

## **Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile**

*René D. Garreaud<sup>1</sup>*

Departamento de Geofísica  
Universidad de Chile

### **1. Consideraciones generales sobre el Cambio Climático**

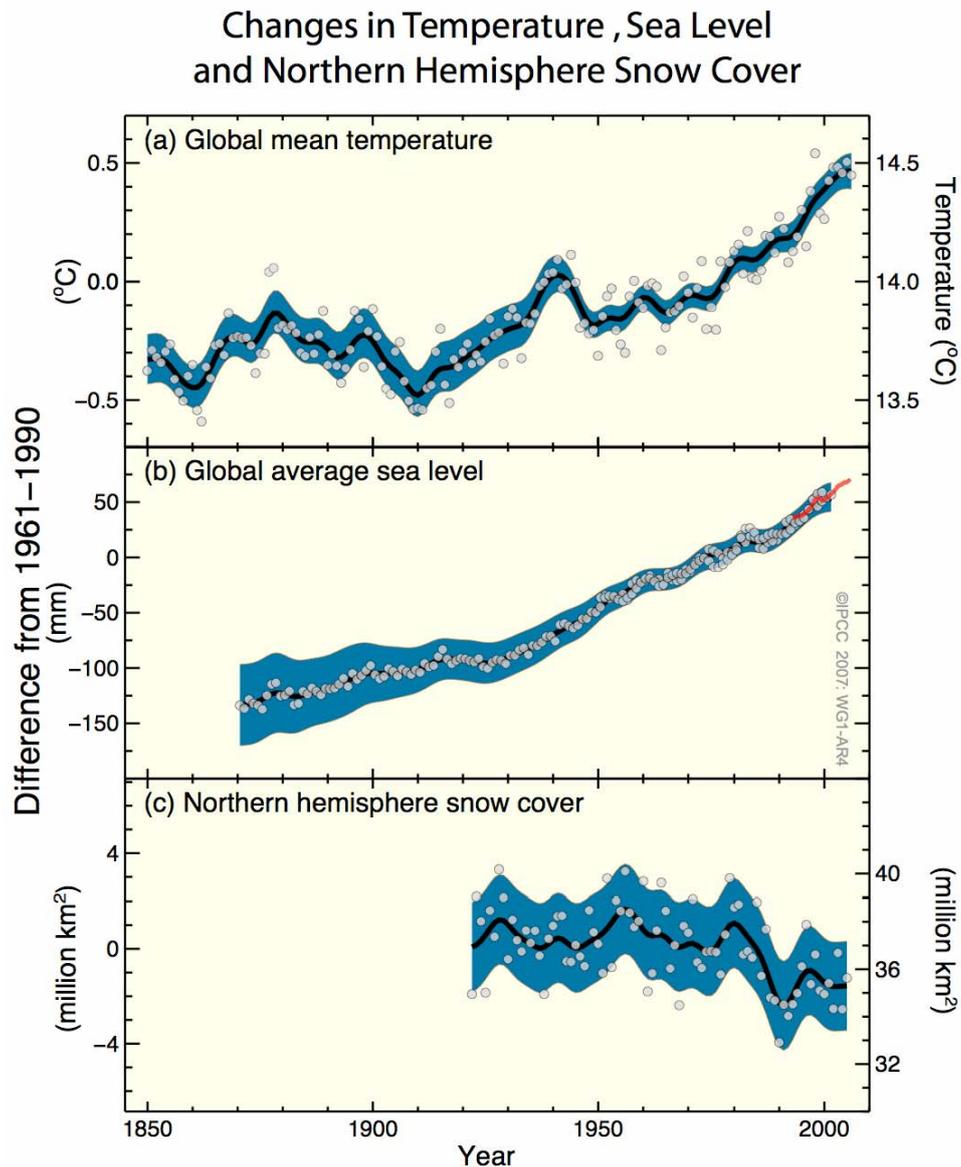
El clima es definido tradicionalmente como el promedio de largo plazo de las variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad, vientos, etc.) en una región. El clima es determinado por la circulación atmosférica de gran escala y la geografía; a su vez, el clima define en gran parte los ecosistemas y los emprendimientos humanos que se desarrollan en una región, especialmente las actividades agrícolas y forestales. Formalmente el “largo plazo” corresponde a una ventana de 30 años de duración al interior de la cual puede existir considerable variabilidad interanual (asociada, por ejemplo, al fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur) superpuesta en el ciclo medio anual. Cuando se examinan registros atmosféricos prolongados (observados directamente o inferidos de registros ambientales) resulta evidente que el clima también cambia en forma significativa en escalas de tiempo de siglos a cientos de miles de años. La mayoría de estos cambios climáticos obedecen a factores naturales, incluyendo la inestabilidad interna del sistema atmósfera-oceanos-criósfera, cambios en el forzante solar debidos a pequeñas desviaciones en la geometría orbital del planeta, cambios de la composición de la atmósfera debido al volcanismo y otros procesos superficiales, y cambios en la configuración continental del planeta debido a la tectónica de placas.

El cambio climático que abordamos en esta presentación corresponde a los cambios del sistema climático debido al incremento de la concentración de gases con efecto invernadero (GEI, gases con gran capacidad de absorber la radiación emitida por la superficie del planeta) como consecuencia directa de la quema de combustible fósiles y otras actividades antropogénicas. Se debería hablar en rigor de “cambio climático debido a incremento de efecto invernadero de origen antropogénico” pero de ahora en adelante sólo lo llamaremos “cambio climático”. La inyección de estos GEI, especialmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), comenzó a ser significativa a mediados del siglo XIX debido al proceso de industrialización. En la actualidad, la concentración

---

<sup>1</sup> <http://www.dgf.uchile.cl/rene>

promedio de CO<sub>2</sub> alcanza unas 360 partes por millón (ppm), un 30% por encima del valor preindustrial de 280 ppm. Evidencias paleo-ambientales indican que la concentración de CO<sub>2</sub> se mantuvo muy cercana a los 280 ppm durante los últimos 700.000 años. La tasa actual de aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera es pronunciada, y se proyecta que dentro de las próximas dos décadas se duplicara el valor preindustrial.



**Figura 1.** Evolución de la temperatura cerca de la superficie promedio del planeta, nivel del mar promedio global y cobertura de nieve en el hemisferio norte, durante el siglo XX. Fuente: IPCC-AR4 (Christensen et al. 2007).

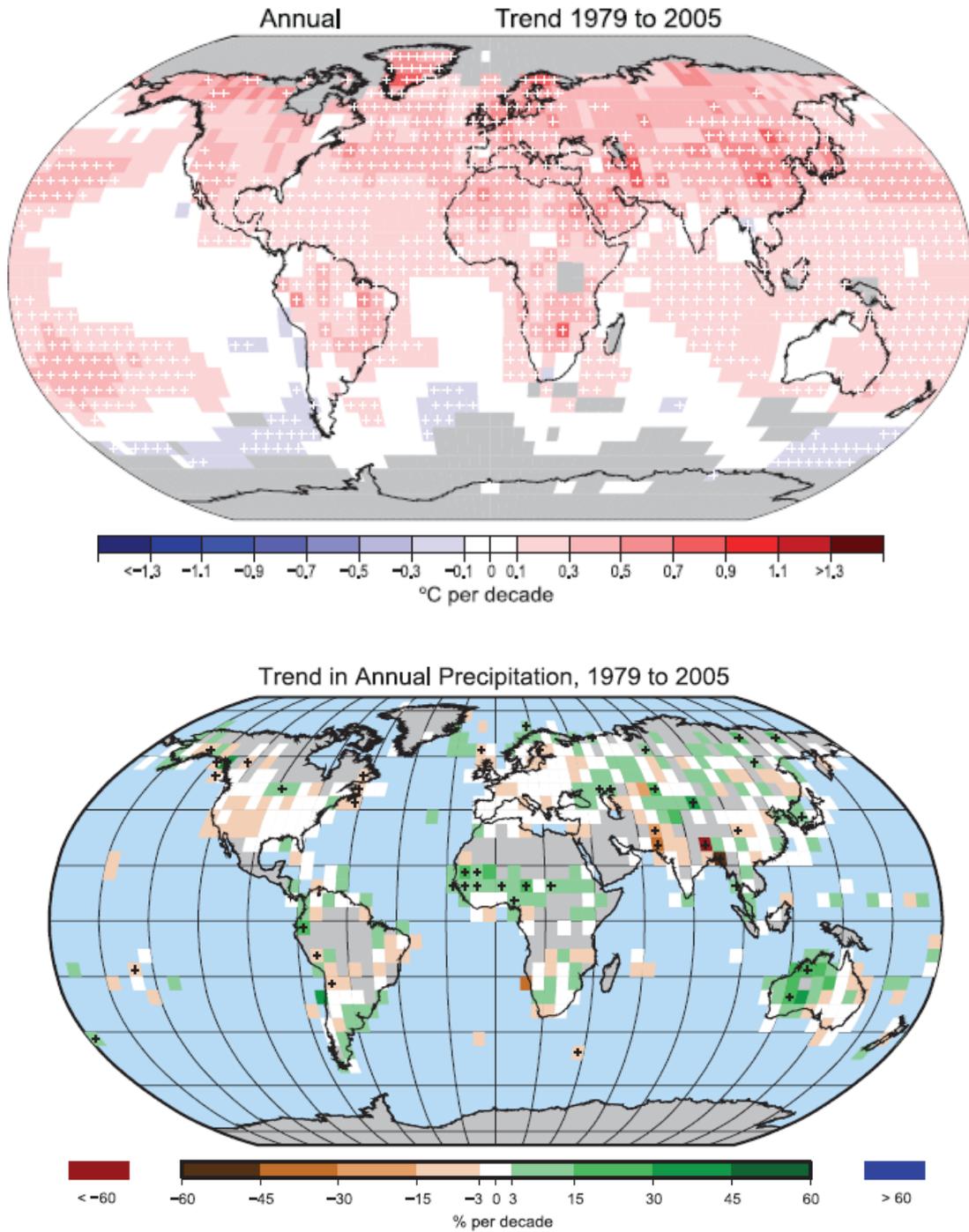
Sobre la base del balance radiativo de la atmósfera, existen consideraciones robustas que indican que un aumento de la concentración del CO<sub>2</sub> genera un aumento en la temperatura superficial del planeta. El aumento de la temperatura superficial del planeta por efectos radiativos se ve incrementada por retroalimentaciones dentro del sistema terrestre. Estos factores son sintetizados en la sensibilidad climática al CO<sub>2</sub> en términos del cambio promedio de la temperatura superficial frente a una duplicación del CO<sub>2</sub> respecto al valor preindustrial ( $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$ ). Aunque el valor exacto de esta sensibilidad no es conocido, la mayoría de las estimaciones de  $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$  caen en el rango +2-3°C, pero con valores escapados tan bajos como +1°C y tan altos como +5°C (e.g., Schwartz, S., 2008). El valor promedio y aceptado por el IPCC es de  $\Delta T_{2\times\text{CO}_2} = 2.5^\circ\text{C}$ .

## 2. Cambios globales en el siglo XX

Antes de continuar hacia el futuro, es conveniente analizar cuáles han sido los cambios observados en el último siglo, considerando que ya hemos recorrido más de medio camino a la duplicación del CO<sub>2</sub>. La Fig. 1, reproducida del Cuarto Informe del IPCC (Christensen et al., 2007), muestra los cambios de la temperatura promedio planetaria desde 1850 al 2005, junto a otras variables que también dan cuenta de un aumento de temperatura. En promedio, la temperatura se ha incrementado en unos 0.8° durante el siglo XX. Este valor cae en el límite inferior del rango esperable considerando las diversas estimaciones de  $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$  y los cambios constatados de CO<sub>2</sub>. Este valor relativamente modesto, parece explicarse en el rol moderador que ejerce el océano profundo, el cual aún no se ajusta completamente al nuevo equilibrio.

Los cambios de temperatura durante el siglo XX muestran considerable variabilidad temporal (taza de cambio variable en el tiempo y superpuesta en fluctuaciones interanuales muy importantes) y espacial. Para ilustrar este último punto, la Fig. 2a muestra el cambio de temperatura superficial del aire en las últimas tres décadas. Consistente con la Fig. 1, la mayor parte del planeta muestra una tendencia al calentamiento, pero este es mucho más extenso e intenso (hasta 0.3°/década) sobre el hemisferio norte, debido a la mayor masa continental y la retroalimentación positiva que produce la pérdida de cobertura nival. El hemisferio sur, donde la superficie oceánica es mucho mayor, el calentamiento es menos extendido e incluso se evidencia una banda circumpolar de enfriamiento cerca de la periferia antártica que se extiende a lo largo de la costa oeste de Sud América. Analizaremos este rasgo con más detalle en la sección siguiente, pero es importante comentar aquí que

tal enfriamiento regional no es incompatible con un cambio climático global asociado al incremento de GEI.



**Figura 2.** Cambios observados de la temperatura del aire cerca de la superficie (panel superior) y precipitación (panel superior) evaluados en el periodo 1979-2005. Fuente: IPCC-AR4 (Christensen et al. 2007)

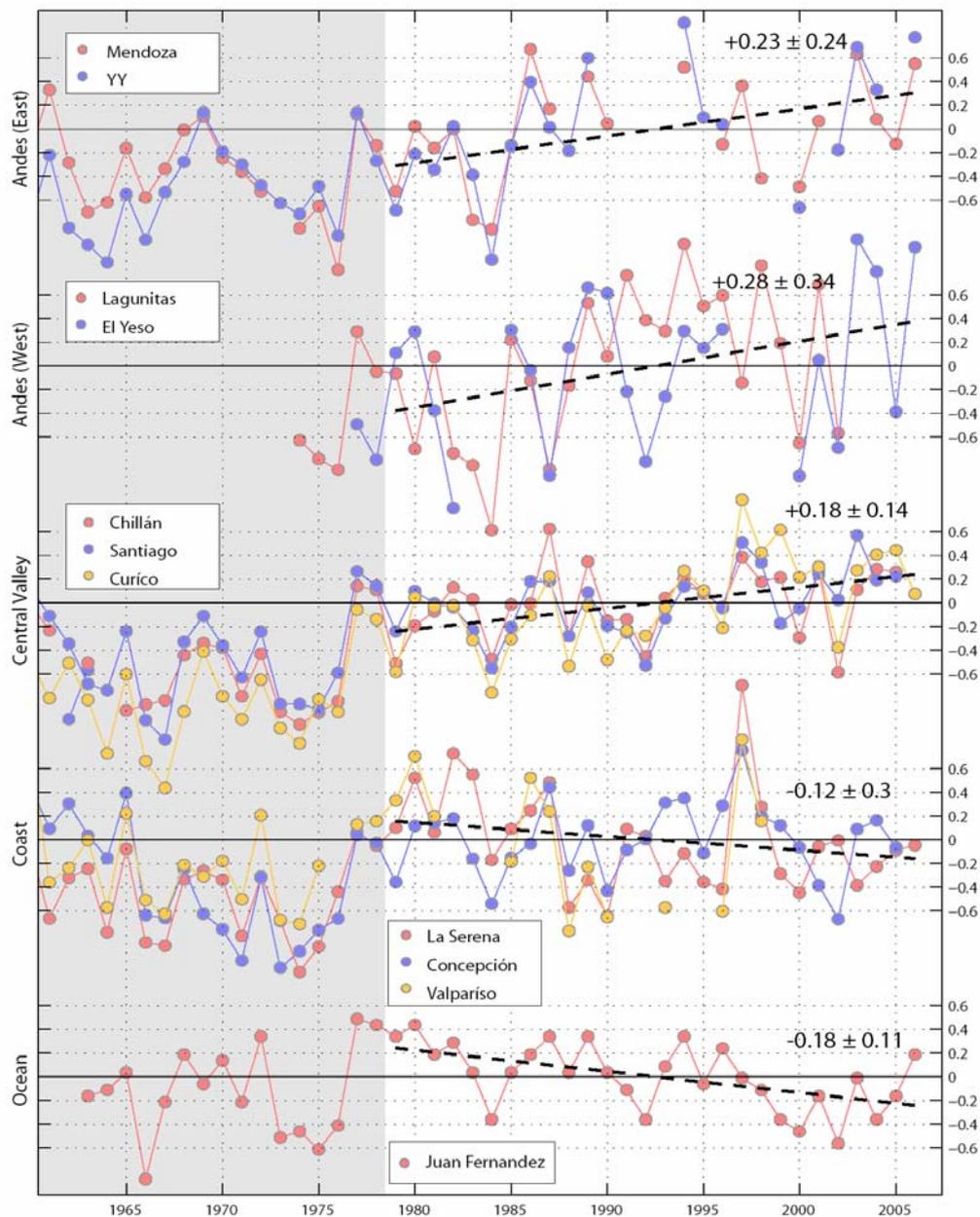
Un cambio climático de carácter global no solo afecta la temperatura del planeta sino que también la circulación de la atmósfera y por ende los regímenes de precipitación. Estos últimos cambios, sin embargo, son más difíciles de detectar (debido a problemas instrumentales) y no presentan patrones espaciales tan coherentes como el caso de la temperatura. La Fig. 2b muestra los cambios de precipitación durante el siglo XX, donde se aprecian zonas con aumento de precipitación (como la cuenca del Plata) y zonas de decremento de precipitación (como el sector Chileno).

### **3. Cambios observados en Chile**

Desde el punto de vista climático, Chile se ubica en la transición entre condiciones oceánicas frías y condiciones continentales más cálidas y húmedas. Este carácter de transición también se verifica en los cambios climáticos observados en el siglo XX y proyectados al siglo XXI. Cualquier estimación de los cambios observados en Chile se complica debido a la pobre y dispar distribución de estaciones de seguimiento climático.

Consistente con lo apreciado en el mapa global de cambio de temperatura, la Fig. 3 permite apreciar el comportamiento dispar de la temperatura a lo ancho del territorio nacional en su zona central. Para distintos conjuntos de estaciones (según su cercanía a la costa) se muestra la serie de tiempo de la temperatura promedio anual, donde se aprecia la variabilidad interanual (saltos año-año) y una tendencia sostenida durante varias décadas. El análisis se restringe al periodo posterior al año 1979 luego del “salto climático” natural de mediados de los 70. Mientras las temperaturas en el océano y a lo largo de la costa han disminuido ( $-0.15^{\circ}$ /década), las estaciones en el valle central muestran un ligero aumento, y las temperaturas en cordillera muestran un aumento significativo de casi  $+1/4^{\circ}$ C por década. El enfriamiento costero y el calentamiento sobre los Andes se verifica en la zona central y norte de Chile (Falvey & Garreaud 2009). Al sur de la región del Bio-Bio las tendencias dejan de ser significativas, pero predomina un ligero enfriamiento. Es importante destacar que 30 años es un periodo relativamente breve y las tendencias en la Fig. 3 podrían corresponder a una oscilación natural de largo plazo. Sin embargo, comparación con los modelos climáticos y otros análisis permiten atribuir estas tendencias al cambio global (por aumento de GEI) al menos parcialmente (Falvey & Garreaud 2009). En particular, el enfriamiento litoral parece consecuencia de una intensificación de los vientos del sur a lo largo de la costa debido a una expansión hacia el sur de la zona de influencia del

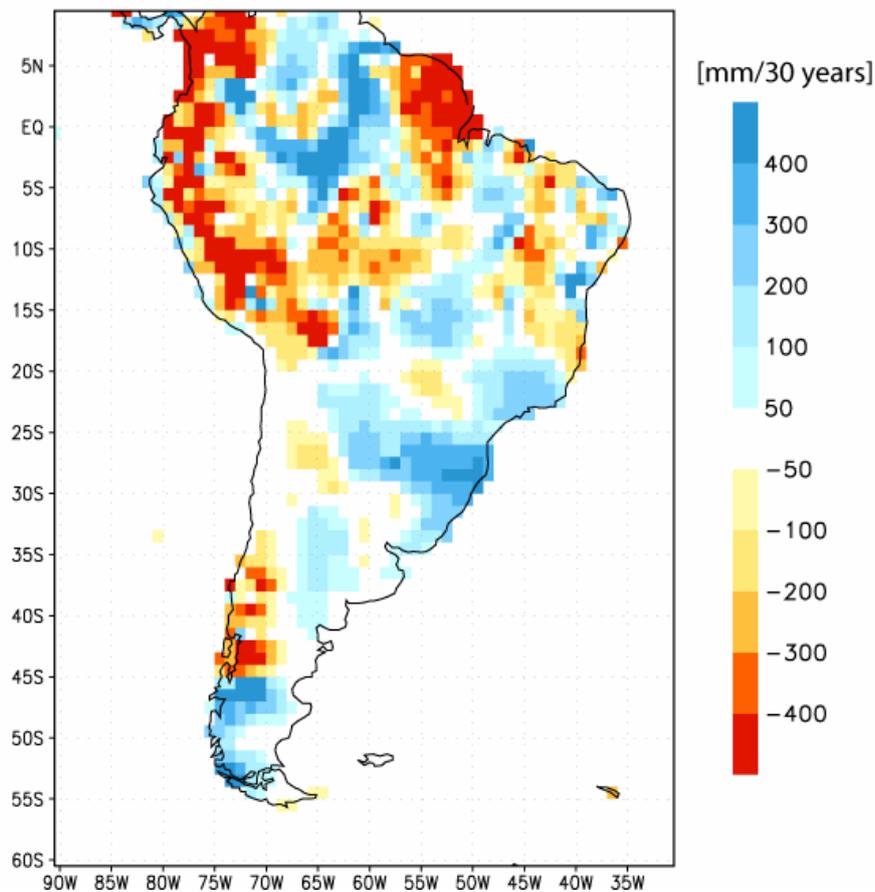
anticiclón subtropical del Pacífico sur oriental, un rasgo de gran escala consistente con un “calentamiento global”.



**Figura 3.** Variación de la temperatura en diversas estaciones en Chile central, agrupadas según su altura. Los números dentro del gráfico en negrita indican la tendencia lineal en °C por década, junto a su rango de incertidumbre, calculada mediante ajuste lineal entre 1979 y 2005. Fuente: Falvey & Garreaud (2009).

Los cambios de precipitación a lo largo de Chile son más difíciles de cuantificar, debido a que la precipitación muestra mucha mayor variabilidad interanual. La figura 4, construida en base a observaciones asimiladas en una

grilla regular (University of Delaware climate data set), indica que sólo la zona centro-sur (entre el Maule y Chiloé continental) presenta tendencias significativas, con una reducción de hasta 100 mm/década en el sector de Valdivia. La zona central, incluyendo la cordillera de la región Metropolitana, no exhibe tendencias significativas que sobresalgan de la gran variabilidad de precipitaciones en esta región que es causada por la alternancia de eventos de El Niño y La Niña. Los resultados en la Fig. 4 son consistentes con el análisis de datos de estaciones pluviométricas realizado por Quintana (2008) y algunas estimaciones en base a caudales en la eco-región Valdiviana por Lara et al. (2008).



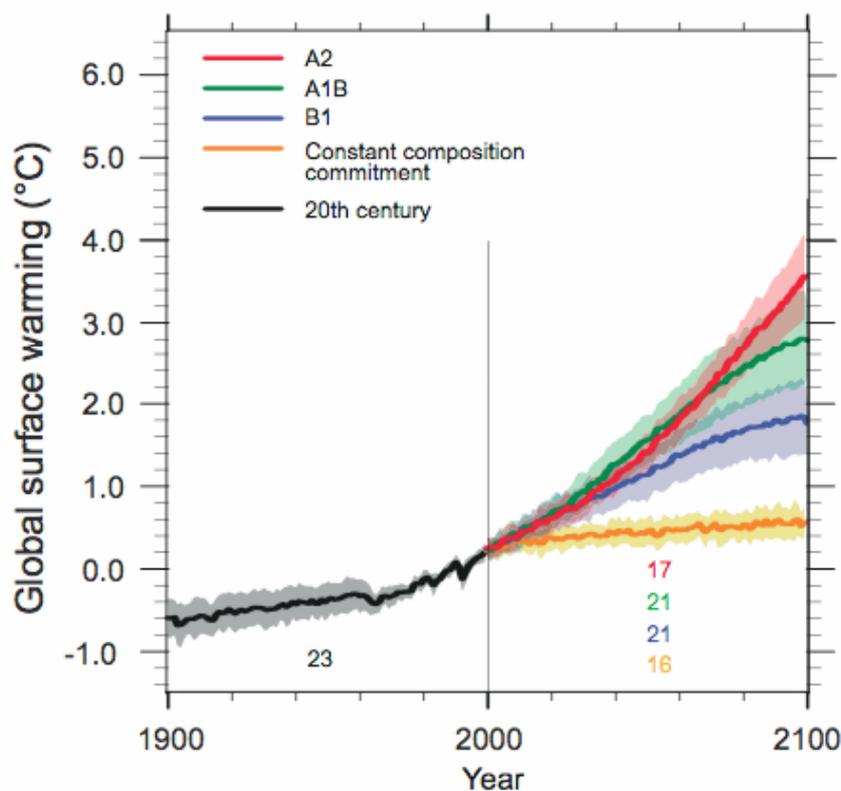
**Figura 4.** Tendencia de la precipitación en mm/30 años calculada mediante ajuste lineal entre 1960 y 2000 de datos grillados de la University of Delaware climate data set.

#### 4. ¿Como saber que nos trae el siglo XX?

##### a. Modelos de Gran Escala (GCM)

Considerando el rango de sensibilidad climática  $\Delta T_{2\times CO_2}$ , y las actuales tasas de emisión de gases con efecto invernadero, es esperable que la temperatura

promedio planetaria aumente en +2°C hacia mediados XXI respecto al promedio 1960-1990. Existe amplio consenso que un cambio de +2°C trae acompañados problemas ambientales graves a nivel global y regional. Por otro lado, existe incertidumbre respecto a cuando la temperatura aumentará en +2°C debido a nuestro desconocimiento de la sensibilidad climática y, sobre todo, la tasa de emisión de GEI en el futuro (incertidumbre de emisiones). El esquema adoptado por el IPCC es considerar distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (lo que se relacionan con escenarios de evolución social, económica y tecnológica), desde uno muy benigno como el “constant composition commitment” a uno muy negativo como el A2.



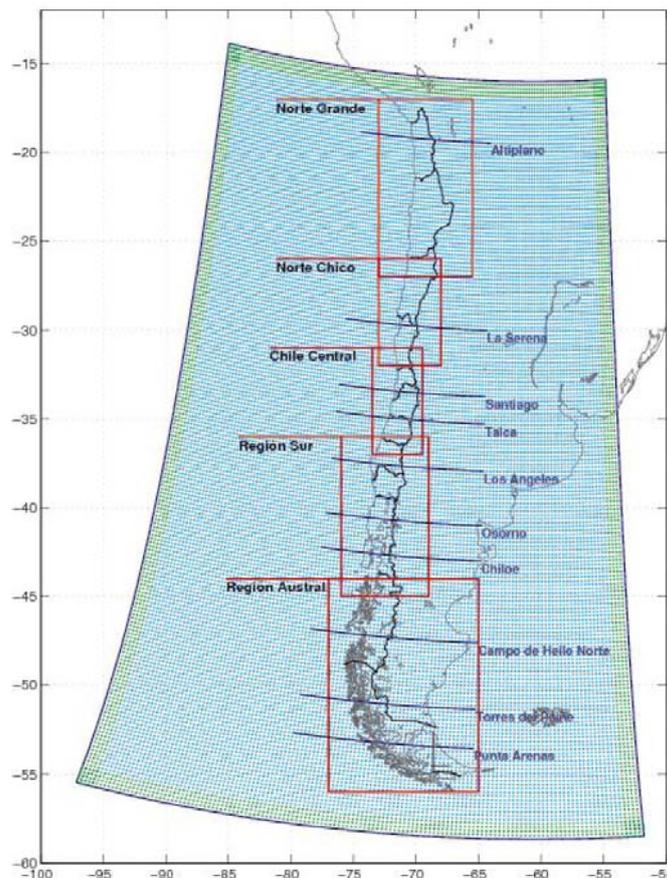
**Figura 5.** Evolución de la temperatura cerca de la superficie promedio del planeta, nivel del mar promedio global y cobertura de nieve en el hemisferio norte, durante el siglo XX. Fuente: IPCC-AR4 (Christensen et al. 2007)

Para predecir cambios climáticos más allá de valores promedios globales, es necesario emplear modelos numéricos de la atmósfera que capturen la dinámica de la circulación atmosférica y los procesos de intercambio de energía, masa y momentum con la superficie. En estos modelos la concentración de CO<sub>2</sub> y otros GEI son establecidos de acuerdo al escenario de emisiones considerados, e integrados en el tiempo en períodos de hasta 100

años. Para el IPCC-AR4 se dispuso de más de 20 GCMs que cubrían al menos un periodo “baseline” (BL) entre 1960 y 1990, y varios escenarios para fines del siglo XXI entre 2070 y 2100. Como ejemplo, la Figura 5 muestra la evolución de la temperatura promedio planetaria para todo el siglo XXI.

*b. Modelos regionales (RCM-PRECIS)*

El gran dominio espacial de los GCM exige que la resolución espacial de la grilla de diferencias finitas no sea muy detallada, usualmente entre 200 y 300 km en la horizontal. Para un país como Chile, con geografía compleja y gradientes tan marcados en la dirección este-oeste, la resolución de los GCMs resulta insuficiente para describir el clima y sus potenciales cambios. Aunque los cambios A2-BL en los GCMs dan cuenta de la alteración del régimen de precipitación y temperatura a nivel regional, no es evidente como se “mapean” estos cambios a la geografía nacional. Es posible, por ejemplo, que los cambios de temperatura se incrementen con la altura sobre los Andes respecto a la atmósfera libre debido al efecto albedo, fenómeno que no es representado por los GCMs.



**Figura 6.** Dominio espacial y retículo horizontal del modelo PRECIS-DGF.

En este caso se debe recurrir a modelos numéricos de mejor resolución pero de área limitada, llamados Regional Climate Models (RCMs). En esencia, los RCMs realizan un escalamiento hacia abajo (downscaling) de la información de mayor escala provista por un GCM. Así, los resultados de un RCM son altamente determinados por el GCM que los alimenta en sus bordes laterales, pero su resolución es alta de manera que los resultados son físicamente consistentes con la geografía local.

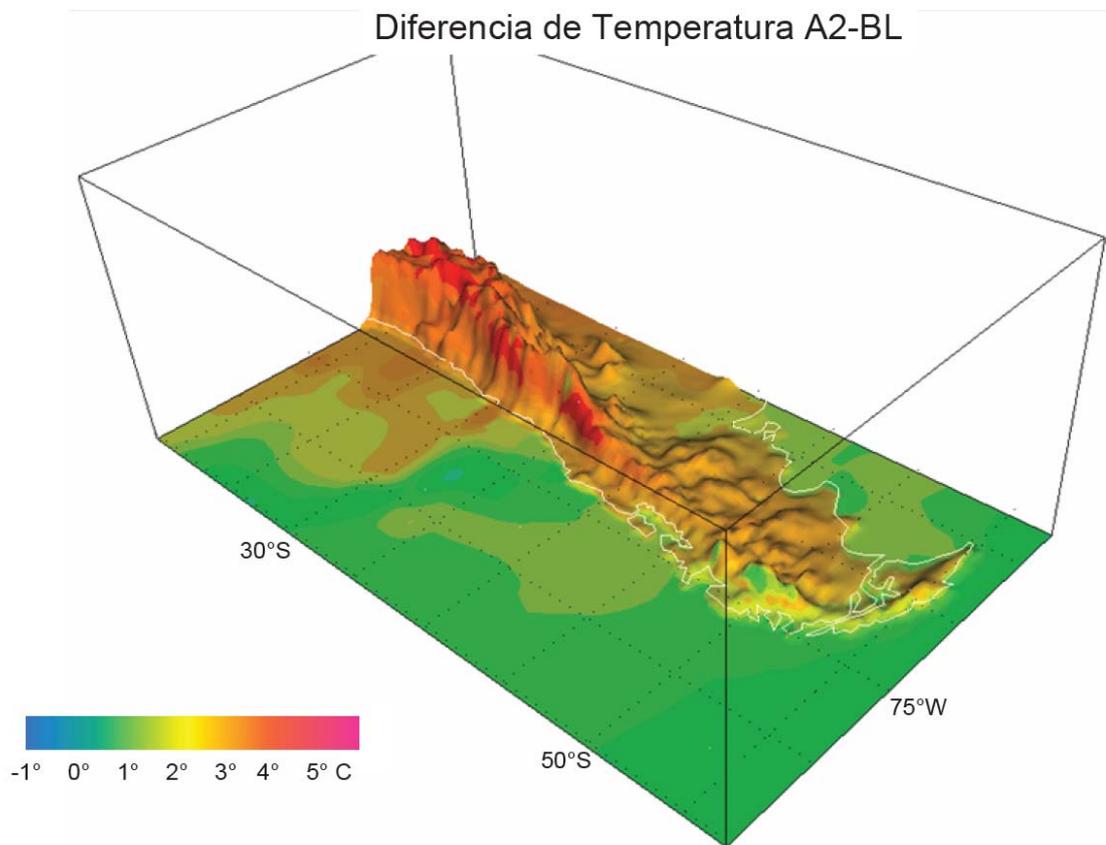
PRECIS (“Providing REgional Escenarios for Climate Studies”) es un RCM desarrollado por el Hadley Centre del Reino Unido sobre la base de Modelos Globales de este mismo centro de investigación (Jones et al. 2004). Como parte del proyecto "Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XX", solicitado por CONAMA y co-financiado por el proyecto ACT19, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile realizó una estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante el siglo XXI empleando PRECIS, cubriendo todo el territorio nacional con una resolución espacial de 25 km (Figura 6). Los informes derivados de este estudio como la mayor parte de los datos generados están disponibles en: <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS>. En esta presentación se muestran los resultados de las simulaciones BL (clima actual, 1960-1990) y A2 (2070-2100 bajo un escenario severo de emisiones GEI).

## **5. Cambios proyectados para Chile durante el Siglo XXI**

Empleando los resultados del modelo PRECIS, es posible calcular las diferencias entre el clima a fines del siglo XXI (periodo 2070-2100), considerando el escenario A2, y el clima de fines del siglo XX (1960-1990). Es importante enfatizar que este cambio corresponde al “peor caso” pues el escenario A2 supone emisiones muy elevadas de GEI durante las próximas décadas. A continuación presentamos los cambios más importantes y coherentes a nivel nacional; el lector interesado en cambios en lugares específicos puede recurrir al informe preparado por el DGF-UCh para CONAMA y acceder a los datos del modelo PRECIS, ambos disponibles desde el sitio web: <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS>

La Fig. 7 muestra el cambio de temperatura superficial del aire (promedio anual) sobrepuesto la topografía de Chile. Se observan calentamiento sobre todo Chile continental y el océano adyacente, pero con magnitudes variables. El calentamiento es modesto (0.5-1°C) sobre la costa, pero este se incrementa rápidamente sobre la cordillera con cambios de hasta 5°C en las tierras altas

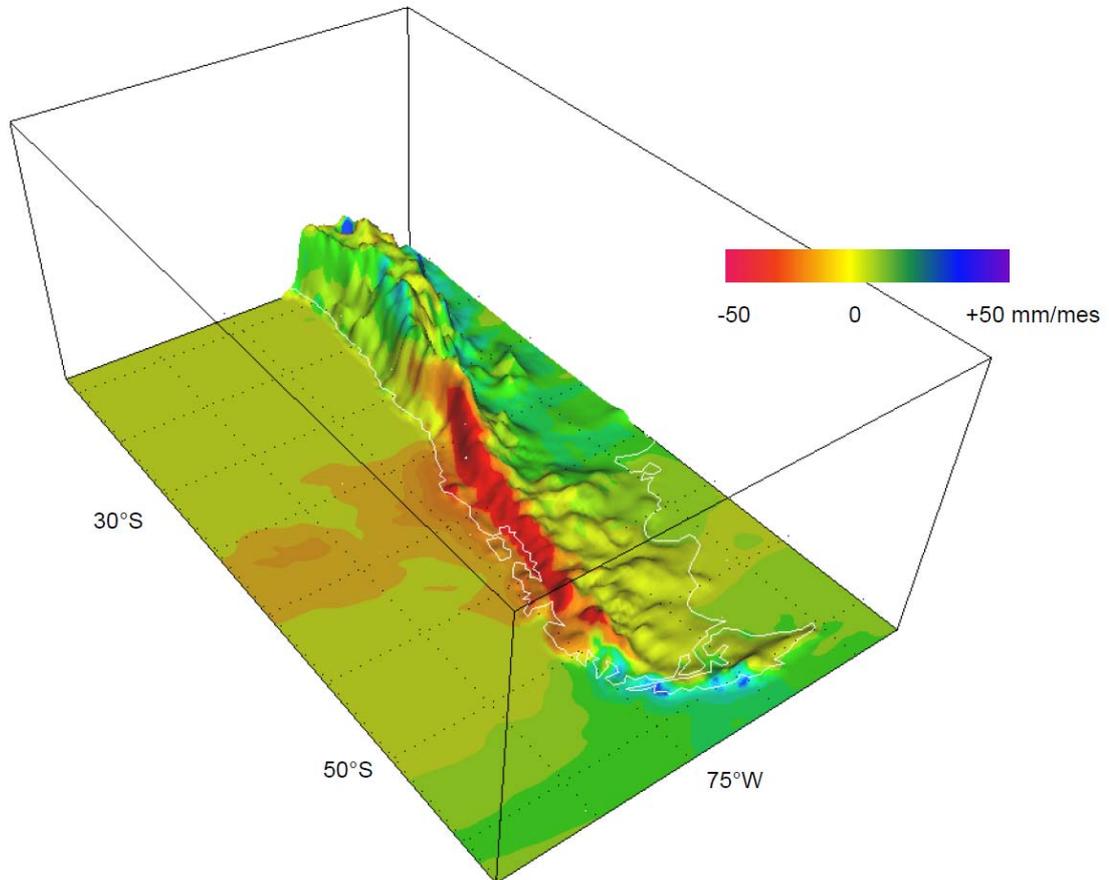
del norte y centro de Chile. Existe una leve diferenciación entre las estaciones del año: durante los meses de verano el mayor calentamiento ( $>4^{\circ}\text{C}$ ) se extiende sobre los Andes hasta la Patagonia, mientras que en invierno el calentamiento es más intenso ( $>5^{\circ}\text{C}$ ) pero concentrado en los Andes de la zona norte de Chile (Fuenzalida et al. 2007). Es importante destacar que el menor (mayor) calentamiento sobre la costa (los Andes) proyectado para el futuro es consistente con los cambios observados en las últimas décadas y probablemente debido al efecto de enfriamiento costero por un aumento de los vientos del sur (Garreaud & Falvey 2009).



**Figura 7.** Cambio de temperatura del aire cerca de la superficie (promedio anual) simulado por el modelo PRECIS-DGF entre fines de siglo (2070-2100 bajo escenario A2) y condición actual (1960-1990).

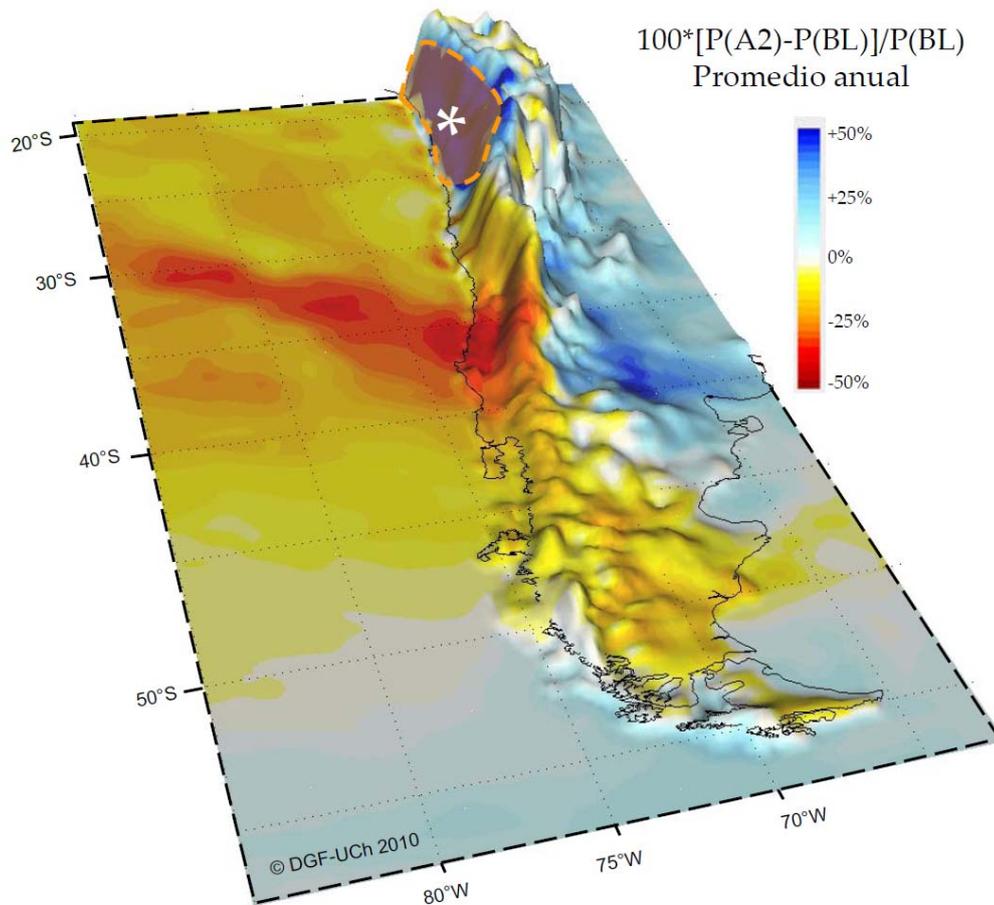
Los cambios de precipitación (acumulada anual) se presentan en la Fig. 8. En este caso, observamos una fuerte tendencia a la disminución de la precipitación en la zona centro-sur de Chile. En la cordillera entre las regiones del Bio-Bio a los Lagos, la precipitación anual disminuye en más de 1000 mm ( $50\text{ mm/mes} \times 12\text{ meses}$ ). También se aprecia un aumento de la precipitación ( $500\text{ mm/año}$ ) en la costa austral de Chile y un leve aumento sobre el

Altiplano (este último rasgo simulado por PRECIS no parece muy robusto, y estimaciones basadas en métodos alternativos indican una disminución de la precipitación en esa zona).



**Figura 8.** Cambio de precipitación media anual (expresada en mm por mes) simulado por el modelo PRECIS-DGF entre fines de siglo (2070-2100 bajo escenario A2) y condición actual (1960-1990).

Para poner los números anteriores en contexto, la Fig. 9 muestra las diferencias normalizada por el promedio actual de la precipitación (simulada por PRECIS), para cada estación del año. La precipitación futura se reduce entre un 60-70% de los valores actuales entre las regiones del Maule y Los Lagos, siendo la reducción mas intensa durante los meses de primavera. En el caso de la zona austral, las precipitaciones se incrementan un 10-20% del valor actual. La zona semiárida y árida de Chile experimenta cambios mucho más modestos. Nuevamente notamos que el patrón de cambio del futuro es consistente con los cambios observados en las últimas décadas. Es también notable el contraste de cambios en precipitación a través de la cordillera de los Andes, en cuanto la zona sur de Argentina experimentará un aumento de precipitaciones, especialmente en verano.



**Figura 9.** Cambio de precipitación media anual simulado por el modelo PRECIS-DGF entre fines de siglo (2070-2100 bajo escenario A2) y condición actual (1960-1990). Los cambios se han normalizado por el promedio actual de la precipitación y se indican en porcentaje. Por ejemplo, el color rojo intenso en la zona central de Chile indica que la precipitación futura será solo la mitad del valor actual. La zona norte de Chile se ha oscurecido, pues sobre el desierto la precipitación actual es cercana a 0 mm.

## 6. Trabajo futuro

Los resultados del modelo PRECIS presentados en el punto anterior son el punto de partida para modelar cambios en una variedad de sistemas físicos, biológicos y humanos, que realmente nos permitirán cuantificar los efectos del cambio climático en nuestros recursos ambientales y actividades económicas. Un primer paso se ha dado con la cuantificación del impacto sobre los recursos hídricos de nuestro país. El prospecto es bastante negativo, pues la disminución de la precipitación y aumento de temperatura resulta en una reducción de los volúmenes anuales de escorrentía y un proceso de deshielo

más temprano alargando y extremando la temporada de estiaje (e.g., Vicuña et al. 2010). Estimación de cambios en la productividad agrícola (Santibáñez et al., en este volumen) y forestal son estudios muy relevantes y necesarios de conducir en la actualidad de manera de poder definir políticas apropiadas de adaptación.

Desde el punto de vista estrictamente climático, es imperativo fortalecer la red de seguimiento “ambiental”, de manera de poder verificar en el tiempo las proyecciones en base a modelos numéricos. Por una parte es necesario ampliar la red de estaciones a zonas con baja cobertura (alta montaña y regiones extremas) pero también es necesario crear los protocolos apropiados de registro, almacenamiento y divulgación de datos climáticos. Por otro lado, será importante revisar las proyecciones regionales generadas con el modelo PRECIS, haciendo uso de las salidas de modelos globales más sofisticados que estarán disponibles a fines del 2011 en conexión con el 5to informe del IPCC.

## Referencias

Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon RT, Laprise R, Magaña V, Mearns CG, Menendez CG, Raisanen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P. 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.

Falvey, M. and R. Garreaud, 2009: Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res.*, **114**, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.

Lara A, Villalba R, Urrutia R., 2008: A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *CLIMATIC CHANGE*, 86, A331-356

Schwartz, S., 2008: Climate change and climate sensitivity. *Energy & Environmental Science*, **1**, 430-453

Vicuña, S., R. Garreaud and J. McPhee, 2010: Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584 - 010-9888-4