto. Como es planificado que el IPCC publicará su Quinto Informe (AR5) sobre el estado del arte del entendimiento científico sobre el cambio climático a fines del año 2013, es evidente de que en este estudio se trabaja con datos de los nuevos GCM del CMIP5. Los GCM de esta generación incorporan más procesos y retroalimentaciones (feedbacks) físicos y normalmente tienen una resolución espacial más alta que los modelos anteriores. Por todo eso sus resultados normalmente son más fiables.

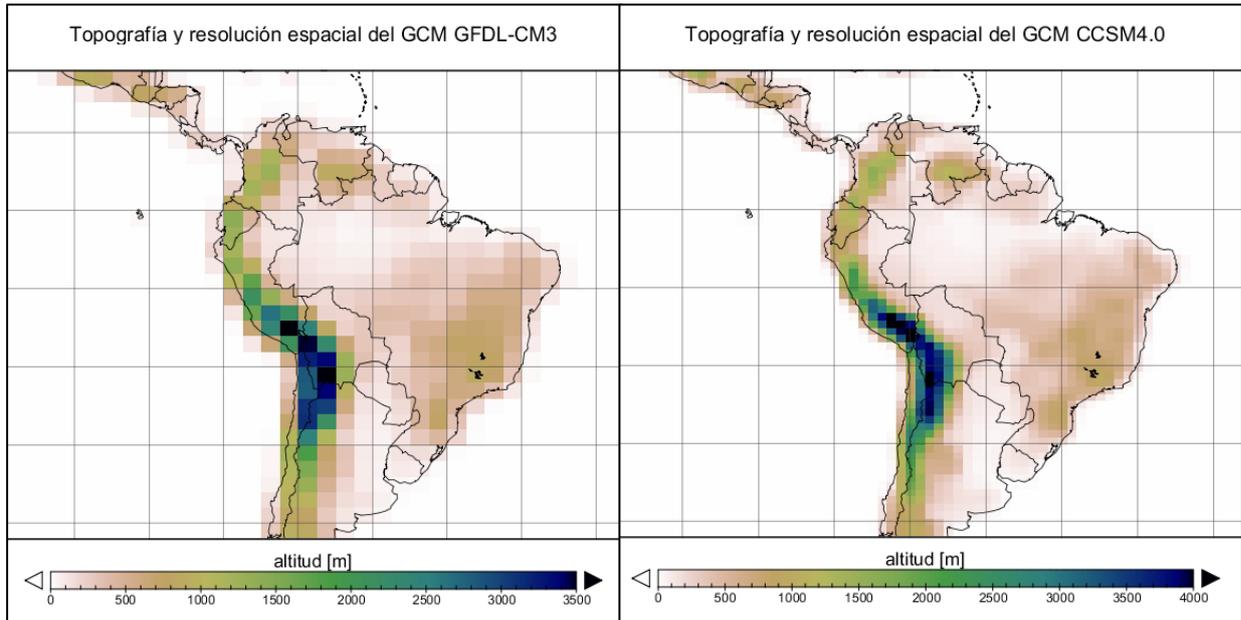
Desafortunadamente el acceso a los datos de CMIP5 a menudo es complicado y la descarga de los datos es de muy larga duración. Frecuentemente, el acceso a los datos es restringido a distintos grupos de usuarios. Además hasta hoy día faltan las proyecciones de unos grupos de modelación. Por esas razones en este estudio se ha concentrado a analizar salidas de dos GCM. El primero es el GFDL-CM3 del Laboratorio Geofísico de Dinámica de fluidos (NOAA). El segundo es el modelo CCSM4.0 del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) (Tabla 3). Los modelos son así llamados “Earth System models”, que significa que estos modelos incluyen entre otras cosas vegetación interactiva, ciclo de carbono interactivo y una mejor representación de química atmosférica.

**Tabla 3:** Resolución espacial y vertical de dos nuevos modelos globales, desarrollados en el marco de CMIP5, para cuales se han examinado la calidad de la temperatura diaria en este estudio.

Nombre del GCM	Centro de modelación	Resolución espacial [lat x lon deg]	Niveles verticales
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (EU)	2 x 2.5	48
CCSM4.0	NCAR National Center for Atmospheric Research (EU)	0.9 x 1.25	26

La Tabla 3 muestra la resolución espacial y vertical de los modelos. El GFDL-CM3 tiene una resolución espacial de aproximadamente 200 – 250 km y 48 niveles verticales. Eso significa que en la horizontal la superficie terrestre está dividida en una malla de aprox. 200 a 250 km por celda. En la vertical la atmósfera está dividida en 48 capas. La resolución horizontal del CCSM4.0 es marcadamente más fina (~100 km). El número de niveles verticales es 26.

En la Figura 4 está ilustrada la resolución horizontal y la topografía del GFDL-CM3 y CCSM4.0. La resolución horizontal del CCSM4.0 es más del doble de la resolución horizontal del GFDL-CM3. La altitud máxima del GFDL-CM3 en el Perú es aprox. 3530 msnm, aquella del CCSM4.0 4160 m. En ambos modelos la altitud máxima - con 1720 msnm (GFDL-CM3) y 2300 msnm (CCSM4.0) - es mal representada para la región de la Cordillera Blanca, porque en esta región solo un área estrecha está situada encima de 3000 msnm.



**Figura 4:** Topografía y resolución espacial de los modelos globales GFDL-CM3 (izquierda) y CCSM4.0 (derecha). La resolución del CCSM4.0 es más del doble de la resolución del GFDL-CM3. En el Perú la altitud máxima en el GFDL-CM3 es 3530 msnm GFDL y 4160 msnm en el CCSM4.0 (Fuente: IPCC).

## 4.2 Selección de puntos de malla adecuados

Como es un objetivo de este estudio hacer disponible proyecciones fiables de la temperatura diaria para las regiones de la Cordillera Blanca y Santa Teresa, el primer paso es la selección de puntos de malla adecuados de los GCM. Es decir que se tiene buscar puntos de malla de ambos GCM que se encuentran en, o por lo menos, en el alrededor de las dos regiones.

En la Figura 5 se ve la ubicación de unos puntos de malla del GFDL-CM3 en turquesa y del CCSM4.0 en amarillo. Los puntos de malla marcados son puntos que están en la región de la Cordillera Blanca o Santa Teresa o por los menos son los puntos de malla los más cercanos de las dos regiones. Como hemos visto en el capítulo anterior el GFDL-CM3 todavía tiene una resolución espacial bastante gruesa de 200 a 250 km. Por eso, de dicho GCM no hay ningún punto de malla en las regiones observadas. Por lo tanto se han analizado los datos de cuatro puntos de malla ubicados en el alrededor de las dos regiones. Por el contrario, el CCSM4.0 dispone de un punto de malla que está ubicado directamente en la Cordillera Blanca. Por esta razón en este estudio enfoca en un solo punto de malla del CCSM4.0.



**Figura 5:** Ubicación de los puntos de malla del GFDL-CM3 (turquesa) y del CCSM4.0 (amarillo). Además se han figurado unos sitios (rojo) para una mejor orientación (Fuente: GoogleEarth).

### 4.3 Calidad de los datos diarios de la temperatura superficial del aire de los GCM

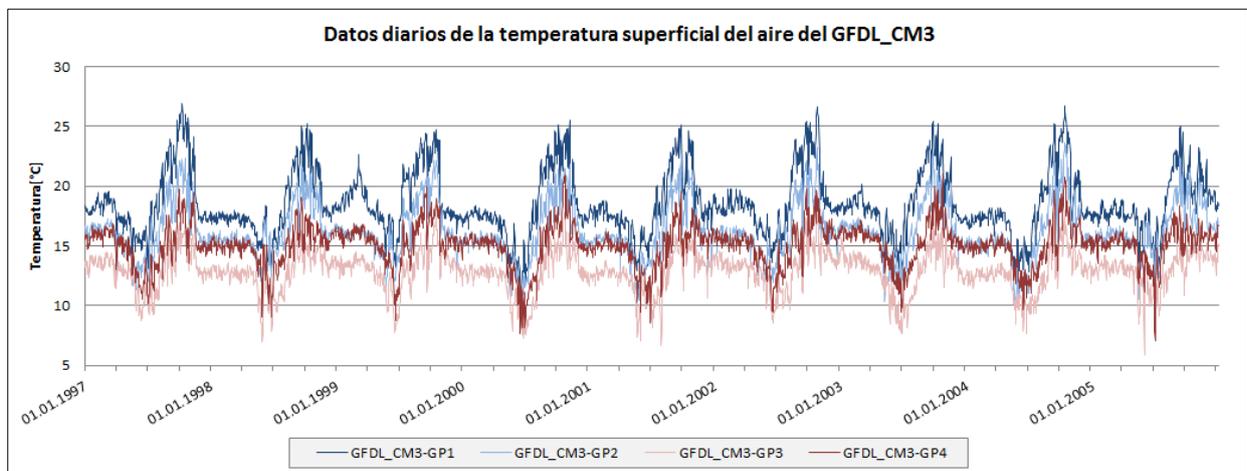
En este capítulo se discute la calidad de los datos diarios – especialmente de la temperatura superficial del aire – provenientes de los GCM. A ese fin se han comparado realizaciones de los GCM con datos observados. Una buena coincidencia de las realizaciones de los GCM con los datos observados permitiría utilizar las proyecciones diarias de los GMC directamente como datos de entrada en modelos de impacto.

En la Figura 6 se muestran realizaciones de la temperatura de la superficie del aire en resolución diaria para los cuatro puntos de malla del GFDL-CM3, figurados en la Figura 5. Se han mostrado los datos de los años 1997 hasta 2005. Las líneas azules representan los puntos de malla GFDL\_CM3-GP1 y GFDL\_CM3-GP2, ubicados cerca de la Cordillera Blanca. Las líneas rojas representan los datos de los puntos de malla GFDL\_CM3-GP3 y GFDL\_CM3-GP4, ubicados en el alrededor de Santa Teresa.

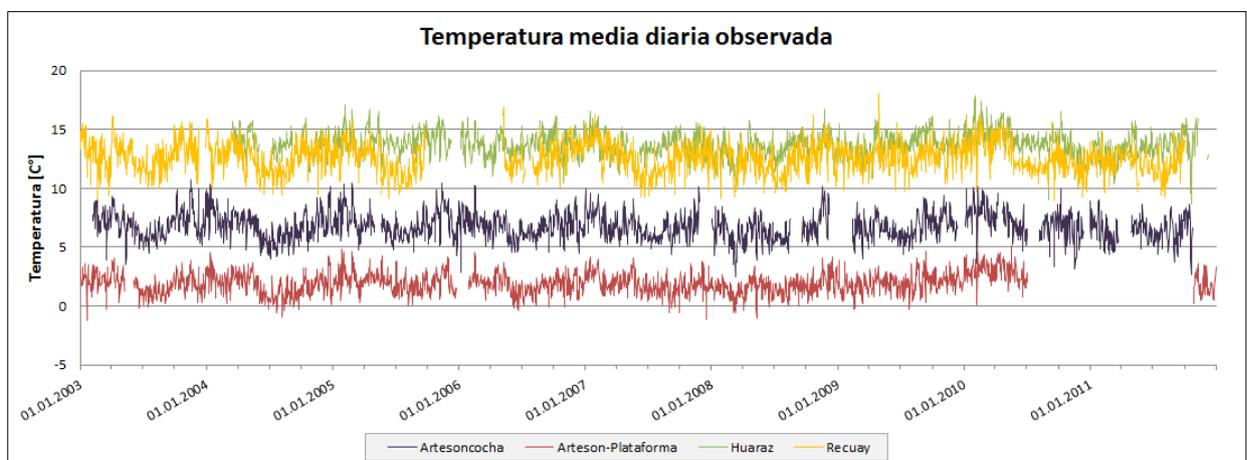
Llama la atención que los desarrollos anuales de todos los puntos de malla son bastante peculiares y poco naturales. Además la diferencia entre los máximos y los mínimos anuales aparece muy grande. Estas declaraciones están apoyadas por los datos observados en diferentes estaciones meteorológicas de la Cordillera Blanca (Figura 7). Las temperaturas medias diarias observadas en estas estaciones entre 2003 y 2011 muestran un desarrollo anual muy diferente comparado con los puntos de malla. Sobre todo la variación anual observada en todas las estaciones es mucho menor que en las realizaciones del GCM GFDEL-CM3.

Una razón para el desarrollo anual atípico de las temperaturas diarias del GFDL-CM3 puede ser que la temperatura superficial del aire depende mucho de la topografía. Pero en el capítulo 4.1 hemos visto que la topografía es mal representada en el modelo GFDL-CM3 por su resolución espacial bastante gruesa. Además, la temperatura superficial del aire es una variable parametrizada y no explícitamente calculada y por eso es más propensa a errores.

Debido a estos resultados se postula que los datos diarios de la temperatura superficial del aire generados por el GCM GFDL\_CM3 no son suficiente fiables para usarlos directamente como datos de entrada en, por ejemplo, modelos hidrológicos o modelos de cultivos. En este sentido se recomienda usar solo las proyecciones mensuales del GFDL-CM3 para estudios de impacto. Para recibir datos diarios se puede aplicar un downscaling estadístico o un método de delta. El método de delta consiste en adicionar, un escenario futuro, es decir un valor constante (delta) a series de datos observados.



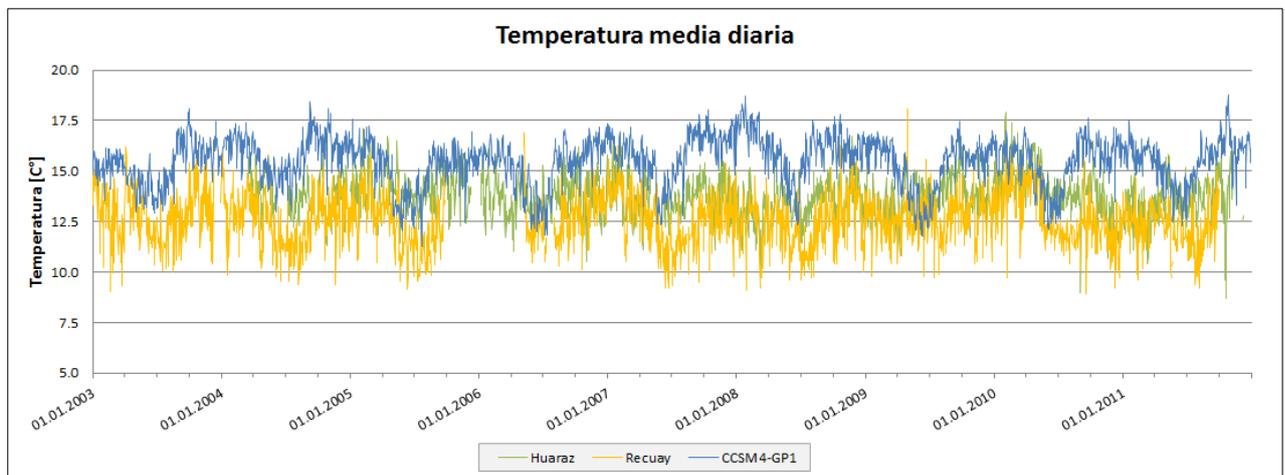
**Figura 6:** Temperatura superficial del aire proveniente del GCM GFDL-CM3 (datos diarios) para el periodo 1997 – 2005. Las líneas azules son realizaciones de los dos puntos de malla en el alrededor de la Cordillera Blanca. Las realizaciones representativas para la región Santa Teresa están figuradas en rojo. Para todos los puntos de malla la variación anual de la temperatura aparece atípica y en comparación con datos observados, es demasiado grande (véase Figura 7) (Datos: IPCC).



**Figura 7:** Temperatura media diaria observada (2003-2011) de unas estaciones meteorológicas en la Cordillera Blanca. En comparación con las realizaciones del GFDL-CM3 (véase Figura 6), la variación anual observada en las estaciones es mucho menor (Datos: SENAMHI y Unidad de Glaciología).

Después de analizar los datos del GFDL-CM3, esta sección se dedica a las temperaturas diarias generadas por el modelo climático CCSM4.0. La Figura 8 muestra una realización de la temperatura diaria del CCSM4.0 (azul) y las series de temperatura de las estaciones Huaraz (verde) y Recuay (amarillo) para un periodo de ocho años. Comparado con las temperaturas del GFDL-CM3, aquellas del CCSM4.0 coinciden mucho mejor con las mediciones. No solo el desarrollo anual sino también la variación interanual son bastante similares a los de las observaciones en Huaraz y Recuay.

Debido a estos resultados se puede recomendar - además de las proyecciones mensuales - usar también las proyecciones diarias de la temperatura superficial del aire directamente para estudios de impacto. Una gran ventaja de las salidas diarias del GCM CCSM4.0 de frente de salidas de otros GCM y RCM es que no solo los datos mensuales pero también los datos diarios son disponibles para todos los interesados.



**Figura 8:** Comparación de la temperatura diaria generada por el modelo global CCSM4.0 (azul) y de la temperatura medida en las estaciones Huaraz (verde) y Recuay (amarillo). El desarrollo de los datos del CCSM4.0 coincide bastante bien con los datos observados en Huaraz y Recuay (Datos: Unidad de Glaciología y IPCC)

## 5 Conclusiones

A fines del año 2013, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicará su Quinto Informe (AR5) sobre el estado del arte del entendimiento científico sobre el cambio climático. Para esto, los grupos que desarrollan modelos climáticos (GCM), han ejecutado la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP5), con nuevos GCM mejorados y nuevos escenarios de emisión, los “Representative Concentration Pathways” (RCP).

Una meta de este estudio era dar una primera impresión sobre el desarrollo futuro de la temperatura y precipitación en la región de la Cordillera Blanca y la Cordillera Negra, considerando las salidas de los nuevos GCM del CMIP5. Por eso se han analizado datos mensuales que hasta hoy están **disponibles** de numerosos GCM. Para cinco de dichos GCM, se han calculado **proyecciones estacionales** para el periodo de los meses diciembre, enero y febrero, basando en el escenario de emisión RCP8.5. En el caso de la temperatura se ha demostrado que en el periodo 2010 -2100 todos los modelos analizados muestran una tendencia positiva. **Para el periodo 2010 - 2095 el aumento de la temperatura estacional varía entre aproximadamente 2.8°C (MRI-CGCM3) y 4.2°C (GFDL-CM3)**. En cuanto a la precipitación no hay tendencias tan claras. **Todas las proyecciones de la precipitación estacional muestran o ninguna tendencia o un aumento pequeño** para la Cordillera Blanca y Negra en el siglo XXI. No solo para la temperatura sino también para la precipitación los modelos dan una imagen bastante consistente.

En este estudio, también se han examinado las **salidas diarias de dos modelos globales**. El primero GCM es el GFDL-CM3 del Laboratorio Geofísico de Dinámica de fluidos (NOAA). El segundo es el modelo CCSM4.0 del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). Era el fin de averiguar si la calidad de la temperatura diaria, generada por los GCM, es suficiente buena para usar las proyecciones diarias directamente como datos de entrada para, por ejemplo, modelos hidrológicos o modelos de cultivos. Por eso se han comparado realizaciones de la temperatura superficial del aire a nivel diario – provenientes de los dos GCM - con datos observados.

Se ha demostrado que, en el caso del modelo **GFDL-CM3**, el desarrollo anual de la temperatura diaria es bastante peculiar y poco natural. Además, la diferencia entre los máximos y los mínimos anuales es demasiado grande comparado con las temperaturas medidas. Por estas razones se postula que los **datos diarios de la temperatura superficial del aire generados por el GCM GFDL\_CM3 no son suficiente fiables** para usar los directamente como datos de entrada en modelos usados en estudios de impacto. En este contexto se recomienda usar solo las proyecciones mensuales del GFDL-CM3.

En contraste con las temperaturas del GFDL-CM3, **las temperaturas diarias generadas por el CCSM4.0 coinciden mucho mejor con las mediciones**. No solo el desarrollo anual sino también la variación interanual son bastante similares a los de las observaciones en Huaraz y Recuay. Por eso se puede recomendar - además de las proyecciones mensuales – usar también las proyecciones diarias de la temperatura superficial del aire directamente para estudios de impacto. Una gran ventaja de las salidas diarias del GCM **CCSM4.0** frente a algunos otros GCM y RCM es que no solo las salidas mensuales sino también las **salidas diarias** son **disponibles para todos los interesados**.

## 6 Bibliografía

Los mapas se realizaron utilizando el software GoogleEarth ([http:// earth.google.com/](http://earth.google.com/))

Falvey, Mark, and René D. Garreaud. 2009. "Regional Cooling in a Warming World: Recent Temperature Trends in the Southeast Pacific and Along the West Coast of Subtropical South America (1979–2006)." *Journal of Geophysical Research* 114 (D4) (February 18): 1–16. doi:10.1029/2008JD010519. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008JD010519.shtml>.

IPCC: <http://www.ipcc-data.org/>

KNMI Climate Explorer: [climexp.knmi.nl](http://climexp.knmi.nl)

Proyecto Glaciares. 2012. "Adaptación Al Cambio Climático y Reducción De Riesgos De Desastres Por El Retroceso De Los Glaciares En La Cordillera De Los Andes." <http://proyectoglaciares.wix.com/boletin01-py-glaciares#!>

Schwarb, M., D. Acuña, Th. Konzelmann, M. Rohrer, N. Salzmann, B. Serpa Lopez, and E. Silvestre. 2011. "A Data Portal for Regional Climatic Trend Analysis in a Peruvian High Andes Region." *Advances in Science and Research* 6 (August 16): 219–226. doi:10.5194/asr-6-219-2011. <http://www.adv-sci-res.net/6/219/2011/>.

SENAMHI. 2007. "Escenarios de cambio climático en la cuenca del Río Urubamba para el año 2100." *Proyecto Regional Andino De Adaptación*.

SENAMHI. 2009. Escenarios climaticos en la cuenca del río Santa para el año 2030.

Taylor, KE. Stouffer, RJ. Meehl, GA. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): p.485–498.

Van Vuuren, D.P., et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change* 109, 5-31.