



semana 8: modelamiento del clima de Chile – fines del siglo XXI

eh1d3 - calentamiento global:
un análisis científico-humanista

Martín Jacques Coper
martin@dgf.uchile.cl

contenidos



- Chile: un país de diversidad climática
- Variabilidad observada
 - miles de años
 - décadas recientes
- Modelamiento climático
 - Modelamiento a escalas global y regional
 - Metodología y resultados para Chile continental hacia fines del siglo XXI
- Impactos en Norte Grande

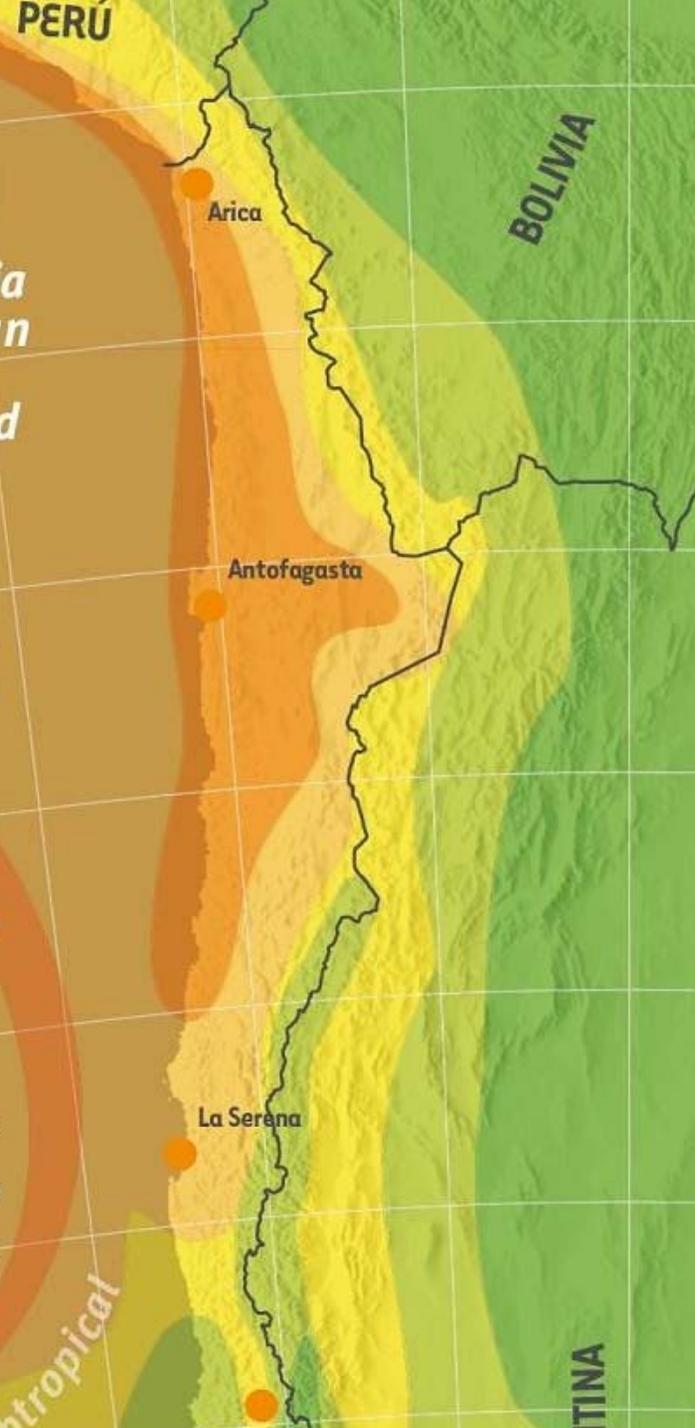
UN PAÍS MULTICLIMÁTICO

Debido a su larga extensión latitudinal y la presencia de la cordillera de los Andes, Chile presenta una gran variedad de regímenes climáticos, desde la hiperaridez de la costa norte hasta la extrema pluviosidad de la Patagonia.

Las razones del desierto. El lento y permanente descenso de aire (subsistencia) en las zonas subtropicales produce condiciones muy estables y un secamiento del aire, explicando la existencia de los grandes desiertos de nuestro planeta. Las aguas frías a lo largo de la costa, el abrupto farellón costero y la pendiente andina, son factores adicionales a la subsistencia que dan lugar a la extrema aridez del desierto de Atacama.

El invierno altiplánico. Los sectores cordilleranos en el extremo norte de Chile reciben más de 100 mm de lluvia entre noviembre y marzo. Estas lluvias se deben al desarrollo de tormentas convectivas sobre el Altiplano Sudamericano alimentadas por el aire húmedo proveniente de las tierras bajas de Bolivia y la cuenca Amazónica durante los meses de verano.

Aguas frías pero ricas. La subsistencia atmosférica mantiene un centro de alta presión en el Pacífico subtropical que fuerza vientos del sur a lo largo de la costa del centro y norte de Chile. Estos vientos del sur inducen el afloramiento de aguas profundas y frías a lo largo de nuestra costa, y sus nutrientes sostienen la riqueza de recursos pesqueros de nuestro país. El aire cerca del océano también se enfría y su humedad mantiene una delgada capa de nubes (estratos) que se extiende miles de kilómetros mar afuera. En el litoral, los estratos interceptan las montañas produciendo la camanchaca, la principal fuente de agua para diversas comunidades de plantas en la costa del norte de Chile.



Precipitación anual



Sistemas Frontales

Las lluvias del sur. Al sur de los 40° de latitud fuertes vientos desde el oeste se hacen sentir desde la superficie hasta el tope de la troposfera. En este flujo nacen y se desarrollan los sistemas frontales que causan las precipitaciones en latitudes medias. El permanente tránsito de los sistemas frontales desde el Pacífico origina el máximo pluviométrico en la zona sur de Chile, el cual se ve acentuado por el ascenso forzado del aire sobre la cordillera de los Andes.

Concepción

Puerto Montt

Coyhaique

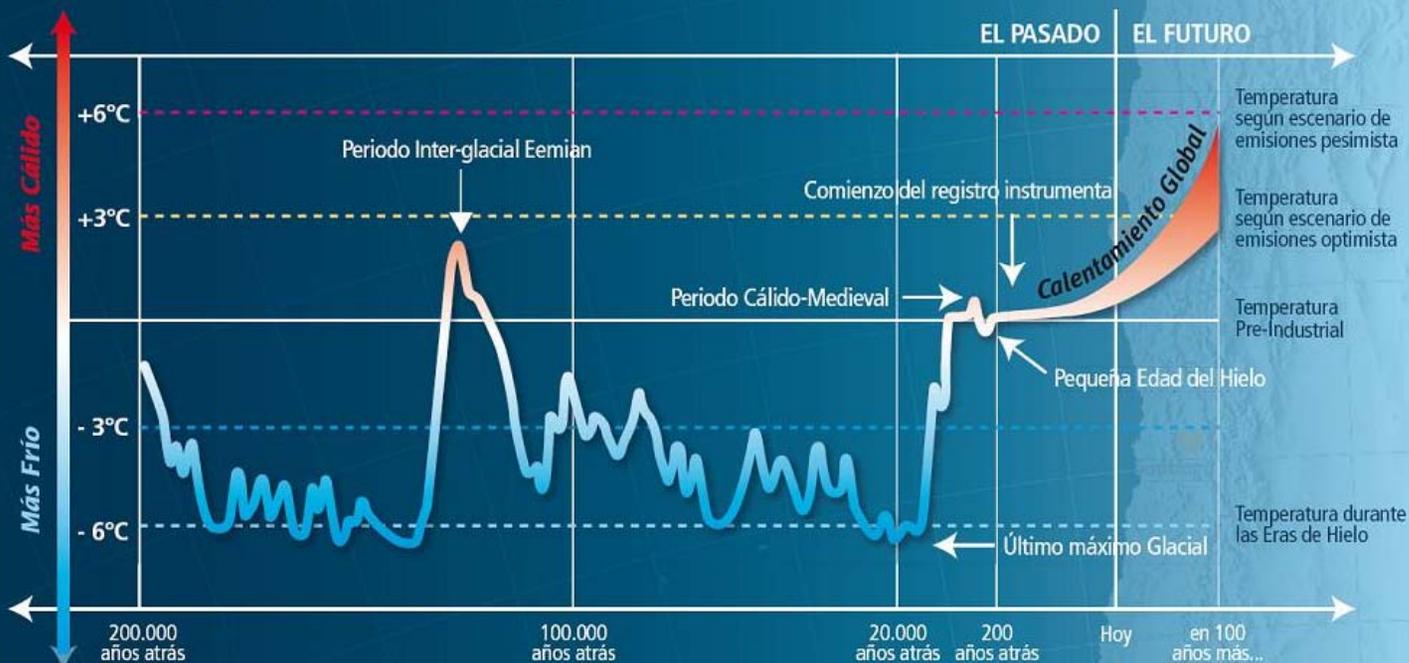
Punta Arenas

NUESTRO CLIMA CAMBIANTE

El clima representa las condiciones atmosféricas predominantes en una región. Sin embargo, los registros instrumentales, observaciones históricas y reconstrucciones ambientales del pasado remoto nos muestran que el clima ha estado en permanente cambio durante la evolución del planeta por causas naturales y, actualmente, por el efecto antropogénico.



Temperatura media del planeta



ARGENTINA

Variaciones naturales. El movimiento de los continentes y el alzamiento de cadenas montañosas afectaron profundamente el clima de la Tierra en el pasado muy remoto, en tanto variaciones lentas y modestas del movimiento orbital del planeta han sido las responsables de fluctuaciones climáticas durante el último millón de años. Condiciones glaciares han persistido durante la mayor parte de este periodo interrumpidas aproximadamente cada cien mil años por “eventos” cálidos de unos diez mil años de duración. En la culminación de la última edad glacial -unos veinte mil años atrás- una cubierta de hielo cubría el cono sur de América hasta la región de los Lagos, en tanto algunos miles de años más adelante, el paleo-lago Tauca cubría buena parte del Altiplano sudamericano alimentando cursos de agua en el desierto de Atacama.

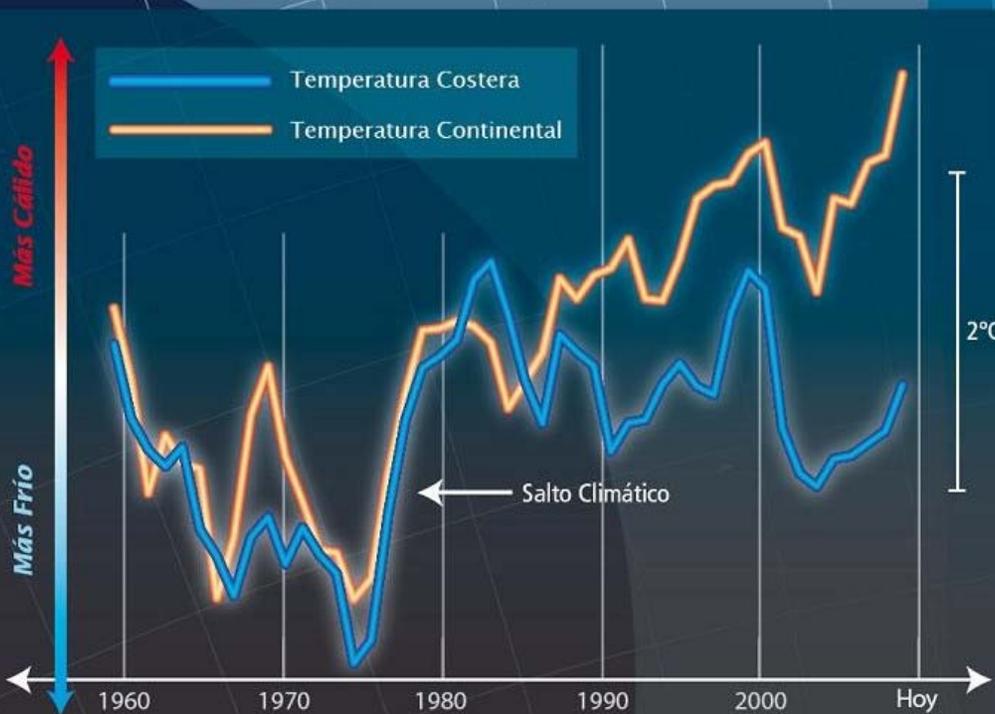
Efecto antropogénico. Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero –capaces de retener parte de la energía que emite nuestro planeta- son en la actualidad un factor capaz de generar cambios climáticos de escala planetaria. Por ejemplo, la actual concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera es la más alta de los últimos ochocientos mil años y en algunas décadas duplicará el promedio preindustrial. Existe consenso en que estas emisiones son responsables del aumento de la temperatura media terrestre cercana a 0.7 grados Celsius desde mediados del siglo pasado. Aunque todavía pequeño en magnitud, el actual incremento de temperatura tiene una rapidez sin precedentes en la historia planetaria y sus proyecciones para las próximas décadas (hasta cinco grados Celsius) modificarán de manera significativa nuestro ambiente.



TEMPERATURAS DISPARES

Mientras la temperatura promedio del planeta se ha incrementado en forma sostenida desde mediados del siglo XX –debido al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera- las observaciones en Chile muestran una mayor variabilidad que refleja la acción de efectos naturales y factores regionales.

Salto climático. El sector sur-este del océano Pacífico y la costa oeste de Sud América experimentaron un abrupto calentamiento a mediados de la década de los '70. Las causas de este "salto climático" no son completamente conocidas, pero la mayoría de las hipótesis lo relacionan con una fluctuación asociada a factores naturales en la forma de un fenómeno similar, pero de mayor escala, que El Niño - Oscilación del sur. El salto de mediados de los '70 se aprecia claramente en la evolución de la temperatura del aire medida en estaciones costeras y sobre el continente, que exhiben un aumento de más de dos grados en este periodo.



Calentamiento continental y enfriamiento oceánico. Desde fines de los '70, la temperatura del océano frente a la costa de Chile y la temperatura del aire sobre Chile continental han seguido una tendencia dispar, representada por el sombreado de colores en este mapa. Mientras la superficie del océano y el aire en contacto con él se ha enfriado más de 0.3°C cada 10 años, el aire sobre la cordillera de los Andes se ha calentado en similar magnitud. Notablemente, el cambio climático global producto del aumento de gases de efecto invernadero explica, al menos parcialmente, tanto el calentamiento continental como el enfriamiento oceánico.

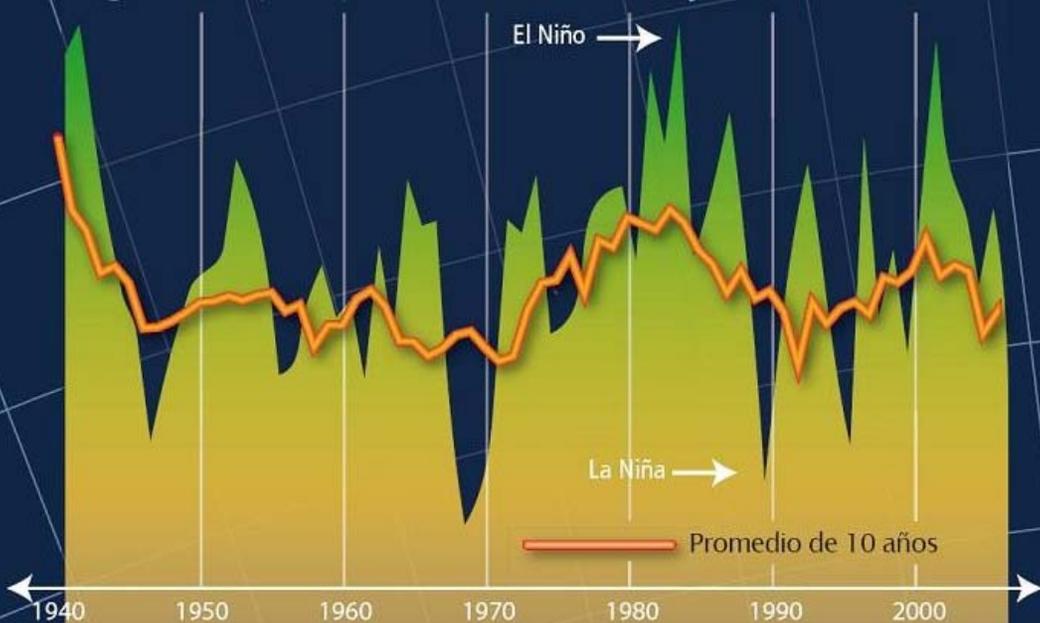
Cambios de temperatura entre 1979 y 2005



LLUVIAS CAMBIANTES

La cantidad de precipitación y su distribución durante el año son rasgos esenciales del clima de una región, los cuales también exhiben variaciones lentas en el tiempo en conexión con cambios en la circulación atmosférica. Las observaciones históricas en Chile permiten distinguir dos regímenes de variabilidad.

Registro de precipitación en el Centro y el Norte



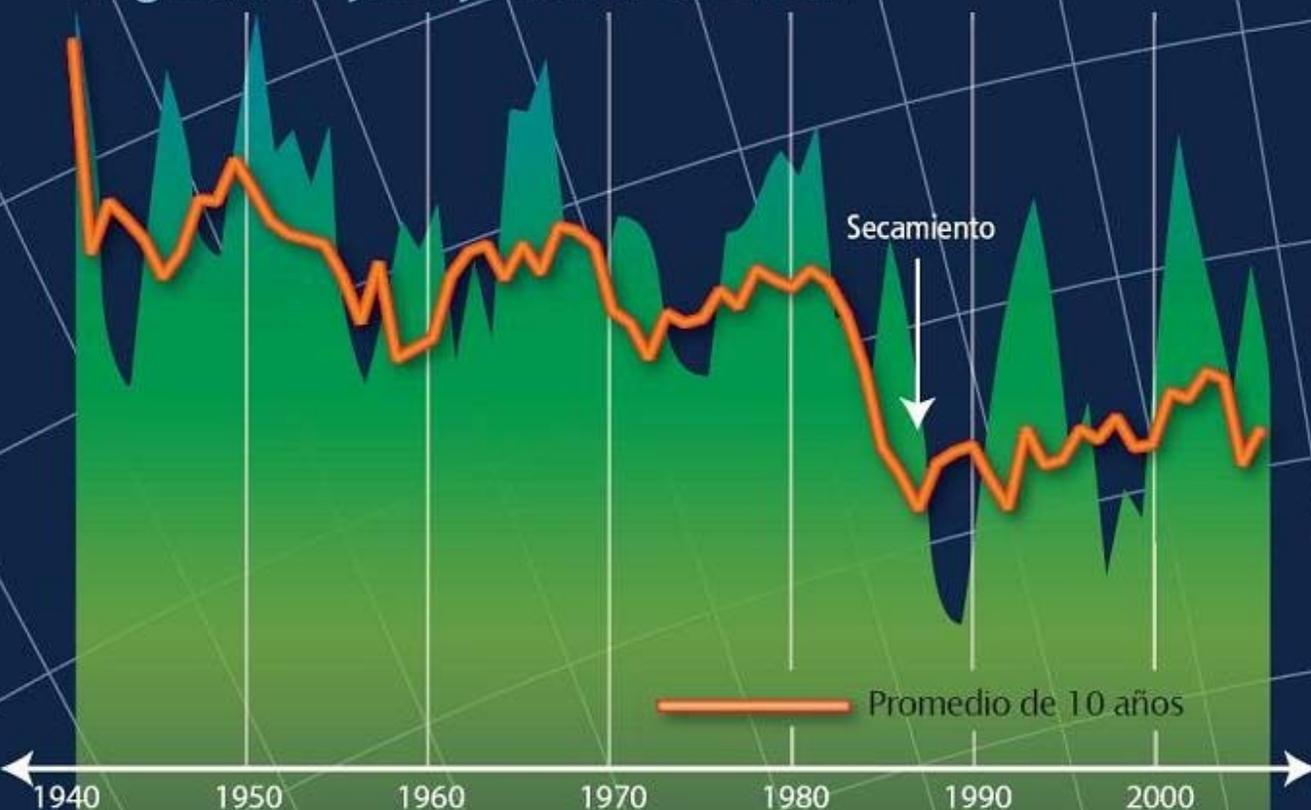
Variabilidad permanente. Las zonas semiárida (Norte Chico) y mediterránea (Chile central) de nuestro país experimentan fluctuaciones muy pronunciadas entre un año y otro, determinadas en buena parte por la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. Durante los años de El Niño, las alteraciones de la circulación atmosférica aumentan la frecuencia de sistemas frontales sobre Chile central y su irrupción hasta el Norte Chico, incrementando las precipitaciones en esta región. Por el contrario, los años de La Niña se asocian a condiciones deficitarias. Al considerar la evolución de las lluvias en los últimos 50 años se observa un leve aumento en el tiempo, pero éste se debe fundamentalmente a un mayor número de eventos de El Niño en los '80 y '90.



EL NORTE CHICO Y EL CENTRO
zona de alta variabilidad pluvial

ZONA SUR
las lluvias han disminuido en las décadas recientes

Registro de precipitación en el Sur

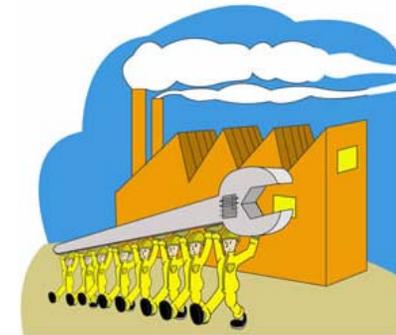


LA PATAGONIA
zona de escasa información

Secamiento en el sur. Las lluvias en esta zona muestran una tendencia a la disminución durante la mayor parte de las últimas 6 décadas, con excepción de una ligera recuperación a partir del año 2000. Por ejemplo, los registros en la zona de Valdivia indican que la precipitación actual es sólo un 70% de su valor hace 50 años. Esta tendencia al secamiento ha ocurrido en conexión con un sostenido debilitamiento del flujo de los oestes al norte de los 40°S y una intensificación más al sur. Parte de esta tendencia del "modo anular del sur" ha sido asociada a factores antropogénicos: disminución del ozono estratosférico y aumento de gases invernadero.

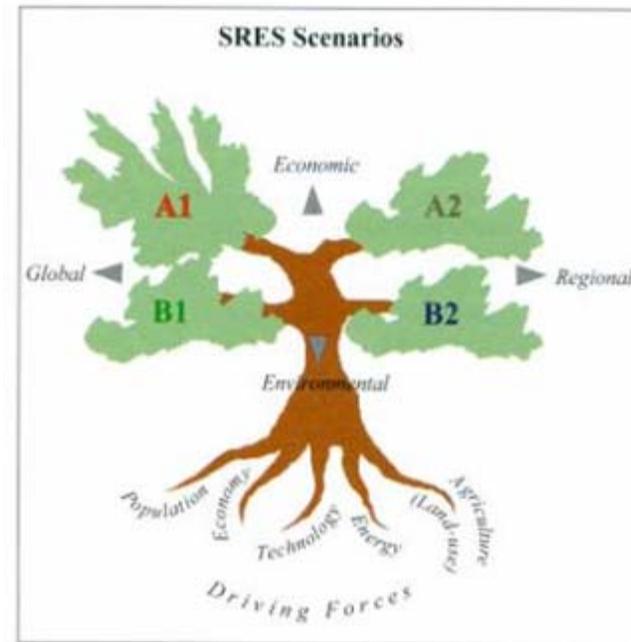
Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI simulación PRECIS

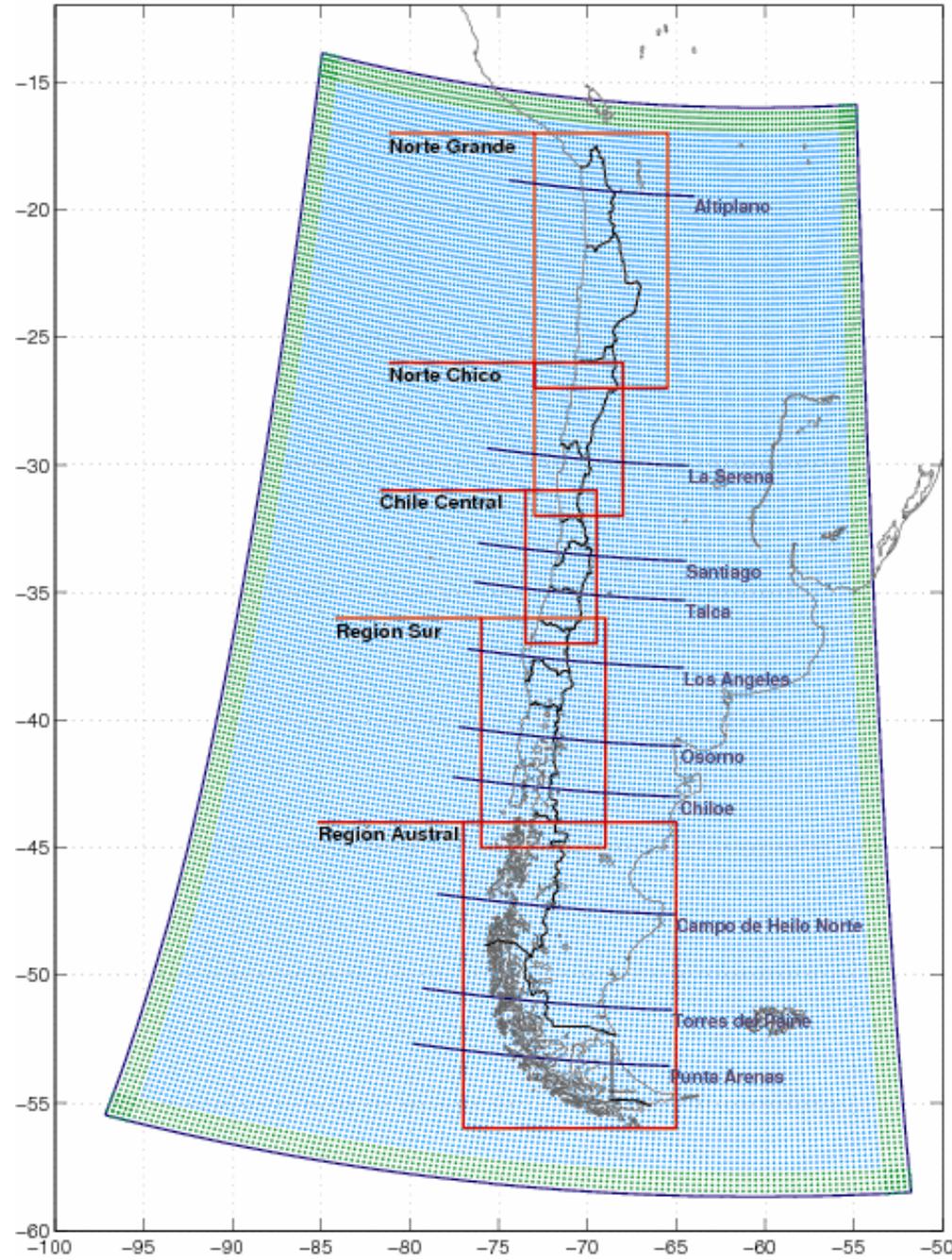
- modelo regional PRECIS (**P**roviding **R**egional **C**limates for **I**mpact **S**tudies, Hadley Center, Oficina Meteorológica del Reino Unido)
- simulaciones globales: modelo atmosférico HadAM3P, derivado del HadCM3 Modelo de Circulación General en que la atmósfera y el océano están acoplados (AOGCM)
 - posee una resolución media de aprox 300x300 km
- 2 escenarios de emisiones:
 - moderado (SRES B2)
 - severo (SRES A2)
- 2 modelamientos regionales
 - período de 30 años de la proyección principal solicitada (2071-2100)
 - modelamiento regional de 30 años para el clima actual (1961-1990)
- estimaciones para dos períodos intermedios (modelo global HadCM3 de baja resolución):
 - 2011-2030
 - 2046-2065.



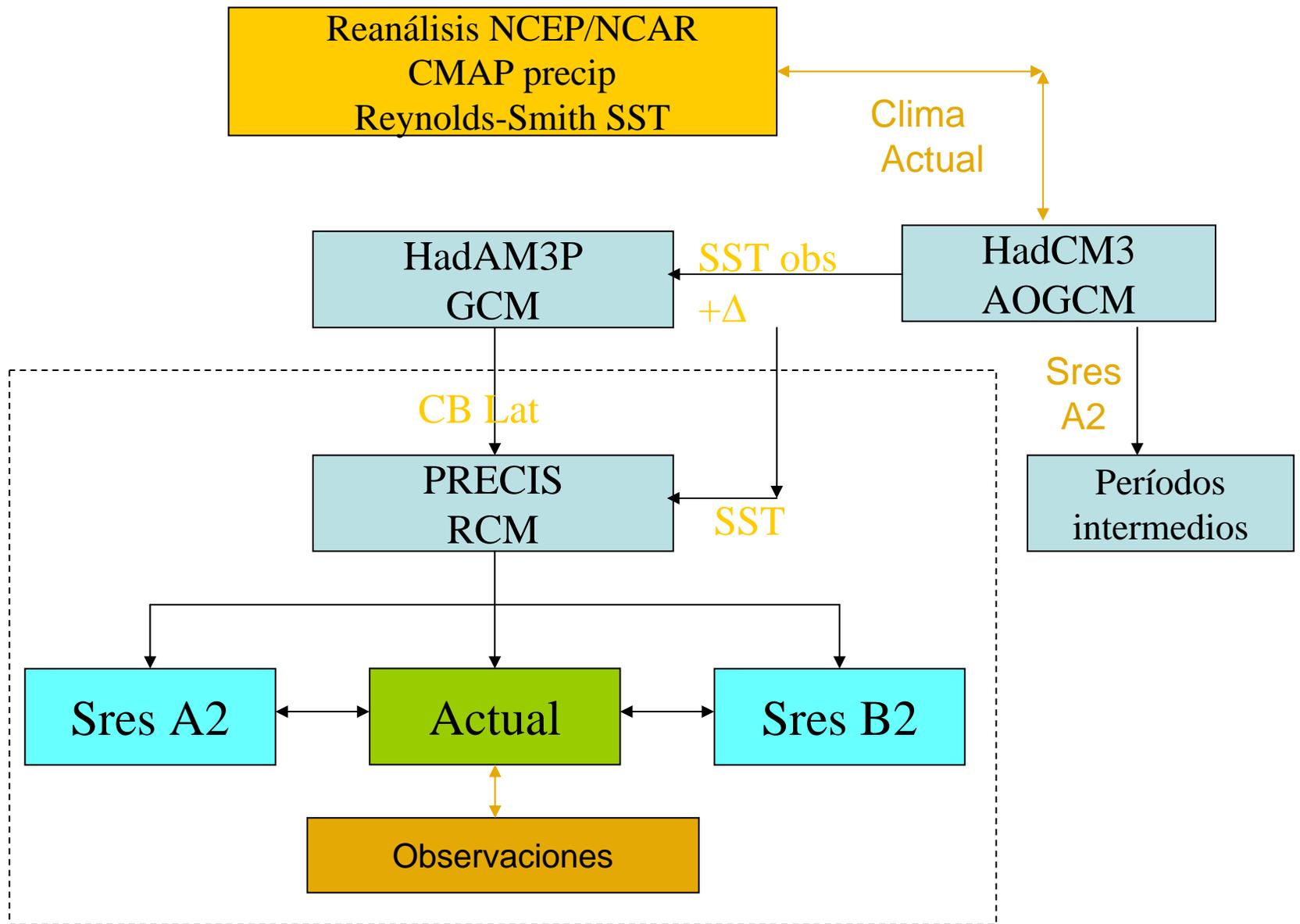
simulación PRECIS, acceder en
<http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/>

- Norte Grande: de 17 a 27° de latitud sur
 - Norte Chico: de 26 a 32° S
 - Chile Central: de 31 a 37° S
 - Región Sur: de 36 a 45° S
 - Región Austral de 44 a 56° S
-
- Los escenarios A2 y B2 se diferencian en tres aspectos socioeconómicos globales:
 - crecimiento demográfico
 - política ambiental
 - equidad social.
-
- aumento población
 - A2: rápido
 - B2: moderado
-
- ambiente y equidad
 - A2: deterioro
 - B2: progreso



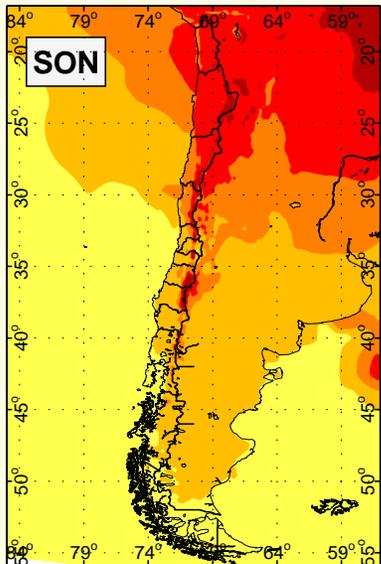
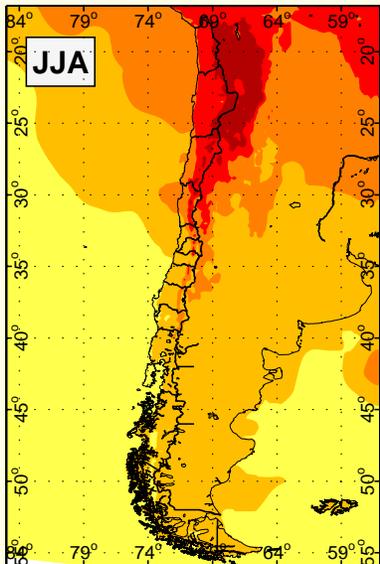
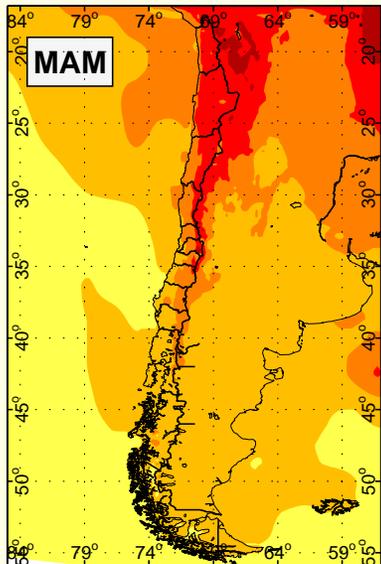
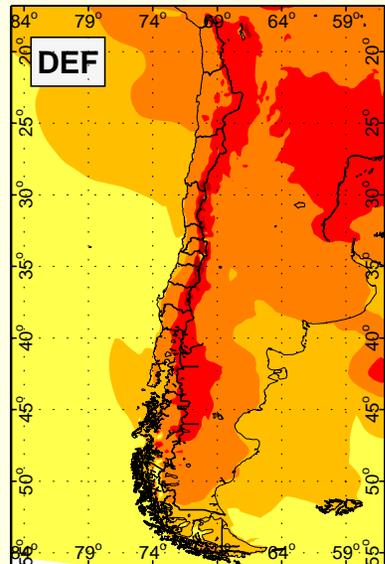


Malla de cálculo

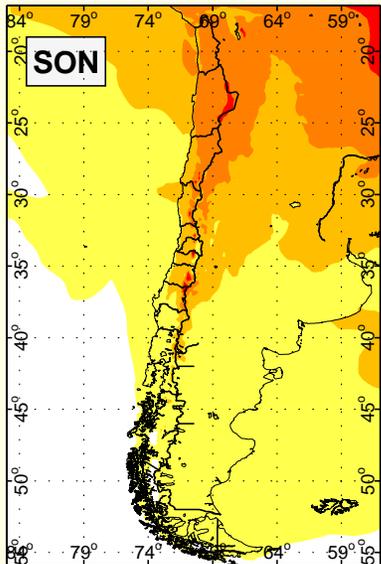
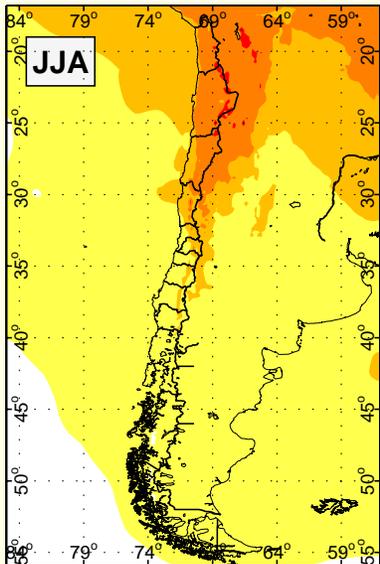
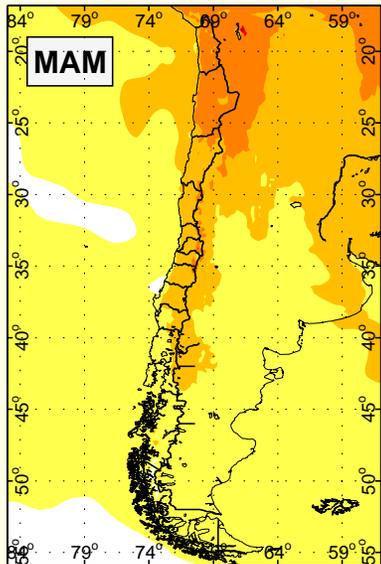
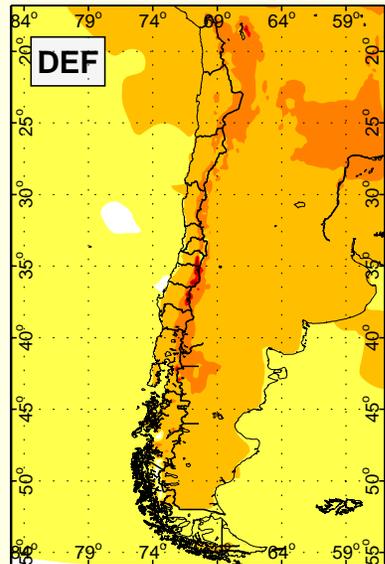


A2 y B2: difieren en población, ambiente y equidad

CAMBIO FUTURO: A2



CAMBIO FUTURO: B2



> 5 4 - 5 3 - 4 2 - 3 1 - 2

Cambio Negativo ($-^{\circ}\text{C}$)



1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 > 5

Cambio Positivo ($^{\circ}\text{C}$)

- calentamiento domina, más pronunciado en A2 (cambio entre 2° y 4°)
 - *En general, el cambio de las temperaturas extremas diarias exhibe un patrón espacial y variación estacional similares a los comentados en relación a los cambios de temperatura media diaria.*
- acentuado hacia regiones andinas y vertiente oriental Andes
- disminuye de N a S
- calentamiento: mayor en verano
 - *En particular, las mayores diferencias (hasta 6°C cuando se considera la diferencia A2-Clima Actual) se concentran sobre la cordillera de la zona norte, mientras que las menores diferencias (siempre positivas) se concentran en la zona austral durante invierno.*

UN CHILE MÁS CÁLIDO

Los modelos climáticos –programas computacionales que representan el comportamiento de la atmósfera– indican un aumento de la temperatura media del planeta entre 3° y 6°C hacia fines de este siglo respecto a la condición actual. El rango proyectado refleja la incertidumbre sobre la concentración de gases con efecto invernadero debido a las emisiones antropogénicas. Adicionalmente, los cambios de temperatura en Chile difieren del promedio global.

Continúa el calentamiento continental. Las proyecciones de cambio climático muestran un importante calentamiento del territorio nacional entre la condición actual y fines del presente siglo. Los mayores incrementos de temperatura (hasta 5°C) tienden a ubicarse sobre la cordillera de los Andes, debido al efecto albedo (pérdida de cobertura nival) y otros factores. El calentamiento persiste durante todo el año, pero su magnitud varía dependiendo de las estaciones: el sector Altiplánico se calienta más en invierno, en tanto los Andes australes se calientan más durante el verano. El incremento de temperaturas ocurrirá durante el día (temperaturas máximas) y la noche (temperaturas mínimas). Este calentamiento continental tendrá un impacto sobre los sectores agrícolas y forestales, entre otros, cuyo sentido (positivo o negativo) y magnitud deben estudiarse en detalle a nivel regional.

PERÚ

Arica

Antofagasta

La Serena

BOLIVIA

NA

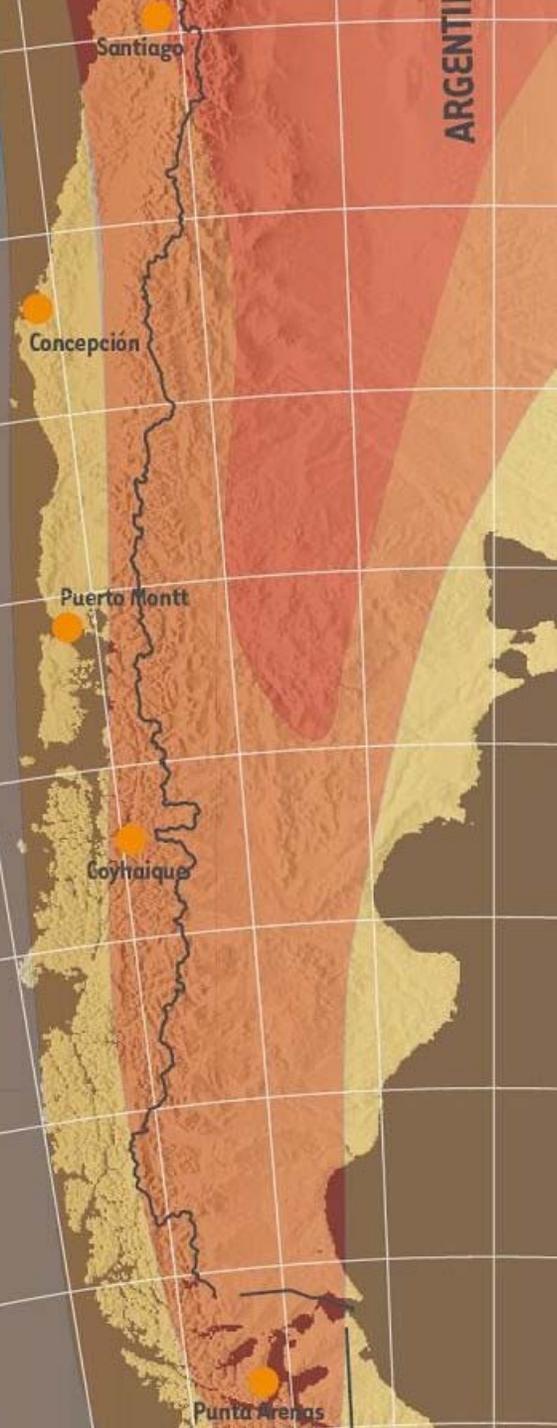
Cambio proyectado de temperatura entre fines del siglo XX y fines del siglo XXI



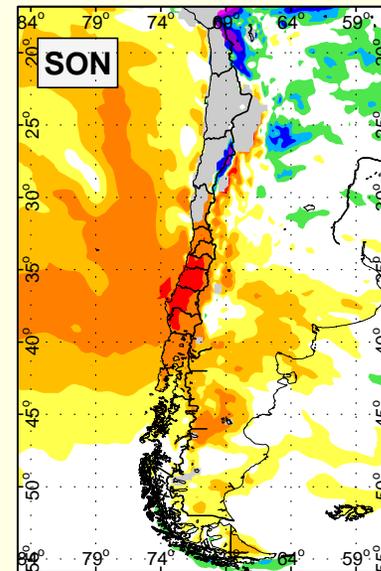
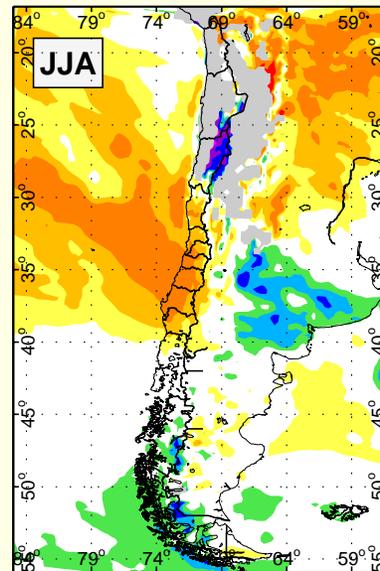
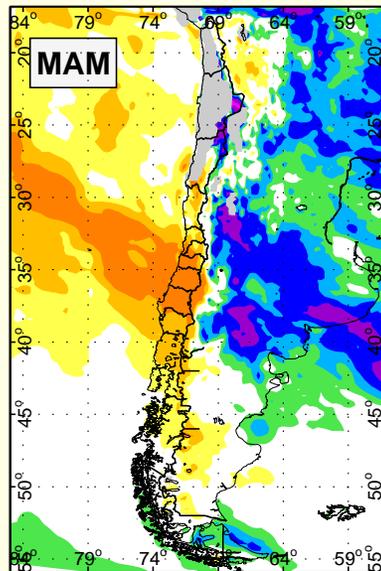
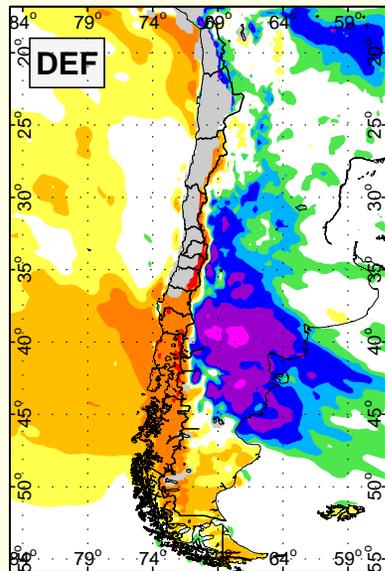
En base del escenario de emisiones más severo (A2)

Vientos del Sur

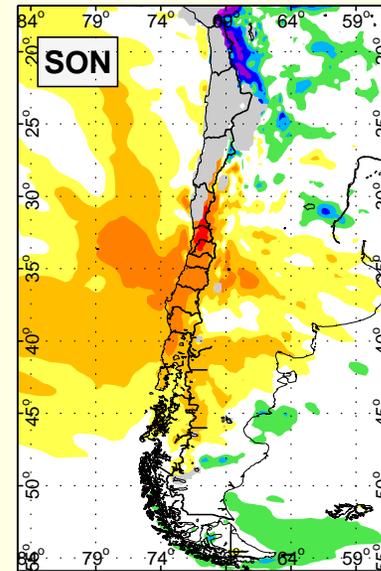
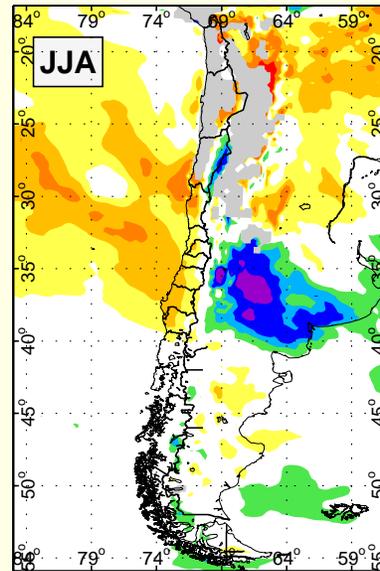
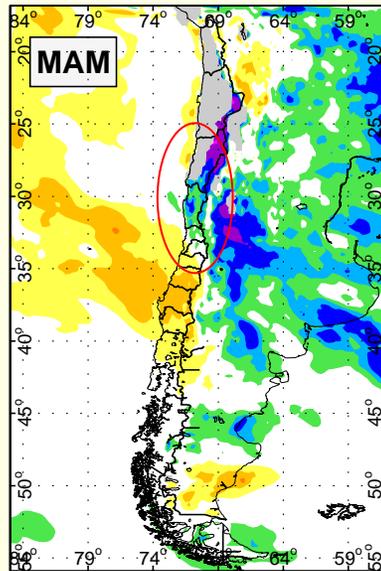
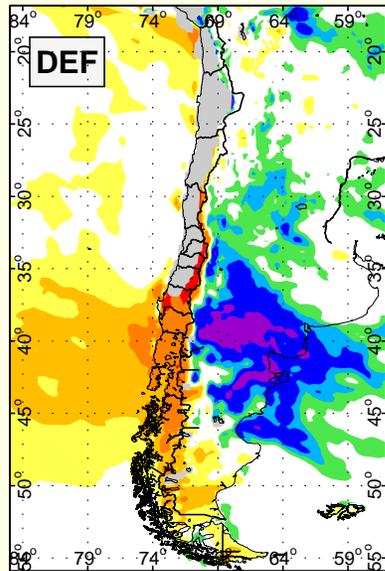
Sorpresas en el mar. El incremento proyectado de temperatura superficial del mar frente a la costa de Chile sólo alcanza 1-2°C, debido a la mayor inercia térmica del océano. Adicionalmente, el cambio climático global producirá una expansión hacia el sur de las altas presiones sobre el Pacífico sur-este, incrementando los vientos del sur que soplan a lo largo de nuestra costa. Estos vientos fuerzan un aumento en el afloramiento de aguas frías (surgencia), contrarrestando el calentamiento superficial. El incremento de los vientos favorables a la surgencia en la costa central y sur de Chile también puede tener importantes impactos en la productividad biológica de nuestro océano.



CAMBIO FUTURO: A2



CAMBIO FUTURO: B2



0 - 25 25 - 50 50 - 70 70 - 80 80 - 90

Menos (% de Actual)



110 - 120 120 - 130 130 - 150 150 - 200 > 200

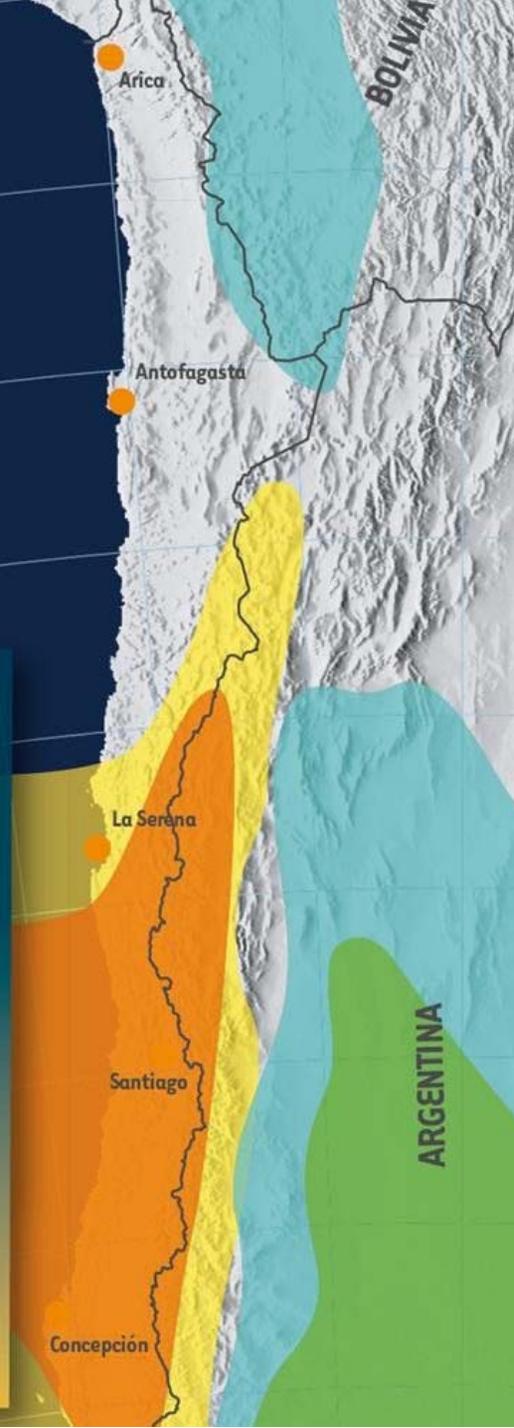
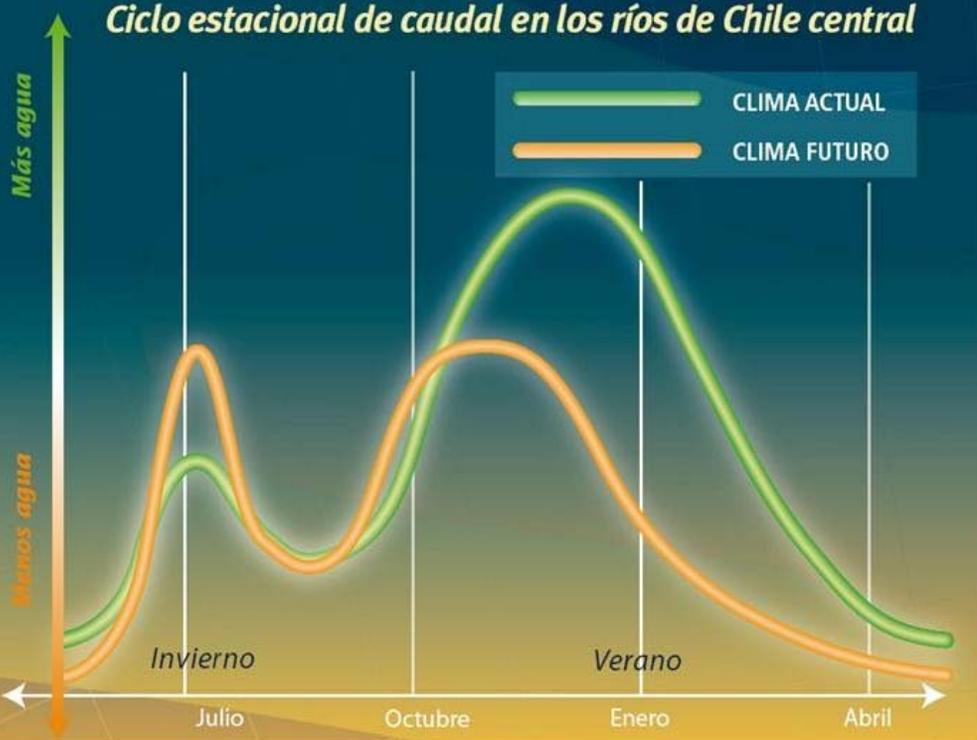
Más (% de Actual)

UN CHILE MÁS SECO

El efecto invernadero antropogénico no sólo producirá un aumento de la temperatura superficial, sino también alteraciones en la circulación atmosférica de escala planetaria y, en consecuencia, cambios en los regímenes de precipitación.

Sequía en el centro-sur. Un rasgo muy consistente entre las diferentes proyecciones del clima de fines del siglo XXI es la expansión hacia el sur de la zona árida que actualmente domina las latitudes subtropicales del océano Pacífico. Esta expansión produce una marcada disminución de las precipitaciones en la zona centro-sur de Chile. Algunos sectores, entre la región de Coquimbo y Aysén, podrían experimentar una reducción de la precipitación anual de hasta un 30% respecto de la condición actual. En contraste, la zona Altiplánica y el extremo austral del país, así como la vertiente argentina de la cordillera de los Andes, verán incrementada su precipitación en los escenarios de cambio climático futuro.

Ciclo estacional de caudal en los ríos de Chile central



Consecuencias hidrológicas. Una disminución de la precipitación sobre el centro-sur de Chile producirá una disminución en el caudal anual de nuestros ríos, pérdida que se verá acentuada por una mayor evaporación en un ambiente más cálido. Un aumento de temperatura también producirá un cambio en la marcha estacional de los caudales, debido a que se acumulará menos nieve durante las tormentas de invierno y a que el deshielo primaveral será más rápido. En consecuencia, junto a una disminución global del recurso hídrico disponible, se prevé un incremento de la fracción del agua que fluye en invierno por los cauces a expensas de los caudales de verano, con importantes consecuencias para los sectores agrícolas y de generación hidroeléctrica.

Cambio proyectado de precipitación entre fines del siglo XX y fines del siglo XXI



En base del escenario de emisiones más severo (A2)

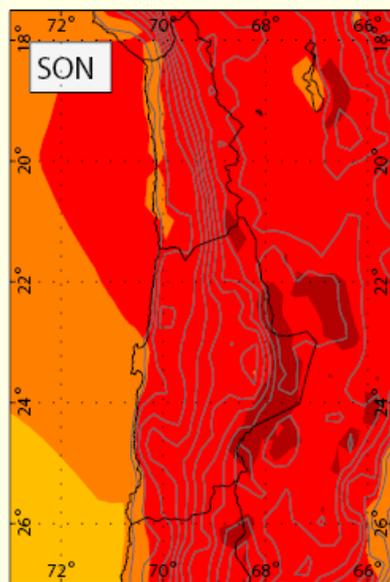
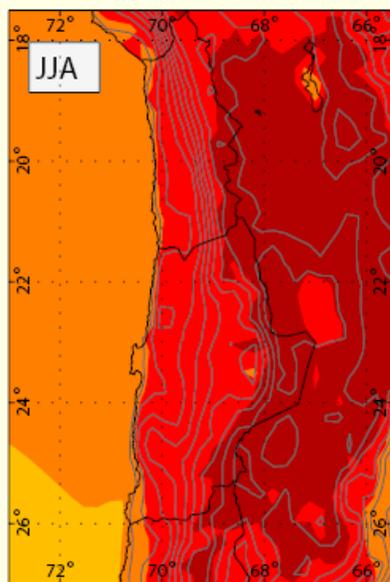
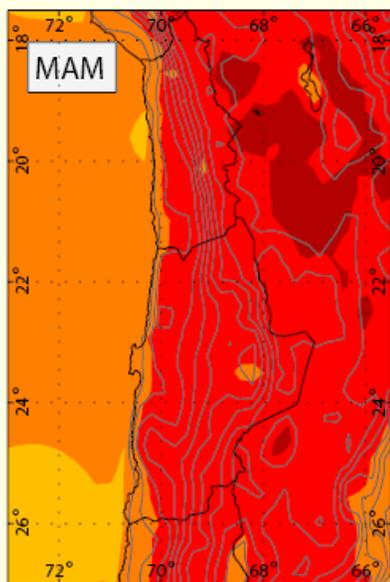
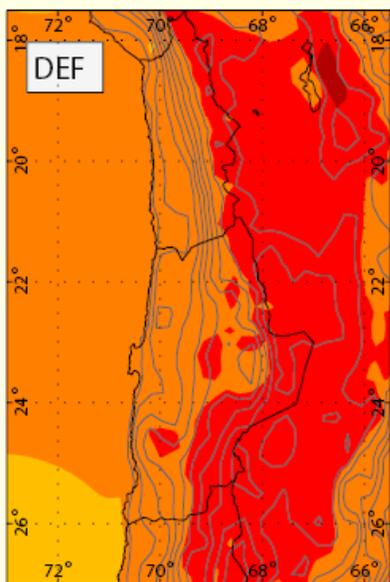


Impactos en el Norte Grande

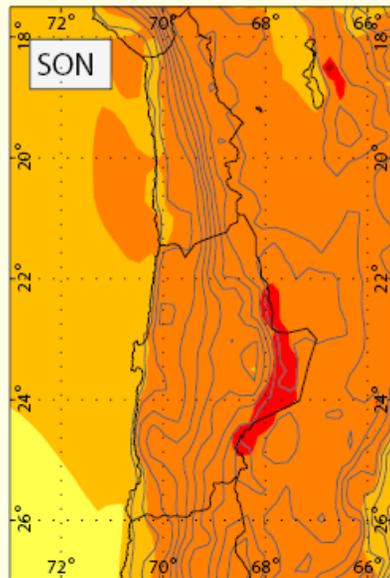
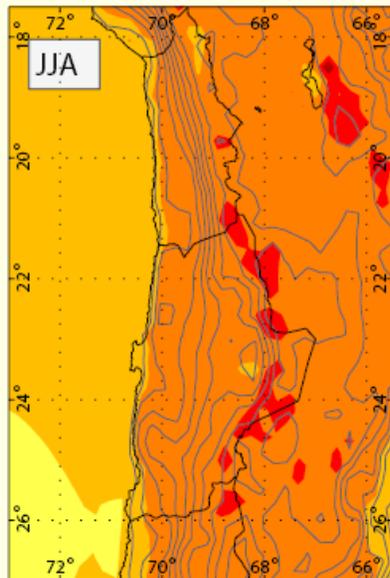
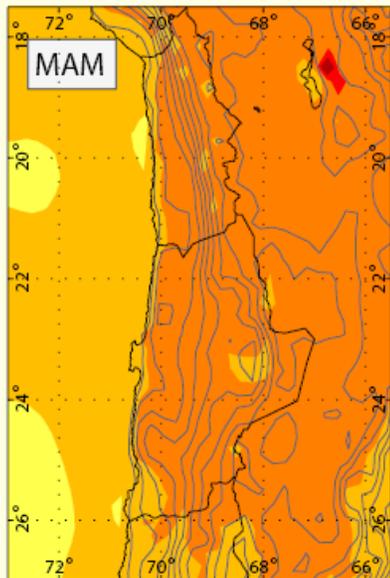
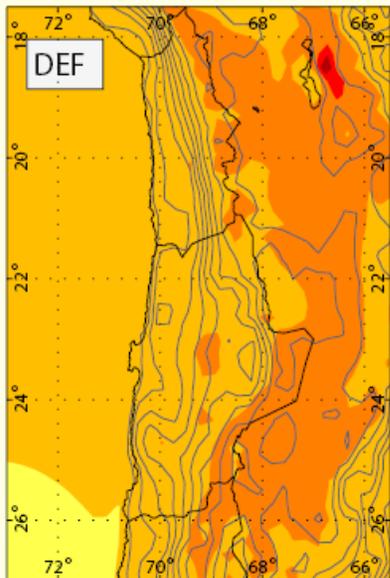
A world map with a color gradient from red at the top to yellow at the bottom. Isotherm zero lines are shown as black contour lines, generally following a latitudinal path. Precipitation patterns are indicated by blue vertical bars of varying heights, with higher values in the tropics and lower values in the mid-latitudes.

- Elevación de isoterma cero
 - Acumulación nival
 - Ecosistemas de altura
- Precipitaciones estivales
 - Variación sugerida
 - Problemas en verificación

CAMBIO FUTURO: A2



CAMBIO FUTURO: B2



>5 4-5 3-4 2-3 1-2

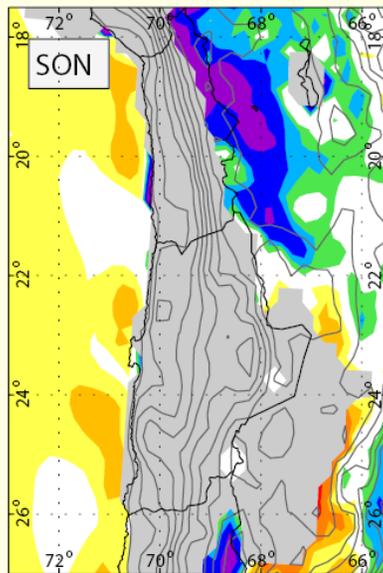
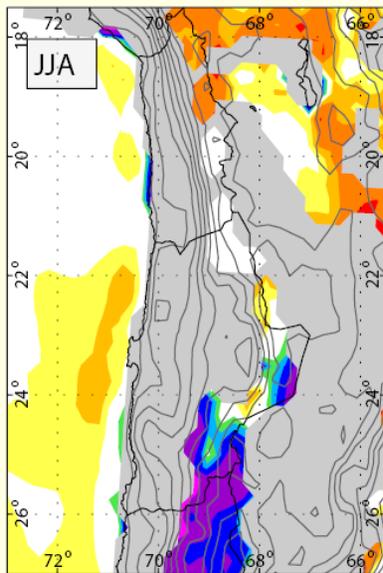
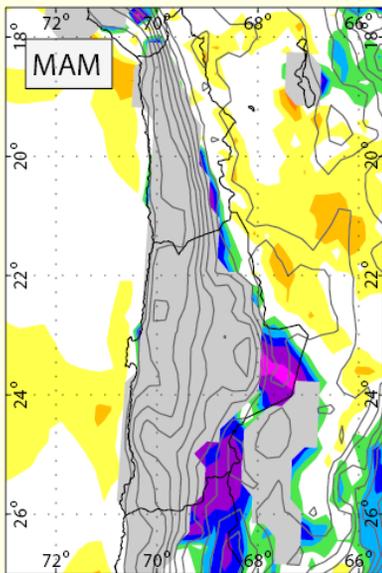
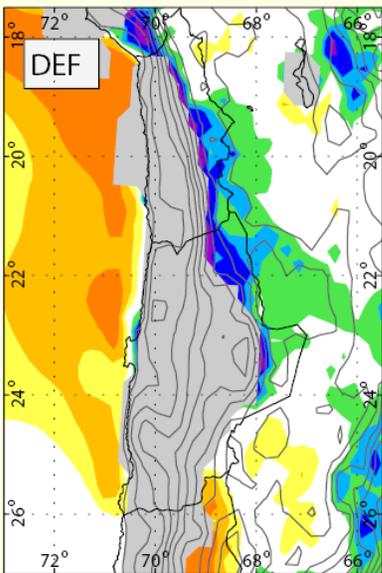
Cambio Negativo (- °C)



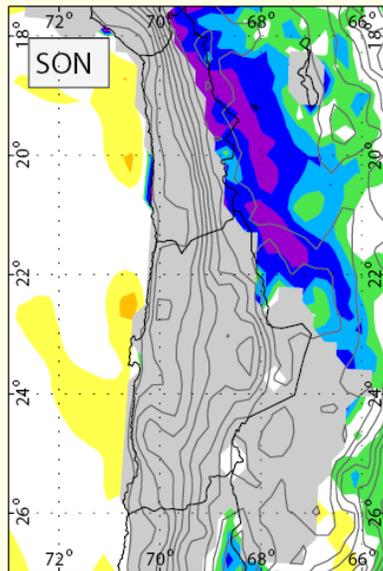
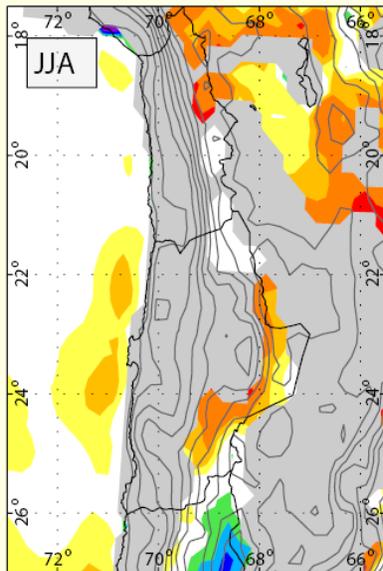
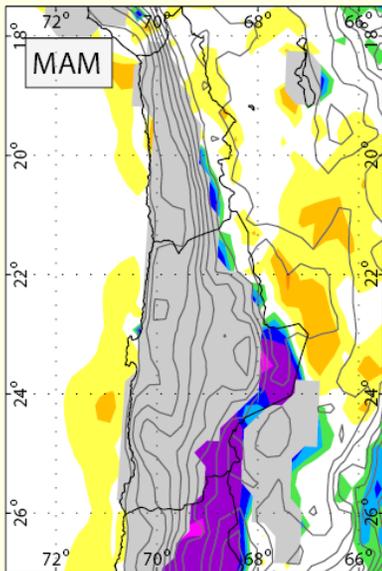
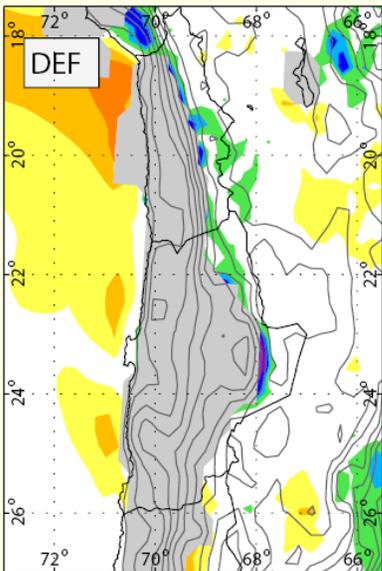
1-2 2-3 3-4 4-5 >5

Cambio Positivo (°C)

CAMBIO FUTURO: A2



CAMBIO FUTURO: B2



0-25 25-50 50-70 70-80 80-90

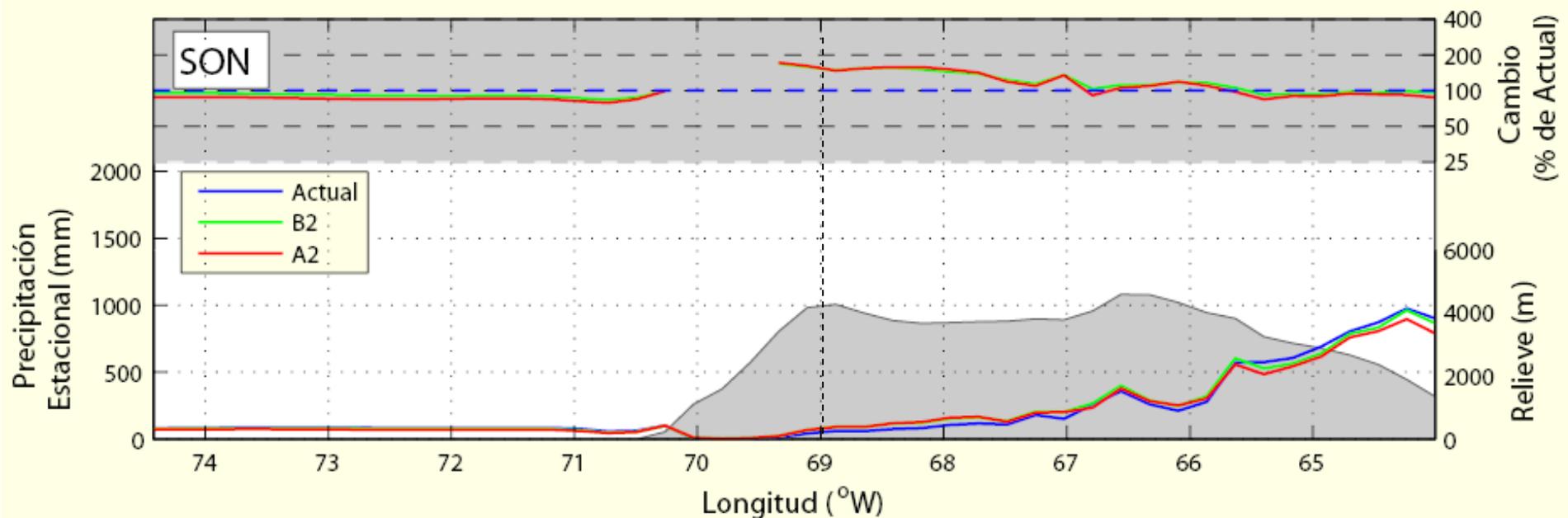
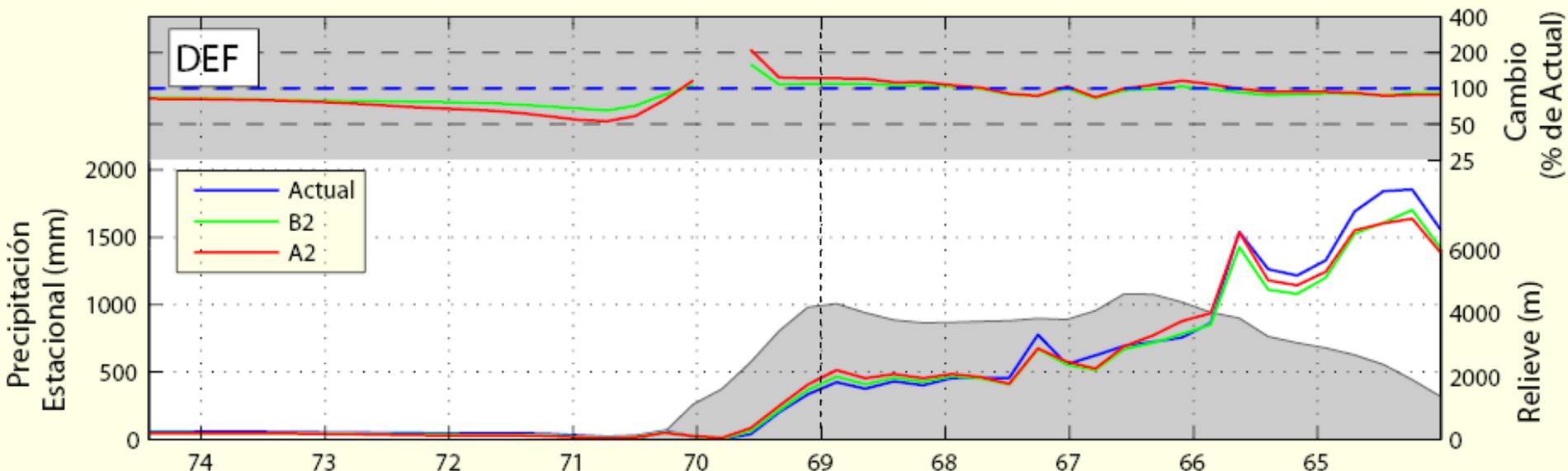
Menos (% de Actual)



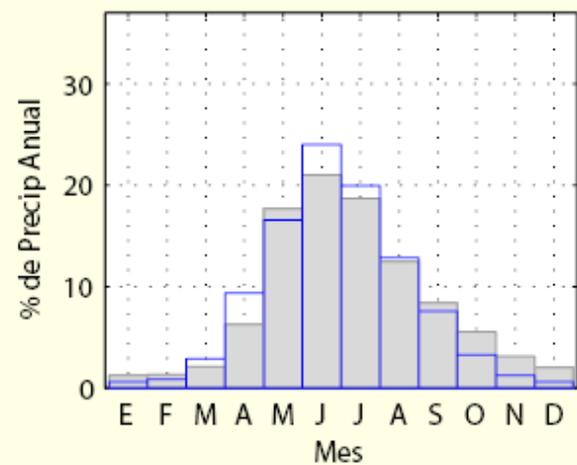
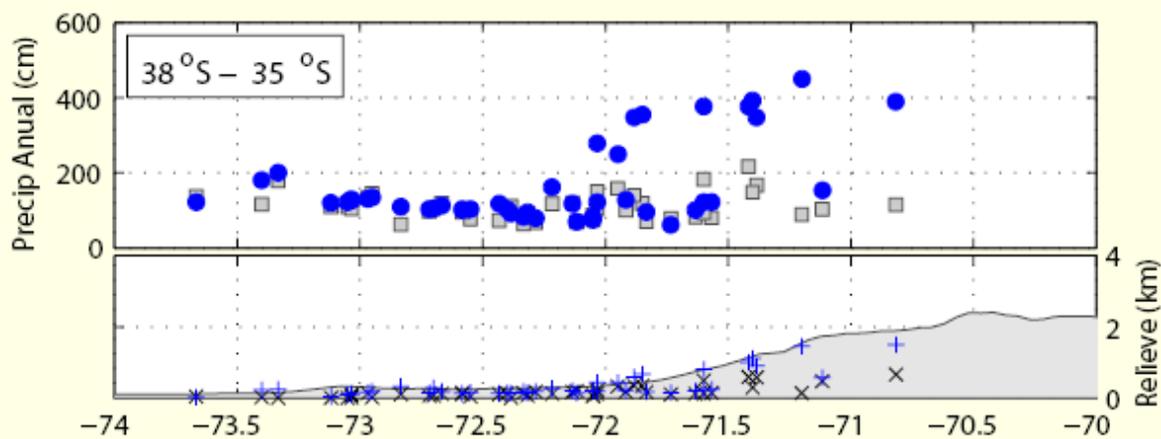
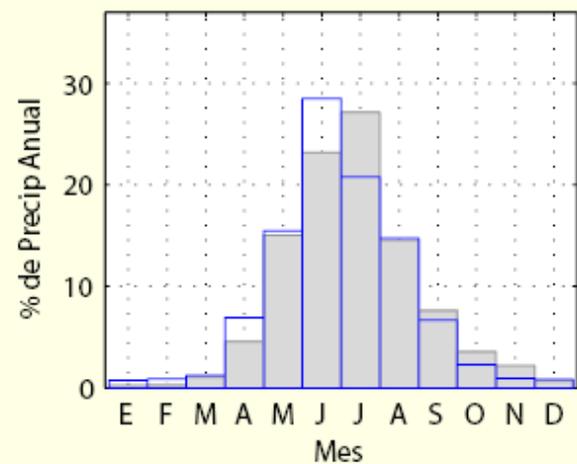
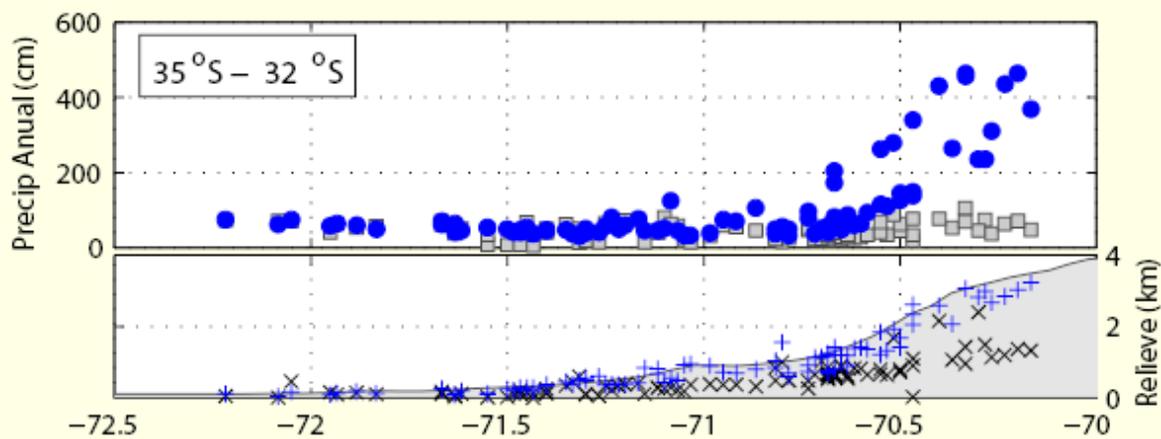
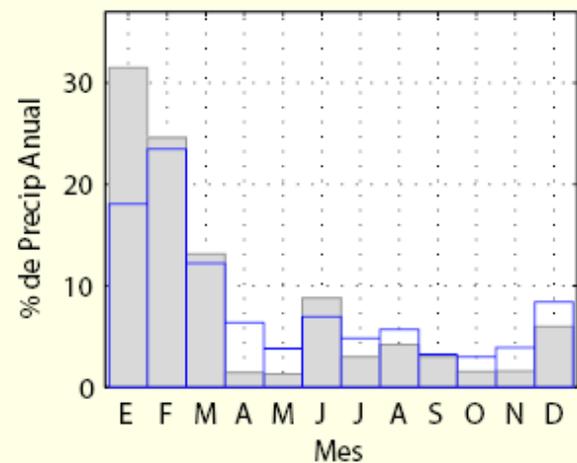
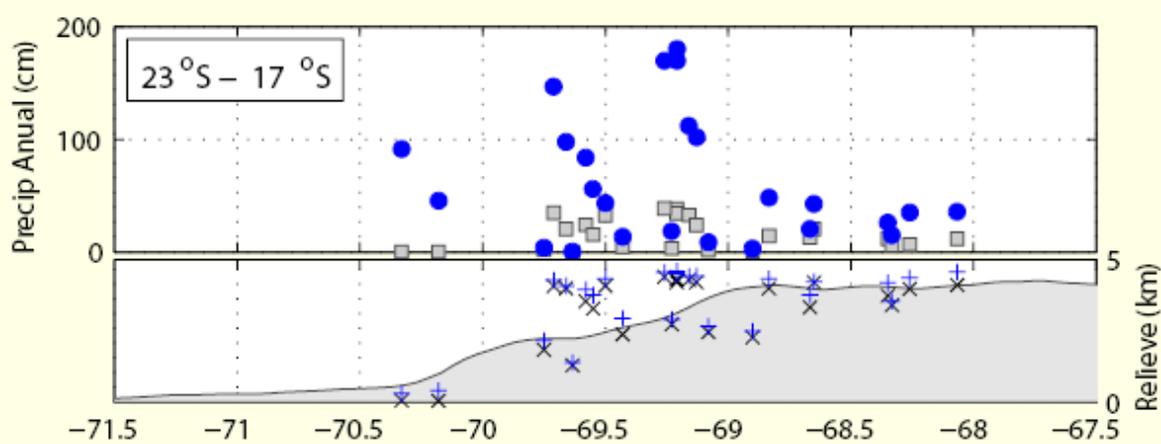
110-120 120-130 130-150 150-200 >200

Más (% de Actual)

CORTE ZONAL PARA ALTIPLANO (19.2S)

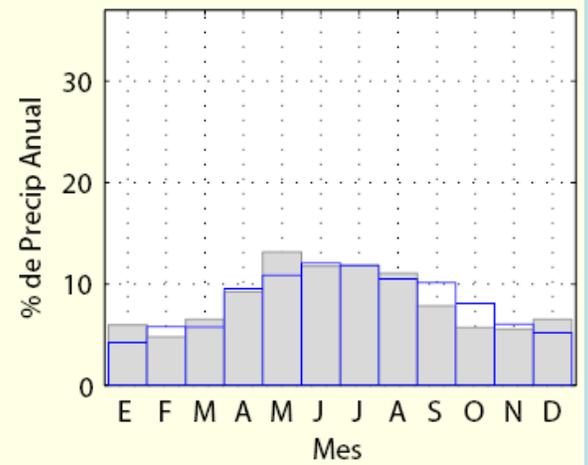
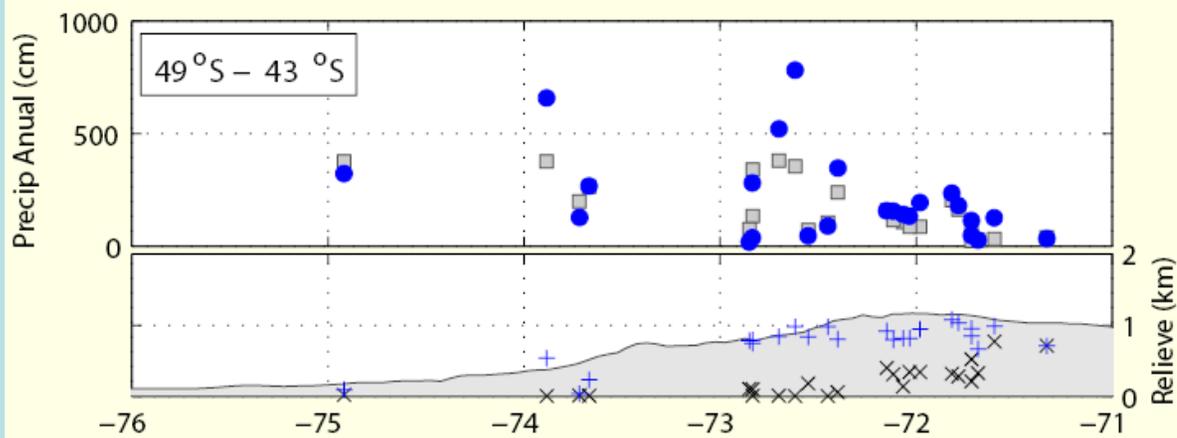
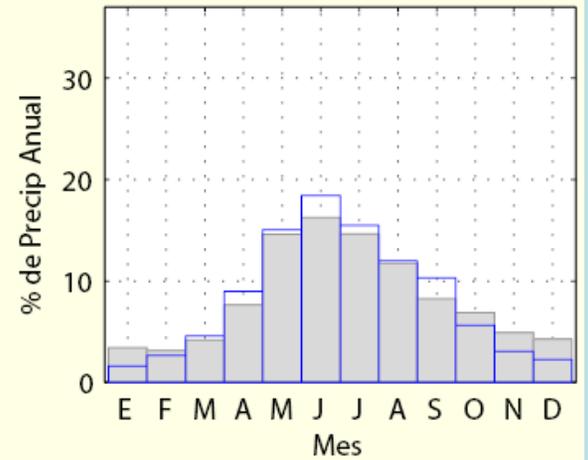
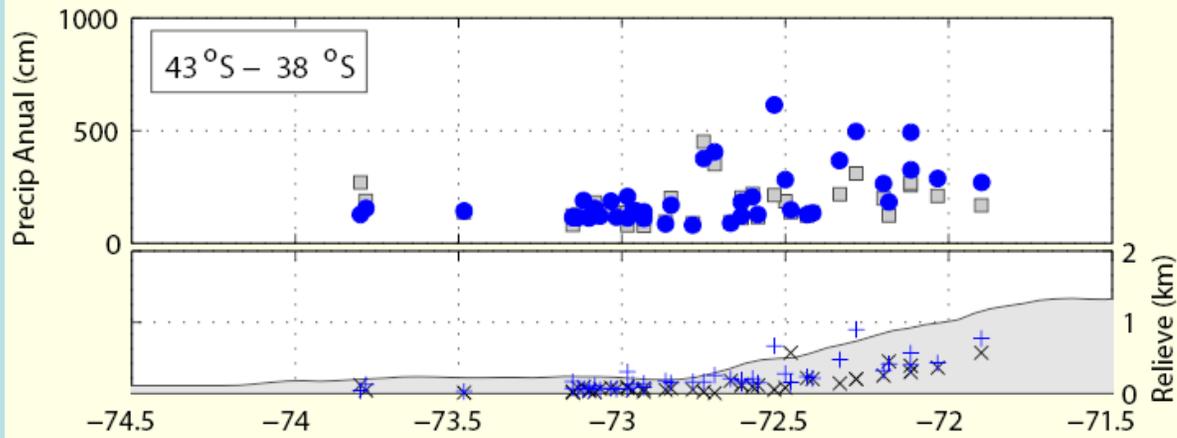
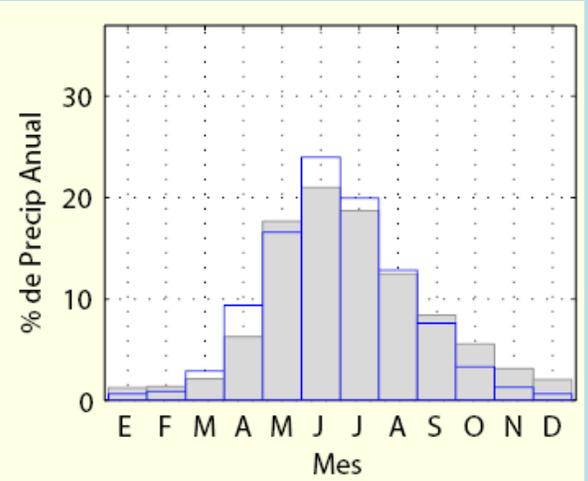
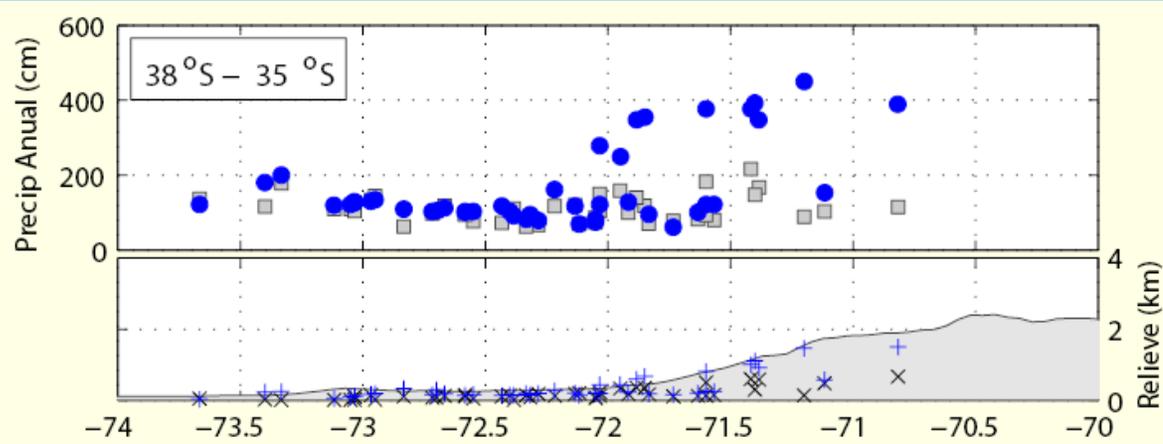


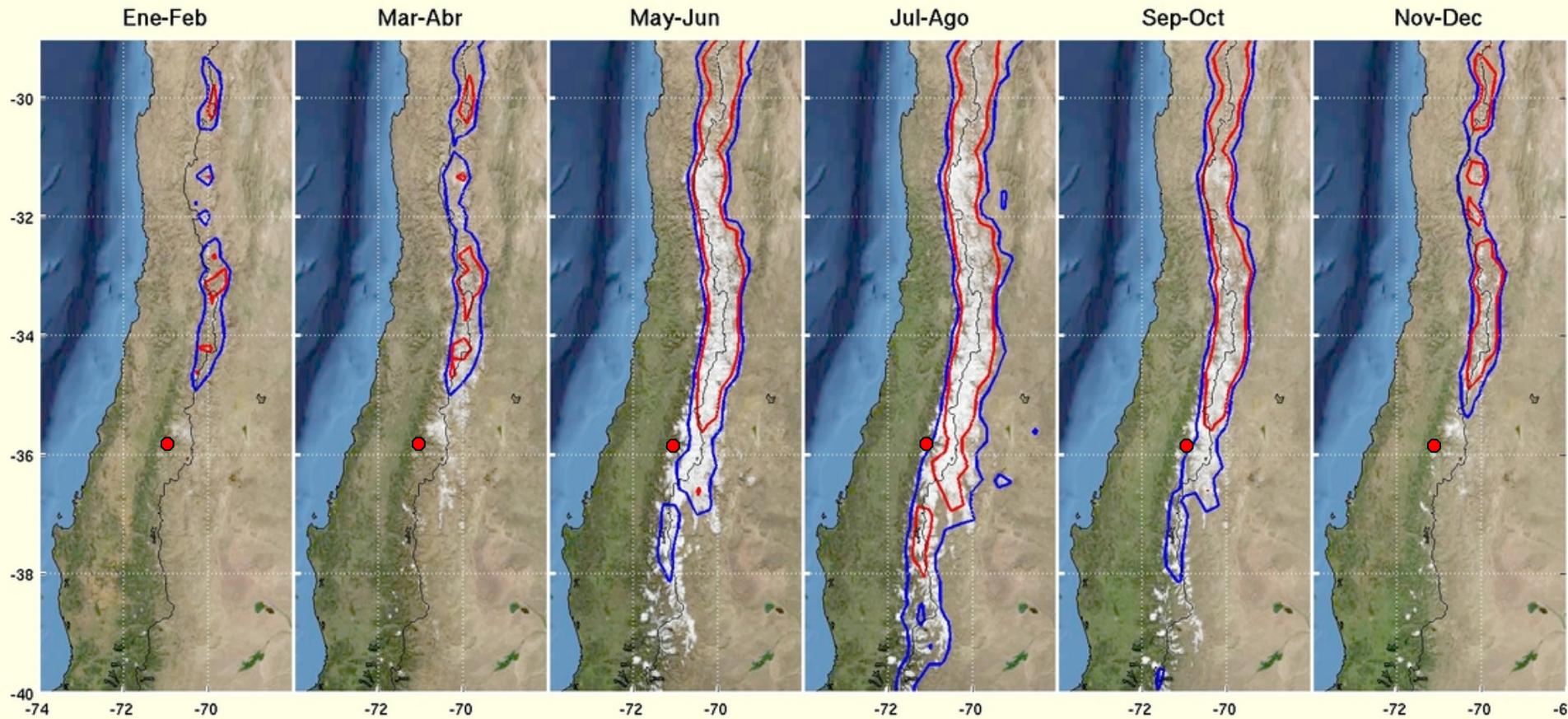
Longitud (°W)



CLASE 8: Impactos en Región Centro-Sur

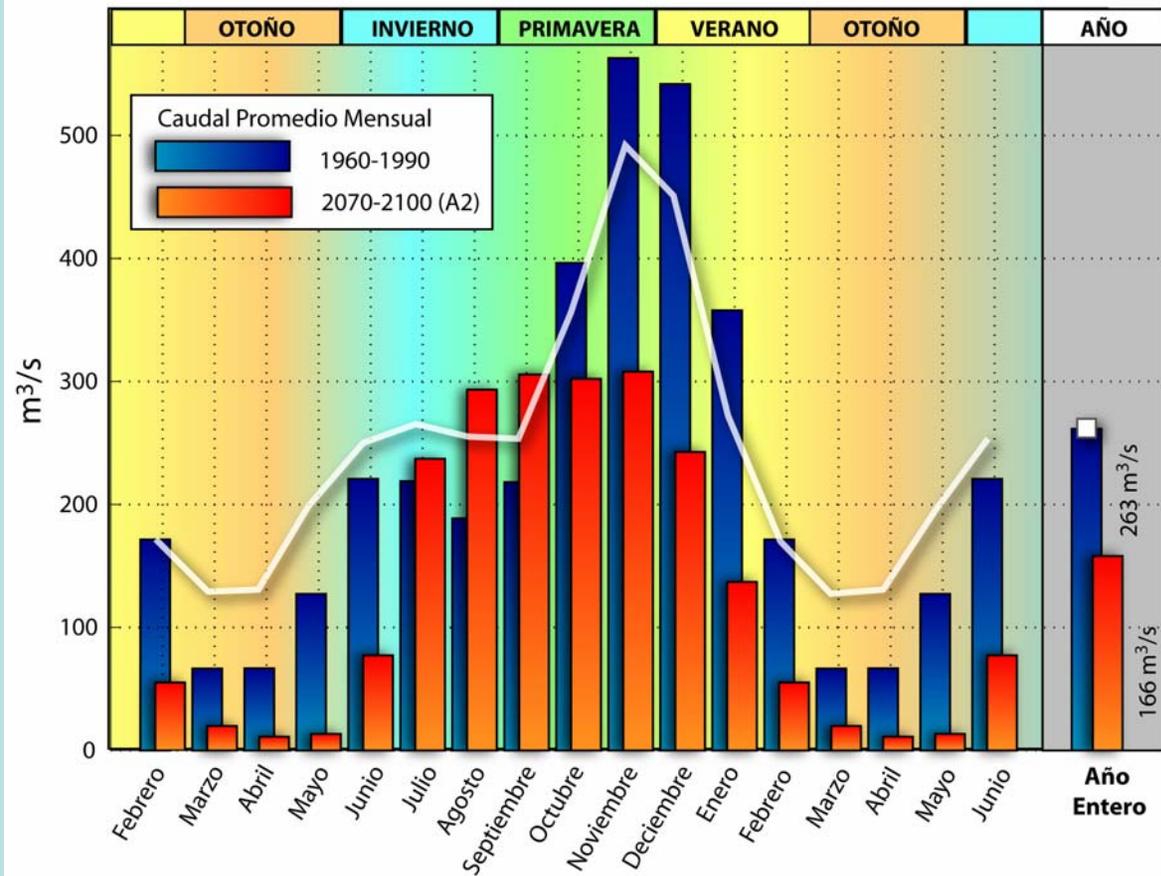
- Regimen hidrológico de ríos pluvio-nivales
 - Isotherma cero
 - Acumulación nival
- Recurso pesquero
 - Surgencia costera
- Recurso forestal
 - Incendios forestales





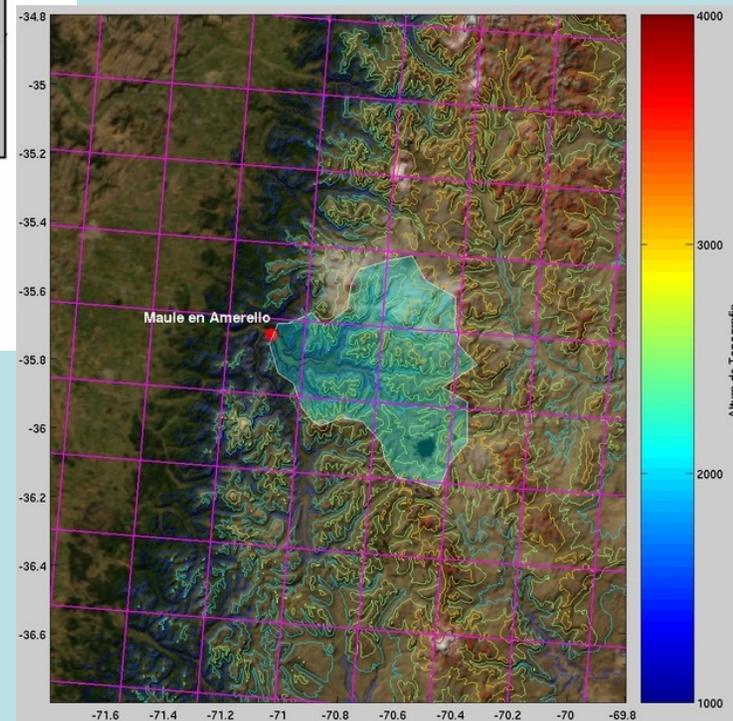
Posición bimestral de la isoterma 0°C en el clima actual (línea azul) y bajo el escenario A2 a fines del siglo XXI (línea roja) . El punto rojo señala la posición de la estación de aforo del Río Maule en Armerillo.

CAUDAL SIMULADO DEL RIO MAULE* - PRESENTE y FUTURO (A2)

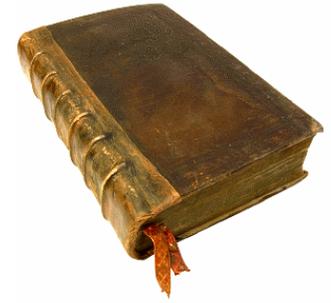


* Rio Maule en Armerillo - Pre-Cordillera

El caudal medio anual decrece en un 37% y el hidrograma estacional se modifica por pérdida del máximo estival, disminución de caudal otoñal y máximo de Julio a Diciembre



bibliografía principal



Fuenzalida, H., M. Falvey, M. Rojas, P. Aceituno, R. Garreaud,
2006: Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo
XXI. informe para CONAMA

http://www.dgf.uchile.cl/ACT19/COMUNICACIONES/OtrosTextos/articles-39442_pdf_Estudio_texto.pdf

Garreaud et al., 2009: El clima de Chile está cambiando. Folleto
de divulgación.

<http://www.dgf.uchile.cl/ACT19/html/avances.html>