

## Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones





## **RESÚMEN EJECUTIVO**

### **RESÚMEN PARA TOMADORES DE DECISIONES**

|   |                 |
|---|-----------------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>  | <b>pág. 1</b>   |
| <b>2. CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS</b>   | <b>pág.5</b>    |
| <b>3. LA PROYECCIÓN DEL CLIMA EN ARGENTINA PARA EL SIGLO XXI</b>  | <b>pág. 23</b>  |
| <b>4. BASE DE DATOS</b>   | <b>pág. 68</b>  |
| <b>5. CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN HÚMEDA</b>  | <b>pág. 85</b>  |
| <b>6. CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN CENTRO</b>  | <b>pág. 150</b> |
| <b>7. CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN ANDES</b>   | <b>pág. 214</b> |
| <b>8. CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN PATAGONIA, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLÁNTICO SUR</b>                | <b>pág. 282</b> |
| <b>ANEXO I. UN INDICADOR ÚNICO PARA ESTABLECER UN RANKING ENTRE MODELOS CLIMÁTICOS</b>                  |                 |
| <b>ANEXO II. VALIDACIÓN DE EXTREMOS EN LOS MODELOS GLOBALES DEL CMIP5</b>                               |                 |
| <b>ANEXO III. LISTADO DE RECURSOS DE LA BASE DE DATOS</b>   |                 |
| <b>ANEXO IV. ARQUITECTURA DE LA BASE DE DATOS: DIAGRAMA ENTIDAD-RELACIÓN. DESCRIPCION DE LAS TABLAS</b> |                 |
| <b>ANEXO V. METADA PARA LOS RECURSOS DE LA BASE DE DATOS</b>  |                 |
| <b>ANEXO VI. DOCUMENTOS EXPLICATIVOS DE LA BASE DE DATOS</b>  |                 |





**TABLA I: EQUIPO DE TRABAJO**

| <b>Nombre y apellido</b>   | <b>Función</b>               |
|----------------------------|------------------------------|
| Vicente Barros             | Coordinador                  |
| Carolina Vera              | Coordinadora                 |
| Eduardo Agosta             | Experto climatólogo          |
| Diego Araneo               | Experto climatólogo          |
| Inés Camilloni             | Experta climatólogo          |
| Andrea Carril              | Experta climatólogo          |
| Moirá Doyle                | Experta climatólogo          |
| Oscar Frumento             | Experto climatólogo          |
| Mario Nuñez                | Experto climatólogo          |
| María Inés Ortiz de Zárate | Experta analista de sistemas |
| Olga Penalba,              | Experta climatólogo          |
| Matilde Rusticucci         | Experta climatólogo          |
| Celeste Saulo              | Experta climatólogo          |
| Silvina Solman             | Experta climatólogo          |



## **RESUMEN EJECUTIVO**

|   |         |
|---|---------|
| <b>1. OBJETIVOS</b>   | pág. 2  |
| <b>2. REGIONALIZACIÓN</b>   | pág. 2  |
| <b>3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME</b>  | pág. 2  |
| <b>4. DATOS</b>   | pág. 2  |
| <b>5. ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS</b>                                  | pág. 3  |
| <b>6. CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS</b>                                   | pág. 3  |
| <b>7. PROYECCIONES DEL CLIMA PARA EL SIGLO XXI</b>                        | pág. 7  |
| 7.1 Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI                 | pág. 8  |
| 7.2 Disponibilidad de escenarios climáticos                               | pág. 8  |
| 7.3 Métricas para la validación de los modelos climáticos                 | pág. 8  |
| 7.4 Proceso de validación   | pág. 9  |
| 7.5 Selección de modelos para el desarrollo de escenarios                 | pág. 9  |
| 7.6 Corrección de los errores sistemáticos de los modelos                 | pág. 10 |
| 7.7 Validación del método de corrección de errores sistemáticos           | pág. 10 |
| 7.8 Escenarios del clima futuro (Siglo XXI)                               | pág. 10 |
| <b>8. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS<br/>ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b> | pág. 13 |
| <b>9. CONCLUSIONES</b>  | pág. 14 |
| <b>10. BASE DE DATOS</b>  | pág. 16 |
| <b>Referencias</b>  | pág. 17 |

## RESUMEN EJECUTIVO

### 1. OBJETIVOS

El primer objetivo de este informe del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) al Proyecto Tercera Comunicación Nacional a la CMNUCC de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) en el marco de los estudios de base para la tercera Comunicación Nacional es presentar una evaluación de las tendencias del clima del pasado reciente (desde la segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) de la Argentina.

El otro objetivo es presentar la documentación, incluyendo la interfaz web y los metadatos, que permita hacer accesible por Internet la base de datos con información relevante para los estudios de impacto del cambio climático, tanto del clima observado como del proyectado, desarrollada para este Proyecto por el CIMA.

### 2. REGIONALIZACIÓN

Para facilitar la lectura del informe por parte de técnicos y decisores políticos, el informe incluye 4 capítulos (5 a 8) con información detallada de 4 regiones. La selección de las regiones se hizo de modo que cada provincia quede dentro de una sola región. Las 4 regiones son, Figura RE1.1:

**Húmeda:** Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires (Capítulo 5).

**Centro:** La Pampa, San Luis, Córdoba, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa (Capítulo 6).

**Andina:** Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Salta y Jujuy (Capítulo 7).

**Patagonia:** Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz, Tierra del Fuego y Antártida e Islas del Atlántico Sur (Capítulo 8).



**Figura RE1.1:** Regiones consideradas: Húmeda (1), Centro (2), Andes (3) y Patagonia, Antártida e Islas del Atlántico Sur (4)



### **3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

El capítulo 1 es introductorio y el segundo sintetiza las tendencias del clima observado a nivel nacional, cuyo mayor detalle se desarrolla en los capítulos regionales. El capítulo 3 trata sobre las proyecciones del clima para el resto del siglo XXI, describiendo la metodología basada en modelos climáticos, sus limitaciones y las técnicas para mejorar sus proyecciones. Los escenarios que se presentan en los capítulos regionales son los de temperatura y precipitación para dos horizontes temporales: el del futuro cercano, 2015-2039 y de fin de siglo, 2075-2099. El capítulo 4 describe la Base de Datos y los elementos necesarios para su utilización, su arquitectura y el formato de los datos.

### **4. DATOS**

Los datos utilizados son promedios o totales mensuales de bases internacionales que se han basado en los datos del Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos han pasado un doble proceso de consistencia, primero por este organismo y luego en la elaboración de las bases. Para los campos medios observados de las temperaturas (media, mínima y máxima) y de la precipitación, así como para la validación de los modelos climáticos se utilizó la base CRU 3.20 ([http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_\\_dataent\\_1256223773328276](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276)). Los índices de extremos de datos observados se tomaron del conjunto CLIMDEX (Donat et al. 2013).

### **5. ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS**

De los 27 índices de extremos climáticos del conjunto CLIMDEX, se eligieron 11 índices de extremos climáticos por su relevancia para potenciales estudios de impacto y por su disponibilidad, ya que no todos pudieron ser calculados para la Argentina en el periodo 1960-2010 por falta de datos. Estos mismos índices fueron calculados de las simulaciones de los modelos climáticos utilizados para las proyecciones del clima de Argentina del siglo XXI.

Los índices de extremos elegidos relacionados con la temperatura fueron el número de días con heladas, el número de noches tropicales, el máximo anual de la temperatura diaria máxima, el mínimo anual de la temperatura diaria mínima, el porcentaje anual de días con temperatura máxima extrema y la duración de olas de calor. Los índices extremos relacionados con la precipitación que fueron usados son la precipitación diaria máxima del año, la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos, la máxima longitud de racha seca del año, la precipitación anual total de los casos con precipitación diaria extrema y el número de días en que la precipitación supera ciertos umbrales. Los detalles sobre la definición de estos índices, así como de su relevancia, se encuentran en la sección 2.1.3 del capítulo 2.

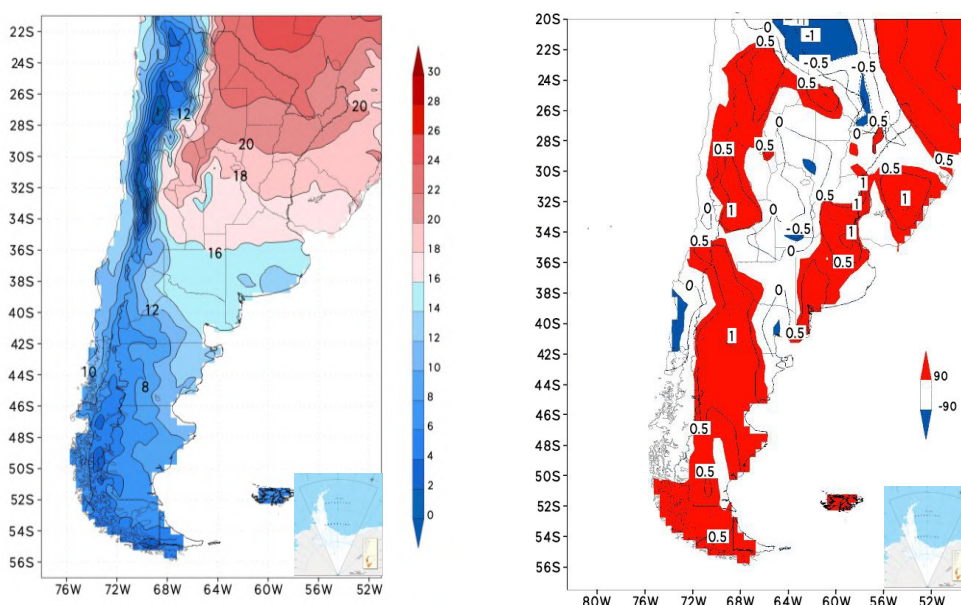
### **6. CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS**

Las conclusiones sobre los cambios climáticos se apoyaron en los análisis propios de los cambios observados y en la literatura científica publicada por distintos autores en los casos en que existe. Este doble control disminuye el riesgo de adoptar conclusiones equivocadas y por lo tanto aumenta la confianza en las conclusiones. A los resultados más relevantes y generales, se les ha asignado un nivel de confianza. Para ello se aplicó la metodología del IPCC que combina la disponibilidad y consistencia de las evidencias con el grado de acuerdo

entre las mismas (Mastrandrea y otros, 2010). La evidencia más importante considerada han sido los resultados de los cambios observados calculados para este informe.

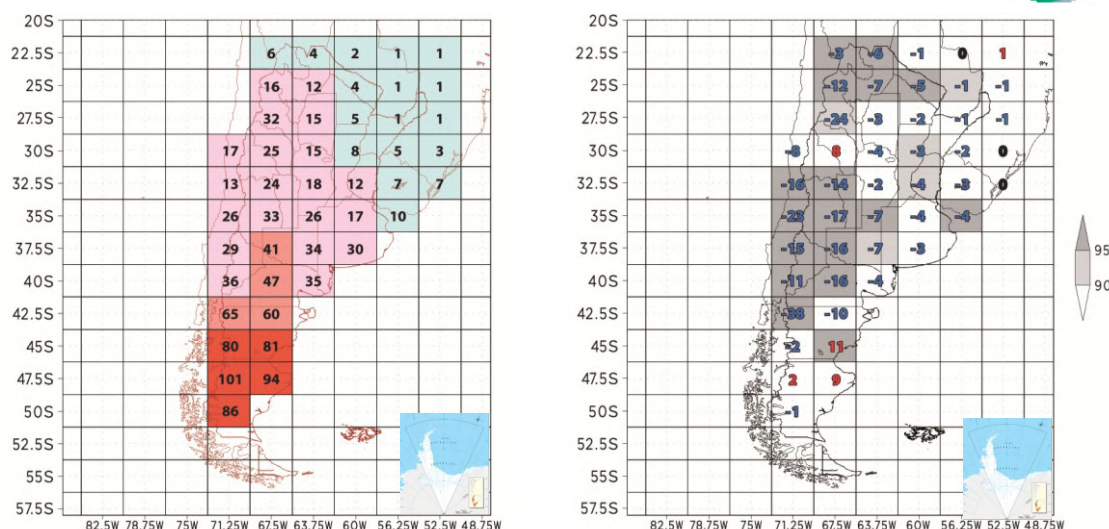
En el caso de la Antártida e Islas del Atlántico Sur, debido a la muy escasa información de estaciones meteorológicas con observaciones de un largo período de tiempo que permita evaluar tendencias climáticas regionales, su tratamiento se basó en la literatura existente, que es mayoritariamente sobre la temperatura. Por este motivo, cabe aclarar que la porción de territorio antártico argentino e Islas del Atlántico Sur no han sido incluidas en la totalidad de las figuras del presente informe.

**En la mayor parte de la Argentina continental no patagónica hubo un aumento de temperatura de hasta medio grado entre 1960 y 2010 (confianza media),** Figura RE.6.1. Este aumento fue menor que el del promedio global computado sobre todas las regiones continentales del planeta en ese periodo. Esto es debido a las condiciones predominantemente oceánicas del Hemisferio Sur, pero también puede deberse a que los cambios de la temperatura en el sur de Sudamérica no solo se deben al calentamiento global sino también a procesos internos del sistema climático como son los cambios en la circulación atmosférica que pueden exacerbar o morigerar regionalmente el impacto de tal calentamiento global. En el centro del país hubo menor aumento de temperatura con incluso disminución en algunas zonas. La temperatura mínima tuvo mayores aumentos que la temperatura máxima, la que incluso tuvo disminuciones generalizadas en el centro del país. **En la Patagonia el aumento de temperatura fue mayor que en el resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1°C (confianza media),** Figura RE.6.1. Al contrario que en el resto del país, la temperatura máxima tuvo un aumento mayor que la mínima.



**Figura RE.6.1:** Izquierda, campo medio de la temperatura media anual (contornos cada 2°C) 1960-2010; derecha, cambio de la temperatura media anual en °C para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia (contornos cada 0,5°C sombreado en rojo (azul) valores significativos con signo positivo (negativo))

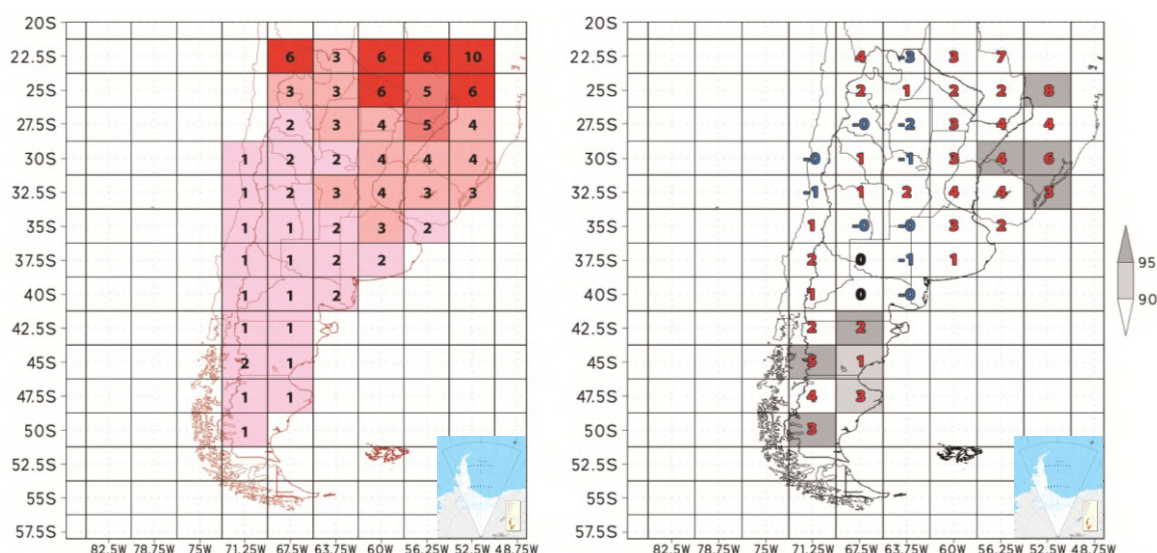




**Figura RE.6.2:** Panel izquierdo: número de días con heladas. Panel derecho: cambios en el número de días con heladas; valores negativos en azul y positivos en rojo. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha

Los cambios en el este y norte del país en los índices relacionados con las temperaturas extremas son consistentes con el calentamiento observado en la temperatura media y mínima (confianza alta). La Figura RE.6.2 muestra los cambios en la frecuencia de heladas.

Las olas de calor aumentaron considerablemente en el norte y este del país, Figura RE.6.3. Por ejemplo en las regiones próximas a la ciudad de Buenos Aires, los días del año con olas



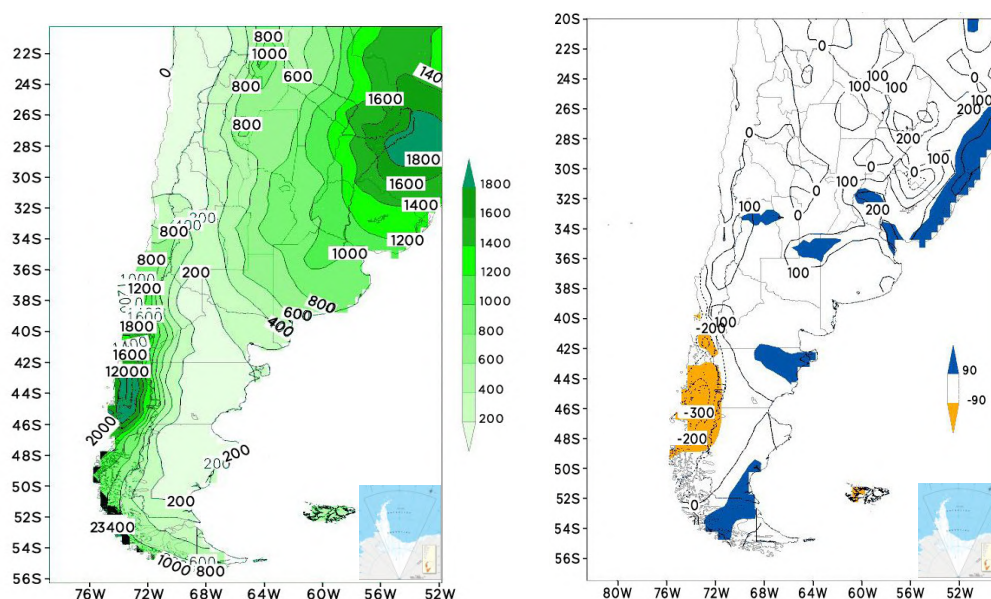
de calor entre 1960 y 2010 se duplicaron.

**Figura RE.6.3:** Ídem Figura SE.6.2, pero para la duración de olas de calor

En el periodo 1960-2010 la precipitación aumentó en casi todo el país aunque con variaciones interanuales (confianza alta). Los mayores aumentos se registraron en el este del país con más de 200 mm en algunas zonas, pero los aumentos porcentuales fueron más



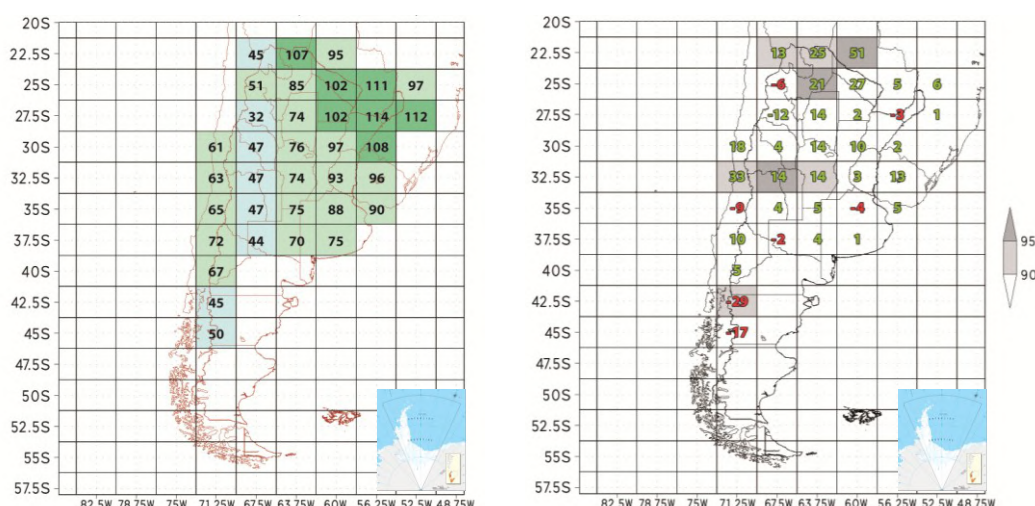
importantes en algunas zonas semiáridas, Figura RE.6.4. Por el contrario, **sobre los Andes patagónicos las precipitaciones tuvieron un cambio negativo en el periodo 1960 – 2010 (confianza alta).**



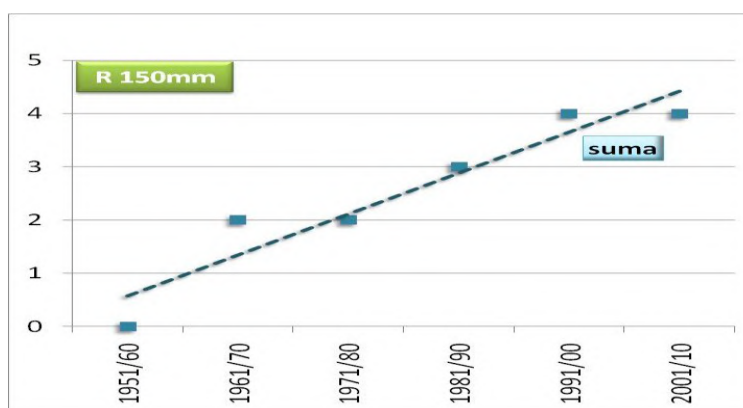
**Figura RE.6.4:** *Izquierda, campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, derecha, cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010. Cambios estadísticamente significativos en colores según escala*

Los índices vinculados a las precipitaciones extremas y la literatura científica publicada indican que **entre 1960 y 2010 hubo un cambio hacia precipitaciones más frecuentes en parte del país (confianza alta) y más intensas en algunas zonas (confianza media)**. La precipitación diaria máxima del año ha aumentado en casi todo el país, aunque solo en pocas zonas en forma significativa, figura RE.6.5. La frecuencia de las precipitaciones intensas aumentó, al menos en la región Húmeda donde hay suficiente información, Figura RE.6.6.

La máxima duración de días en el año sin prácticamente precipitación (racha seca) ha disminuido en la Pampa húmeda y la Patagonia no andina, consistentemente con el aumento de las precipitaciones anuales, Figura RE.6.7. En cambio, en el oeste y notoriamente en el norte, estos periodos secos se han hecho más largos. En estas regiones, la precipitación en el invierno es escasa o nula y por lo tanto el aumento de la racha máxima seca acompañado de mayores precipitaciones anuales (que se dan fuera del invierno), está indicando un cambio hacia una prolongación del periodo seco invernal.

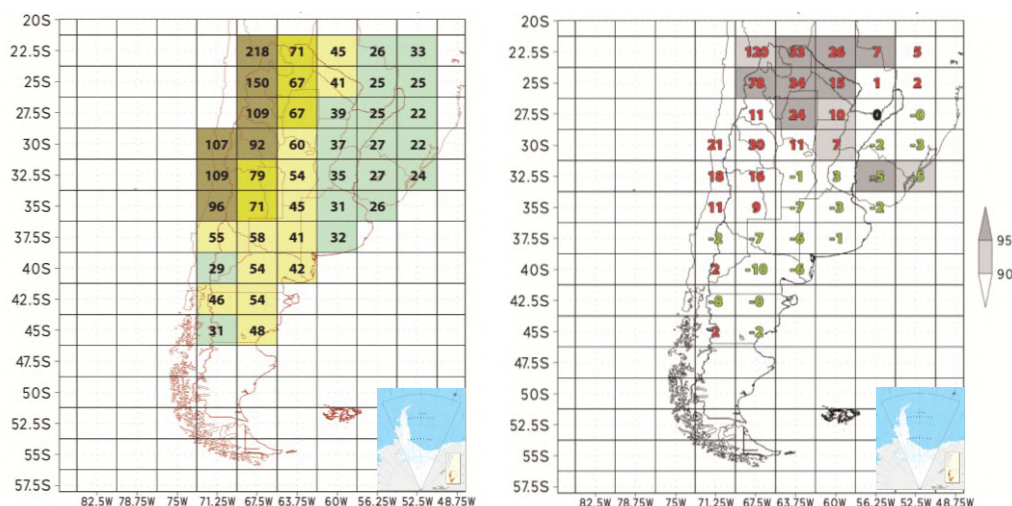


**Figura RE.6.5:** Panel izquierdo, precipitación diaria máxima del año en mm. Panel derecho, cambios en precipitación diaria máxima del año; valores negativos en rojo y positivos en verde. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha



**Figura RE.6.6:** Número de casos de precipitaciones diarias por encima del umbral de 150mm en periodos de 10 años para 4 estaciones (Observatorio Buenos Aires, Paraná, Ceres y Monte Caseros)





**Figura RE.6.7:** Ídem Figura RE.6.5, pero para la máxima longitud de días secos consecutivos

Desde la segunda mitad del siglo pasado hubo un fuerte calentamiento de la Península Antártica y un ligero enfriamiento del interior del continente antártico. El calentamiento de la Antártida occidental excedió  $0,1^{\circ}\text{C}$  por década en los últimos 50 años. Estos resultados tienen sin embargo un grado de incerteza debido a la escasez y la corta duración de las observaciones disponibles.

## 7. PROYECCIONES DEL CLIMA PARA EL SIGLO XXI

La herramienta más confiable para las proyecciones climáticas futuras son los modelos climáticos globales (MCGs). Estos son complejos sistemas de programas informáticos que representan numéricamente los procesos físicos (y en menor medida químicos y biológicos) de la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera. Son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios en el pasado reciente y por lo tanto son creíbles como herramienta para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros. Los escenarios se construyen con diferentes hipótesis sobre las futuras concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Se cuenta con un conjunto de escenarios climáticos conocido como CMIP5 (Taylor y otros, 2012). Un conjunto anterior de estos escenarios climáticos es el conocido como CMIP3 (Meehl y otros, 2007).

Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. En particular, si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional del sur de América del Sur, sus errores en la cuantificación de la precipitación son importantes (ejemplo en Vera y otros, 2006). En el capítulo 3 se comprobó la disparidad en la representación del clima regional por parte de los MCGs analizados. Por ejemplo, en el caso de la precipitación los errores porcentuales varían de casi 0 a 46 % en las regiones Húmeda y Centro y a 185 % en las regiones Andes y Patagonia. En general solo un pequeño número de modelos ajustan correctamente al clima observado en cada región. Por ello es mejor proyectar el clima regional con estos modelos y no hacerlo con el promedio de todos los modelos ya que este promedio puede estar afectado por modelos con una muy deficiente representación del clima regional. Esta metodología de



generar ensambles para la proyección de clima futuro es una de las recomendadas por el IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections (Knutti y otros 2010). Sin embargo, como no hay ningún modelo que represente el clima correctamente en cada una de las cuatro regiones, el promedio de los 42 MCGs es una primera aproximación al clima de todo el país y es el que se presenta en este resumen ejecutivo, figuras RE7.8.1 y RE7.8.2. Por otra parte en los estudios de impacto se requieren valores diarios y /o mensuales y estos no pueden surgir del promedio de los 42 modelos, ya que estos promedios eliminarían las variaciones interdiurnas e interanuales que son necesarias en muchos de estos estudios.

Los modelos del conjunto CMIP5 son mejores que los del conjunto anterior (CMIP3), pero sus errores son todavía muy importantes en la región, aún para el caso del clima medio. A esos errores se los denomina de aquí en adelante sistemáticos, por cuanto se supone que se extenderían de igual modo a las simulaciones del clima futuro.

Parte de los errores de los MCGs en la representación de los climas regionales provienen de su baja resolución horizontal. Esto afecta particularmente en las regiones que presentan fuertes accidentes topográficos o contrastes térmicos. En nuestro caso, esto es una fuente de error en la zona andina y sus inmediaciones. Este problema se puede abordar con modelos climáticos regionales de más alta resolución (MCR) que por su mayor demanda computacional se los circunscribe a una determinada región. La experiencia indica que, aunque en algunas zonas, en particular las montañosas, los MCR pueden mejorar las simulaciones climáticas de los MCGs, sus errores pueden ser también importantes.

Los escenarios climáticos del siglo XXI fueron calculados sobre dos horizontes temporales: *clima futuro cercano* (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y *clima futuro lejano* (2075-2099), de carácter informativo sobre el largo plazo.

## **7.1 Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI**

Los resultados de los MCRs disponibles están basados en uno de los escenarios de emisiones de GEI usado por los modelos del CMIP3 (el llamado A1B), que es un escenario de emisiones entre moderado y alto, mientras que los resultados de los MCGs del CMIP5 se basan en escenarios representativos de trayectorias de concentración (sigla en inglés, RCP). Estos escenarios de concentración se distinguen por el forzamiento radiactivo en watts por metro cuadrado al que llegan en el año 2100. Se elaboraron escenarios climáticos de dos escenarios RCP 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas y el escenario RCP8.5 al caso en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo.

## **7.2 Disponibilidad de escenarios climáticos**

La base CMIP5 incluye simulaciones del siglo XX y proyecciones de escenarios climáticos del siglo XXI provenientes de unos 42 experimentos con MCGs. De ellos se seleccionaron 14 experimentos de casi otros tantos MCGs que tienen una resolución horizontal de 2° o mayor. En cuanto a los MCRs, 11 experimentos de 7 MCRs anidados en MCGs del CMIP3 están disponibles para la región.

## **7.3 Métricas para la validación de los modelos climáticos**

Se elaboró una métrica para visualizar qué modelos climáticos presentaban comportamientos muy erróneos y en qué regiones. Esta métrica se basa en una serie de indicadores de errores



en la temperatura media y la precipitación anual y de las estaciones extremas (verano e invierno). Los indicadores que se utilizaron son 10 y de la combinación de los mismos se desarrolló un índice único (IUVM) que permite comparar la habilidad de los modelos para representar el clima en cada una de las 4 regiones.

#### **7.4 Proceso de validación**

En el Cuadro 3.3.1 (Capítulo 3) se listan los 14 modelos del conjunto CMIP5 (Stouffer y otros, 2011; Taylor y otros, 2012) evaluados en este Informe. Estos modelos se encuentran disponibles a través del Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos (PCMDI, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) y fueron preseleccionados por presentar datos diarios y tener la mejor resolución horizontal.

El Proyecto CLARIS-LPB realizó simulaciones con MCRs (Solman y otros, 2013) con una resolución de  $0,44^\circ$  de latitud y longitud, equivalente, aproximadamente, a 50 km. Los MCRs requieren condiciones iniciales y condiciones de borde lateral a lo largo del período de integración, que son provistas por un MCG. El conjunto de simulaciones disponibles incluye 7 MCRs y 3 MCGs. La Tabla 3.3.9 (Capítulo 3) lista los MCR evaluados. El modelo del *Meteorological Research Institute* (MRI) de la *Japan Meteorological Agency* (JMA) es un modelo global del conjunto CMIP3 de muy alta resolución (20 km) y se lo preseleccionó por ello.

#### **7.5 Selección de modelos para el desarrollo de escenarios**

La confianza en los modelos climáticos para el desarrollo de escenarios climáticos futuros se debe basar en la evaluación de su desempeño para representar el clima presente. Para ello se hizo un proceso de validación de los MCGs y MCRs tomando como referencia para el cálculo de los indicadores de error, el clima observado según los datos de temperatura y precipitación mensual de la base de datos CRU en el período comprendido entre 1961 y 1990.

Con el índice único de validación de modelos (IUVM), basado en 10 indicadores de error, se pudieron rankear los modelos y hacer una selección objetiva de los que fueron finalmente utilizados en el desarrollo de los escenarios climáticos del siglo XXI. La Tabla 3.3.20 (Capítulo 3) presenta el conjunto de modelos validados, listados teniendo en cuenta el valor decreciente de IUVM.

En general, los modelos globales tuvieron una mejor representación del clima observado que los modelos regionales, lo que puede atribuirse a que los modelos globales son de una generación de modelos más nueva. La excepción es la región Patagonia, y en menor medida la Andina donde, como es de esperar, la mayor resolución espacial de los modelos regionales permite mejorar la representación de los efectos de la cordillera de los Andes.

A partir del índice IUVM, la evaluación experta de una serie de elementos como la distribución de errores dentro de cada región y los errores en los índices extremos se seleccionaron para cada región los 4 primeros modelos del ranking de la Tabla 3.3.20 (Capítulo 3). Ningún modelo estuvo entre los 4 seleccionados en las cuatro regiones, reflejando la diversidad de los forzamientos geográficos del clima, propios de un país muy extenso.



## **7.6 Corrección de los errores sistemáticos de los modelos**

Para la realización de estudios de impacto del clima futuro es necesario contar con los valores climáticos proyectados en escala diaria y mensual y para ello es deseable que a estos valores se los pueda obtener con la mayor certeza posible. Como los errores sistemáticos son importantes, aún en los modelos de mejor desempeño, es necesario elaborar correcciones de modo de ajustarlo lo más posible al clima observado. Esto implica el cálculo de factores de corrección basados en los errores sistemáticos, que luego se aplicarán a los escenarios climático futuros proyectados por el MCGs.

El método de corrección elegido es el de ajustar las distribuciones estadísticas de los modelos a las del clima observado. El ajuste o calibración se realizó sobre un periodo con simulaciones climáticas y datos confiables observados, donde obviamente los valores de los modelos corregidos serán muy similares a los observados. Pero luego, este ajuste se verificó en un segundo periodo independiente, para el cual se observó una adecuada validación. De acuerdo a la disponibilidad de las simulaciones del clima pasado por parte de los modelos globales y regionales se tomó el intervalo (1961-75) para el cómputo de factores de corrección (calibración) y (1976-90) para la validación de las correcciones realizadas.

Los factores de corrección se calcularon para cada variable (temperatura y precipitación) y para cada punto del reticulado de medio grado de latitud por medio grado de longitud. El esquema de corrección se aplicó a los campos de cada uno de los doce meses de precipitación y temperatura y para cada uno de los 4 modelos seleccionados en cada una de las 4 regiones. Como se aprecia se trata de un enorme volumen de factores de corrección.

## **7.7 Validación del método de corrección de errores sistemáticos**

La validación se realizó comparando mapas de los valores medios de los modelos corregidos en el periodo de validación con los respectivos datos observados y las distribuciones estadísticas en algunos puntos de cada región. Estos mapas y gráficos se muestran en los capítulos 5 a 8, correspondientes a cada región. La conclusión es que con la selección de los modelos de mejor performance y el método de corrección de sus errores sistemáticos aplicado, se logra representar los valores medios de la precipitación y la temperatura anual con muy poco error en la mayor parte del territorio continental argentino. Igualmente, también se logra representar las distribuciones estadísticas con poco error, excepto para algunos casos, particularmente en los extremos de las distribuciones de lluvia, lo cual es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la Argentina.

## **7.8 Escenarios del clima futuro (Siglo XXI)**

Con los modelos seleccionados para cada región se construyeron los escenarios RCP4.5 y 8.5 y en algunas regiones el A1B para el futuro cercano (2015-2039) y el futuro lejano (2075-2099). Como los modelos elegidos son distintos para cada región, los cambios respecto del periodo de referencia (1981-2005) se muestran en los capítulos regionales (capítulos 5 a 8), mientras que aquí se presenta una visión general de todo el país mediante el promedio de los 42 modelos de la base CMIP5. Esta es otra forma de usar los modelos climáticos para construir escenarios climáticos y es la que fue utilizada por el IPCC en sus últimos informes. Para mayores detalles a nivel regional, los mapas de los capítulos regionales se consideran más confiables porque están basados en los modelos que para cada región representaron mejor el clima observado.



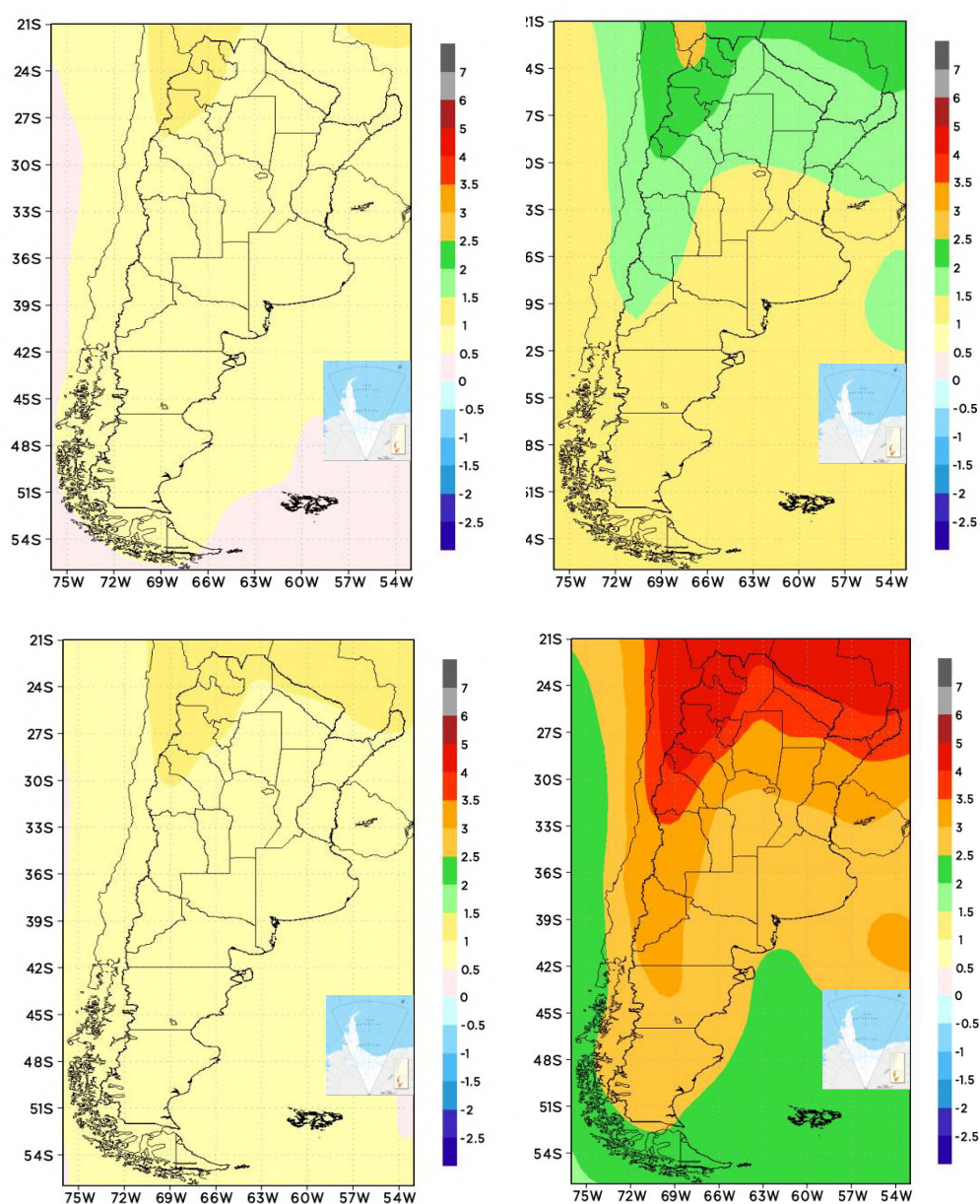
Sobre la Antártida, las islas del Atlántico Sur y el Mar Argentino, no hay suficientes datos para aplicar los métodos de corrección de los modelos. Para estas regiones se puede recurrir directamente a los modelos globales en la base datos del CIMA.

La temperatura media aumentaría en todo el país en los dos escenarios, tanto para el futuro cercano como para el lejano y en ambos casos los aumentos de temperatura son mayores hacia fin de siglo, Figura RE.7.8.1. De acuerdo a lo esperado, en el futuro lejano el escenario RCP8.5 muestra mayor calentamiento que el RCP4.5. En el futuro cercano, se proyectan aumentos muy similares en los dos escenarios con valores entre 0,5 y 1°C en casi todo el país. Esto implicaría una aceleración del calentamiento observado entre 1960-2010, que en casi todo el país fue menos de 0,5°C.

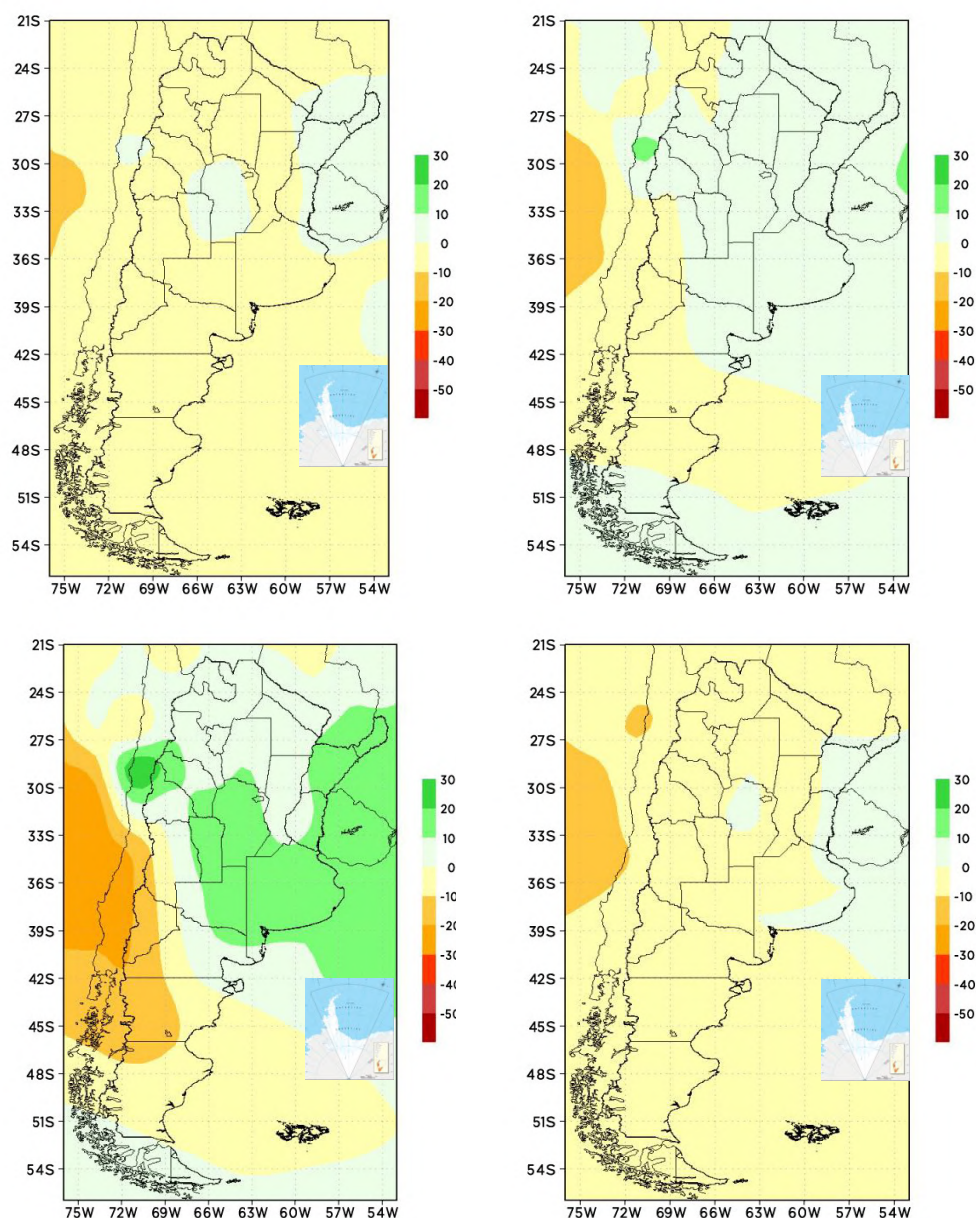
El aumento de la temperatura proyectado es mayor en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste con más de 3,5°C que se prolonga hacia el sur en los escenarios de mayor calentamiento llegando hasta el centro de la Patagonia. La región de máximo calentamiento sería la del noroeste que no solo está muy alejada del mar, sino que está encerrada entre las sierras pampeanas desde Salta hasta San Luis por el este, por los Andes al oeste y por la Puna al norte, lo que aumenta su aislamiento de las masas de aire provenientes del mar.

En el caso de la precipitación, los cambios proyectados no son grandes, Figura RE.7.8.2. Excepto para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, los cambios proyectados están entre -10% y 10%. Como este podría ser el rango de las posibles fuentes de error, estas señales de cambio son poco relevantes. Por ello, se podría asumir que no habría mayores cambios en la precipitación en todo el país en el futuro cercano, ni tampoco en el caso del escenario RCP4.5 en el futuro lejano. Esto se confirma con los escenarios regionales, calculados con solo los modelos elegidos como más representativos del clima observado (capítulos 5 a 8). En el caso del escenario RCP8.5, para el futuro lejano se proyecta un descenso de 10 a 20 % sobre el oeste de la Patagonia norte y central y un aumento similar en el centro y la mayor parte del este del país. En los escenarios de las regiones Húmeda y Central, capítulos 5 y 6, este aumento solo coincide en el signo pero está acotado entre 0 a 10 %, por lo que se puede estimar que en esas regiones solo habría un aumento moderado de las precipitaciones.





**Figura RE.7.8.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)



**Figura RE.7.8.2:** Cambio porcentual en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

En cuanto a la Península Antártica, su calentamiento seguiría a lo largo del siglo XXI en todos los escenarios probables. En el futuro cercano, la temperatura de los meses de verano (diciembre, enero y febrero) aumentaría menos de 0,5°C y en el invierno (junio, julio, agosto) en alrededor de 1°C. Hacia fin del siglo, en el escenario RCP2.6, de gran reducción de emisiones, la Península Antártica se calentaría cerca de 1°C y en el escenario extremo RCP8.5 entre 3 y 5°C (IPCC 2013).



## 8. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

No obstante lo señalado, en el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones.

En el futuro cercano, la incertidumbre ocasionada por diferentes escenarios de concentración de GEI posibles es muy reducida, mientras que las contribuciones de las otras dos fuentes de la incertidumbre son grandes. Con el paso del tiempo, aunque la contribución de la variabilidad interdecadal del clima se puede mantener constante, su peso relativo disminuye frente a la incertidumbre en la señal de cambio climático por aumento de las concentraciones de GEI.

En este estudio, se comparan los tres escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales, el RCP4.5 de emisiones moderadas y el A1B de emisiones intermedias entre las de los dos anteriores. En cuanto a los modelos, se utilizan los MCGs y MCRs de mejor performance en cada región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5. Los detalles, resultados y comentarios se encuentran desarrollados para la precipitación y la temperatura en los capítulos regionales.

## 9. CONCLUSIONES

**En la mayor parte de la Argentina al norte de la Patagonia hubo un aumento de la temperatura media (confianza alta) de hasta medio grado entre 1960 y 2010 (confianza media).** Este aumento fue menor que el del promedio global computado sobre todas las regiones continentales del planeta en ese periodo. Esto se puede deber a la predominancia oceánica del Hemisferio Sur, pero también a procesos internos del sistema climático como son los cambios en la circulación atmosférica que pueden exacerbar o morigerar regionalmente el impacto del calentamiento global. En algunas zonas del país los aumentos fueron de 1 o 2 décimas de grado, y pueden haber estado asociados al efecto del calentamiento urbano no correctamente filtrado.

**En la Patagonia el aumento de la temperatura media fue mayor que en el resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1 °C (confianza media).** A pesar de las escasas series climáticas de largo plazo disponibles, el calentamiento en particular en la zona andina parece haber efectivamente tenido lugar dada la generalizada retirada de los glaciares existentes en esa región.

**Los incrementos detectados en el este y norte del país en los índices relacionados con las temperaturas extremas son consistentes con el calentamiento observado en las temperaturas media y mínima (confianza alta).** Cabe señalar que ha habido en la mayoría del país una reducción en el número de días con heladas, efecto potencialmente beneficioso





para las actividades agrícolas. En cambio, los índices derivados de las temperaturas máximas muestran un leve descenso que sería coherente con el aumento observado de la precipitación.

Las olas de calor aumentaron considerablemente en el norte y este del país. Estos eventos, una de cuyas manifestaciones más severas ocurridas se produjo recientemente en diciembre de 2013, evidencian la necesidad de activas políticas de adaptación por parte de los gobiernos a escala local, provincial y nacional y de la sociedad en su conjunto. En particular, resultaría importante mejorar y fortalecer los actuales sistemas de alerta, prevención y respuesta.

**En el periodo 1960-2010 la precipitación aumentó en casi todo el país aunque con diferencias regionales y con variaciones interanuales (confianza alta).** Los mayores aumentos se registraron en el este del país con más de 200 mm en 50 años en algunas zonas. Los aumentos porcentuales fueron muy importantes en algunas zonas semiáridas, lo que facilitó además de otros factores no climáticos la expansión de la frontera agrícola. Resulta importante profundizar las investigaciones sobre los aspectos ambientales y socioeconómicos asociados con esta expansión agrícola, así como aumentar el conocimiento y el asesoramiento técnico para obtener la mayor ventaja de las nuevas condiciones climáticas.

**Sobre los Andes patagónicos las precipitaciones tuvieron un cambio negativo en el periodo 1960 – 2010 (confianza alta) mientras que en los Andes cuyanos, los caudales de los ríos permiten inferir una tendencia decreciente de largo plazo (desde comienzos de siglo XX), pero con fuertes variaciones y aun con periodos prolongados con tendencias positivas (confianza media).** Las precipitaciones sobre los Andes cuyanos y los ríos que se alimentan de ellas tuvieron desde 1950 fluctuaciones similares con una tendencia negativa hasta 1970, seguida de una fuerte recuperación hasta fines de la década de 1980 y un posterior periodo con otra vez tendencia negativa.

El análisis de los índices vinculados a las precipitaciones extremas y de la literatura científica publicada indica que **entre 1960 y 2010 hubo un cambio hacia precipitaciones extremas más frecuentes en gran parte del país (confianza alta)** y en algunas zonas hacia precipitaciones más intensas. Este resultado, a la luz de los recientes impactos que afectaron nuestro país en las ciudades de Santa Fe, Buenos Aires, La Plata y otras localidades confirman la necesidad de fortalecer los actuales sistemas de alerta sobre inundaciones de diverso tipo, expandiendo las redes de monitoreo y las capacidades de predicción, y además mejorar los planes específicos de prevención y respuesta rápida, así como de reparación de los daños originados.

En el oeste y notoriamente en el norte del país, ha habido un cambio hacia la prolongación del periodo seco invernal. Esto podría estar generando problemas en la disponibilidad de agua para las poblaciones, condiciones más favorables para incendios incontrolados de bosques y pasturas, así como condiciones de estrés sobre la actividad ganadera.

Las proyecciones de la temperatura media para el siglo XXI son de aumento en todo el país en los escenarios utilizados, siendo mayor hacia fin de siglo y, de acuerdo a lo esperado, en el escenario de mayores emisiones. **En el futuro cercano, el aumento de la temperatura media no depende mucho de los escenarios y sería de 0,5 a 1°C en casi todo el país, lo que implicaría una aceleración del calentamiento observado en los últimos 50 años (confianza media).** El aumento de la temperatura proyectado es mayor en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste que, con valores decrecientes, se prolonga por el oeste hasta el centro de la Patagonia.



**Los cambios proyectados por el promedio de todos los modelos CMIP5 en la precipitación media en todo el país no serían relevantes, y excepto para el escenario de mayor emisión (RCP8.5) en el futuro lejano, los cambios proyectados estarían entre menos 10% y más 10% (confianza baja).** Habría un descenso moderado en el oeste de la Patagonia norte y central y en la zona cordillerana de Mendoza. Debido a la todavía limitada calidad de los modelos climáticos para representar los procesos relacionados con la precipitación, existe una gran dispersión entre las diferentes proyecciones, especialmente en el futuro lejano. En el caso de Cuyo, si esta tendencia de largo plazo continuara como indican las proyecciones se reduciría la disponibilidad de agua de riego necesaria para mantener los niveles actuales de la actividad vitivinícola y frutihortícola en los oasis de riego. Ante este riesgo potencial, sería importante implementar investigaciones y desarrollos integrales sobre el funcionamiento de tales oasis, que teniendo en cuenta su complejidad física y socio-económica, contribuyan a determinar futuras medidas de adaptación.

Finalmente, **las proyecciones indican en promedio un aumento de los índices extremos relacionados con las altas temperaturas y las precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones del país (confianza media).** Aunque por lo antes mencionado, la cuantificación de este cambio proyectado exhibe considerable niveles de incertidumbre.

## 10. BASE DE DATOS

La Base de Datos contiene información de precipitación y temperatura provenientes de observaciones del clima reciente (1961-2010). Dichos datos están representados en un reticulado geo-referenciado de al menos 1 grado de latitud y longitud de resolución. Por las características de las regiones geográficas a cubrir por la base, los datos se agrupan teniendo en cuenta dos áreas principales: Argentina Continental y Antártida e Islas del Atlántico Sur.

Los conjuntos de datos mensuales incluidos en la Base de Datos son CRU\_TS 3.21 de temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación; GPCC Versión 6 de precipitación; NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI-SST V2) de temperatura de la superficie del mar. Para el caso de información con resolución diaria, los conjuntos de datos incluidos en la Base de Datos son Claris-LPB SAT 1.0 de temperatura mínima, temperatura máxima, Claris-LPB-rr-05.1 de precipitación, NOAA/ESRL PSD SA de precipitación, NCEP REANALYSIS I de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y NOAA OI SST V2 HR de temperatura de superficie del mar.

Otros datos incluidos son los Índices de extremos de precipitación y temperatura basados en datos observados. Se proveen los datos grillados de los 11 Índices de extremos de precipitación y temperatura descriptos en la sección 2.1.2 del Capítulo 2.

La base incluye los datos de precipitación y temperatura del clima del pasado reciente (1961-2010) y del clima futuro (2015-2039, 2075-2099) simulados por los modelos climáticos. Se pondrán a disposición los datos corregidos de todos los modelos climáticos que hayan sido seleccionados en el proceso de validación.

Los datos simulados están disponibles en un reticulado geo-referenciado de 0,5 grados de latitud y longitud de resolución y se proveen para cada uno de los modelos individuales. Los datos climáticos simulados se proveerán en resoluciones temporales diarias y mensuales en un dominio que abarque la Argentina así como en los dominios regionales que definen a las 4 regiones de estudio. El listado de los modelos a incluir se encuentra en la sección 3.3.6 del



Capítulo 3. Este contenido de la Base de Datos se completa con el agregado de los datos simulados por los modelos climáticos seleccionados para los tres períodos considerados (1960/2010, 2015/2039, 2075/2099).

La base se construyó a partir de una arquitectura que permite relaciones rápidas y eficientes para el manejo de los recursos y su provisión al usuario. Su utilización se facilita a través de una interfaz de visualización web que permite consultar los archivos almacenados y sus metadatos, como así también visualizar mapas de localización de los datos. Incluye un sistema de descarga de los datos almacenados, que resulta de fácil manejo al usuario final, y que permite exportar los datos seleccionados “Series de Tiempo”, en formato Texto y Shape. La interfaz será pública y abierta con registración, para identificar los accesos y uso de la Base de Datos.

La sección 4.4 (Capítulo 4) describe la arquitectura de la Base de Datos, cuyo detalle se incluye además en el Anexo IV. La interfaz de visualización web que permite a los usuarios consultar los archivos almacenados y sus metadatos, como así también visualizar mapas de localización de los datos, se presenta en la sección 4.5. La descripción general del contenido de los archivos de metadatos se incluye en la sección 4.6 y su detalle en el Anexo V, mientras que la descripción de los documentos explicativos sobre la Base de Datos se presenta en la sección 4.7 y el detalle de los mismos en el Anexo VI. La información sobre la implementación y puesta a disposición de la Base de Datos mediante la inclusión de los conjuntos de datos se discute en la sección 4.8.

## Referencias

Donat M. G., L. V. Alexander, H. Yang, Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroel, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, and S. Kitching. 2013: Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 J. of Geophysical Research **118**, 2098–2118.

Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe, and F.W. Zwiers, 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Knutti, R., G. Abramowitz, M. Collins, V. Eyring, P.J. Gleckler, B. Hewitson, and L. Mearns, 2010: Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.

Meehl G, Covey C, Taylor KE, Delworth T, Stouffer RJ, Latif M, McAvaney B, Mitchell JFB, 2007: THE WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. Bull. Am. Meteorol. Soc. 88:1383–1394.



Solman S., E. Sanchez, P. Samuelsson , R. da Rocha, L. Li , J. Marengo, N. Pessacg, A.R.C. Remedio , S. C. Chou, H. Berbery , H. Le Treut, M. de Castro y D. Jacob, 2013. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: Model performance y uncertainties" (DOI: 10.1007/s00382-013-1667-2). *Clim Dyn*, 41, 1139-1157.

Stouffer RJ, Taylor KE, Meehl GA. 2011. CMIP5 Long-term experimental Design. *CLIVAR Exchanges* **56**, 5-7.

Taylor, KE, Stouffer RJ, Meehl GA. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**: **485–498**. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Vera, C., G. Silvestri, B. Liebmann, y P. Gonzalez, 2006: Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13707.



## SUMARIO PARA LOS TOMADORES DE DECISIONES

En el contexto del Proyecto Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) hizo una evaluación de las tendencias del clima desde la segunda mitad del siglo XX y una proyección del clima futuro (siglo XXI) de la Argentina. Asimismo, desarrolló una base de datos con acceso abierto y público por internet que contiene información relevante para los estudios de impacto del cambio climático, tanto del clima observado como del proyectado.

Para facilitar la lectura del presente Informe por parte de los decisores de políticas, hay cuatro capítulos con información detallada de 4 regiones. La selección de las regiones se hizo de modo que cada provincia quedara dentro de una sola región. Las 4 regiones son:

**Húmeda:** Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires.

**Centro:** La Pampa, San Luis, Córdoba, Tucumán, Santiago, Chaco y Formosa.

**Andina:** Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Salta y Jujuy.

**Patagonia:** Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz, Tierra del Fuego y Antártida e Islas del Atlántico Sur.

Se trabajó con conjuntos de datos globales elaborados por organismos internacionales más utilizados en el mundo en las investigaciones sobre cambio climático. Para la Argentina continental, estos conjuntos de datos se basan en observaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos han pasado un doble proceso de consistencia: por este organismo nacional y luego en la elaboración de las bases de datos.

El análisis de los cambios climáticos se circunscribió fundamentalmente al periodo 1960-2010. En ese periodo, en la mayor parte de la Argentina al norte de la Patagonia hubo un aumento de la temperatura bastante menor que el aumento global promedio y no mayor a medio grado. Incluso en algunas zonas del centro del país, el aumento de temperatura fue de solo 1 o 2 decimas de grado.

En la Patagonia el aumento de la temperatura fue mayor que en el resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1 °C. En la zona de los Andes patagónicos, este calentamiento es consistente con el retroceso generalizado de los glaciares. En casi todo el país hubo reducción en el número de días con heladas y los días con olas de calor aumentaron considerablemente en el norte y este del país. Estos eventos, una de cuyas manifestaciones más severas ocurridas se produjo recientemente en diciembre de 2013, evidencian la necesidad de activas políticas de adaptación por parte de los gobiernos a escala local, provincial y nacional y de la sociedad en su conjunto.

La precipitación aumentó en casi todo el país aunque con diferencias regionales y fuertes variaciones interanuales. En el este del país se produjeron los mayores aumentos con más de 200 mm anuales entre 1969 y 2010 en algunas zonas. Los cambios porcentuales fueron muy importantes en algunas zonas semiáridas, en donde este cambio facilitó la expansión de la frontera agrícola alentada por otros factores no climáticos. Para obtener la mayor ventaja de las nuevas condiciones climáticas es importante profundizar las investigaciones sobre los aspectos ambientales, agronómicos y socioeconómicos asociados con esta expansión agrícola.



En cambio, en los Andes patagónicos las precipitaciones se redujeron en el periodo 1960 – 2010, mientras que en los Andes cuyanos, los caudales de los ríos permiten inferir una tendencia decreciente desde comienzos de siglo XX pero con fuertes variaciones y aun con periodos prolongados con tendencias positivas.

Hubo además un cambio hacia precipitaciones extremas más frecuentes en gran parte del país y en algunas zonas estas precipitaciones extremas se volvieron aún más intensas. Estas conclusiones junto con los recientes impactos que afectaron las ciudades de Santa Fe, La Plata y Buenos Aires y otras localidades confirman la necesidad de fortalecer los sistemas de alerta temprana sobre inundaciones de diverso tipo, expandiendo las redes de monitoreo, las capacidades de predicción y el perfeccionamiento de los planes de prevención y respuesta.

En el oeste y notoriamente en el norte del país, ha habido un cambio hacia la prolongación del periodo seco invernal. Esto podría estar generando problemas en la disponibilidad de agua para las poblaciones y condiciones más favorables para incendios de bosques y pasturas, así como condiciones de estrés sobre la actividad ganadera.

### **SINTESIS DE CAMBIOS CIMÁTICOS OBSERVADOS**

**En la mayor parte de la Argentina, al norte de la Patagonia, hubo un aumento de la temperatura media de hasta medio grado entre 1960 y 2010.**

**En la Patagonia el aumento de la temperatura media fue mayor que en el resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1 °C.**

**Los incrementos detectados en el este y norte del país en los índices relacionados con las temperaturas extremas son consistentes con el calentamiento observado en las temperaturas media y mínima.**

**En el periodo 1960-2010 la precipitación aumentó en casi todo el país aunque con diferencias regionales y con variaciones interanuales.**

**Sobre los Andes patagónicos las precipitaciones tuvieron un cambio negativo en el periodo 1960 – 2010.**

**En los Andes cuyanos, los caudales de los ríos permiten inferir una tendencia decreciente desde comienzos de siglo XX pero con fuertes variaciones.**

**Entre 1960 y 2010 hubo un cambio hacia precipitaciones extremas más frecuentes en gran parte del país.**

**En el oeste y notoriamente en el norte del país, ha habido un cambio hacia la prolongación del periodo seco invernal.**

Para estimar los potenciales cambios climáticos en lo que resta del siglo XXI se usó la herramienta estándar y más confiable que son los modelos climáticos globales (MCGs). Estos modelos son conjuntos de programas informáticos que representan los procesos físicos,





químicos de la atmósfera, océanos, criosfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera.

Se elaboraron escenarios climáticos futuros, sobre la base de tres escenarios, dos de la base CMIP5, denominados RCP4.5 y RCP8.5, y uno de la base CMIP3, llamado A1B. El primero asume una evolución durante el siglo XXI de emisiones globales moderadas y el segundo, una evolución de estas emisiones con fuerte crecimiento, similares a las actuales. El escenario A1B representaría un escenario de emisiones en cierta forma intermedio entre los dos anteriores. Se lo considera dado que fue usado para la elaboración de escenarios climáticos regionales a partir de modelos climáticos regionales MCRs, que en algunos casos pueden generar escenarios más detallados geográficamente.

Los modelos climáticos, tanto los MCGs como los MCRs, no representan en forma totalmente adecuada el clima regional, y presentan importantes errores en ciertas zonas, especialmente en el caso de la precipitación. Para lograr una adecuada representación del clima futuro, como primera medida se exploraron los resultados de 26 modelos y se seleccionaron para cada región los cuatro que mejor representan el clima observado. Luego a estos modelos seleccionados se les aplicaron mejoras estadísticas para perfeccionar su representación del clima.

Los escenarios climáticos para el siglo XXI fueron calculados sobre dos periodos, uno en el futuro cercano (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y otro en el futuro lejano (2075-2099), de carácter informativo sobre el largo plazo

Las proyecciones de la temperatura media para el resto del siglo XXI son de aumento en todo el país siendo mayor hacia fin de siglo. De acuerdo a lo esperado, el escenario RCP8.5 es el que representa el mayor calentamiento. En el futuro cercano, el aumento de la temperatura media no depende mucho de los escenarios y sería de 0,5 a 1°C en casi todo el país, lo que implicaría una aceleración del calentamiento observado en los últimos 50 años. El aumento de la temperatura media proyectado es mayor en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste que se extiende con valores decrecientes hacia el centro de la Patagonia a lo largo de todo el oeste del país.

Los cambios proyectados en la precipitación media anual por el promedio de los modelos no serían relevantes, y estarían entre menos 10 y más 10% en todo el país. La excepción es el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, en el cual se proyecta un descenso moderado en el oeste y sobre la cordillera en la Patagonia norte y central y en Mendoza y un aumento también moderado en el centro y del este del país. En Cuyo, con esta tendencia, se reduciría la disponibilidad de agua de riego necesaria para mantener los niveles actuales de la actividad vitivinícola y frutihortícola.

Finalmente, las proyecciones indican en promedio un aumento de los extremos relacionados con las altas temperaturas y las precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones del país, aunque, la cuantificación de estos cambios proyectados presenta considerables niveles de incerteza, especialmente en el futuro lejano.



## SINTESIS DE CAMBIOS CIMÁTICOS PROYECTADOS

**En el futuro cercano, el aumento de la temperatura media no dependerá mucho de los escenarios de emisiones de GEI y sería de 0,5 a 1°C en casi todo el país.**

**El aumento de la temperatura media proyectado es mayor en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste.**

**Los cambios proyectados por el promedio de los modelos en la precipitación media en todo el país no serían relevantes y estarían entre menos 10% y más 10%.**

**Las proyecciones indican que habría un aumento de los índices extremos relacionados con las altas temperaturas y las precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones del país.**

La Base de Datos Climáticos contiene información de precipitación y temperatura provenientes de observaciones del clima reciente (1961-2010). Dichos datos están representados en un reticulado geo-referenciado. Por las características de las regiones geográficas a cubrir por la base, los datos se agrupan teniendo en cuenta dos áreas principales: Argentina Continental y Antártida e Islas del Atlántico Sur.

Los conjuntos de datos se proveen en forma mensual o diaria y fueron derivados de diversos conjuntos de datos climáticos elaborados por diferentes centros internacionales sobre la base de observaciones realizadas sobre todo el globo. En particular estos conjuntos consideraron los datos observados en la República Argentina por el Servicio Meteorológico Nacional. Se incluyen además conjuntos de datos elaborados por proyectos como CLARIS-LPB que proveen información con una mayor resolución espacial en algunas regiones del país.

La Base de datos incluye los datos de precipitación y temperatura del clima simulado para el pasado reciente (1961-2010) y el clima futuro (2015-2039 y 2075-2099) por todos los modelos climáticos que fueron seleccionados en el proceso de validación. Los datos simulados están disponibles en un reticulado geo-referenciado de 0.5 grados de latitud y longitud de resolución para cada uno de los modelos utilizados y en resoluciones temporales diarias y mensuales en las dos áreas principales: Argentina Continental y Antártida e Islas del Atlántico Sur. Otros datos incluidos, son 11 índices de extremos de precipitación y temperatura basados en datos observados del pasado reciente, así como proyectados para el clima futuro. La Base incluye además datos de temperatura de superficie del mar en el Océano Atlántico Sur y las áreas oceánicas que rodean la península Antártica para facilitar los estudios de impacto en los ambientes marinos.

La Base se construyó a partir de una arquitectura que permite relaciones rápidas y eficientes para el manejo de los recursos y su provisión al usuario. Su utilización se facilita a través de una interfaz de visualización web que permite consultar los archivos almacenados y sus metadatos, como así también visualizar mapas de localización de los datos. Incluye un sistema de descarga de los datos almacenados, que resulta de fácil manejo al usuario final, exportando los datos seleccionados “Series de Tiempo”, en formato Texto y Shape. La interfaz es pública y abierta con registración, para identificar los accesos y uso de la Base de Datos. La Base puede ser accedida a través de la página [3cn.cima.fcen.uba.ar](http://3cn.cima.fcen.uba.ar).





# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| <b>1.1 CONTEXTO</b>               | pág. 2 |
| <b>1.2 OBJETIVOS</b>              | pág. 2 |
| <b>1.3 REGIONALIZACIÓN</b>        | pág. 2 |
| <b>1.4 CONTENIDOS DEL INFORME</b> | pág. 3 |

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 CONTEXTO**

Este es el informe final del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) al Proyecto Tercera Comunicación Nacional a la CMNUCC de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) en el marco de los estudios de base para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Fue desarrollado con el concurso de 14 expertos, entre ellos varios pertenecientes a otras instituciones académicas y regiones del país.

### **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este informe es presentar una evaluación de las tendencias del clima del pasado reciente (desde la segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) de la Argentina.

El foco del estudio es en las tendencias observadas y proyectadas de la temperatura de superficie y de la precipitación y de algunos de sus índices extremos que pueden conducir a impactos relevantes, tales como sequías, heladas, inundaciones e incendios de pasturas y bosques.

El otro objetivo es presentar la documentación que permita hacer accesible por Internet una base de datos con información relevante para los estudios de impacto del cambio climático, tanto del clima observado como del proyectado. Este objetivo incluye también la descripción de la interfaz web que da acceso a la base de datos y de la información metadatos de cada conjunto que la conforma.

### **1.3 REGIONALIZACIÓN**

Para facilitar la lectura y uso del informe por parte de técnicos y decisores políticos, se presenta gran parte de la información agrupada en 4 regiones. En consecuencia, la selección de las regiones se ha hecho de modo que cada provincia quede dentro de una sola región. Un segundo criterio para el agrupamiento por regiones es que la región tenga continuidad geográfica y cierta homogeneidad en sus características climáticas más relevantes.

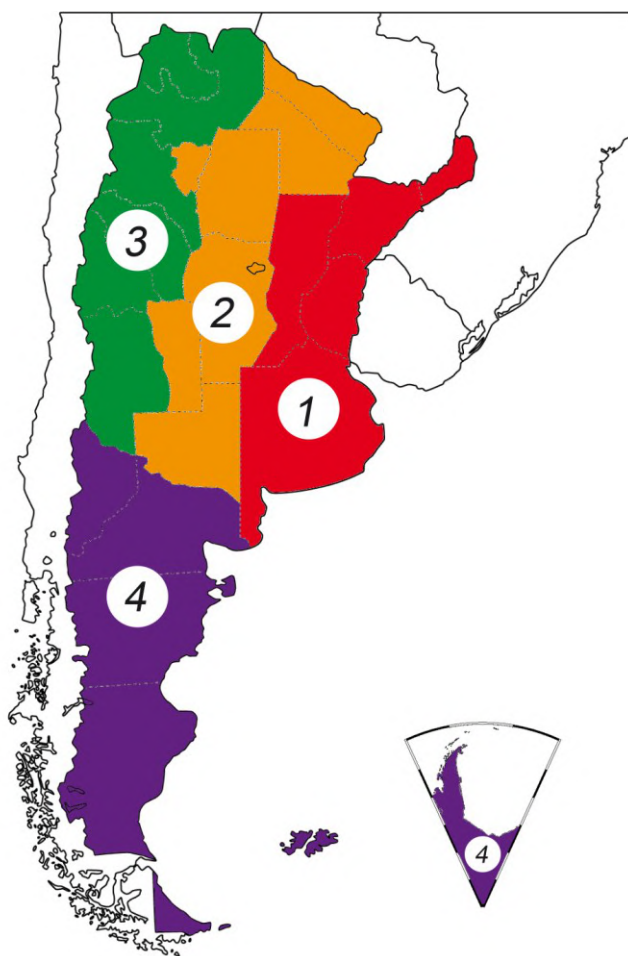
Con estos dos criterios se decidió elaborar informes para las siguientes regiones (Fig. 1):

**Húmeda:** Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires. Esta región se caracteriza por no tener una pronunciada estación seca y no presentar condiciones reiteradas de estrés hídrico (Capítulo 5).

**Centro:** La Pampa, San Luis, Córdoba, Tucumán, Santiago, Chaco y Formosa. La característica común de esta región es su condición monzónica en la precipitación con una marcada estación seca invernal (Capítulo 6).

**Andina:** Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Salta y Jujuy. Clima fuertemente condicionado por la orografía de los Andes con zonas sumamente áridas en el piedemonte andino (Capítulo 7).

Patagonia: Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego, Antártida e islas del Atlántico Sur. Clima dominado por la circulación de los vientos del oeste de latitudes medias y polares en el caso de la Antártida (Capítulo 8).



**Figura 1.1:** *Regiones consideradas: Húmeda (1), Centro (2), Andes (3) y Patagonia, Antártida e Islas del Atlántico Sur (4)*

## 1.4 CONTENIDOS DEL INFORME

En el capítulo 2 se hace el análisis de las tendencias del clima observado a nivel nacional, fundamentalmente de la temperatura de superficie y de la precipitación en sus valores medios y en algunos índices de sus valores extremos.

El capítulo 3 trata sobre las proyecciones del clima para el resto del siglo XXI. Comienza por describir la metodología utilizada, que se basa en el uso de modelos climáticos, por lo cual se explican sus limitaciones así como las técnicas para mejorar sus proyecciones. El capítulo concluye con los escenarios de temperatura y precipitación para dos horizontes temporales: el del futuro cercano, 2015-2039 y de fin de siglo, 2075-2099.

El capítulo 4 describe la Base de Datos y los elementos necesarios para su utilización, su arquitectura y formato de los datos. Los capítulos 5 a 8, sobre las regiones, detallan los resultados de los capítulos 2 y 3 con foco en las respectivas regiones.



## **CAPITULO 2**

### **CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS**

|              |  |         |
|--------------|--|---------|
| <b>2.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>                                | pág. 6  |
| <b>2.1.1</b> | <b>Contenidos</b>                                  | pág. 6  |
| <b>2.1.2</b> | <b>Datos</b>                                       | pág. 6  |
| <b>2.1.3</b> | <b>Índices de extremos climáticos</b>              | pág. 6  |
| <b>2.1.4</b> | <b>Elaboración de resultados y de conclusiones</b> | pág. 8  |
| <b>2.2</b>   | <b>TEMPERATURA</b>                                 | pág. 8  |
| <b>2.2.1</b> | <b>Temperaturas medias</b>                         | pág. 8  |
| <b>2.2.2</b> | <b>Índices extremos</b>                            | pág. 11 |
| <b>2.3</b>   | <b>PRECIPITACIÓN</b>                               | pág. 15 |
| <b>2.3.1</b> | <b>Precipitación media anual</b>                   | pág. 15 |
| <b>2.3.2</b> | <b>Índices extremos</b>                            | pág. 14 |
| <b>2.4</b>   | <b>CAMBIOS EN OTRAS VARIABLES</b>                  | pág. 18 |
| <b>2.5</b>   | <b>LIMITACIONES E INCERTEZAS</b>                   | pág. 18 |
| <b>2.6</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>                                | pág. 19 |
|              | <b>Referencias</b>                                 | pág. 20 |



## CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

#### 2.1.1 Contenidos

Este capítulo trata sobre los cambios del clima observados a partir de la segunda mitad del siglo pasado con foco en la temperatura de superficie y en la precipitación, e incluye algunos comentarios sobre otras variables basados en la bibliografía publicada. En el caso de la precipitación y de la temperatura, el análisis se centra en los campos medios y en índices de extremos relevantes para potenciales estudios de impacto.

#### 2.1.2 Datos

La principal base de datos utilizada es de valores interpolados a puntos de un reticulado de un grado de latitud y longitud que se ha construido a partir de datos provenientes de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, habiendo pasado un doble proceso de consistencia, primero por este organismo y luego por el instituto que la desarrolló. En el proceso de interpolación y en las zonas de frontera, el análisis se benefició de los datos de los países limítrofes (Jones y otros 2012).

Los campos medios mensuales utilizados de las temperaturas (media, mínima y máxima) y de la precipitación son los de la base CRU 3.20 (Jones y otros 2012) que están con resolución espacial de medio grado de latitud y longitud. Están disponibles en la base de datos desarrollada para este Proyecto (Capítulo 4), además de encontrarse en la institución de origen:

([http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_\\_dataent\\_1256223773328276](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276)).

Complementariamente para el estudio de posibles errores en los cambios observados de la precipitación se utilizó la base de datos GPCC (Schneider 2013).

Se utilizaron índices de extremos relacionados con la temperatura y la precipitación del conjunto CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) basado en las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) (Donat y otros 2013). Estos datos originariamente en resolución de 2,5 grados fueron interpolados a medio grado usando el método *triangle-based linear interpolation*.

En cada región se usaron complementariamente datos del Servicio Meteorológico Nacional para el cómputo de indicadores de extremos de precipitaciones sobre determinados umbrales y para otros análisis relacionados con la confiabilidad en los cambios observados.

#### 2.1.3 Índices de extremos climáticos

Los datos de extremos climáticos utilizados fueron tomados de la base mencionada que contiene 27 índices. Los índices fueron elaborados utilizando un esquema común para todo el planeta y



están disponibles tanto para las observaciones del pasado como para las simulaciones de los modelos climáticos utilizados para las proyecciones del clima de Argentina del siglo XXI.

De estos 27 índices, se han seleccionado 11 por su relevancia para el clima local, su interés para potenciales estudios de impacto y por su disponibilidad ya que por falta de datos no todos los índices pudieron ser calculados para la Argentina para un periodo prolongado de tiempo. Adicionalmente a estos tres criterios mencionados, se trató de evitar índices que suministraran información en cierta forma redundante.

Habida cuenta de la diferente disponibilidad regional de datos y a que en algunos pocos casos la relevancia del indicador es distinta según la región, en algunos capítulos regionales (Capítulos 5 a 8) se prescindió del análisis de algunos de ellos.

#### *Índices de extremos seleccionados*

**FD:** *Número de días con heladas definido como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue menor a 0°C.* De relevancia para múltiples actividades, especialmente agropecuarias.

**TR:** *Número de noches tropicales definido como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20°C.* Indicador de calentamiento global, ya que en general la respuesta al incremento de gases de efecto invernadero es mayor en las temperaturas mínimas.

**TX<sub>x</sub>:** *Valor anual máximo de la temperatura diaria máxima.* Relevante para varias actividades socio-económicas, y seres vivos que son afectados al superarse ciertos límites térmicos.

**TN<sub>n</sub>:** *Valor anual mínimo de la temperatura diaria mínima.* Otro indicador de calentamiento global, pero también, en el caso de su aumento, de la habilitación de rangos tolerables para algunas actividades socio-económicas.

**TX90p:** *Porcentaje anual de días con temperatura máxima mayor al percentil 90.* Indicador de cambio climático que por basarse en numerosos datos para su cómputo complementa a TX<sub>x</sub> que solo se basa en un solo dato anual.

**WSDI:** *Duración de olas de calor definido como el número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el respectivo valor del percentil 90.* De relevancia por el estrés en la salud, algunos ecosistemas, la agricultura y la ganadería y en potenciales colapsos del sistema eléctrico.

**Rx1:** *Precipitación diaria máxima del año.* Relevante por su posible asociación con inundaciones y otros daños en la calidad de vida, la actividad agropecuaria y la infraestructura.

**Rx5:** *Precipitación máxima anual de 5 días consecutivos.* De relevancia para inundaciones especialmente en áreas de llanura con bajo escurrimiento y otros daños en la calidad de vida, la actividad agropecuaria y la infraestructura.



**CDD:** *Máxima longitud de racha seca definida como el número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año.* Indicador de condiciones climáticas de sequía. Tiene muchas implicancias para la actividad agropecuaria y los múltiples usos del agua, incluyendo el energético. Tiene implicancias distintas para cada región ya que en el centro y oeste del país es una medida de la duración de la estación seca.

**R95pT:** *Precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pT).* Otro indicador de la torrencialidad de las lluvias y por consiguiente de relevancia por los daños asociados a la misma. A diferencia de los Rx1 o Rx5 no depende de un solo caso siendo entonces un índice más robusto que ellos y a la vez complementario.

**Rnnmm:** *Días en que la precipitación supera un cierto umbral.* Como los umbrales extremos son críticamente dependientes de la región, estos deben definirse para cada una de ellas de acuerdo a lo que puede ser extremo en la misma. Por lo tanto este índice no se tomó de la base ETCCDI, sino que se calculó utilizando datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) siguiendo el criterio de contar el número de días en cada decenio para evitar la aleatoriedad asociada a los valores muy extremos (Capítulos 5 a 7). Es un indicador muy relevante por cuanto da información de con cuánta frecuencia son superados los umbrales elegidos, que en muchos casos están asociados a situaciones nocivas para la calidad de vida, la infraestructura y la producción.

## 2.1.4 Elaboración de resultados y de conclusiones

Las conclusiones sobre los cambios climáticos se apoyan en los análisis de los cambios observados en los datos y en la literatura científica publicada por distintos autores en los casos en que existe. Este doble insumo, disminuye la posibilidad de adoptar conclusiones equivocadas a partir de errores en los datos o en su manejo y por lo tanto aumenta la confianza en las conclusiones.

A los resultados más relevantes y generales, se les ha asignado un nivel de confianza. Para ello se aplicó la metodología del IPCC que combina la disponibilidad y consistencia de las evidencias con el grado de acuerdo entre las mismas (IPCC, 2010). La evidencia más importante considerada han sido los resultados de los cambios observados calculados para este informe.

Los cambios entre determinados años se calcularon a partir del ajuste lineal de los datos, multiplicando la pendiente de la recta por el número de años. Los campos medios de temperatura y precipitación y sus cambios en el período 1960-2010 se presentan en mapas. El campo anual corresponde al promedio para la temperatura o el acumulado anual para la precipitación.

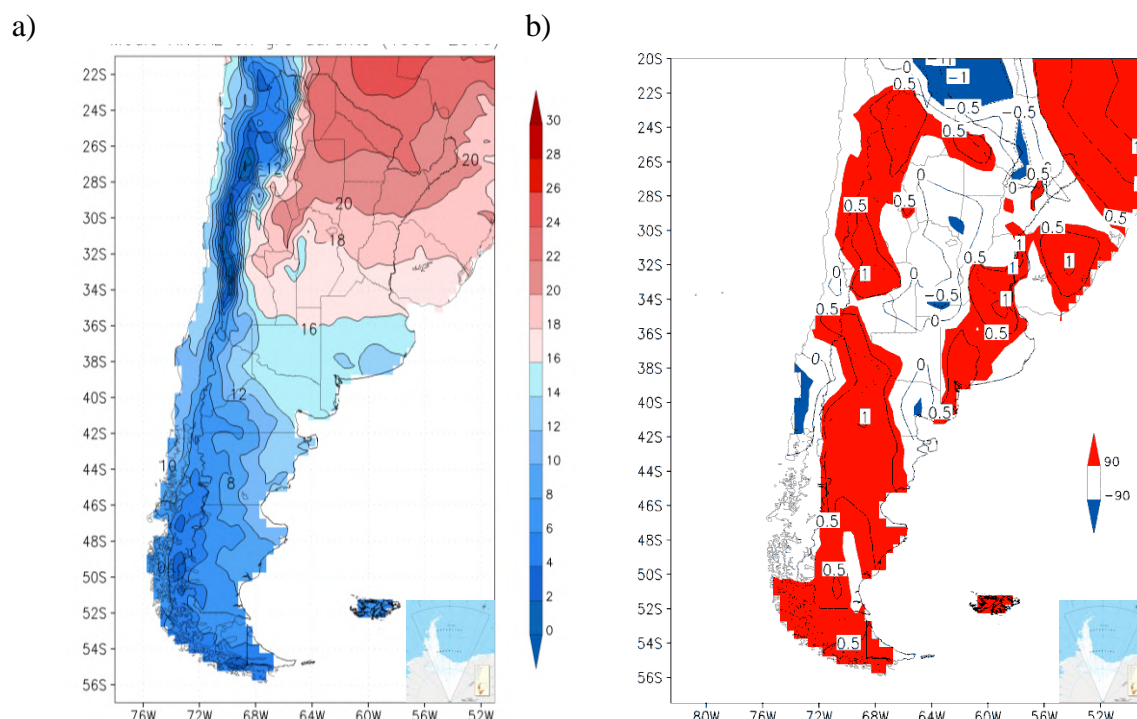
## 2.2 TEMPERATURA

### 2.2.1 Temperaturas medias

En la mayor parte del país se registró un aumento de temperatura menor a 1 °C desde 1960, pero en el centro del país este aumento fue mucho menor e incluso hubo algunas zonas con



enfriamiento, aunque muy pequeño. En la mayor parte de las áreas con calentamiento, este fue estadísticamente significativo, Figura 2.2.1, pero el promedio regional entre 1950 y 2010 fue bastante menor que el del promedio global sobre los continentes (IPCC, AR5, capítulo 2). Por otra parte, en una amplia zona de la Patagonia el calentamiento superó 1°C.



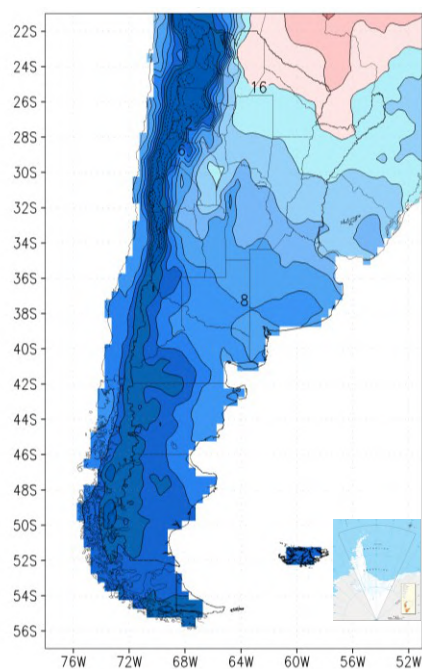
**Figura 2.2.1:** a) Campo medio de la temperatura media anual (contornos cada 2°C) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en °C para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia (contornos cada 0,5°C sombreado en rojo (azul) valores significativos con signo positivo (negativo))

En el país, al norte de la Patagonia, el aumento en la temperatura mínima ha sido más importante que en la temperatura máxima, en la que incluso se registraron descensos en la mayor parte de la región, Figuras 2.2.2 y 2.2.3 (Barrucand y Rusticucci 2001). El mayor aumento en las temperaturas mínimas es el esperado por el aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero. Pero en este caso se ha sumado el efecto de la mayor precipitación, Figura 2.3.1, que por la evaporación y por la nubosidad asociada favorecen el enfriamiento en las zonas con predominante buenas condiciones de insolación, propias de las temperaturas máximas.

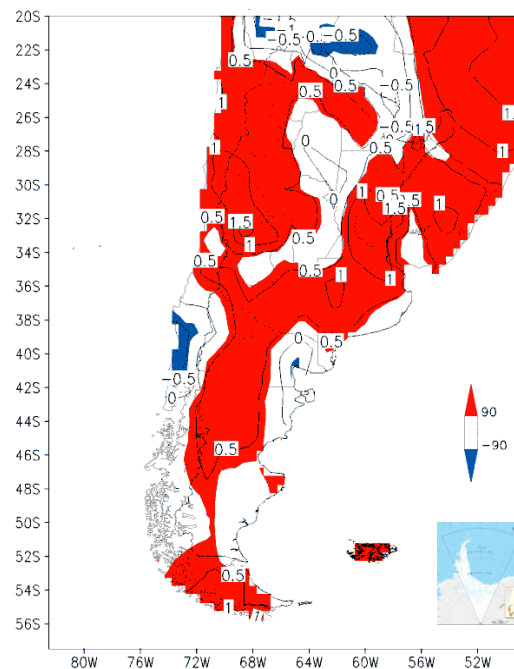
En la Patagonia, además de observarse un mayor aumento en la temperatura media, el cambio positivo en la temperatura máxima fue mayor y más extendido que en la mínima. Este es un indicio, entre otros, de que los cambios de temperatura en esta región han obedecido a un cambio en la circulación hemisférica y no solo al efecto invernadero.



a)

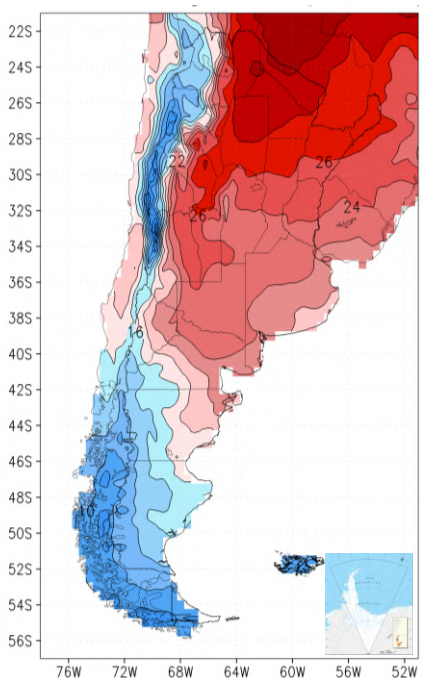


b)

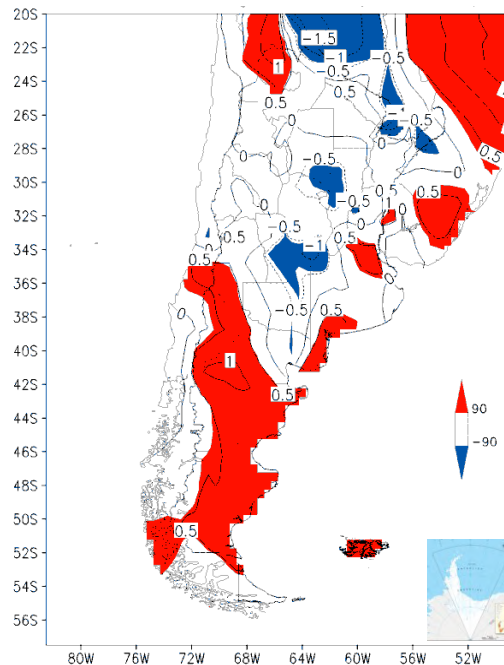


**Figura 2.2.2:** Ídem Figura 2.2.1, pero para la temperatura mínima media

a)



b)



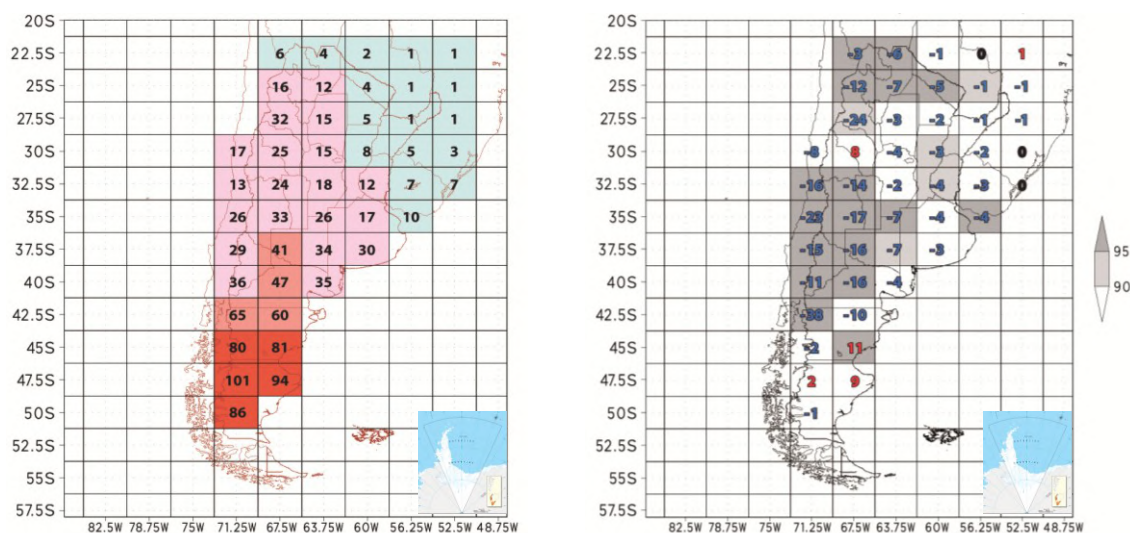
**Figura 2.2.3:** Ídem Figura 2.2.1, pero para temperatura máxima media

## 2.2.2 Índices extremos

El análisis de los índices que aquí se presentan es sobre aspectos generales de los cambios ocurridos en el país. Una discusión más detallada se hace en los capítulos regionales (5 a 8).

Las figuras 2.2.4 a 2.2.9 muestran en el panel izquierdo los valores medios del índice respectivo en el periodo 1960 - 2010 y en panel derecho el cambio del índice entre 1960 y 2010. En el caso de la Patagonia y en menor medida en la región Andina, los valores en varios puntos del retículo fueron calculados a partir de datos de una sola estación. Esta limitación debe tenerse presente en el uso de análisis de las tendencias de estos índices en esas regiones.

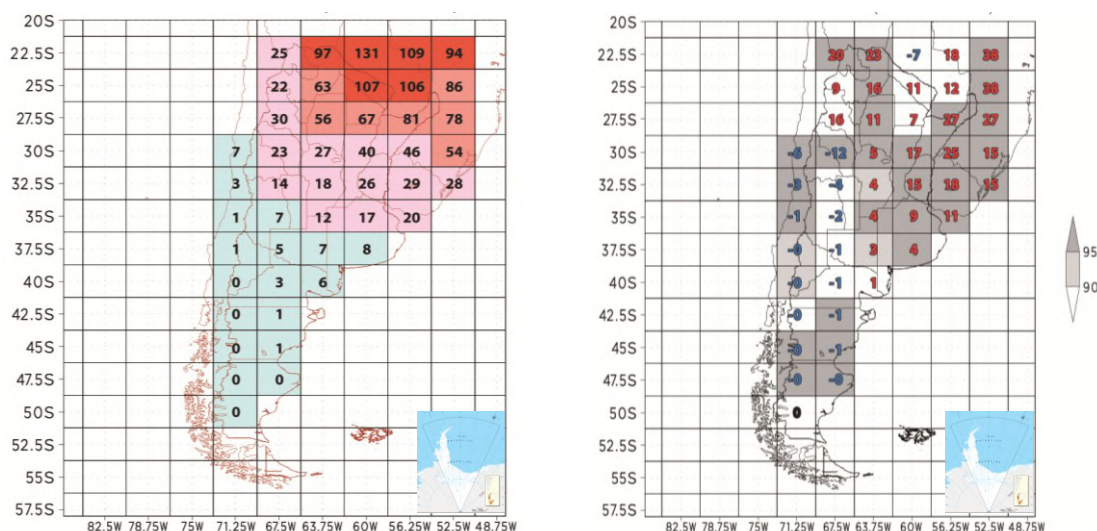
Los días con heladas han disminuido en casi todo el país y en gran parte del mismo en forma estadísticamente significativa, Figura 2.2.4. Ello ocurrió tanto en el noreste donde las heladas son poco frecuentes como en la mayor parte del oeste donde son más frecuentes debido a la mayor altura. En ambos casos, las heladas disminuyeron en general en un 30 % o más.



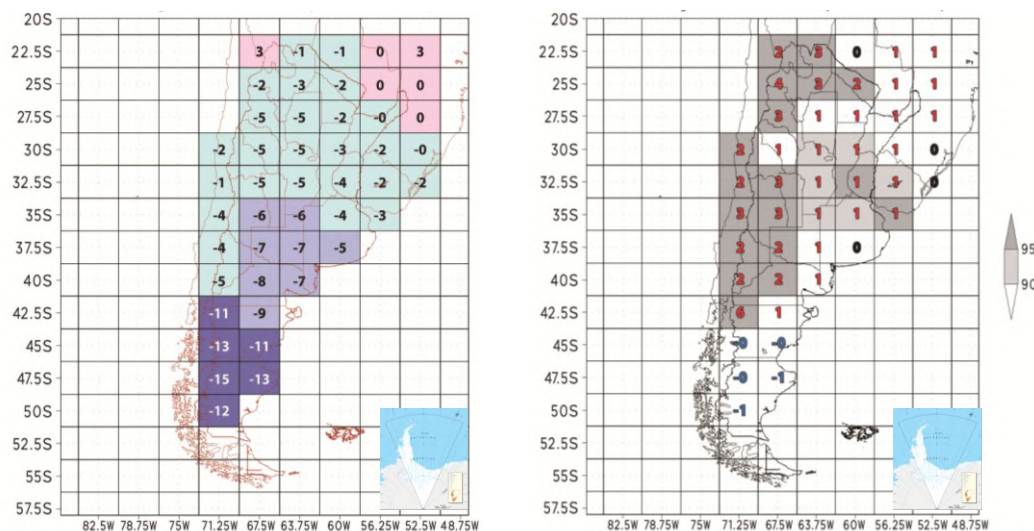
**Figura 2.2.4:** Panel izquierdo: número de días con heladas (FD). Panel derecho: cambios en el número de días con heladas; valores negativos en azul y positivos en rojo. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha

El número de noches cálidas aumentó en forma estadísticamente significativa en el norte y este del país. Disminuyó en Cuyo y Patagonia, aunque en estas dos regiones, o bien los casos han sido muy escasos o la disminución fue muy pequeña, Figura 2. 2 5 (Agosta y Barrucand 2012). Excepto en la Patagonia, el mínimo anual de la temperatura diaria aumentó en todo el país en más de 1°C y hasta 3 y 4°C en Cuyo y el noroeste, Figura 2.2.6. También las olas de calor aumentaron en el este y norte del país (Rusticucci et al 2014) y en la Patagonia, aunque en este último caso, esto carece de relevancia en los impactos por la forma en que se ha definido este índice, Figura 2.2.9.

Los cambios en el este y norte del país en todos los índices descritos en los dos párrafos precedentes son consistentes con el calentamiento observado en la temperatura media y mínima, Figuras 2.2.1 y 2.2.2. Los cambios en la Patagonia no son en este sentido tan concluyentes, pero cabe recordar la escasa información sobre la cual se han construido estos índices en esa región. Por el contrario, los dos índices derivados de las temperaturas máximas muestran un leve descenso en el este y norte del país, aumentos en la Patagonia y señales contradictorias en Cuyo, Figuras 2.2.7 y 2.2.8. La reducción de las máximas extremas en el este y norte del país estaría vinculada al aumento de la precipitación que durante días de alta temperatura tienden a morigerarla por la nubosidad que la acompaña, Figura 2.3.1.

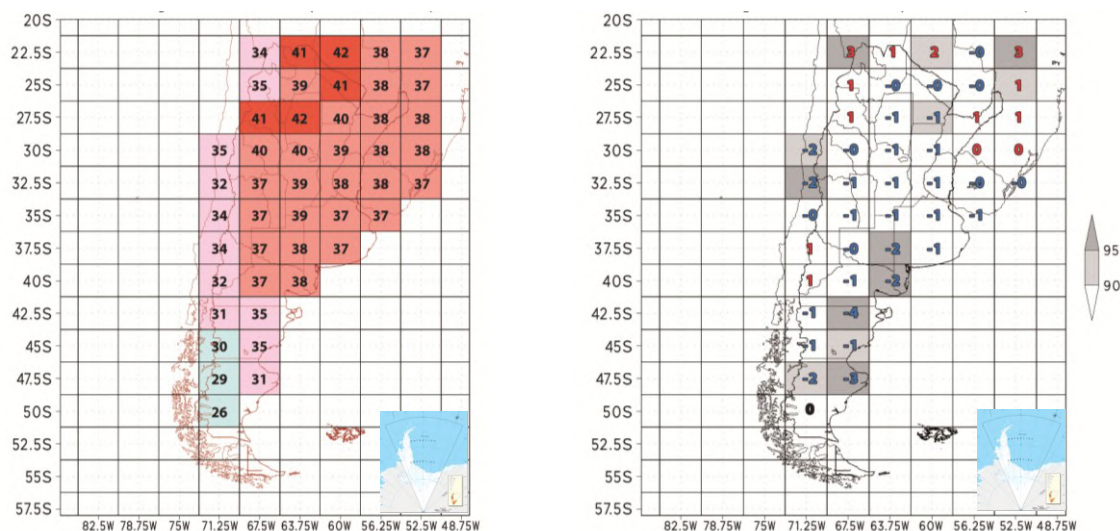


**Figura 2.2.5:** *Idem Figura 2.2.4, pero para el número de noches tropicales (TR)*

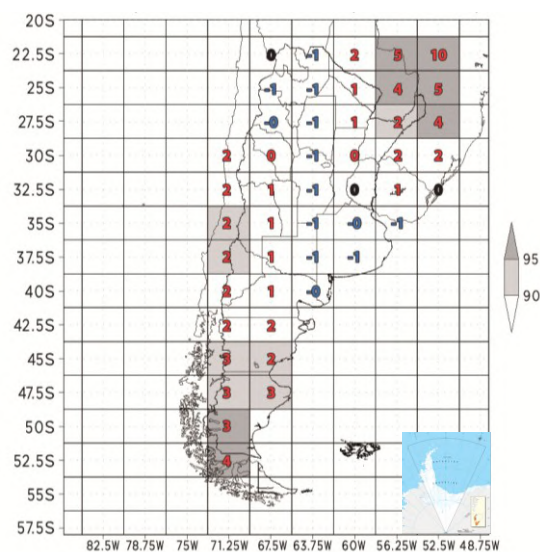


**Figura 2.2.6:** *Idem Figura 2.2.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima ( $TN_n$ ) en °C*

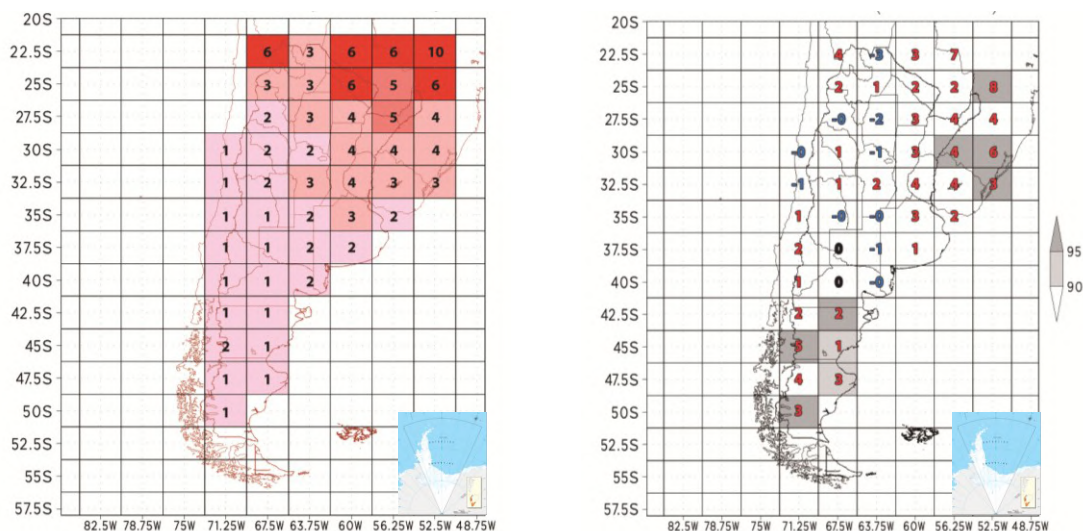




**Figura 2.2.7:** Ídem Figura 2.2.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima ( $TX_x$ ) en °C



**Figura 2.2.8:** Ídem Figura 2.2.4, pero para el porcentaje anual de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 ( $TX_{90p}$ ). NOTA: No se presenta el valor climatológico de este índice porque según su definición, es 10 para todos los puntos del retículo

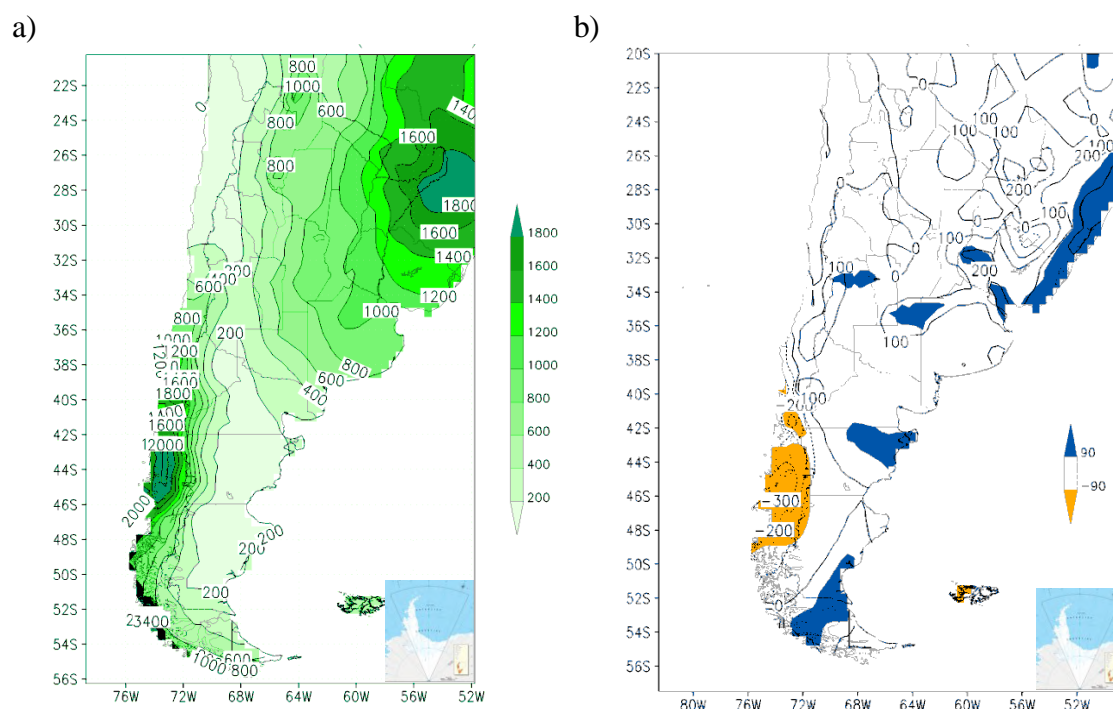


**Figura 2.2.9:** Ídem Figura 2.2.4, pero para la duración de olas de calor (WSDI)

## 2.3 PRECIPITACIÓN

### 2.3.1 Precipitación media anual

En el periodo 1960-2010 la precipitación aumentó en casi todo el país, Figura 2.3.1, a pesar de que la década del 2000-2010 fue relativamente seca (figuras 5.2.21, 6.21. y 7.2.2.1). Los mayores aumentos absolutos se registraron en el este del país, pero más relevantes resultaron los incrementos de más de 100 mm en algunas zonas semiáridas que implicaron aumentos porcentuales de más del 20 %. Por lo tanto tuvieron un efecto importante en el proceso de agriculturización de esas zonas (Castañeda y Barros 1994; Barros y otros 2000; Boulanger y otros 2005; Haylock y otros 2006; Barros y otros 2008; Doyle y otros 2012).



**Figura 2.3.1:** a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010. Cambios estadísticamente significativos en colores según escala

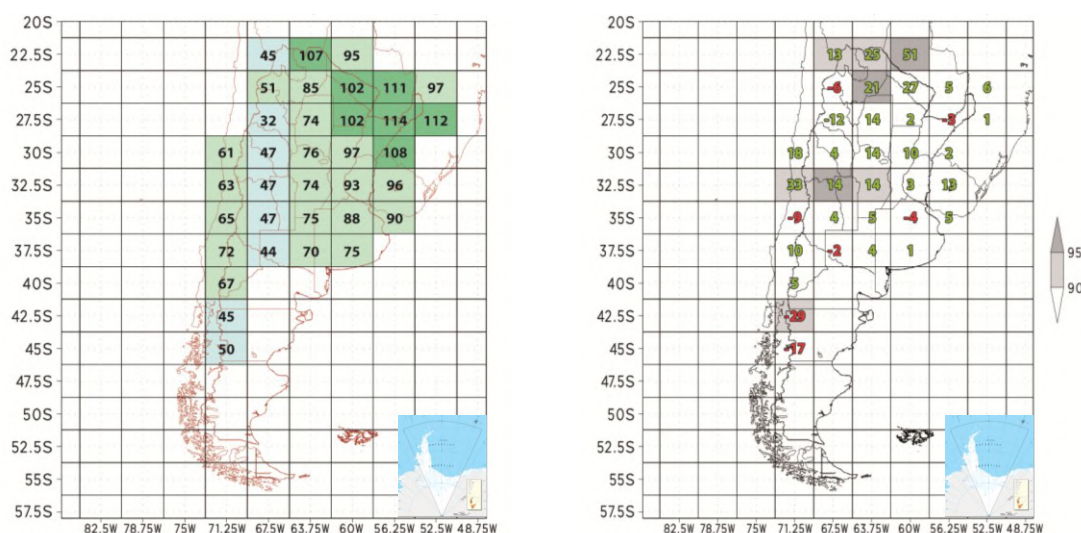
Sobre la cordillera patagónica las precipitaciones descendieron y lo mismo sucedió en los Andes cuyanos de acuerdo a la reducción de los caudales de los ríos en los últimos 100 años, aún a pesar del ostensible deshielo de los glaciares (Boninsegna 2014).

### 2.3.2 Índices extremos

Como en el caso de los índices de temperaturas extremas, el análisis de los índices relacionados con las precipitaciones extremas se concentra en los aspectos generales de los cambios ocurridos en el país ya que un mayor detalle regional se presenta en los capítulos 5 a 8. Igualmente, las

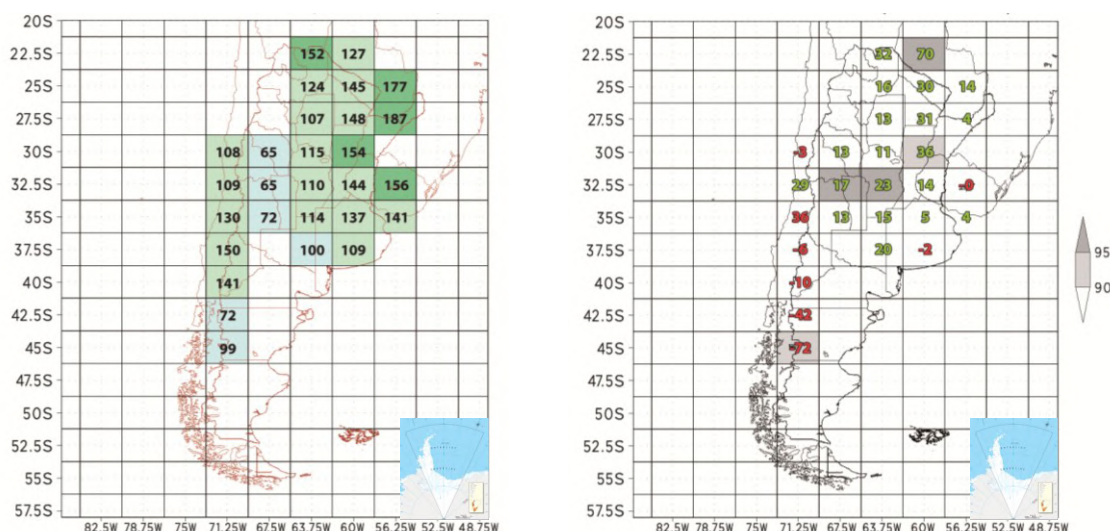
Figuras 2.3.2 a 2.3.5 muestran en el panel izquierdo los valores medios del índice respectivo en el periodo 1960 -2010 y en panel derecho el cambio que el índice experimentó entre 1960 y 2010.

La Figura 2.3.2 revela que la precipitación diaria máxima del año ha aumentado en casi todo el país, aunque solo en pocas zonas en forma significativa. Lo mismo ha ocurrido con las precipitaciones acumuladas de 5 días consecutivos, Figura 2.3.3 y con la precipitación anual acumulada de los casos de precipitaciones más altas, Figura 2.3.4. Los tres índices presentan una distribución geográfica muy similar y están indicando un cambio hacia precipitaciones más intensas. En consecuencia, no solo han aumentado las precipitaciones anuales en gran parte del país, Figura 2.3.1, sino que también han cambiado sus características, con mayor ocurrencia de lluvias más intensas (Re y Barros 2009, Penalba y Robledo 2010).

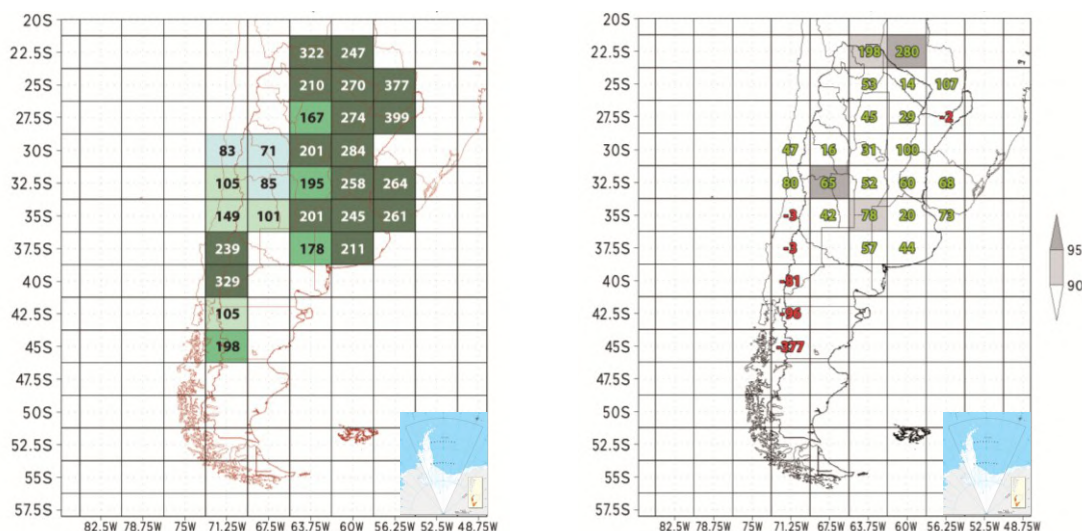


**Figura 2.3.2:** Panel izquierdo: precipitación diaria máxima del año (Rx1) en mm. Panel derecho: cambios en precipitación diaria máxima del año; valores negativos en rojo y positivos en verde. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha





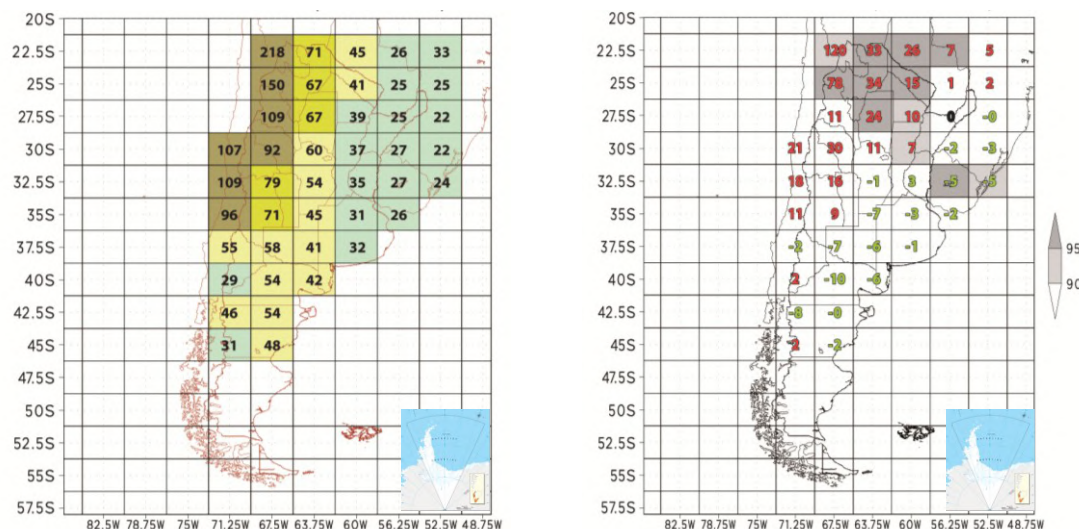
**Figura 2.3.3:** Ídem Figura 2.3.2, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos ( $R_{x5}$ ) en mm



**Figura 2.3.4:** Ídem Figura 2.3.2, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 ( $R_{95pT}$ ) en mm

La máxima duración de días en el año sin prácticamente precipitación ha disminuido en la Pampa húmeda y la Patagonia, Figura 2.3.5, consistentemente con el aumento de las precipitaciones anuales, Figura 2.3.1. En cambio en la región norte y oeste, estos periodos secos se han hecho más largos. En estas regiones, la escasa o nula precipitación en el invierno y el aumento de la racha máxima seca, está indicando un cambio hacia una prolongación del periodo seco invernal,

siendo notoriamente significativo y porcentualmente muy elevado en el norte argentino. Este cambio pudo haber sido un factor importante en las limitaciones en la provisión de agua potable en varias localidades, en un mayor estrés en las pasturas y en mayores condiciones favorables para la ocurrencia de incendios de bosques y pastizales.



**Figura 2.3.5:** Ídem Figura 2.3.2, pero para la máxima longitud de la racha seca (CDD)

## 2.4 CAMBIOS EN OTRAS VARIABLES

Con el desplazamiento del anticiclón del Atlántico Sur hacia el sur (Escobar y otros 2003) hubo aumentos en las frecuencias de vientos del sector este y sudeste sobre el Río de la Plata (Simionato y otros 2004) y del viento norte en el centro del país (Agosta y Compagnucci, 2012) con mayor aporte de humedad y calor desde latitudes tropicales en esta región.

La frecuencia de granizo aumentó en el norte de Argentina y en particular considerablemente en la provincia de Misiones en la que el número de eventos de granizo pasó de alrededor de 7 a 11 entre 1960 y 2010, aunque con una fuerte variabilidad interanual e interdecadal. Por el contrario la frecuencia de granizo tuvo una leve disminución en la zona central incluyendo el norte de Buenos Aires y las provincias de Córdoba y La Pampa (Mezher y otros 2012).

## 2.5 LIMITACIONES E INCERTEZAS

En gran parte del territorio argentino, hay pocas estaciones con series largas y suficientemente completas como para poder estimar tendencias climáticas de largo plazo. En particular es el caso del norte argentino y de la Patagonia. Esto limita de una manera importante la descripción espacial detallada, especialmente en las zonas montañosas donde los gradientes de precipitación y temperatura son grandes. Por lo tanto, los cambios observados que se presentan en este informe para esas regiones solo tienen validez de carácter regional y ello debe tenerse en cuenta al realizar estudios o interpretaciones a escala local. Para esto último, es útil el uso de proxy indicadores que

convenientemente analizados por especialistas pueden dar en ciertos casos información de cambios climáticos. El mejor ejemplo de esto es el retroceso de los glaciares que en general es un indicador del aumento de la temperatura, aunque en algunos casos puede estar relacionado con otras causas. En la Argentina, la recesión documentada de los glaciares es información no solo útil desde el punto de vista local, sino regional (Aniya et al 1996, Skvarka 2006, Le Quesne et al 2009). La generalizada recesión de los glaciares en los Andes cuyanos y patagónicos refuerza la estimación de las tendencias regionales al calentamiento sobre los mismos basada en la interpolación de las muy pocas estaciones con datos.

Una posible fuente de sobrestimación del calentamiento puede ser el efecto urbano, ya que la temperatura es en general mayor en las ciudades que en el ámbito rural y en general proporcional al tamaño de las mismas. Este efecto, llamado isla urbana de calor, puede aumentar con el crecimiento de la ciudad y producir en las series de estaciones localizadas en las ciudades o cerca de ellas tendencias al calentamiento adicionales a las propias de la región. En el capítulo 5 se hizo una comparación entre los mapas generados por la base CRU y otros en los que solo se utilizaron datos de aeropuertos para la región Húmeda. Estos últimos presentan en general, poco o ningún efecto urbano de la isla de calor. La comparación muestra que los datos CRU estarían sobrestimando la tendencia al calentamiento en las temperaturas mínimas y por consiguiente afectando también las temperaturas medias. Es muy posible que este tipo de error esté presente en otras regiones, pero los pocos datos provenientes de aeropuertos no permitieron hacer una comparación similar a la de la región Húmeda.

A pesar de los posibles errores en los cambios de temperatura, en la mayor parte del país estos errores no llegarían a cambiar el signo de los cambios observados según la base de datos CRU, salvo en las zonas donde estos cambios son muy pequeños.

Las tendencias de precipitación calculadas con dos bases diferentes, CRU y GPCC, presentan algunas diferencias porque no siempre utilizaron las mismas estaciones, usaron criterios distintos para la consideración y tratamiento de las series temporales de datos que no están absolutamente completas y utilizaron métodos de interpolación espacial distintos. La comparación de los cambios en la precipitación de ambas bases en las cuatro regiones (Capítulos 5 a 8) muestra algunas diferencias menores y solo en la Patagonia hay diferencias sustanciales, pero que son claramente el resultado de una inapropiada técnica de interpolación en la base GPCC. En consecuencia, se estima que el signo y la magnitud de los cambios observados según la base CRU son correctos, excepto en el signo donde son muy pequeños y no significativos.

## 2.6 CONCLUSIONES

**Exceptuando la Patagonia, en la mayor parte de la Argentina hubo un aumento de temperatura de hasta medio grado entre 1960 y 2010 (confianza media).** Estos cambios fueron menores que los observados a nivel global en las regiones continentales. En el centro del país hubo un menor aumento de temperatura e incluso disminuciones en algunas zonas. La temperatura mínima tuvo mayores aumentos que la temperatura máxima, la que tuvo disminuciones generalizadas en el centro del país.



**En la Patagonia el aumento de temperatura fue mayor que en el resto del país, llegando en algunas zonas a superar 1 °C (confianza media).** Este aumento probablemente sea atribuible además de al efecto invernadero, al cambio de la circulación de la atmósfera debido no solo al calentamiento global sino también a la reducción de la capa de ozono.

**Los cambios en el este y norte del país en los índices relacionados con las temperaturas extremas y en particular el de las olas de calor son consistentes con el calentamiento observado en la temperatura media y mínima (confianza alta).** La excepción son los índices derivados de las temperaturas máximas que muestran un leve descenso que estaría relacionado con el aumento de la precipitación.

**En el periodo 1960-2010 la precipitación aumentó en casi todo el país con variaciones interanuales (confianza alta).** Los mayores aumentos se registraron en el este del país con más de 200 mm en algunas zonas, pero los aumentos porcentuales fueron muy importantes en algunas zonas semiáridas. **Sobre los Andes patagónicos y cuyanos las precipitaciones tuvieron un cambio negativo en el periodo 1960 – 2010 (confianza alta).**

Según lo indican los índices vinculados a las precipitaciones extremas y la literatura científica, **entre 1960 y 2010 hubo un cambio hacia precipitaciones más intensas (confianza media) y frecuentes en gran parte del país (confianza alta).**

## Referencias

Agosta, E. A. y R. H. Compagnucci, 2012: Central West Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections. *J. Climate*, **25**, 1657–1677.

Agosta, E. A. y M. B. Barrucand, 2012: Condiciones medias de invierno y ondas cuasi-estacionarias de Rossby asociadas a la frecuencia invernal de noches frías y cálidas en Argentina subtropical. *Geoscientia* **37(2)**, 147–146.

Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P. Skvarka y G. Cassasa, 1996: Recent Glacier variations in Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, **29(1)**, 1–12.

Barros, V., M. E. Castañeda y M. Doyle, 2000: Recent precipitation trends in Southern South America to the East of the Andes: an indication of a mode of climatic variability, Capítulo del libro “Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates, Concepts, Methods, Problems”, *Springer*.

Barros, V., M. Doyle e I. A. Camilloni, 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol*, **93**, 19–33.

Boninsegna, J. A., 2014: Impacto del cambio climático en los oasis del oeste argentino. *Ciencia e Investigación*, **64** (1), 45–58.





Boulanger, J. P., O. Penalba, M. Rusticucci, F. Lafon y W. Vargas, 2005: Observed precipitation in the Parana-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections, *Clim. Dyn.*, **24**, 393–413.

Camilloni, I. y V. Barros, 1995: Influencia de la isla urbana de calor en la estimación de las tendencias seculares en Argentina Subtropical, *Geofísica Internacional*, **4**, 161–170.

Castañeda, E. y V. Barros 1994: Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al este de los Andes, *Meteorológica*, **19**, 23–32.

Donat, M. G., L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroya, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang y S. Kitching, 2013: Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2, *J. Geophys. Res.* **118**, 2098–2118.

Doyle, M., R. Saurral y V. Barros, 2012: Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. *Int. J. Climatol.*, **32**, 2149–2162.

Escobar, G., I. Camilloni y V. Barros, 2003: Desplazamiento del anticiclón subtropical del Atlántico Sur y su relación con el cambio de vientos sobre el estuario del Río de la Plata. *X Congreso latinoamericano e Ibérico de Meteorología*. La Habana, Cuba. (CD-ROM).

Haylock, M. R., T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. Anunciação, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. Garcia, A. M. Grimm, R. Jaildo dos Anjos, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. Molion, D. F. Moncunill, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. I. Santos, L. Trebejo y L. Vincent, 2006: Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *J. Climate*, **19**, 1490–1512.

IPCC 2010. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties.

Le Quesne, C., C. Acuña, J. Boninsegna, A. Rivera y J. Barichivich, 2009. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeoecology*, **281** (3-4), 234–244.

Mezher, R., M. Doyle y V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina, *Atmospheric Research*, **114–115**, 70–82.





Penalba, O. C. y F. Robledo, 2010: Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change* **98**, 531–550.

Re, M. y V. Barros, 2009: Extreme rainfalls in SE South America . *Climatic Change*, **96**, 119–136.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2004: Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, 4099–4107.

Rusticucci, M., J. Kyselý, G. Almeida y O. Lhotka, 2014: Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *In WCRP Conference for Latin America and the Caribbean*, Montevideo 2014, Accesible en: [http://www.cima.fcen.uba.ar/WCRP/docs/pdf/Abstract\\_M-Rusticucci.pdf](http://www.cima.fcen.uba.ar/WCRP/docs/pdf/Abstract_M-Rusticucci.pdf).

Schneider, U., 2013: GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor. Appl. Climatol.* **115**, 15–40.

Simionato, C., C. Vera y F. Siegesmund, 2004: Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Rio de La Plata. *Continental Shelf Research*.

Skvarka, P., 2006: En Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Estudio base para la Segunda Comunicación Nacional a la UNFCCC. Fundación e Instituto T. Di Tella, Buenos Aires, 129–146.



## **CAPÍTULO 3**

### **LA PROYECCION DEL CLIMA EN ARGENTINA PARA EL SIGLO XXI**

|              |  |         |
|--------------|--|---------|
| <b>3.1</b>   | <b>CONTEXTO</b>  | pág. 24 |
| <b>3.2</b>   | <b>LOS MODELOS CLIMÁTICOS</b>  | pág. 24 |
| <b>3.2.1</b> | <b>Características</b>   | pág. 24 |
| <b>3.2.2</b> | <b>Limitaciones</b>  | pág. 24 |
| <b>3.3</b>   | <b>EL USO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DEL CLIMA EN EL SIGLO XXI</b> | pág. 26 |
| <b>3.3.1</b> | <b>Horizontes temporales</b>   | pág. 26 |
| <b>3.3.2</b> | <b>Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI</b>                         | pág. 26 |
| <b>3.3.3</b> | <b>Disponibilidad de escenarios climáticos</b>                                       | pág. 26 |
| <b>3.3.4</b> | <b>Métricas para la validación de los modelos climáticos</b>                         | pág. 27 |
| <b>3.3.5</b> | <b>Proceso de validación</b>   | pág. 28 |
| 3.3.5.1      | <i>Climatología de referencia</i>  | pág. 28 |
| 3.3.5.2      | <i>Modelos climáticos globales evaluados</i>   | pág. 28 |
| 3.3.5.3      | <i>Validación de los MCGs</i>  | pág. 29 |
|              | <i>Temperatura</i>   | pág. 29 |
|              | <i>Precipitación</i>   | pág. 37 |
| 3.3.5.4      | <i>Modelos climáticos regionales evaluados</i>                                       | pág. 44 |
| 3.3.5.5      | <i>Validación de los MCRs</i>  | pág. 45 |
|              | <i>Temperatura</i>   | pág. 45 |
|              | <i>Precipitación</i>   | pág. 49 |
| 3.3.5.6      | <i>3.3.5.6 Validación del modelo MRI/JMA</i>   | pág. 56 |
| <b>3.3.6</b> | <b>Selección de modelos para el desarrollo de escenarios</b>                         | pág. 57 |
| <b>3.3.7</b> | <b>Corrección de los errores sistemáticos de los modelos</b>                         | pág. 60 |
| <b>3.3.8</b> | <b>Validación del método de corrección de errores sistemáticos</b>                   | pág. 61 |
| <b>3.4</b>   | <b>ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)</b>                                       | pág. 62 |
| <b>3.5</b>   | <b>EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b>                       | pág. 65 |
|              | <b>Referencias</b>   | pág. 66 |



## **LA PROYECCION DEL CLIMA EN ARGENTINA PARA EL SIGLO XXI**

### **3.1 CONTEXTO**

Los modelos climáticos constituyen la herramienta más confiable disponible en la actualidad para la generación de información acerca de las perspectivas climáticas futuras en la escala de decenios a un siglo en respuesta a acciones antrópicas o cambios naturales en los forzamientos externos del sistema climático.

### **3.2 LOS MODELOS CLIMÁTICOS**

#### **3.2.1 Características**

Un modelo climático global (MCG) es un complejo sistema de programas informáticos que representan numéricamente los procesos físicos (y en menor medida químicos y biológicos) que se producen en la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera. Es la herramienta más confiable actualmente disponible para simular el sistema climático y sus variaciones. Los MCGs se ejecutan en poderosas computadoras para realizar experimentos numéricos del sistema climático bajo distintas condiciones de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, de aerosoles de origen natural y antrópico, de la radiación solar y de otros efectos antrópicos sobre el clima como el cambio de uso del suelo.

Actualmente, los MCGs simulan el clima considerando un retículo tridimensional sobre la Tierra con una resolución horizontal en general de entre 60 y 200 Km, y de hasta 60 niveles verticales en la atmósfera y similarmente en el océano. Se ha verificado que estos modelos son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios registrados en el pasado reciente. Son por lo tanto una herramienta aceptable para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros, resultantes de hipótesis sobre futuras concentraciones de GEI.

La comunidad científica que desarrolla estos modelos y realiza los experimentos que alimentan los informes del IPCC ha elaborado pautas comunes y métodos de distribución pública de sus experimentos. Recientemente, han hecho disponibles un conjunto de simulaciones y escenarios climáticos que es conocido como CMIP5 (Taylor y otros, 2012). Una generación anterior de estas simulaciones de escenarios es conocida como CMIP3 (Meehl y otros, 2007).

#### **3.2.2 Limitaciones**

Muchos procesos físicos como los propios de las nubes, ocurren en escalas espaciales menores a las resueltas por los modelos y por lo tanto no pueden ser representados en forma adecuada. Esta es una de las fuentes de incerteza en las simulaciones del clima futuro basadas en las salidas de los MCGs. Otros procesos que presentan dificultades para ser representados son los vinculados con los mecanismos de flujos del vapor de agua y calor ente



la superficie y la atmósfera, así como la interacción entre las nubes y los aerosoles. Por esta razón, los distintos MCGs pueden proveer respuestas diferentes a un mismo forzamiento climático debido a las distintas formas en que modelan estos procesos.

Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. En particular, si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional del sur de América del Sur, sus errores en la cuantificación de la precipitación son importantes (ejemplo en Vera y otros, 2006). Los modelos del conjunto CMIP5 representan mejor la variabilidad climática de la región que los del conjunto anterior (CMIP3), pero sus errores son todavía muy importantes. A esos errores se los denomina de aquí en adelante sistemáticos, por cuanto se supone que se extenderían de igual modo a las simulaciones del clima futuro.

Otra limitación, que resulta en algunas regiones muy importante, es la baja resolución horizontal de los MCGs. Esto afecta particularmente en las regiones que presentan fuertes accidentes topográficos o contrastes térmicos. En nuestro caso esto es una fuente de errores en la simulación del clima en toda la zona andina y sus inmediaciones y en toda la región patagónica por la imposibilidad de representar adecuadamente a los Andes en los modelos con baja resolución espacial.

El problema de la baja resolución de los MCGs, se puede abordar con la utilización de modelos climáticos regionales (MCR) de más alta resolución que por su demanda computacional se los suele circunscribir a una determinada región. Como el clima regional está en permanente conexión con el del resto del planeta, este abordaje tiene sentido si la simulación del clima regional que el MCR realiza, incorpora información proveniente de un MCG. La estrategia que se utiliza es alimentar las condiciones de frontera del reticulado del MCR, cada determinados pasos de tiempo, con las salidas del MCG, proceso que se conoce como “anidado”. El CIMA tiene amplia experiencia en este tipo de técnicas como lo muestran algunas de sus publicaciones (por ej. Nuñez y otros 2009; Solman y Pessacg 2012).

La experiencia indica que, aunque en algunas zonas, en particular las montañosas, los MCR pueden mejorar las simulaciones climáticas de los MCGs, sus errores pueden ser todavía importantes. Por lo tanto las salidas de los MCRs también deben ser sujetas a validación y corrección de sus errores con las mismas técnicas que los MCGs. (Nuñez y otros 2005, Montroull y otros, 2012, Carril y otros 2012). En el caso de la Argentina, las posibles ventajas del uso de MCRs se ve limitada por el hecho de que sus salidas solo están disponibles para experimentos basados en el conjunto CMIP3. También puede utilizarse algún MCG que presente resoluciones tan altas como 20 Km, aunque ello no es la norma entre los MCGs disponibles.

### **3.3 EL USO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DEL CLIMA EN EL SIGLO XXI**

Se utilizan modelos climáticos para estimar los cambios climáticos en la Argentina continental. Sobre la Antártida, las islas del Océano Atlántico y el Mar Argentino, no hay suficientes datos para aplicar los métodos de corrección de los modelos. Para estas regiones se puede recurrir directamente a los modelos de la base datos.

#### **3.3.1 Horizontes temporales**

Los escenarios climáticos del siglo XXI fueron calculados sobre dos horizontes temporales: *clima futuro cercano* (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y *clima futuro lejano* (2075-2099), de carácter informativo sobre el largo plazo. Los periodos exactos fueron elegidos en función de las salidas de los MCGs y MCRs disponibles para la región.

#### **3.3.2 Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI**

Los resultados de los MCRs disponibles están basados en uno de los escenarios de emisiones de GEI usado por los modelos del CMIP3 (el llamado A1B), que es un escenario de emisiones entre moderado y alto, mientras que los resultados de los MCGs del CMIP5 se basan en escenarios representativos de trayectorias de concentración (sigla en inglés, RCP). Estos escenarios de concentración se distinguen por el forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado al que llegan en el año 2100...

Se elaboraron escenarios climáticos de dos escenarios RCP, 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas, pero no a un escenario de extrema mitigación del cambio climático como en el del RCP 2.6. En este último caso, los cambios serían semejantes al del escenario 4.5 en el horizonte temporal de futuro cercano y con escasos cambios adicionales hacia fin de siglo. Por esta razón, no se estudiaron los escenarios climáticos basados en el RCP 2.6 al considerar que no aportaría información adicional. Por otra parte, el escenario RCP 8.5 corresponde al caso extremo en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo. El escenario A1B es de emisiones en cierta forma intermedias entre las de los dos escenarios RCP pero no obstante se la considera en este Proyecto como un escenario de concentraciones diferente.

#### **3.3.3 Disponibilidad de escenarios climáticos**

En la base CMIP5 están accesibles simulaciones del siglo XX y proyecciones de escenarios climáticos del siglo XXI provenientes de unos 42 experimentos con MCGs. Previo a la validación de los modelos se realizó una selección tomando como criterio que estuvieran disponibles para los escenarios de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 y tuvieran salidas diarias de sus proyecciones. Dentro de los que cumplieron con estos requisitos, se seleccionaron 14 experimentos de casi otros tantos MCGs que presentaban una resolución horizontal de 2° o mayor.





En cuanto a los MCRs, están disponibles para la región, 11 experimentos de 7 MCRs anidados en MCGs del CMIP3 del proyecto europeo CLARIS, a los que se les aplicó el proceso de validación. Los experimentos disponibles anidados con MCGs para el siglo XX cubren en general el período 1961-1990. En relación a las proyecciones climáticas, las mismas abarcan en general dos períodos (2011-2040) y (2071-2100). Algunos MCRs del proyecto CLARIS tienen algunos experimentos continuos sobre todo el período (1961-2100).

### 3.3.4 Métricas para la validación de los modelos climáticos

Se elaboró una métrica para identificar cuáles de los modelos climáticos presentaban comportamientos muy erróneos y en qué regiones. Esta métrica se basa en una serie de indicadores que se describen a continuación.

Para cada modelo, se elaboraron mapas de los errores porcentuales para precipitación y temperatura media en la región sur de América del Sur, incluyendo toda la Argentina continental. Estos errores se calcularon con respecto a los datos observados de la base CRU (Ver sección 2.1.2) para el promedio anual y los trimestres de verano (DEF), invierno (JJA) y se promediaron en cada una de las cuatro regiones.

La métrica, en el caso de la temperatura media de cada MCG, incluye el error medio definido como:

$$\text{Error } T(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{MC}} - T_{\text{CRU}} \quad (1)$$

donde  $T_{\text{MC}}$  y  $T_{\text{CRU}}$  representan los promedios de cada región de verano (DEF), invierno (JJA) y anual de la temperatura de cada modelo climático (MC) y la base de datos CRU. Asimismo, se calcularon los coeficientes de correlación lineal entre el ciclo anual de la temperatura media regional de CRU y aquel derivado de cada MC ( $R_{\text{ciclo anual}}$ ). Para evaluar la variabilidad interanual de la temperatura representada por los MCGs, se calculó el cociente entre los desvíos estándar de la temperatura anual de cada modelo ( $\sigma T_{\text{MC}}$ ) y de referencia ( $\sigma T_{\text{CRU}}$ ).

Para la evaluación de la precipitación, se calculó el error porcentual según:

$$\text{Error } (\%) = ((pp_{\text{MC}} - pp_{\text{CRU}}) / pp_{\text{CRU}}) * 100 \quad (2)$$

donde  $pp_{\text{MC}}$  y  $pp_{\text{CRU}}$  son la precipitación de verano, invierno y anual estimada por cada MC y con la base de datos CRU, respectivamente.

Como algunas regiones pueden tener zonas con muy escasa precipitación anual y ello se extiende a muchas zonas en invierno, esto puede dar lugar a errores porcentuales muy importantes que sin embargo no reflejen un error sustancial. Por ello se complementó el análisis de los errores de la precipitación mediante los errores por diferencia obviando el análisis porcentual cuando el valor  $l$  es inferior a 100mm en el caso anual y a 50 mm en los casos estacionales según la expresión:

$$\text{Error } pp \text{ (mm)} = pp_{\text{MC}} - pp_{\text{CRU}} \quad (3)$$



Para cada variable de precipitación integrada en cada región y para cada modelo se correlacionó el ciclo anual medio del periodo de validación con el ciclo anual de los datos observados, ( $R_{\text{ciclo anual}}$ ) de modo de tener una indicación de cómo el modelo representa el ciclo anual medio.

Para estimar si los modelos presentan una variabilidad interanual del orden de la observada, para cada región y modelo se calculó el desvío estándar de la media anual de la precipitación y se lo comparó con el respectivo valor de los datos observados mediante el coeficiente de variación (CV) definido como:

$$CV = (\sigma_{ppMC} / pp_{MC}) / (\sigma_{ppCRU} / pp_{CRU}) \quad (4)$$

donde  $\sigma_{ppMC}$  y  $\sigma_{ppCRU}$  son los desvíos de la precipitación anual de cada MC y de la base CRU. Finalmente, se elaboró un índice único que permite comparar los modelos, que se describe en el Anexo I.

Dado que en general la confiabilidad de los resultados de los modelos climáticos aumenta con la escala espacial y temporal, los escenarios climáticos son más confiables en los valores medios que en los extremos y por lo tanto el uso de estos últimos para seleccionar los modelos climáticos puede llevar a eliminar modelos que representan mejor los campos medios. Por ello la validación de índices extremos se hizo en forma cualitativa mediante la comparación de tres índices extremos de 14 MCGs con datos observados. Este material se tuvo en cuenta, cuando aportó alguna información relevante para el juzgamiento experto al momento de seleccionar los modelos para la elaboración de los escenarios climáticos. Este aspecto se presenta en detalle en el Anexo II.

### 3.3.5 Proceso de validación

La confianza en la utilización de los modelos climáticos para el desarrollo de escenarios climáticos futuros se debe basar en una cuidadosa evaluación de su desempeño para representar el clima presente. En esta sección se analiza la habilidad del conjunto de los MCGs y los MCRs preseleccionados según se explicó en la sección 3.3.3, para simular el clima de Argentina con el objeto de identificar aquellos que reproducen más adecuadamente las características climáticas principales de la temperatura y la precipitación.

#### 3.3.5.1 Climatología de referencia

La evaluación de los MCGs y MCRs se realizó tomando como referencia del clima observado según datos de temperatura y precipitación mensual provistos en puntos de retícula con una resolución de  $0.5^\circ$  latitud x  $0.5^\circ$  longitud. Como se describió en las secciones 2.1 y 3.3.4, la base de datos considerada, es la conocida como CRU y el período de análisis para la evaluación fue el comprendido entre 1961 y 1990. En las Figuras 2.2.1 y 2.3.1 se muestran los campos medios de temperatura y precipitación anual derivados de los datos CRU, respecto de los cuales se realizaron las comparaciones para evaluar el desempeño de los modelos.

#### 3.3.5.2 Modelos climáticos globales evaluados

Se evaluaron 14 MCGs de la base CMIP5 (Stouffer y otros, 2011; Taylor y otros, 2012). Estos modelos se encuentran disponibles a través del Programa para el Diagnóstico e



Intercomparación de Modelos (PCMDI, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) y fueron utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), Cuadro 3.3.1.

| <b>Modelo</b>                  | <b>Institución</b>   | <b>Atmósfera –<br/>Resolución Horizontal<br/>(lat x lon)</b> |
|--------------------------------|--|--|
| <b>CCSM4 (2010)</b>            | NCAR, ESTADOS UNIDOS   | 0.9° x 1.25°   |
| <b>CMCC-CM (2009)</b>          | Centro Euro-Mediterraneo per<br>I Cambiamenti Climatici,<br>ITALIA | 0.75° x 0.75°  |
| <b>CNRM-CM5 (2010)</b>         | Centre National de<br>Recherches Meteorologiques,<br>FRANCIA       | 1.41° x 1.41°  |
| <b>CSIRO-Mk3.6.0 (2009)</b>    | CSIRO, AUSTRALIA   | 1.875°x 1.875°   |
| <b>GFDL-ESM2G (2011)</b>       | NOAA-GFDL, ESTADOS<br>UNIDOS                                       | 2°x 2.5°   |
| <b>HadGEM2-ES (2009)</b>       | Met Office Hadley Centre,<br>REINO UNIDO                           | 1.25° x 1.875°   |
| <b>HadGEM2-CC (2010)</b>       | Met Office Hadley Centre,<br>REINO UNIDO                           | 1.25° x 1.875°   |
| <b>INM-CM4 (2009)</b>          | Russian Institute for<br>Numerical Mathematics,<br>RUSIA           | 1.5° x 2°  |
| <b>IPSL-CM5A-LR<br/>(2010)</b> | Institut Pierre Simon Laplace,<br>FRANCIA                          | 1.9° x 3.75°   |
| <b>MIROC5 (2010)</b>           | Meteorological University of<br>Tokyo, JAPON                       | 1.40625° x 1.40625°  |
| <b>MPI-ESM-LR (2009)</b>       | Max Planck Institute for<br>Meteorology, ALEMANIA                  | ~1.8°  |
| <b>MPI-ESM-MR (2009)</b>       | Max Planck Institute for<br>Meteorology, ALEMANIA                  | ~1.8°  |
| <b>MRI-CGCM3 (2011)</b>        | Meteorological Research<br>Institute, JAPON                        | 1.1° x 1.2°  |
| <b>NorESM1-M (2011)</b>        | Norwegian Climate Centre,<br>NORUEGA                               | ~1.8° x 2.5°   |

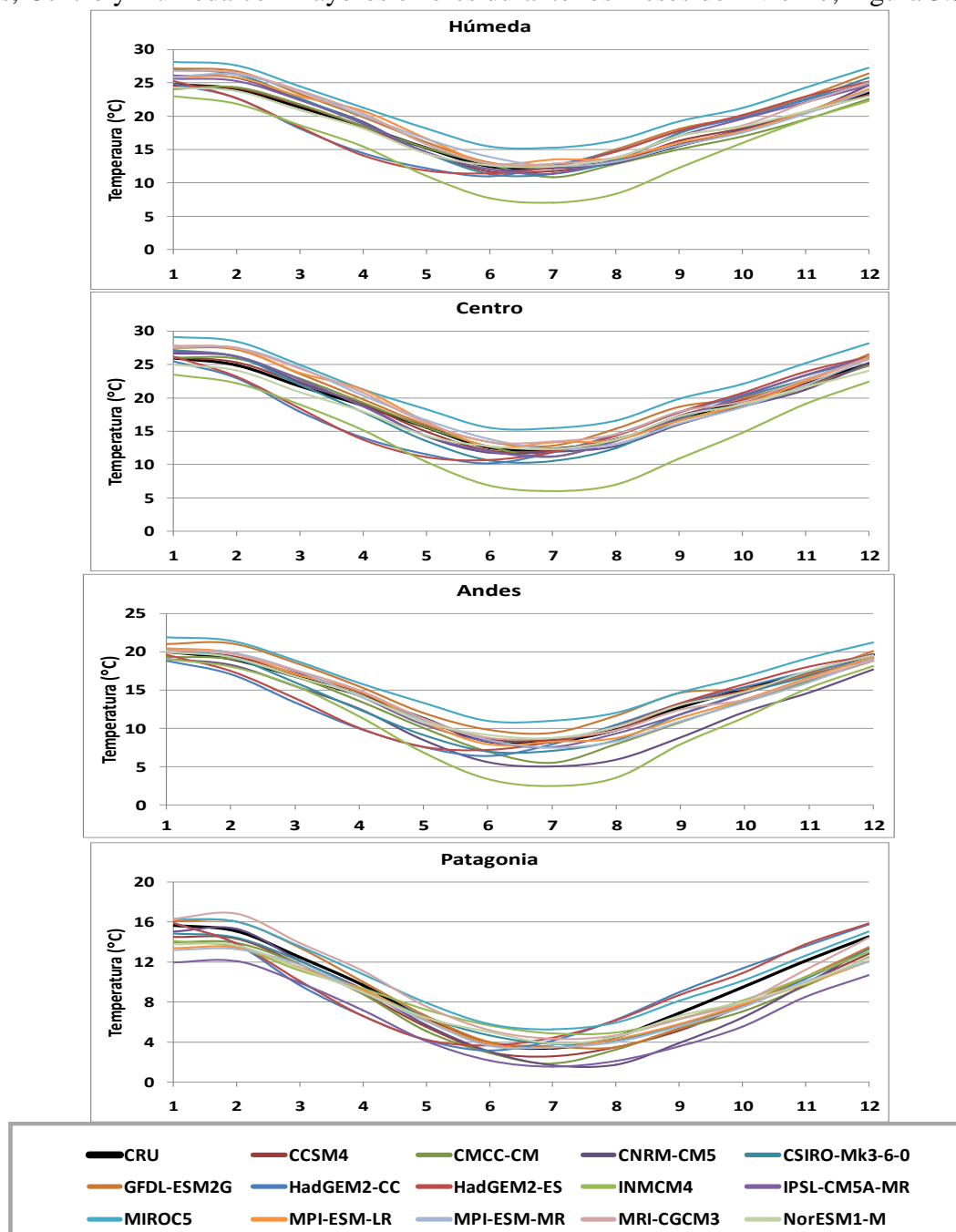
**Cuadro 3.3.1:** MCGs del CMIP5 usados con institución de origen y resolución horizontal

### 3.3.5.3 Validación de los MCGs

#### *Temperatura media*

La Figura 3.3.1 muestra el ciclo anual de temperatura de las simulaciones de cada MCG y de la base de datos CRU para las cuatro regiones, mientras que las Tablas 3.3.1 a 3.3.4 resumen los resultados de la evaluación de la temperatura media según los estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) computados para cada MCG y región. En general existe una buena

representación del ciclo anual por parte de los modelos analizados (Figura 3.3.1). Esto se hace evidente en los valores de los coeficientes de correlación lineal computados entre los ciclos anuales de cada MCG y CRU presentados en las Tablas 3.3.1 a 3.3.4. En todos los casos estos coeficientes son significativos estadísticamente para un nivel de confianza del 99%. No obstante ello, el modelo INMCM4 subestima en forma marcada la temperatura en las regiones Andes, Centro y Húmeda con mayores errores durante los meses de invierno, Figura 3.3.1.



**Figura 3.3.1:** Ciclo anual de temperatura media (°C) para cada una de las cuatro regiones consideradas de acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y para el conjunto de MCGs analizados (período 1961-90)



Con respecto al error de la temperatura anual, se encuentra que la mayor parte de los modelos (10 de 14) subestiman los valores anuales en la Patagonia, ocho lo hacen en la región Andes, Tabla 3.3.3, mientras que en las regiones Centro y Húmeda, la mayor parte de los modelos sobrestiman esta variable, Tablas 3.3.2 y 3.3.1. En el caso del error estacional (verano e invierno) se encuentra que excepto en Patagonia, en las restantes regiones la mayor parte de los MCGs sobrestiman la temperatura de verano mientras que durante el invierno los modelos que subestiman la temperatura son mayoritarios en las regiones Andes y Centro.

| Modelo        | Error $T_{\text{anual}}$ (°C) | Error $T_{\text{verano}}$ (°C) | Error $T_{\text{invierno}}$ (°C) | R ciclo anual | $\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$ |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|---|
| CCSM4         | -0,1                          | -0,2                           | -0,5                             | 1,00          | 1,00  |
| CMCC-CM       | -0,4                          | -0,5                           | -0,5                             | 0,99          | 0,98  |
| CNRM-CM5      | 0,4                           | 1,3                            | -0,3                             | 1,00          | 1,04  |
| CSIRO-Mk3-6-0 | 1,0                           | 2,2                            | -0,7                             | 0,99          | 1,07  |
| GFDL-ESM2G    | 1,8                           | 2,6                            | 0,9                              | 0,99          | 1,14  |
| HadGEM2-CC    | -0,3                          | 0,0                            | 0,1                              | 0,90          | 0,98  |
| HadGEM2-ES    | -0,2                          | 0,2                            | 0,2                              | 0,89          | 0,99  |
| INMCM4        | -3,0                          | -1,8                           | -5,0                             | 0,99          | 0,79  |
| IPSL-CM5A-MR  | 0,6                           | 1,0                            | -0,3                             | 0,99          | 1,05  |
| MIROC5        | 3,3                           | 3,5                            | 3,0                              | 1,00          | 1,23  |
| MPI-ESM-LR    | 0,9                           | 1,1                            | 0,7                              | 0,99          | 1,08  |
| MPI-ESM-MR    | 0,8                           | 1,2                            | 0,5                              | 0,98          | 1,07  |
| MRI-CGCM3     | 1,4                           | 2,0                            | 0,5                              | 1,00          | 1,09  |
| NorESM1-M     | 0,0                           | -0,5                           | 0,3                              | 0,99          | 1,00  |

**Tabla 3.3.1:** Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCGs para la región Húmeda

| Modelo        | Error $T_{\text{anual}}$ (°C) | Error $T_{\text{verano}}$ (°C) | Error $T_{\text{invierno}}$ (°C) | R ciclo anual | $\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$ |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|---|
| CCSM4         | 0,0                           | 0,1                            | -0,3                             | 1,00          | 1,00  |
| CMCC-CM       | 0,0                           | 0,3                            | -0,3                             | 0,99          | 1,02  |
| CNRM-CM5      | -0,3                          | 0,7                            | -0,7                             | 0,99          | 1,00  |
| CSIRO-Mk3-6-0 | -0,3                          | 1,1                            | -1,6                             | 1,00          | 0,99  |
| GFDL-ESM2G    | 1,2                           | 1,8                            | 1,0                              | 0,99          | 1,08  |
| HadGEM2-CC    | -1,1                          | -0,6                           | -0,7                             | 0,92          | 0,93  |
| HadGEM2-ES    | -0,9                          | -0,1                           | -0,6                             | 0,92          | 0,95  |
| INMCM4        | -4,3                          | -2,6                           | -6,3                             | 1,00          | 0,74  |
| IPSL-CM5A-MR  | 0,3                           | 1,1                            | -0,6                             | 1,00          | 1,02  |
| MIROC5        | 3,0                           | 3,3                            | 3,0                              | 1,00          | 1,19  |
| MPI-ESM-LR    | 0,9                           | 1,8                            | 0,4                              | 0,99          | 1,08  |
| MPI-ESM-MR    | 0,8                           | 1,6                            | 0,2                              | 0,98          | 1,06  |
| MRI-CGCM3     | 1,2                           | 1,7                            | 0,9                              | 0,99          | 1,08  |
| NorESM1-M     | -0,5                          | -1,0                           | 0,1                              | 1,00          | 0,97  |

**Tabla 3.3.3:** Ídem Tabla 3.3.1, pero para la región Centro





Con respecto a la variabilidad interanual, se observa que es subestimada por 11 sobre los 14 modelos analizados en la Patagonia mientras que es sobrestimada por la mayor parte de los MCGs en las regiones Centro y Húmeda, Tablas 3.3.1 a 3.3.4.

| Modelo               | Error $T_{\text{anual}}$<br>(°C) | Error $T_{\text{verano}}$ (°C) | Error $T_{\text{inv.}}$ (°C) | $R_{\text{ciclo anual}}$ | $\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$ |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|---|
| <b>CCSM4</b>         | 0,1                              | -0,1                           | 0,2                          | 1,00                     | 1,01  |
| <b>CMCC-CM</b>       | -1,2                             | -0,5                           | -2,0                         | 0,99                     | 0,93  |
| <b>CNRM-CM5</b>      | -2,4                             | -1,2                           | -3,3                         | 0,99                     | 0,83  |
| <b>CSIRO-Mk3-6-0</b> | -0,9                             | 0,0                            | -1,3                         | 1,00                     | 0,93  |
| <b>GFDL-ESM2G</b>    | 1,1                              | 1,1                            | 1,5                          | 0,99                     | 1,09  |
| <b>HadGEM2-CC</b>    | -1,3                             | -1,3                           | -0,5                         | 0,92                     | 0,90  |
| <b>HadGEM2-ES</b>    | -1,0                             | -0,7                           | -0,2                         | 0,93                     | 0,93  |
| <b>INMCM4</b>        | -3,3                             | -1,2                           | -5,6                         | 0,99                     | 0,75  |
| <b>IPSL-CM5A-MR</b>  | -0,1                             | 0,4                            | -0,4                         | 1,00                     | 1,00  |
| <b>MIROC5</b>        | 2,1                              | 1,9                            | 2,6                          | 1,00                     | 1,17  |
| <b>MPI-ESM-LR</b>    | -0,3                             | 0,3                            | -0,4                         | 0,99                     | 1,01  |
| <b>MPI-ESM-MR</b>    | -0,5                             | 0,1                            | -0,7                         | 0,98                     | 0,97  |
| <b>MRI-CGCM3</b>     | 0,0                              | 0,0                            | 0,3                          | 0,99                     | 1,01  |
| <b>NorESM1-M</b>     | 0,1                              | 0,0                            | 0,6                          | 1,00                     | 1,01  |

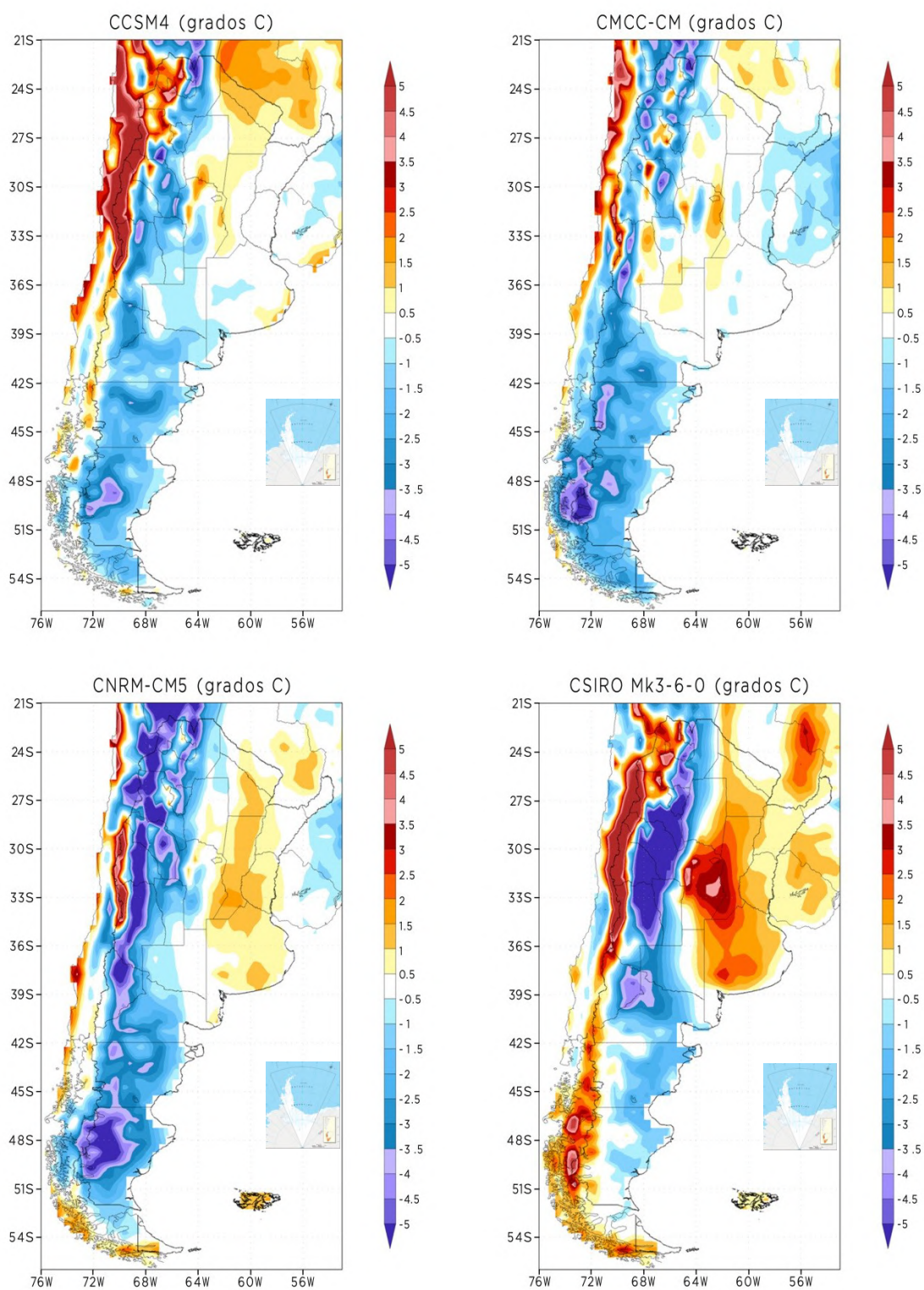
**Tabla 3.3.2:** Ídem 3.3.1, pero para la región Andes

| Modelo               | Error $T_{\text{anual}}$<br>(°C) | Error $T_{\text{verano}}$ (°C) | Error $T_{\text{invierno}}$ (°C) | $R_{\text{ciclo anual}}$ | $\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$ |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---|
| <b>CCSM4</b>         | -1,2                             | -1,2                           | -0,9                             | 0,99                     | 0,87  |
| <b>CMCC-CM</b>       | -1,5                             | -1,6                           | -1,2                             | 0,99                     | 0,84  |
| <b>CNRM-CM5</b>      | -1,4                             | -0,5                           | -1,7                             | 0,98                     | 0,85  |
| <b>CSIRO-Mk3-6-0</b> | -0,6                             | -0,9                           | 0,3                              | 0,98                     | 0,91  |
| <b>GFDL-ESM2G</b>    | -0,3                             | 0,1                            | -0,2                             | 0,98                     | 0,96  |
| <b>HadGEM2-CC</b>    | 0,0                              | 0,1                            | 0,6                              | 0,92                     | 0,98  |
| <b>HadGEM2-ES</b>    | 0,0                              | 0,1                            | 0,9                              | 0,92                     | 1,00  |
| <b>INMCM4</b>        | -0,4                             | -1,6                           | 1,3                              | 0,99                     | 0,93  |
| <b>IPSL-CM5A-MR</b>  | -2,9                             | -3,5                           | -2,0                             | 0,99                     | 0,67  |
| <b>MIROC5</b>        | 1,1                              | 0,7                            | 1,8                              | 1,00                     | 1,12  |
| <b>MPI-ESM-LR</b>    | -1,1                             | -2,1                           | -0,1                             | 0,99                     | 0,86  |
| <b>MPI-ESM-MR</b>    | -1,2                             | -2,2                           | -0,2                             | 0,99                     | 0,89  |
| <b>MRI-CGCM3</b>     | 0,5                              | 0,8                            | 0,8                              | 0,97                     | 1,05  |
| <b>NorESM1-M</b>     | -0,8                             | -1,8                           | 0,6                              | 0,99                     | 0,90  |

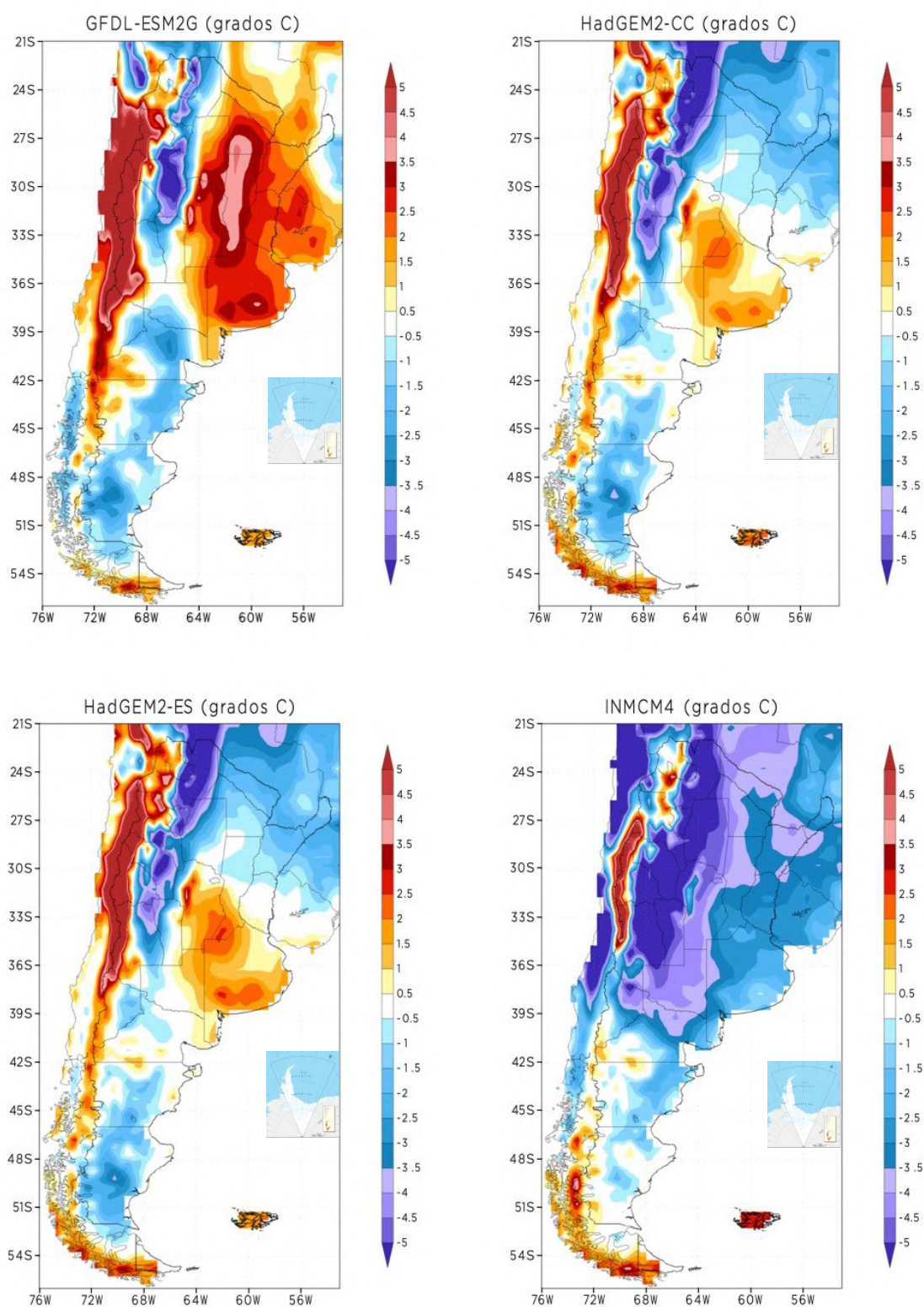
**Tabla 3.3.4:** Ídem Tabla 3.3.2, pero para la región Patagonia



La Figura 3.3.2 presenta los campos de error para la temperatura anual correspondientes a cada uno de los 14 MCGs analizados. Se encuentra que la mayor parte de los modelos subestima la temperatura en la región patagónica donde la temperatura simulada puede ser hasta 5°C inferior a la observada. En el centro-este del país por el contrario los MCGs sobrestiman la temperatura media en algunos casos superando en 5°C los valores de referencia aunque se destacan los modelos CCSM4 y CMCC-CC como los de mejor desempeño en esta región, con errores que prácticamente no superan 1°C. El modelo INMCM4 se caracteriza por simular temperaturas más bajas que las observadas en todo el país mientras que el MIROC5 presenta un comportamiento opuesto. De los resultados obtenidos, no se identifica un modelo climático individual que represente en forma adecuada la temperatura en todo el país lo que justifica el análisis regional presentado.

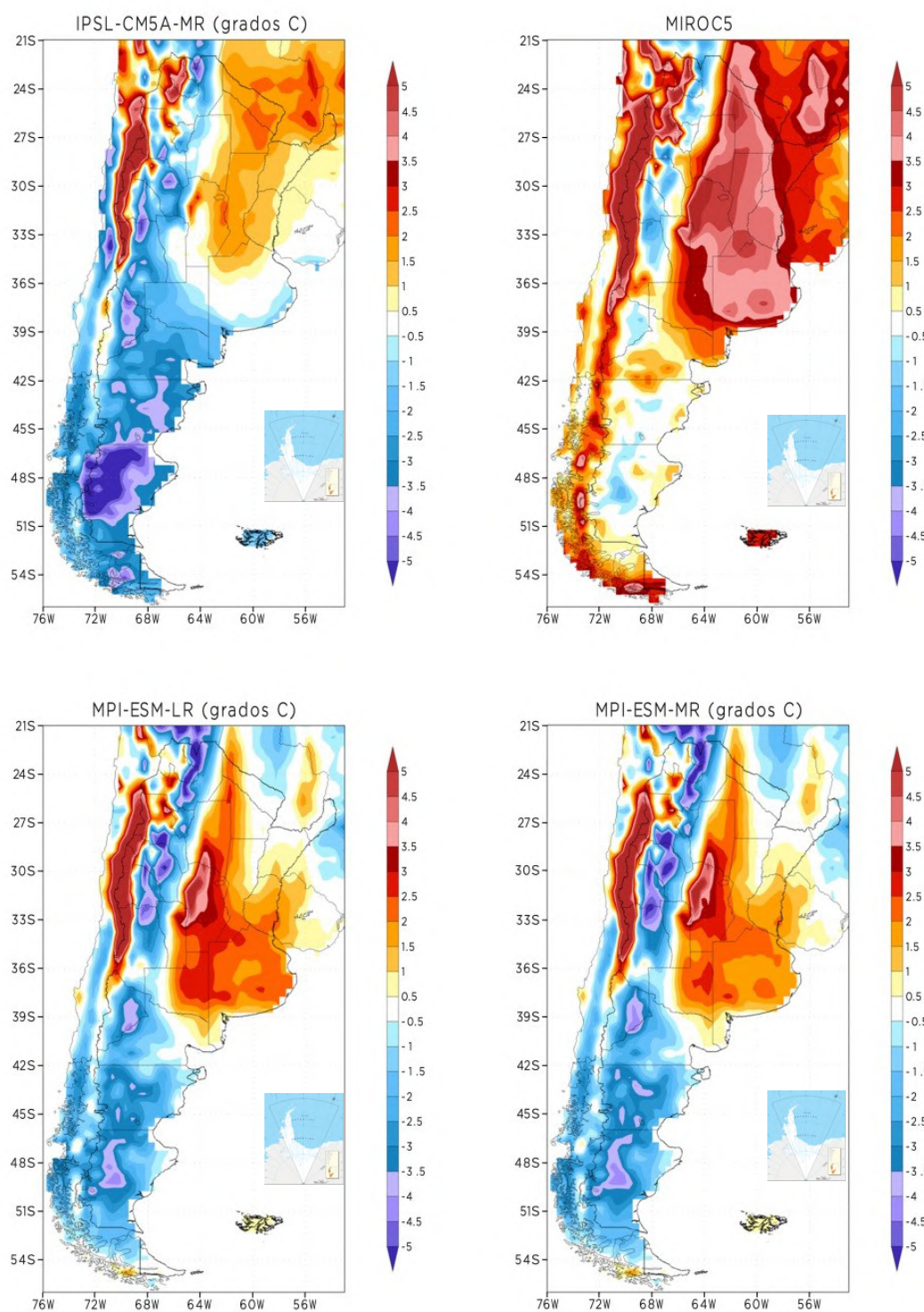


**Figura 3.3.2:** Error de temperatura anual (°C) para cada uno de los MCGs analizados



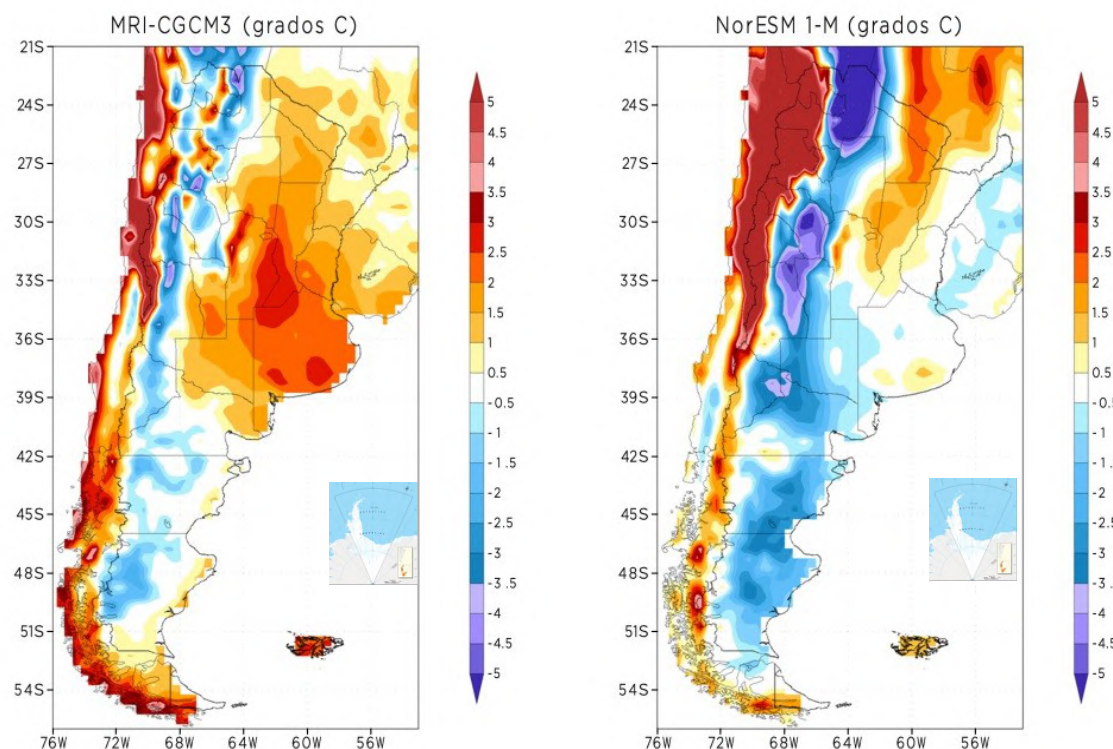
**Figura 3.3.2:** *Continuación*





**Figura 3.3.2:** *Continuación*





**Figura 3.3.2:** *Continuación*

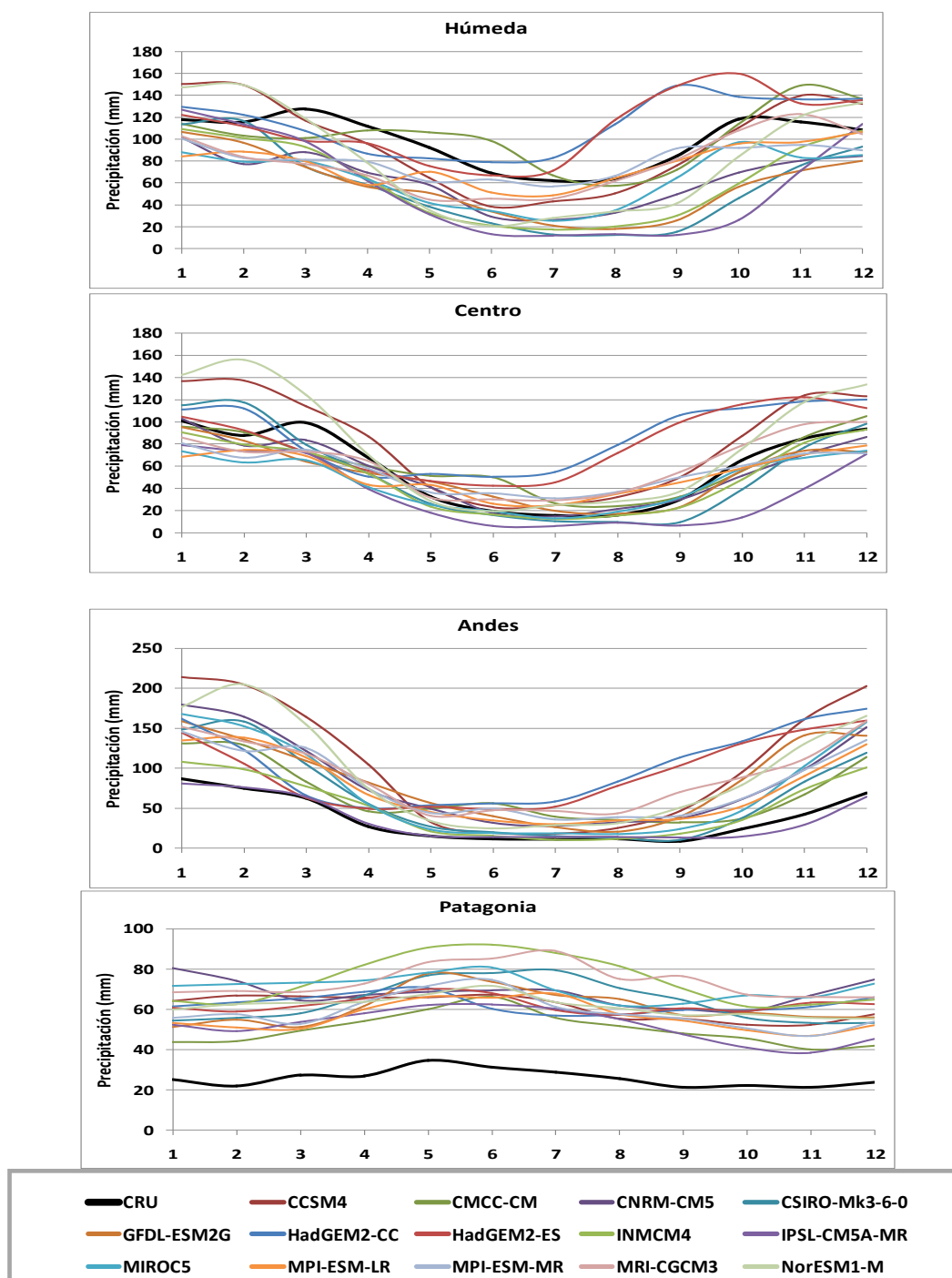
### *Precipitación*

La Figura 3.3.3 muestra el ciclo anual de precipitación derivado de las simulaciones de cada MCG y según la base de datos CRU para las cuatro regiones consideradas mientras que las Tablas 3.3.5 a 3.3.8 reseñan los estadísticos computados para esta variable para cada MCG y región. Del análisis de la representación del ciclo anual, se encuentra que todos los modelos presentan errores en la estimación de la precipitación en Patagonia que es sistemáticamente sobrestimada para todos los meses del año mientras que ocurre algo semejante en la región Andes. No obstante ello, los MCGs analizados muestran al igual que las observaciones, un mínimo en la precipitación durante el invierno. En la región Húmeda, por el contrario, se observa una tendencia a la subestimación de la precipitación por parte de la mayoría de los modelos evaluados. En prácticamente todos los casos, los coeficientes de correlación entre el ciclo anual observado y el simulado por cada MCG son estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 99%, Tablas 3.3.5 a 3.3.8.

En la Figura 3.3.4 se presenta el error porcentual de la precipitación anual para cada uno de los MCGs, calculado sólo en aquellas regiones donde la precipitación anual de referencia supera los 100 mm (sección 3.3.4). En la Figura 3.3.5 se muestra el error absoluto de cada MCG. Se encuentra que la mayor parte de los modelos tiene un patrón de error semejante con sobrestimación de la precipitación a lo largo de la parte oeste del país y Patagonia y subestimación en el centro-este, principalmente en la provincia de Buenos Aires.

En las regiones Centro y en particular en la Húmeda, la mayor parte de los modelos subestiman la precipitación y sobrestiman la variabilidad interanual, Tablas 3.3.6 y 3.3.5. En

la región Andes, Tabla 3.3.7, la sobrestimación de la lluvia es notoria en prácticamente todos los modelos y a nivel anual y estacional aunque en este caso la variabilidad interanual es inferior a la de la base de datos de referencia.



**Figura 3.3.3:** Ciclo anual de precipitación (mm) para cada una de las cuatro regiones consideradas de acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y para el conjunto de MCGs analizados (período 1961-90)



La Tabla 3.3.8 confirma la sobrestimación de la precipitación con valores de error absolutos positivos en Patagonia así como coeficientes de variación mayores a 1 que indican que los modelos muestran mayor variabilidad interanual que la observada.

| Modelo       | Error pp <sub>anual</sub> |       | Error pp <sub>verano</sub> |       | Error pp <sub>invierno</sub> |       | R <sub>ciclo</sub><br>anual | CV   |
|--------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------|------|
|              | (mm)                      | (%)   | (mm)                       | (%)   | (mm)                         | (%)   |                             |      |
| CCSM4        | -19,8                     | -1,7  | 90,7                       | 27,0  | -62,3                        | -32,2 | 0,89                        | 0,71 |
| CMCC-CM      | 40,4                      | 3,4   | 13,0                       | 3,9   | 28,2                         | 14,6  | 0,72                        | 0,73 |
| CNRM-CM5     | -420,1                    | -35,3 | -77,1                      | -23,0 | -106,8                       | -55,2 | 0,93                        | 1,41 |
| CSIRO-Mk3-6  | -505,7                    | -42,5 | -17,2                      | -5,1  | -147,9                       | -76,5 | 0,79                        | 1,76 |
| GFDL-ESM2G   | -494,4                    | -41,6 | -55,1                      | -16,4 | -123,5                       | -63,9 | 0,83                        | 1,70 |
| HadGEM2-CC   | 177,9                     | 15,0  | 46,7                       | 13,9  | 80,7                         | 41,8  | 0,44*                       | 0,92 |
| HadGEM2-ES   | 149,7                     | 12,6  | 30,1                       | 9,0   | 61,0                         | 31,6  | 0,44*                       | 0,69 |
| INMCM4       | -439,1                    | -36,9 | -21,2                      | -6,3  | -137,9                       | -71,3 | 0,87                        | 1,49 |
| IPSL-CM5A-MR | -493,2                    | -41,5 | 14,4                       | 4,3   | -158,6                       | -82,0 | 0,75                        | 1,67 |
| MIROC5       | -410,0                    | -34,5 | -87,1                      | -25,9 | -101,5                       | -52,5 | 0,91                        | 1,59 |
| MPI-ESM-LR   | -261,6                    | -22,0 | -60,0                      | -17,9 | -31,4                        | -16,2 | 0,70                        | 1,09 |
| MPI-ESM-MR   | -227,0                    | -19,1 | -69,4                      | -20,7 | -8,1                         | -4,2  | 0,73                        | 1,03 |
| MRI-CGCM3    | -241,2                    | -20,3 | -48,6                      | -14,5 | -42,3                        | -21,9 | 0,71                        | 1,14 |
| NorESM1-M    | -194,6                    | -16,4 | 88,8                       | 26,4  | -113,1                       | -58,5 | 0,85                        | 0,80 |

**Tabla 3.3.5:** Métricas de evaluación de la precipitación simulada por los MCGs para región Húmeda (<sup>#</sup> indica que R<sub>ciclo anual</sub> no es significativo)

| Modelo       | Error pp <sub>anual</sub> |       | Error pp <sub>verano</sub> |       | Error pp <sub>invierno</sub> |       | R <sub>ciclo</sub><br>anual | CV   |
|--------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------|------|
|              | (mm)                      | (%)   | (mm)                       | (%)   | (mm)                         | (%)   |                             |      |
| CCSM4        | 267,7                     | 37,5  | 112,8                      | 40,4  | 31,0                         | 63,9  | 0,98                        | 0,61 |
| CMCC-CM      | 38,6                      | 5,4   | 8,3                        | 3,0   | 50,2                         | 103,5 | 0,91                        | 1,10 |
| CNRM-CM5     | -54,7                     | -7,7  | -16,1                      | -5,8  | 3,8                          | 7,9   | 0,98                        | 1,12 |
| CSIRO-Mk3-6  | -60,9                     | -8,5  | 46,1                       | 16,5  | -15,0                        | -30,9 | 0,93                        | 1,14 |
| GFDL-ESM2G   | -75,0                     | -10,5 | -31,8                      | -11,4 | 18,2                         | 37,4  | 0,94                        | 1,20 |
| HadGEM2-CC   | 328,7                     | 46,1  | 55,6                       | 20,0  | 136,0                        | 280,1 | 0,58                        | 0,82 |
| HadGEM2-ES   | 269,1                     | 37,7  | 25,2                       | 9,0   | 110,3                        | 227,3 | 0,61                        | 0,63 |
| INMCM4       | -104,2                    | -14,6 | -18,4                      | -6,6  | -6,8                         | -14,0 | 0,98                        | 1,31 |
| IPSL-CM5A-MR | -278,6                    | -39,0 | -58,2                      | -20,9 | -30,3                        | -62,3 | 0,91                        | 2,14 |
| MIROC5       | -160,9                    | -22,5 | -71,6                      | -25,7 | 0,4                          | 0,9   | 0,97                        | 1,57 |
| MPI-ESM-LR   | -74,9                     | -10,5 | -60,9                      | -21,8 | 35,6                         | 73,3  | 0,93                        | 1,31 |
| MPI-ESM-MR   | -38,3                     | -5,4  | -63,6                      | -22,8 | 53,0                         | 109,1 | 0,98                        | 1,22 |
| MRI-CGCM3    | 42,2                      | 5,9   | -25,1                      | -9,0  | 44,9                         | 92,4  | 0,90                        | 0,91 |
| NorESM1-M    | 245,8                     | 34,4  | 146,6                      | 52,6  | 22,2                         | 45,7  | 0,96                        | 0,66 |

**Tabla 3.3.6:** Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Centro



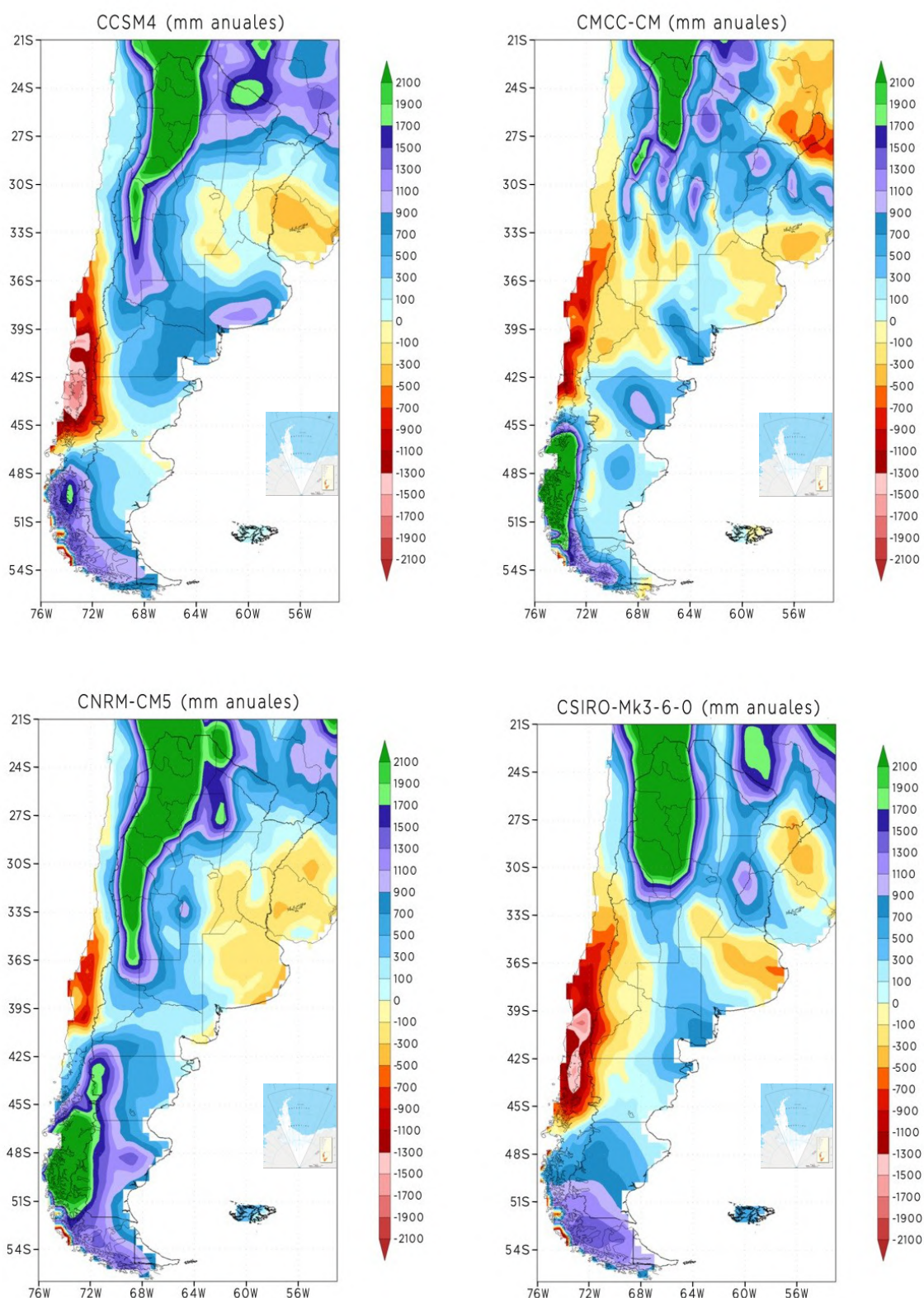
| Modelo       | Error pp <sub>anual</sub> |       | Error pp <sub>verano</sub> |       | Error pp <sub>invierno</sub> |       | R <sub>ciclo</sub><br>anual | CV   |
|--------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------|------|
|              | (mm)                      | (%)   | (mm)                       | (%)   | (mm)                         | (%)   |                             |      |
| CCSM4        | 845,8                     | 189,9 | 382,0                      | 167,1 | 29,6                         | 91,1  | 0,96                        | 0,57 |
| CMCC-CM      | 375,1                     | 84,2  | 140,0                      | 61,2  | 96,8                         | 297,9 | 0,96                        | 0,65 |
| CNRM-CM5     | 582,1                     | 130,7 | 257,0                      | 112,4 | 58,5                         | 180,1 | 0,99                        | 0,49 |
| CSIRO-Mk3-6  | 347,9                     | 78,1  | 190,1                      | 83,1  | 13,9                         | 42,7  | 0,99                        | 0,55 |
| GFDL-ESM2G   | 591,3                     | 132,8 | 199,8                      | 87,4  | 52,7                         | 162,2 | 0,92                        | 0,55 |
| HadGEM2-CC   | 789,8                     | 177,3 | 219,5                      | 96,0  | 165,4                        | 508,7 | 0,59                        | 0,53 |
| HadGEM2-ES   | 691,3                     | 155,2 | 172,4                      | 75,4  | 146,5                        | 450,7 | 0,56                        | 0,50 |
| INMCM4       | 178,1                     | 40,0  | 76,6                       | 33,5  | 2,8                          | 8,7   | 0,98                        | 0,65 |
| IPSL-CM5A-MR | -15,7                     | -3,5  | -11,1                      | -4,8  | 7,7                          | 23,7  | 0,98                        | 0,97 |
| MIROC5       | 457,0                     | 102,6 | 241,1                      | 105,4 | 20,7                         | 63,7  | 0,99                        | 0,67 |
| MPI-ESM-LR   | 462,2                     | 103,8 | 167,8                      | 73,4  | 66,1                         | 203,5 | 0,99                        | 0,56 |
| MPI-ESM-MR   | 527,1                     | 118,4 | 167,2                      | 73,1  | 91,2                         | 280,5 | 0,98                        | 0,59 |
| MRI-CGCM3    | 646,7                     | 145,2 | 208,9                      | 91,4  | 104,2                        | 320,7 | 0,94                        | 0,51 |
| NorESM1-M    | 711,5                     | 159,8 | 309,3                      | 135,3 | 51,2                         | 157,5 | 0,97                        | 0,58 |

**Tabla 3.3.7:** Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Andes

| Modelo       | Error pp <sub>anual</sub> |       | Error pp <sub>verano</sub> |       | Error pp <sub>invierno</sub> |       | R <sub>ciclo</sub><br>anual | CV   |
|--------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------------|------|
|              | (mm)                      | (%)   | (mm)                       | (%)   | (mm)                         | (%)   |                             |      |
| CCSM4        | 423,3                     | 136,1 | 117,1                      | 166,4 | 101,9                        | 119,0 | 0,66                        | 1,80 |
| CMCC-CM      | 291,1                     | 93,6  | 58,8                       | -31,1 | 89,5                         | 104,5 | 0,85                        | 1,77 |
| CNRM-CM5     | 506,3                     | 162,8 | 156,4                      | 75,6  | 117,0                        | 136,6 | 0,12 <sup>#</sup>           | 1,89 |
| CSIRO-Mk3-6  | 457,2                     | 147,0 | 91,8                       | -28,5 | 144,5                        | 168,8 | 0,77                        | 1,74 |
| GFDL-ESM2G   | 420,3                     | 135,1 | 90,1                       | -1,1  | 121,9                        | 142,3 | 0,77                        | 1,79 |
| HadGEM2-CC   | 440,8                     | 141,7 | 117,8                      | 17,3  | 90,2                         | 105,3 | 0,34 <sup>#</sup>           | 1,84 |
| HadGEM2-ES   | 437,5                     | 140,6 | 109,7                      | -4,3  | 100,4                        | 117,2 | 0,68                        | 1,65 |
| INMCM4       | 581,9                     | 187,0 | 121,2                      | 6,4   | 178,9                        | 208,9 | 0,86                        | 2,09 |
| IPSL-CM5A-MR | 315,6                     | 101,4 | 75,5                       | -23,8 | 93,4                         | 109,1 | 0,88                        | 1,50 |
| MIROC5       | 541,2                     | 174,0 | 145,1                      | 47,7  | 127,7                        | 149,2 | 0,69                        | 1,81 |
| MPI-ESM-LR   | 365,2                     | 117,4 | 85,0                       | -27,9 | 107,4                        | 125,4 | 0,84                        | 1,79 |
| MPI-ESM-MR   | 391,8                     | 125,9 | 95,5                       | 6,8   | 109,1                        | 127,4 | 0,86                        | 1,65 |
| MRI-CGCM3    | 578,2                     | 185,9 | 131,9                      | 21,9  | 165,8                        | 193,7 | 0,71                        | 1,97 |
| NorESM1-M    | 428,8                     | 137,8 | 105,9                      | -12,8 | 111,7                        | 130,5 | 0,84                        | 1,71 |

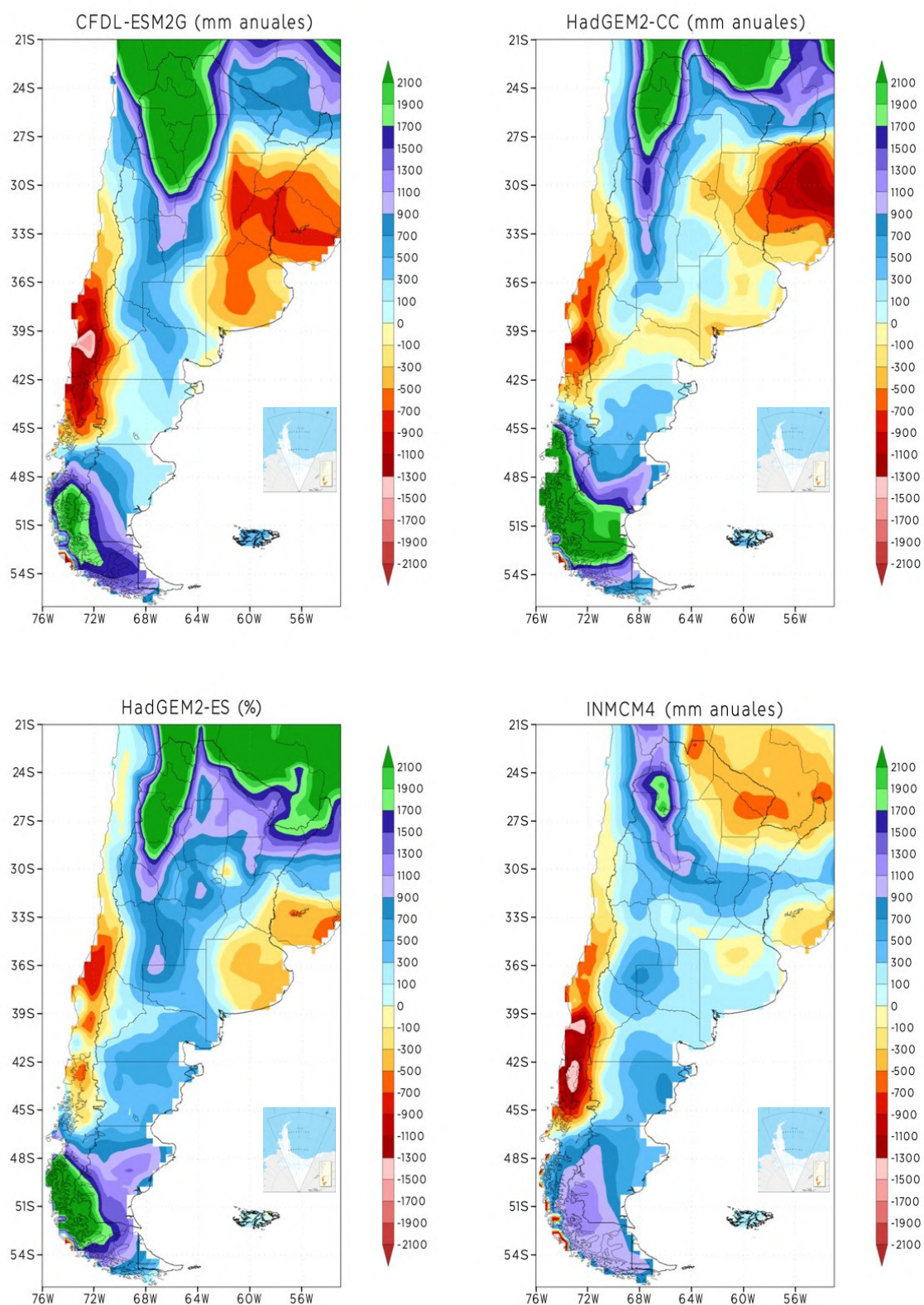
**Tabla 3.3.8:** Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Patagonia



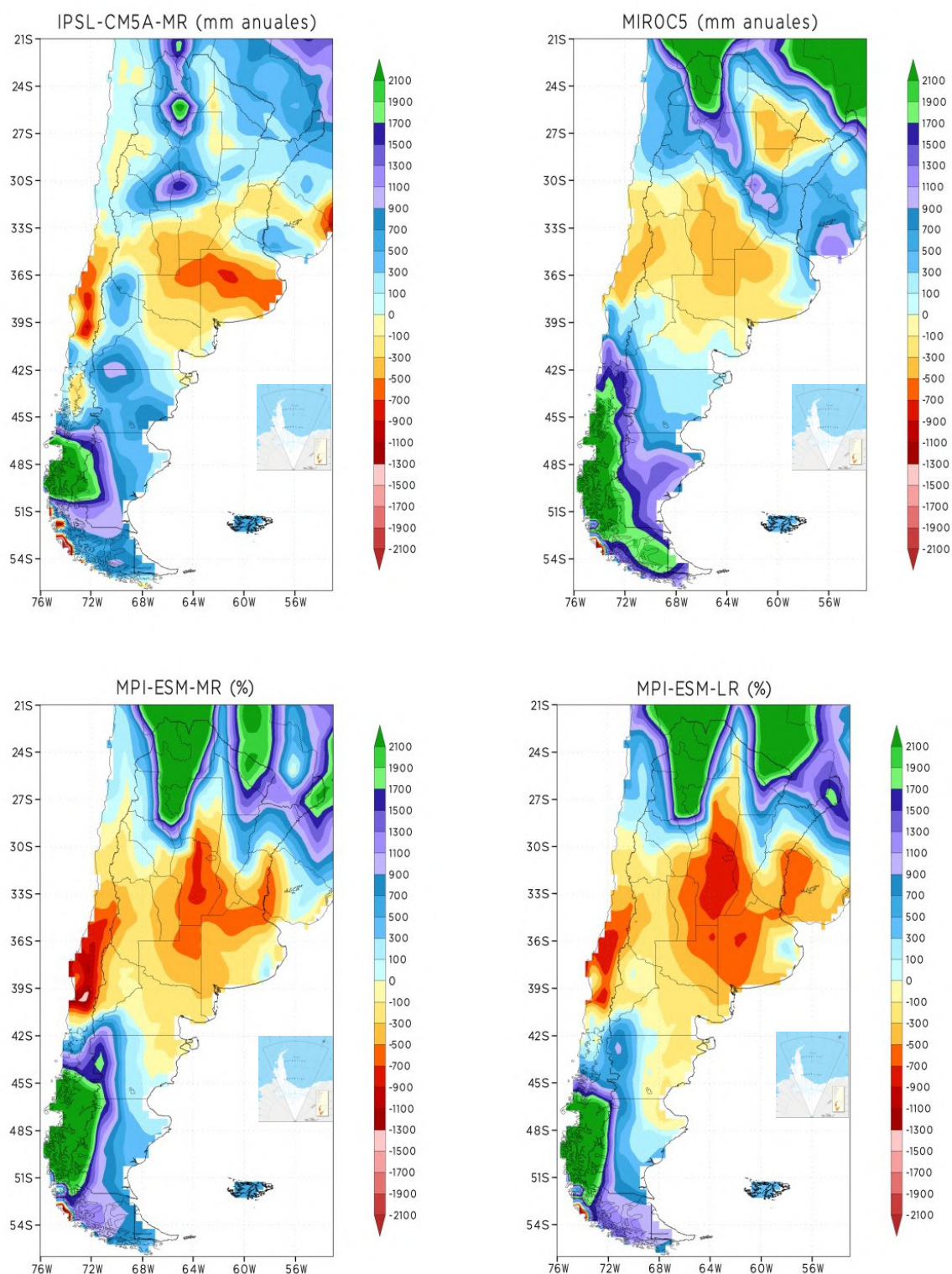


**Figura 3.3.4:** Error absoluto de la precipitación anual (mm) para cada uno de los MCGs analizados



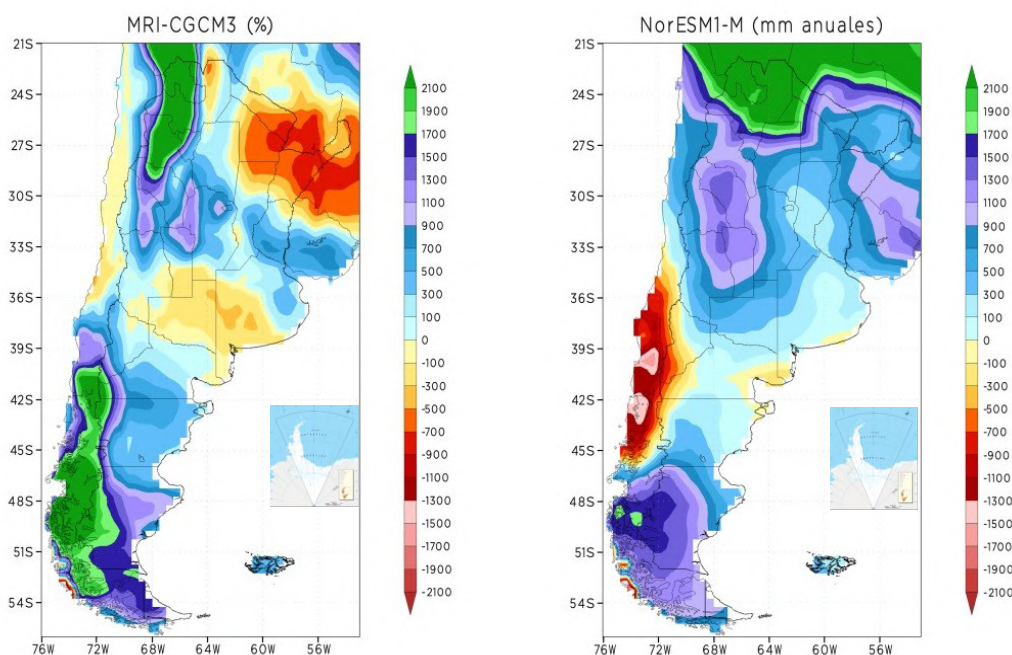


**Figura 3.3.4:** *Continuación*



**Figura 3.3.4:** *Continuación*





**Figura 3.3.4:** Continuación

#### 3.3.5.4 Modelos climáticos regionales evaluados

Las simulaciones con los MCRs utilizadas provienen de los experimentos numéricos realizados en el marco del Proyecto CLARIS-LPB (según se detalla en Solman y otros, 2013). Presentan una resolución de  $0,44^\circ$  de latitud y longitud, equivalente, aproximadamente, a una resolución espacial de 50 km. El conjunto de simulaciones disponibles incluye 7 MCRs y 3 MCGs. La Tabla 3.3.9 presenta el listado de modelos evaluados, en la cual se indica tanto el MCR como el MCG. En las secciones siguientes se denotará cada MCR conjuntamente con el MCG en el que se anida.

| MCR    | MCG       | INSTITUCIÓN  |
|--------|-----------|--|
| RegCM3 | HADCM3-Q0 | U. de Sao Paulo, Brasil                              |
|        | ECHAM5-R1 |  |
| RCA    | ECHAM5-R1 | Rossby Centre SMHI,<br>Suecia                        |
|        | ECHAM5-R2 |  |
|        | ECHAM5-R3 |  |
| MM5    | HADCM3-Q0 | CIMA, Argentina                                      |
| REMO   | ECHAM5-R3 | Max-Planck-Institute for<br>Meteorology, Alemania    |
| PROMES | HADCM3-Q0 | U. de Castilla-La Mancha,<br>España                  |
| LMDZ   | IPSL      | Laboratoire de<br>Météorologie Dynamique,<br>Francia |
|        | HADCM3-Q0 |  |
| ETA    | HADCM3-Q0 | Instituto Nacional de Pesquisas<br>Espaciais         |

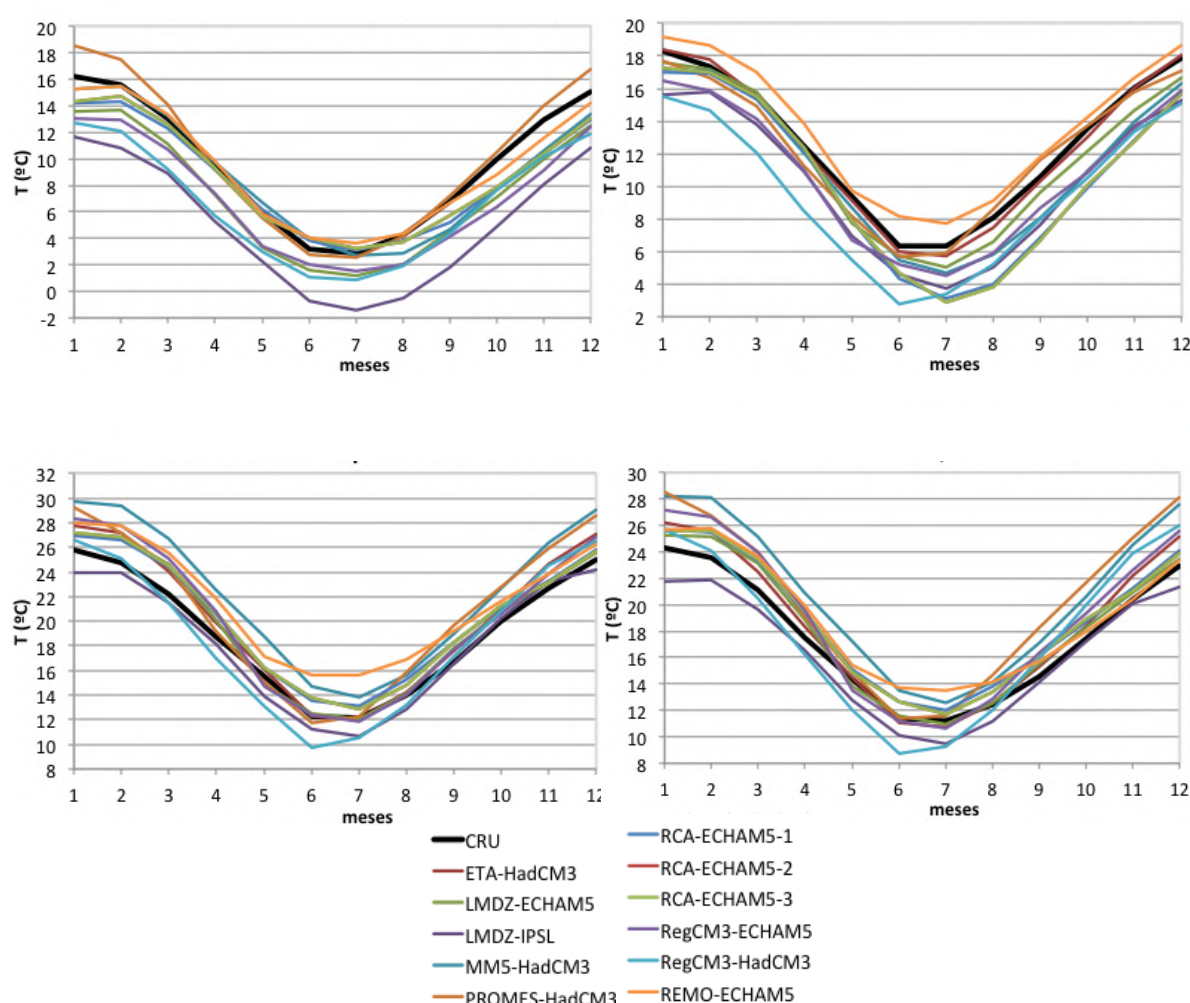
**Tabla 3.3.9:** Listado de simulaciones con MCRs conducidas por MCG disponibles para el período 1961-1990

En total se dispone de 11 simulaciones. El dominio del MCR ETA no abarca la totalidad del territorio Argentino ya que no se extiende más allá de los 50°S. Esta limitación afecta únicamente a la región Patagónica por lo que este modelo no será incluido para validar su desempeño en esa región.

### 3.3.5.5 Validación de los MCRs

#### Temperatura media

La Figura 3.3.6 muestra el ciclo anual medio de temperatura que resulta de la base CRU y de cada uno de los MCR, Tabla 3.3.9, para cada región. El modelo ETA/HADCM3 no está incluido en las figuras para Patagonia por no disponer de la información en la totalidad de la región.



**Figura 3.3.6:** Ciclo anual de temperatura media (°C) para cada una de las cuatro regiones consideradas. Panel superior: derecha Húmeda e izquierda Centro; panel inferior: derecha Andes e izquierda Patagonia. De acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y los MCRs analizados (período 1961-90)



Todos los MCRs reproducen adecuadamente el ciclo anual de temperatura en Patagonia, aunque la mayoría subestima la temperatura a lo largo de todo el ciclo anual, con excepción de REMO/ECHAM5 y PROMES/HADCM3 que presentan una evolución anual más acorde con lo observado. LMDZ/IPSL presenta la mayor subestimación a lo largo de todo el ciclo anual (subestimando la temperatura por más de 4°C). Para el resto de los modelos, los errores están en el rango de -2°C a 1°C en los meses más fríos y de -2°C en los meses cálidos. En la región Andes, la evolución anual de la temperatura de los modelos concuerda razonablemente con la de CRU, aunque la mayoría simula el mínimo en Julio, mientras que en CRU, la temperatura de Julio es sólo levemente inferior a la de Junio. Excepto por REMO/ECHAM5 que sobreestima la temperatura a lo largo de todo el ciclo anual, todos los modelos la subestiman y en mayor medida en invierno y primavera. ETA/HADCM3, LMDZ/ECHAM5 y PROMES/HADCM3 son los que reproducen mejor el ciclo anual en la región Andes. Asimismo, en esta región algunos modelos presentan subestimaciones, principalmente en la porción norte de la región Andes y más cercana a la Cordillera y sobreestimaciones, principalmente en el centro y este de esa región, por lo cual en promedio dentro de la región los errores pueden compensarse. En las regiones Centro y Húmeda, todos los modelos reproducen el ciclo anual de la temperatura media. Sin embargo la temperatura es sobreestimada por la mayoría de los modelos durante la primavera y el verano (alrededor de 2°C) mientras que en otoño e invierno algunos modelos subestiman y otros sobreestiman la temperatura (en el rango entre -2°C y 2°C).

Las Tablas 3.3.10 a 3.3.13 presentan los indicadores estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) utilizados para evaluar la calidad de los MCRs en la representación de las características de la temperatura media en cada una de las regiones consideradas. En la Región Húmeda, Tabla 3.3.10, todos los modelos sobreestiman la temperatura en hasta 3,2°C, excepto LMDZ/IPSL que presenta un error inferior a 1°C. Para la mayoría de los modelos la sobreestimación de la temperatura es mayor en los meses cálidos. Además todos los modelos reproducen con gran precisión el ciclo anual aunque sobreestiman la variabilidad interanual. Sólo en 4 de ellos la variabilidad interanual modelada excede en un 30 a 40% a la observada, mientras que para el resto la sobreestimación es superior al 45%.

| Modelos       | Error (°C) |      |      | $r$ ciclo anual | $\sigma_{RMC}/\sigma_{CRU}$ |
|---------------|------------|------|------|-----------------|-----------------------------|
|               | Anual      | DEF  | JJA  | Anual           | Anual                       |
| ETA/HADCM3    | 0,9        | 2,0  | -0,3 | 0,999           | 1,327                       |
| LMDZ/ECHAM5   | 0,7        | 1,0  | 0,0  | 0,994           | 1,503                       |
| LMDZ/IPSL     | -1,3       | -2,0 | -1,5 | 0,991           | 1,392                       |
| MM5/HADCM3    | 3,2        | 4,3  | 1,7  | 0,998           | 1,396                       |
| PROMES/HADCM3 | 2,7        | 4,2  | 0,9  | 0,982           | 1,860                       |
| RCA/ECHAM5 1  | 1,3        | 1,4  | 1,1  | 0,996           | 1,455                       |
| RCA/ECHAM5 2  | 1,3        | 1,4  | 0,9  | 0,994           | 1,689                       |
| RCA/ECHAM5 3  | 1,3        | 1,4  | 0,9  | 0,994           | 1,689                       |
| RegCM3/ECHAM5 | 1,5        | 2,9  | -0,2 | 0,995           | 1,603                       |
| RegCM3/HADCM3 | 0,2        | 1,6  | -1,7 | 0,967           | 1,279                       |
| REMO/ECHAM5   | 1,5        | 1,3  | 2,1  | 0,983           | 1,858                       |

**Tabla 3.3.10:** Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCRs para la región Húmeda





En la Región Centro, Tabla 3.3.11, la mayoría de los modelos evaluados reproducen con un error aceptable (menor a 2°C) las temperaturas medias, aunque en la mayoría de los modelos, la temperatura simulada es superior a la observada, excepto los modelos LMDZ/IPSL y RegCM3HADCM3 que exhiben un mayor desvío frío. El ciclo anual de la temperatura está muy bien representado por todos los modelos aunque la mayor deficiencia se encuentra en la sistemática sobreestimación de la variabilidad interanual.

En la región Andes, Tabla 3.3.12, se observa que la mayoría de los modelos subestima la temperatura media anual (entre -3,1°C y -0,2°C) con excepción de REMO/ECHAM5 que simula temperatura superiores a las observadas con un error de 1°C.

| Modelos       | Error (°C) |      |      | r ciclo anual | $\sigma_{\text{RMC}}/\sigma_{\text{CRU}}$ |
|---------------|------------|------|------|---------------|---|
|               | Anual      | DEF  | JJA  | Anual         | Anual                                     |
| ETA/HADCM3    | 1,2        | 2,2  | 0,1  | 0,999         | 1,314                                     |
| LMDZ/ECHAM5   | 0,8        | 1,3  | 0,1  | 0,992         | 1,635                                     |
| LMDZ/IPSL     | -0,8       | -1,2 | -1,2 | 0,991         | 1,551                                     |
| MM5/HADCM3    | 3,2        | 4,2  | 1,9  | 0,996         | 1,457                                     |
| PROMES/HADCM3 | 1,9        | 3,2  | 0,5  | 0,988         | 2,207                                     |
| RCA/ECHAM5 1  | 1,3        | 1,3  | 1,1  | 0,995         | 1,485                                     |
| RCA/ECHAM5 2  | 1,3        | 1,4  | 1,0  | 0,994         | 1,687                                     |
| RCA/ECHAM5 3  | 1,3        | 1,4  | 1,0  | 0,994         | 1,687                                     |
| RegCM3/ECHAM5 | 1,2        | 2,5  | 0,0  | 0,993         | 1,572                                     |
| RegCM3/HADCM3 | -0,3       | 1,0  | -1,7 | 0,988         | 1,426                                     |
| REMO/ECHAM5   | 2,5        | 2,2  | 3,2  | 0,987         | 2,043                                     |

**Tabla 3.3.11.** Ídem Tabla 3.3.10, pero para la región Centro

| Modelos       | Error (°C) |      |      | r ciclo anual | $\sigma_{\text{RMC}}/\sigma_{\text{CRU}}$ |
|---------------|------------|------|------|---------------|---|
|               | Anual      | DEF  | JJA  | Anual         | Anual                                     |
| ETA/HADCM3    | -0,2       | 0,2  | -0,5 | 0,999         | 1,167                                     |
| LMDZ/ECHAM5   | -0,9       | -0,7 | -1,1 | 0,993         | 1,530                                     |
| LMDZ/IPSL     | -2,3       | -2,3 | -2,4 | 0,993         | 1,571                                     |
| MM5/HADCM3    | -1,4       | -1,0 | -1,6 | 0,983         | 1,156                                     |
| PROMES/HADCM3 | -0,4       | -0,7 | -0,2 | 0,989         | 1,726                                     |
| RCA/ECHAM5 1  | -2,1       | -1,3 | -3,1 | 0,969         | 1,854                                     |
| RCA/ECHAM5 2  | -2,1       | -1,2 | -3,1 | 0,964         | 2,138                                     |
| RCA/ECHAM5 3  | -2,1       | -1,2 | -3,1 | 0,964         | 2,138                                     |
| RegCM3/ECHAM5 | -1,9       | -1,7 | -1,7 | 0,994         | 1,524                                     |
| RegCM3/HADCM3 | -3,1       | -2,7 | -3,1 | 0,995         | 1,285                                     |
| REMO/ECHAM5   | 1,1        | 1,0  | 1,4  | 0,996         | 1,440                                     |

**Tabla 3.3.12:** Ídem Tabla 3.3.10, pero para la región Andes



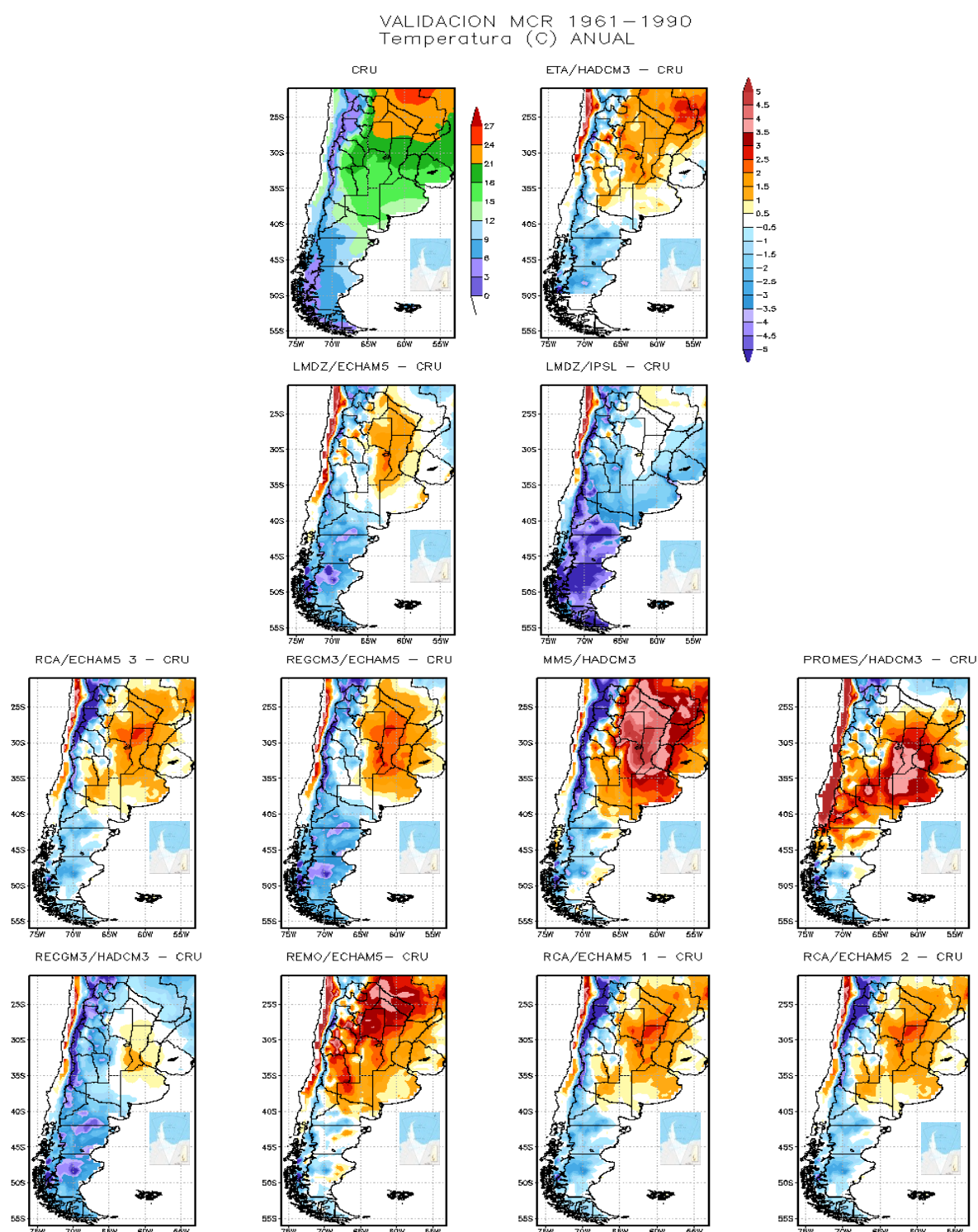
| Modelos       | Error (°C) |      |      | $r_{\text{ciclo anual}}$ | $\sigma_{\text{RMC}}/\sigma_{\text{CRU}}$ |
|---------------|------------|------|------|--------------------------|---|
|               | Anual      | DEF  | JJA  | Anual                    | Anual                                     |
| ETA/HADCM3    |            |      |      |                          |   |
| LMDZ/ECHAM5   | -2,3       | -2,4 | -1,8 | 0,996                    | 1,169                                     |
| LMDZ/IPSL     | -4,5       | -4,6 | -4,4 | 0,996                    | 1,112                                     |
| MM5/HADCM3    | -0,8       | -0,9 | -0,3 | 0,971                    | 0,891                                     |
| PROMES/HADCM3 | 0,6        | 1,9  | -0,3 | 0,998                    | 0,934                                     |
| RCA/ECHAM5 1  | -1,0       | -1,8 | 0,1  | 0,986                    | 0,758                                     |
| RCA/ECHAM5 2  | -0,9       | -1,6 | 0,2  | 0,985                    | 1,124                                     |
| RCA/ECHAM5 3  | -0,9       | -1,6 | 0,2  | 0,985                    | 1,124                                     |
| RegCM3/ECHAM5 | -2,5       | -2,8 | -1,6 | 0,991                    | 1,397                                     |
| RegCM3/HADCM3 | -2,9       | -3,4 | -2,1 | 0,995                    | 0,817                                     |
| REMO/ECHAM5   | -0,2       | -0,6 | 0,6  | 0,992                    | 1,088                                     |

**Tabla 3.3.13:** Ídem Tabla 3.3.11, pero para la región Patagonia

En Patagonia, Tabla 3.3.13, todos los modelos, excepto PROMES/HADCM3 subestiman la temperatura media anual en un rango entre  $-4,5^{\circ}\text{C}$  y  $-0,2^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas medias estacionales también son subestimadas, siendo los errores mayores durante el verano que en invierno. A su vez, todos los modelos reproducen con buena precisión para esta región el ciclo anual, con coeficientes de correlación superiores a 0,97. La variabilidad interanual simulada por la mayoría de los modelos está capturada adecuadamente, en un rango que varía entre 80 y 130% de aquella observada

En verano e invierno los modelos también tienden a subestimar la temperatura media, siendo los errores en invierno en general mayores que los de verano. ETA/HADCM3 es el que simula la temperatura en la región con menor error. Asimismo, el ciclo anual está adecuadamente representado por todos los modelos. Sin embargo, sólo 3 de los 11 modelos reproducen adecuadamente el rango de variabilidad interanual. En particular se destaca ETA/HADCM3 que presenta el mejor desempeño para la temperatura en esta región. Esto puede deberse a que este modelo tiene una coordenada vertical que ha sido diseñada especialmente para regiones con topografía compleja.

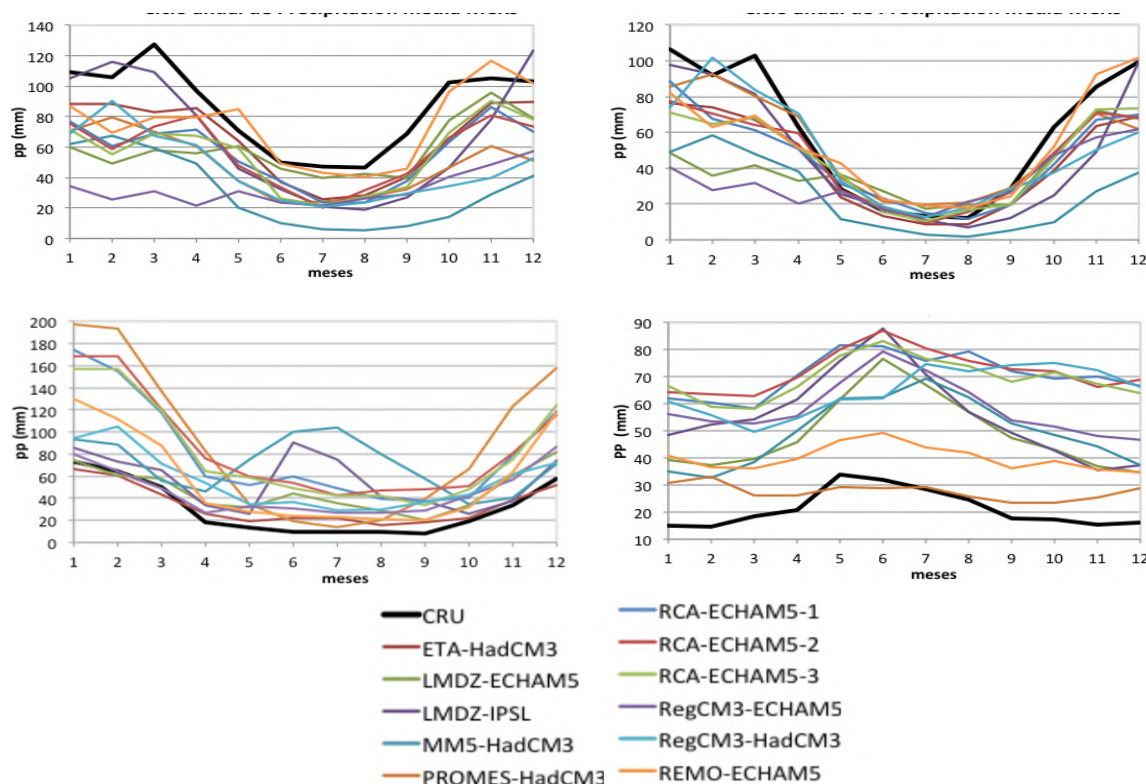
La Figura 3.3.8 muestra la temperatura media anual computada con la base CRU (panel superior izquierdo) y los errores medios o error de cada modelo con respecto a la media observada. Los errores en general son superiores a  $1^{\circ}\text{C}$  e inferiores a  $2^{\circ}\text{C}$  en todo el territorio argentino, excepto esto último para algunas regiones y modelos específicos. La mayoría de los MCR sobreestiman la temperatura en el noreste y la subestiman en Patagonia, aunque la magnitud de los errores es variable dependiendo del modelo considerado. La mayoría de los MCR subestiman la temperatura en la franja cercana a la cordillera de los Andes, excepto PROMES. En la región Andes, ETA/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 simulan la temperatura media anual con menor error que el resto de los modelos. Resulta evidente que no hay ningún MCR que sea capaz de reproducir la temperatura media anual en toda la región con menor error, ya que algunos MCR son capaces de reproducir la temperatura media anual mejor en algunas regiones que en otras.



**Figura 3.3.7:** Error de temperatura anual (°C) para cada uno de los MCRs analizados

### Precipitación

La Figura 3.3.8 presenta para cada región el ciclo anual de precipitación mensual obtenido a partir de la base CRU y de las simulaciones.



**Figura 3.3.8:** Ciclo anual de precipitación (mm) para cada una de las cuatro regiones. Panel superior: derecha Húmeda e izquierda Centro; panel inferior: derecha Andes e izquierda Patagonia. De acuerdo con la base CRU y para el conjunto de MCRs analizados (período 1961-90)

En general, la concordancia entre el ciclo anual de precipitación simulado por los MCR y el observado es mucho más pobre que lo obtenido para la temperatura, debido a las mayores limitaciones de los modelos en simular los procesos que producen la precipitación. No obstante, la mayoría de los modelos son capaces de describir una evolución de la precipitación a lo largo del año, a pesar de subestimar o sobreestimar, dependiendo de la región, la cantidad de precipitación mensual. En Patagonia, todos los modelos sobreestiman la lluvia a lo largo de todo el año, entre 50% y más del 100%. Sólo 5 de ellos reproducen la evolución anual, con mayor precipitación en invierno y condiciones más secas en primavera, verano y otoño, aunque estos modelos simulan el máximo un mes más tarde que las observaciones. PROMES/HADCM3, RegCM3/HADCM3, RCA/ECHAM5-2 y RCA/ECHAM5-3 no son capaces de reproducir el ciclo anual en esta región. En la Región Andes todos los modelos sobreestiman la precipitación a lo largo de todo el ciclo anual, entre 10% y más del 100%, con excepción de ETA/HADCM3 que reproduce tanto la cantidad de precipitación como el ciclo anual muy adecuadamente. En esta región, el ciclo anual de la precipitación presenta un período seco bien marcado entre mayo y septiembre y un período más lluvioso entre octubre y abril. Este comportamiento está bien representado por la mayoría



de los modelos, aunque simulan más precipitación durante la estación húmeda. MM5/HADCM3 y LMDZ/IPSL no reproducen el ciclo anual de precipitación. En la Región Centro el ciclo anual de precipitación está caracterizado por una estación seca durante el invierno y una estación lluviosa en verano. La mayoría de los modelos captura adecuadamente esta evolución anual aunque subestiman la precipitación durante la estación húmeda (aproximadamente en un 40%). En particular sólo 3 de los 11 modelos son capaces de reproducir el máximo de precipitación observado en marzo. En la Región Húmeda casi todos los modelos son capaces de reproducir el ciclo anual observado (de amplitud moderada y con máximos en las estaciones de transición), a pesar de que la mayoría de ellos subestiman la precipitación a lo largo de todo el año (entre un 10 y un 70 %) y presentan un ciclo anual de menor amplitud. Además, la mayoría de los modelos simula una estación seca con menor precipitación que la observada. Se destaca RegCM3/ECHAM5 que no reproduce la evolución anual de la lluvia en la región.

Las tablas 3.3.14 a 3.3.17 presentan los indicadores estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) utilizados para evaluar la calidad de los MCRs en la representación de las características de la precipitación en cada una de las regiones consideradas. En la región Húmeda, Tabla 3. 3.14, todos los modelos subestiman la precipitación a lo largo del año, siendo las mayores subestimaciones durante la transición del verano al otoño, cuando se registran las mayores precipitaciones. Asimismo, la mayor deficiencia de la mayoría de los modelos es la gran subestimación (en términos porcentuales) de la precipitación de invierno, tendiendo a simular un invierno mucho más seco que el observado.

| Modelos       | Error                |        |                  |        |                   |        | r ciclo anual | $\sigma^*$ RMC/<br>$\sigma^*$ CRU |
|---------------|----------------------|--------|------------------|--------|-------------------|--------|---------------|-----------------------------------|
| (CRU)         | Anual<br>(1034,9 mm) |        | DJF<br>(316,3mm) |        | JJA<br>(144,1 mm) |        |               |                                   |
|               | (%)                  | (mm)   | (%)              | (mm)   | (%)               | (mm)   |               |                                   |
| ETA/HADCM3    | -24,2                | -250,1 | -15,6            | -49,4  | -36,7             | -52,8  | 0,918         | 1,299                             |
| LMDZ/ECHAM5   | -32,0                | -331,0 | -41,0            | -129,8 | -11,1             | -15,9  | 0,609         | 1,071                             |
| LMDZ/IPSL     | -22,2                | -230,1 | 8,7              | 27,6   | -49,7             | -71,6  | 0,863         | 0,794                             |
| MM5/HADCM3    | -64,1                | -663,4 | -45,6            | -144,3 | -85,1             | -122,6 | 0,818         | 1,731                             |
| PROMES/HADCM3 | -43,5                | -450,0 | -35,8            | -113,3 | -48,4             | -69,7  | 0,912         | 1,370                             |
| RCA/ECHAM5 1  | -35,1                | -363,8 | -34,2            | -108,2 | -40,9             | -59,0  | 0,903         | 1,494                             |
| RCA/ECHAM5 2  | -33,7                | -348,8 | -34,7            | -109,9 | -40,4             | -58,2  | 0,913         | 1,342                             |
| RCA/ECHAM5 3  | -35,4                | -366,5 | -35,6            | -112,7 | -47,5             | -68,4  | 0,870         | 1,222                             |
| RegCM3/ECHAM5 | -62,4                | -645,3 | -63,4            | -200,4 | -50,6             | -72,8  | 0,484         | 1,433                             |
| RegCM3/HADCM3 | -46,8                | -484,1 | -33,0            | -104,4 | -51,9             | -74,8  | 0,779         | 1,406                             |
| REMO/ECHAM5   | -13,5                | -139,9 | -18,2            | -57,7  | -7,6              | -11,0  | 0,763         | 1,250                             |

**Tabla 3.3.14:** Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCRs para la región Húmeda

En la región Centro, Tabla 3.3.15, todos los modelos subestiman la precipitación anual ya que subestiman aquella de la época lluviosa (septiembre-abril), aunque reproducen adecuadamente las condiciones secas de invierno. LMDZ/IPSL es el que mejor reproduce la precipitación media en la región, con errores inferiores al 20%, así como también es el que mejor reproduce el ciclo anual medio y la variabilidad interanual de la lluvia.





| Modelos       | Error               |        |                   |        |                  |       | $r$ ciclo anual | $\sigma^*_{RMC}/\sigma^*_{CRU}$ |
|---------------|---------------------|--------|-------------------|--------|------------------|-------|-----------------|---------------------------------|
| (CRU)         | Anual<br>(710,7 mm) |        | DJF<br>(297,0 mm) |        | JJA<br>(42,0 mm) |       |                 |                                 |
|               | (%)                 | (mm)   | (%)               | (mm)   | (%)              | (mm)  |                 |                                 |
| ETA/HADCM3    | -27,5               | -195,2 | -26,1             | -77,6  | -27,0            | -11,3 | 0,984           | 1,440                           |
| LMDZ/ECHAM5   | -34,2               | -242,9 | -49,5             | -147,0 | 53,5             | 22,5  | 0,751           | 1,626                           |
| LMDZ/IPSL     | -19,9               | -141,2 | -2,7              | -7,9   | -13,8            | -5,8  | 0,930           | 0,880                           |
| MM5/HADCM3    | -58,3               | -414,1 | -50,7             | -150,5 | -72,6            | -30,5 | 0,899           | 1,909                           |
| PROMES/HADCM3 | -11,1               | -78,8  | -19,1             | -56,8  | 46,5             | 19,5  | 0,941           | 1,616                           |
| RCA/ECHAM5 1  | -23,1               | -164,0 | -23,8             | -70,6  | 17,6             | 7,4   | 0,965           | 1,588                           |
| RCA/ECHAM5 2  | -21,5               | -152,9 | -27,1             | -80,4  | 3,4              | 1,4   | 0,974           | 1,479                           |
| RCA/ECHAM5 3  | -23,3               | -165,8 | -29,6             | -87,9  | 0,2              | 0,1   | 0,971           | 1,583                           |
| RegCM3/ECHAM5 | -45,0               | -319,6 | -57,0             | -169,2 | 20,3             | 8,5   | 0,682           | 1,894                           |
| RegCM3/HADCM3 | -17,0               | -121,2 | -20,2             | -60,1  | 16,9             | 7,1   | 0,876           | 1,548                           |
| REMO/ECHAM5   | -10,2               | -72,2  | -17,5             | -52,0  | 41,7             | 17,5  | 0,919           | 1,442                           |

**Tabla 3.3.15:** Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Centro

En la región Andes, Tabla 3.3.16, ETA/HADCM3 es el que reproduce con mejor confiabilidad la precipitación tanto para las medias, el ciclo anual como la variabilidad interanual. Exceptuando MM5/HADCM3 y LMDZ/IPSL que fallan en reproducir el ciclo anual, el resto de los modelos logra capturar con bastante fidelidad la evolución a lo largo del año, como se refleja en los coeficientes de correlación que son superiores a 0,89. No obstante es evidente que la mayoría de los modelos sobreestiman la precipitación a lo largo del año produciendo, además, un ciclo anual de mayor amplitud que el observado. Este comportamiento se observa en particular en PROMES/HADCM3, REMO/ECHAM5 y RCA/ECHAM5. RegCM3/ECHAM5, RegCM3/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 reproducen adecuadamente el ciclo anual medio, aunque subestiman la variabilidad interanual.

Por otro lado, RegCM3/ECHAM5, MM5/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 son los que presentan el desempeño más pobre, principalmente debido a que subestiman la precipitación durante el período de lluvias. El resto de los modelos reproducen razonablemente bien el ciclo anual medio aunque la mayoría falla en reproducir adecuadamente el mes en el cual se registra la máxima precipitación. La mayoría de los modelos presenta una variabilidad interanual de la precipitación 40% superior a la observada.

| Modelos     | Error               |       |                   |       |                  |       | $r$ ciclo anual | $\sigma^*_{RMC}/\sigma^*_{CRU}$ |
|-------------|---------------------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|-----------------|---------------------------------|
| (CRU)       | Anual<br>(368,5 mm) |       | DJF<br>(195,8 mm) |       | JJA<br>(29,6 mm) |       | Anual           | Anual                           |
|             | (%)                 | (mm)  | (%)               | (mm)  | (%)              | (mm)  |                 |                                 |
| ETA/HADCM3  | 10,2                | 37,6  | -8,6              | -16,9 | 103,0            | 30,5  | 0,986           | 0,970                           |
| LMDZ/ECHAM5 | 53,0                | 195,3 | 10,5              | 20,6  | 266,4            | 78,9  | 0,896           | 0,806                           |
| LMDZ/IPSL   | 80,4                | 296,2 | 18,7              | 36,6  | 598,2            | 177,5 | 0,501           | 1,062                           |
| MM5/HADCM3  | 130,0               | 479,0 | 30,7              | 60,2  | 857,1            | 254,0 | 0,104           | 1,086                           |



|               |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PROMES/HADCM3 | 194,8 | 717,8 | 181,0 | 353,7 | 79,7  | 23,6  | 0,975 | 0,984 |
| RCA/ECHAM5 1  | 166,1 | 612,2 | 129,4 | 253,4 | 398,5 | 118,1 | 0,975 | 1,005 |
| RCA/ECHAM5 2  | 180,3 | 664,2 | 132,2 | 258,8 | 384,3 | 113,9 | 0,970 | 0,971 |
| RCA/ECHAM5 3  | 163,9 | 604,0 | 124,7 | 244,2 | 350,4 | 103,9 | 0,983 | 0,939 |
| RegCM3/ECHAM5 | 50,1  | 184,7 | 17,7  | 34,7  | 186,8 | 55,4  | 0,915 | 0,757 |
| RegCM3/HADCM3 | 81,2  | 299,3 | 38,9  | 76,3  | 220,4 | 65,3  | 0,959 | 0,791 |
| REMO-ECHAM5   | 88,6  | 326,6 | 83,3  | 163,1 | 131,0 | 38,8  | 0,994 | 0,776 |

**Tabla 3.3.16:** Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Andes

El desempeño de los modelos en la Región Patagónica, Tabla 3.3.17, es en general pobre comparado con aquel encontrado para la temperatura. Todos los modelos sobreestiman la precipitación anual, la media de verano y la media de invierno, con excepción del PROMES/HADCM3 que no reproduce adecuadamente la precipitación de invierno ni tampoco reproduce el ciclo anual de la precipitación. De los 10 modelos disponibles para validar en la región, sólo 5 reproducen adecuadamente el ciclo anual, con coeficientes de correlación superiores a 0,85. La mayoría de los modelos captura la variabilidad interanual en un rango alrededor del 15% de la observada.

| Modelos<br>(CRU) | Error               |        |                  |       |                  |       | r ciclo anual | $\sigma^*$ RMC/<br>$\sigma^*$ CRU |
|------------------|---------------------|--------|------------------|-------|------------------|-------|---------------|-----------------------------------|
|                  | Anual<br>(254,9 mm) |        | DJF<br>(45,7 mm) |       | JJA<br>(85,0 mm) |       | Anual         | Anual                             |
|                  | (%)                 | (mm)   | (%)              | (mm)  | (%)              | (mm)  |               |                                   |
| ETA/HADCM3       |                     |        |                  |       |                  |       |               |                                   |
| LMDZ/ECHAM5      | 130,2               | 332,0  | 143,5            | 65,6  | 136,2            | 115,7 | 0,925         | 0,984                             |
| LMDZ/IPSL        | 164,2               | 418,4  | 204,5            | 93,4  | 153,7            | 130,6 | 0,895         | 0,960                             |
| MM5/HADCM3       | 133,6               | 340,5  | 129,6            | 59,2  | 128,6            | 109,3 | 0,859         | 1,039                             |
| PROMES/HADCM3    | 29,9                | 76,3   | 104,6            | 47,8  | -1,2             | -1,0  | 0,083         | 1,432                             |
| RCA/ECHAM5 1     | 232,5               | 592,7  | 313,8            | 143,3 | 178,1            | 151,3 | 0,834         | 0,889                             |
| RCA/ECHAM5 2     | 239,0               | 609,3  | 330,2            | 150,8 | 186,5            | 158,5 | 0,888         | 0,750                             |
| RCA/ECHAM5 3     | 226,7               | 577,9  | 314,2            | 143,5 | 174,9            | 148,7 | 0,832         | 0,836                             |
| RegCM3/ECHAM5    | 175,5               | 447,5  | 242,1            | 110,6 | 154,5            | 131,3 | 0,896         | 0,873                             |
| RegCM3/HADCM3    | 205,7               | 524,2  | 300,8            | 137,4 | 145,6            | 123,8 | 0,052         | 0,788                             |
| REMO/ECHAM5      | 88,5                | 225,71 | 145,95           | 66,7  | 59,1             | 50,2  | 0,894         | 1,136                             |

**Tabla 3.3.17:** Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Patagonia

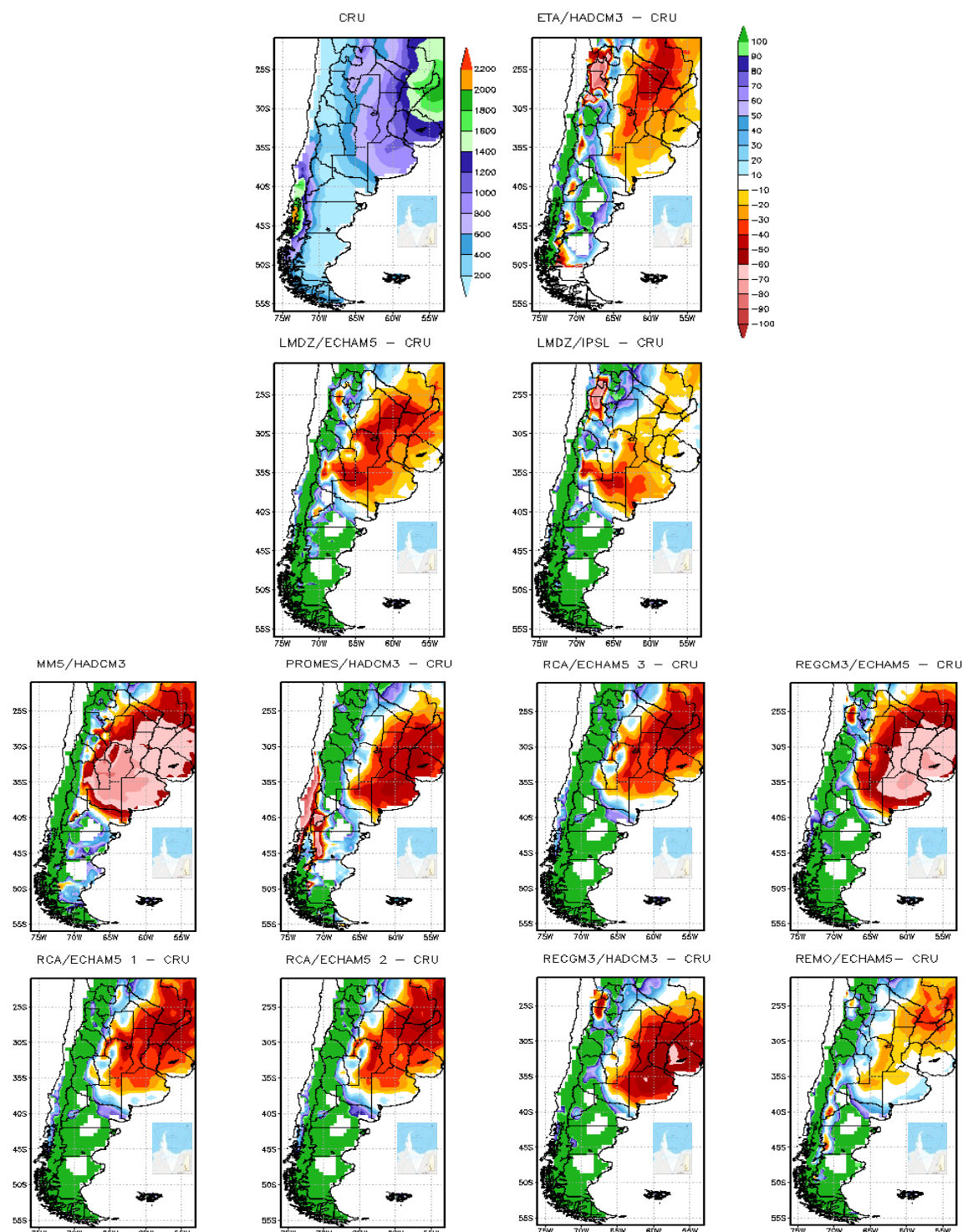
La capacidad de los modelos en reproducir el ciclo anual de la precipitación en la región Húmeda es variable, con valores del coeficiente de correlación entre los ciclos anuales simulados y observado entre 0,5 y 0,9. Cabe mencionar que RegCM3/ECHAM5 Y LMDZ/ECHAM5 presentan graves deficiencias en reproducir adecuadamente el ciclo anual con coeficientes de correlación inferiores a 0,6. La mayoría de los modelos sobreestiman la variabilidad interanual, a excepción de LMDZ/IPSL, aunque en la mayoría de los casos el error no supera el 30%.

Las Figuras 3.3.9 y 3.3.10 muestran el error porcentual y el error absoluto, respectivamente, computados según lo descripto en la sección 3.3.4. En términos generales los errores porcentuales superan  $\pm 10\%$  en todo el territorio argentino. La mayoría de los MCR muestran subestimación en el centro y noreste de Argentina (entre -20% y -70 %) y sobreestimación en

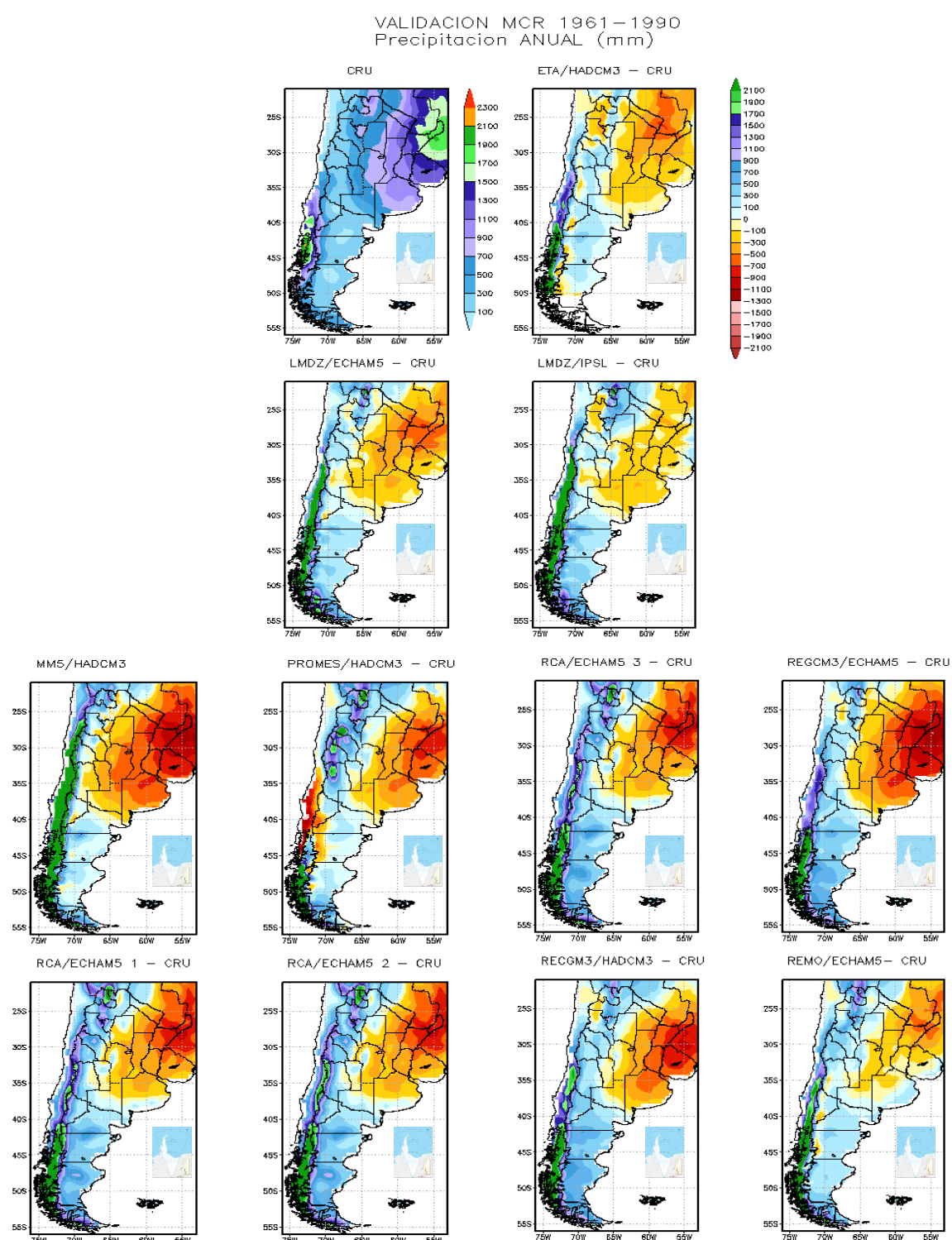


las regiones Patagónica y Andes (entre 40% y más del 100%). Asimismo se encuentra que los MCRs sobreestiman la precipitación en las regiones más secas y la subestiman en las regiones más lluviosas. Excepto MM5/HADCM3 y PROMES/HADCM3, el resto de los MCRs sobreestiman la precipitación anual en más del 100 % en la región Patagónica. Asimismo, la mayoría de los modelos sobreestima por más del 100% la precipitación en la región cercana a los Andes. Sólo ETA/HADCM3 y LMDZ/IPSL presentan errores menores. Este tipo de error sistemático es típico en regiones en las cuales la precipitación está fuertemente influenciada por una topografía compleja como la de los Andes. Por otra parte, MM5/HADCM3 y RegCM3/ECHAM5 son los que presentan mayores subestimaciones en el centro y este de Argentina, con valores que superan -70%, mientras que los errores porcentuales para el resto son en general inferiores a -40%.

VALIDACION MCR 1961-1990  
Precipitación ANUAL (%)



**Figura 3.3.9:** Error porcentual de la precipitación anual (%) para cada uno de los MCRs analizados. Este parámetro se calcula sólo donde la precipitación anual de referencia supera los 100mm



**Figura 3.3.10:** Error absoluto de la precipitación anual (mm) para cada uno de los MCRs analizados





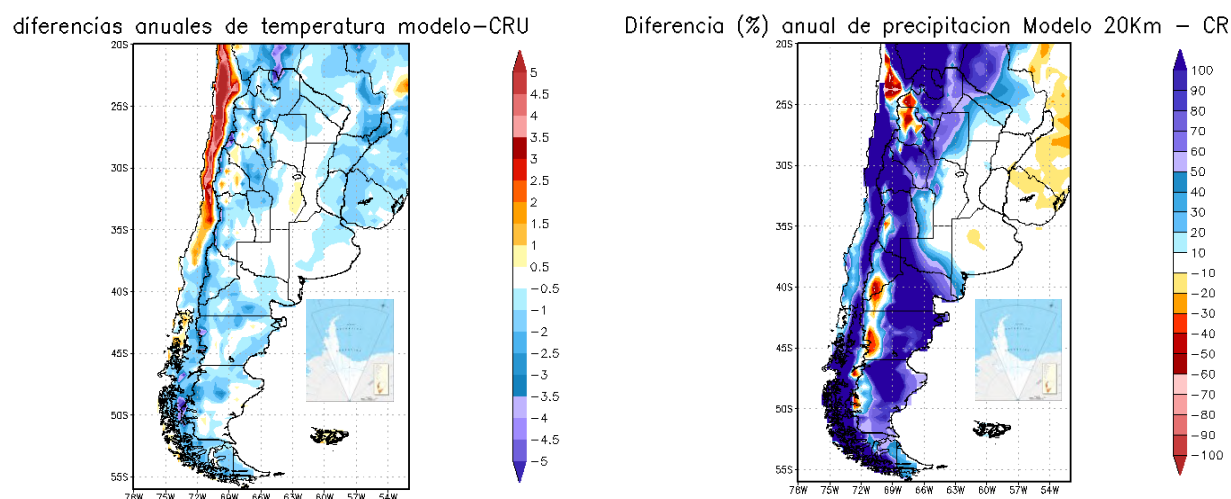
En la Figura 3.3.10 se destaca que en la región Patagónica todos los modelos simulan mayor cantidad de precipitación. Asimismo, las mayores subestimaciones se encuentran en las regiones del país de mayor precipitación, tal como se había señalado previamente.

### 3.3.5.6 Validación del modelo MRI/JMA

El modelo del *Meteorological Research Institute* (MRI) y de la *Japan Meteorological Agency* (JMA) es un modelo global de muy alta resolución (20 Km) y se lo preseleccionó por ello, aunque es del conjunto CMIP3. La validación se realizó como en las secciones anteriores para la temperatura media y precipitación, considerando en este caso el período de validación 1979 – 2003, teniendo en cuenta los períodos de las simulaciones disponibles.

La Figura 3.3.11 muestra los errores medios en la temperatura media anual. El modelo en general subestima la temperatura en la mayor parte de Argentina, con errores entre 0 y  $-3^{\circ}\text{C}$ , llegando los errores cerca de la cordillera  $-4.5^{\circ}\text{C}$ . Las diferencias de temperatura entre el modelo y los datos CRU durante el verano (no se muestran), son positivas, pero en parte de las regiones Húmeda y Centro, los errores son despreciables. En el resto del país los errores varían entre 0 y  $2.0^{\circ}\text{C}$ . Asimismo, las diferencias de temperatura entre el modelo y los datos CRU durante el invierno (no se muestran) son negativos, de hasta  $-3,5^{\circ}\text{C}$  en la Patagonia y parte de la región Andes.

En el norte de la región Andes se observan zonas con sobreestimación de la temperatura de hasta  $2.5^{\circ}\text{C}$ , coexistiendo con zonas de subestimación de hasta  $-5^{\circ}\text{C}$ , en particular próximo y sobre la cordillera.



**Figura 3.3.11:** Izquierda, error de la temperatura media anual y derecha, error porcentual de la precipitación anual del modelo MRI/JMA con respecto a la base CRU

La Figura 3.3.11 muestra los errores medios en el promedio anual de la precipitación. El modelo en general sobreestima la precipitación en la mayor parte de Argentina (entre 60% y 90%), con excepción de la Patagonia y la zona Andes con deficiencias de hasta el 100%. La representación de la lluvia anual por el modelo para las regiones Centro y Húmeda es



prácticamente coincidente con los valores de CRU. Con respecto a las diferencias de precipitación entre el modelo y los datos CRU durante el verano (no se muestran) se encuentra que en las regiones Centro y Húmeda son menores (menor a 20%), mientras que las regiones de Patagonia y Andes muestran, en general, sobreestimación de las lluvias entre 70% y 90%, con algunos manchones de subestimación con valores en algunas zonas de -10% y en otras de hasta 50%. En particular durante el invierno (no se muestra), se observa una sobreestimación entre 50% y 90% en casi todo el país, con excepción de una parte de las regiones Centro y Húmeda donde la sobreestimación varía entre 0% y 30%. A lo largo de los Andes hay zonas con subestimación de las lluvias entre 20% y 70%.

Los resultados de las métricas o indicadores descriptos en la sección 2.2 aplicadas al modelo MRI/JMA se presentan en las Tablas 3.3.18 y 3.3.19. Para la temperatura media, la Tabla 3.3.18 muestra que los errores son inferiores a 1°C para el verano en las cuatro regiones, con los errores menores para las regiones Patagonia y Húmeda. Con excepción de la región Andes, donde el error es negativo, en las tres regiones restantes son positivos. Para el invierno se observa, que en las cuatro regiones los errores son negativos, siendo menores para las regiones Centro y Húmeda (inferiores a 1°C) y superiores a 1°C en Patagonia (-1,4°C) y Andes (-1,3°C). Los errores anuales, son negativos en las cuatro regiones, menores a 1°C, excepto en la región Andes con un error de -1,5°C. Asimismo, los coeficientes de correlación para el ciclo anual son prácticamente igual a 1, lo que indica una excelente correlación de los resultados del modelo con la base CRU.

Con respecto a las diferencias de precipitación entre el modelo y el conjunto de datos CRU, se observa en la Tabla 3.3.19 que en relación al ciclo anual los valores de correlación son altos para las regiones Andes y Centro, mientras que para las regiones Patagonia y Húmeda son algo menores. Las magnitudes de los errores de la precipitación media anual son altos en todas las regiones excepto en la región Húmeda.

| Región    | Error<br>$T_{\text{anual}}$ (°C) | Error<br>$T_{\text{verano}}$<br>(°C) | Error<br>$T_{\text{invierno}}$<br>(°C) | $R_{\text{ciclo}}$<br>anual | $\sigma_m/\sigma_0$ |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|---------------------|
| Húmeda    | -0,63                            | 0,17                                 | -0,66                                  | 0,99                        | 1,02                |
| Centro    | -0,47                            | 0,58                                 | -0,42                                  | 0,99                        | 1,10                |
| Andes     | -1,49                            | -0,60                                | -1,34                                  | 0,99                        | 1,07                |
| Patagonia | -0,93                            | 0,19                                 | -1,42                                  | 0,99                        | 1,05                |

**Tabla 3.3.18:** Métricas de evaluación de la temperatura media a partir del modelo MRI/JMA

| Región    | Error<br>$PP_{\text{anual}}$<br>(%) | Error<br>$PP_{\text{verano}}$<br>(%) | Error<br>$PP_{\text{invierno}}$<br>(%) | $R_{\text{ciclo}}$<br>anual | $\sigma_m/\sigma_0$ |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|---------------------|
| Húmeda    | -1                                  | 3                                    | 33                                     | 0,89                        | 0,20                |
| Centro    | 23                                  | 21                                   | 135                                    | 0,96                        | 0,28                |
| Andes     | 90                                  | 80                                   | 142                                    | 0,97                        | 0,21                |
| Patagonia | 53                                  | 121                                  | 33                                     | 0,65                        | 0,30                |

**Tabla 3.3.19:** Métricas de evaluación de la precipitación a partir del modelo MRI/JMA



### 3.3.6 Selección de modelos para el desarrollo de escenarios

EL índice único de validación de modelos (IUVM), descrito en el anexo I permite sintetizar el desempeño de cada modelo climático y de sus 10 índices de error descriptos en la sección 3.3.4. Se lo utilizó para ranquear los modelos y hacer una selección objetiva de los modelos que luego fueron utilizados en el desarrollo de los escenarios climáticos del siglo XXI.

Como se menciona en el Anexo I, el IUVM varía entre 0 y 1, y los valores próximos a 0 son indicadores de un mal desempeño mientras que cuanto mayor es la habilidad del modelo para representar el clima observado, el índice se aproxima a 1. La Tabla 3.3.20 muestra para cada una de las cuatro regiones el conjunto de modelos validados listados por el valor decreciente de su IUVM. Por la forma que se construyó el IUVM, se considera que los modelos que exhiben un valor de IUVM de 0,5 o mayor representen aceptablemente el clima de la región.

En Patagonia 6 modelos presentan valores de IUVM por encima del umbral definido, siendo 3 MCGs y 3 MCRs. Se destaca que el mayor valor de IUVM alcanzado es de solo 0,66, lo que muestra las dificultades de los actuales modelos climáticos en reproducir el clima de esta región. Para la región Andes se identifican 7 modelos con buen IUVM, siendo sólo 2 de ellos MCRs. En particular se destacan el excelente desempeño del IPSL-CM5A-MR y del ETA-HadM3 con IUVM mayores o iguales a 0,9, mientras que el resto de los 5 modelos presenta valores muy cercanos a 0,5. En la región Centro, 10 modelos reproducen aceptablemente el clima siendo 9 de ellos MCGs. En la región Centro se destaca como excelente el modelo CNRM-CM5, aunque hay también otros 3 modelos con IUVM mayores o iguales a 0,7. En la región Húmeda hay 7 modelos con IUVM mayores a 0,5, siendo todos MCGs. Se destaca el modelo CCSM4 con un valor de 0,91, mientras que también el CMCC-CM hace una buena simulación en esta región con un valor de 0,75.

En general, los modelos globales tienen una mejor representación del clima observado que los modelos regionales, particularmente en las regiones Centro y Húmeda; ello puede atribuirse a que los modelos globales son de una generación de modelos más reciente y por ello tienen una mejor performance. La excepción es la región Patagonia, y en menor medida la región Andes, regiones donde como es de esperar la mayor resolución espacial de los modelos regionales puede permitir una mejor representación de los efectos de la cordillera de los Andes en el clima regional.

El análisis comparativo entre regiones, muestra que ningún modelo tuvo un muy buen desempeño simultáneamente en las cuatro regiones. Se destacan 5 MCGs que tuvieron buen desempeño en tres regiones, Andes, Centro y Húmeda: CCSM4, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, NorESM1-M. Asimismo, MRI-CGCM3 tuvo buenos resultados en Patagonia, Andes y Centro y en la región Húmeda estuvo cerca del límite que se adoptó como criterio de calidad. Por ello este modelo se provee en la base de datos para todo el país.

Los resultados proporcionados por la Tabla 3.3.20 constituyen la base del proceso de selección de los modelos utilizados. La misma permite distinguir aquellos modelos que exhiben un muy mal desempeño en cada una de las regiones, así como aquellos en los que es muy bueno. En este sentido la aplicación del IUVM cumplió con este objetivo. A partir de la evaluación experta de una serie de elementos como la distribución de errores dentro de cada



región, los errores en los índices extremos (Anexo II) y el análisis particular de cada uno de los índices que conforman el IUVM se confirmó que para cada región los 4 primeros modelos del ranking de la Tabla 3.3.20 constituyen una buena elección para la simulación del clima futuro. Esto permite contar con un número mínimo de modelos en cada región para estimar el rango de incerteza originada en las desigualdades entre modelos. Ningún modelo estuvo entre los 4 seleccionados en las cuatro regiones, reflejando la diversidad de los forzamientos geográficos del clima, propios de un país muy extenso y las limitaciones de los modelos en reproducirlos.

| Húmeda        | IUVM | Centro        | IUVM | Andes         | IUVM | Patagonia     | IUVM |
|---------------|------|---------------|------|---------------|------|---------------|------|
| CCSM4         | 0,91 | CNRM-CM5      | 0,90 | IPSL-CM5A-MR  | 0,93 | REMO-ECHAM5   | 0,66 |
| MRI/JMA       | 0,88 | CMCC-CM       | 0,78 | ETA-HadCM3    | 0,90 | MM5-HadCM3    | 0,58 |
| CMCC-CM       | 0,75 | CSIRO-Mk3-6-0 | 0,71 | MRI/JMA       | 0,54 | CSIRO-Mk3-6-0 | 0,52 |
| NorESM1-M     | 0,62 | MRI-CGCM3     | 0,70 | MPI-ESM-LR    | 0,52 | GFDL-ESM2G    | 0,52 |
| HadGEM2-CC    | 0,57 | MPI-ESM-MR    | 0,67 | CCSM4         | 0,51 | PROMES-HadCM3 | 0,51 |
| MPI-ESM-MR    | 0,57 | LMDZ-IPSL     | 0,66 | MPI-ESM-MR    | 0,51 | MRI-CGCM3     | 0,51 |
| MPI-ESM-LR    | 0,55 | GFDL-ESM2G    | 0,63 | MRI-CGCM3     | 0,51 | RCA-ECHAM5-3  | 0,48 |
| IPSL-CM5A-MR  | 0,53 | MPI-ESM-LR    | 0,60 | NorESM1-M     | 0,51 | MRI/JMA       | 0,48 |
| ETA-HadCM3    | 0,49 | MRI/JMA       | 0,57 | LMDZ-ECHAM5   | 0,50 | RCA-ECHAM5-2  | 0,47 |
| MRI-CGCM3     | 0,49 | CCSM4         | 0,56 | PROMES-HadCM3 | 0,47 | NorESM1-M     | 0,45 |
| RegCM3-HadCM3 | 0,48 | NorESM1-M     | 0,56 | HadGEM2-CC    | 0,47 | HadGEM2-ES    | 0,44 |
| CNRM-CM5      | 0,47 | HadGEM2-ES    | 0,49 | CSIRO-Mk3-6-0 | 0,46 | HadGEM2-CC    | 0,43 |
| LMDZ-ECHAM5   | 0,42 | RegCM3-HadCM3 | 0,48 | HadGEM2-ES    | 0,43 | INMCM4        | 0,37 |
| RCA-ECHAM5-3  | 0,40 | IPSL-CM5A-MR  | 0,48 | REMO-ECHAM5   | 0,40 | CCSM4         | 0,36 |
| RCA-ECHAM5-2  | 0,40 | LMDZ-ECHAM5   | 0,42 | RegCM3-ECHAM5 | 0,37 | CNRM-CM5      | 0,35 |
| CSIRO-Mk3-6-0 | 0,38 | RCA-ECHAM5-2  | 0,40 | CMCC-CM       | 0,37 | MIROC5        | 0,35 |
| RCA-ECHAM5-1  | 0,34 | RCA-ECHAM5-3  | 0,40 | INMCM4        | 0,37 | CMCC-CM       | 0,34 |
| LMDZ-IPSL     | 0,34 | RCA-ECHAM5-1  | 0,36 | MM5-HadCM3    | 0,31 | MPI-ESM-LR    | 0,31 |
| HadGEM2-ES    | 0,32 | REMO-ECHAM5   | 0,36 | GFDL-ESM2G    | 0,30 | MPI-ESM-MR    | 0,31 |
| GFDL-ESM2G    | 0,31 | ETA-HadCM3    | 0,36 | RegCM3-HadCM3 | 0,21 | RCA-ECHAM5-1  | 0,30 |
| REMO-         | 0,30 | HadGEM2-      | 0,36 | MIROC5        | 0,20 | LMDZ-         | 0,28 |



|               |      |               |      |              |      |               |      |
|---------------|------|---------------|------|--------------|------|---------------|------|
| ECHAM5        |      | CC            |      |              |      | ECHAM5        |      |
| RegCM3-ECHAM5 | 0,25 | PROMES-HadCM3 | 0,34 | LMDZ-IPSL    | 0,19 | IPSL-CM5A-MR  | 0,22 |
| PROMES-HadCM3 | 0,16 | MIROC5        | 0,30 | RCA-ECHAM5-2 | 0,17 | RegCM3-ECHAM5 | 0,19 |
| INMCM4        | 0,14 | RegCM3-ECHAM5 | 0,26 | RCA-ECHAM5-3 | 0,17 | LMDZ-IPSL     | 0,15 |
| MM5-HadCM3    | 0,12 | INMCM4        | 0,23 | CNRM-CM5     | 0,15 | RegCM3-HadCM3 | 0,14 |
| MIROC5        | 0,11 | MM5-HadCM3    | 0,12 | RCA-ECHAM5-1 | 0,14 |               |      |

**Tabla 3.3.20:** Índice único de validación de modelos (IUVM) para cada MCG, MCR y región. Se indican en azul los MCGs, en negro los MCRs y en rojo el modelo MRI/JMA

Los modelos seleccionados fueron los siguientes:

Región Húmeda: CCSM4 (NCAR, Estados Unidos ), MRI/JMA (MRI, Japón), CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italia) y NorESM1-M (Norwegian Climate Centre, Noruega), todos MCGs.

Región Centro: CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques, Francia), CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italia), CSIRO-Mk3-6-0 (CSIRO, Australia) y MRI/CGM3 (MRI, Japón), todos MCGs.

Región Andes: IPSL-CM5A-MR (Institut Pierre Simon Laplace, Francia), ETA-HadCM3 (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil), MRI/JMA (MRI, Japón) y MPI-ESM-LR (Max Planck Institute for Meteorology, Alemania). Todos MCGs, excepto ETA-HadCM3 MCGs.

Región Patagonia: REMO-ECHAM5 (Max Planck Institute for Meteorology, Alemania), MM5-HadCM3 (CIMA, Argentina), CSIRO-Mk3-6-0 (CSIRO, Australia), GFDL-ESM2G (NOAA-GFDL, Estados Unidos). Los dos primeros regionales y los otros dos, MCGs.

### 3.3.7 Corrección de los errores sistemáticos de los modelos

En la sección 3.3.5 se vio que todos los modelos presentan errores al representar los campos medios de la temperatura en superficie y de la precipitación en el periodo de validación. Como estos errores sistemáticos son importantes, es necesario elaborar correcciones para modificar los resultados del modelo de modo que se aproximen lo más posible al clima observado. Esto implica el cálculo de factores de corrección basados en los errores sistemáticos, que luego se aplicarán a los escenarios climáticos futuros proyectados por el MCGs, tanto en sus valores medios como en los datos diarios necesarios para ciertos estudios de impactos, especialmente en la agricultura y los recursos hídricos.

Hay distintas técnicas de corrección de los modelos que van desde la más simple mediante el ajuste a los valores medios del clima observado, a otras más sofisticadas en las que las variables a corregir lo son de tal modo que presenten, luego de la corrección las mismas distribuciones estadísticas que en el clima observado. Este último es el esquema que se utilizó y es mucho más poderoso que el de la simple corrección de los valores medios ya que asegura





no solo que los valores medios se ajusten a los observados, sino también su distribución estadística, con lo cual parte de la variabilidad queda bien representada. Este esquema es robusto en términos estadísticos y fue previamente usado en diferentes trabajos (Wood y otros 2002, 2004; Vidal y Wade 2008, Saurral, 2012) en los que se mostró la utilidad del mismo para mejorar las simulaciones provistas por modelos climáticos antes de emplearlas como entradas a modelos hidrológicos.

El ajuste o calibración se realiza sobre un periodo con simulaciones climáticas y datos confiables observados, donde obviamente los valores de los modelos corregidos serán muy similares a los observados. Pero luego, este ajuste se verifica en un segundo periodo independiente de modo que si se observa una adecuada validación en este segundo periodo se puede tener una mayor confianza en las proyecciones futuras. Esto no implica la eliminación total del nivel de incerteza de las proyecciones futuras (sección 3.5).

De acuerdo a la disponibilidad de las simulaciones del clima pasado por parte de los modelos globales y regionales se tomó el intervalo (1961-75) para el cómputo de factores de corrección (calibración) y (1976-90) para la validación de las correcciones realizadas. Por la diferente disponibilidad de datos del modelo, en el caso del modelo global de alta resolución MRI, los períodos considerados fueron 1991-2003 para la calibración y 1979-1990 para la validación.

El método consiste en computar la distribución de percentiles de las series de temperatura media y de precipitación acumulada mensual tanto en los datos de la base CRU correspondientes a las observaciones como en los provistos por los modelos para el período de calibración. El vector de corrección se obtuvo en el caso de la temperatura, de forma que se sumó a cada dato la diferencia entre el valor del percentil  $p$  en las observaciones menos el del percentil  $p$  en el modelo climático, mientras que en el caso de la precipitación, se procedió a multiplicar cada valor mensual de los modelos climáticos por el cociente entre el valor del percentil  $p$  de precipitación en las observaciones sobre el valor del percentil  $p$  en el modelo climático.

Esto se realizó para cada variable, temperatura y precipitación, y para cada punto del reticulado correspondiente a la base CRU, por lo que los datos de los modelos debieron ser previamente interpolados al reticulado CRU. El esquema de corrección se aplicó a los campos de cada uno de los doce meses de precipitación y temperatura de superficie, para cada uno de los 4 modelos seleccionados en cada una de las 4 regiones. Como se aprecia se trata de un enorme volumen de factores de corrección.

### **3.3.8 Validación del método de corrección de errores sistemáticos**

Para completar el trabajo de calibración se pasó a su validación sobre un segundo periodo. Dado que no es posible mostrar todos los resultados para los centenares de puntos evaluados, los mismos se sintetizan mediante mapas que muestran la comparación de los valores medios de los modelos corregidos en el periodo de validación con los respectivos datos observados, complementado con las distribuciones estadísticas en algunos puntos de cada región.

Estos mapas y gráficos se muestran en los capítulos 5 a 8, correspondientes a cada región donde también se hace su análisis. La conclusión es que con la selección de los modelos de



mejor performance y el método de corrección de sus errores sistemáticos aplicado, se logra representar los valores medios de la precipitación y la temperatura anual con error pequeño en la mayor parte del territorio continental argentino. Esto es con menos del 10% en la precipitación y menos de 0,5°C en la temperatura. Igualmente, también se logra representar las distribuciones estadísticas con poco error, excepto para algunos casos, particularmente en los extremos de las distribuciones de lluvia. Esto último es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la Argentina.

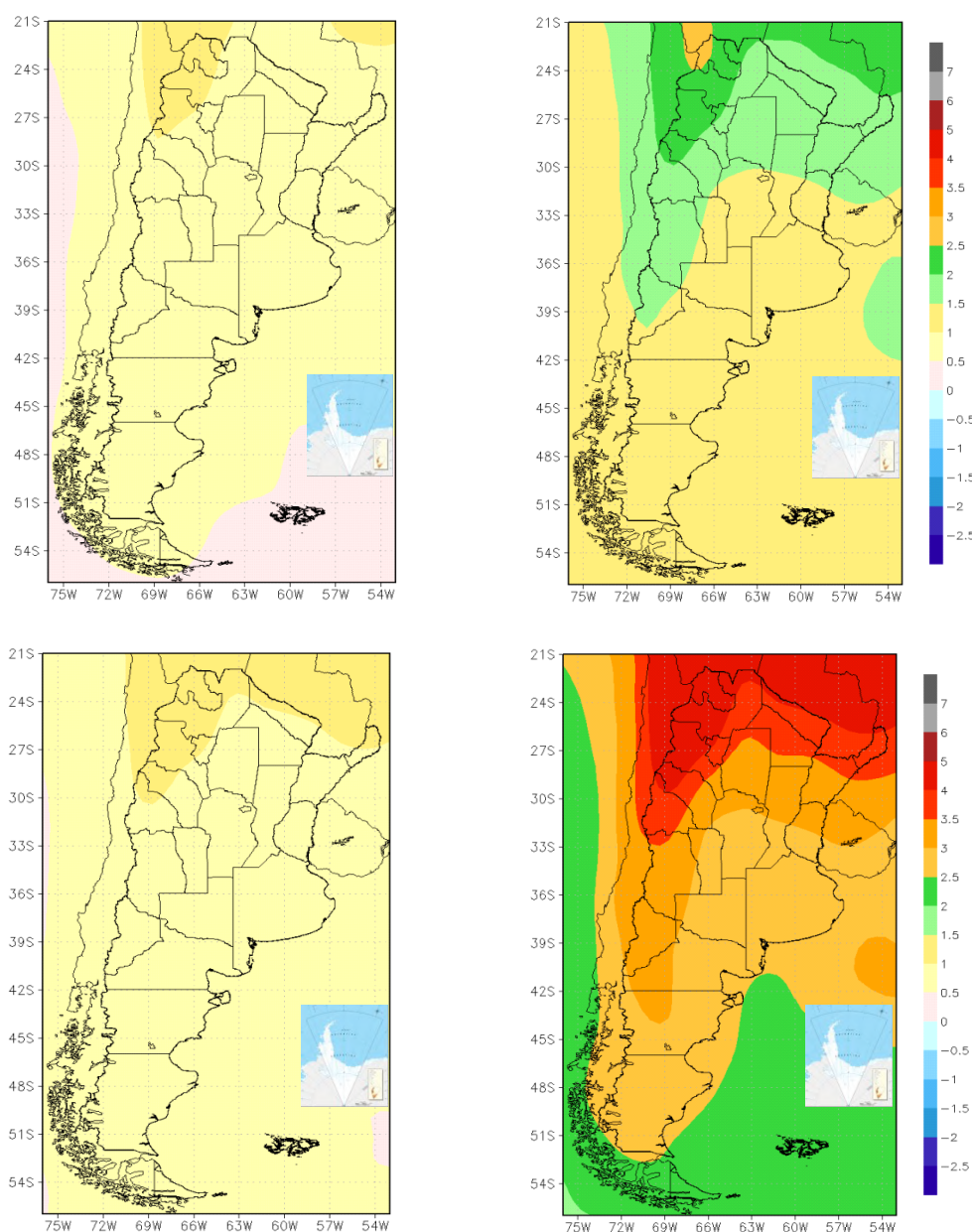
### **3.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)**

Con los modelos seleccionados para cada región se construyeron los escenarios RCP4.5 y 8.5 y en algunas regiones el A1B para el futuro cercano (2015-2039) y el futuro lejano (2075-2099). Como los modelos elegidos son distintos para cada región esos resultados se muestran en los capítulos regionales (capítulos 5 a 8). En este capítulo se presenta una visión general de todo el país y para ello se muestran las diferencias de estos mismos escenarios y periodos con el periodo de referencia 1981-2005 del promedio de los 42 modelos de la base CMIP5. Esta es otra forma de usar los modelos climáticos para construir escenarios climáticos y es la que fue utilizada por el IPCC en sus últimos informes. En este caso, las coincidencias o divergencias de estos promedios sobre los 42 modelos con los escenarios climáticos regionales contruidos con los modelos elegidos para cada región es un elemento de juicio para evaluar la incerteza de los escenarios climáticos por la divergencia entre modelos. Para mayores detalles a nivel regional, los mapas de los capítulos regionales se consideran más confiables porque están basados en los modelos que para cada región representaron mejor el clima observado.

La temperatura media aumenta en todo el país en los dos escenarios, tanto para el futuro cercano como para el lejano y en ambos casos los aumentos de temperatura son mayores hacia fin de siglo, Figura 3.4.1. De acuerdo a lo esperado, en el futuro lejano el escenario RCP8.5 muestra mayor calentamiento que el RCP4.5. En el futuro cercano, se proyectan aumentos muy similares en los dos escenarios con valores entre 0,5 y 1°C en casi todo el país. Esto implicaría una aceleración del calentamiento observado entre 1986-2010, que en casi todo el país fue menor a 0,5°C, Tablas 5.2.1.1, 6.2.1.1, 7.2.1.1 y 8.2.1.1.

El patrón geográfico es de mayor aumento en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste que se prolonga hacia el sur en los escenarios de mayor calentamiento y que llega hasta el centro de la Patagonia con más de 3°C. La otra característica de esos escenarios es que en todos los casos los aumentos de temperatura son menos pronunciados en las zonas como la Patagonia y la provincia de Buenos Aires, que se encuentran más expuestos a la circulación de los vientos provenientes de los océanos.

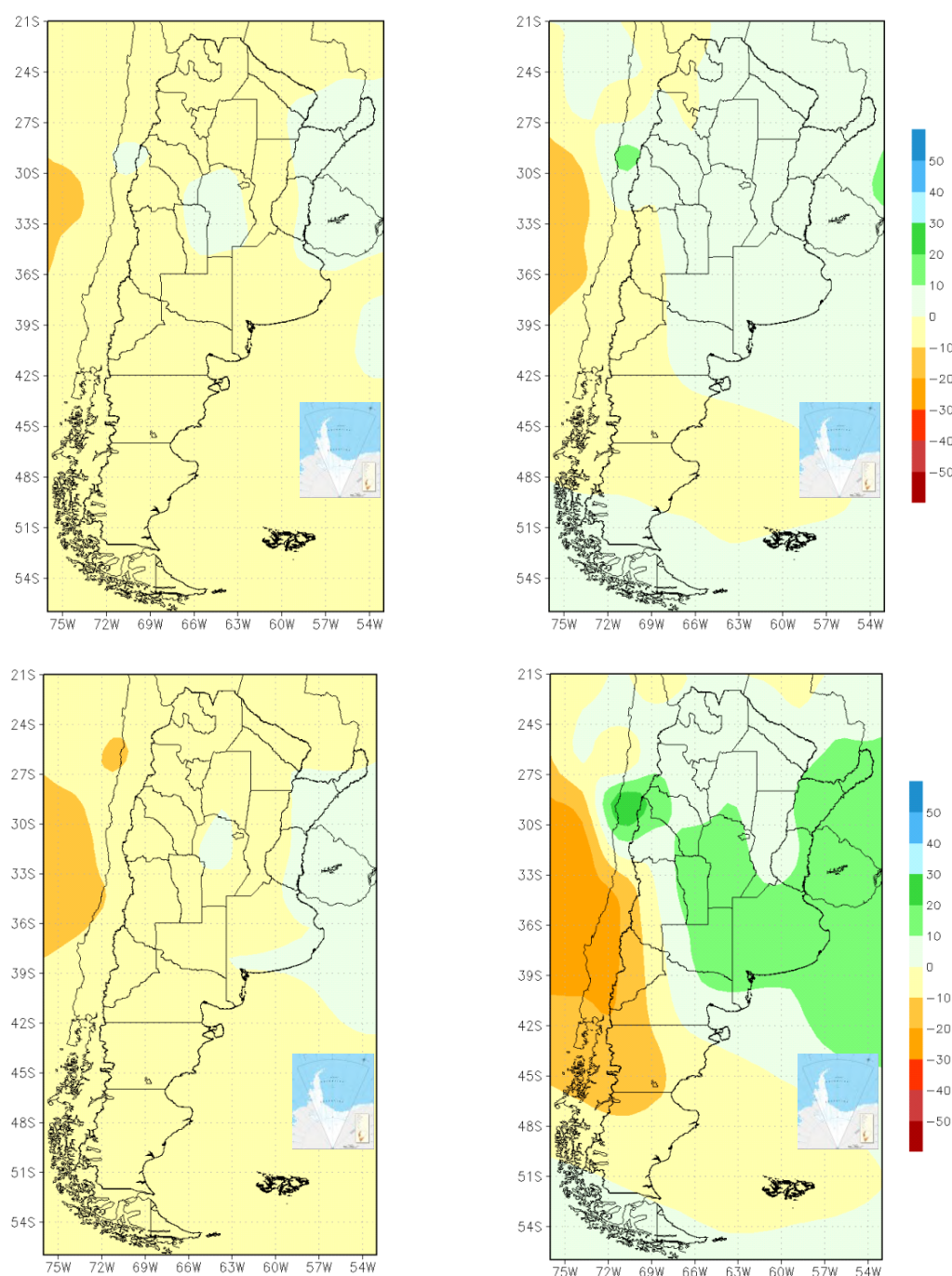
Por el contrario, la región de máximo calentamiento sería la del noroeste que no solo está muy alejada del mar, sino que está encerrada entre las sierras pampeanas desde Salta hasta San Luis por el este, por los Andes al oeste y por la Puna al norte. Por esta orografía, el mayor ingreso de aire en capas bajas es desde el sur, fundamentalmente con el pasaje de frentes fríos, que con el calentamiento global, tendrían un ingreso cada vez más esporádico a esta región, agravando de esta forma el calentamiento provocado localmente por el aumento de los GEIs.



**Figura 3.4.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior, escenario RCP4.5 y panel inferior, RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

En el caso de la precipitación, los cambios proyectados por el promedio de los 42 modelos de la base CMIP5 no son importantes, Figura 3.4.2. Excepto para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, los cambios proyectados están entre menos diez y más diez por ciento. Si se considera que este podría ser el rango de las posibles fuentes de error, estas señales de cambio serían poco relevantes. Por ello, se podría asumir que no habría mayores cambios en la precipitación en todo el país en el futuro cercano, ni tampoco en el caso del escenario RCP4.5

en el futuro lejano. Esto se confirma con los escenarios regionales, calculados con solo los modelos elegidos como más representativos del clima observado (capítulos 5 a 8).



**Figura 3.4.2:** Cambio porcentual en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario, RCP4.5 y panel inferior, RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)



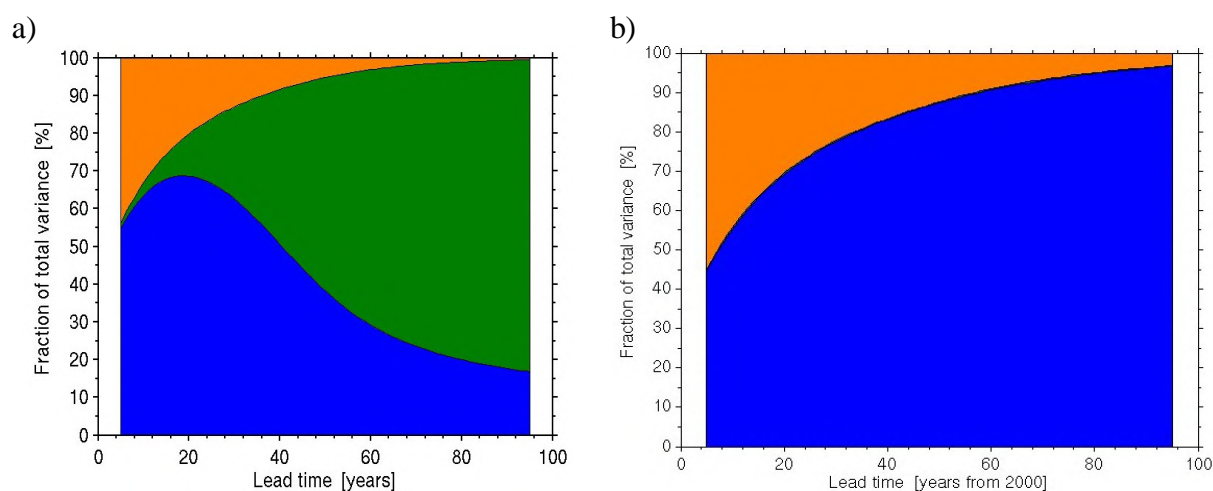
En el caso del escenario RCP8.5, para el futuro lejano se proyecta un descenso de 10 a 20% sobre el oeste de la Patagonia norte y central y un aumento similar en el centro y la mayor parte del este del país. En los escenarios de las regiones Húmeda y Central, capítulos 5 y 6, este aumento solo coincide en el signo pero está acotado entre 0 a 10 %, por lo que se puede estimar que en esas regiones solo habría un aumento moderado de las precipitaciones medias.

### 3.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente.

En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones.

La Figura 3.5.1 presenta la cuantificación del peso relativo de las tres diferentes fuentes de incerteza en las proyecciones realizadas sobre Sudamérica por los MCG del CMIP3 a lo largo del siglo XXI.



**Figura 3.5.1:** Porcentaje relativo explicado por cada fuente de incerteza de las proyecciones con los modelos del CMIP3 de los promedios decadales sobre Sudamérica de a) temperatura media anual y b) precipitación acumulada anual. Naranja: incerteza de la variabilidad natural del clima, verde: incerteza de los escenarios de GEI, azul: incerteza de los modelos. (Hawkins y Sutton (2009) y (2011), <http://climate.ncas.ac.uk/research/uncertainty/>)

Tanto para la lluvia como para la temperatura de superficie, el porcentaje de incerteza asociada a la variabilidad interdecadal del clima es importante en los primeros años pero luego disminuye. Asimismo, para las proyecciones de la temperatura de superficie el porcentaje de incerteza asociada a los errores de los modelos aumenta para mediados del siglo XXI y luego disminuye. Sin embargo, su contribución a la incerteza de las proyecciones de la lluvia continúa aumentando, siendo la más importante hacia el final del siglo XXI. Esta figura





también muestra que si bien el porcentaje de incerteza asociado a las emisiones de GEI es importante en las proyecciones de la temperatura de superficie en el continente, el mismo es despreciable en las proyecciones de la precipitación a lo largo de todo el período frente a la gran incerteza que producen los modelos.

En suma, en términos absolutos y no solo relativos, en un futuro cercano (es decir dentro de la primera mitad del siglo XXI), la incerteza ocasionada por diferentes escenarios de concentración de GEI posibles es entonces muy reducida, mientras que las contribuciones de las otras dos fuentes de incerteza son grandes. Con el paso del tiempo, aunque la contribución de la variabilidad natural del clima se puede mantener constante, su peso relativo disminuye frente a la incerteza en la señal de cambio climático por aumento de las concentraciones de GEI. Sobre la Argentina, esto es válido en general para la temperatura mientras que para la precipitación depende de la región, dado que la discordancia entre modelos puede crecer con el tiempo (ej. Blázquez y Nuñez, 2012).

En este estudio, se comparan tres escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales, el RCP4.5 de emisiones moderadas y el A1B de emisiones intermedias entre las de los dos anteriores. Los detalles y resultados se presentan en los capítulos regionales (5 al 8).

## Referencias

Blázquez, J. y M. N. Nuñez, 2012: Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Climate Dynamics*. 10.1007/s00382-012-1489-7.

Carril, A. F., C. G. Menéndez, C. Remedio, F. Robledo, A. Sörensson, B. Tencer, J.P. Boulanger, M. de Castro, D. Jacob, H. Le Treut, L. Z. X. Li, O. Penalba, S. Pfeifer, M. Rusticucci, P. Salio, P. Samuelsson, E. Sanchez y P. Zaninelli, 2012: Assessment of a multi-RCM ensemble for South America. *Clim. Dyn.*, **39** (12), 2747–2768.

Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn y D. H. Lister, 2013. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623–642.

Hawkins, E y Rowan Sutton, 2011; The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change *ClimDyn.* **37**, 407–418

Meehl, G., C. Covey, K. E. Taylor, T. Delworth, R. J. Stouffer, M. Latif, B. McAvaney y J. F. Mitchell, 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **88**, 1383–1394.

Montroull, N., R. Saurral, I. Camilloni, C. Menendez, R. Ruscica y A. Sörensson, 2012: Escenarios hidrológicos futuros en la región de los esteros del Iberá en el contexto del cambio climático. *Meteorologica* (en prensa).

Nuñez, M. N., S. Solman, M. Cabré y A. Rolla, 2005: Estimación de escenarios regionales de cambio climático mediante el uso de modelos climáticos regionales. Informe *Final*



CIMA/CONICET, B-9 Modelos Climáticos Regionales- Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. GEF BIRF PF 51286 AR.

Saurral, R. I., 2012. La hidrología superficial de la cuenca del Plata y su representación a través de simulaciones climáticas: identificación de errores y mecanismos físicos asociados. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA.

Saurral, R. I., 2010: The hydrologic cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 multimodel dataset. *J. Hydrometeor.*, **11**, 1083–1102.

Solman, S. y N. Pessacg, 2012: Evaluating uncertainties in Regional Climate simulations over South America at the seasonal scale. *Clim. Dyn.*, **39**, 59–76.

Solman, S., E. Sanchez, P. Samuelsson, R. da Rocha, L. Li, J. Marengo, N. Pessacg, A.R. Remedio, S. C. Chou, H. Berbery, H. Le Treut, M. de Castro y D. Jacob, 2013. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: Model performance y uncertainties", *Clim. Dyn.*, **41**, 1139–1157.

Stouffer, R. J., K. E. Taylor y G. A. Meeh, 2011. CMIP5 Long-term experimental Design. *CLIVAR Exchanges*, **56**, 5–7.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer y G. A. Meehl, 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 485–498.

Vera, C., G. Silvestri, B. Liebmann, y P. Gonzalez, 2006: Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13707.

Vidal, J. P y S. Wade, 2007: A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *Int. J. Climatol.*, **28**, 843–858.

Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar y D. P. Lettenmaier, 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4429.

Wood, A. W., R. Leung Lai, V. Sridhar y D. P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, **62**, 189–216.



## **CAPITULO 4 BASE DE DATOS**

|              |   |         |
|--------------|---|---------|
| <b>4.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>   | pág. 69 |
| <b>4.2</b>   | <b>DEFINICIÓN Y ADECUACIÓN DEL CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS</b>                      | pág. 69 |
| <b>4.2.1</b> | <b>Datos diarios y mensuales observados</b>   | pág. 69 |
| <b>4.2.2</b> | <b>Índices de extremos de precipitación y temperatura basados en datos observados</b> | pág. 72 |
| <b>4.2.3</b> | <b>Datos simulados de modelos climáticos</b>  | pág. 72 |
| <b>4.3</b>   | <b>DEFINICIÓN Y ADECUACIÓN DEL FORMATO DE LOS DATOS</b>                               | pág. 72 |
| <b>4.4</b>   | <b>DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DE LA BASE DE DATOS</b>                              | pág. 73 |
| <b>4.4.1</b> | <b>Especificación detallada</b>   | pág. 73 |
| <b>4.4.2</b> | <b>Arquitectura de la Base de Datos</b>   | pág. 74 |
| <b>4.5</b>   | <b>INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN WEB DE LA BASE DE DATOS</b>                              | pág. 78 |
| <b>4.6</b>   | <b>DESCRIPCIÓN DE LOS ARCHIVOS DE METADATOS</b>                                       | pág. 82 |
| <b>4.7</b>   | <b>DOCUMENTOS EXPLICATIVOS DE LA BASE DE DATOS</b>                                    | pág. 83 |
| <b>4.8</b>   | <b>IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A DISPOSICIÓN DE LA BASE DE DATOS</b>                      | pág. 83 |



## BASE DE DATOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe las características de la Base de Datos climáticos elaborada. La Base de Datos constituye un soporte informático que permite albergar y poner a disposición abierta y pública, información climática relevante para los estudios de impacto de cambio climático que se realizarán a futuro en el marco de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático.

La Base de Datos incluye un conjunto de datos cuyos archivos correspondientes están descriptos en la sección 4.2 así como la adecuación realizada a los mismos. La sección 4.3 define los datos y describe el proceso de adecuación de los formatos correspondientes mientras en el Anexo III se detallan los archivos recibidos u obtenidos de sus fuentes originales, que han ingresado a la Base de Datos. En la sección 4.4 presenta la arquitectura sobre la cual está siendo generada la Base de Datos, cuyo detalle se incluyen además en el Anexo IV. La interfaz de visualización web que permite a los usuarios consultar los archivos almacenados y sus metadatos, como así también visualizar mapas de localización de los datos, se presenta en la sección 4.5. La descripción general del contenido de los archivos de metadatos se incluye en la sección 4.6 y su detalle en el Anexo V mientras que la descripción de los documentos explicativos sobre la Base de Datos se presenta en la sección 4.7 y el detalle de los mismos en el Anexo VI. La información sobre la implementación y puesta a disposición de la Base de Datos mediante la inclusión de los conjuntos de datos se discute en la sección 4.8.

### 4.2 DEFINICIÓN Y ADECUACIÓN DEL CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS

#### 4.2.1 Datos diarios y mensuales observados

La Base de Datos contiene información de precipitación y temperatura provenientes de observaciones del clima reciente (1961-2010). Dichos datos están representados en un reticulado geo-referenciado de al menos 1 grado de latitud y longitud de resolución. Por las características de las regiones geográficas a cubrir por la base, los datos se agrupan teniendo en cuenta dos áreas principales: a) Argentina Continental, b) Antártida e Islas del Atlántico Sur.

##### a) Argentina Continental

##### Datos Mensuales

Se proveen datos de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y precipitación. Asimismo se proveen datos de temperatura de la superficie del mar que pueden ser de utilidad para diversos estudios de impacto. Las características de los conjuntos de datos seleccionados para ser incluidos en la Base de Datos son los siguientes:

CRU\_TS 3.21:

Variabes: temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación

Resolución: 0.5x0.5,



Frecuencia: Mensual,  
Área: Global, Período: 1901-2012  
URL: [http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru\\_ts/cru\\_ts\\_3.21/data](http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_3.21/data)

GPCC Versión 6.  
Variables: Precipitación  
Resolución: 1.0x1.0,  
Frecuencia: Mensual,  
Área: Global,  
Período: 1901-2010  
URL: [ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/html/fulldata\\_v6\\_doi\\_download.html](ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/html/fulldata_v6_doi_download.html)

NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OI-SST V2).  
Variable: Temperatura de la superficie del mar.  
Resolución: 1.0x1.0,  
Frecuencia: Mensual,  
Área: Global,  
Período 1981-2014  
URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>

#### Datos diarios:

Se proveen datos de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y precipitación. Asimismo se proveen datos de temperatura de la superficie del mar que pueden ser de utilidad para diversos estudios de impacto. Las características de los conjuntos de datos seleccionados para ser incluidos en la Base de Datos son los siguientes:

Clarís-LPB SAT 1.0 :  
Variables: temperatura mínima, temperatura máxima  
Resolución: 0.5x0.5,  
Frecuencia: Diaria,  
Área: Sudeste de Sudamérica (SESA, 20S-40S; 45W-75W)  
Período: 1961-2000  
URL: <http://wp32.at.fcen.uba.ar/gridded>

Clarís-LPB-rr-05.1:  
Variables: precipitación  
Resolución: 0.5x0.5,  
Frecuencia: Diaria,  
Área: Sudeste de Sudamérica (SESA, 20S-40S; 45W-75W)  
Período: 1961-2000  
URL: <http://wp32.at.fcen.uba.ar/gridded/prec>

NOAA/ESRL PSD SA  
Variables: Precipitación,  
Resolución: 1.0x1.0,  
Frecuencia: Diaria,





Área: Sudamérica,  
Período: 1940-2012

URL: [ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets.other/south\\_america/sa24.daily.1.1940-2012.nc](ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets.other/south_america/sa24.daily.1.1940-2012.nc)  
[http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south\\_america\\_precip.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.south_america_precip.html)

#### NCEP REANALYSIS I

Variables: temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media

Resolución: 1.875x1.915

Frecuencia: Diaria

Área: Sudamérica (20.5°S – 59.5°S, 79.5°W – 50.5°W)

Período: 1960-2010

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>

#### NOAA OI SST V2 HR

Variables: temperatura de superficie del mar

Resolución: 0.25x0.25,

Frecuencia: Diaria,

Área: Global,

Período: 1981-Presente

URL: <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2.highres/sst.day.mean.yyyy.v2.nc>

#### b) Antártida e Islas del Atlántico Sur:

##### Datos mensuales

Se proveen datos de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y precipitación. Las características de los conjuntos de datos seleccionados para ser incluidos en la Base de Datos son los siguientes:

#### NCEP REANALYSIS I

Variables: temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media, precipitación

Resolución: 1.875x1.915

Frecuencia: Mensual

Área: (60°S – 89°S, 25°W – 74°W)

Período: 1960-2010

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>

##### Datos diarios

Se proveen datos de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media y precipitación. Las características de los conjuntos de datos seleccionados para ser incluidos en la Base de Datos son los siguientes:

#### NCEP REANALYSIS I

Variables: temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media, precipitación

Resolución: 1.875x1.915

Frecuencia: Diaria



Área: (60°S – 89°S, 25°W – 74°W)

Período: 1960-2010

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>

#### **4.2.2 Índices de extremos de precipitación y temperatura basados en datos observados**

Se proveen datos grillados de los 11 Índices de extremos de precipitación y temperatura descriptos en la sección 2.1.2 del Capítulo 2. Las características de los conjuntos de datos seleccionados para ser incluidos en la Base de Datos son los siguientes:

CLIMDEX HadEX2

Variables: FD, TR, TX<sub>x</sub>, TN<sub>n</sub>, TX90p, WSDI, Rx1, Rx5, CDD, R95pT

Resolución: 3.75x2.5

Frecuencia: Dependiente del índice

Área: Global

Período: 1960-2010

URL: <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadex2/download.html>

#### **4.2.3 Datos simulados de modelos climáticos**

La base incluye también los datos de precipitación y temperatura del clima del pasado reciente (1961-2010) y del clima futuro (2015-2039, 2075-2099) simulados por los modelos climáticos. Están a disposición los datos corregidos provenientes de todos los modelos climáticos que hayan sido seleccionados en el proceso de validación. Los datos simulados están disponibles en un reticulado geo-referenciado de 0.5 grados de latitud y longitud de resolución. Se proveerán los datos promedio del ensamble multi-modelo como de cada uno de los modelos individuales. Los datos climáticos simulados se proveen en resoluciones temporales diarias y mensuales. Los mismos cubren espacialmente la totalidad de Argentina subdividida en las 4 regiones de estudio. El listado de los modelos a incluir se encuentra en la sección 3.3.6 del Capítulo 3.

### **4.3 DEFINICIÓN Y ADECUACIÓN DEL FORMATO DE LOS DATOS**

Los archivos de datos dentro del sistema están almacenados en formato NetCDF. Este formato facilita que los archivos grillados estén organizados espacial y temporalmente según las dimensiones fijadas en la metadata. Los archivos de datos están organizados según:

-tipo de dato: observados grillados; simulaciones; índices.

-período: presente; futuro cercano; futuro lejano.

-variable: temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, temperatura de superficie del mar.

-frecuencia: mensual, diaria.

#### **Tratamiento previo:**

La estructura interna que presentan los diferentes archivos que conforman la base no es homogénea. En consecuencia para poder procesar los archivos mediante comandos de



extracción automatizada se elabora una tabla con los parámetros necesarios, cuya descripción se encuentra en el Anexo IV.

La mayoría de los archivos, provistos por diversas fuentes, son de cobertura global. Por esta razón los archivos originales han sido recortados en espacio y tiempo para adecuar al área y tiempo de estudio. De esa forma, se evita un mal uso de espacio e incrementos de procesamiento innecesarios.

Los datos grillados observados se almacenaron en sus grillas espaciales originales. Mientras que los datos grillados simulados provenientes de los modelos climáticos se grillaron en una resolución de medio grado (0.5x0.5).

#### Armado de archivos de datos grillados:

Para cada archivo de datos (de ahora en más llamado “recurso”) que se almacenó en la Base de Datos, se requirió la definición de una tabla conteniendo las coordenadas geográficas de los puntos (latitud-longitud) contenidos en los archivos, asociando país, región, provincia. Para este proceso se diseñó un script, que recupera las áreas definidas en shapes de país-provincia, donde a su vez se integró las regiones definidas en el proyecto. Para cada punto en un archivo dado, el script realiza la búsqueda dentro de las shapes obteniendo la provincia, región, y país de cada punto. Esta información se almacena en la Tabla Provincias-Grilla, que se utiliza en la visualización de los mapas y en la exportación de los Datos.

## **4.4 DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DE LA BASE DE DATOS**

### **4.4.1 Especificación detallada**

La extensión espacial de los datos se circunscribe a aquella de la República Argentina incluyendo la Antártida e Islas del Atlántico Sur. Debido a su extensión territorial, la visualización de los mapas, se divide en “Continental” (20S-60S 80W-50W) y “Antártida e Islas del Atlántico Sur” (sur de 60°S entre 74W-25W). Los archivos de datos simulados validados y corregidos para el proyecto corresponden a la Argentina en su zona continental. Asimismo Argentina Continental es dividida en 4 regiones:

- Húmeda,
- Centro,
- Andes
- Patagonia.

Cada región está conformada por un conjunto de provincias.

- Húmeda: Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Corrientes, Misiones
- Centro: Formosa, Chaco, Santiago Del Estero, Córdoba, San Luis, La Pampa
- Andes: Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, San Juan, Mendoza
- Patagonia: Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz, Tierra del Fuego e Islas Malvinas.

(La zona Antártida e Islas del Atlántico Sur no tiene sub regiones).

La Base de Datos cubre los siguientes períodos:

- Pasado reciente (1961-2010), datos grillados observados y simulados.



- Futuro cercano (2015-2039), solo simulaciones de los modelos seleccionados.
- Futuro lejano (2075-2099), solo simulaciones de los modelos seleccionados.

Asimismo se proveen algunos conjuntos de datos observados que cubren períodos temporales más cortos que el definido. Se decidió su provisión de manera de aumentar la oferta de datos.

Como se mencionó en la sección 4.3, los conjuntos de datos observados seleccionados para almacenar en la Base de Datos, están generados en grillas de distinta resolución que no coinciden entre sí. Los datos son almacenados en sus grillas originales y se provee para cada conjunto, la descripción de la grilla en la cual son representados. Cuando más de una resolución esté disponible, se elige para su almacenamiento aquella más cercana a un grado de resolución. Las simulaciones corregidas para cada región, se proveen en una grilla de medio grado de resolución (0.5x0.5).

Para la zona Antártida e islas del Atlántico Sur se hacen disponibles datos diarios y mensuales de provenientes de 9 modelos globales para todos los escenarios y variables solicitadas. Ninguno de los modelos regionales disponibles tiene un dominio que abarque esta zona. Con respecto a los índices, no se incluyen para esta zona dado que los índices calculados desde observaciones no incluyen a la Antártida. Por otra, porque los modelos si bien son globales la calidad de su información a esas latitudes tan altas es limitada como para justificar la calidad de los índices, y además porque la mayoría de los índices no tienen sentido práctico sobre la Antártida.

#### **4.4.2 Arquitectura de la Base de Datos.**

Esta sección describe en detalle las facilidades que la Base de Datos brinda y la arquitectura que se diseñó para su generación.

##### a) Diseño Conceptual:

El sistema maneja una cantidad de archivos, definida por las siguientes especificaciones:

- Datos Observados: 2 zonas, 1 período, 5 variables, 2 frecuencias.
- Datos simulados: 3 períodos, 9 modelos, 3 escenarios, 4 variables, 2 frecuencias.
- Datos de Índices: 1 zona, 3 períodos, 11 índices, 1 frecuencia.

Las simulaciones de tiempo presente cubren 50 años, se almacena en 2 archivos de 25 años cada una, esto reduce el tamaño de los archivos, que en la frecuencia diaria es crítico. Todos los archivos son indexados por la Base de Datos, que genera una tabla relacional, que contiene todas las propiedades de los archivos de manera de poder vincularlos y recuperarlos, según las consultas realizadas.

Los parámetros para los criterios de búsquedas que deben ser definidos para indexar las tablas son: zona, período, variable, frecuencia.

La Base de Datos incluye:

- los metadatos de los archivos,
- los descriptores necesarios para resolver las consultas impuestas,



- los descriptores de los archivos NetCDF, necesarios para extraer los datos con comandos automatizados,
- las grillas de latitud-longitud de cada archivo,
- las shapes de la Argentina

#### b) Diseño Físico:

La implementación física del modelo lógico arriba descrito se realiza centralizando toda la información de cada archivo en una tabla, denominada “Recurso”, esta tabla contiene todas las propiedades de los recursos. Cada recurso tiene un conjunto de posiciones latitud-longitud que georreferencian la variable que contiene.

Además se define una tabla “Grilla” que almacena las coordenadas, pares latitud-longitud, asociados a cada recurso, que incluye la provincia y país. Se define una tabla “NetCDFFFile” que almacena los todos descriptores de los archivos NetCDF necesarios para la extracción de datos. Se define una tabla “Argentina” que contiene las shapes de la Argentina, provincias, y continente Antártico.

Se normaliza la tabla Recurso, se generan entonces las tablas asociadas: zona, región, variable, frecuencia, institución, autor. Se definen las relaciones entre las tablas que se muestra en el diagrama Entidad-Relación. Se definen los índices en las tablas para acelerar las búsquedas.

En el Anexo V se detalla la descripción de la tabla “Recurso”, las tablas asociadas resultado de la normalización de la Base de Datos, y las tablas de trabajo resultado del pre-procesamiento de datos para armar las formas, definir las regiones incluyendo las provincias contenidas y definir las grillas de los recursos.

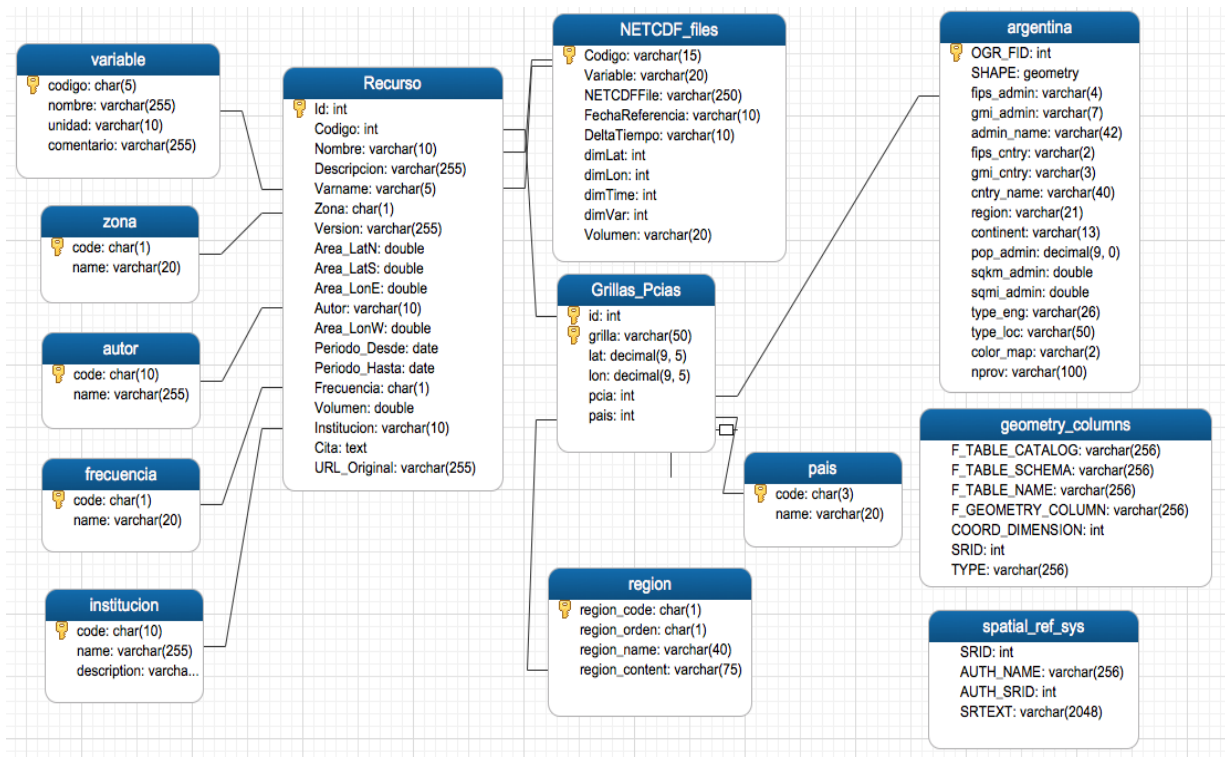
#### c). Modelo Entidad-Relación:

El grafico que se incluye a continuación representa las entidades relevantes del sistema de Base de Datos así como sus interrelaciones y propiedades.





**Figura 4.4.2.1 DIAGRAMA ENTIDAD-RELACION**



#### d) Tecnologías utilizadas.

El sistema está desarrollado utilizando herramientas de arquitectura abierta (Open Source). Funciona en plataforma Linux con un **servidor web Apache2**. Para alojar la Base de Datos relacional se utiliza **MySQL** y los lenguajes de programación y desarrollo utilizados son **PHP, SQL, JavaScript** (Ajax, **Jquery** y **Herramientas de desarrollo de Google Map** para mostrar los mapas). Los archivos en el sistema están almacenados internamente en formato **NetCDF**. El protocolo utilizado para la transferencia de hipertexto es **HTTP** (HyperText Transfer Protocol) que está basado en el envío de mensajes y establece el conjunto de normas mediante las cuales se envían peticiones de acceso y respuestas de una web, perteneciente a la capa de aplicación del modelo OSI. El **modelo de interconexión de sistemas abiertos OSI** (en inglés, *Open System Interconnection*) es el modelo de red descriptivo, que fue creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en el año 1980 (ISO/IEC 7498-1). Es un marco de referencia para la definición de arquitecturas en la interconexión de los sistemas de comunicaciones.

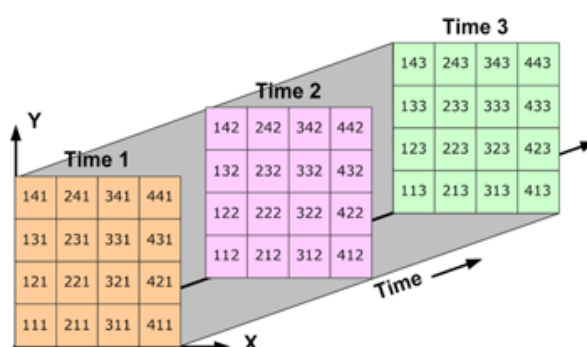
**Motivación en la selección de MySQL:** El servidor de bases de datos MySQL es muy rápido, seguro, y fácil de usar. El servidor MySQL fue desarrollado originalmente para manejar grandes bases de datos mucho más rápido que las soluciones existentes y ha estado siendo usado exitosamente en ambientes de producción sumamente exigentes por varios años. Aunque se encuentra en desarrollo constante, el servidor MySQL ofrece hoy un conjunto rico y útil de funciones. Su conectividad, velocidad, y seguridad hacen de MySQL un servidor apropiado para acceder a bases de datos en Internet.



## El almacenamiento de los datos en formato netCDF

La figura 4.3.2.1 muestra la estructura de un archivo netCDF mediante la anotación CDL (Idioma del formulario de datos comunes en red). CDL es el formato ASCII que se utiliza para describir el contenido de un archivo netCDF

```
netcdf filename {  
  dimensions:  
    lat = 3 ;  
    lon = 4 ;  
    time = UNLIMITED ; // (2 currently)  
  
  variables:  
    float lat(lat) ;  
      lat:long_name = "Latitude" ;  
      lat:units = "degrees_north" ;  
    float lon(lon) ;  
      lon:long_name = "Longitude" ;  
      lon:units = "degrees_east" ;  
    int time(time) ;  
      time:long_name = "Time" ;  
      time:units = "days since 1895-01-01" ;  
      time:calendar = "gregorian" ;  
    float rainfall(time, lat, lon) ;  
      rainfall:long_name = "Precipitation" ;  
      rainfall:units = "mm yr-1" ;  
      rainfall:missing_value = -9999.f ;  
  
  // global attributes:  
    :title = "Historical Climate Scenarios" ;  
    :Conventions = "CF-1.0" ;  
  
  data:  
    lat = 48.75, 48.25, 47.75 ;  
    lon = -124.25, -123.75, -123.25, -122.75 ;  
    time = 364, 730 ;  
    rainfall =  
      761, 1265, 2184, 1812, 1405, 688, 366, 269, 328, 455, 524, 877,  
      1019, 714, 865, 697, 927, 926, 1452, 626, 275, 221, 196, 223 ;  
}
```



**Figura 4.4.2.2:** Componentes básicos de un archivo netCDF

Los datos de un archivo netCDF se almacenan en conjuntos. Por ejemplo: la temperatura que varía con el tiempo en una ubicación se almacena como un conjunto unidimensional. La temperatura de un área durante un tiempo determinado se almacena como un conjunto bidimensional.

Los datos tridimensionales (3D), como p.ej., la temperatura de un área que varía con el tiempo, se almacenan como series de conjuntos bidimensionales. Datos tridimensionales: son los datos de un área que varían con el tiempo. Un archivo netCDF contiene dimensiones, variables y atributos. Estos componentes se utilizan conjuntamente para captar el significado de los datos y las relaciones entre los campos de datos en un archivo orientado a los conjuntos.

### Dimensiones

La dimensión netCDF consta de nombre y tamaño. El tamaño de la dimensión es un número entero positivo de valor arbitrario. La dimensión se puede utilizar para representar una dimensión física real; por ejemplo, tiempo, latitud, longitud o altura. La dimensión también se puede utilizar como índice de otras cantidades, por ejemplo, número para ejecutar estación o modelo. Es posible utilizar la misma dimensión más de una vez para especificar una shape variable.



## **Variables**

Una variable representa un conjunto de valores del mismo tipo. Las variables se utilizan para almacenar el volumen de los datos en un archivo netCDF. Cada variable tiene nombre, tipo de datos y forma descrita mediante la lista de sus dimensiones especificadas en el momento de crear la variable. El número de dimensiones es la clasificación (también denominado "dimensionalidad"). Una variable escalar tiene una clasificación de 0, un vector tiene una clasificación de 1 y una matriz tiene una clasificación de 2. Una variable también puede tener atributos asociados que se pueden agregar, eliminar o cambiar después de crear la variable.

## **Variables de coordenadas**

Una variable unidimensional que tenga el mismo nombre que una dimensión es una variable de coordenadas. Se asocia a una dimensión constituida por una o más variables de datos y, normalmente, define la coordenada física que corresponde a esa dimensión.

Las variables de coordenadas no tienen ningún significado especial para la biblioteca netCDF. Sin embargo, el software que utilice esta biblioteca deberá manejar las variables de coordenadas de manera especializada.

## **Atributos**

Los atributos netCDF se utilizan para almacenar datos secundarios o metadatos. La mayoría de los atributos proporcionan información sobre una variable determinada. Estos atributos se identifican por el nombre de la variable junto con el nombre del atributo. Los atributos que proporcionan información sobre todo el archivo netCDF se denominan atributos globales.

## **Convenciones**

Las convenciones definen los metadatos que proporcionan una descripción definitiva de los datos de cada variable y sus propiedades espaciales y temporales. La convención ayuda a los usuarios de los datos procedentes de distintas fuentes decidir qué cantidades son comparables. El nombre de la convención se presenta como un atributo global en un archivo netCDF.

## **4.5 INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN WEB DE LA BASE DE DATOS**

Mediante esta interfaz el usuario deberá ser capaz de seleccionar las búsquedas previamente definidas en la Base de Datos, ingresando parámetros de selección de shape amistosa, de rápido accionar y que eviten errores. Para los archivos almacenados en la Base de Datos se muestra:

- La descripción general de cada archivo
- La información detallada de cada archivo
- Visualización previa de la información a recuperar mediante mapa grillado.

Para el archivo seleccionado se muestra, antes de descargar el archivo:

- Los metadatos asociados y valoración experta del archivo
- La gráfica donde se pueden obtener datos a descargar, identificando los dominios regionales de las 4 áreas de estudio, mediante selección de áreas.
- puntos/áreas seleccionadas con posibilidad de ser “des-seleccionadas” para reducir el tamaño del archivo a descargar, ajustándolo a las necesidades del usuario.



Se generan los archivos finales a descargar en formatos requeridos en los TDR, independientemente del formato de almacenamiento interno: ASCII y Shape

La interfaz proporciona un feedback del accionar del usuario, con ayudas y recuperación de errores de manera eficaz a través de una gráfica clara que facilita al usuario el reconocimiento visual de lo ofrecido en pantalla.

La interfaz incluye dos componentes principales:

- Una componente pública, a la que accede el público en general y comunica contenidos del proyecto al usuario común.
- Una componente a la que se accede por registración, destinada al usuario interesado en consultar y descargar los datos albergados en la Base de Datos

#### Diseño de la Interfaz Pública

Esta interfaz tiene como objetivo comunicar a los usuarios los objetivos del proyecto y de la Base de Datos, como así también provee información sobre quienes han colaborado en su construcción, contactos para obtener más información y links relacionados.

La página inicial tiene incluido un menú de ayudas y login. Ambos elementos están preparados para guiar al usuario interesado en usar la componente principal del sitio: “Base de Datos”. Se han agregado estructuras para que este sitio público pueda crecer, teniendo en cuenta que es un proyecto en desarrollo y a futuro puede ser necesario agregar más información.

#### Diseño de la Interfaz Base de Datos

Esta interfaz cuenta con una registración que inicialmente se usará para moderar los ingresos, y en su fase definitiva, maneja una registración de activación automática para minimizar la atención requerida para el sitio web por el administrador. Para ello cuenta con una pantalla de login, que incluye la registración de los usuarios, recuperación automática de contraseña por olvidos y el ingreso al sitio. La registración de los usuarios requiere que los mismos incluyan en el formulario en línea información de contacto y además las motivaciones y objetivos de los trabajos de investigación, desarrollo, asistencia técnica que requieren del uso de los datos.

La identificación y actividad del usuario es mantenida por el sistema como un registro en el archivo de log incluyendo información como los accesos a la página y exportación de datos. Este permitirá realizar estadísticas confiables del uso de la Base de Datos.

Pasada la etapa de registración, se ingresa directamente a la búsqueda de recursos, según los parámetros definidos:

- Zona
- Período
- Variables
- Frecuencia



Se recuperan los registros que cumplen con la selección, visualizándose una tabla conteniendo:

- Nombre y descripción del Recurso
- Un botón que permite visualizar los metadatos.
- Un botón para visualizar gráficamente el área abarcada por el recurso, desplegando sobre un mapa los puntos que definen la grilla donde se seleccionará las series temporales de datos contenidos en la misma.

El usuario selecciona el “Mapa” del recurso elegido y en una ventana emergente para cada recurso seleccionado, se despliega:

- A izquierda un mapa con los puntos disponibles en color azul.
- A derecha aparece su identificación y un botón de “Info” para visualizar los metadatos. Si la variable cae en la zona Argentina Continental, se mostraran más ayudas de selección.

A medida que los puntos son seleccionados por los distintos métodos disponibles, se muestran en rojo. Los métodos disponibles de selección de puntos son:

- Selección por Región (solo para zona Argentina Continental). Se dispone de cajas de selección, para optar por las distintas regiones. En el mapa se visualizan las selecciones cambiando a color rojo.
- Selección por Provincia (solo para zona Argentina Continental). Las cajas de selección permitirán marcar la/s provincia/s, que en el mapa se visualizan cambiando a color rojo.
- Selección por Puntos individuales. Es posible seleccionar puntos en forma individual, para ello, parados sobre el mapa realizar un zoom de la zona con la que se va a trabajar y hacer click en los puntos elegidos. Los puntos seleccionados cambian a color rojo.
- Selección por Área rectangular, a elección del usuario definida sobre el mapa con el mouse.
- Selecciones mixtas, es posible combinar estas selecciones y así ir sumando áreas/puntos.
- Es posible deseleccionar puntos, provincias y/o regiones. En caso de realizar las deselecciones, los puntos vuelven a su color original azul. Es posible limpiar toda el área de trabajo, usando el botón “Limpiar Puntos”.

La interfaz permite realizar zooms sobre las áreas de interés del usuario identificando los nombres de las localidades hasta una resolución de metros. Es posible realizar “paneos” sobre el mapa hasta ubicar el o los puntos en la zona de interés. Es posible cambiar los fondos de los mapas entre: vista orográfica, vista satelital, o híbrida (con localidades y rutas). Es posible reconocer las coordenadas del punto grillado, señalando dicho punto con el mouse.

Una vez definida la selección final, usando el botón “Exportar Puntos” se dispara la consulta de exportación necesaria para los scripts que procesan los datos. La interfaz muestra un ícono en movimiento, para indicarle al usuario que la extracción está en curso. De esta manera se extraen de los archivos indexados por la Base de Datos, las Series de Tiempo (ST) de la variable seleccionada, en la frecuencia y período elegidos, para cada punto de grilla marcado. Se muestra un link al archivo resultado, y el tamaño del mismo.





### Exportación de la Base de Datos

Las ST generadas, se exportan de la Base de Datos. Para cada punto seleccionado, se generará un archivo con la ST en formato texto “csv” (comma separated values: valores separados por coma), y para el conjunto de archivos obtenidos se construye:

- Un archivo GIS, conteniendo las posiciones de todos los puntos exportados en formato shape del área seleccionada.
- Un archivo conteniendo los metadatos asociados.

Se utiliza el formato “csv” porque es muy genérico y de fácil importación a distintos utilitarios (por ejemplo MS Excel, Access, o para ser usados por distintos lenguajes de programación: Matlab, R, etc).

La estructura del nombre de los archivos es:

- Lat{Latitud},\_Lon{Longitud}.csv
- puntos.{shp|shx | dbf }
- detalle.csv

Donde:

Latitud: es la latitud correspondiente a cada uno de los puntos exportados

Longitud: es la longitud correspondiente a cada uno de los puntos exportados.

Puntos: es el archivo shape conteniendo los puntos exportados.

Con el conjunto de archivos csv, el archivo shape y detalle, anteriormente descriptos, se construye un archivo comprimido (en formato zip). Se realiza esta compresión pues para el usuario es más eficiente la descarga de los archivos por internet, ya que reduce el tiempo de transferencia.

El formato del archivo Latx\_Lony.csv para las ST es:

Latitud (numérico -gg.mm)

Longitud (numérico -gg.mm)

Fecha (date dd/mm/aaaa)

Valor (numérico snnn.d)

El formato del archivo detalle.csv es:

Registro 1:

Nombre de Variable; Unidad: texto libre

Registro 2:

Archivo original: texto libre

Registro 3:

Nombre Institución: texto libre

Registro 4:

Autor: texto libre

Registro 5:

Cita: texto libre

Registro 6:

Comentario Experto: Texto libre



El GIS, está compuesto por los archivos SHP, SHX y DBF, sistema WGS 84 en formato ESRI compatible.

#### 4.6 DESCRIPCIÓN DE LOS ARCHIVOS DE METADATA

Como se describió en las secciones anteriores, las consultas y vistas que se pueden realizar en la Base de Datos incluyen la visualización de los archivos de metadatos asociado a cada recurso que se ofrece. El metadatos se organiza a través de una tabla que contiene lo siguiente:

- Código: uso interno de la Base de Datos
- Descripción: Se describe brevemente los datos y los métodos utilizados para generar el conjunto de datos grillados.
- Versión: se especifica en caso que el conjunto de datos cuente con más de una versión disponible.
- Zona: zona Continental o Antártica en la que se provee el recurso.
- Área Geográfica: límites en latitud y longitud de la zona en la que se provee el recurso.
- Período Desde/Hasta: período temporal en el que se provee el recurso.
- Frecuencia: Diaria o Mensual
- Institución: Nombre de la Institución o Instituciones de origen que proveen el recurso.
- Autor: Nombres del personal de esas Instituciones responsable de la generación del recurso.
- Cita: Referencia bibliográfica relacionada con el recurso.
- Tipo de Reticulado (grilla): espaciamiento en latitud y longitud del reticulado en el que se provee el recurso.
- Tipo de Datos: “Grillados Observados” en caso que el recurso se base en observaciones o “Grillados Simulados” en caso que el recurso provenga de simulaciones de modelos climáticos.
- Volumen: Tamaño en Megabites del recurso.
- Variables: Información sobre la variable, unidad, código de datos faltante, asociados con el recurso.
- URL: Dirección web donde el recurso es proporcionado por la Institución de origen.
- Nombre del Archivo: Nombre del archivo netcdf en el que se almacena el recurso en la Base de Datos.
- Comentario Experto: Espacio que en caso sea necesario se utiliza para proveer información adicional al usuario sobre el recurso. En particular se incluye información sobre la calidad del dato provisto por el recurso.

La descripción detallada del metadatos correspondiente a cada uno de los conjuntos de datos o recursos provistos en la Base de Datos y detallados en la sección 4.2 se incluye en el Anexo V.



#### **4.7 DOCUMENTOS EXPLICATIVOS DE LA BASE DE DATOS**

De manera facilitar a los usuarios el acceso y utilización de la Base de Datos a través de la interfaz web así como facilitar y recomendar una utilización adecuada y responsable de su contenido, se han elaborado un conjunto de documentos explicativos relacionados con:

- Acceso a la Base de Datos
- Uso de la Base de Datos
- Uso de los datos Grillados Observados
- Uso de los datos Grillados Simulados

El detalle de la primera versión de esos documentos se encuentra en el Anexo Cap4.IV. Los mismos estarán disponibles a través del link “Ayuda” que se encuentra en la parte superior derecha de la interfaz web.

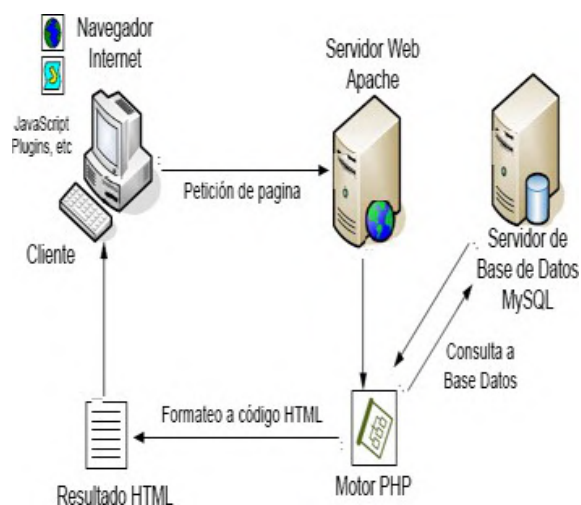
Los documentos están organizados en el formato de Pregunta/Respuesta. Este formato se seleccionó dado que permite una identificación rápida por parte del usuario de la pregunta que resuelve su duda o su problema y a la vez este formato permite una fácil actualización y/o expansión de los temas de ayuda.

El contenido de los documentos proporcionados en este informe serían una primera versión que luego se actualizará incluyendo preguntas que surjan de los usuarios que utilicen la Base de Datos.

#### **4.8 IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA A DISPOSICIÓN DE LA BASE DE DATOS**

La Base de Datos está implementada en los servidores del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), que cuenta con un servicio de acceso a internet de alta velocidad, provisto por la FCEN/UBA y acceso a Redes Avanzadas (Internet II) provistos por innova-red (innova-red.net). El host cuenta con servidor Web Apache2, Servidor de Base de Datos MySQL y motor PHP. Todos ellos protegidos por un firewall.

La figura 4.8.1 muestra en forma resumida la relación entre las consultas de los usuarios (Cliente Web), la interacción de los servidores y el resultado obtenido.



**Figura 4.8.1:** *Relación entre las consultas desde la Web e interacción de los servidores*

La Base de Datos se encuentra disponible y su consulta disponible a través de la interfaz web, en el sitio: <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>.

## CAPITULO 5: CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN HÚMEDA

|              |  |          |
|--------------|--|----------|
| <b>5.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>  | pág. 86  |
| <b>5.1.1</b> | <b>Dominio espacial</b>  | pág. 86  |
| <b>5.1.2</b> | <b>Datos</b>   | pág. 86  |
| <b>5.2</b>   | <b>CAMBIOS Y TENDENCIAS</b>  | pág. 86  |
| <b>5.2.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 86  |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 86  |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 92  |
|              | <i>Incerteza sobre las tendencias de temperatura</i>                             | pág. 95  |
| <b>5.2.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 98  |
|              | <i>Precipitaciones medias anuales y estacionales</i>                             | pág. 98  |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 104 |
|              | <i>Grado de Incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados</i> | pág. 108 |
| <b>5.2.3</b> | <b>Otras variables</b>   | pág. 109 |
| <b>5.3</b>   | <b>VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES</b>                                    | pág. 110 |
| <b>5.3.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 110 |
| <b>5.3.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 114 |
| <b>5.4</b>   | <b>ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)</b>                                   | pág. 118 |
| <b>5.4.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 118 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 118 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 124 |
| <b>5.4.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 131 |
|              | <i>Precipitación media</i>   | pág. 131 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 133 |
| <b>5.5</b>   | <b>EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b>                   | pág. 138 |
| <b>5.5.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 138 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 138 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 140 |
| <b>5.5.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 143 |
|              | <i>Precipitación media</i>   | pág. 143 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 145 |
| <b>5.6</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | pág. 147 |
|              | <b>Referencias</b>   | pág. 148 |



## CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN HÚMEDA

### 5.1 INTRODUCCIÓN

#### 5.1.1 Dominio espacial

La región a la que se refiere este capítulo comprende a las provincias de: Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires y se caracteriza por no presentar una estación seca y/o condiciones reiteradas de estrés hídrico.

#### 5.1.2 Datos

Las bases de datos utilizadas y las razones de su selección están descritas en la sección 2.1 del capítulo 2. Se utilizó para la temperatura de superficie y la precipitación la base CRU TS3.1, producida en el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris y otros 2013) que tiene temperatura y precipitación mensual y se extiende en su versión 3.20 hasta el 2010 (<http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk>). Para la descripción de las tendencias de los índices de extremos se usó la base CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) donde están calculados siguiendo las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

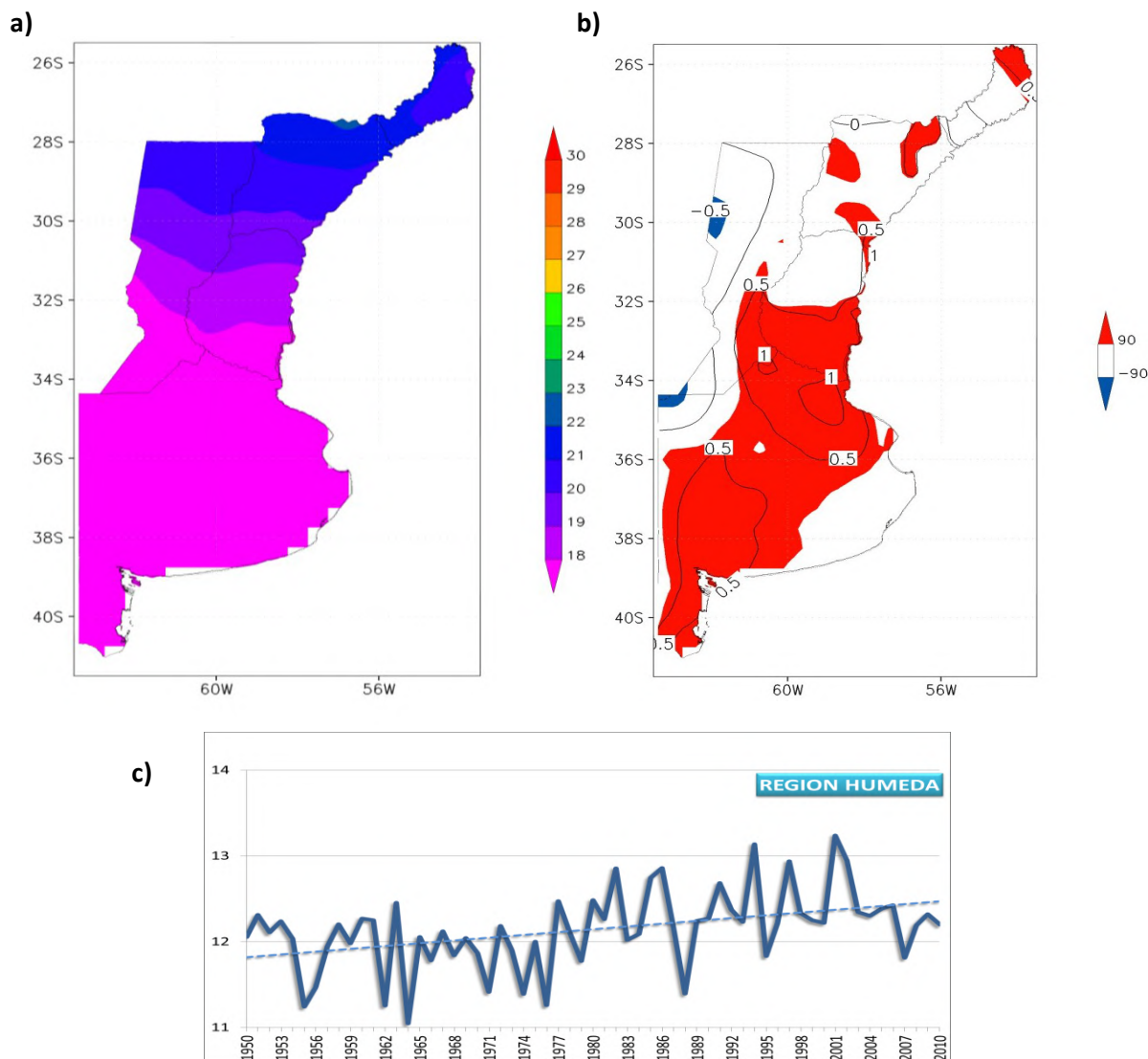
Complementariamente para evaluar la posible incerteza originada en la escasa información básica existente se hicieron comparaciones con datos del SMN en el caso de la temperatura y con la base GPCC (Schneider 2013) en la precipitación. Para esta última variable se usaron también datos de 4 estaciones de Servicio Meteorológico Nacional, una de cada provincia de la región para calcular los cambios en el índice extremo Rnnmm (*número de días en el año con precipitación por encima de los umbrales de 50, 100 y 150 mm*).

### 5.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

#### 5.2.1 Temperatura

##### *Temperaturas medias*

**En más de la mitad de la región Húmeda la temperatura media anual aumentó en más de 0,5°C entre 1960 y 2010 y en promedio en más de 0,3°C (*confianza media*)**, Figura 2.2.1.1b y c. La mayor parte de este aumento se registró por un salto a principios de la década de 1980, Figura 5.2.1.1c. Este aumento en el promedio regional ha sido significativo estadísticamente al 95%, Figura 5.2.1.1c, al igual que en la mayor parte de la provincia de Buenos Aires y sur de Entre Ríos. El aumento fue generalizado aunque no significativo en toda la región, como en las provincias de Santa Fe y Entre Ríos. El calentamiento regional promedio (0,4°C) entre 1950 y 2010 fue menos de la mitad del calentamiento global sobre los continentes para el mismo periodo (IPCC AR5, WGI capítulo 2, Tabla 2.4).



|                             | Buenos Aires | Sta Fe– Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-----------------------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio<br/>1950-2010</b> | <b>0,6**</b> | <b>0,4 **</b>      | 0,1                 | <b>0,4**</b>  |

**Figura 5.2.1.1:** a) Campo medio de la temperatura media anual (°C) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en °C para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; c) serie anual de la temperatura media integrada en las 5 provincias y cuadro de cambios (°C) por provincias.  
\* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

Excepto por los mapas globales de las bases internacionales, la literatura sobre tendencias y/o cambios de la temperatura media en la región es muy escasa, pero hay más publicaciones sobre las temperaturas mínimas y máximas medias y extremos. Los pocos trabajos publicados no coinciden en los periodos sobre los que se calcularon las tendencias en este informe (Camilloni y Barros 1995) o han estado orientados hacia extremos de temperatura y analizan fundamentalmente las temperaturas mínimas y máximas medias en las estaciones extremas del año (Rusticucci y Barrucand 2004). En cuanto a los mapas globales de tendencias de los distintos conjuntos (HADCRUT4, MLOST, GISS), tal como fueron evaluados por el IPCC, coinciden en indicar una tendencia positiva de la temperatura media significativa en la región pero muestran ciertas diferencias debido a las distintas técnicas de extrapolación de datos utilizadas (IPCC AR5, WGI capítulo 2, Figura 2.2.1.1).

En todas las estaciones del año y en todas las subregiones la temperatura aumentó en el periodo 1950-2010 con la sola excepción del invierno en Corrientes-Misiones y los mayores aumentos ocurrieron en la primavera, Tabla 5.2.1.1.

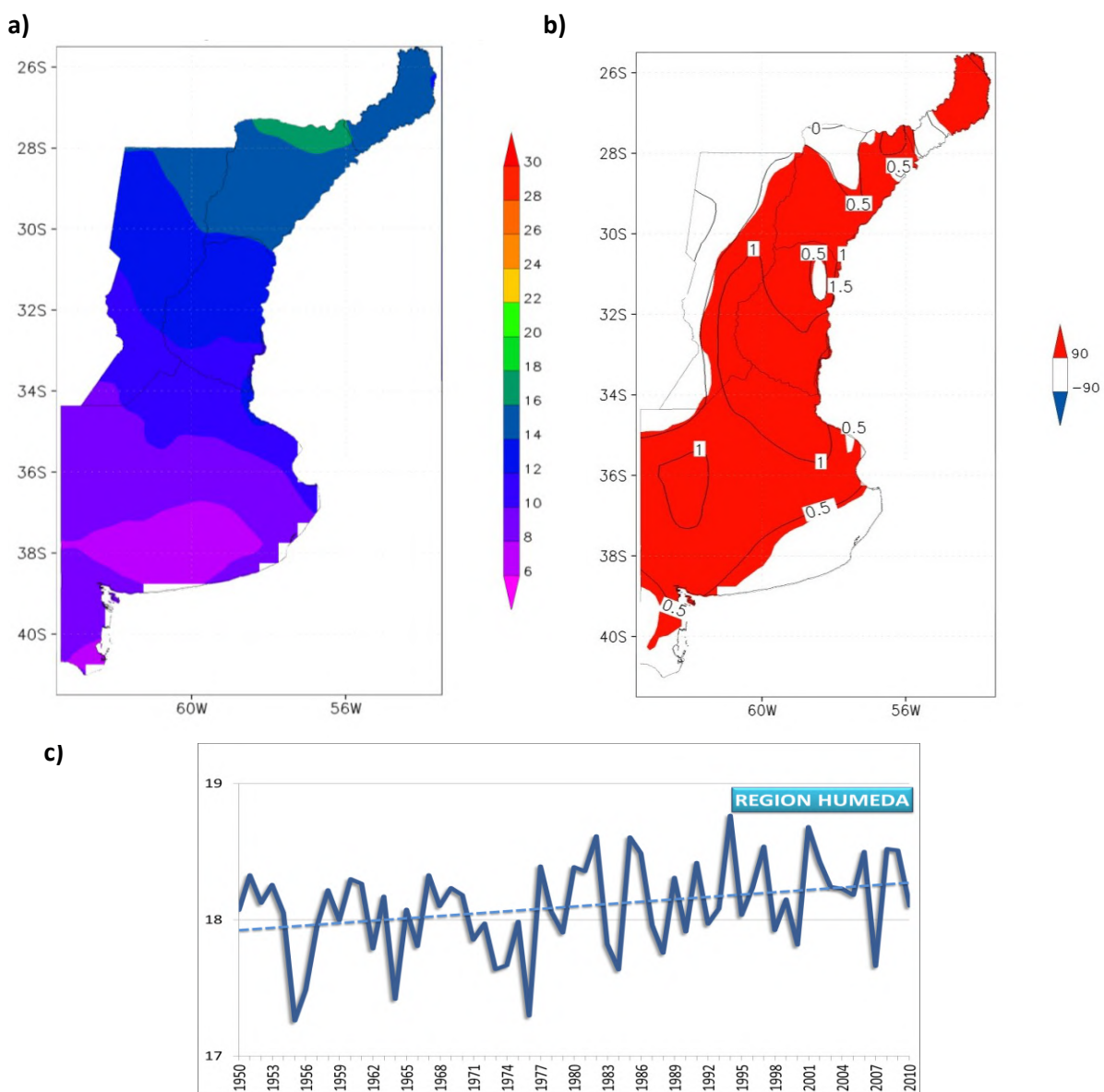
|                            |               | <b>TEMPERATURA MEDIA 1950-2010</b> |      |      |      |              |
|----------------------------|---------------|------------------------------------|------|------|------|--------------|
|                            |               | DEF                                | MAM  | JJA  | SON  | ANUAL        |
| <b>BUENOS AIRES</b>        | <i>Medio</i>  | 21,0                               | 11,9 | 9,9  | 17,9 | 15,2         |
|                            | <i>Cambio</i> | 0,5                                | 0,4  | 0,5  | 1,0  | <b>0,6**</b> |
| <b>SANTA FE ENTRE RIOS</b> | <i>Medio</i>  | 23,6                               | 15,0 | 13,2 | 20,9 | 18,2         |
|                            | <i>Cambio</i> | 0,1                                | 0,3  | 0,3  | 1,0  | <b>0,4**</b> |
| <b>CORRIENTES MISIONES</b> | <i>Medio</i>  | 25,6                               | 18,1 | 16,8 | 23,3 | 21,0         |
|                            | <i>Cambio</i> | 0,1                                | 0,1  | -0,3 | 0,3  | 0,1          |
| <b>REGIÓN HÚMEDA</b>       | <i>Medio</i>  | 22,7                               | 14,1 | 12,3 | 19,9 | 17,2         |
|                            | <i>Cambio</i> | 0,3                                | 0,3  | 0,3  | 0,9  | <b>0,4**</b> |

**Tabla 5.2.1.1:** Valores medios y cambios de la temperatura media para la región Húmeda y para 3 subregiones (°C). \*\* significancia al 95%

**En la mayor parte de la región, la temperatura mínima media aumentó en más de 0,5°C entre 1960 y 2010 y en más de 1°C en por lo menos la mitad de la región (confianza media),** Figura 5.2.1.2b. Aunque como en el caso de la temperatura media, se aprecia un salto a principios de la década del 80, hay una tendencia creciente más regular a lo largo de todo el periodo. Este aumento a nivel regional ha sido significativo estadísticamente al 95 %, Figura 5.2.1.2c, excepto en el oeste de Santa Fe y sudeste de Buenos Aires y zonas pequeñas de la Mesopotamia.

Rusticucci y Barrucand (2004) encontraron similares resultados para la temperatura mínima con una tendencia al aumento en toda la región, pero muy reducido en el verano en el sur de Buenos Aires y en general en invierno. Asimismo, al igual que en el caso de la temperatura media, en todas las estaciones del año y en todas las subregiones, la temperatura mínima aumentó en el periodo 1950-2010 con la sola excepción del invierno en Corrientes-Misiones. Aunque los mayores aumentos se dieron en la primavera fueron importantes también en las otras estaciones,

Tabla 5.2.1.2. Incluso en la primavera, los aumentos fueron significativos estadísticamente en todas las subregiones y en el verano también con la excepción de Corrientes y Misiones.



|                         | Buenos Aires  | Sta Fe– Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | <b>0,8 **</b> | <b>-0,8 **</b>     | 0,4                 | <b>0,7 **</b> |

**Figura 5.2.1.2:** Ídem Figura 5.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)

|                            |        | TEMPERATURA MINIMA 1950-2010 |      |      |       |       |
|----------------------------|--------|------------------------------|------|------|-------|-------|
|                            |        | DEF                          | MAM  | JJA  | SON   | ANUAL |
| <b>BUENOS AIRES</b>        | Medio  | 14,2                         | 6,4  | 4,2  | 11,3  | 9,0   |
|                            | Cambio | 1,0**                        | 0,5  | 0,6  | 1,1** | 0,8** |
| <b>SANTA FE ENTRE RIOS</b> | Medio  | 17,3                         | 9,4  | 7,2  | 14,5  | 12,1  |
|                            | Cambio | 0,8**                        | 0,7  | 0,4  | 1,4** | 0,8** |
| <b>CORRIENTES MISIONES</b> | Medio  | 19,9                         | 12,9 | 11,1 | 17,4  | 15,3  |
|                            | Cambio | 0,4                          | 0,5  | -0,2 | 0,7** | 0,4   |
| <b>REGIÓN HÚMEDA</b>       | Medio  | 16,3                         | 8,6  | 6,5  | 13,5  | 11,2  |
|                            | Cambio | 0,8**                        | 0,6  | 0,4  | 1,2** | 0,7** |

**Tabla 5.2.1.2:** Ídem Tabla 5.2.1.1, pero para la temperatura mínima media (°C)

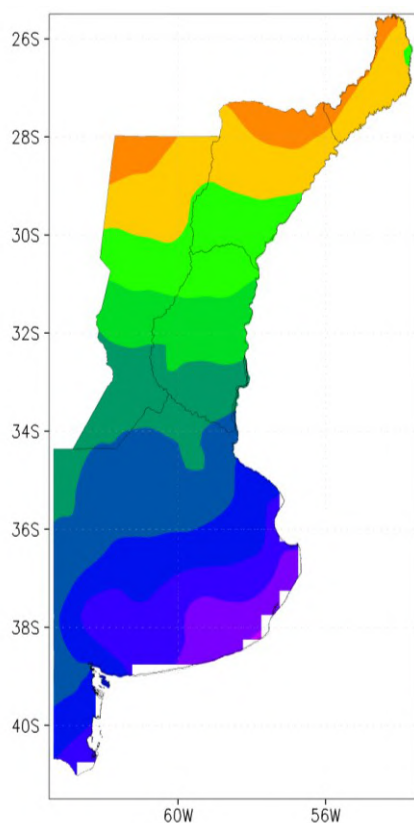
El promedio regional de la temperatura máxima media en la región Húmeda no aumentó más de 0,1°C entre 1960 y 2010 (*confianza alta*), Figura 5.2.1.3b. Incluso se redujo en forma estadísticamente significativa en las zonas de Santa Fe y del noroeste de Buenos Aires, Figura 5.2.1.3a, donde fue máximo el aumento de la precipitación, Figura 5.2.2.1. Esto último es indicativo de la consistencia de ambas bases de datos. El hecho que el aumento manifestado en las temperaturas mínimas, no se observa en las temperaturas máximas se debe a que las tendencias observadas a mayores precipitaciones, especialmente en la parte estival del año, están asociadas a nubosidad y evaporación, procesos que tienden a atenuar las altas temperaturas.

Las temperaturas máximas han disminuido en el verano y otoño (aunque no en Buenos Aires en esta última estación) y excepto en el norte de la región han aumentado en el invierno y primavera, Tabla 5.2.1.3. La disminución de las temperaturas máximas en el verano y el otoño, estaciones del mayor cambio en la precipitación, refuerza el concepto de que las temperaturas máximas han disminuido en parte por las mayores precipitaciones, Figuras 5.2.2.2 y 5.2.2.3.

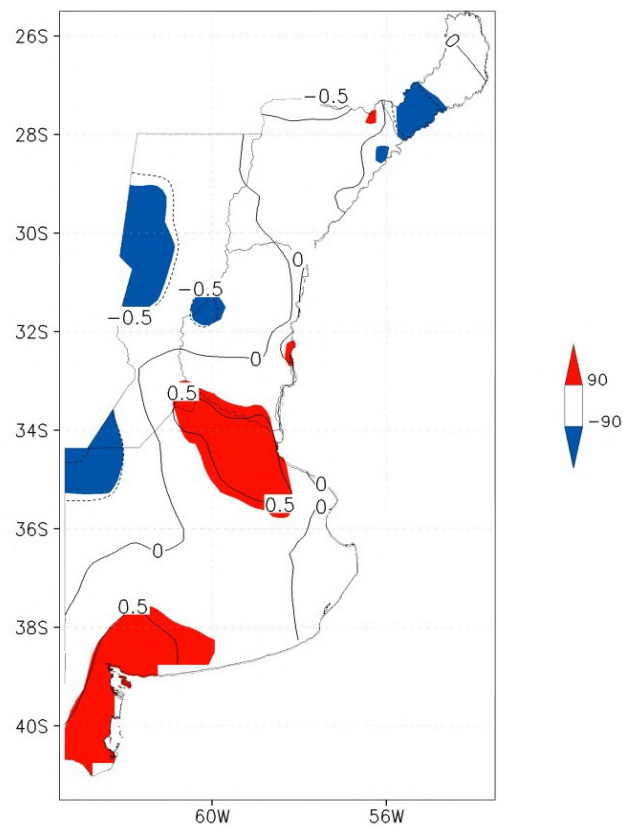
Rusticucci y Barrucand (2004) encontraron similares resultados para la temperatura máxima con tendencias negativas en el verano toda la región excepto en Corrientes y Misiones donde no coinciden con los resultados aquí presentados. De todos modos en ambos casos las tendencias son pequeñas y por lo tanto sensibles al periodo considerado que fue distinto en cada caso. En el invierno, como en este informe, las autoras encontraron tendencias también pequeñas, pero positivas excepto en Corrientes y Misiones.



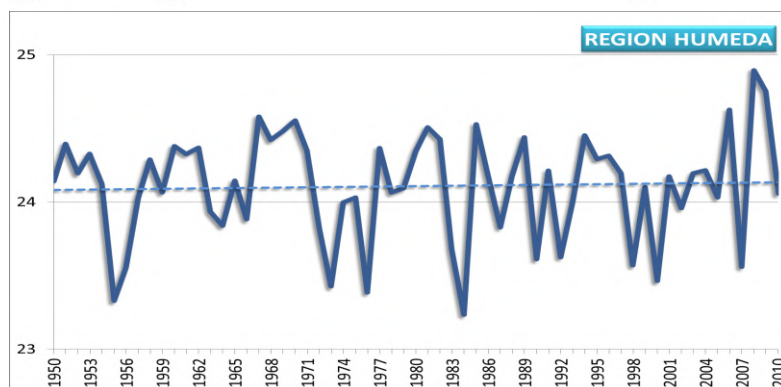
a)



b)



c)



|                         | Buenos Aires | Sta Fe- Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | 0,4          | 0,0                | 0,3                 | 0,1           |

**Figura 5.2.1.3:** a) Ídem Figura 5.2.1.1, pero para la temperatura máxima media anual (°C). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%



|                            |        | TEMPERATURA MAXIMA 1950-2010 |      |      |       |       |
|----------------------------|--------|------------------------------|------|------|-------|-------|
|                            |        | DEF                          | MAM  | JJA  | SON   | ANUAL |
| <b>BUENOS AIRES</b>        | Medio  | 27,9                         | 17,4 | 15,6 | 24,6  | 21,4  |
|                            | Cambio | -0,1                         | 0,3  | 0,4  | 0,8** | 0,4*  |
| <b>SANTA FE ENTRE RIOS</b> | Medio  | 30,0                         | 20,6 | 19,3 | 27,4  | 24,3  |
|                            | Cambio | -0,6                         | -0,1 | 0,3  | 0,6   | 0,0   |
| <b>CORRIENTES MISIONES</b> | Medio  | 31,4                         | 23,3 | 22,5 | 29,3  | 26,6  |
|                            | Cambio | -0,2                         | -0,4 | -0,3 | -0,1  | -0,3  |
| <b>REGIÓN HÚMEDA</b>       | Medio  | 27,9                         | 17,9 | 18,6 | 25,7  | 23,9  |
|                            | Cambio | -0,4                         | -0,2 | 0,1  | 0,4   | 0,0   |

**Tabla 5.2.1.3:** Ídem Tabla 5.2.1.1, pero para temperatura máxima media (°C)\* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

### *Extremos térmicos*

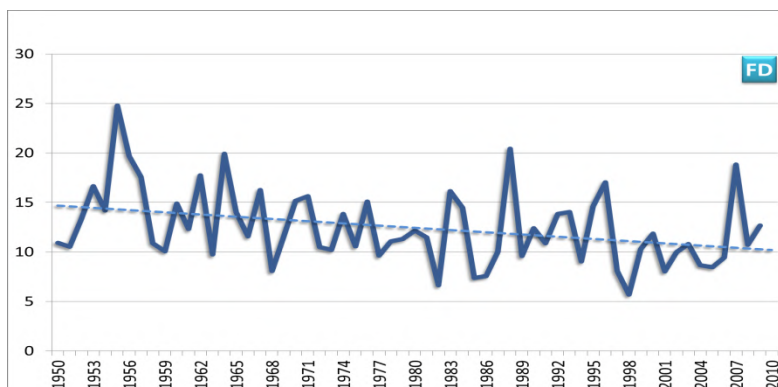
Los cambios en los índices de extremos de temperatura son consistentes con el calentamiento regional y con los cambios en las precipitaciones, especialmente en los últimos 20 años (confianza alta), Figuras 5.2.1.4 a 5.2.1.9. El cambio consistente con el calentamiento es significativo para el promedio regional del número de heladas, el promedio regional del número de noches tropicales y el promedio regional del valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima. En el caso del promedio regional del porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 y de las olas de calor, el aumento se manifiesta desde principios de la década de 1990 y no se distingue una tendencia para todo el periodo por los altos valores de la década de 1950, en la que probablemente las extremas condiciones secas favorecieron situaciones con muy altas temperaturas.

Por otra parte, es notable el descenso del promedio regional del valor máximo anual de la temperatura diaria máxima que alcanza 1,7°C, consistente con el aumento generalizado de la precipitación, Figura 5.2.2.1. Estos resultados son similares a los obtenidos con otra metodología por Rusticucci y Barrucand (2004) quienes encontraron pocos cambios en el número de días fríos, pero tendencias marcadamente negativas en el número de días cálidos en el verano.

El promedio anual del número de días con heladas se redujo en un 10% en el sur de la región, un 30% en el centro entre 1960 y 2010 y las heladas casi han desaparecido en las zonas bajas de Misiones, Figura 2.2.4 (Ver sección 2.2). Asimismo, el número de noches con temperaturas mínimas superiores a 20°C aumentó desde un 30 % en el norte a un 50 % en el sur, Figura 2.2.5. El número de días en el año con olas de calor se incrementó en un día en el sur y en 4 en Misiones y Corrientes, Figura 2.2.7, y prácticamente se duplicó en toda la región entre 1960 y 2010. El aumento se produjo entre 1990 hasta 2010, periodo en que los días con olas de calor se multiplicaron 4 veces, aunque ello no llegó a compensar la tendencia negativa iniciada en la

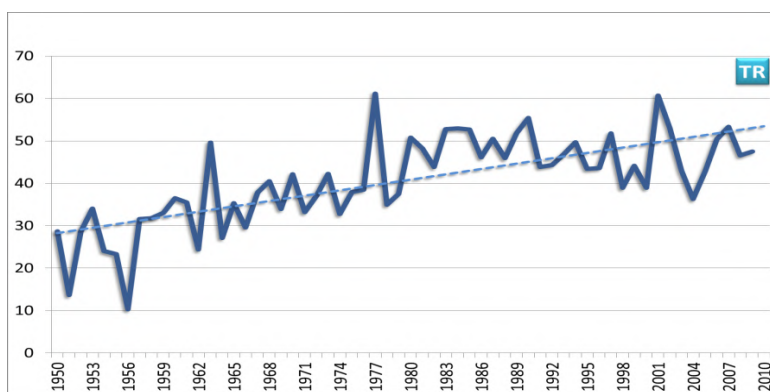


década de 1950, Figura 5.2.1.9. Sin embargo, los cambios a escala provincial no son significativos estadísticamente debido a su alta variabilidad interanual.



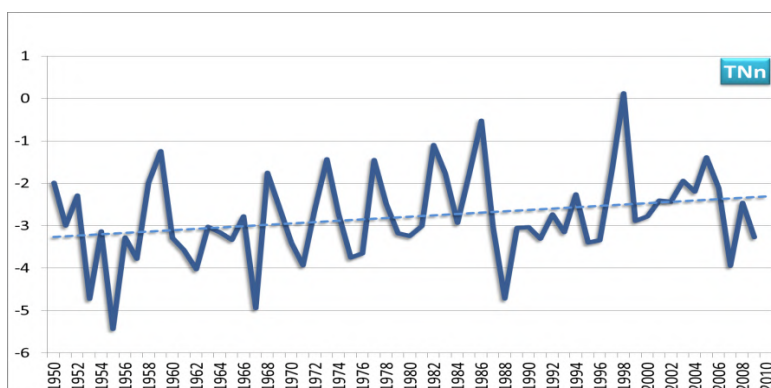
|                         | Buenos Aires  | Sta Fe– Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | <b>-7,3**</b> | <b>2,8</b>         | <b>-3,5**</b>       | <b>-4,5**</b> |

**Figura 5.2.1.4:** Promedio regional del número de días con heladas (FD) y cuadro de cambios por provincia (días). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%



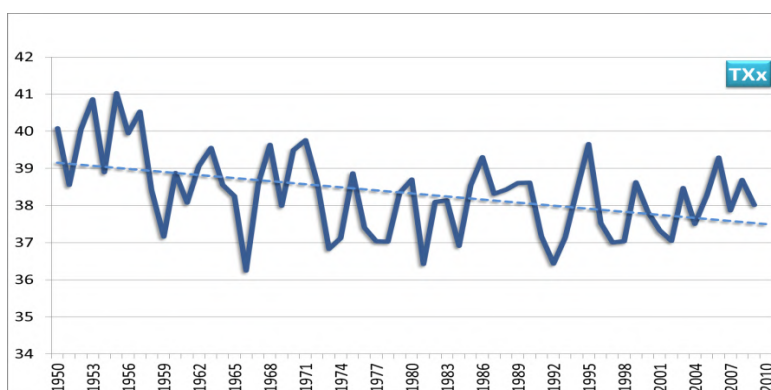
|                         | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | <b>6,6**</b> | <b>21,8 **</b>      | <b>50,3**</b>        | <b>25,3**</b> |

**Figura 5.2.1.5:** Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el número de noches tropicales (TR) (°C)



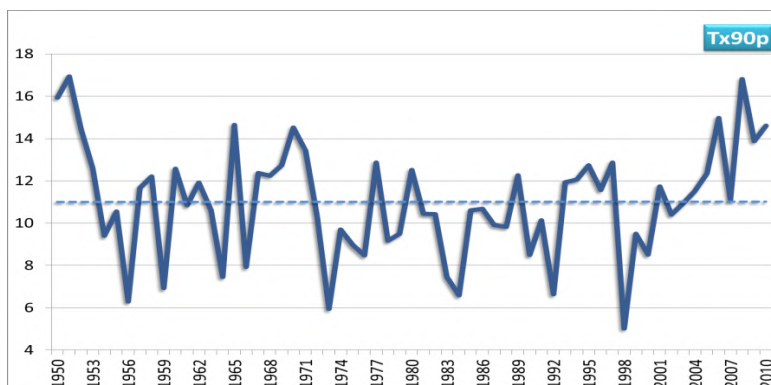
|                             | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-----------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio<br/>1950-2010</b> | 0,5          | 0,7                 | <b>1,7**</b>         | <b>1,0*</b>   |

**Figura 5.2.1.6:** Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima (TN) (°C)



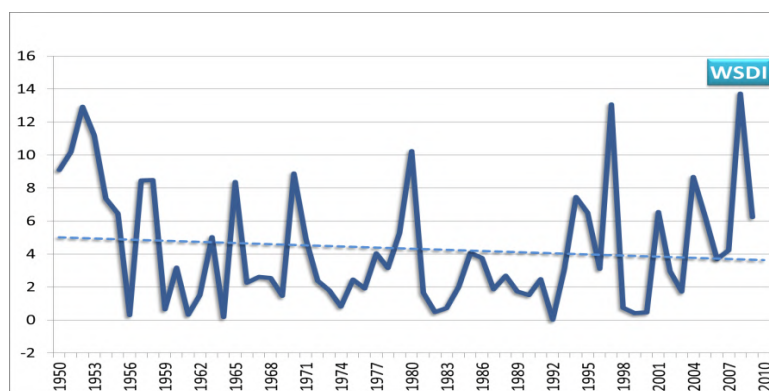
|                             | Buenos Aires  | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-----------------------------|---------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio<br/>1950-2010</b> | <b>-2,2**</b> | -1,0                | <b>-1,7**</b>        | <b>-1,7**</b> |

**Figura 5.2.1.7:** Ídem Figura 5.2.1.4, pero para la temperatura diaria máxima (TX) (°C)



|                         | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | -1,6         | -0,3                | 2,0                  | 0,0           |

**Figura 5.2.1.8:** Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 (TX90p)



|                         | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | -2,0         | -0,4                | -1,7                 | -1,4          |

**Figura 5.2.1.9:** Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el índice de la duración de olas de calor (WSDI) (días). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

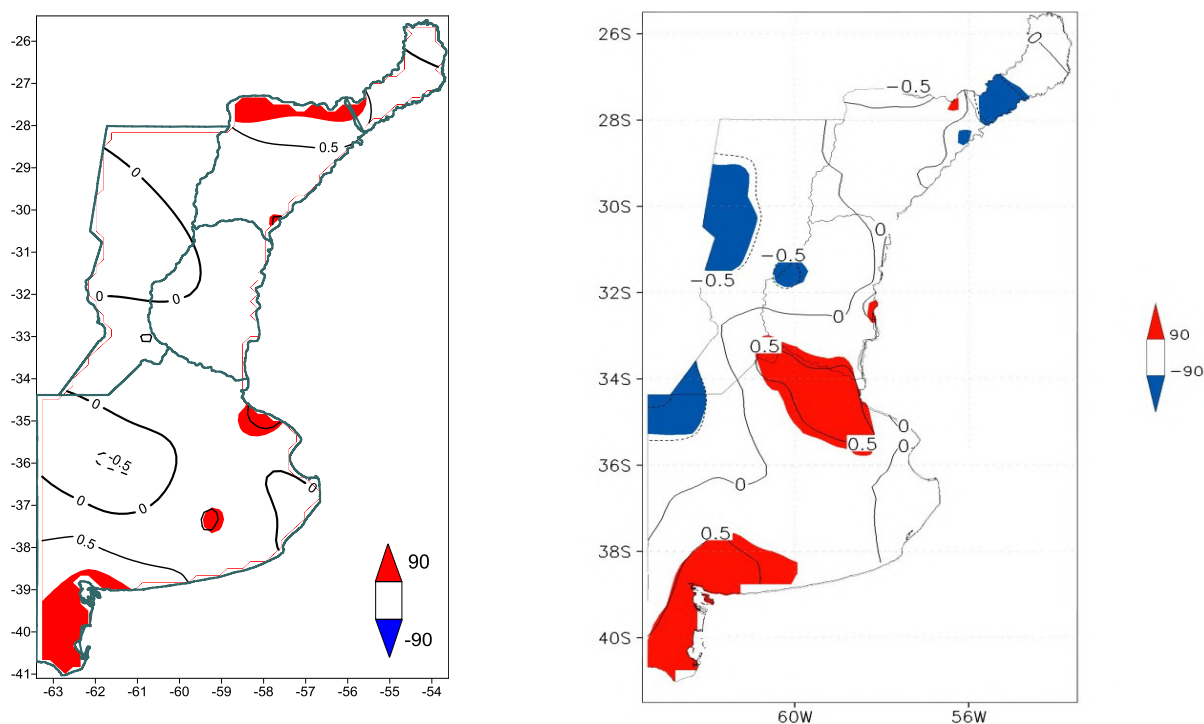
### ***Incerteza sobre las tendencias de temperatura***

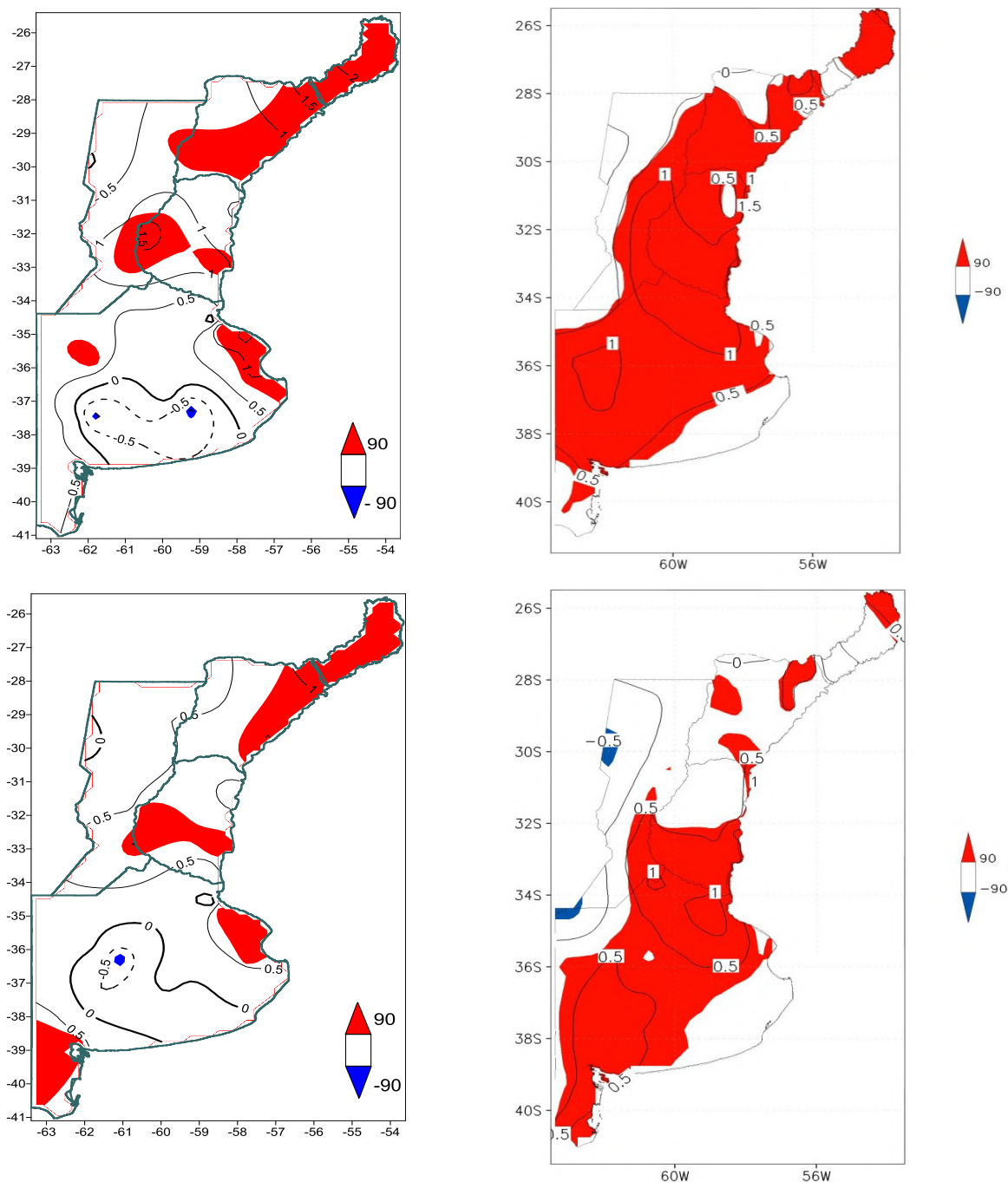
En el caso de la temperatura un aspecto a considerar es que el crecimiento de las ciudades incorpora un cambio en las temperaturas que no se observa en estaciones meteorológicas rurales. Este efecto se llama “isla urbana de calor”. Como gran parte de las estaciones meteorológicas se encuentran en ambientes urbanos o muy cerca de éstos, los cambios de temperatura calculadas a



partir de estas estaciones pueden tener algún nivel de calentamiento adicional que introduciría un aumento ficticio en el cálculo de los cambios regionales. Una forma de explorar la magnitud de este efecto adicional consiste en recalcular los cambios de temperatura solo con estaciones de aeropuertos alejados de las ciudades, los que estarían menos contaminados que el resto de las estaciones.

La Figura 5.2.2.10 compara los campos de temperatura máxima, mínima y media anual de estaciones tomadas solamente en aeropuertos fuera de zonas urbanizadas con los obtenidos utilizando la base de datos CRU. En las temperaturas máximas, las diferencias son pequeñas, pero en las mínimas son muy importantes, en particular en la provincia de Buenos Aires donde los aeropuertos señalan disminuciones estadísticamente significativas mientras que la base CRU presenta calentamiento. Pero en toda la región las mínimas de los aeropuertos presentan en general calentamientos menores que los calculados con la base CRU. Esto es indicativo precisamente de que la base CRU no ha filtrado adecuadamente el efecto urbano de la isla de calor. Aunque ello puede implicar que los aumentos de la temperatura mínima estén algo exagerados en general, ello no invalida las conclusiones sobre el signo y aproximada magnitud del calentamiento regional, excepto en parte del sur de la Provincia de Buenos Aires.





**Figura 5.2.2.12:** Cambios en las tendencias de la temperatura máxima (superior), mínima (medio) y media (panel inferior) calculados con datos de aeropuertos (datos del SMN) y calculados con la base de datos de CRU (paneles del izquierdo)



## 5.2.2 Precipitación

### *Precipitaciones medias anuales y estacionales*

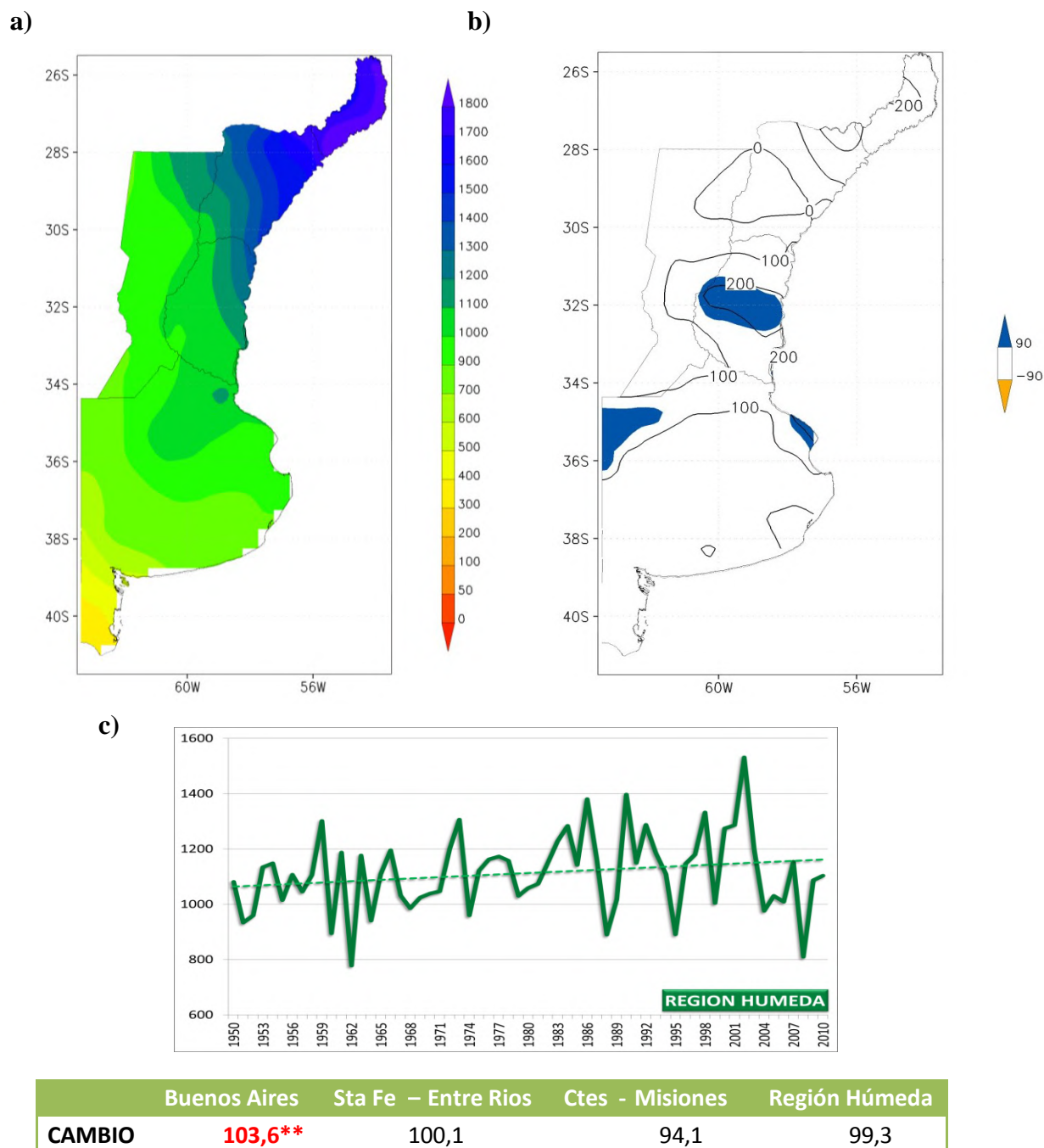
**En casi toda la región Húmeda, la precipitación anual aumentó en la segunda mitad del siglo XX (*confianza alta*),** (Castañeda y Barros 1994; Barros y otros 2000; Boulanger y otros 2005; Haylock y otros 2006; Barros y otros 2008; Doyle y otros 2012). En la mayor parte de la región entre 1960 y 2010 hubo aumentos de la precipitación de entre 100 y 200 mm, Figura 5.2.2.1b. Este aumento se registró principalmente entre 1960 y 1990, Figura 5.2.2.1c (*confianza alta*). El aumento ha sido significativo estadísticamente al 90 y 95 % en Entre Ríos y zonas del norte de Buenos Aires, Figura 5.2.2.1b, pero no lo ha sido en el promedio regional. La región es una de las zonas del planeta que presentó mayor aumento de la precipitación entre 1950 y 2005 (IPCC AR5, Fig. 2 del WGI SPM).

Entre 2004 y 2010 hubo una disminución de la precipitación respecto de la medias de las últimas dos décadas del siglo XX. Esto probablemente obedece a una fluctuación de la precipitación de escala inter-decadal que morigeró la tendencia positiva de largo plazo. Esto ocurrió también en décadas anteriores asociadas con otro período seco como fue la década de 1950. Pero la tendencia positiva también se manifiesta a pesar de estos periodos secos ya que el promedio de la década del 2000 estuvo muy por encima del de 1950.

La literatura sobre tendencias y/o cambios de las precipitaciones anuales en la región es más abundante que en el caso de la temperatura media anual. Sin embargo, debido a los diferentes periodos considerados, existen diferencias entre los artículos, no relacionadas con el signo de los cambios, sino ligeramente en la magnitud de los mismos y fundamentalmente en su significancia. Los trabajos concuerdan en que desde 1950 ha habido un aumento generalizado en la precipitación media regional. Consistentemente, aumentaron en un 33% los días con precipitaciones mayores a 1mm entre 1950 y 2000 (Penalba y Robledo 2010).

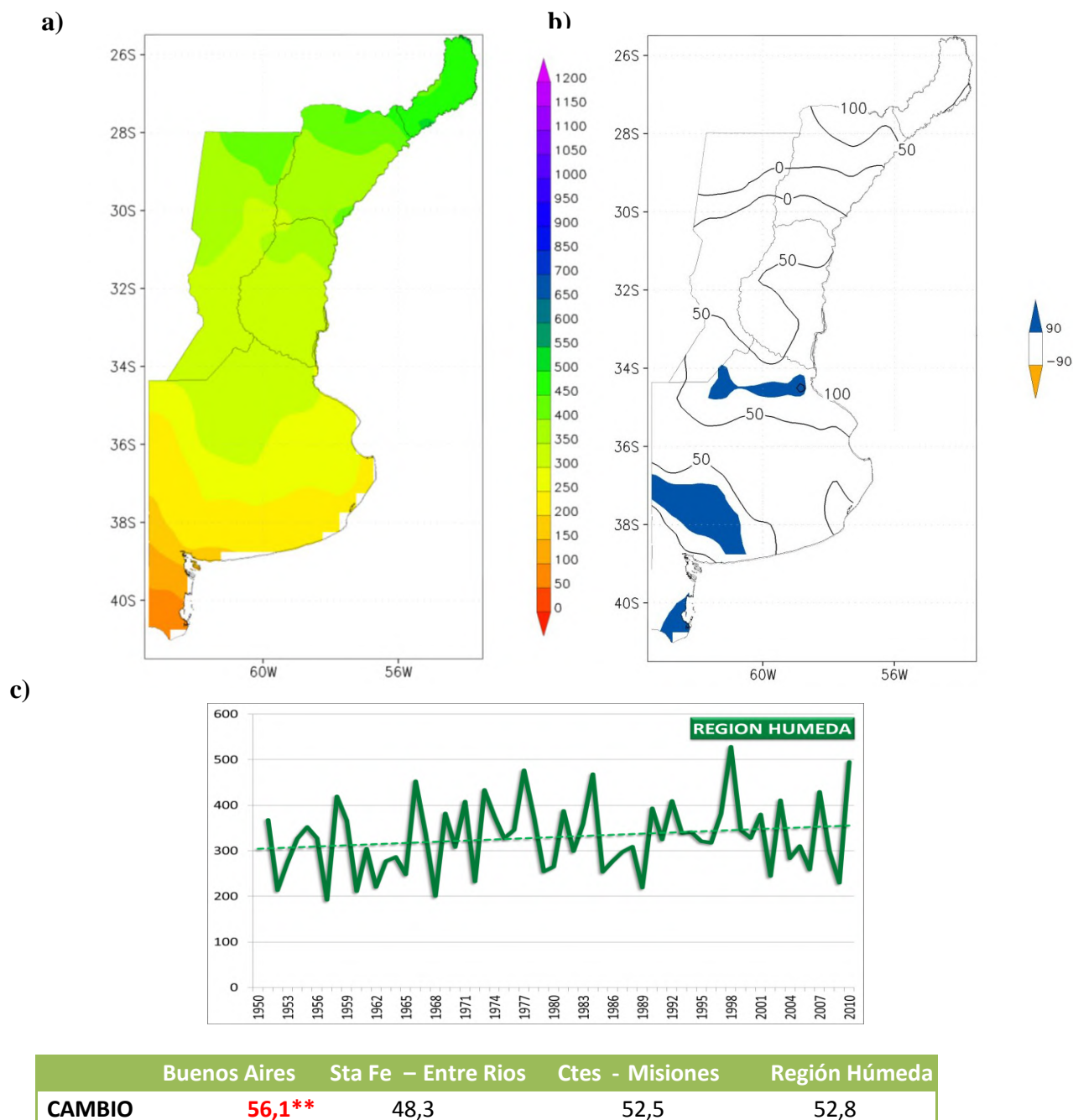
Castañeda y Barros (1994) encontraron un aumento significativo promedio de alrededor de 150 mm en toda la región en el periodo 1916-1991. Esto implica que el aumento que se produjo con más intensidad desde 1960 no fue simplemente una variación de pocas décadas sino que forma parte de una tendencia de más largo plazo. Los estudios que se extienden hasta 2002 o 2005 muestran que aunque las tendencias positivas se concentraron mayormente entre 1960 y 1990 no se revertieron (Boulanger y otros 2005); y además en muchas estaciones se hicieron más significativas (Doyle y otros 2012).

Entre 1950 y 1990, en la mayor parte de Buenos Aires y en el sur de Santa Fe y Entre Ríos el cambio se caracterizó por una tendencia con fuerte variabilidad interanual pero con tendencia sostenida. Por otra parte, en el noreste de la región, el aumento de la precipitación anual se produjo por un salto entre 1970 y 1980, asociado al cambio de la fase de la oscilación decadal del Pacífico que modula la ocurrencia e intensidad de eventos del Niño y la Niña (Barros y otros 2000; 2008).



**Figura 5.2.2.1:** a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, c) Serie del promedio regional de precipitación anual y cuadro de cambios (mm) por provincias con \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

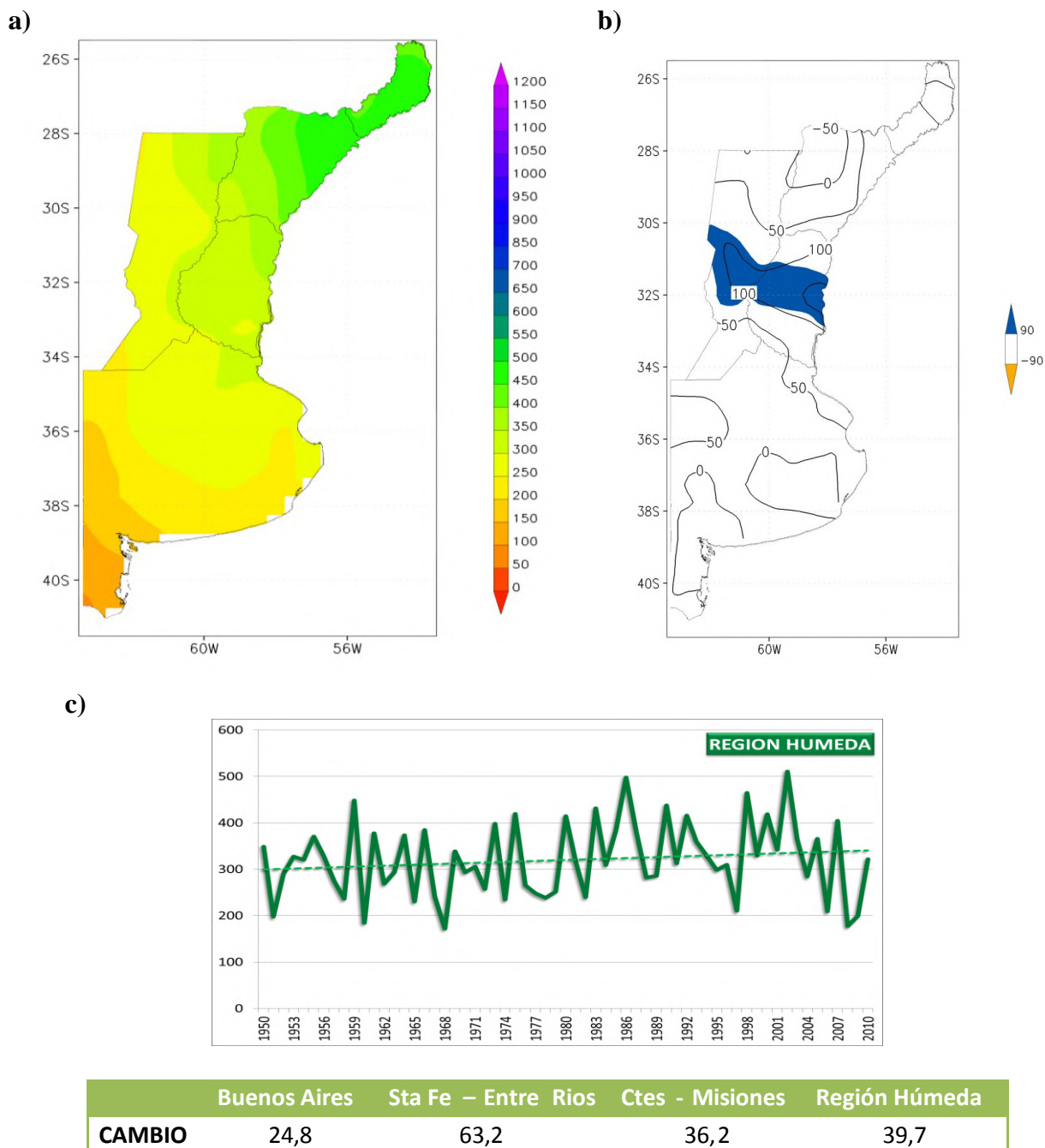
El aumento de las precipitaciones fue importante en el periodo cálido del año, principalmente en verano y primavera, mientras que en invierno la tendencia fue negativa (confianza media), Figuras. 5.2.2.2 a 5.2.2.5.



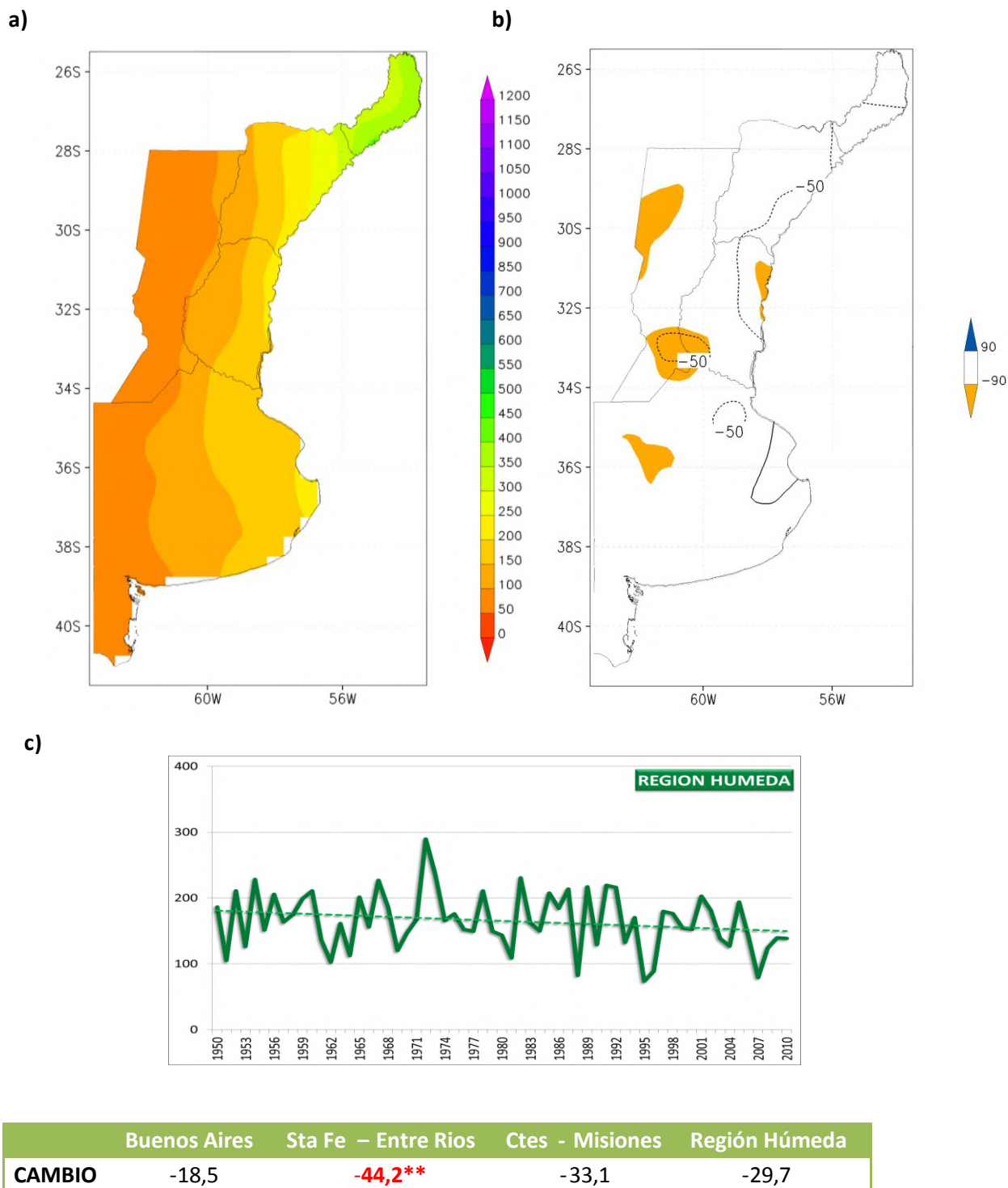
**Figura 5.2.2.2:** Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el verano (mm)



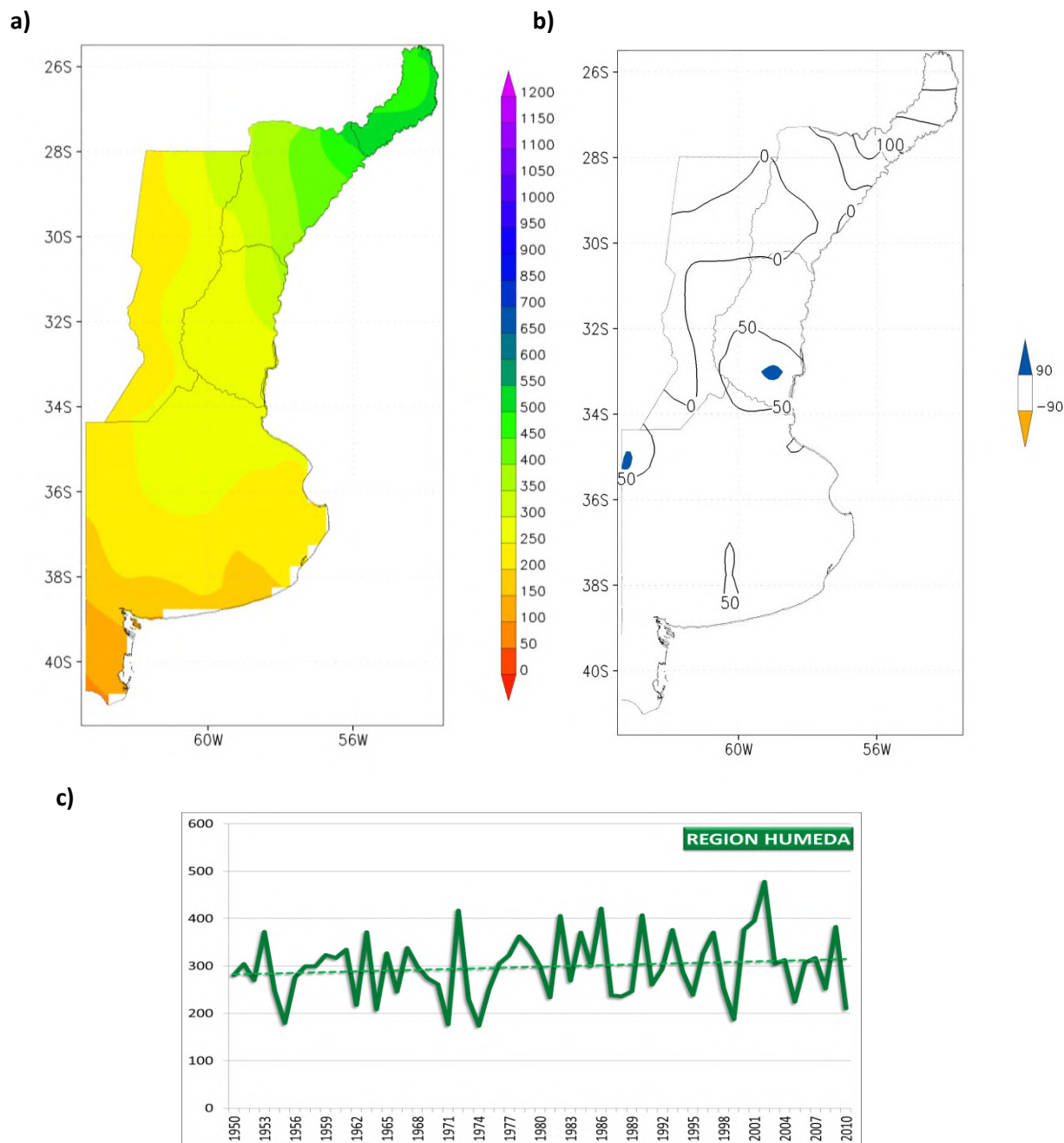
En el invierno, la mayor reducción se ha dado en el centro de la región con incluso zonas con cambios negativos estadísticamente significativos, Figura 5.2.2.4. Los aumentos en invierno y otoño son más importantes en el centro y norte de la región que en Buenos Aires.



**Figura 5.2.2.3:** Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el otoño (mm)



**Figura 5.2.2.4:** Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el invierno (mm)



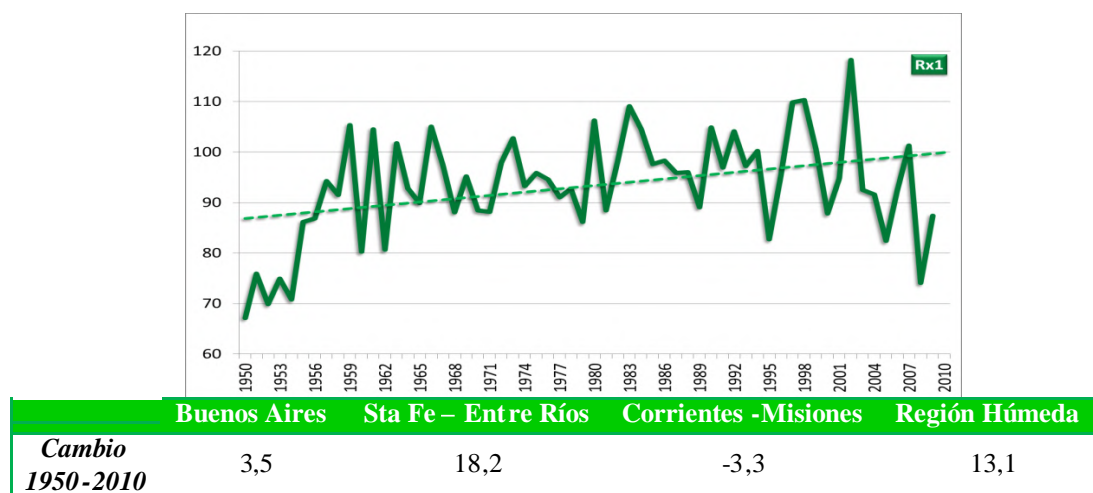
|               | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Rios | Ctes - Misiones | Región Húmeda |
|---------------|--------------|---------------------|-----------------|---------------|
| <b>CAMBIO</b> | 37,2         | 25,3                | 36,1            | 33,1          |

**Figura 5.2.2.5:** Ídem Figura 5.2.2.1, pero para la primavera (mm)

### *Precipitaciones extremas*

**Consistente con el aumento generalizado de la precipitación en la región, los indicadores de precipitaciones extremas muestran que estas han ido en aumento en intensidad (confianza media) y frecuencia (confianza alta). Igualmente la duración de los periodos secos se ha ido reduciendo (confianza media), Figuras 5.2.2.6 a 5.2.2.10 y Figuras 2.3.2 a 2.3.5.**

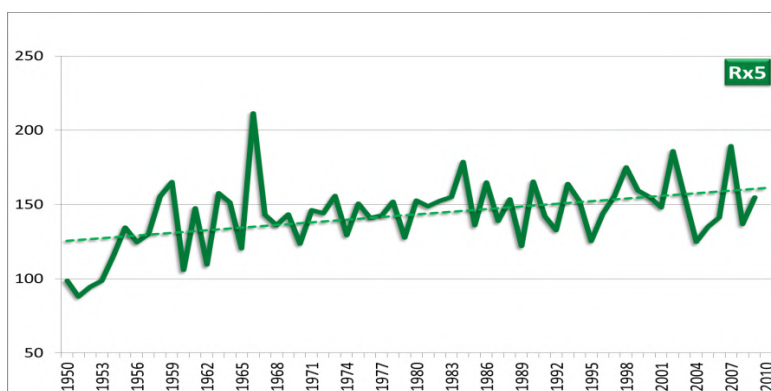
El promedio regional de la precipitación diaria máxima del año tuvo una tendencia positiva hasta el 2000, que se debe en gran medida a los menores valores en la década seca de 1950 en contraposición con los mayores valores de finales del siglo 20. Otro periodo seco se dio en la segunda mitad de la década del 2000. Sin embargo si se obvian estas variaciones, se observa que se mantiene la misma tendencia, Fig. 5.2.2.6. La tendencia positiva de esta variable fue reportada por Re y Barros (2009) y Penalba y Robledo (2010) aunque como en este estudio sin significancia estadística. El mayor cambio se registró en la zona central de la región, Figura 2.3.2 (Ver sección 2.3).



**Figura 5.2.2.6:** Promedio regional de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) y cuadro de cambios por provincia (mm)

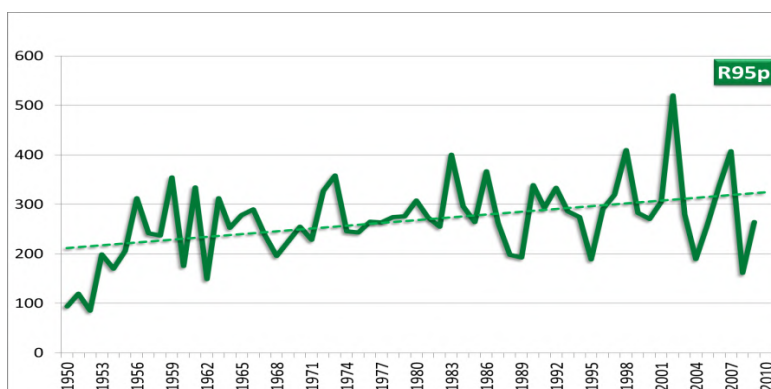
Cuando se consideran las precipitaciones acumuladas en 5 días, la tendencia hacia valores mayores es más regular, e incluso se hace estadísticamente significativa en el sur y centro de la región y en la región entera, Figura 5.2.2.7.

Igualmente, los casos de precipitación diaria por encima del percentil 95, tuvieron un aumento importante e incluso, cuando se agrupan en subregiones, estadísticamente significativo en el sur y centro de la región, Figura 5.2.2.8.



|                         | Buenos Aires  | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | <b>20,6**</b> | <b>33,0*</b>        | 14,7                | <b>35,4**</b> |

**Figura 2.2.2.7:** Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) (mm)



|                         | Buenos Aires  | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes-Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | <b>76,3**</b> | <b>104,3**</b>      | 57,4                | 112,9         |

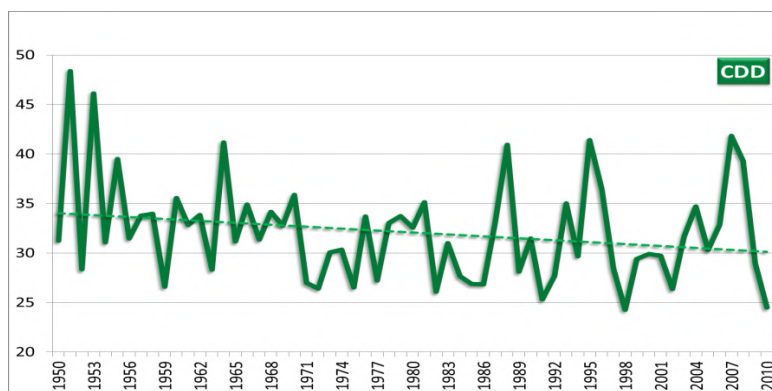
**Figura 5.2.2.8:** Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT) (mm)

El índice de la duración de los periodos secos muestra también la característica fundamental del cambio en la región, esto es su evolución a condiciones más húmedas, Figuras 5.2.2.9 y Figura 2.4.2.2.

La Figura 2.2.2.10 muestra las series del número de casos de precipitaciones diarias por encima de los umbrales de 50, 100 y 150mm en periodos de 10 años para 4 estaciones de diferentes provincias. Se incluye también una serie que muestra el número de casos total de estas cuatro

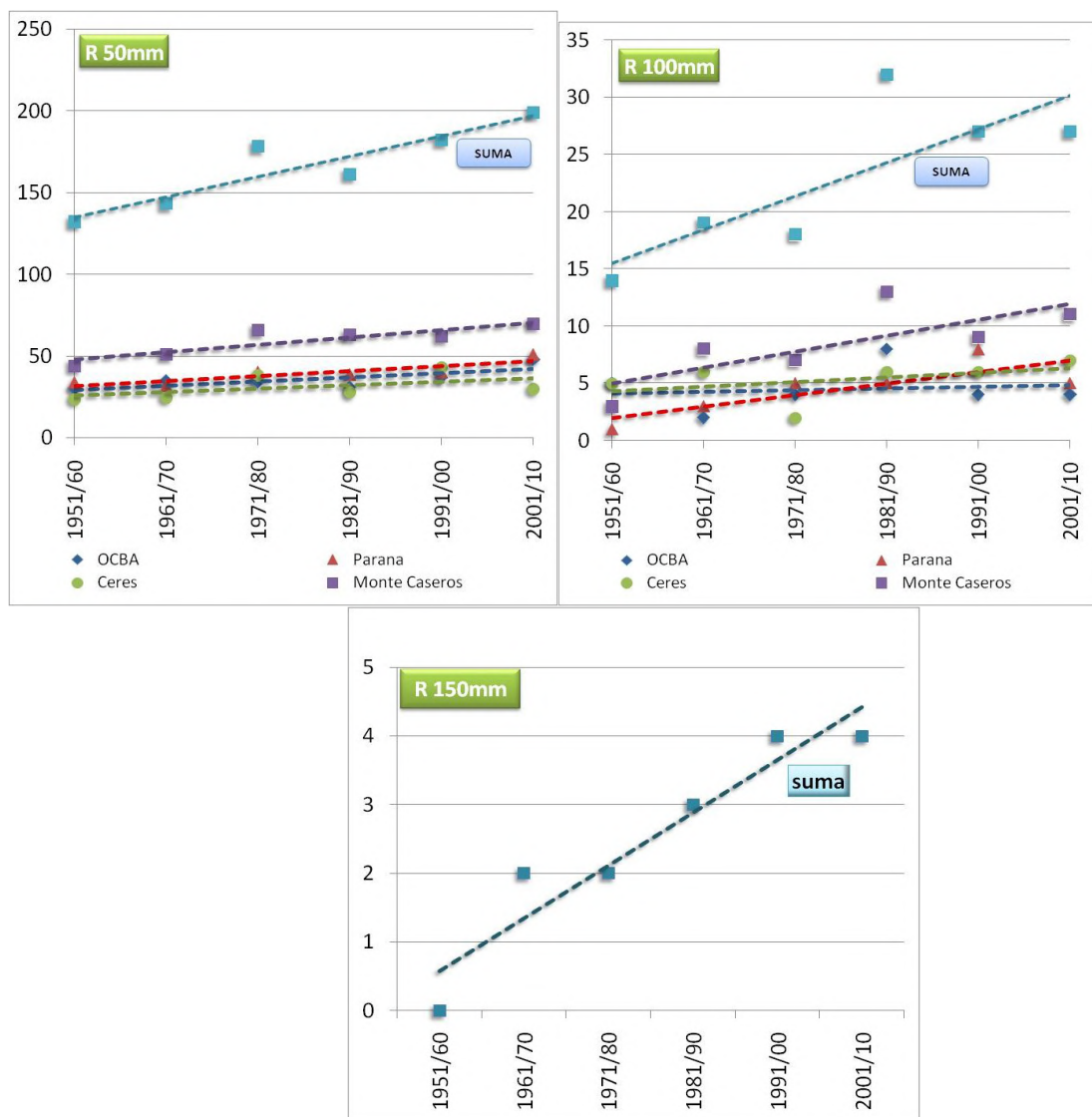


series que superan dichos umbrales. Como estas precipitaciones son muy azarosas, se ha recurrido a su suma en periodos de 10 años para detectar el comportamiento de largo plazo que para todos los umbrales y estaciones indican un aumento del número de casos muy regular, hasta el punto de que a pesar del escaso número de décadas la mayor parte de los aumentos son significativos, Figura 5.2.2.10.



|                         | Buenos Aires | Sta Fe – Entre Ríos | Corrientes -Misiones | Región Húmeda |
|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | -1,4         | -1,2                | <b>-7,7 **</b>       | -4,0          |

**Figura 5.2.2.9:** Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la máxima longitud de racha seca definida como el número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD) (días)



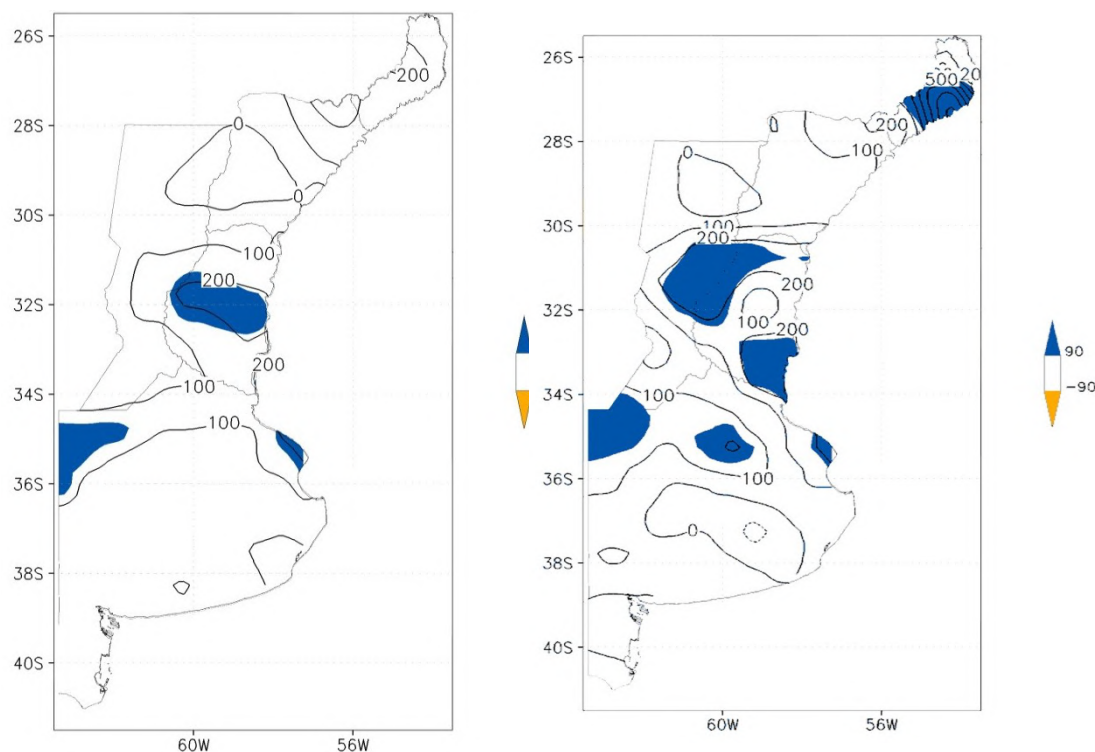
|               | R 50mm | R100 mm | R 150mm |
|---------------|--------|---------|---------|
| OCBA          | 13,3*  | 0,7     |         |
| Paraná        | 15,5** | 5,0*    |         |
| Ceres         | 10,6   | 2,0     |         |
| Monte Caseros | 22,9** | 7,0*    |         |
| SUMA          | 62**   | 14,7*   | 3,85**  |

**Figura 5.2.2.10:** Índice Rnnmm, aumento del número de casos de precipitaciones diarias por encima del umbral de a) 50mm y b) 100mm en periodos de 10 años para 4 estaciones de diferentes provincias y la suma de casos de estas estaciones que superan ese umbral

### *Grado de Incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados*

Las series de precipitación en la región que cubren el periodo 1960-2010 o al menos gran parte del mismo son escasas. Ello hace que las estimaciones regionales o subregionales puedan tener algún grado de error y más aun cuando se trata de una localidad en particular. Una forma de estimar el grado de error posible es comparando tendencias calculadas con dos bases distintas que tienen algunas diferencias en las estaciones que utilizan pues al usar criterios distintos en el tratamiento de las series no absolutamente completas pueden no incorporar en el análisis las mismas estaciones y por otra parte, utilizan métodos de interpolación espacial distintos. En la Figura 5.2.2.11 se observa que en comparación con la base de datos CRU, la base de datos GPCC sobreestima los cambios en la precipitación en la región Húmeda en particular en la provincia de Misiones. Este resultado se observa tanto a nivel anual como estacional (las figuras de las estaciones del año no se muestran).

De todos modos, las diferencias no invalidan las conclusiones sobre el signo de los cambios observados, excepto donde estos son muy pequeños y no significativos. También la magnitud de los cambios y sus patrones regionales son en general muy similares tanto a nivel anual como estacional. La excepción es el exagerado cambio de precipitación en la provincia de Misiones en la base GPCC.



**Figura 5.2.2.11:** *Cambios en la precipitación total anual calculados con la base de datos de CRU (izquierda) y datos de GPCC (derecha)*



### 5.2.3 Otras variables

El desplazamiento del anticiclón del Atlántico Sur hacia el sur (Escobar y otros 2003) trajo aparejado un aumento de las frecuencias de vientos del sector este y sudeste sobre el Río de la Plata (Simionato y otros 2004) contribuyendo al aumento medio del nivel del estuario, aunque en forma menos importante que otros factores.

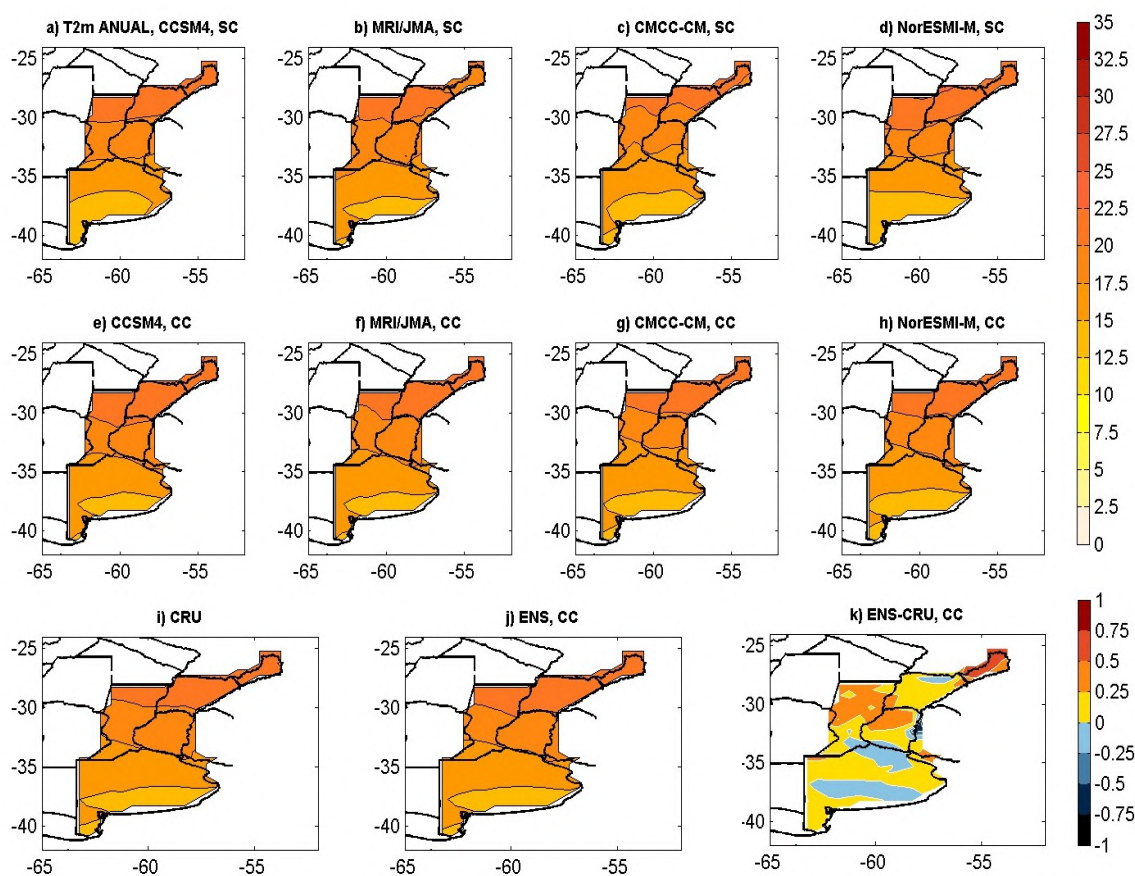
En el trabajo de Mezher y otros (2012) se analizaron las tendencias del número de eventos de granizo registrados en las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional en el periodo 1960-2008. En la región noreste, que incluye el este de las provincias de Chaco y Formosa pero donde la mayor frecuencia se observa en la provincia de Misiones, el número de eventos de granizo paso de alrededor de 7 a 11 entre 1960 y 2010 pero con una fuerte variabilidad interanual e interdecadal. La tendencia en la zona central de la región Húmeda incluyendo el norte de Buenos Aires ha sido muy pequeña y negativa.

## 5.3 VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES

Se presentan los resultados de la validación del método de corrección de los errores sistemáticos de los modelos seleccionados para las proyecciones climáticas en periodos futuros del siglo XXI, para la región Húmeda. La metodología empleada se describe en el capítulo 3, secciones 3.3.7 y 3.3.8.

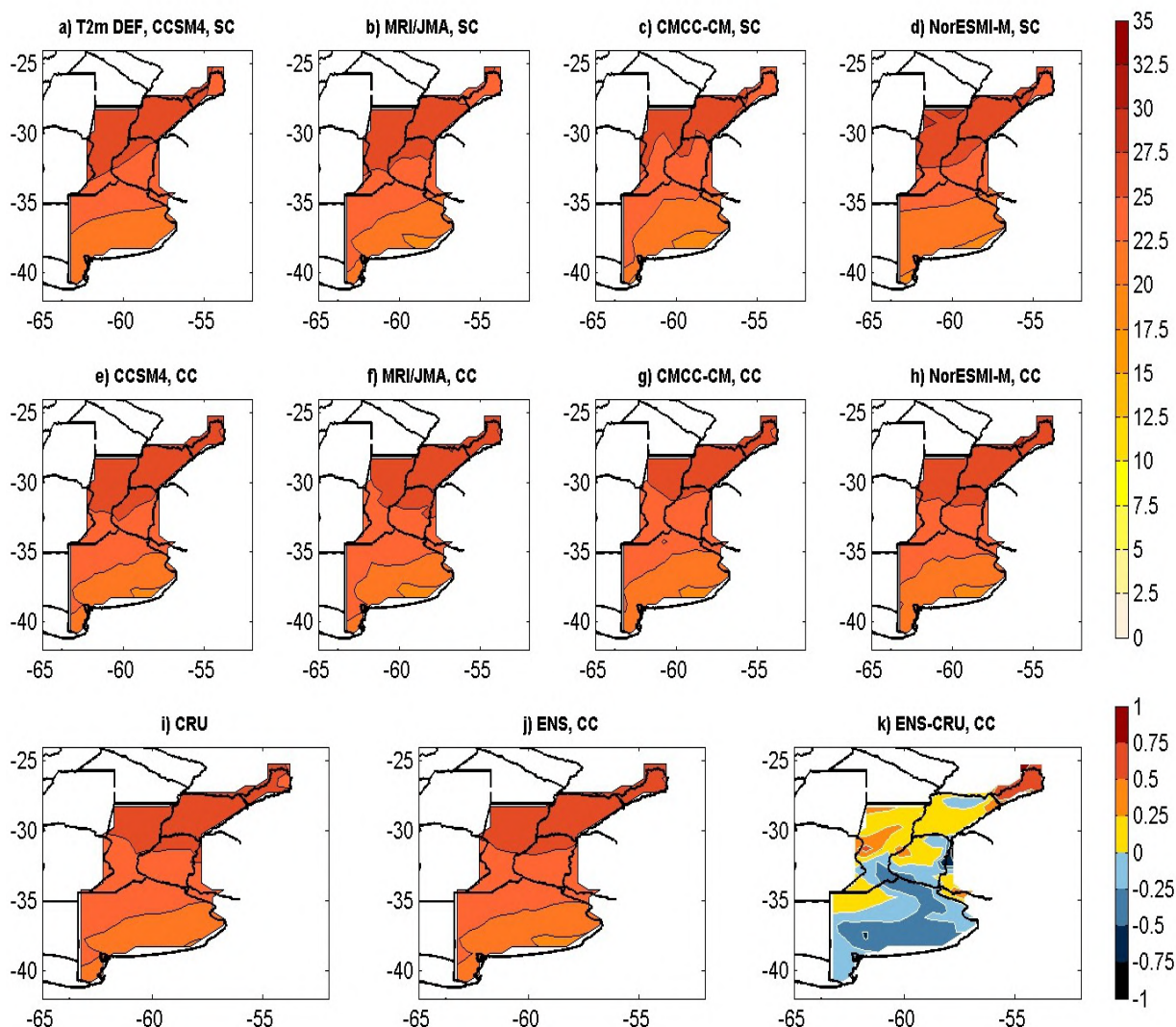
### 5.3.1 Temperatura

El ajuste de los modelos a los datos observados es bueno en esta región, aun para los datos sin corregir y mejorando con la corrección, Figura 5.3.1.



**Figura 5.3.1:** Validación de la temperatura media anual para la región Húmeda. 1976/1990 (Excepto para el modelo MRI en que es 1979/1990). Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección. Panel inferior, valores observados según CRU, ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU

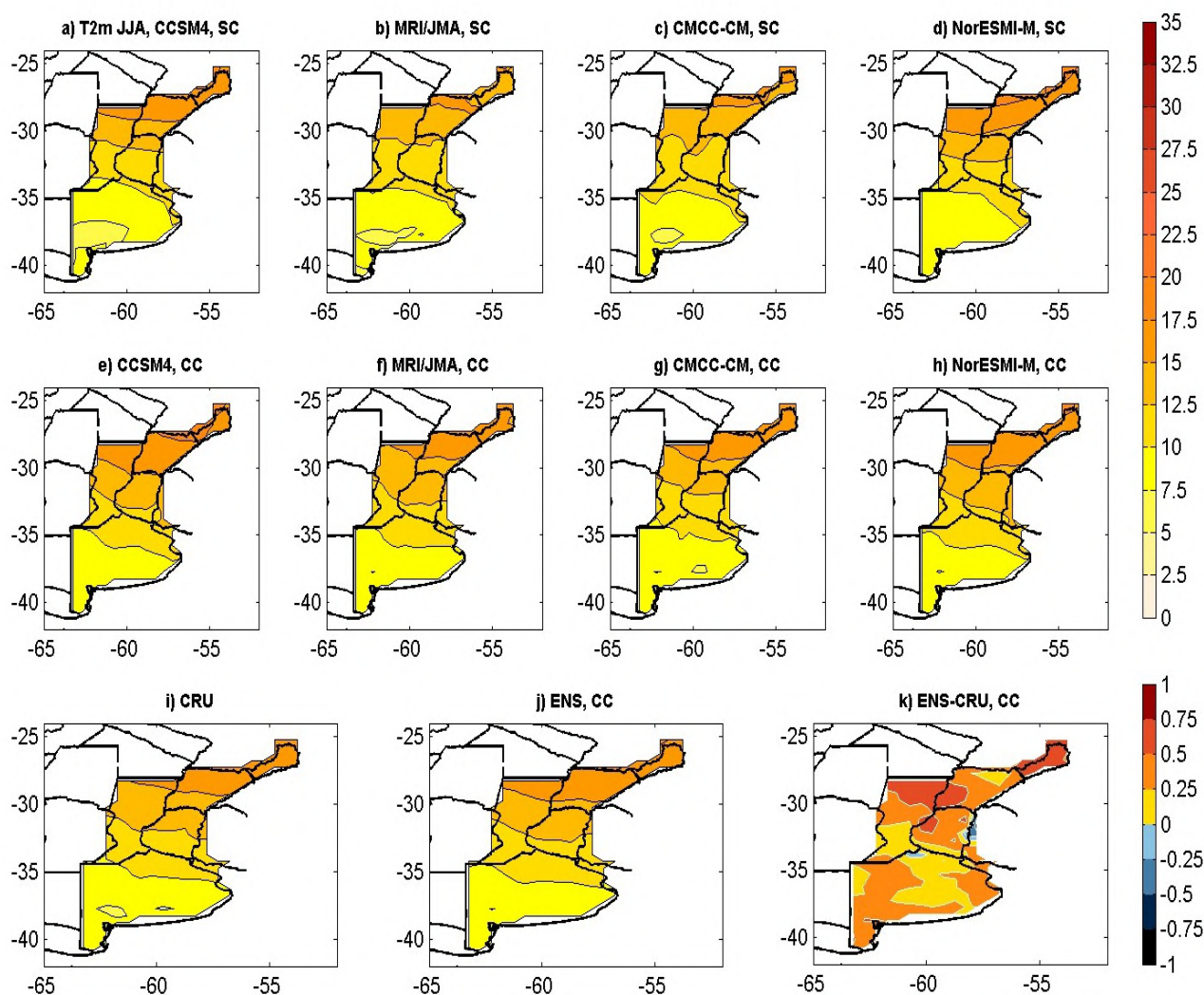




**Figura 5.4.2:** Ídem Figura 5.3.1, pero para el verano (diciembre, enero y febrero)

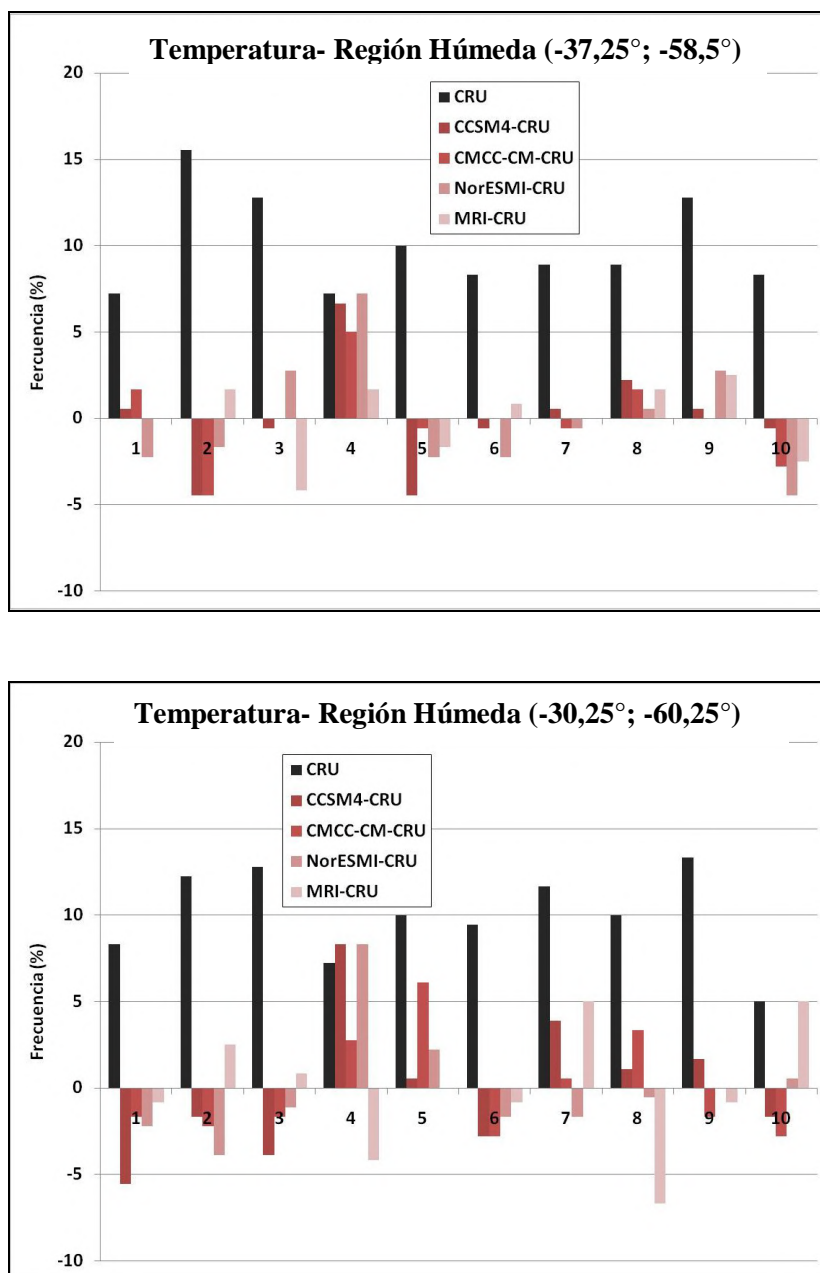
El ensamble (promedio en este caso) de los modelos corregidos tiene en la mayor parte de la región un error de menos de 0,25°C y solo en Misiones supera el medio grado.

En la estación estival los errores son algo mayores que en el promedio anual, especialmente en la Provincia de Buenos Aires, pero siempre menores a medio grado, Figura 5.3.2. Al contrario del caso anual y del verano, en el invierno los modelos corregidos sobreestiman la temperatura media en toda la región, pero en general en menos de medio grado, Figura 5.3.3.



**Figura 5.3.3:** Ídem figura 5.3.1, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

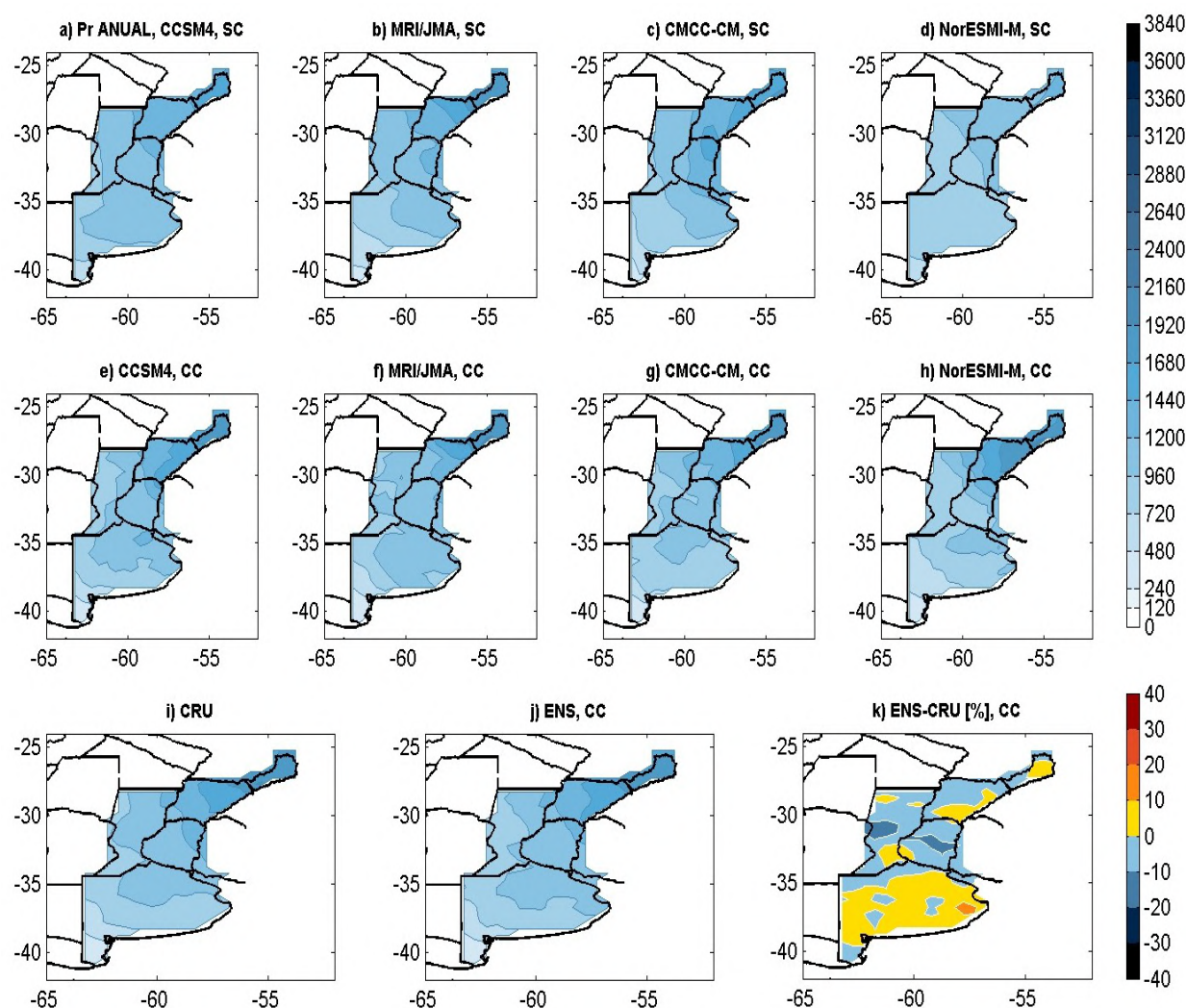
Ello es también válido para las temperaturas más extremas, excepto para el modelo NorESMI. Este ajuste en los extremos es muy valioso por la importancia de contar con proyecciones de extremos de altas temperatura prolongadas. La distribución es desde luego bimodal, reflejando las temperaturas mensuales a lo largo del año.



**Figura 5.3.4:** Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Húmeda. En negro las frecuencias observadas y en colores, según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales

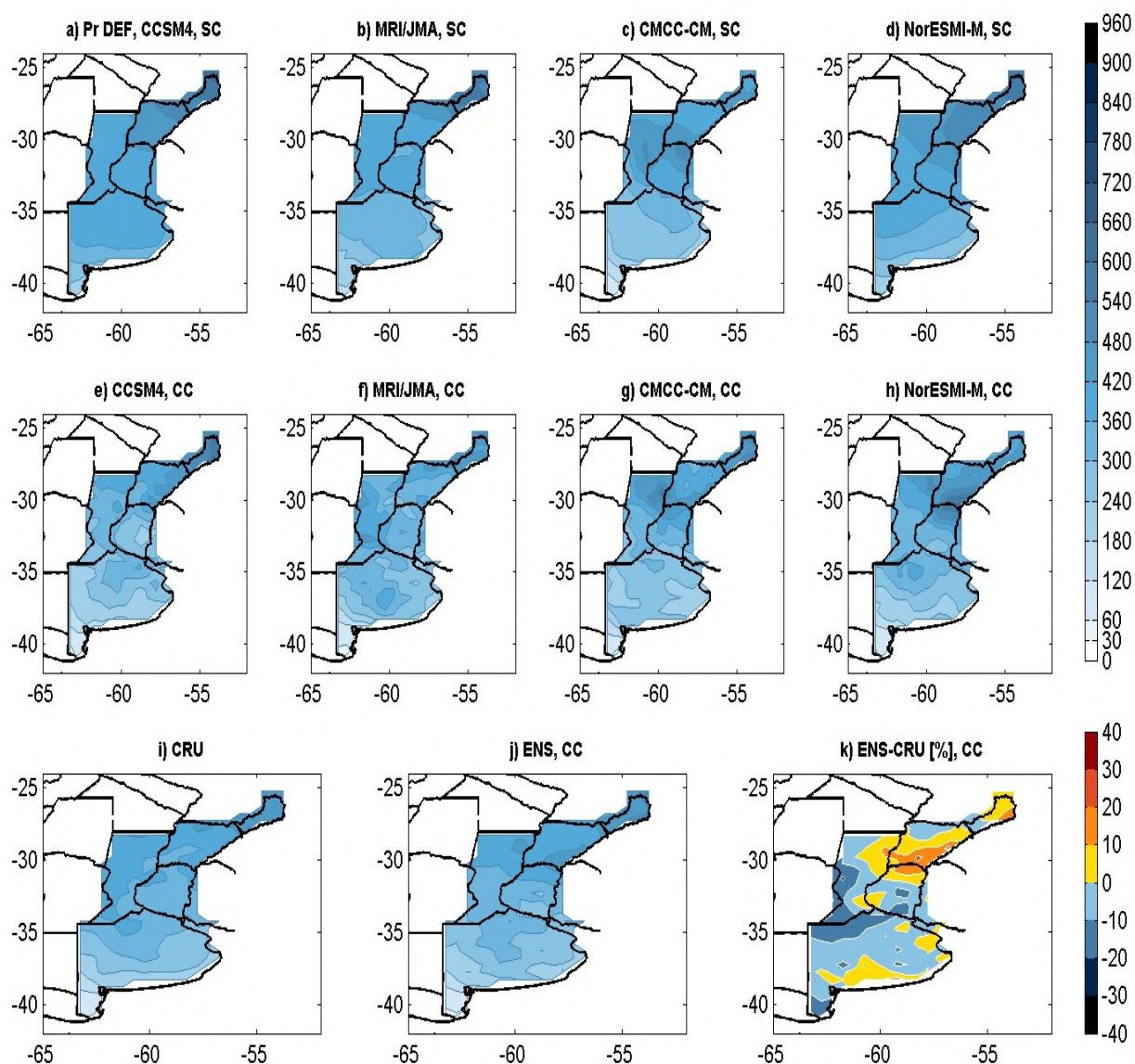
### 5.3.2 Precipitación

Los errores de los modelos sin corregir son importantes, como surge de comparar el panel superior de la Figura 2.5 con el mapa de CRU, Figura 5.3.5i, con errores de más de 200 mm en muchas zonas y modelos. La corrección mejora sustancialmente el ajuste al campo observado, y en el promedio de los modelos el error respecto del campo de CRU es menor al 10% en casi toda la región.



**Figura 5.3.5:** Ídem Figura 5.3.1, pero para la precipitación anual

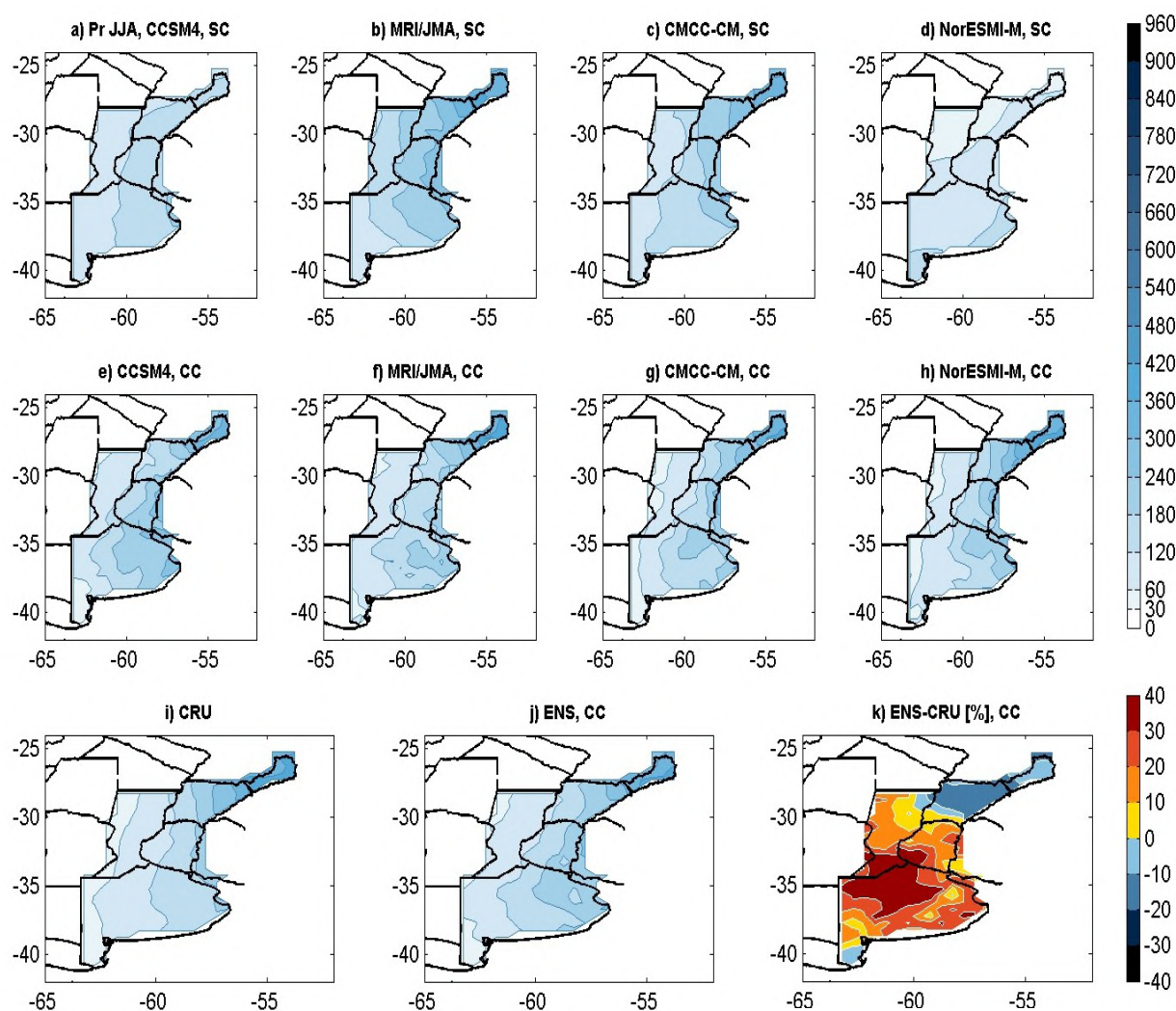




**Figura 5.3.6:** Ídem Figura 5.3.5, pero para el verano (diciembre, enero y febrero)

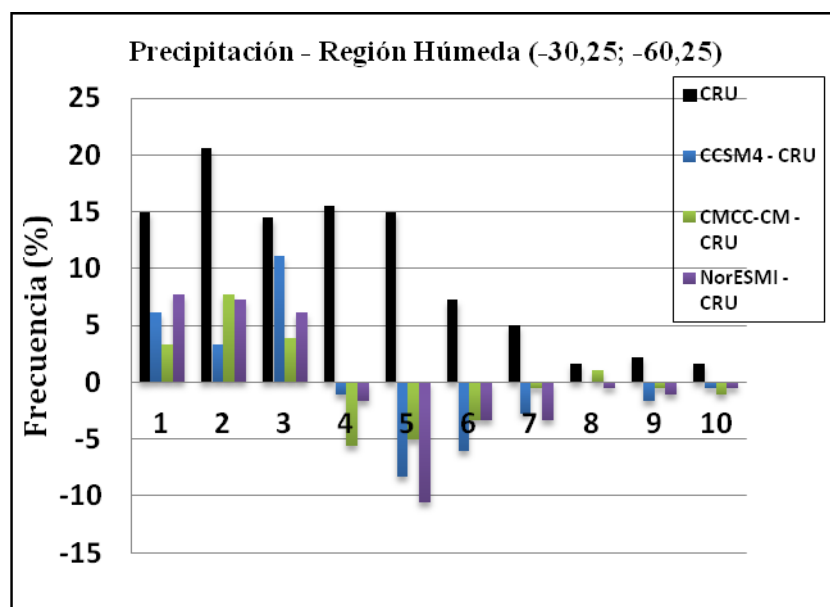
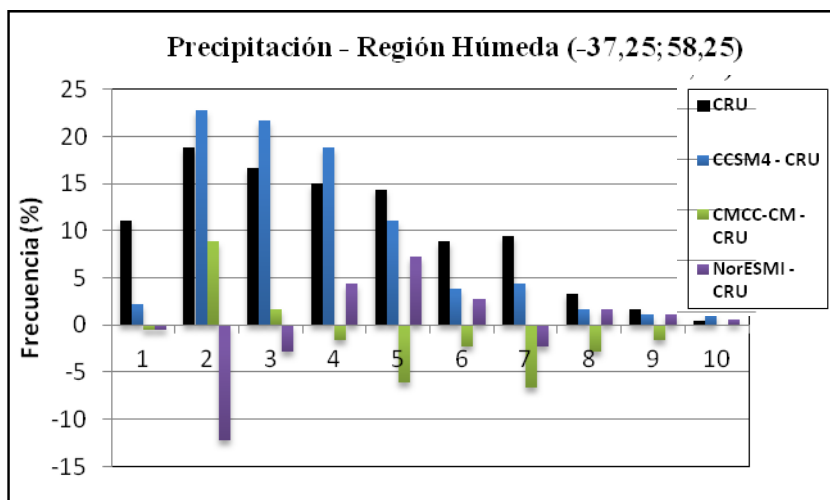
En el caso del verano, el ajuste es similar al del caso anual, Figura 5.3.6. En invierno los errores relativos son sustancialmente mayores de forma que el promedio de los modelos corregidos llega a estar entre y 30 y 40% por encima de los observados en una amplia zona, Figura 5.3.7. Sin embargo, esto no implica errores absolutos grandes porque en esta estación del año y en esa zona, la precipitación es escasa y no mayor a 180 mm y por tanto los errores relativos como el que aparece en el panel k de la Figura 5.3.7 no son mayores a 70 mm en total para los tres meses.





**Figura 5.3.7:** Ídem Figura 5.3.5, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

La figura 5.3.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos del retículo de la región. Como en el caso de la temperatura, la figura presenta asimismo la frecuencia observada, lo que permite visualizar que con alguna excepción en los valores extremos, el error en las frecuencias de la distribución de los modelos en cada decil de la distribución es mucho menor que la frecuencia observada. La distribución de la lluvia mensual tiene la forma de una distribución Gama, típica de la lluvia mensual, que se caracteriza por su asimetría y una cola de valores extremos prolongada. Los errores en los valores extremos de la precipitación son iguales o mayores que la frecuencia observada, indicativo de la dificultad para captar la correcta frecuencia de precipitaciones mensuales extremas en las proyecciones del clima futuro.



**Figura 5.3.8:** Ídem Figura 5.3.4, pero para la precipitación

La conclusión es que con la selección de los modelos de mejor performance y el método de corrección de sus errores sistemáticos aplicado, se logra representar los valores medios de la precipitación y la temperatura anual con errores pequeños en la región Húmeda. Igualmente, también se logra representar en líneas generales las distribuciones estadísticas en el caso de la temperatura. Para la precipitación el ajuste en la distribución no es tan bueno, particularmente en

el modelo CCSM4 y en los extremos de las distribuciones de lluvia, lo cual es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la región.

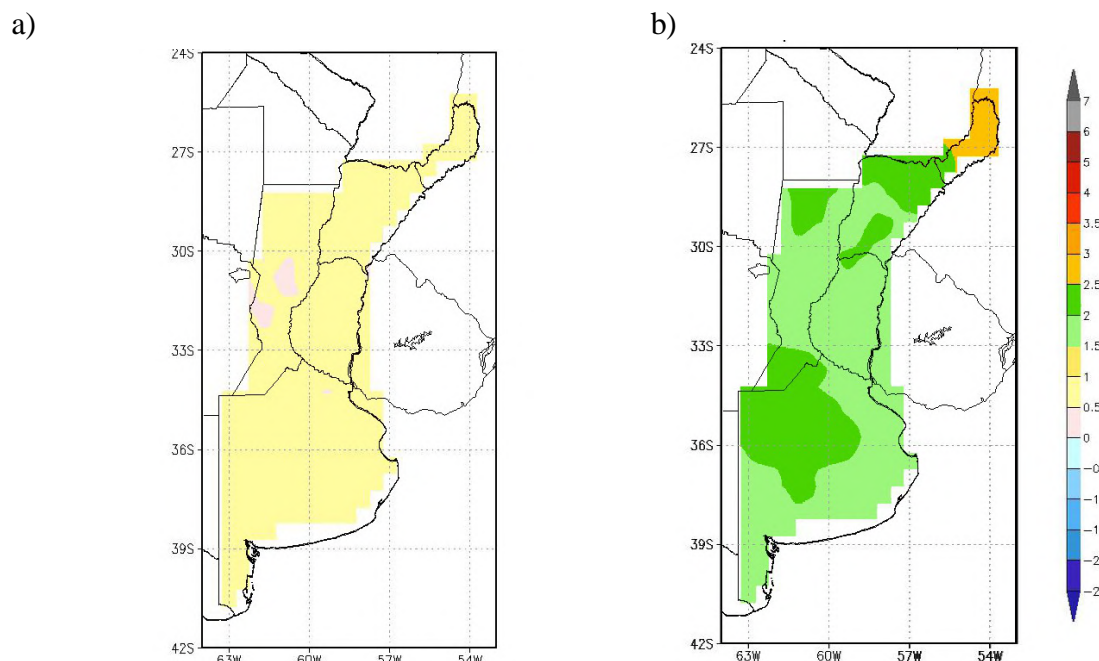
## 5.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

### 5.4.1 Temperatura

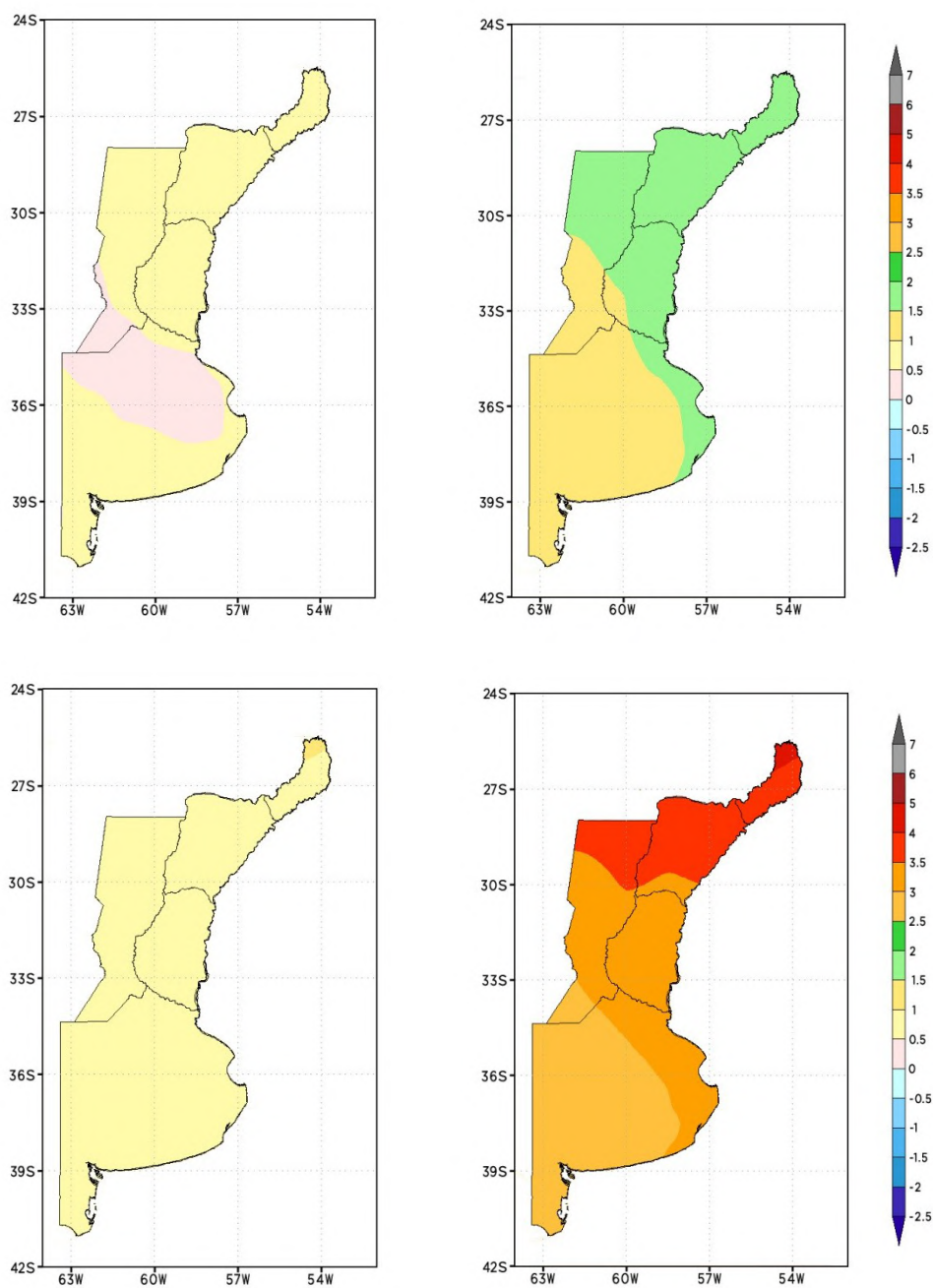
#### *Temperaturas medias*

El elemento común a todos los modelos y escenarios es la proyección de un calentamiento con su magnitud aumentando desde el sudoeste hacia el noreste de la región, Figuras 5.4.1.1 y 5.4.1.2. En el futuro cercano, los escenarios RCP4.5 y 8.5 y A1B son muy similares entre sí y su calentamiento de 0.5 a 1°C en casi toda la región indicaría una aceleración del calentamiento regional con respecto a las tendencias observadas. Como se mostró previamente en la Tabla 5.2.1.1, estas tendencias solo dieron lugar a un calentamiento promedio regional de 0,4°C en 50 años (1960-2010).

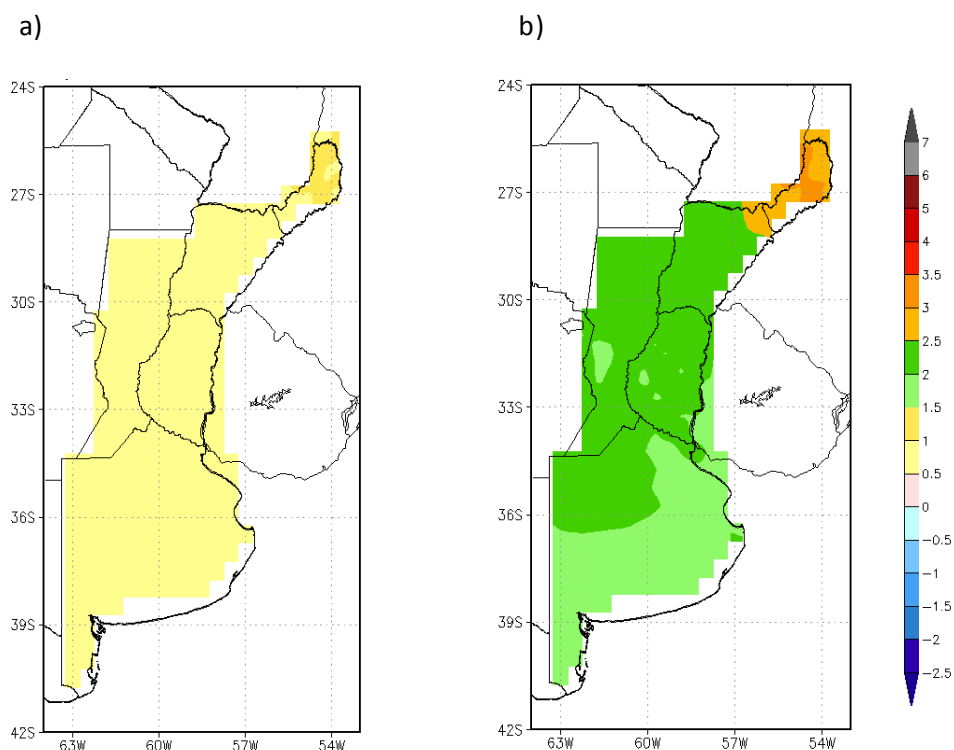
Cabe destacar los valores excepcionales de más de 4°C de calentamiento en la temperatura media del escenario RCP8.5 hacia fin de siglo en el extremo norte de la región. Esa zona tuvo una temperatura media de alrededor de 21°C en 1960-2010, por lo que el calentamiento proyectado llevaría esa temperatura media anual de más de 25°C, con implicancias muy desfavorables. En el futuro lejano, los aumentos de temperatura proyectados en la temperatura media en el escenario A1B son intermedios entre los de los escenarios RCP4.5 y 8.5.



**Figura 5.4.1.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1979-2003 modelo MRI/JMA (Japón). Escenario A1B. a), futuro cercano (2015-2039); b) futuro lejano (2075-2099)



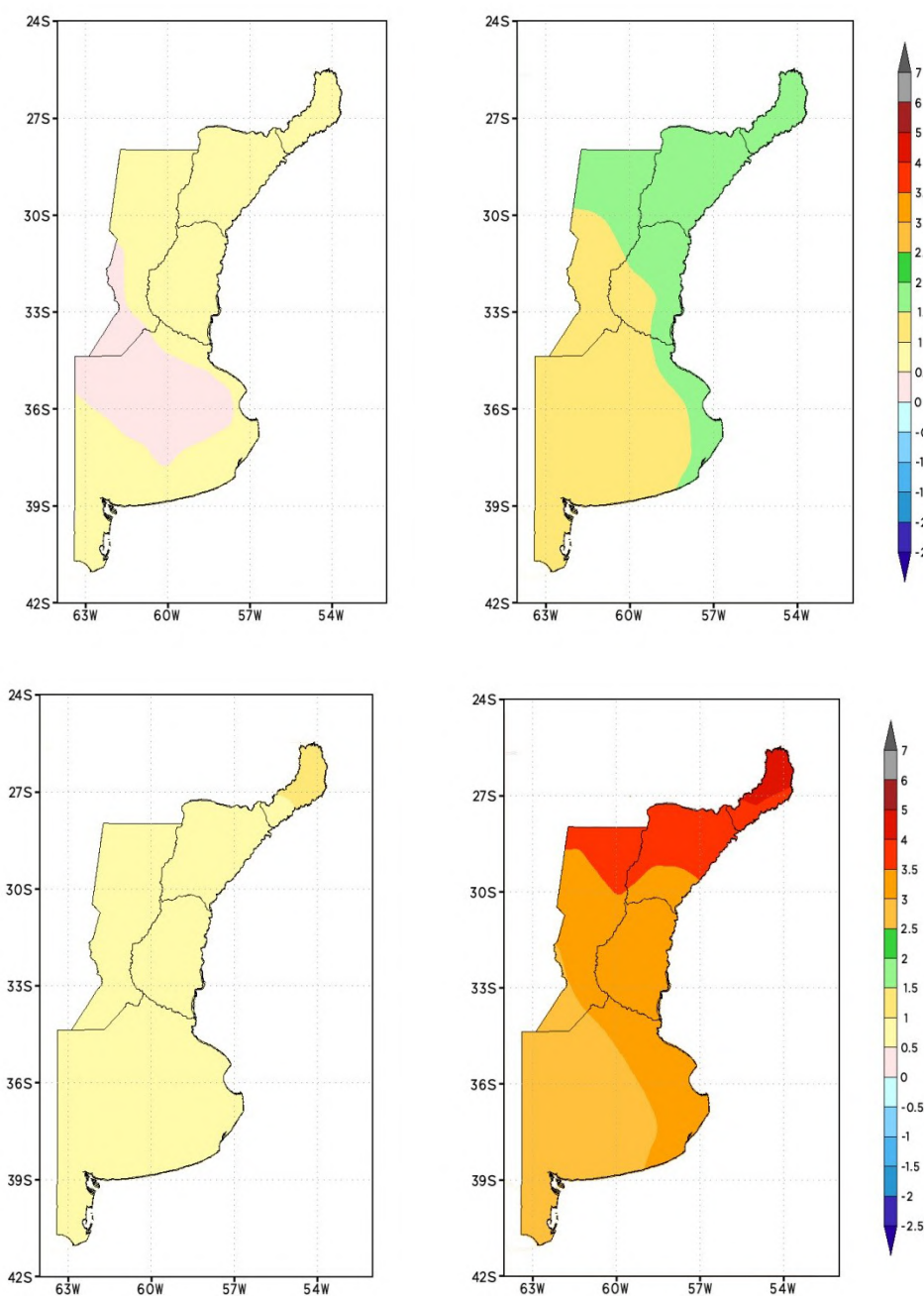
**Figura 5.4.1.2:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)



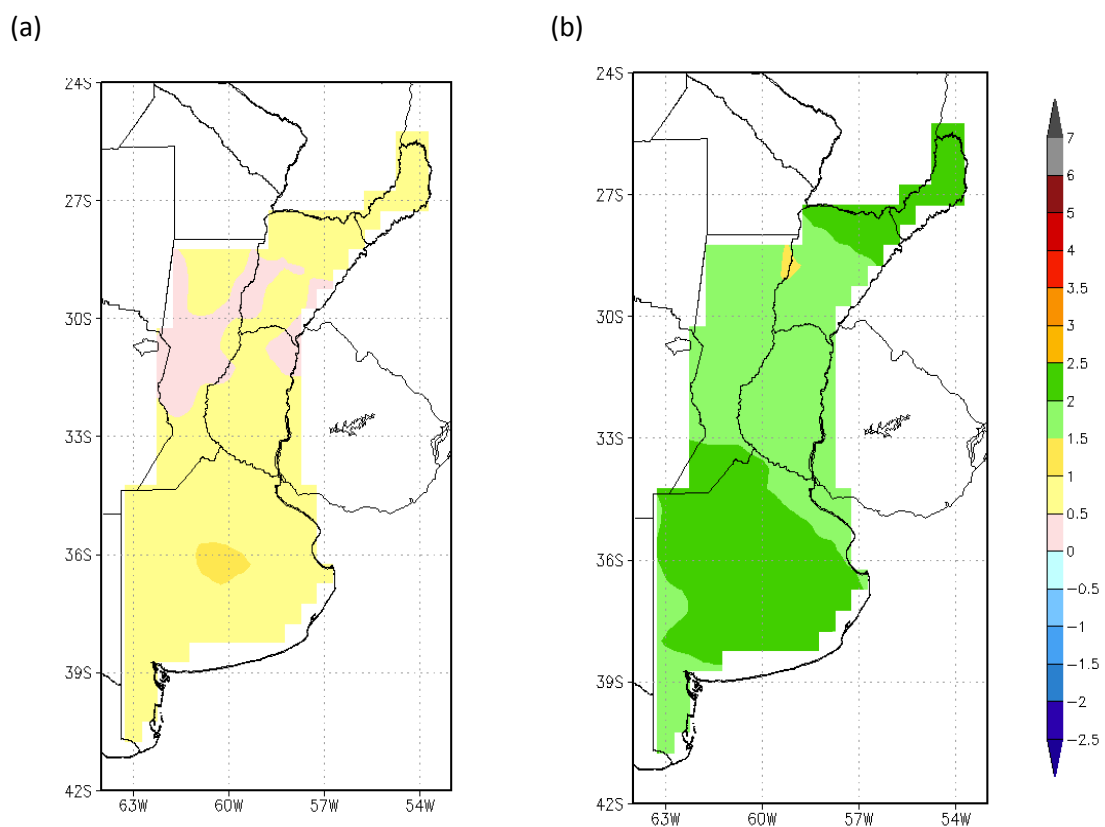
**Figura 5.4.1.3:** Ídem figura 5.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual

Los aumentos de temperatura proyectados en la temperatura mínima media y en la máxima media son muy similares en todos los escenarios y en los dos horizontes temporales; Figuras 5.4.1.3 a 5.4.1.6 y, también son muy similares a los de la temperatura media.

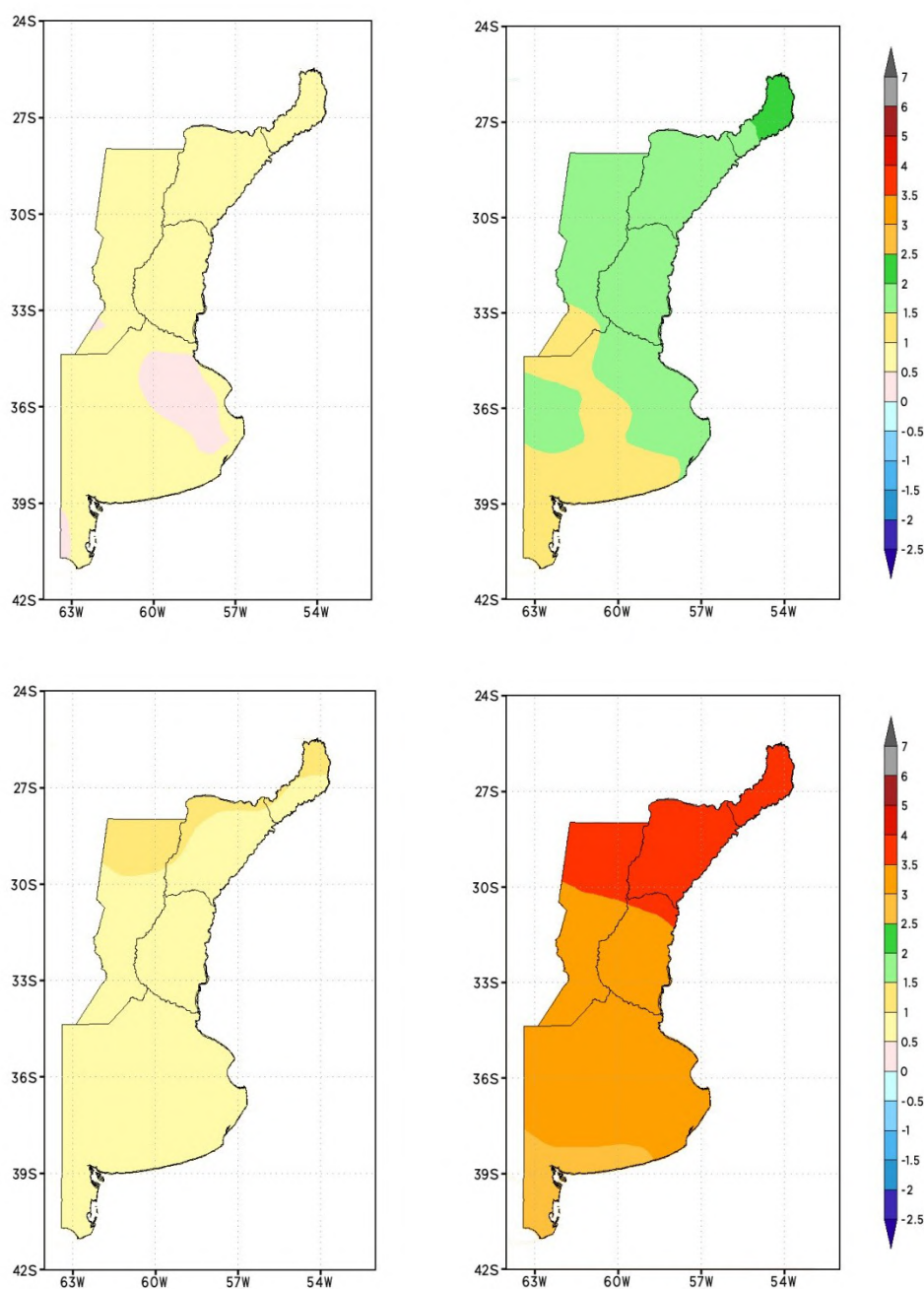




**Figura 5.4.1.4:** Ídem Figura 5.4.1.2, pero para la temperatura mínima media anual



**Figura 5.4.1.5:** Ídem Figura 5.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual



**Figura 5.4.1.6:** Ídem Figura 5.4.1.2, pero para la temperatura máxima media anual

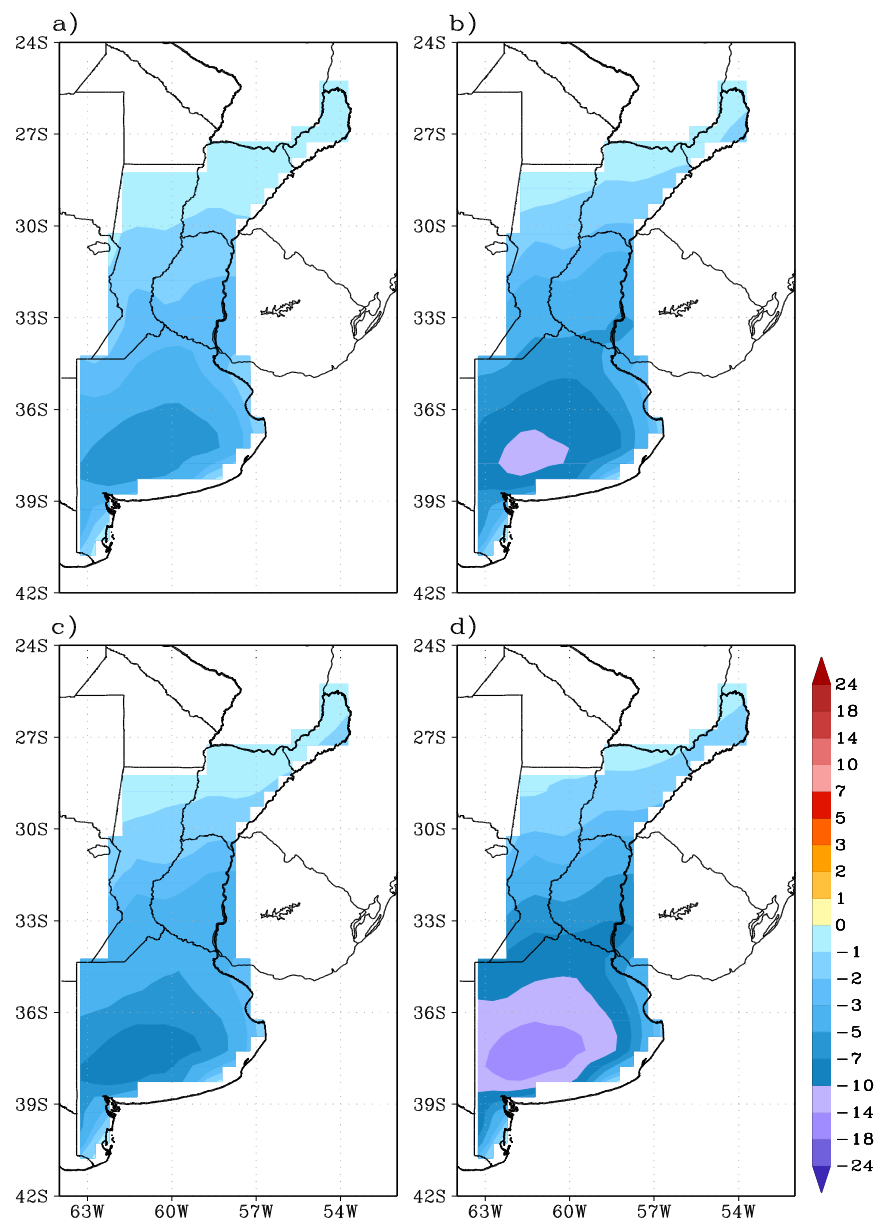


### *Extremos térmicos*

En toda la región, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios RCP y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento esperado, Figuras 5.4.1.7 a 5.4.1.12. En general los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero sus escenarios en el futuro lejano son muy distintos con mayores cambios en el RCP8.5 como es de esperar por el proceso de calentamiento global en que se basa. De todas maneras, en los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

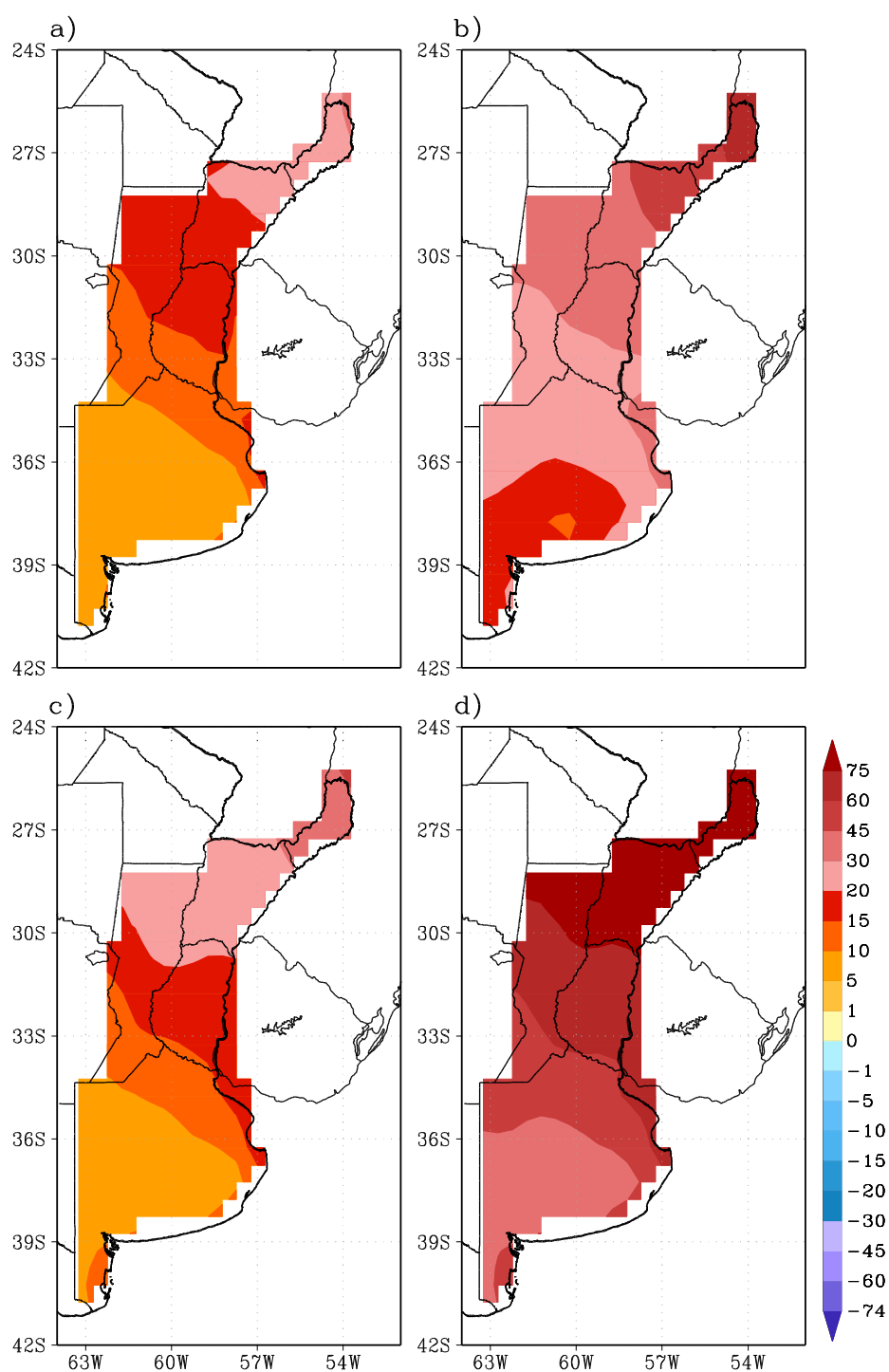
Las heladas se reducirían sustancialmente en el sur de la región y tenderían a desaparecer en el norte, Figuras 2.2.4 y 5.4.1.7. Las noches con temperaturas en exceso de 20°C (noches tropicales) aumentarían mucho más en el norte de la región que en el sur, Figura 5.4.1.8 y lo mismo harían las temperaturas máximas y mínimas del año, Figuras 5.4.1.9 y 5.4.1.10.

En general, los cambios proyectados tienen el mismo signo y el patrón espacial (marcado gradiente norte sur o viceversa) que los cambios observados entre 1960 y 2010. Es el caso del número de días con heladas, Figuras 2.2.4 y 5.4.1.7, el valor mínimo anual de la temperatura anual, Figuras 2.2.6 y 5.4.1.9, el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90, Figuras 2.2.8 y 5.4.1.11 y el número de días con olas de calor, Figuras 2.2.9 y 5.4.1.12. La excepción es el valor máximo de la temperatura anual que tuvo un enfriamiento uniforme en la región entre 1960 y 2010.

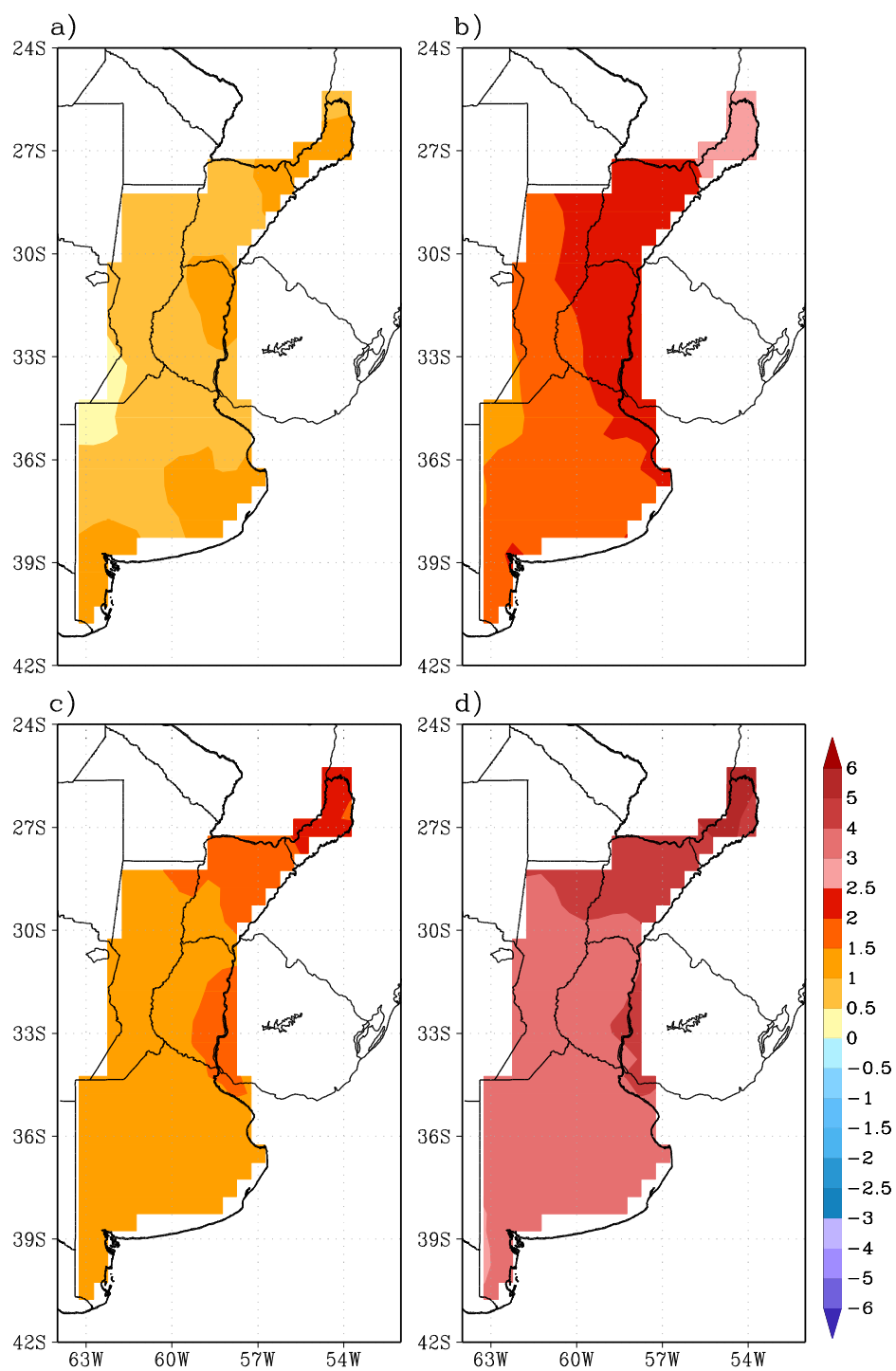


**Figura 5.4.1.7:** Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorES SMI-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

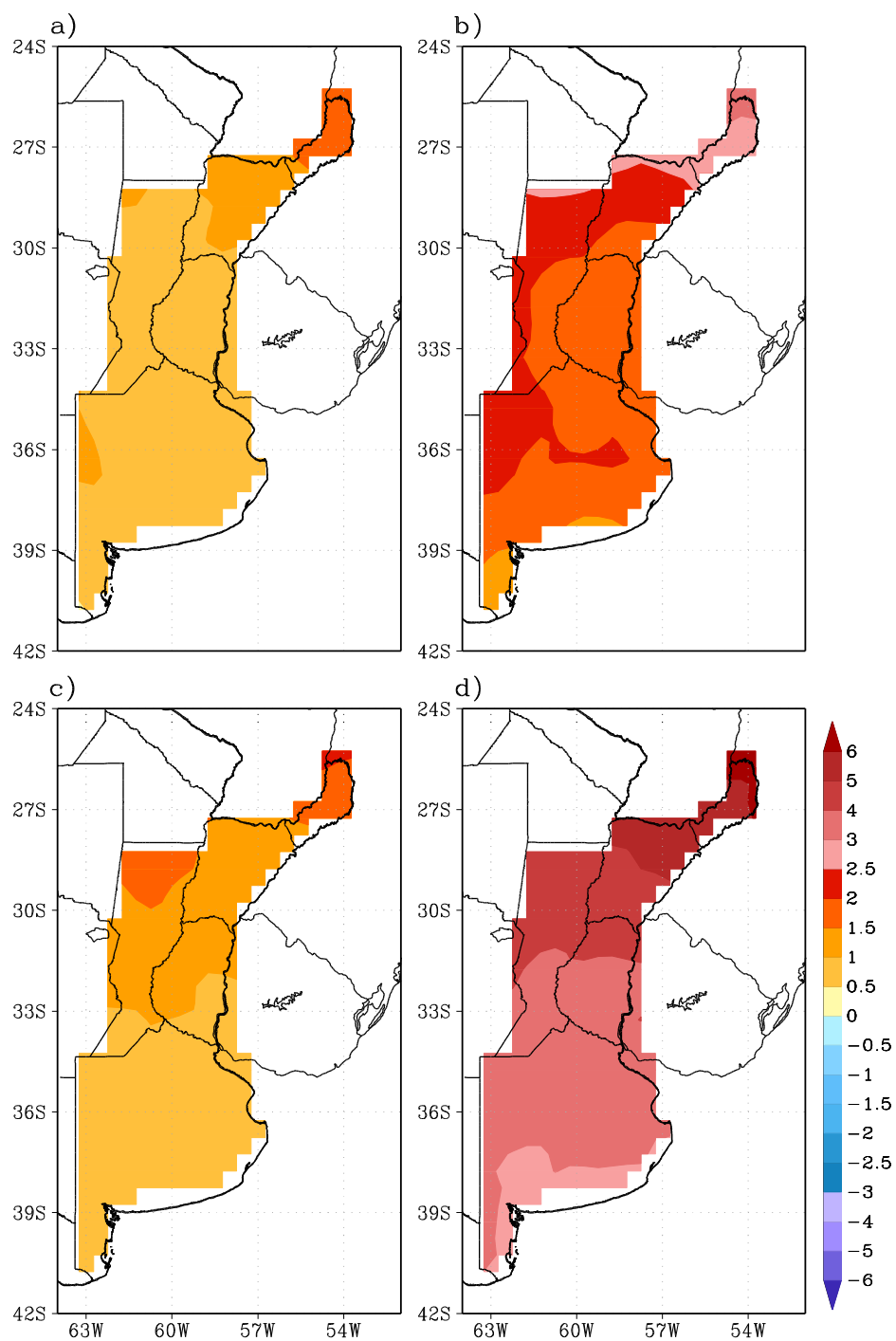




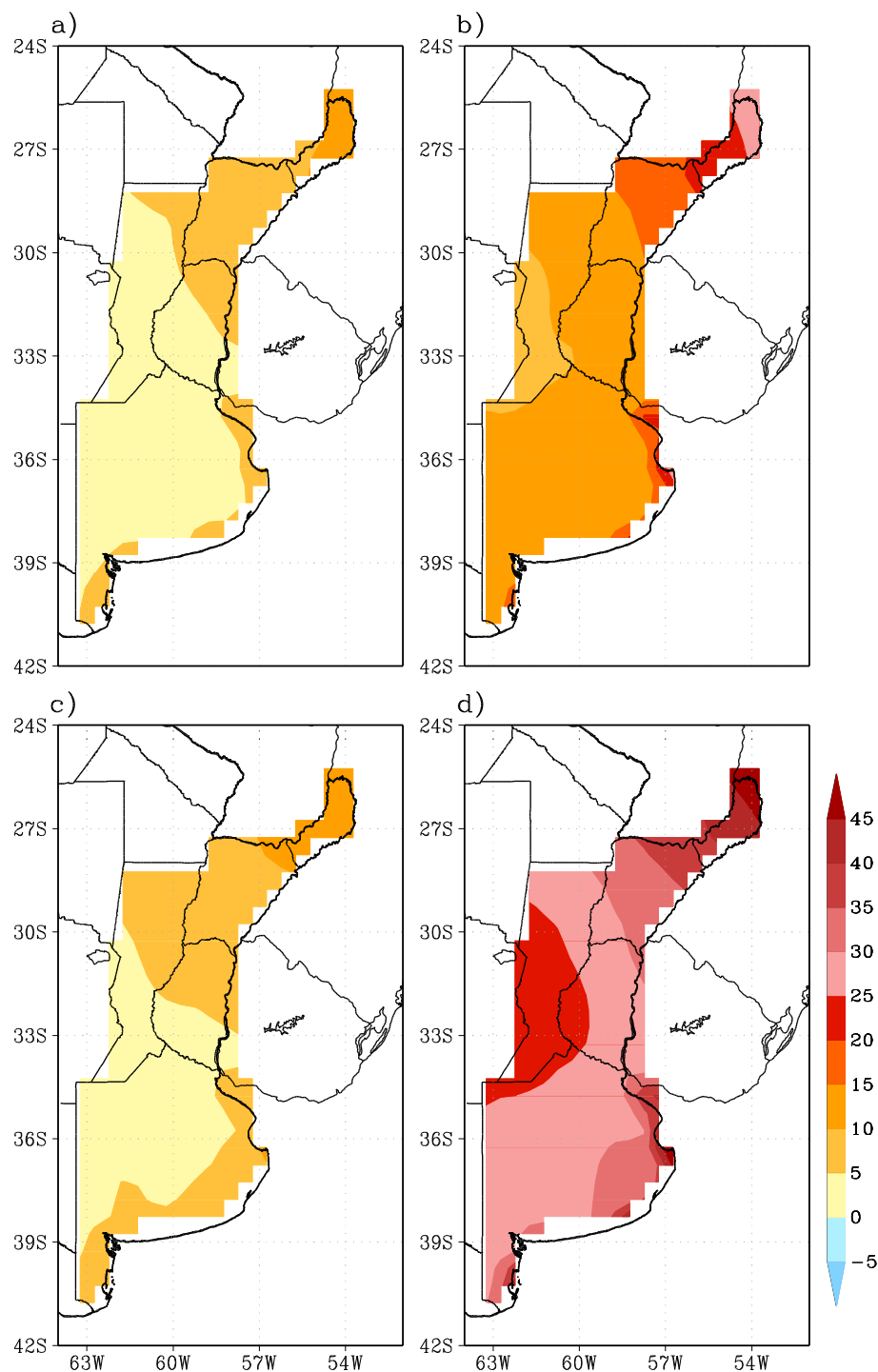
**Figura 5.4.1.8:** Ídem Figura 5.4.1.7, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



**Figura 5.4.1.9:** Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)

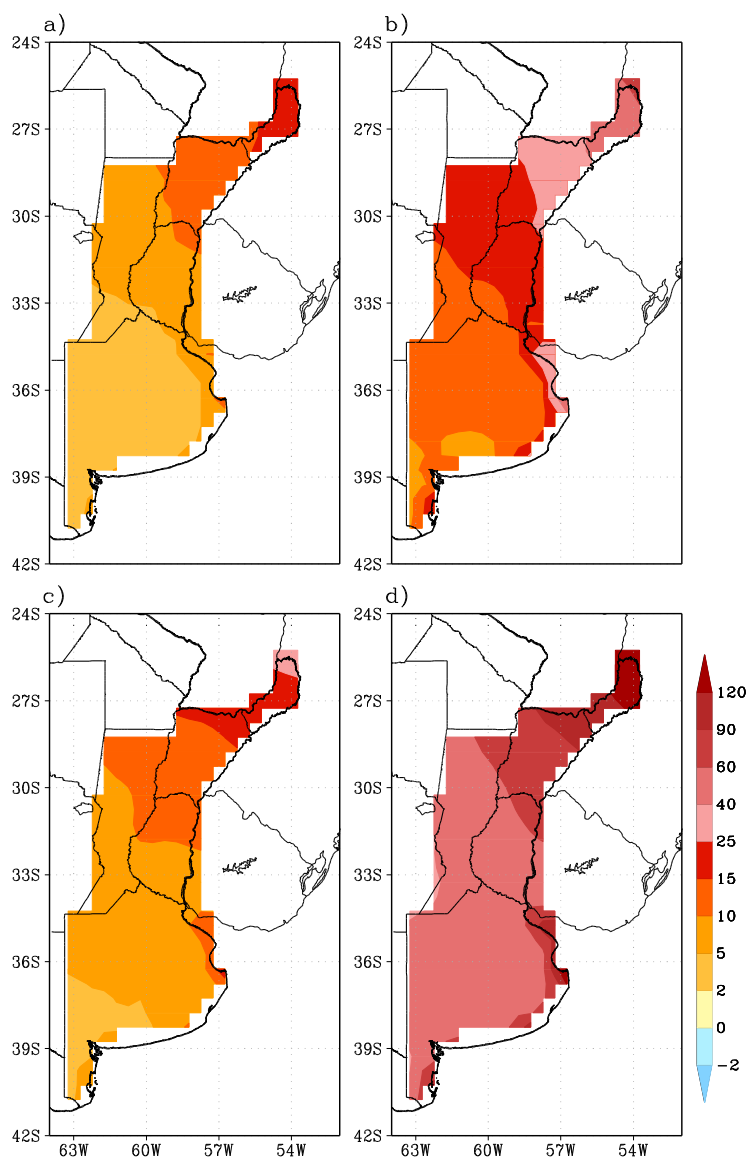


**Figura 5.4.1.10:** Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el valor anual máximo de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )



**Figura 5.4.1.11:** Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

De acuerdo con las proyecciones que muestra la Figura 5.4.1.12, es de esperar que el número de días con olas de calor aumente en toda la región, aunque mucho más en el norte. Cabe destacar que de acuerdo a la definición del índice utilizado, este es independiente de las temperaturas absolutas por lo que debido a esta caracterización regional, el gradiente en latitud que se observa en la figura 5.4.1.12 es consistente con el calentamiento diferente en latitud figuras 5.4.1.1 a 5.4.1.6. Aun en el escenario más benigno y en el futuro cercano, el aumento de días en el año con olas de calor sería de más de 2 a 15 días.



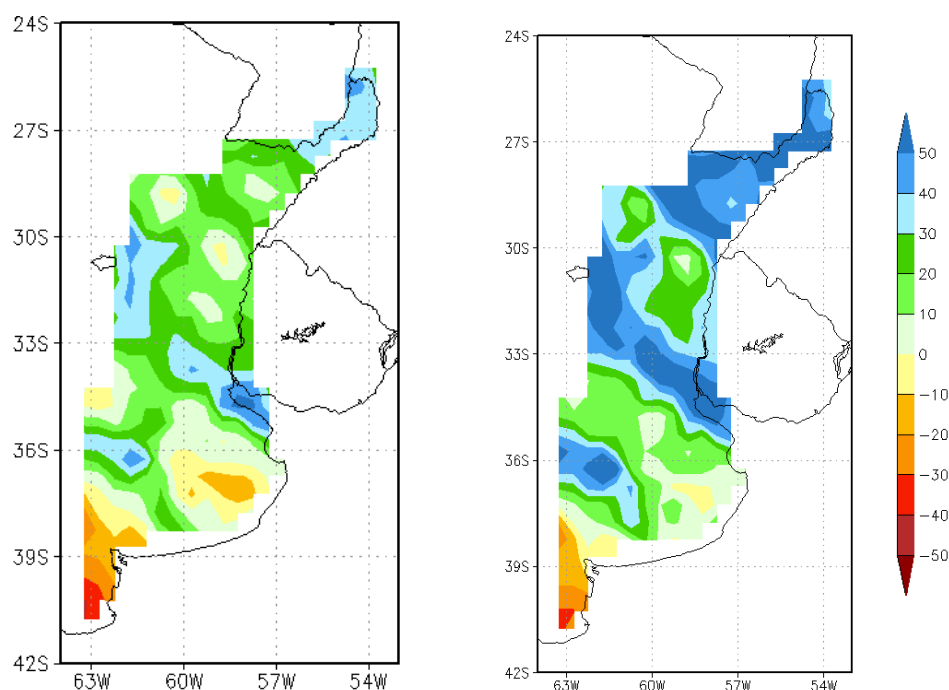
**Figura 5.4.1.9:** Ídem Figura 5.4.1.4, pero para los días en el año con ola de calor



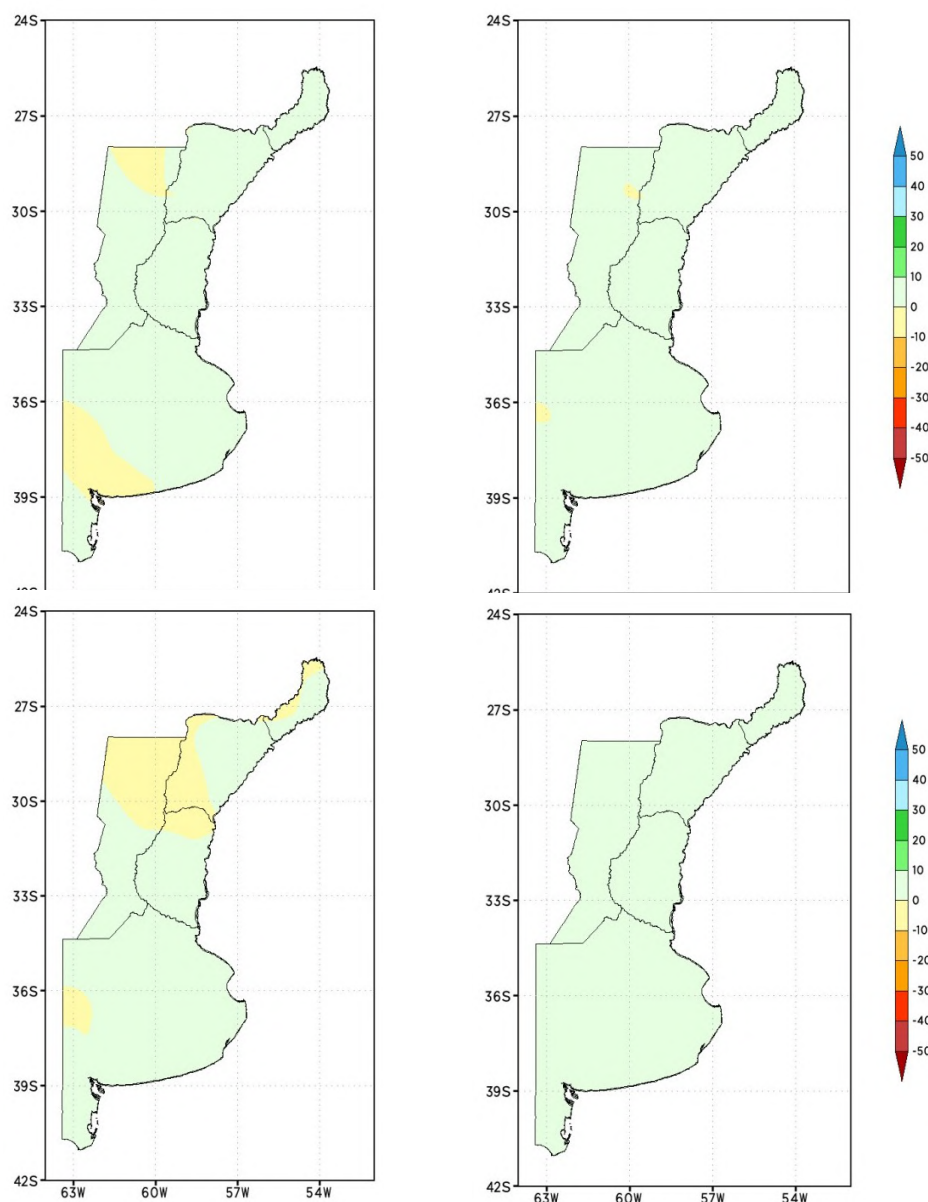
## 5.4.2 Precipitación

### *Precipitación media*

Las proyecciones en toda la región en los dos escenarios **RCP**, tanto en el futuro cercano como lejano son de aumentos poco relevantes en la precipitación, 0 a 10%, que estarían dentro del margen de error de esta evaluación, Figura 5.4.2.2. Incluso, en algún caso y en zonas aisladas se proyectan ligeras disminuciones por lo que en principio, se puede suponer que no habrá mayores cambios en la precipitación, aunque de acuerdo con lo obtenido del promedio de 42 modelos CMIP5, no se puede descartar un escenario de tendencias a aumentos moderados en Buenos Aires y el este de la Mesopotamia, Figura 3.4.2. También el escenario A1B en el modelo de alta resolución MRI/JMA proyecta aumentos mayores al 10% en la mayor parte de la región y muy extendidos de más del 40 % en futuro lejano, Figura 5.4.2.1. Con estos resultados diversos en cuanto a la magnitud del cambio, la conclusión es que excepto en el extremo sur de la provincia de Buenos Aires, es poco probable que haya una reducción en las precipitaciones anuales en este siglo.



**Figura 5.4.2.1:** Cambio en precipitación anual con respecto al periodo 1979-2003 modelo MRI/JMA (Japón). Escenario A1B. a) futuro cercano (2015-2039) y b) futuro lejano (2075-2099)



**Figura 5.4.2.2:** Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

### *Precipitaciones extremas*

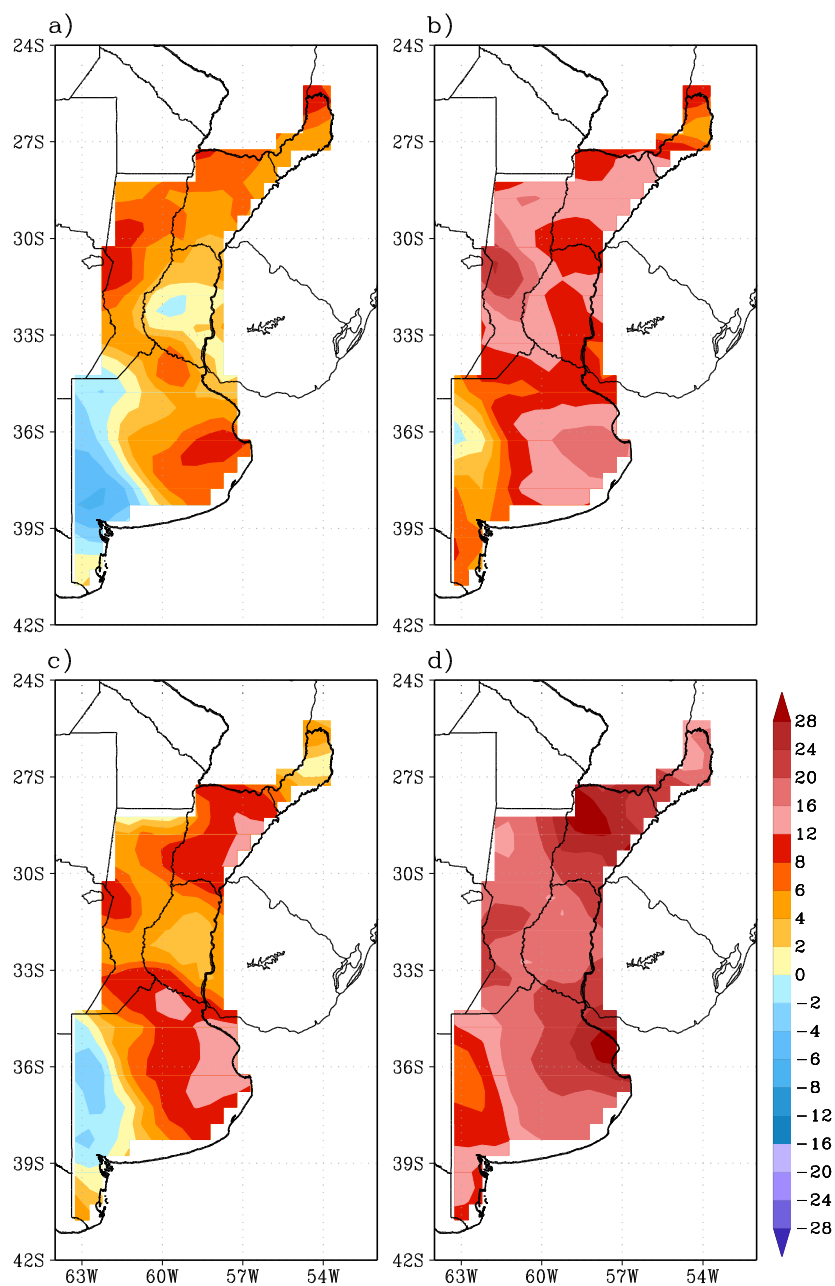
En casi toda la región, las precipitaciones extremas en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros tienden a aumentar, aunque con la excepción de algunas zonas del sudoeste de Buenos Aires y en algunos casos en Misiones, Figuras 5.4.2.3 a 5.4.2.5.

Como con la temperatura, en general los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero los cambios para el futuro lejano son distintos con mayores cambios en el RCP8.5. En los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

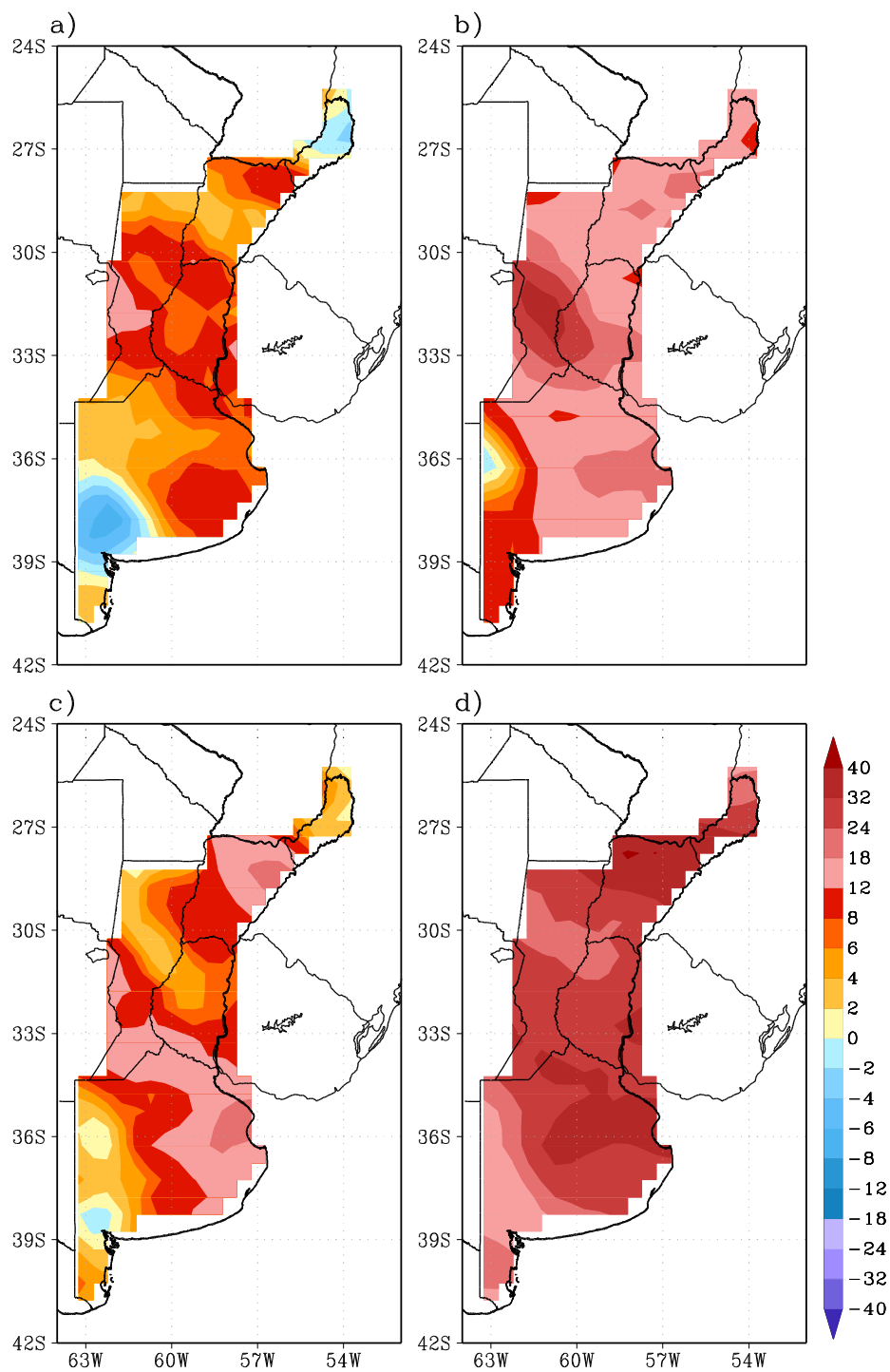
La Figura 5.4.2.5 indica que como resultado del cambio climático habría una tendencia en toda la región hacia mayores valores de la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa. Esto mismo fue encontrado para precipitaciones acumuladas mensuales por Barros y otros (2013) para dos grandes zonas de esta región.

Los cambios observados en los índices de precipitaciones extremas, Figuras 2.3.2 a 2.3.4 y los proyectados, Figuras 5.4.2.3 a 5.4.2.5, coinciden en un patrón regional de predominante aumento en la región que en el caso de las proyecciones varían con el horizonte temporal y con el escenario.

Los cambios en el número máximo anual de días consecutivos secos (máxima racha seca) presentan un cuadro geográfico heterogéneo y son en general pequeños. Excepto para el horizonte lejano en el escenario RCP4.5, habría una tendencia a una prolongación de estas rachas en el norte de la región.

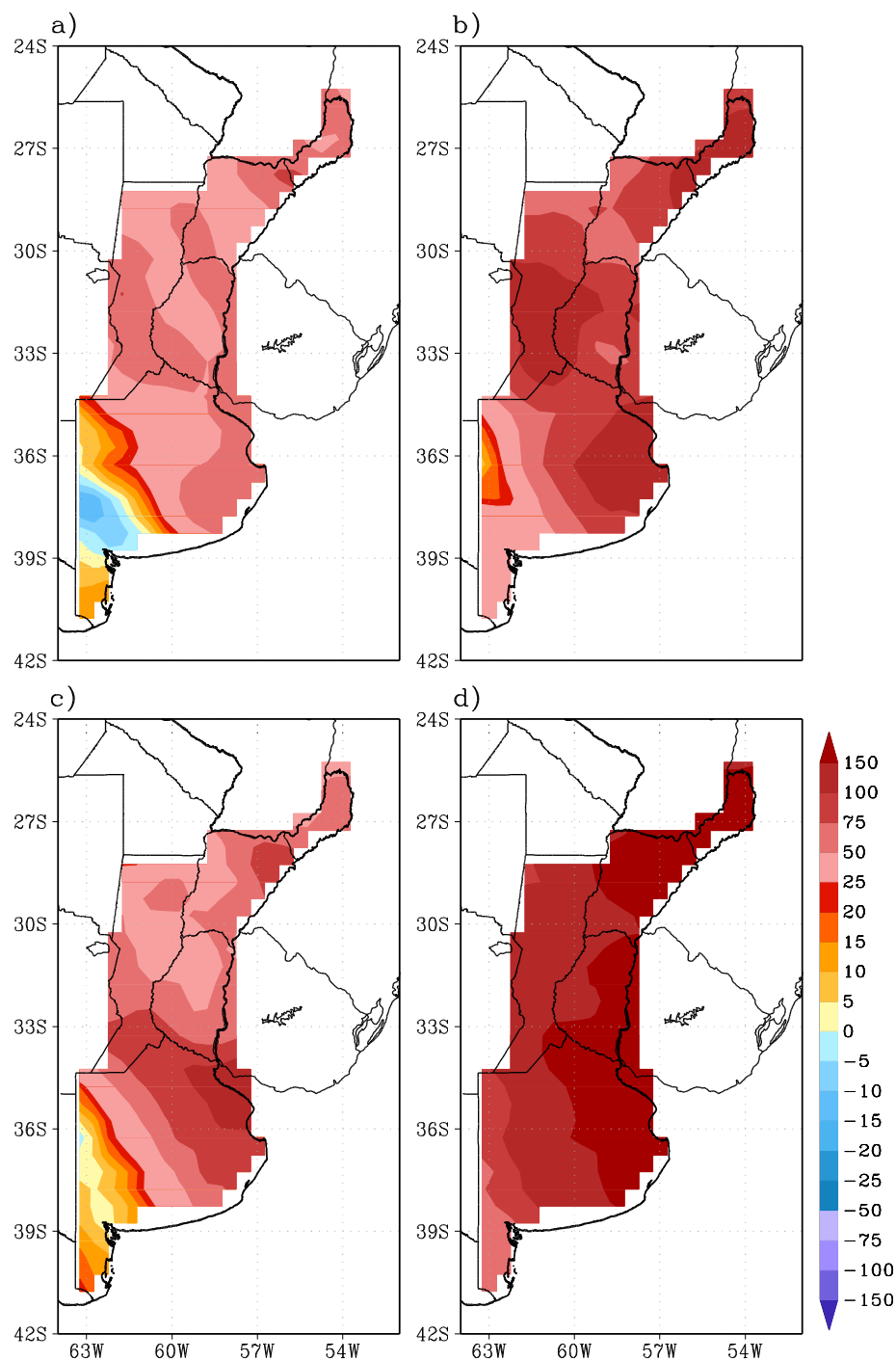


**Figura 5.4.2.3:** Cambios en la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESM1-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario RCP8.5, futuro lejano

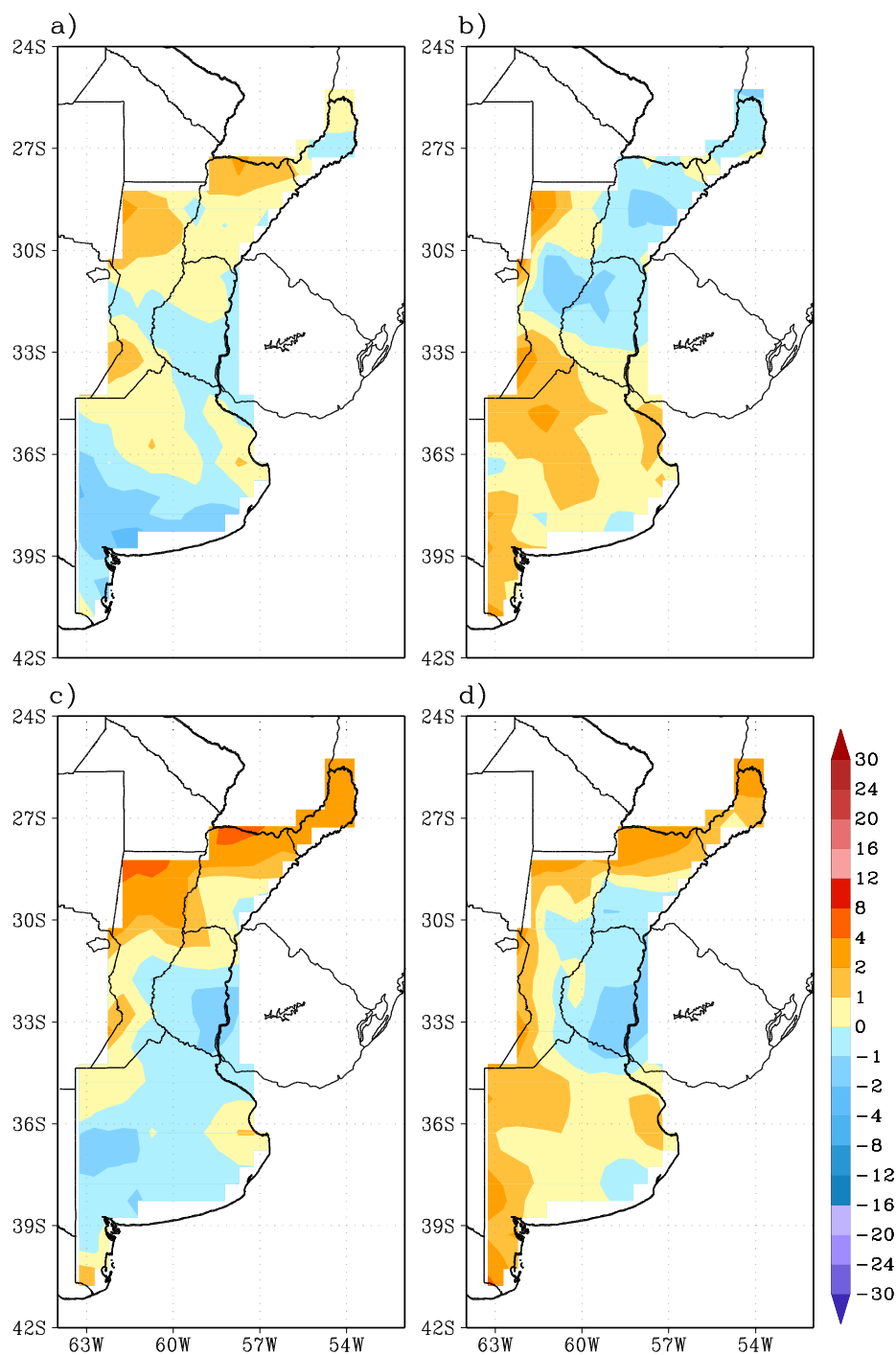


**Figura 5.4.2.4:** Ídem Figura 5.4.2.3, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)





**Figura 5.4.2.5:** Ídem Figura 5.4.2.3, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 5.4.2.6:** Ídem Figura 5.4.2.3, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 5.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

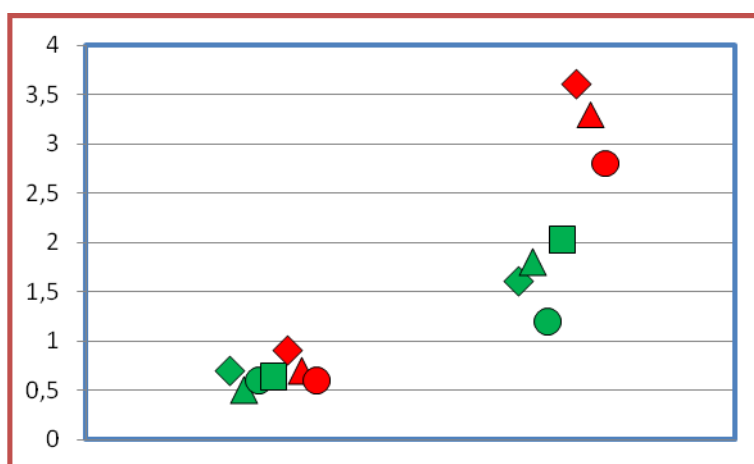
En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será relativamente menor que aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones. En este estudio, se comparan dos escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales y el RCP4.5 de emisiones moderadas. En cuanto a los modelos, se utilizan los 3 MCGs de mejor performance en la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5.

Lo mismo se hace para el futuro cercano, pero en ese caso hay que sumar cierto nivel de incerteza por la variabilidad interdecadal, sobre todo en el caso de la precipitación, la que surge de comparar los promedios regionales de las temperaturas y la precipitación de los 3 MCGs en los 2 escenarios.

### 5.5.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

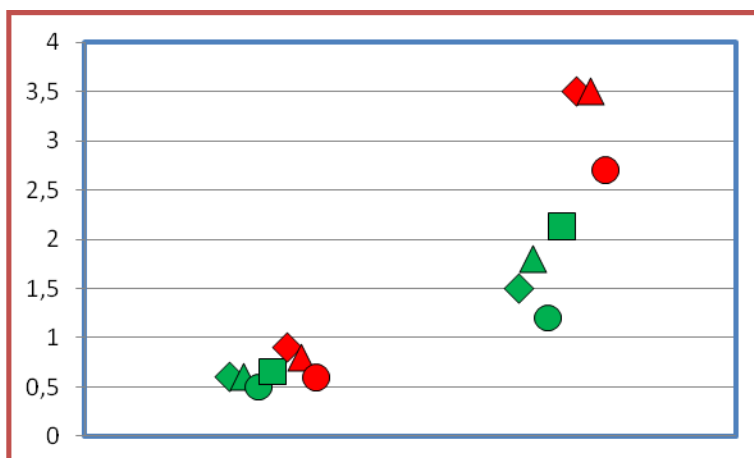
En todos los casos, la diferencia de calentamiento de los distintos modelos es muy pequeña frente al cambio, dado un determinado escenario y horizonte temporal.



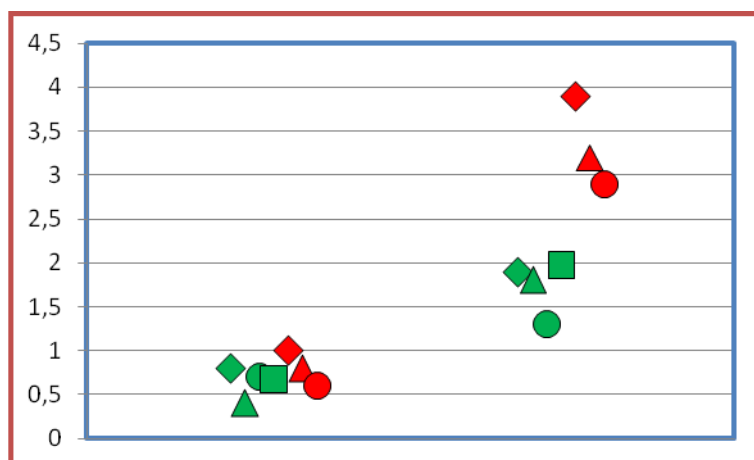
**Figura 5.5.1.1:** Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1981-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B, en rojo RCP8.5. Modelos: CCSM4 (círculos), CMCC-CM (rombos), NorESM1-M (triángulos) y MRI/JMA (cuadrados)

En el futuro cercano ya hay una marcada diferencia entre escenarios, pero se podría suponer que el calentamiento estará entre 0,5 y 2°C, Figura 5.5.5.1, aunque cabe tener en cuenta que el promedio de los 42 MCGs está más cerca del nivel inferior, Figura 3.4.1. Resumiendo, no se debería esperar más de 1° de calentamiento en el futuro cercano para el promedio regional. En relación al futuro lejano, en el escenario RCP4.5, el calentamiento no se hace mucho mayor con el tiempo y a fin de siglo estaría entre 0,5 y 1°, mientras que en RCP8.5 el aumento en el promedio regional estaría entre 2,5°C y algo más de 3,5°C, Figura 5.5.5.1.

El promedio de aumento de la temperatura mínima media regional rondaría en el futuro cercano entre 0,5 y 1°C sin mayor diferencia entre escenarios, Figura 5.5.1.2. En el futuro lejano habría más incerteza y dependiendo del escenario el aumento sería entre alrededor de 1,5°C para el RCP3.5 y en el escenario RCP8.5 podría llegar a 3,5°C, con valores intermedios para el escenario A1B. En el caso de la temperatura máxima media, la situación en el futuro cercano es similar a la de la temperatura mínima, pero en el futuro lejano la dispersión entre modelos es mucho mayor y el rango de posibles aumentos del promedio regional oscila entre 1 y 4°C, Figura 5.5.1.3.

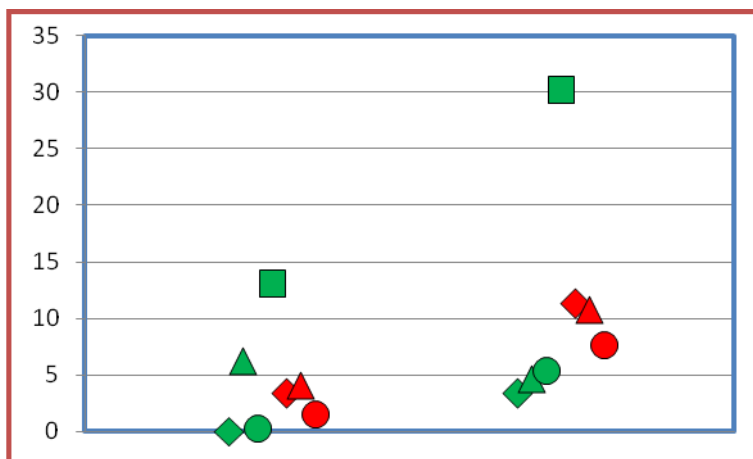


**Figura 5.5.1.2:** *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional*

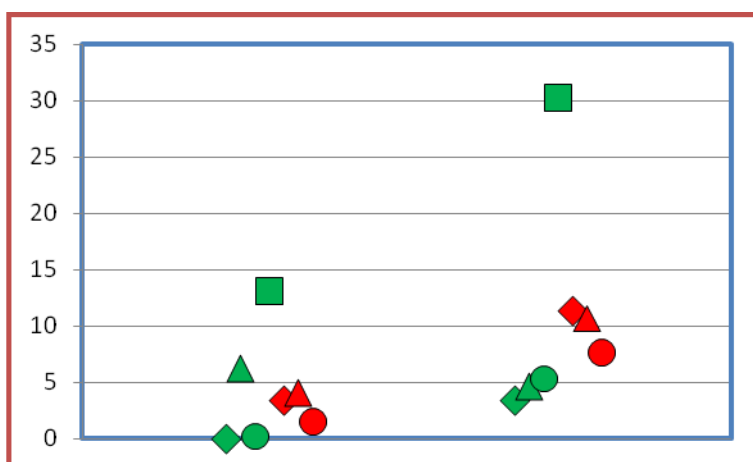


**Figura 5.5.1.3:** *Idem 5.5.1, pero para la temperatura máxima media regional*

Los cambios en la temperatura media del verano e invierno son casi iguales entre sí, y presentan características similares a las de los de la temperatura media anual en cuanto a las diferencias entre modelos y escenarios en los dos horizontes temporales; Figuras, 5.5.1.4, 5.5.1.5 y 5.5.1.1.



**Figura 5.5.1.4:** *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*



**Figura 5.5.1.5:** *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

#### *Extremos térmicos*

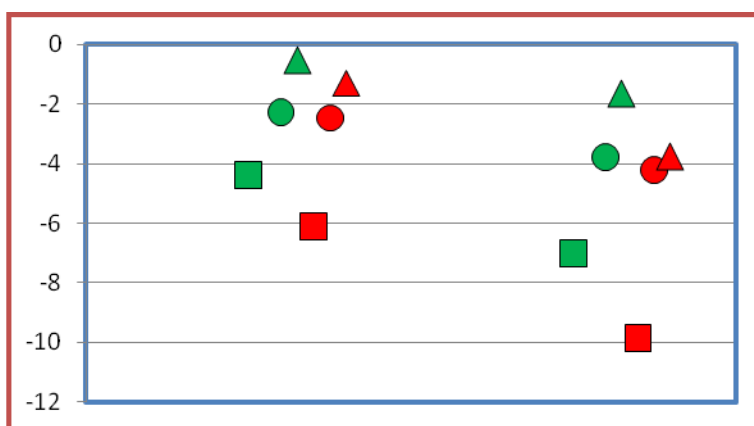
Como fuera señalado en la sección 5.4.1, los 6 índices regionales de extremos térmicos son consistentes en todos los escenarios y modelos y en las figuras 5.5.1.6 a 5.5.1.11 se aprecia que ello vale también para los promedios regionales de los 4 modelos con los que se construyeron los escenarios climáticos de esta región.

Como era de esperar en el futuro cercano la diferencia entre escenarios no es muy grande y en algunos casos es menor que la que existe entre los modelos. En el caso del aumento de noches tropicales, del porcentaje de días con temperaturas extremas y de días con olas de calor, las

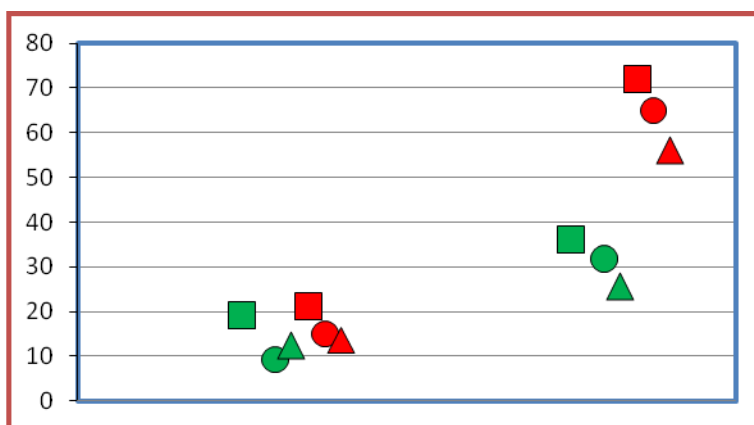


variaciones entre modelos y distintos escenarios no son muy grandes y se podría estimar que el rango probable estaría entre 10 y 20, 3 y 10 y 4 y 20 respectivamente. La disminución de las heladas presenta una importante variación entre modelos y dos de ellos tienen una reducción de solo menos de un día.

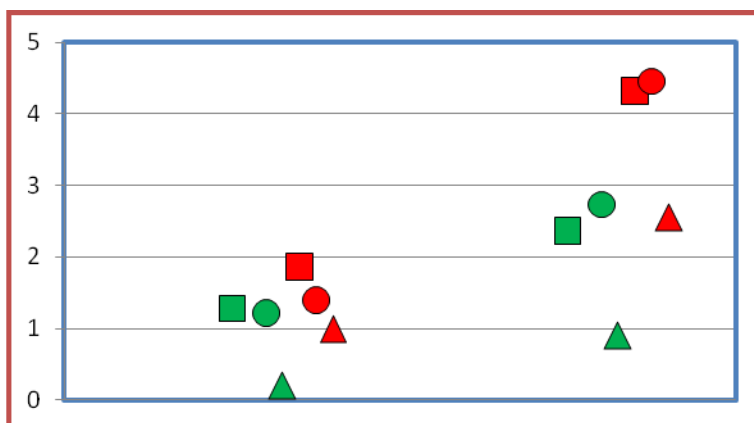
En el futuro lejano, las diferencias entre escenarios son marcadas y, excepto para el caso del cambio de días con heladas, son mucho mayores que las diferencias entre modelos. En conclusión, para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos térmicos es muy pequeña o nula respecto del signo y magnitud de los cambios para el futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Para el futuro lejano, la mayor fuente de incerteza se asocia con el escenario de emisiones.



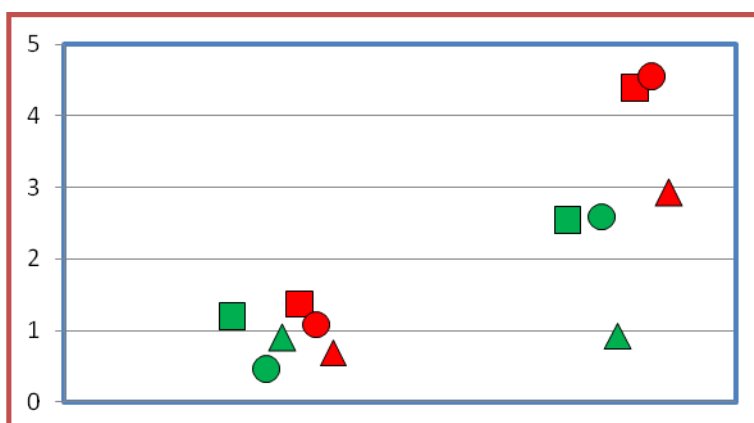
**Figura 5.5.1.6:** Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1981-2005. Modelos: CCSM4 (cuadrados), CMCC-CM (círculos) y NorES SMI-M (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5



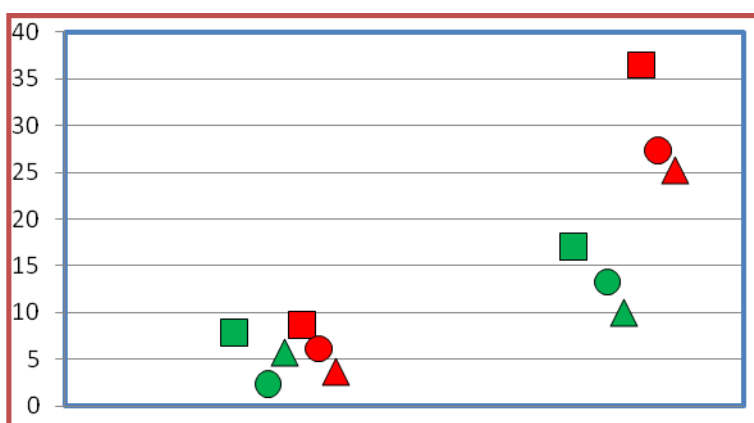
**Figura 5.5.1.7:** Ídem Figura 5.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



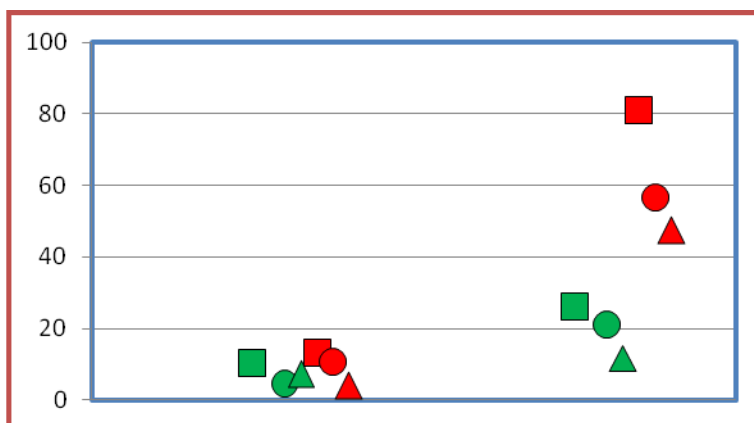
**Figura 5.5.1.8:** Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)



**Figura 5.5.1.9:** Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)



**Figura 5.5.1.10:** Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

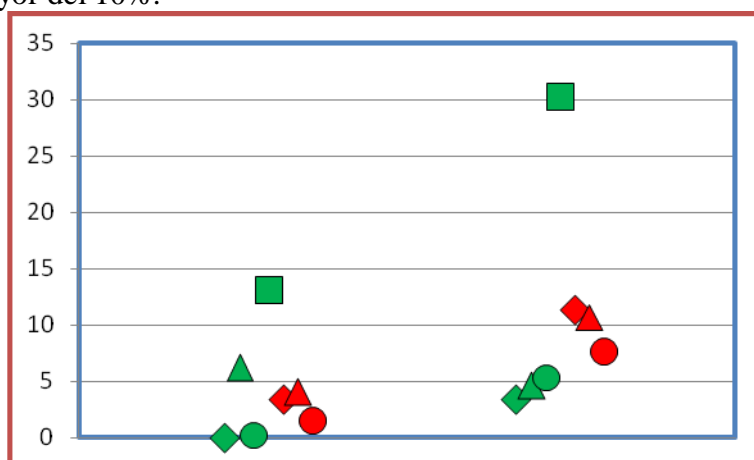


**Figura 5.5.1.11:** Ídem Figura 5.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

## 5.5.2 Precipitación

### *Precipitación media*

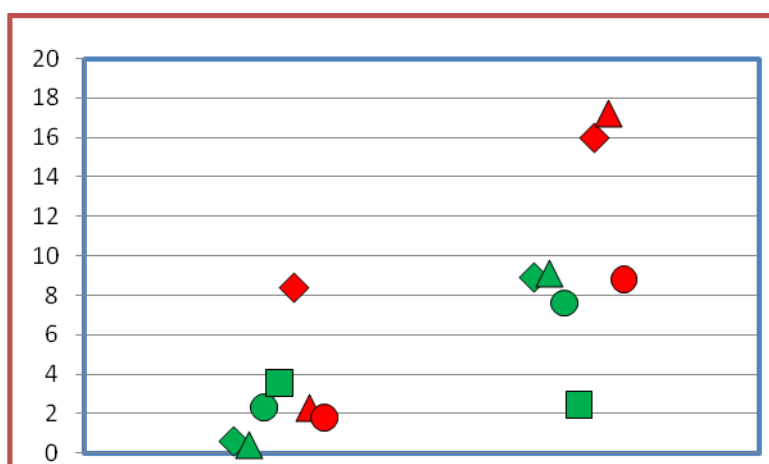
En el futuro cercano, el aumento en la precipitación es de apenas 0 a 6% entre los diferentes modelos y escenarios RCP y de 13% en el escenario A1B, Figura 5.5.2.1. Esto coincide con lo que se puede apreciar del promedio de los 42 MCGs del CMIP5 en la Figura 3.4.2. En consecuencia, no se debería esperar mayores cambios en la precipitación anual media regional para ese periodo, y los aumentos observados entre 1960 y 2010 no se revertirían. Para el futuro lejano en el escenario RCP8.5 se proyecta un aumento del orden del 10%, algo menor que el que resulta del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, mientras que el modelo MRI/JMA en el escenario A1B proyecta un aumento considerable y muy distinto del resto por lo que debiera considerarse como poco probable. En consecuencia se estima que el cambio probable será positivo y algo mayor del 10%.



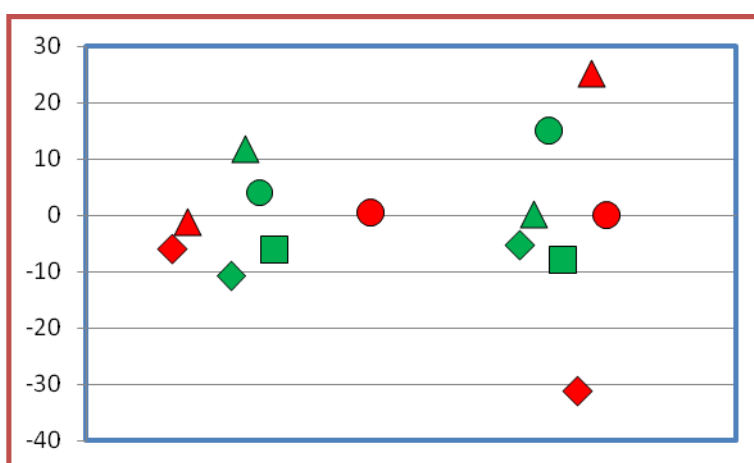
**Figura 5.5.2.1:** Porcentaje de cambio proyectado para la precipitación anual media regional respecto de 1981-2010. A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B, en rojo RCP8.5. Modelos: CCSM4 (círculos), CMCC-CM (rombos), NorESM1-M (triángulos) y MRI/JMA (cuadrados)

Para el futuro lejano se observa en el escenario RCP8.5 cierta diferencia entre los modelos aunque es mayor la diferencia entre los cambios proyectados por los escenarios considerados. De todos modos, habría que esperar un aumento moderado de la precipitación media regional ya que en ambos escenarios y en todos los modelos se proyectan aumentos.

En el verano habría una tendencia hacia mayor precipitación con mayores cambios porcentuales en el escenario RCP8.5, y en el futuro lejano, Figura 5.5.2.2. Esto estaría indicando que la precipitación media regional del verano sería mayor en escenarios de mayor calentamiento, aunque con diferencias entre modelos apreciables. En el invierno, los cambios para el futuro cercano son pequeños y diferentes en signo tanto para el escenario RCP4.5 y como para el escenario RCP 8.5. Para el futuro lejano la dispersión entre escenarios y modelos es mayor y por lo tanto, el rango esperado de cambios estaría entre - 30 y 30%.



**Figura 5.5.2.2:** *Idem 5.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

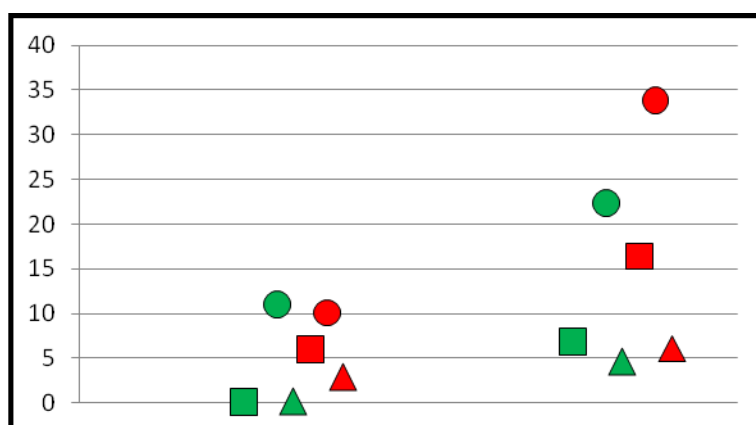


**Figura 5.5.2.3:** *Idem 5.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

### *Precipitaciones extremas*

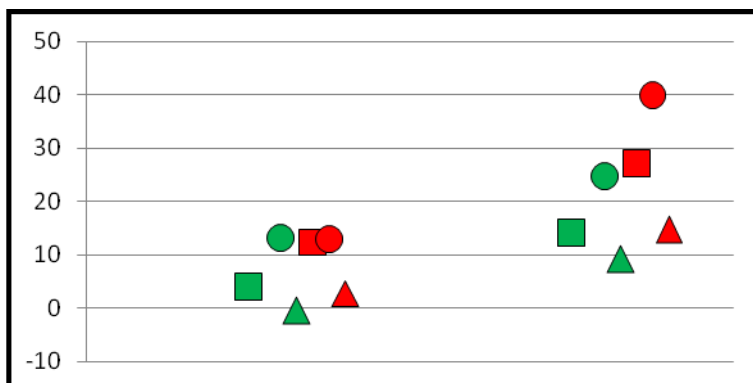
Los índices de precipitaciones extremas calculados indican que habrá una tendencia a que estas aumenten con el tiempo y en forma más pronunciada con el escenario RCP8.5, aunque con limitaciones en su cuantificación debido a la dispersión encontrada entre los resultados de los diferentes modelos. Para el futuro cercano, aunque en el promedio de todos los modelos y escenarios habría una tendencia hacia mayores extremos, algunos índices en el escenario RCP4.5 tienen diferencias nulas o incluso negativas, Figuras 5.5.2.4, 5.5.2.5 y 5.5.2.6. La longitud de los periodos secos máximos no tendrían mayores cambios en ninguno de los dos periodos futuros y en general serían de un día, Figura 5.5.2.7. Para los tres índices de precipitaciones extremas en el futuro lejano, las diferencias son siempre grandes y positivas pero con gran dispersión tanto en modelos como escenarios.

Para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos de precipitación es pequeña con respecto del signo de los cambios. En cuanto a la magnitud de estos cambios, no es grande en el caso del futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Las precipitaciones máximas de un día aumentarían no mucho más de 10 mm y las acumuladas de 5 días en 20mm. Para el escenario lejano, la fuente de incerteza proviene tanto del escenario de emisiones como de los modelos.

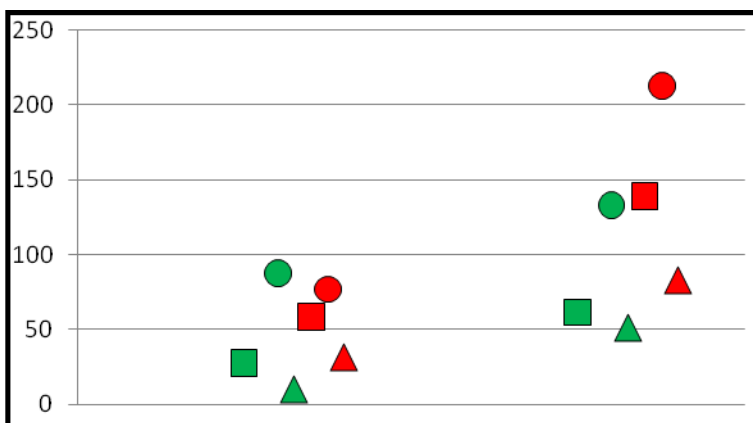


**Figura 5.5.2.4:** *Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Modelos: CCSM4 (cuadrados), CMCC-CM (círculos) y NorES SMI-M (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5*

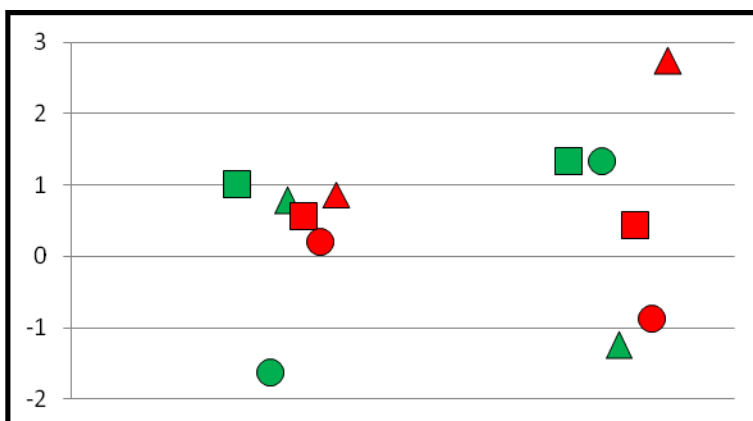




**Figura 5.5.2.5:** Ídem Figura 5.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)



**Figura 5.5.2.6:** Ídem Figura 5.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 5.5.2.7:** Ídem Figura 5.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos



## 5.6 CONCLUSIONES

La temperatura y la precipitación media anual han aumentado en toda la región Húmeda desde el comienzo de la segunda mitad del siglo pasado. (*Confianza media*)

En el caso de la temperatura, este aumento se produjo en la temperatura mínima diaria, mientras que en la máxima los cambios fueron muy pequeños y heterogéneos dentro de la región, e incluso negativos en áreas con fuerte aumento de la precipitación. Esto es un indicador de que el calentamiento de esta región habría estado generado en buena medida por el aumento de los gases de efecto invernadero, aunque regionalmente modulado por otros procesos como los relacionados con la lluvia o con cambios en la circulación atmosférica. Igualmente los indicadores de extremos, como aquellos asociados con heladas u olas de calor han cambiado en forma consistente con la temperatura media, evidenciando también el calentamiento regional. (*Confianza alta*)

La precipitación media anual aumentó en casi toda la región y en muchas zonas en forma estadísticamente significativa. La significancia de este aumento crece con el agregado de los datos por subregiones, de modo que en las tres subregiones consideradas en este estudio los resultados son significativos al 95% (*confianza alta*). El aumento se produjo en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación, que en el promedio regional fue estadísticamente significativo. Los indicadores de extremos que se asocian con potenciales desastres por inundaciones cambiaron consistentemente con las mayores precipitaciones lo que se evidenció más claramente con los valores acumulados; esto es en 5 días en el caso aquí presentado y en un mes (Doyle y otros 2012). Otros indicadores de extremos mostraron aumentos en las lluvias extremas y una disminución de la duración de los períodos secos máximos anuales.

Para el siglo XXI, no se debería esperar más de 1°C de calentamiento en el futuro cercano para el promedio regional. Hacia fin de siglo el cambio proyectado es diferente según el escenario; en el escenario RCP4.5 estaría entre 0,5 y 1°C y en el RCP8.5 entre 2,5°C y algo más de 3,5°. (*Confianza media*)

En el futuro cercano, la precipitación media regional no tendría mayores cambios y con bastante certeza no se revertiría el aumento registrada entre 1960-2010 (*confianza alta*). Para el futuro lejano y en el escenario RCP8.5 habría un aumento del orden del 10%, pero existe un grado de incerteza asociado con los modelos, por lo que no habría que descartar aumentos aún mayores. (*Confianza media*)

Los índices calculados indican que habrá una tendencia a que las precipitaciones extremas aumenten con el tiempo y en forma más pronunciada con el escenario RCP8.5. Para el futuro cercano, aunque también habría una tendencia general hacia mayores precipitaciones extremas en casi todos los modelos y escenarios, en algunos casos las diferencias con respecto al presente son casi nulas o incluso negativas.



Resumiendo, el calentamiento regional observado entre 1960 y 2010 se aceleraría en el siglo XXI y el aumento de la precipitación registrado en ese periodo no se revertiría y por el contrario habría una tendencia hacia mayores precipitaciones extremas, aunque todavía con cierta incerteza en cuanto a la magnitud del cambio. (*Confianza media*)

## Referencias

Barros, V., M. E. Castañeda y M. Doyle, 2000. Recent precipitation trends in Southern South America to the East of the Andes: an indication of a mode of climatic variability, 2000, Capítulo del libro Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates, Concepts, Methods, Problems, *Springer*.

Barros, V., M. E. Doyle e I. A. Camilloni, 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 19–33.

Barros, V., C. Garavaglia and M. Doyle, 2013: Twenty First century Projections of Extreme Precipitations in the Plata basin. *International Journal of River Basin Management*, **11**, 373–381.

Boulanger, J. P., O. Penalba, M. Rusticucci, F. Lafon y W. Vargas, 2005: Observed precipitation in the Parana-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections, *Climate Dynamics*, **24**, 393–413.

Camilloni, I. y V. Barros, 1995: Influencia de la isla urbana de calor en la estimación de las tendencias seculares en Argentina Subtropical, *Geofísica Internacional*, **4**, 161–170.

Castañeda, E. y V. Barros, 1994: Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al este de los Andes, *Meteorológica*, **19**, 23–32.

Doyle, M., R. Saurral y V. Barros, 2012: Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. *Int. J. Climatol.*, **32**, 2149–2162.

Escobar, G., I. Camilloni y V. Barros, 2003: Desplazamiento del anticiclón subtropical del Atlántico Sur y su relación con el cambio de vientos sobre el estuario del Río de la Plata. *X Congreso latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, La Habana, Cuba. (CD-ROM).

Harris, I., P.D. Jones, T.J. Osborn, G.H. Lister, 2013: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623–642.

Haylock, M. R., T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. Anunciação, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. García, A. M. Grimm, R. Jaildo dos Anjos, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. Molion, D. F. Moncunill, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. I. Santos, L. Trebejo y L. Vincent, 2006: Trends in Total



and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *J. Climate*, **19**, 1490–1512.

IPCC Chapter 2. Hartmann, D. L., A. M. Klein Tank, M. Rusticucci, L. V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F. J. Dentener, E. J. Dlugokencky, D. R. Easterling, A. Kaplan, B. J. Soden, P. W. Thorne, M. Wild y P. M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mezher, R., M. Doyle y V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina, *Atmospheric Research*, **114–115**, 70–82.

Penalba, O.C. y F. Robledo 2010: Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, **98**, 531–550.

Re, M. y V. Barros, 2009: Extreme rainfalls in SE South America, *Climatic Change*, **96**, 119–136.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2004: Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, 4099–4107.

Schneider, U., 2013: GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, **115**, 15–40.

Simionato, C., C. Vera y F. Siegesmund, 2004: Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Rio de La Plata. *Continental Shelf Research*, **17(7)**, 770–783.



## CAPITULO 6

### CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN CENTRO

|              |  |          |
|--------------|--|----------|
| <b>6.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>  | pág. 148 |
| 6.1.1        | <b>Dominio espacial</b>  | pág. 148 |
| 6.1.2        | <b>Datos</b>   | pág. 148 |
| 6.1.3        | <b>Presentación de mapas y gráficos</b>  | pág. 148 |
| <b>6.2</b>   | <b>CAMBIOS Y TENDENCIAS</b>  | pág. 148 |
| <b>6.2.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 149 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 149 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 154 |
| <b>6.2.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 159 |
|              | <i>Precipitaciones medias</i>  | pág. 159 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 166 |
|              | <i>Grado de Incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados</i> | pág. 170 |
| <b>6.2.3</b> | <b>Otras variables</b>   | pág. 171 |
| <b>6.3</b>   | <b>VALID. DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN DE ERRORES</b>                                | pág. 172 |
| <b>6.3.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 171 |
| <b>6.3.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 176 |
| <b>6.4</b>   | <b>ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)</b>                                   | pág. 180 |
| <b>6.4.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 180 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 180 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 184 |
| <b>6.4.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 191 |
|              | <i>Precipitación media</i>   | pág. 191 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 192 |
| <b>6.5</b>   | <b>EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESC. CLIMAT.</b>                            | pág. 197 |
| <b>6.5.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 197 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>   | pág. 197 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>   | pág. 199 |
| <b>6.5.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 202 |
|              | <i>Precipitación media</i>   | pág. 202 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>  | pág. 204 |
| <b>6.6</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | pág. 206 |
|              | <b>Referencias</b>   | pág. 207 |





## **CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN CENTRO**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

#### **6.1.1 Dominio espacial**

La región a la que se refiere este capítulo es la que comprende a las provincias de Formosa, Chaco, Santiago del Estero, Tucumán, Córdoba, San Luis y La Pampa que se denominó región Centro y está localizada enteramente al norte del paralelo 40° S. La misma corresponde a un clima semiárido, y tiene una gran extensión meridional, que va desde esta última latitud hasta casi los 22° S. Este aspecto es reflejado con claridad en los campos medios, tanto de la temperatura como de la precipitación, presentando en general magnitudes de estos parámetros mayores hacia el norte y menores hacia el sur.

#### **6.1.2 Datos**

Las bases de datos utilizadas y las razones de su selección están descriptas en el capítulo 2. Se utilizó para la temperatura de superficie y la precipitación la base CRU TS3.1, producida por el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris y otros 2013) que tiene temperatura y precipitación mensual y se extiende en su versión 3.20 hasta el 2010. (<http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk>). Para la descripción de las tendencias de los índices de extremos se usó la base CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) donde están calculados siguiendo las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

Complementariamente a las bases de datos descriptas en el párrafo precedente, se usaron datos diarios de las estaciones meteorológicas Las Lomitas y Formosa del Servicio Meteorológico Nacional y consistidos en el marco del proyecto CLARIS LPB (Penalba y otros 2013). Datos disponibles en <http://wp32.at.fcen.uba.ar/>. Con estas series de datos se calculó el índice de precipitación extrema definido como el número de días en el año con precipitación por encima de 25mm y 50mm de precipitación, umbrales representativos de precipitación diaria extrema en la región. Para evaluar la posible incerteza originada en la escasa información básica existente se hicieron comparaciones entre los cambios de precipitación calculados con las bases CRU y la base GPCC (Schneider 2013).

#### **6.1.3 Presentación de mapas y gráficos**

Debido a la extensión latitudinal de la región Centro, y con el fin de evaluar adecuadamente el cambio tanto de los valores medios como de los extremos de temperatura y precipitación, se presentan las series temporales y las tendencias lineales en tres subregiones: sur (San Luis, La Pampa, y sur de Córdoba); medio (centro-norte de Córdoba, Santiago del Estero y Tucumán) y norte (Chaco y Formosa).

## 6.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

### 6.2.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

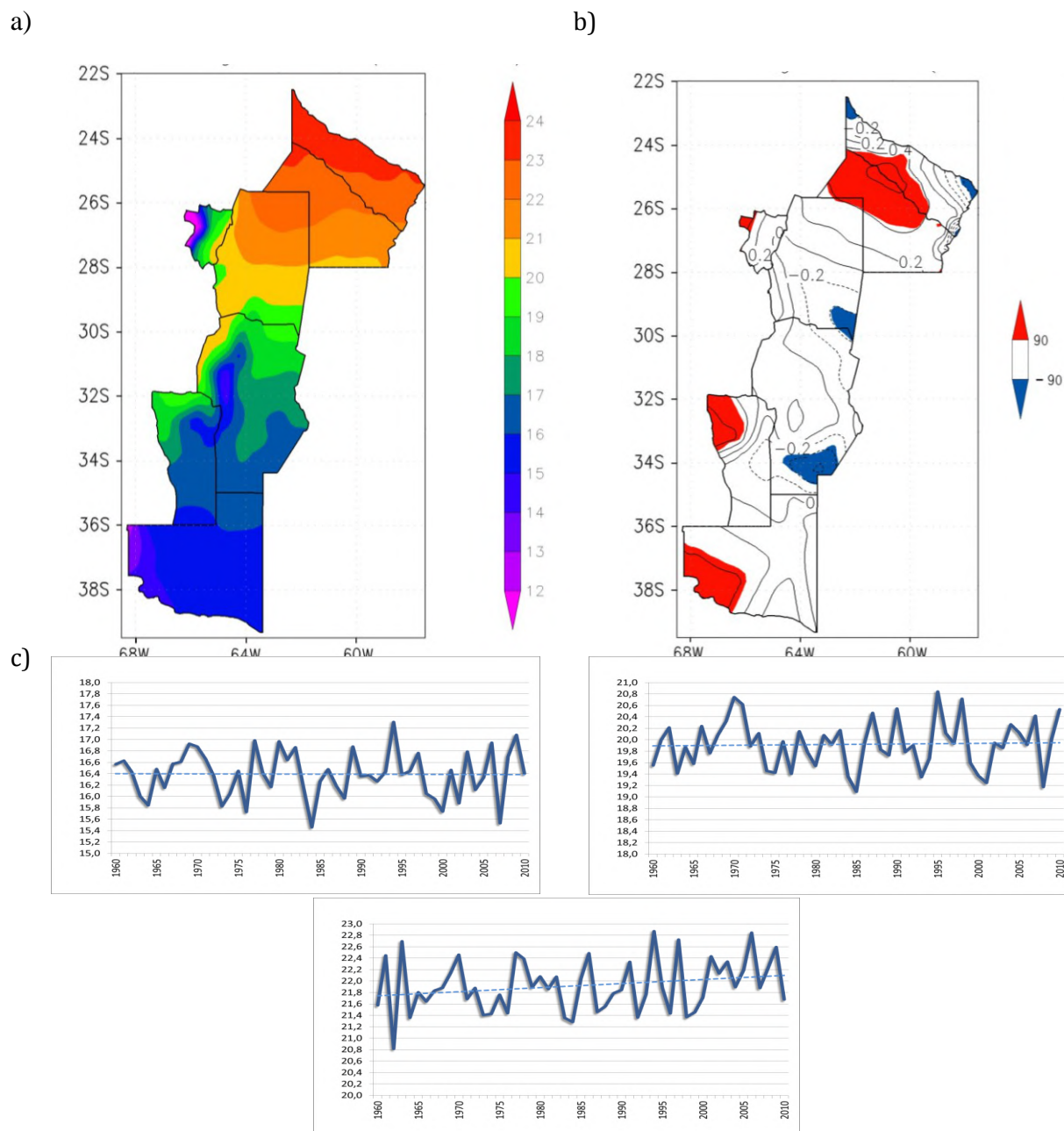
Exceptuando la información provista por las bases internacionales, la literatura sobre tendencias de las temperatura media en la región es escasa. La mayoría de las publicaciones son sobre las temperaturas mínimas y máximas medias y otros extremos. No obstante algunas publicaciones relacionan las temperaturas extremas a las temperaturas medias. Por ejemplo, en la región Centro la temperatura media del verano está fuertemente correlacionada en forma positiva con la ocurrencia de temperaturas máximas muy cálidas, mientras que la temperatura media de invierno es menos sensible a la frecuencia de temperaturas extremas (Rusticucci y Barrucand 2001).

**Para el periodo 1960/2010, la temperatura media anual tuvo un aumento significativo de 0,4°C en la subregión Centro norte (confianza alta) y de 0,5°C en toda la región Centro durante la primavera (confianza alta).** Los cambios fueron importantes durante la primavera, mientras que en otras estaciones del año no se aprecian variaciones significativas. No obstante hay un aumento de medio grado en el verano en la zona sur que es consistente con el significativo aumento en el verano encontrado por Martin y Agosta (2008) para la región centro-oeste del país, la que incluía el oeste de La Pampa, San Luis y otras provincias de la región Andina, en el período 1959-2004. La Tabla 6.2.1.1 sintetiza los cambios y los valores medios estacionales y anuales calculados para las tres subregiones.

|                      |               | <b>TEMPERATURA MEDIA 1960-2010</b> |      |      |             |             |
|----------------------|---------------|------------------------------------|------|------|-------------|-------------|
|                      |               | DEF                                | MAM  | JJA  | SON         | ANUAL       |
| <b>CENTRO SUR</b>    | <i>Medio</i>  | 23,1                               | 16,1 | 9,3  | 17,0        | 16,4        |
|                      | <i>Cambio</i> | -0,3                               | -0,3 | 0,0  | 0,5         | -0,0        |
| <b>CENTRO MEDIO</b>  | <i>Medio</i>  | 25,6                               | 19,6 | 13,7 | 20,8        | 19,9        |
|                      | <i>Cambio</i> | -0,2                               | -0,3 | -0,0 | 0,5         | 0,0         |
| <b>CENTRO NORTE</b>  | <i>Medio</i>  | 26,9                               | 21,6 | 16,7 | 22,5        | 21,9        |
|                      | <i>Cambio</i> | 0,2                                | 0,4  | 0,3  | 0,5         | <b>0,4*</b> |
| <b>REGION CENTRO</b> | <i>Medio</i>  | 25,6                               | 19,7 | 14,0 | 20,7        | 20,0        |
|                      | <i>Cambio</i> | 0,0                                | 0,0  | 0,1  | <b>0,5*</b> | 0,2         |

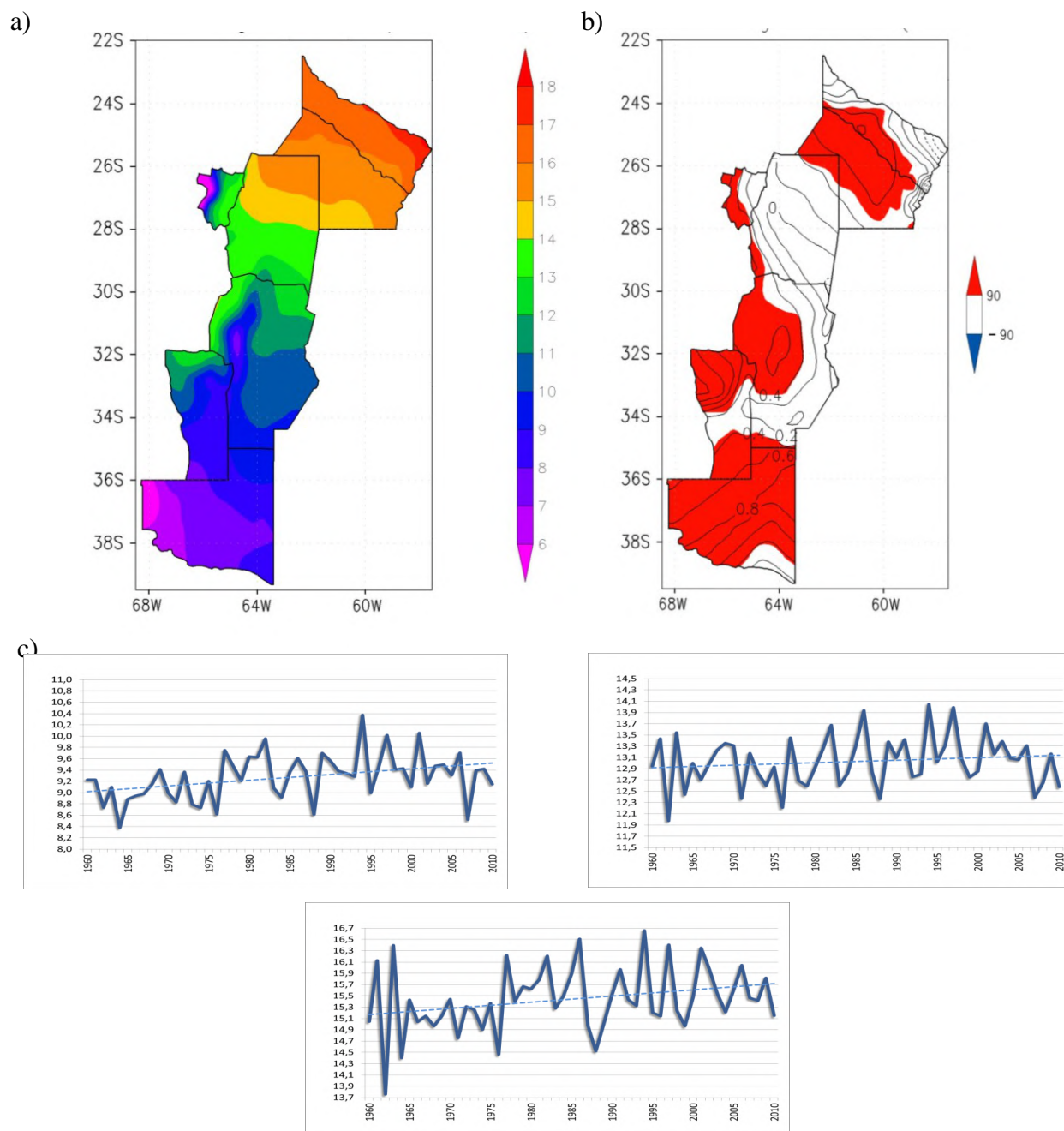
**Tabla 6.2.1.1:** Valores medios y cambios de la temperatura media para la región Centro para 3 subregiones (°C). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

El mapa de cambios para el período 1960-2010 se muestra en la Figura 6.2.1.1b. Una importante zona al norte de Chaco y sur de Formosa tuvo un cambio significativo superior a 0,5°C. Este aumento de la temperatura media anual influye en la serie de la subregión Centro norte en la que hubo una tendencia lineal positiva con significancia estadística al 90%, Figura 6.2.1.1c. Por otra parte, un cambio significativo de -0,5°C se produjo en una pequeña región en el sur de Córdoba y sudeste de Santiago del Estero.



**Figura 6.2.1.1:** a) Campo medio de la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en  $^{\circ}\text{C}$  para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; c) serie anual de la temperatura media para las 3 subregiones: panel superior izquierdo, Centro sur, panel superior derecho, Centro medio y panel inferior, Centro norte

**La temperatura mínima media anual tuvo un aumento significativo en prácticamente toda la región de alrededor de 0,4°C entre 1960 y 2010 (confianza alta), siendo más importante en la subregión Centro sur, Figura 6.2.1.2b, Figura 6.2.1.2c y Tabla 6.2.1.2.**



**Figura 6.2.1.2:** Ídem 6.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)

En términos estacionales, la primavera y el verano tienen los mayores aumentos significativos de temperatura mínima en el período 1960-2010. Ellos son de aproximadamente 0,5°C en el Centro medio en verano y 0,8°C en el Centro sur en primavera, Tabla 6.2.1.2.

|                      |        | <b>TEMPERATURA MINIMA 1960-2010</b> |      |      |       |       |
|----------------------|--------|-------------------------------------|------|------|-------|-------|
|                      |        | DEF                                 | MAM  | JJA  | SON   | ANUAL |
| <b>CENTRO SUR</b>    | Medio  | 15,7                                | 9,3  | 2,5  | 9,6   | 9,3   |
|                      | Cambio | 0,6*                                | 0,3  | 0,4  | 0,8** | 0,5** |
| <b>CENTRO MEDIO</b>  | Medio  | 18,8                                | 13,4 | 6,5  | 13,4  | 13,0  |
|                      | Cambio | 0,5*                                | 0,0  | -0,1 | 0,5*  | 0,2   |
| <b>CENTRO NORTE</b>  | Medio  | 20,4                                | 15,6 | 10,2 | 15,6  | 15,4  |
|                      | Cambio | 0,7**                               | 0,5  | 0,3  | 0,7   | 0,6   |
| <b>REGION CENTRO</b> | Medio  | 18,8                                | 13,4 | 7,2  | 13,5  | 13,2  |
|                      | Cambio | 0,6**                               | 0,3  | 0,2  | 0,7** | 0,5** |

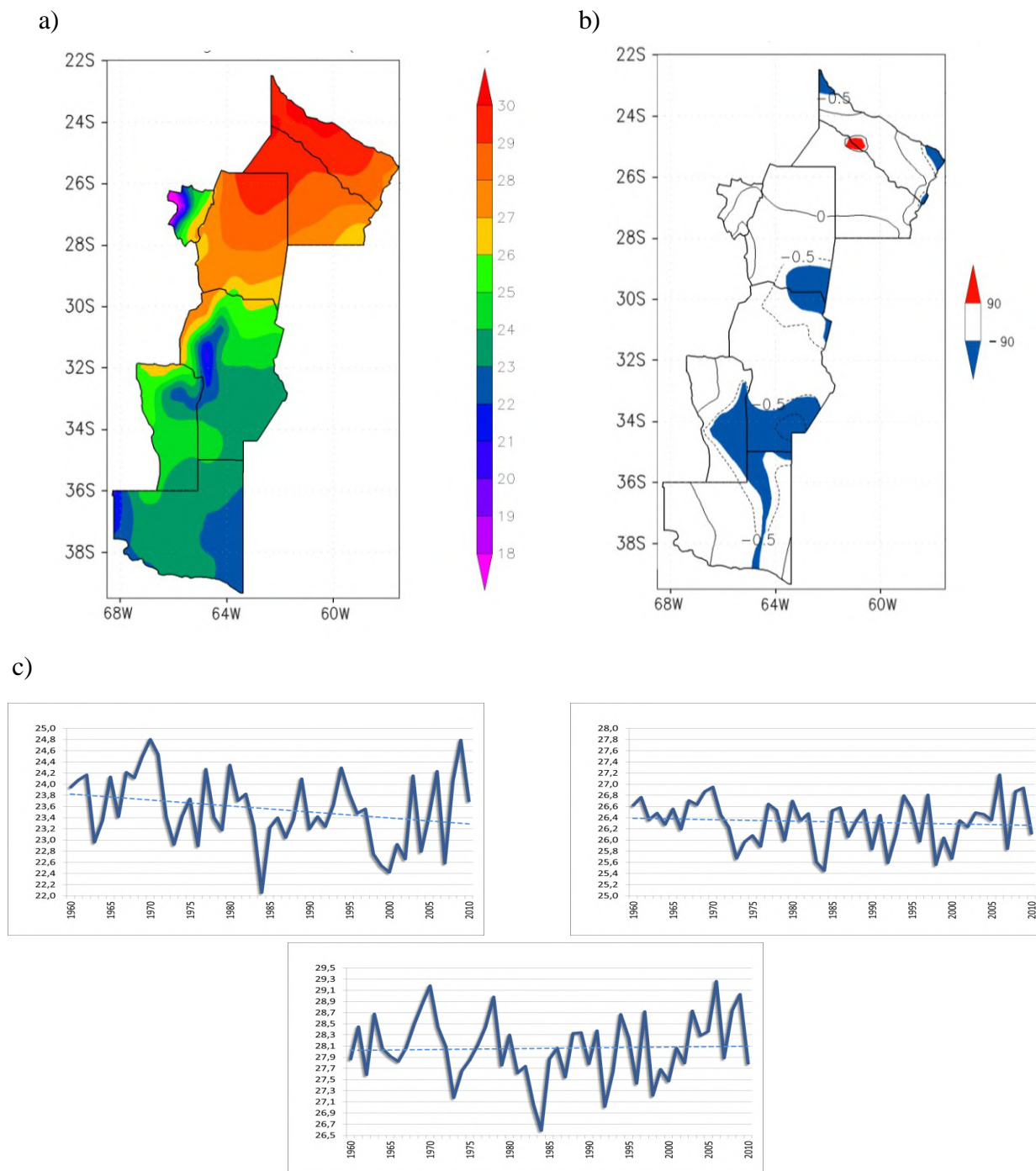
**Tabla 6.2.1.2:** Valores medios y cambios de la temperatura mínima media para la región Centro y para 3 subregiones (°C). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

La temperatura media máxima ha disminuido significativamente en -0,5°C al norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero, y en -1°C al norte de la provincia de La Pampa, sur de Córdoba y este de San Luis entre 1960 y el 2010, Figura 6.2.1.3b, Figura 6.2.1.3c y Tabla 6.2.1.3. A lo largo del año, la mayor disminución ocurre en la subregión Centro sur en verano y otoño, con cambios de -1,1°C y -0,9°C, respectivamente.

|                      |        | <b>TEMPERATURA MAXIMA 1960-2010</b> |       |      |      |       |
|----------------------|--------|-------------------------------------|-------|------|------|-------|
|                      |        | DEF                                 | MAM   | JJA  | SON  | ANUAL |
| <b>CENTRO SUR</b>    | Medio  | 30,6                                | 23,0  | 16,2 | 24,4 | 23,6  |
|                      | Cambio | -1,1**                              | -0,9* | -0,3 | 0,2  | -0,5* |
| <b>CENTRO MEDIO</b>  | Medio  | 31,7                                | 25,9  | 20,7 | 26,9 | 26,3  |
|                      | Cambio | -0,4                                | -0,1  | -0,1 | 0,3  | -0,1  |
| <b>CENTRO NORTE</b>  | Medio  | 33,3                                | 27,3  | 22,7 | 29,0 | 28,1  |
|                      | Cambio | -0,4                                | 0,2   | 0,1  | 0,3  | 0,1   |
| <b>REGION CENTRO</b> | Medio  | 32,2                                | 25,8  | 20,5 | 27,3 | 26,5  |
|                      | Cambio | -0,6*                               | -0,3  | -0,1 | 0,3  | -0,1  |

**Tabla 6.2.1.3:** Valores medios y cambios de la temperatura máxima media para la región Centro y para 3 subregiones (°C). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%





**Figura 6.2.1.3:** Ídem Figura 6.2.1.1, pero para la temperatura máxima media anual ( $^{\circ}\text{C}$ )

Los resultados obtenidos para la temperatura mínima y temperatura máxima en la región son consistentes con lo que se encuentra publicado. Fernández-Long y otros (2012) analizaron la

evolución temporal de las temperaturas máximas y mínimas en distintas localidades de las provincias San Luis, Santiago del Estero, Córdoba y La Pampa en el periodo 1940-2007. Estos autores encontraron que regionalmente la temperatura máxima presenta una disminución mientras que la temperatura mínima un aumento. Esta evolución temporal no es tan marcada cuando se analizan las series a partir de 1975. En este sentido, el trabajo de Barrucand y Rusticucci (2001) sobre la variabilidad de los valores medios de las temperaturas máximas y mínimas de verano e invierno de todas las estaciones meteorológicas disponibles en Argentina, mostró que en la mayoría de las estaciones ubicadas en la región Centro hubo una importante disminución de la frecuencia de temperaturas mínimas frías de verano desde fines de la década del 70, seguido posteriormente con un aumento de la frecuencia de temperaturas máximas cálidas en el invierno.

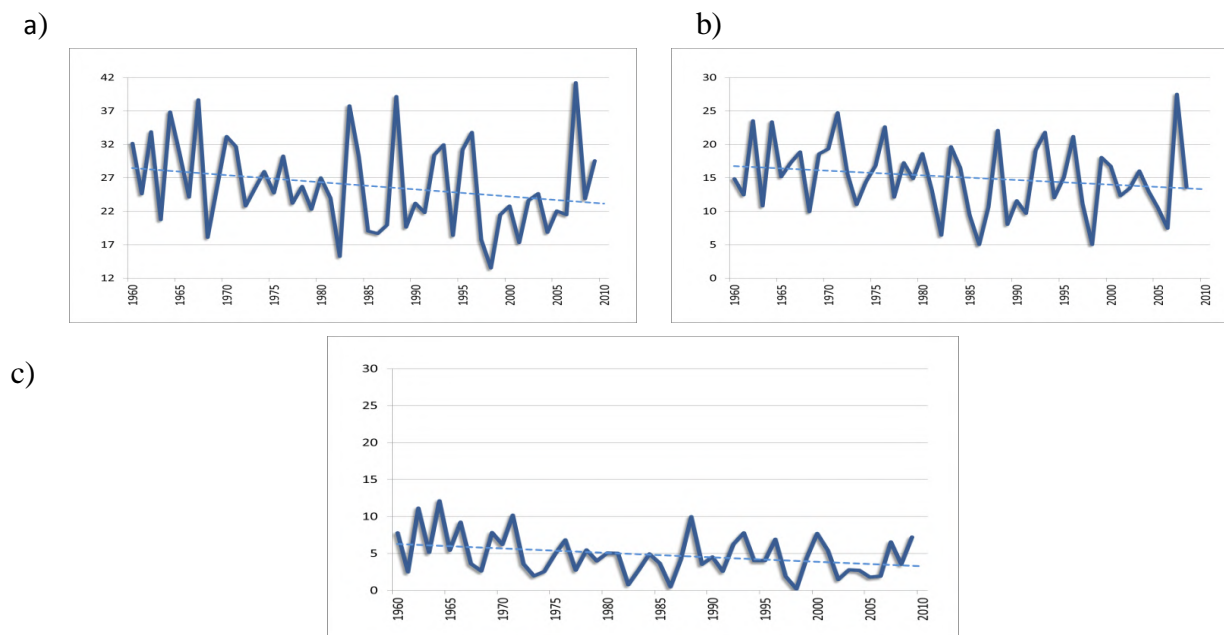
#### *Extremos térmicos*

**Los índices extremos térmicos muestran para toda la región Centro cambios importantes que revelan una disminución en los días con heladas, aumento de la cantidad de noches tropicales y de la temperatura mínima del año (confianza alta).** La cantidad de días con heladas ha disminuido significativamente en 4 días al año en toda la región, La cantidad de noches tropicales ha aumentado en 6 días al año para toda la región, y la temperatura mínima del año ha aumentado entre 1°C y 1,2°C.

Los índices extremos relacionados con la temperatura máxima diaria muestran, para la región Centro, cambios regionalmente heterogéneos. En cambio, un conjunto de estudios que se basaron en pocas estaciones meteorológicas son coincidentes en encontrar un aumento en las variables relacionadas con las temperaturas mínimas y una disminución en las relacionadas con las temperaturas máximas. Vincent y otros (2005) han utilizado 2 estaciones de referencia en la región de interés para este informe (Laboulaye y Santiago del Estero); para esas estaciones la cantidad de días con temperaturas mayores a 25°C disminuyó en 10 días en 41 años, al igual que el valor más alto de temperatura máxima en 1°C y sin embargo, el porcentaje de días con temperaturas menores al percentil 10 aumentó en un 5%. Vargas, y otros(2006) analizaron las tendencias de temperaturas diaria extremas de las estaciones Santa Rosa, Pilar (Córdoba) y San Miguel de Tucumán en el periodo 1960-2000; la temperatura mínima tuvo un incremento en el promedio anual mientras que la temperatura máxima registró un enfriamiento significativo en ese período. Rusticucci y Vargas (2001) analizaron las olas de calor y frío extremas en Las Lomitas, en el periodo 1959-96, observando que junto al aumento de la temperatura media también aumentó la longitud de la ola de calor, tanto en el verano como el invierno, mientras que un comportamiento inverso ocurrió con las olas frías.

Agosta y Barrucand (2012) analizaron la frecuencia de ocurrencia de noches cálidas (temperatura mínimas superiores al percentil 90) y noches frías (temperaturas mínimas inferiores al percentil 10) durante el invierno para una amplia área de Argentina en el período 1979-2008. En promedio para la región Centro, estos autores encontraron un aumento de 2 días en la frecuencia invernal de ocurrencia de noches cálidas para ese período, y una disminución de 1 día para la ocurrencia de noches frías.

El análisis muestra que en términos generales, la región Centro tuvo una disminución progresiva de la cantidad de días con heladas, Figura 2.2.4. La zona más al oeste de la región central es la que tuvo las disminuciones mayores y significativas. Esto es en el oeste de Tucumán (alta montaña) con 24 días con heladas menos en el año, y en el oeste de la provincia de La Pampa y la totalidad de San Luis con entre 14 a 17 días menos, Figura 2.2.4, Figura 6.2.1.4 y Tabla 6.2.1.4.

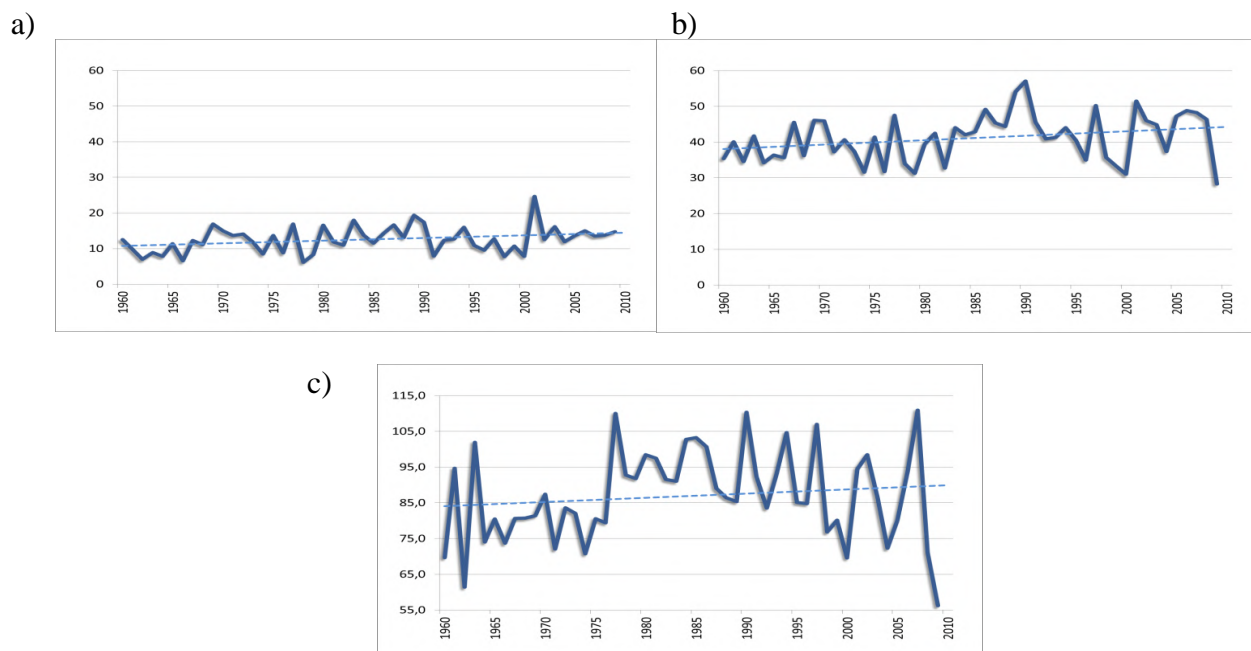


**Figura 6.2.1.4:** Promedio regional y su tendencia lineal del número de días con heladas en el año (FD), en tres subregiones: a) Centro sur; b) Centro medio; c) Centro norte

|                         | CENTRO SUR    | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE  | CENTRO       |
|-------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Cambio 1960-2010</b> | <b>- 5 **</b> | <b>-4</b>    | <b>- 3 **</b> | <b>-4 **</b> |

**Tabla 6.2.1.4:** Cambio del número de días con heladas al año en las subregiones Centro sur, Centro medio y Centro norte de la región Centro. Valores de cambio significativo: \* al 90% de confianza, \*\* al 95% de confianza

Con respecto al cambio en el número anual de noches tropicales hubo un aumento al este del meridiano 65° W, siendo significativo en prácticamente toda la región central, Figura 2.2.5. Al analizar el comportamiento de las tres subregiones, las series temporales que se muestran en la Figura 6.2.1.5 denotan el aumento progresivo del número de las noches tropicales, siendo significativo en las subregiones Centro sur y Centro medio, Tabla 6.2.1.5.



**Figura 6.2.1.5:** Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el número de noches tropicales, definida como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20 °C (TR)

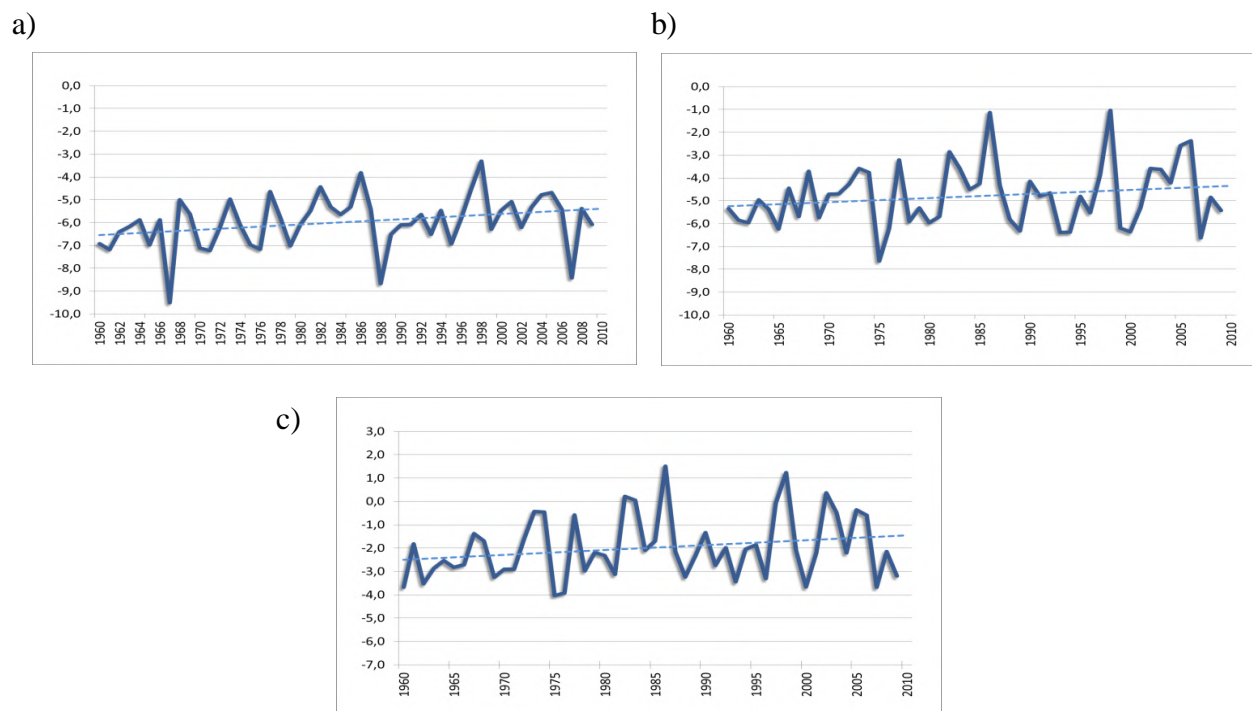
|                         | CENTRO SUR  | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE | CENTRO   |
|-------------------------|-------------|--------------|--------------|----------|
| <b>Cambio 1960-2010</b> | <b>4 **</b> | <b>6*</b>    | <b>6</b>     | <b>6</b> |

**Tabla 6.2.1.5:** Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para el número de noches tropicales al año, definida como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20 °C (TR)

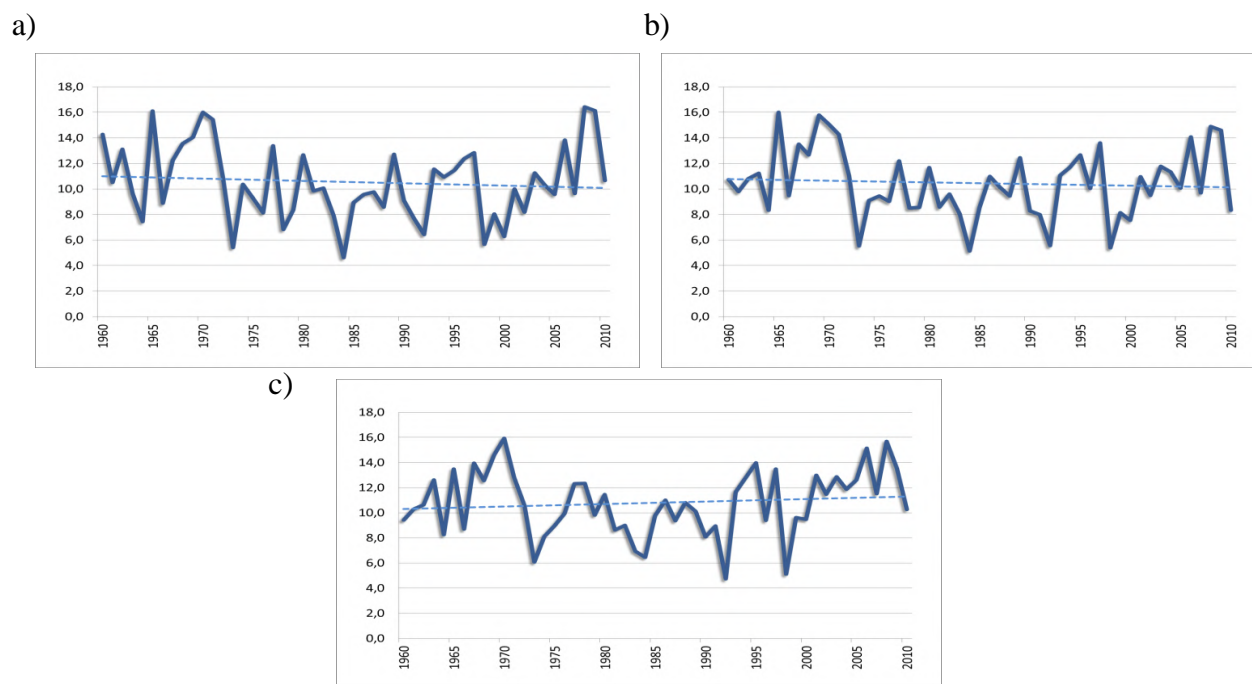
En el período 1960-2010, el valor mínimo de la temperatura diaria mínima del año aumentó en toda la región central, entre 1°C a 3°C según la provincia, Figura 2.2.6, y en forma significativa en la subregión Centro sur, siendo su aumento de 1,2° C, Tabla 6.2.1.6.

|                         | CENTRO SUR   | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE | CENTRO   |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| <b>Cambio 1960-2010</b> | <b>1,2**</b> | <b>0,9</b>   | <b>1,1</b>   | <b>1</b> |

**Tabla 6.2.1.6:** Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para el valor mínimo de la temperatura diaria mínima en el año (TNn)



**Figura 6.2.1.6:** Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el valor mínimo de la temperatura diaria mínima en el año (TNn)



**Figura 6.2.1.7:** Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima (TXx)

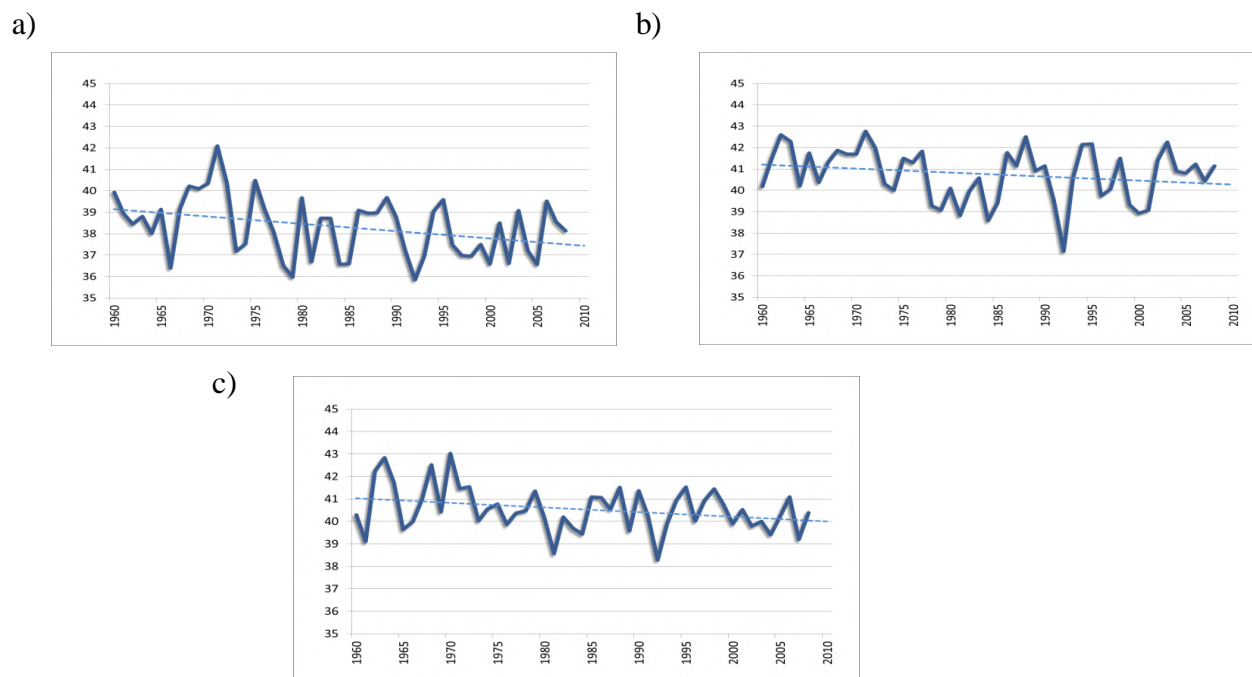


La evolución temporal de la temperatura máxima anual en cada una de las subregiones varía según la subregión, con alguna tendencia positiva solo en la región Centro norte, Figura 6.2.1.7 y Tabla 6.2.1.7.

|                             | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE | CENTRO |
|-----------------------------|------------|--------------|--------------|--------|
| <b>Cambio<br/>1960-2010</b> | -0,9       | -0,7         | 1            | 0,2    |

**Tabla 6.2.1.7:** Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima (TXx)

Al evaluar el cambio del porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90, de la Figura 2.2.8 se puede observar un comportamiento similar en toda la región con una marcada disminución, Figura. 6.2.1.8 y Tabla 6.2.1.8.

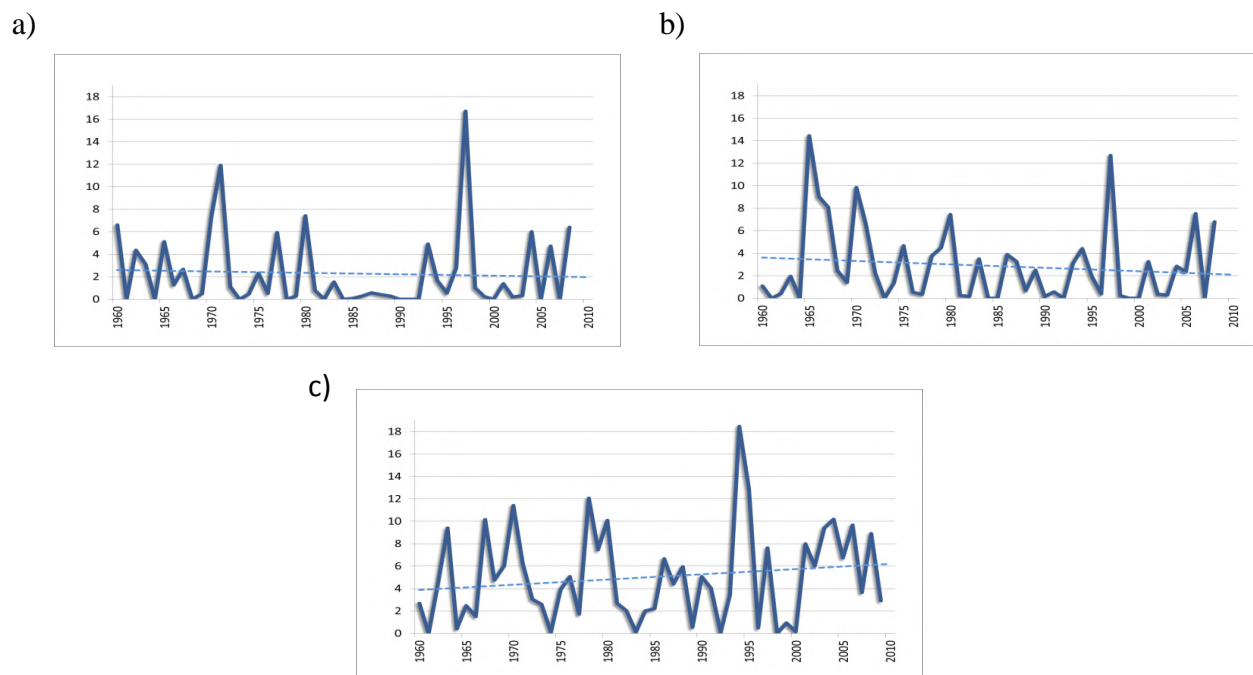


**Figura 6.2.1.8:** Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el número de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1960-2010 (TX90p)

|                             | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE | CENTRO |
|-----------------------------|------------|--------------|--------------|--------|
| <b>Cambio<br/>1960-2010</b> | -2**       | -1           | -1**         | -1**   |

**Tabla 6.2.1.8:** Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para el número de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 (TX90p) en el año

El índice de olas de calor tuvo un aumento en las provincias de Chaco y Formosa y una disminución en el resto de la Región Centro, sin ser ninguno significativo, Figura 2.2.9 y Tabla 6.2.1.9.



**Figura 6.2.1.9:** Ídem Figura 6.2.1.4, pero para la duración de olas de calor (WSDI).

|                             | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRO-NORTE | CENTRO |
|-----------------------------|------------|--------------|--------------|--------|
| <b>Cambio<br/>1960-2010</b> | -0,6       | -1,5         | 2,4          | 1      |

**Tabla 6.2.1.9:** Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para la duración de olas de calor definido como el número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el respectivo valor del percentil 90 (WSDI).

## 6.2 Precipitación

### *Precipitaciones medias*

Entre 1960 y 2010, en la región Centro ha habido aumentos significativos de la precipitación anual y en las estaciones de verano y otoño e invierno (confianza alta). La precipitación en esta región está intensamente afectada por variaciones en escalas de décadas (confianza media). Existe además gran heterogeneidad en las variaciones espaciales de estos cambios (confianza media).

Existen varios trabajos sobre los cambios y tendencias de la precipitación que abarcan la región Centro. Barros y otros (2000) describieron los cambios en la precipitación anual en la Argentina, identificando un desplazamiento de la isoyeta de 600mm hacia el oeste en 100 a 200 Km. en la mayor parte de la región Centro durante la segunda mitad del siglo XX, resultado del aumento de la lluvia hasta esa fecha (Haylock y otros 2006 y Alexander y otros 2006). Krepper y otros (1989) encontraron un incremento de la precipitación anual en la región sudoccidental pampeana, particularmente sobre la provincia de La Pampa entre 1947 y 1976.

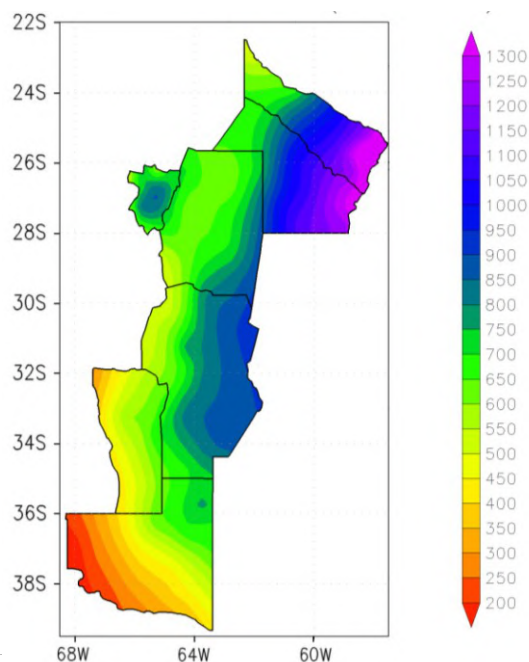
En cuanto a la estacionalidad, las tendencias positivas de las precipitaciones anuales en la segunda mitad del siglo XX, son resultado de las tendencias en el semestre cálido (de octubre a marzo) (Barros y otros 2008; Liebmann y otros 2004). En toda la región Centro hubo grandes variaciones en la escala de décadas, lo que concuerda con la literatura publicada. Entre esas variaciones se inscribe la reducción brusca hacia el final del periodo, Figura 6.2.2.1c y Tabla 6.2.2.1.

|                      |        | <b>PRECIPITACIÓN 1960-2010</b> |             |              |           |              |
|----------------------|--------|--------------------------------|-------------|--------------|-----------|--------------|
|                      |        | DEF                            | MAM         | JJA          | SON       | ANUAL        |
| <b>CENTRO SUR</b>    | Medio  | 242                            | 1671        | 52           | 186       | 647          |
|                      | Cambio | 47                             | <b>56**</b> | 0            | 10        | <b>114*-</b> |
| <b>CENTRO MEDIO</b>  | Medio  | 322                            | 173         | 31           | 170       | 695          |
|                      | Cambio | 12                             | 28          | <b>-21**</b> | -25       | - 6          |
| <b>CENTRO NORTE</b>  | Medio  | 385                            | 306         | 69           | 259       | 1016         |
|                      | Cambio | 49                             | 31          | -16          | 45        | <b>106</b>   |
| <b>REGION CENTRO</b> | Medio  | 332                            | 232         | 53           | 215       | 830          |
|                      | Cambio | 37                             | 36          | -14          | <b>15</b> | 74           |

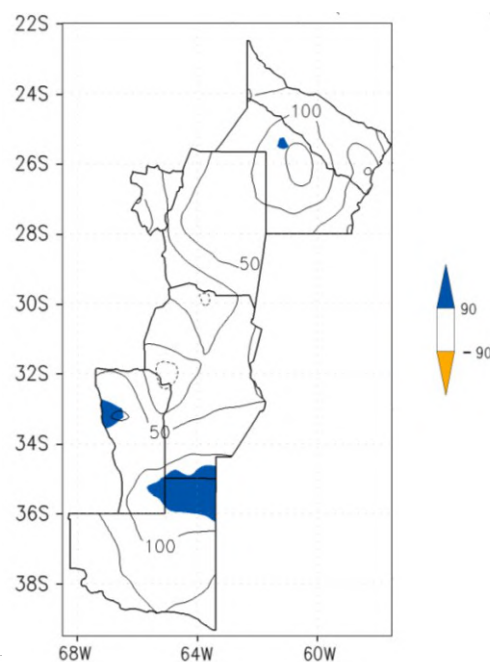
**Tabla 6.2.2.1:** Valores promedios regionales y cambio de la precipitación total anual (mm) en las subregiones Centro sur, Centro medio y Centro norte de la región Centro. Valores de cambio significativo: \* al 90% de confianza, \*\* al 95% de confianza

El incremento anual de la precipitación en la región oeste de Argentina se produjo como un ‘salto’ o discontinuidad a partir de la década del 70 (Minetti y Vargas 1997; Agosta 2013; Agosta y Compagnucci 2012; Figuras. 6.2.2.c). En cambio, en el sudoeste de la región Centro (San Luis y el oeste de La Pampa) a partir de la década de 1970 se inició un aumento sostenido de precipitación estival con un significativo incremento de alrededor del 24% en la media regional, Agosta y otros (1999), Compagnucci y otros (2002). Por otra parte, Penalba y Vargas (2004, 2008) identificaron una variabilidad década en las precipitaciones anuales en la provincia de Córdoba y San Luis superpuesta a una tendencia lineal entre 1960 y 2000.

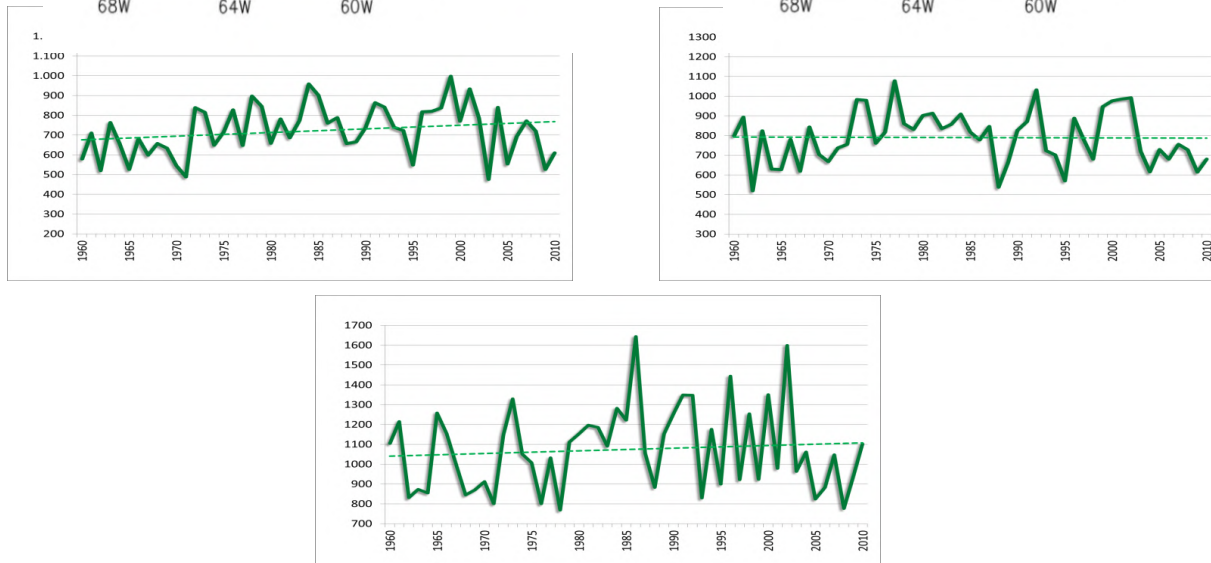
a)



b)



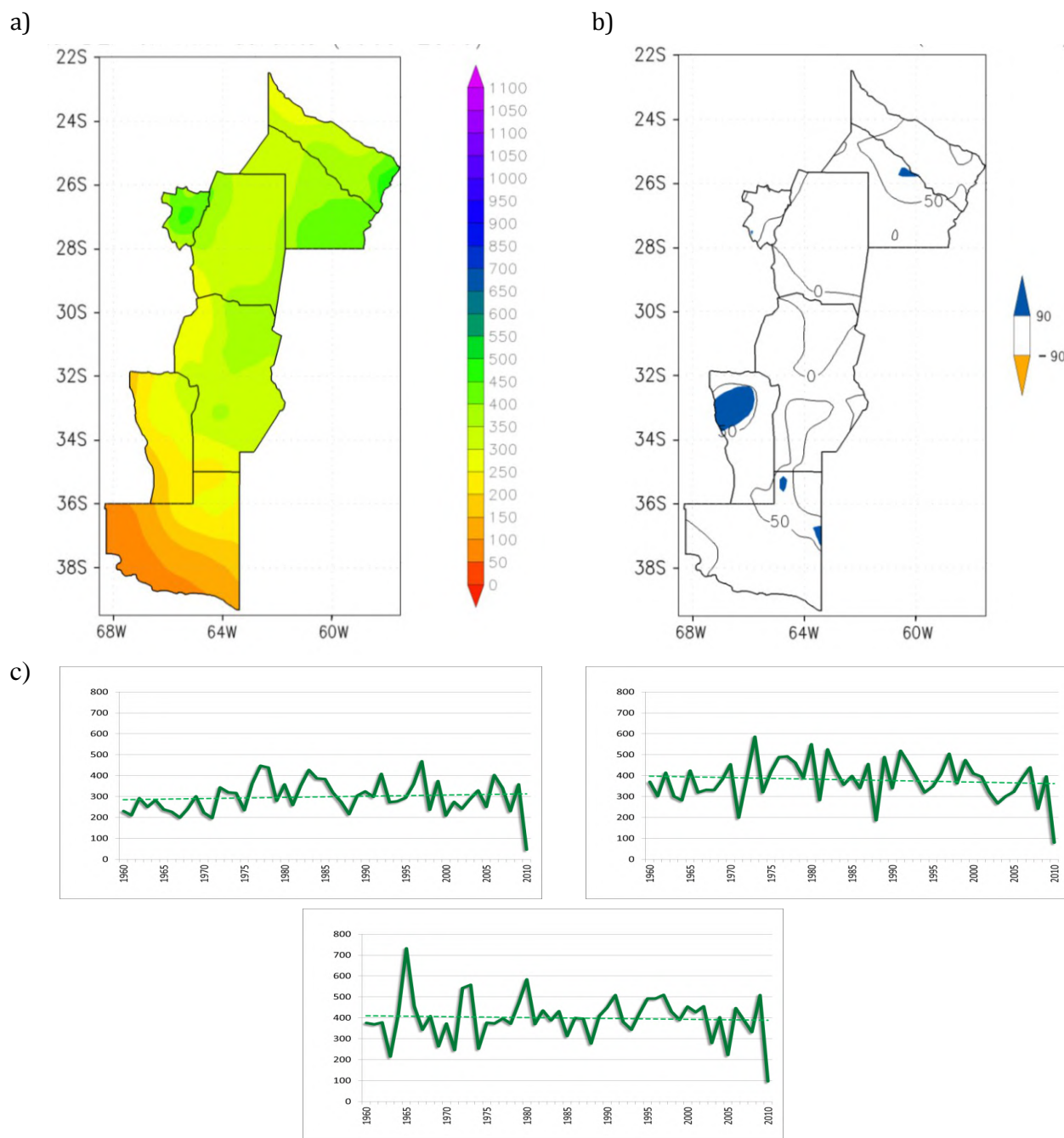
c)



**Figura 6.2.2.1:** a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960/2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, c) promedios regionales de precipitación anual para las tres subregiones: panel superior izquierdo Centro sur, panel superior derecho, Centro medio y panel inferior, Centro norte

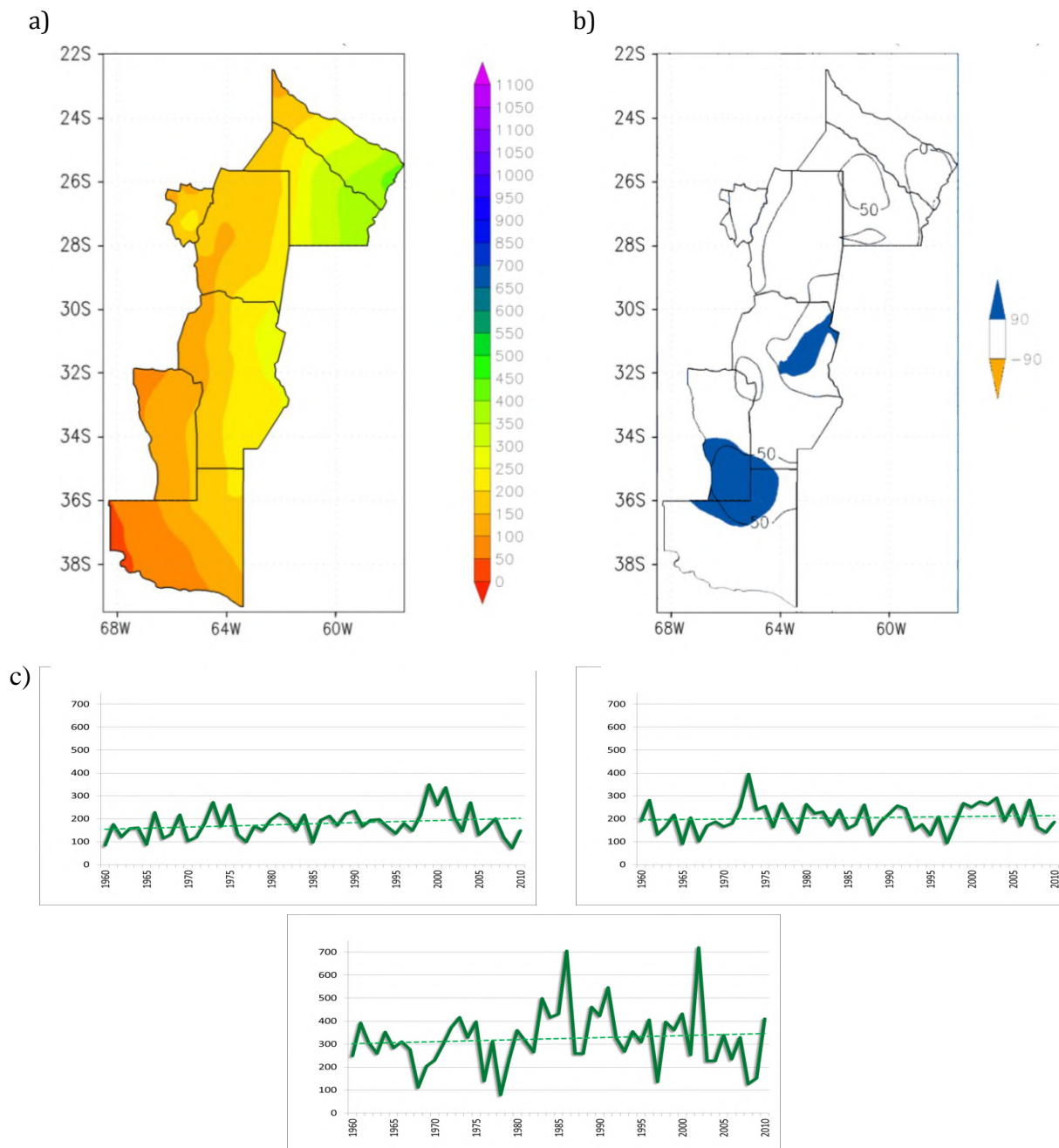
Entre 1960 y 2010, la precipitación total anual en la Región Centro aumentó en promedio alrededor de 70mm. Sin embargo, este aumento fue heterogéneo dependiendo de la zona: 100mm en el centro de la provincia del Chaco; 100mm y significativo en el norte de La Pampa y al centro

oeste de San Luis, pero con una reducción en la zona límite entre la provincia de Córdoba y Santiago del Estero, Figuras. 6.2.2.1b y 6.2.2.1c y Tabla 6.2.2.1.



**Figura 6.2.2.2:** Ídem Figura 6.2.2.1, pero para el verano

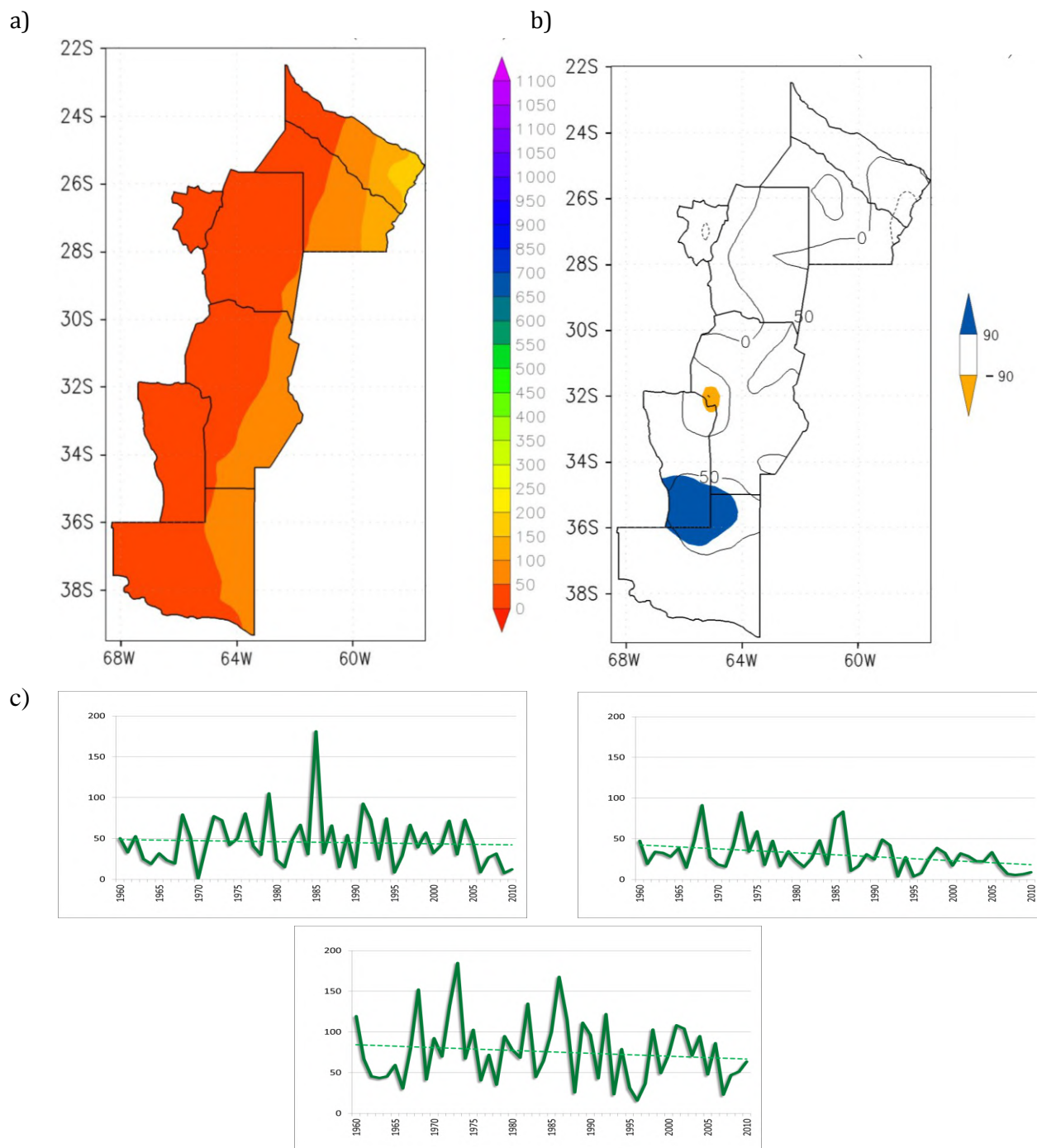




**Figura 6.2.2.3:** Ídem Figura 6.2.2.1, pero para el otoño

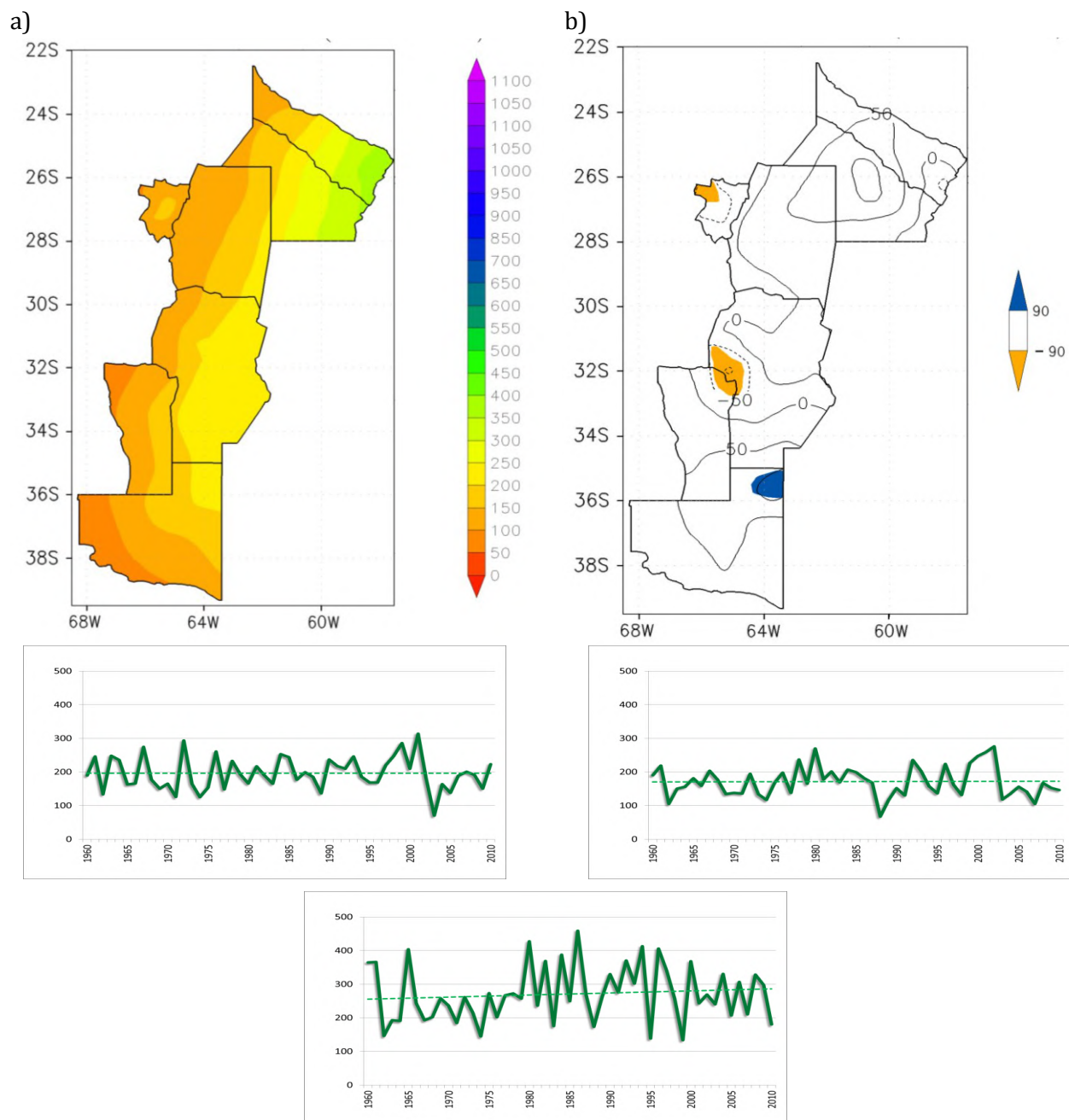
La precipitación estacional del verano, en el período 1960-2010, aumentó al sur del paralelo 32°S, Figura 6.2.2.2b y Tabla 6.2.2.1. La única zona en donde el cambio fue significativo es en el noroeste de San Luis, Figura 6.2.2.2b.

La precipitación en otoño aumentó significativamente más de 50 mm en la región centro sur, Tabla 6.2.2.1. En el resto de las subregiones la precipitación también aumentó dando como resultado un aumento generalizado de más de 30mm en promedio en toda la región Centro.



**Figura 6.2.2.4:** Ídem 6.2.2.1, pero para el invierno

Entre 1960 y 2010, la precipitación invernal tuvo un aumento significativo en el sur de San Luis y norte de La Pampa y una disminución en el resto de la región Centro Figura 6.2.2.4b, Tabla 6.2.2.1, 6.2.2.4c.



**Figura 6.2.2.5:** Ídem Figura 6.2.2.1, pero para la primavera

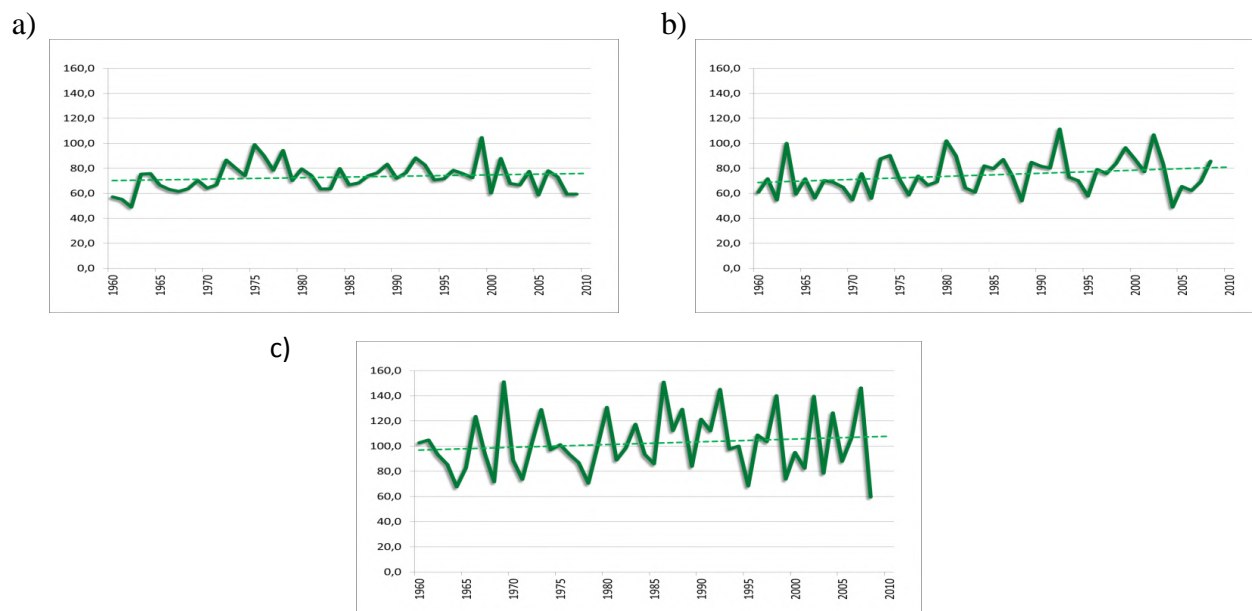
### *Precipitaciones extremas*

**Los extremos de precipitación diaria, su intensidad y la frecuencia de su ocurrencia presentan tendencias positivas, superpuestas a variabilidad decadal y están acompañados por una disminución en la cantidad de días sin lluvias al año (confianza alta).**

Debido a su impacto en las regiones afectadas, el estudio de la variabilidad de los extremos de precipitación diaria, inundaciones y sequías, ha sido abordado por varios investigadores en la última década. Naumann y otros (2012) observaron aumentos significativos de precipitación extrema en la primavera, para La Pampa, San Luis, Chaco y Formosa. Este aumento también ocurrió en el total anual de precipitación con lluvias diarias superiores al percentil 95 y en la cantidad anual de días con lluvias mayores a 10 mm de precipitación diaria. (Penalba y Robledo 2010) y en los días con precipitación superior a 50 y 150mm (Re y Barros 2009). Para un período hasta una fecha más reciente, 1969-2006, la distribución estadística de la precipitación estacional en la provincia de La Pampa se modificó con menores frecuencias debajo de la media y una ligera mayor frecuencia en los extremos más altos (Russián y otros 2010).

Consistentemente, estos aumentos estuvieron acompañados por una tendencia negativa en la cantidad de meses secos en el periodo 1901-2010 (Minetti y otros 2010) y por el número anual de días secos hasta el 2000, año en el cual la tendencia se revertió por una posible variabilidad interdecadal (Rivera y otros 2013).

La precipitación diaria máxima del año ( $Rx1_{day}$ ) aumentó significativamente entre 1960 y 2010 en las tres subregiones Figura 2.3.1, Figura 6.2.2.6 y Tabla 6.2.2.6.

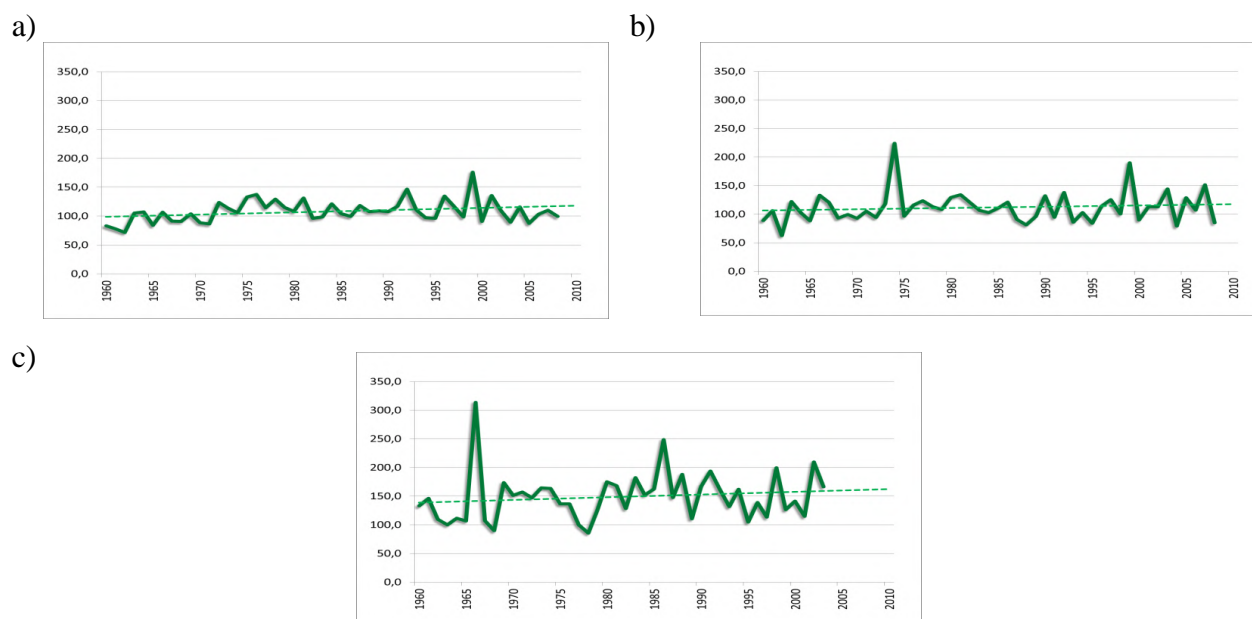


**Figura 6.2.2.6:** Promedio de la precipitación diaria máxima del año ( $Rx1$ ) en tres subregiones: a) Centro sur; b) Centro medio; c) Centro norte

|                 | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRO NORTE | CENTRO |
|-----------------|------------|--------------|--------------|--------|
| <b>PROMEDIO</b> | 73         | 75           | 102          | 88     |
| <b>CAMBIO</b>   | 6          | 13*          | 11           | 12     |

**Tabla 6.2.2.6:** Valores promedios regionales y cambio de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) en las subregiones Centro sur, Centro medio y Centro norte de la región Centro. Valores de cambio significativo: \* al 90% de confianza y \*\* al 95% de confianza

La precipitación máxima anual durante 5 días consecutivos (Rx5day) aumentó en las tres subregiones, Figura 6.2.2.7, y con significancia estadística en la subregión Centro sur. Tabla 6.2.2.7.



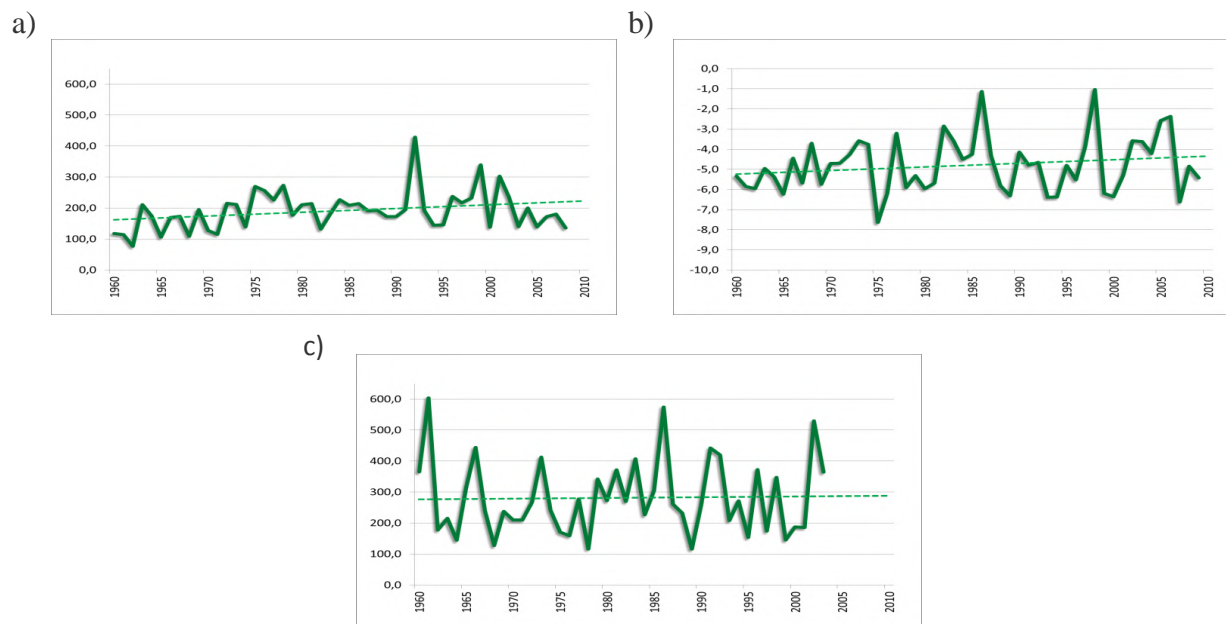
**Figura 6.2.2.7:** Ídem Figura 6.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5)

|                 | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRO NORTE | CENTRO |
|-----------------|------------|--------------|--------------|--------|
| <b>PROMEDIO</b> | 108        | 112          | 149          | 131    |
| <b>CAMBIO</b>   | 19**       | 11           | 24           | 20     |

**Tabla 6.2.2.7:** Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para la precipitación diaria máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) en el año



La región Centro tuvo un aumento de 44mm en la precipitación anual de los días en que la precipitación superó el percentil 95 (R95pTOT), siendo significativo el cambio en la región Centro sur, Tabla 6.2.2.8. Hubo aumentos significativos en la región del norte de La Pampa, noroeste de San Luis y el sur de Córdoba, Figura 2.3.4.

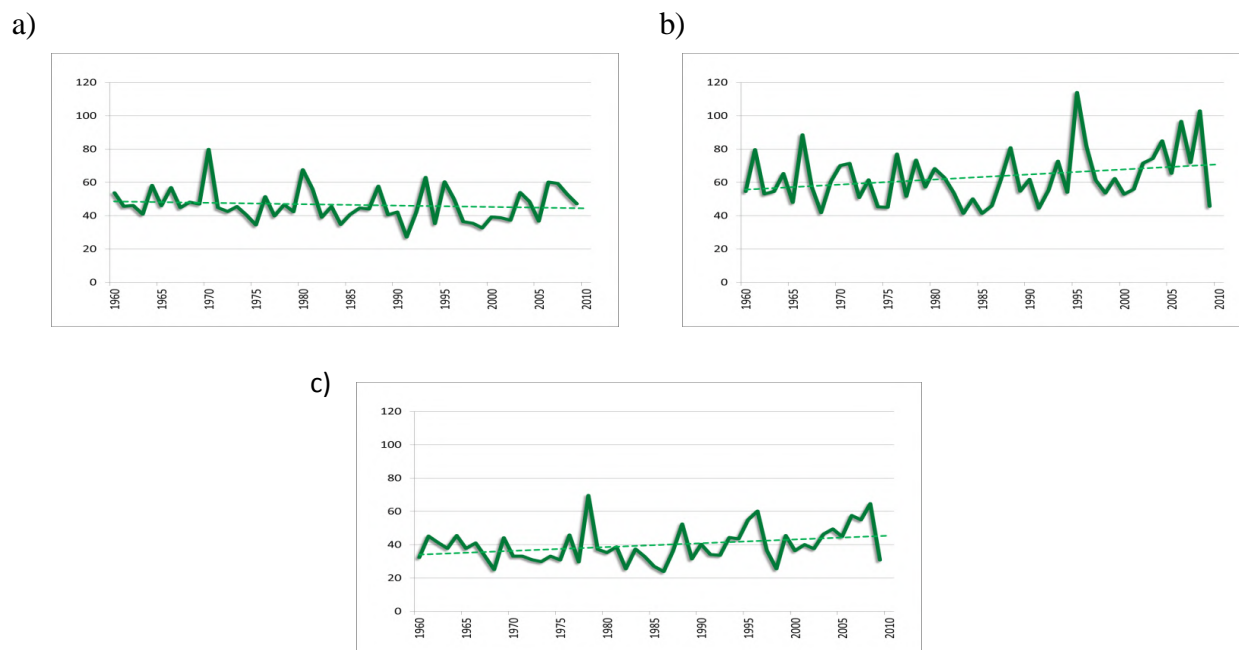


**Figura 6.2.2.8:** Ídem Figura 6.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT)

|                 | CENTRO SUR  | CENTRO MEDIO | CENTRO NORTE | CENTRO |
|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------|
| <b>PROMEDIO</b> | 191         | 191          | 282          | 239    |
| <b>CAMBIO</b>   | <b>63**</b> | 33           | 12           | 44     |

**Tabla 6.2.2.8:** Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT)

Entre 1960 y 2010, la longitud máxima de días consecutivos con precipitaciones menores a 1 mm (CDD) tuvo un aumento significativo generalizado en la región Centro (14 días), Tabla 6.2.2.9. Este comportamiento regional es el resultado de aumentos significativos en las subregiones Centro norte y Centro medio, pero en la región Centro sur hubo una disminución de las secuencias secas extremas, Figura 6.2.2.9 y Tabla 6.2.2.9.

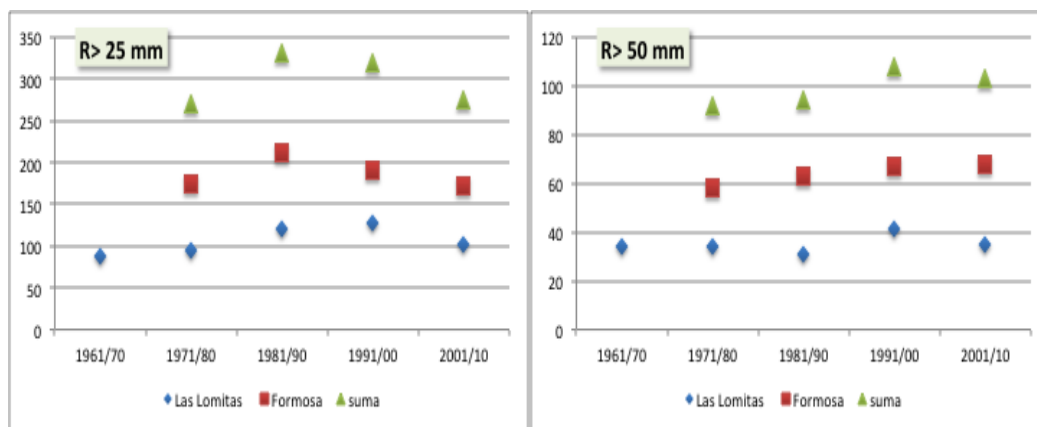


**Figura 6.2.2.9:** Ídem Figura 6.2.6, pero para el máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año, (CDD)

|                 | CENTRO SUR | CENTRO MEDIO | CENTRONORTE | CENTRO |
|-----------------|------------|--------------|-------------|--------|
| <b>PROMEDIO</b> | 47         | 63           | 40          | 51     |
| <b>CAMBIO</b>   | -4         | 16*          | 12**        | 14**   |

**Tabla 6.2.2.9:** Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para el máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD)

Dado que la región es semiárida, las precipitaciones extremas son muy poco frecuentes a menos que se consideren como tales a las que superan umbrales muy modestos. Por ello, se adoptaron dos umbrales, 25mm y 50mm. Para llevar a cabo este análisis se utilizaron dos estaciones del norte de la región Centro, que contaban con datos diarios: Las Lomitas (1960-2010) y Formosa (1963-2010). Para la estación Formosa, el análisis se llevó a cabo a partir de la década 1971. La Figura 6.2.2.10 y Tabla 6.2.2.10 muestran la evolución decadal del número de casos con precipitaciones diarias por encima de los umbrales fijos en períodos de 10 años y una serie que muestra el número de casos total de estas series que superan dichos umbrales. Aunque en forma heterogénea, esos datos limitados indican que hubo una tendencia hacia más frecuentes precipitaciones extremas dependiendo del umbral analizado, como fue encontrado también por Re y Barros (2009).



**Figura 6.2.2.10:** Cantidad de días con lluvias superiores a 3 umbrales distintos: 25 mm, 50 mm y 100mm, en dos estaciones: a) Las Lomitas; b) Formosa, para distintas décadas

|           | Las Lomitas | Las Lomitas |           | Formosa | Formosa |
|-----------|-------------|-------------|-----------|---------|---------|
| 1961-2010 | 25 mm       | 50 mm       | 1971-2010 | 25 mm   | 50 mm   |
| Promedio  | 106         | 35          | Promedio  | 188     | 64      |
| Cambio    | 30*         | 4.5         | Cambio    | -10     | 13*     |

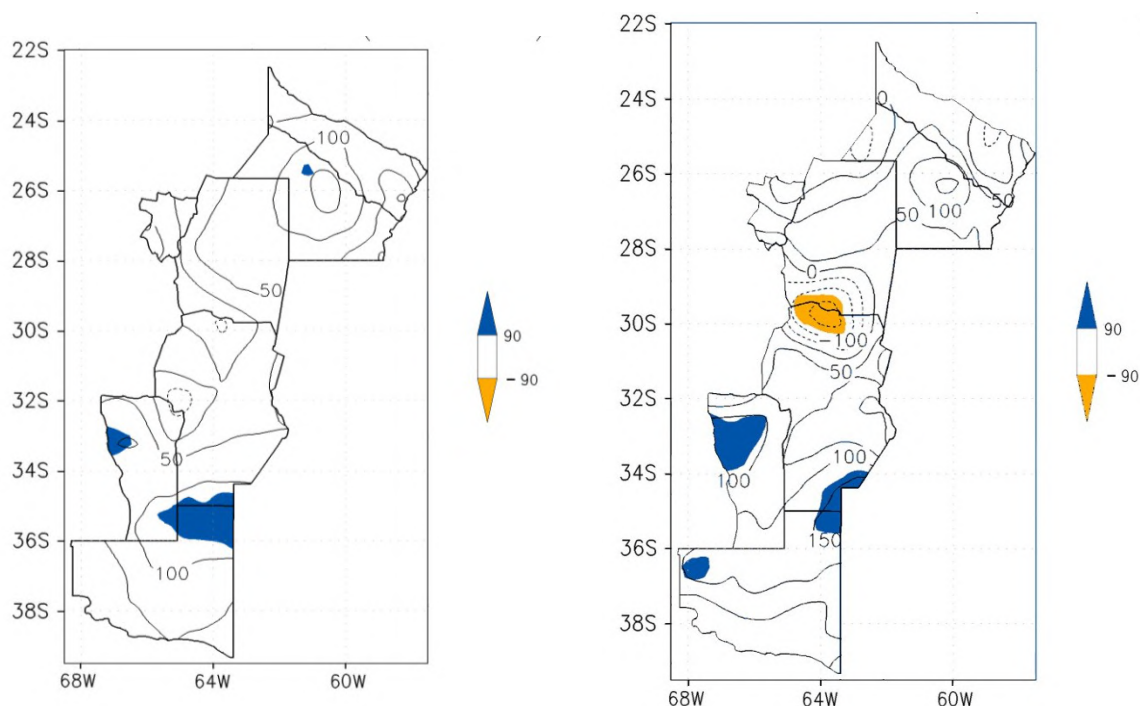
**Tabla 6.2.2.9:** Valores promedios y cambio de la cantidad de días por décadas con precipitación superior a los umbrales 25mm y 50 mm en Las Lomitas y Formosa en la subregión Centro norte. Valores de cambio significativo: \* al 90% de confianza, \*\* al 95% de confianza

### Grado de incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados

Las series de precipitación de la región que cubren el periodo 1960-2010 o gran parte del mismo son escasas. Ello hace que las estimaciones regionales o subregionales puedan tener algún grado de error. Una forma de estimar el grado de error posible es comparando tendencias calculadas con dos bases distintas que tienen algunas diferencias en las estaciones que utilizan. Lo que sigue es la comparación del cambio de la precipitación anual según las bases GPCC y CRU (1960-2010).

Ambas bases son coherentes en el signo de los cambios. Las amplitudes aparecen más pronunciadas (mayores valores de las anomalías) en la base GPCC. El cambio positivo (aumento de precipitación) en la subregión Centro-sur es altamente consistente pues aparece con similar extensión espacial en ambas bases, aunque con intensidad distinta. El cambio negativo (disminución de la precipitación) en la subregión Centro-medio, que es manifiestamente significativo para la base GPCC no lo es para la base CRU en la cual incluso disminuye notoriamente su extensión espacial y su amplitud por lo que sobre este cambio en esa zona hay

baja confianza. Para el resto del campo de cambio, ambas bases coinciden bastante por lo que se tiene alta confianza sobre las conclusiones sobre estos cambios.



**Figura 6.2.2.11:** cambio en la precipitación media anual, entre 1960 y 2010 en mm. A la izquierda calculada con datos de la base CRU y a la derecha con datos de la base GPCC. Significancia en colores según lo indicado por la escala de la derecha

### 6.2.3 Otras variables

La región Centro, principalmente en las provincias de Córdoba y La Pampa, es una de las regiones con las frecuencias más altas de granizo de Argentina. La evolución del número anual de eventos de granizo en esta región tuvo una tendencia negativa entre 1960 y 2008 (Mezher y otros 2012).

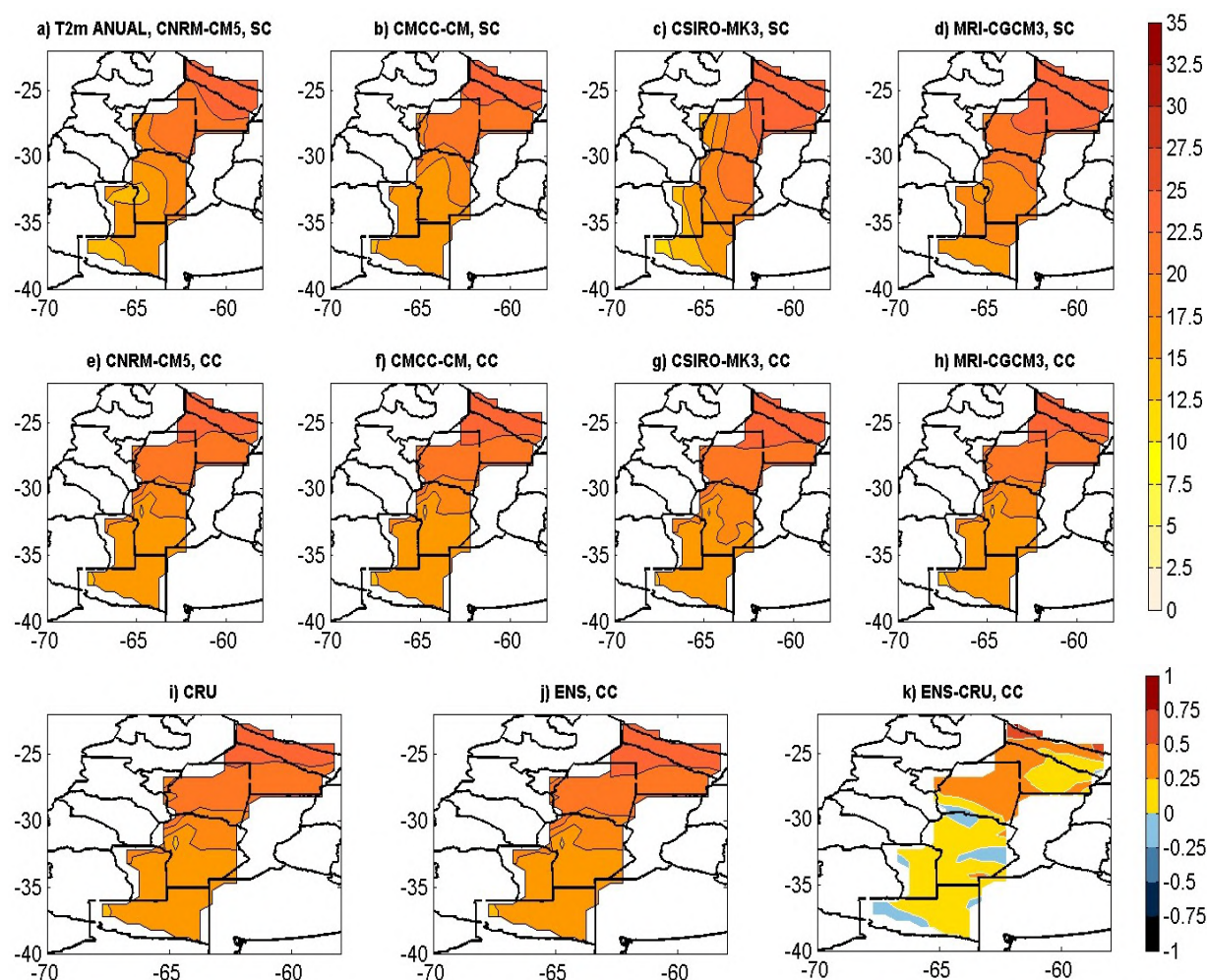
Agosta y Compagnucci (2008 2012) mostraron que en las décadas posteriores a la del 70, el viento en capas bajas con componente norte sobre Argentina subtropical se ha incrementado debido a cambios en la actividad del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, aportando mayor transporte de humedad y calor desde latitudes tropicales hacia el centro del país.

## 6.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN DE ERRORES

Se presenta la validación de la corrección de los errores sistemáticos de los modelos seleccionados que se usaron para las proyecciones climáticas del siglo XXI. La explicación de la metodología se describe en el capítulo 3, secciones 3.3.7 y 3.3.8.

### 6.3.1 Temperatura

Como en el caso de la región Húmeda, el ajuste de los modelos al campo observado es bueno en esta región, aún para los datos sin corregir, pero mejora con la corrección, Figura 7.3.1.



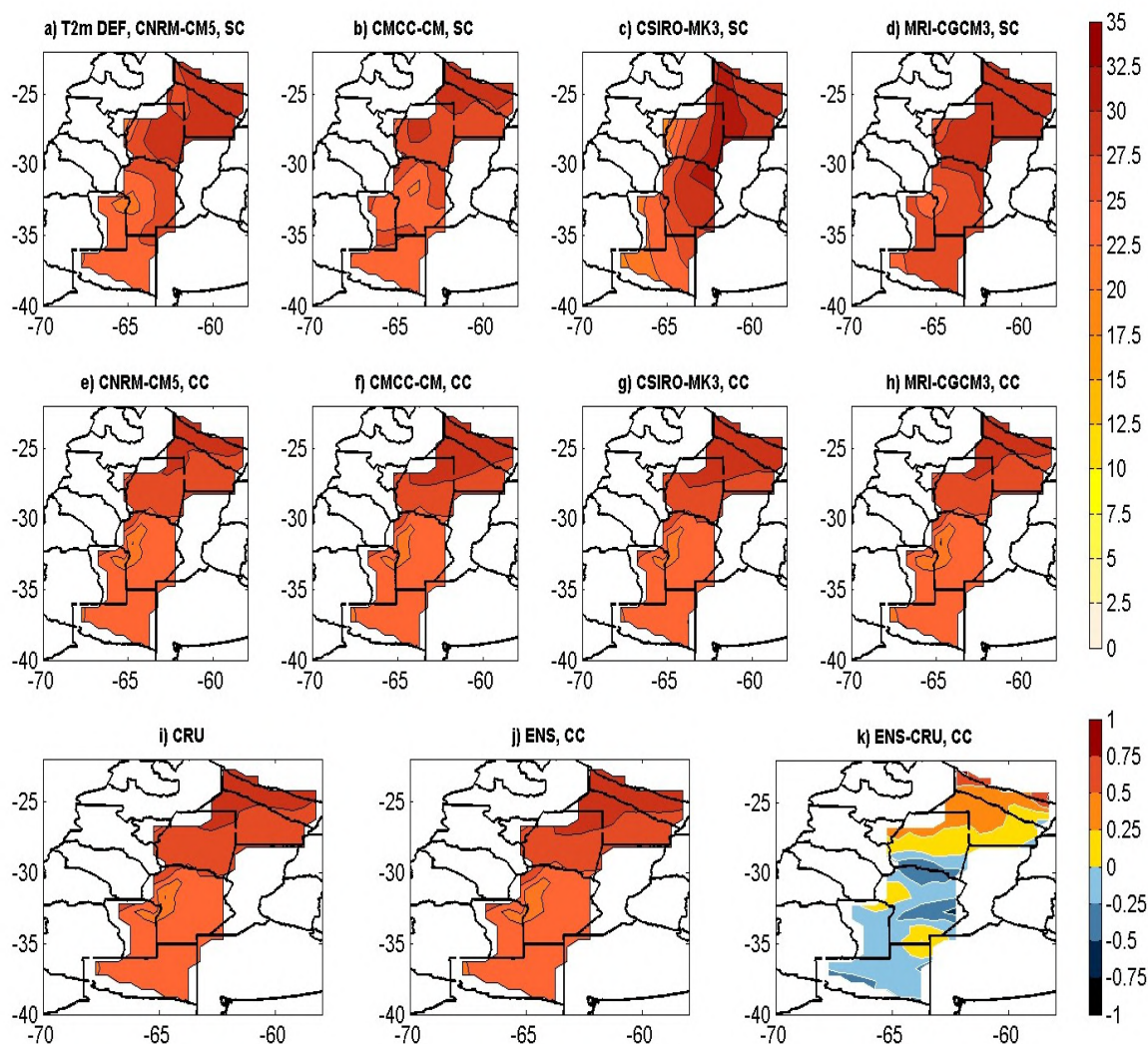
**Figura 6.3.1:** Validación de la temperatura media anual para la región Centro. 1976/1990. Panel superior: la temperatura de los modelos sin corregir. Panel del centro: ídem anterior, pero para los valores corregidos. Panel inferior, valores observados (CRU), ensemble de los 4 modelos y diferencia entre el ensemble y CRU

El promedio de los modelos corregidos tiene en la mayor parte de la región un error de menos de  $0,25^{\circ}\text{C}$  y solo en el norte, esto es en el oeste de Santiago del Estero, Formosa y Chaco es mayor a ese valor en amplias zonas, pero aún así, no mayor a medio grado.

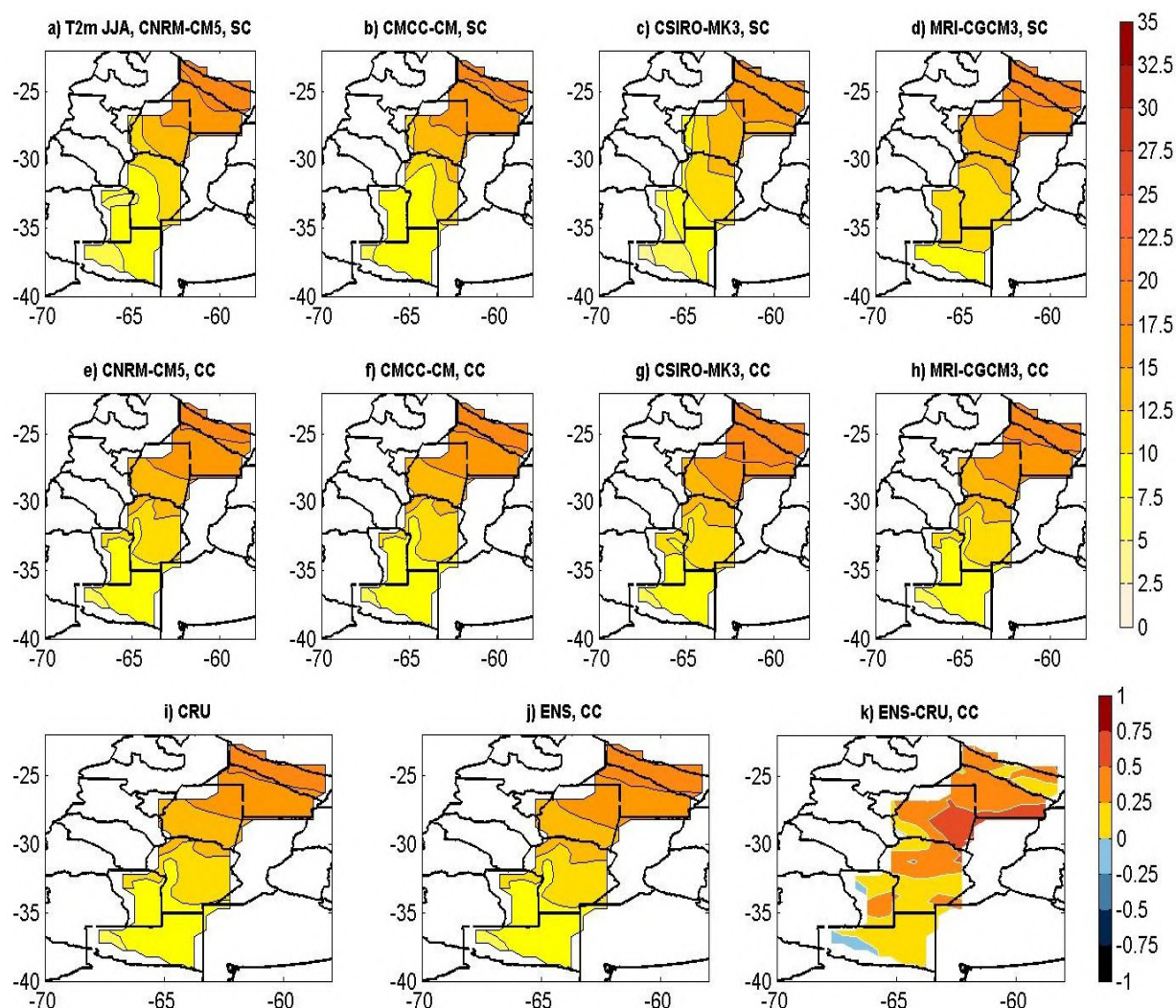
En el verano la situación es muy similar al caso anual, pero con mejoras importantes en el norte de la región en los modelos corregidos. Otra vez los errores son menores a  $0,25$  en el promedio de los modelos, siendo mayores, pero así por debajo de medio grado en el noroeste de la región,



Figura 7.3.2. En el invierno, Figura 7.3.3, los errores son algo mayores que en el verano en el norte, pero en general por debajo de medio grado.

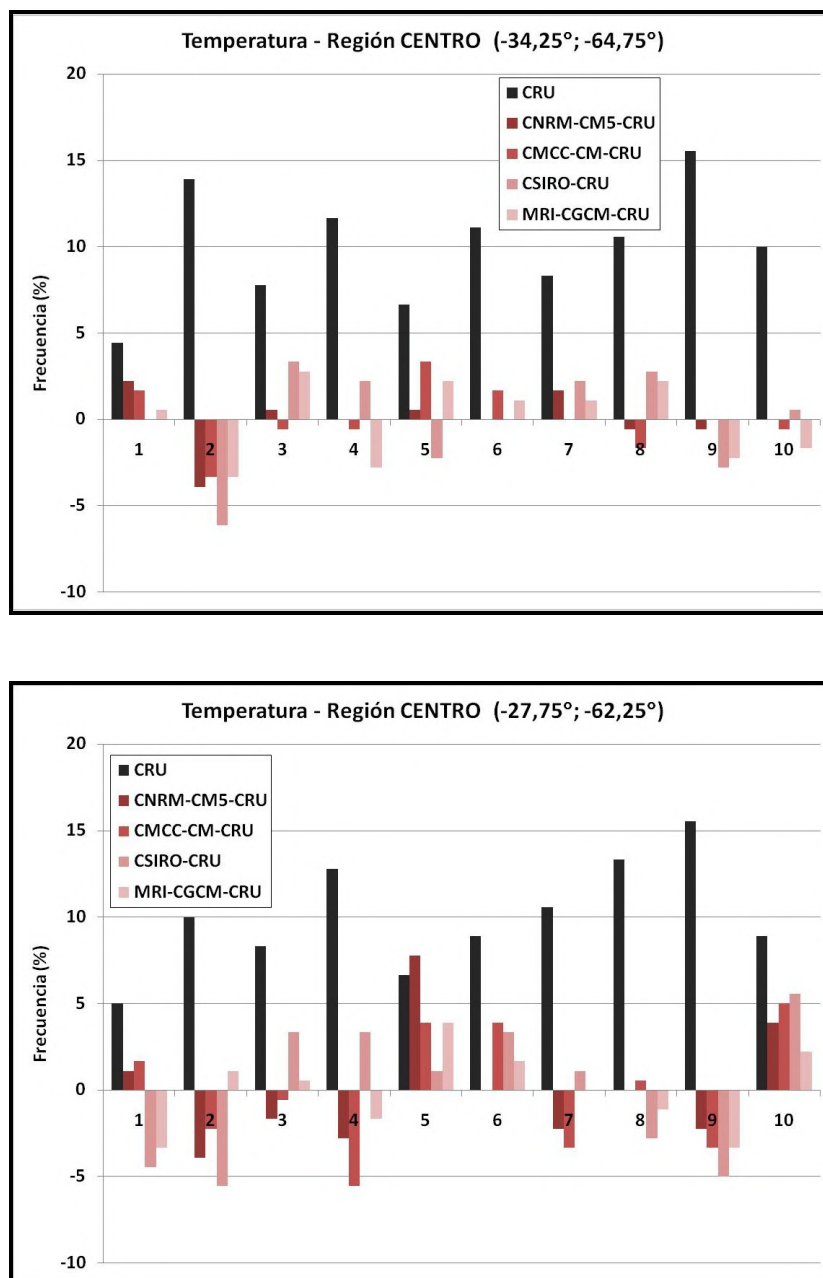


**Figura 6.3.2:** Ídem Figura 6.3.1, pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)



**Figura 6.3.3:** Ídem Figura 6.3.1, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

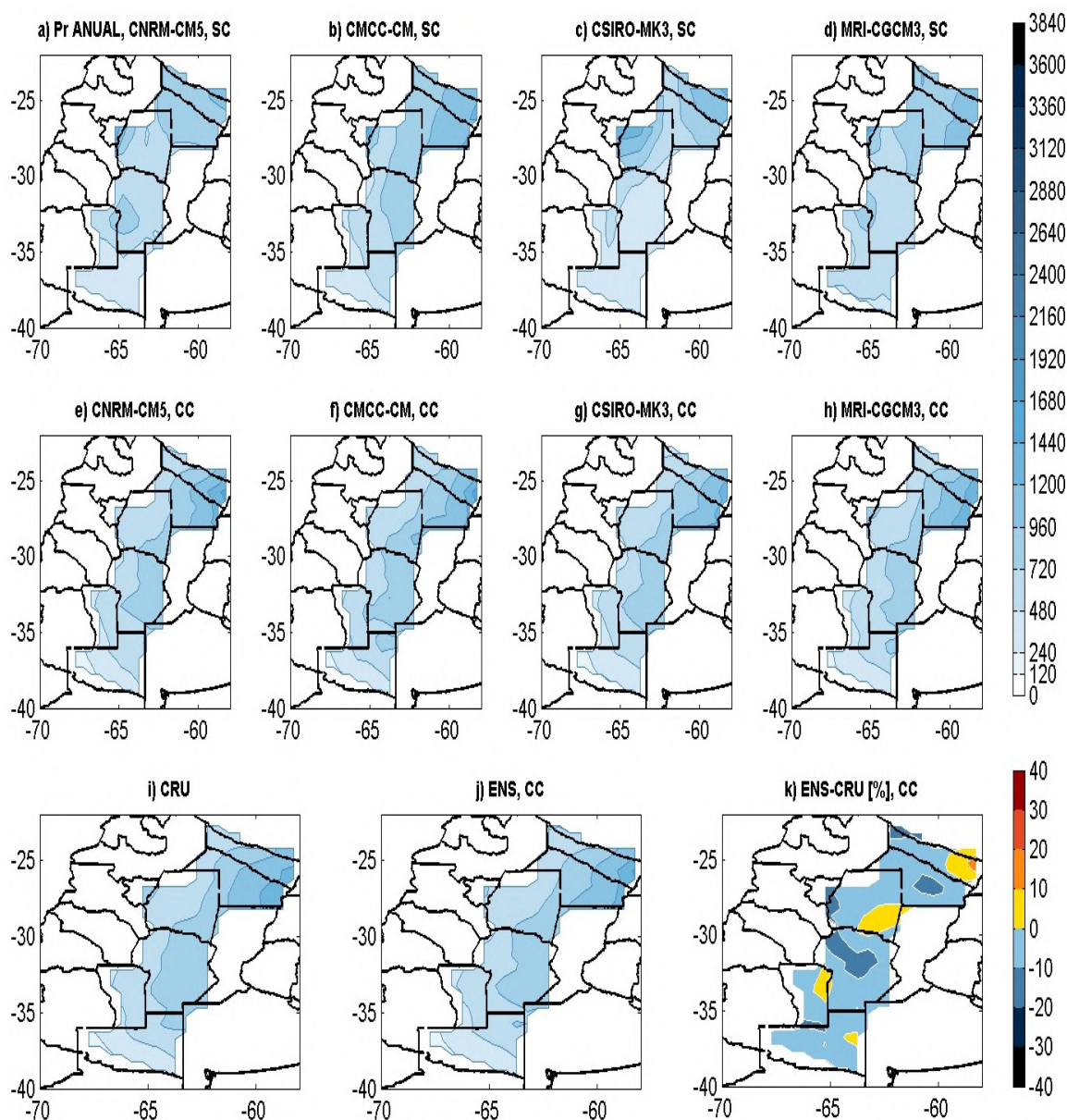
La Figura 6.3.4 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos representativos de la región. La distribución de temperatura mensual es también bimodal como en el caso de la región Húmeda. Los errores en la frecuencia de los modelos son, en general, bastante menores que las frecuencias observadas en los dos puntos y en casi todas las frecuencias. Muy interesante es el caso de las más altas temperaturas mensuales donde como en el caso de la región Este, estos resultados indican que las frecuencias de temperaturas extremas del futuro serían proyectadas con algún grado de certidumbre.



**Figura 6 3.4:** Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Centro. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales



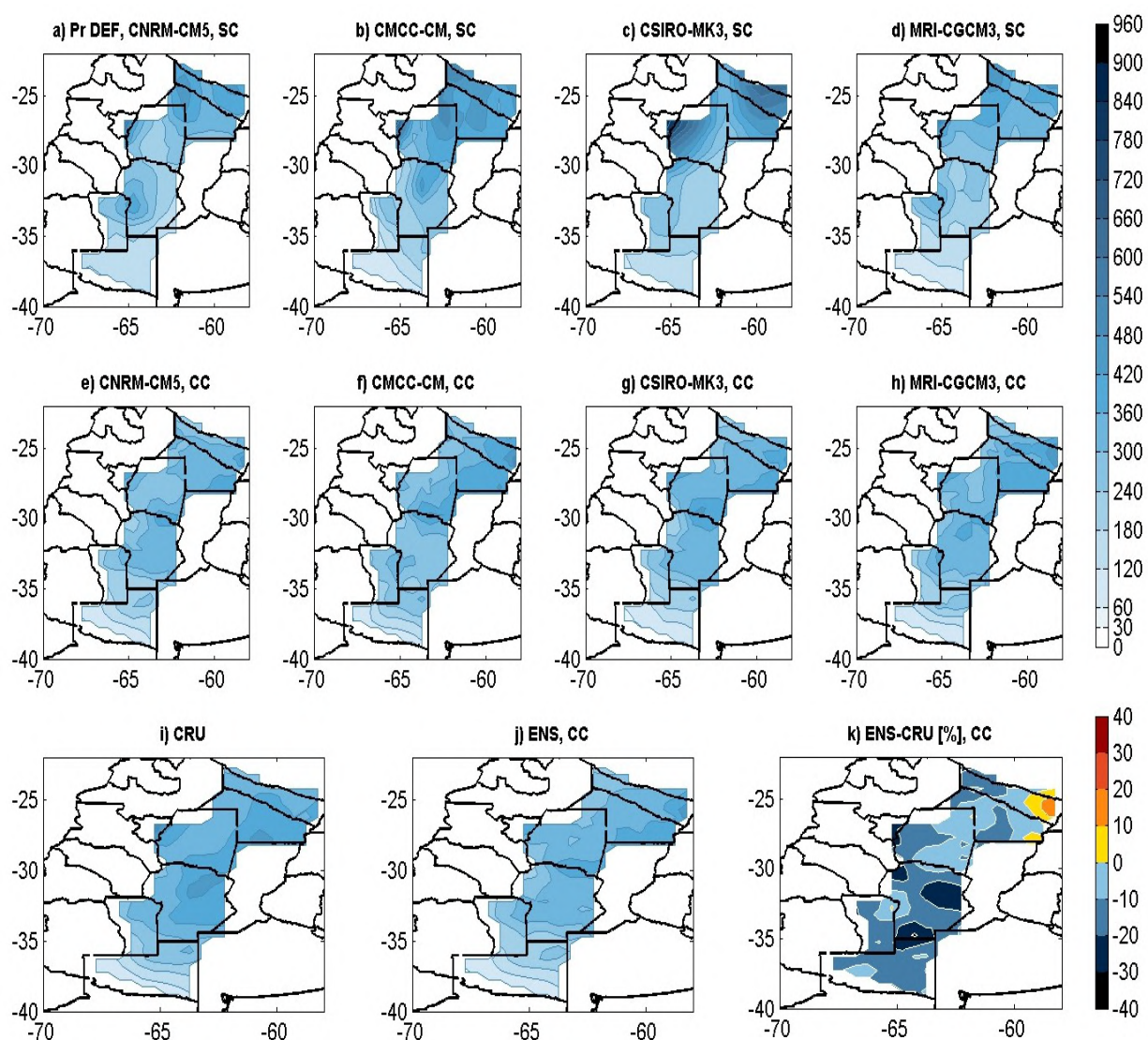
### 6.3.2 Precipitación



**Figura 6.3.5:** Ídem Figura 6.3.1, pero para la precipitación anual

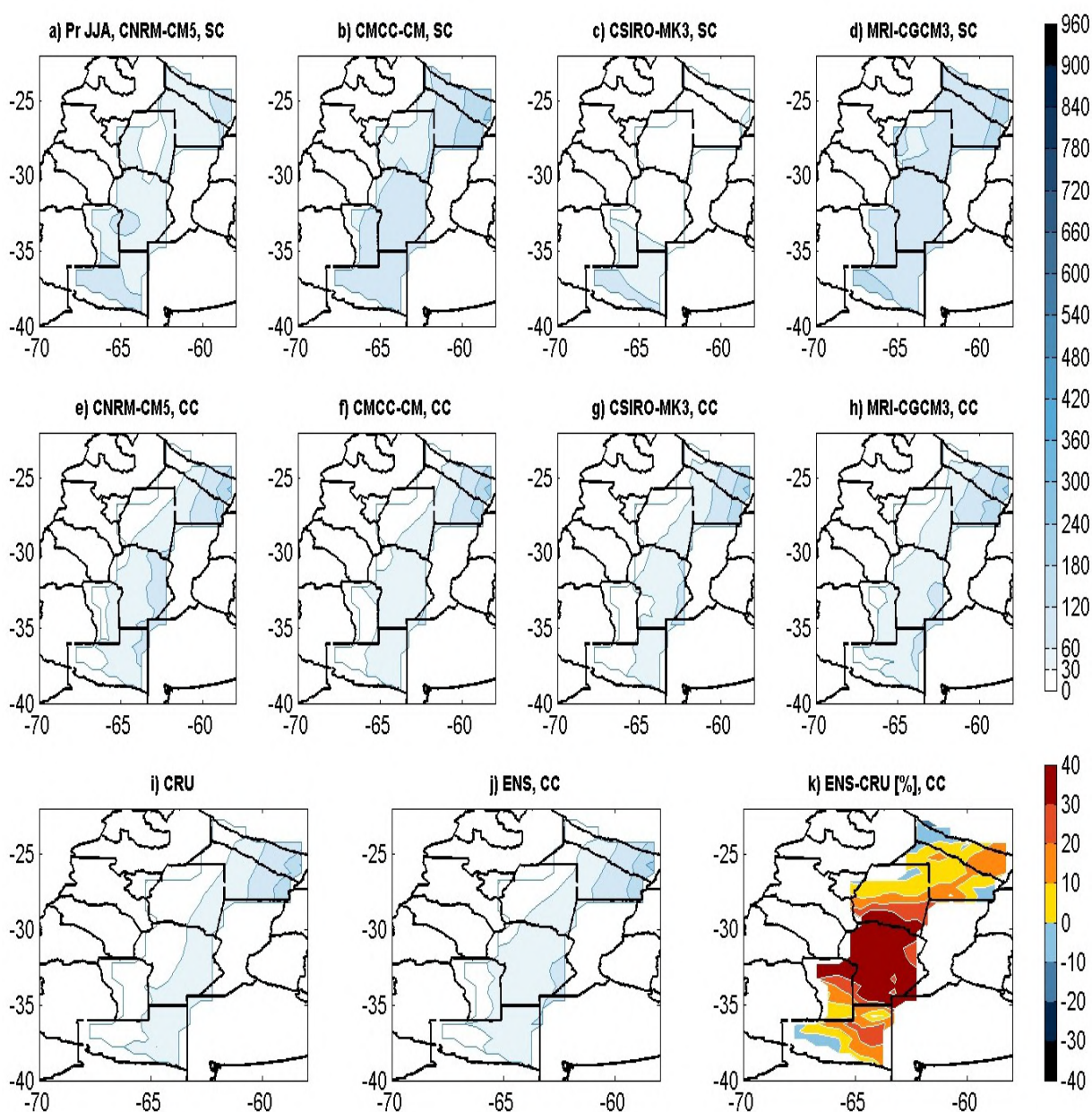
La precipitación anual corregida es sustancialmente más representativa del campo anual observado que la no corregida, Figura 6.3.5. El promedio de los modelos presenta diferencias en general menores al 10% con el campo CRU. Como esta zona es predominantemente semiárida,

Sin embargo el ajuste estacional es menor. En el caso del verano, hay zonas aisladas donde el error está entre el 20 y 30%, pero en general está por debajo del 20%, Figura 6.3.6. En invierno en la zona central, mayormente en la provincia de Córdoba, los errores relativos son sustancialmente mayores, de forma que para el promedio de los modelos corregidos llegan a estar entre 30 y 40% por encima del campo observado, Figura 6.3.7. Esta región es de precipitaciones con características monzónicas, donde el invierno es pronunciadamente seco, y excepto en el este de Chaco y Formosa sus precipitaciones medias no son mayores a 120 mm. Por lo tanto, los errores relativos como los que aparecen en el panel k de la Figura 6.3.7 representan valores poco importantes en valor absoluto.



**Figura 6.3.6:** Ídem Figura 6.3.5, pero para la precipitación de verano (diciembre, enero y febrero)

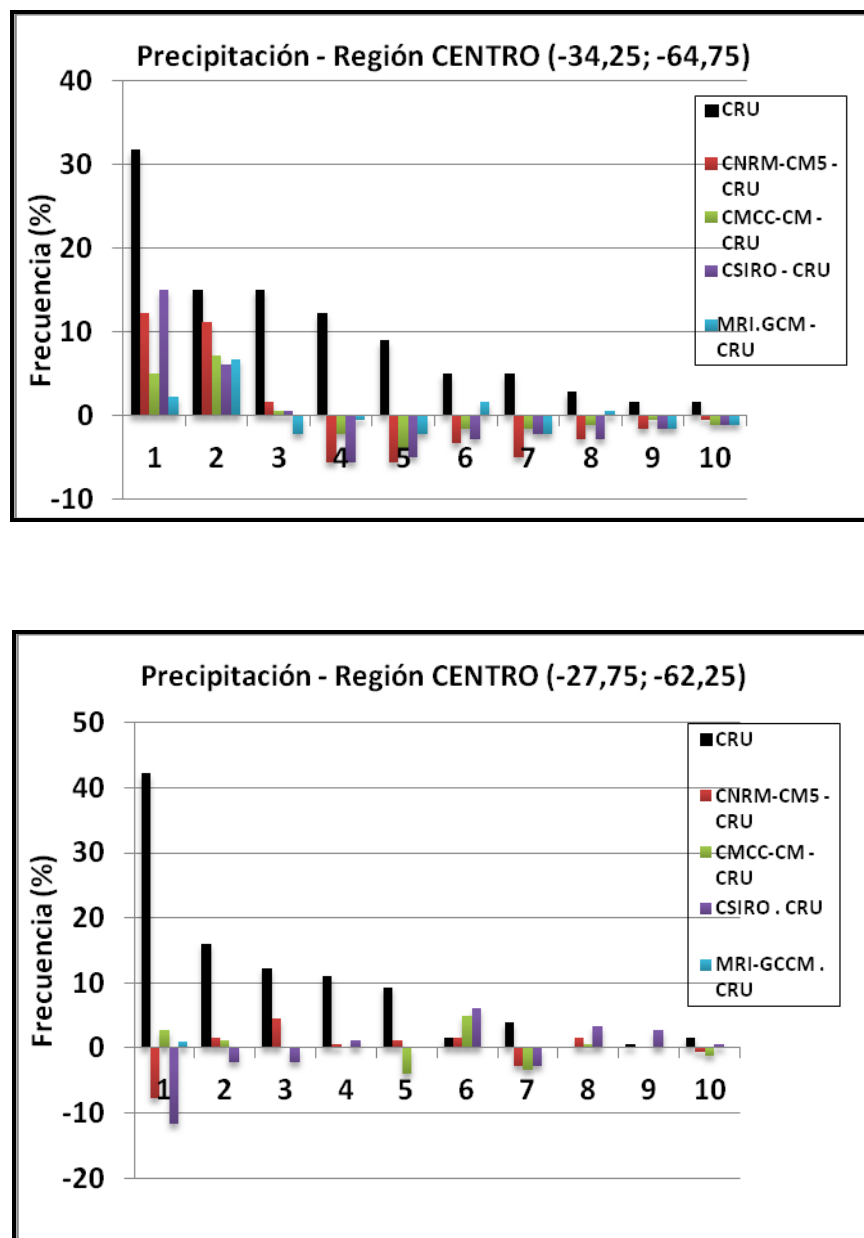




**Figura 6.3.7:** Ídem Figura 6.3.4, pero para la precipitación de invierno (junio, julio y agosto)

La Figura 6.3.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada según CRU en dos puntos representativos de la región Centro. La distribución de la precipitación mensual tiene la forma de una distribución Gama, típica de las regiones donde las lluvias muy escasas o nulas son muy frecuentes. Los errores en los valores extremos de la precipitación son iguales o mayores que la

frecuencia observada indicando la dificultad que existiría para captar la correcta frecuencia en las precipitaciones mensuales extremas en las proyecciones del clima futuro.



**Figura 6.3.8:** Ídem Figura 6.3.4, pero para la precipitación

## 6.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

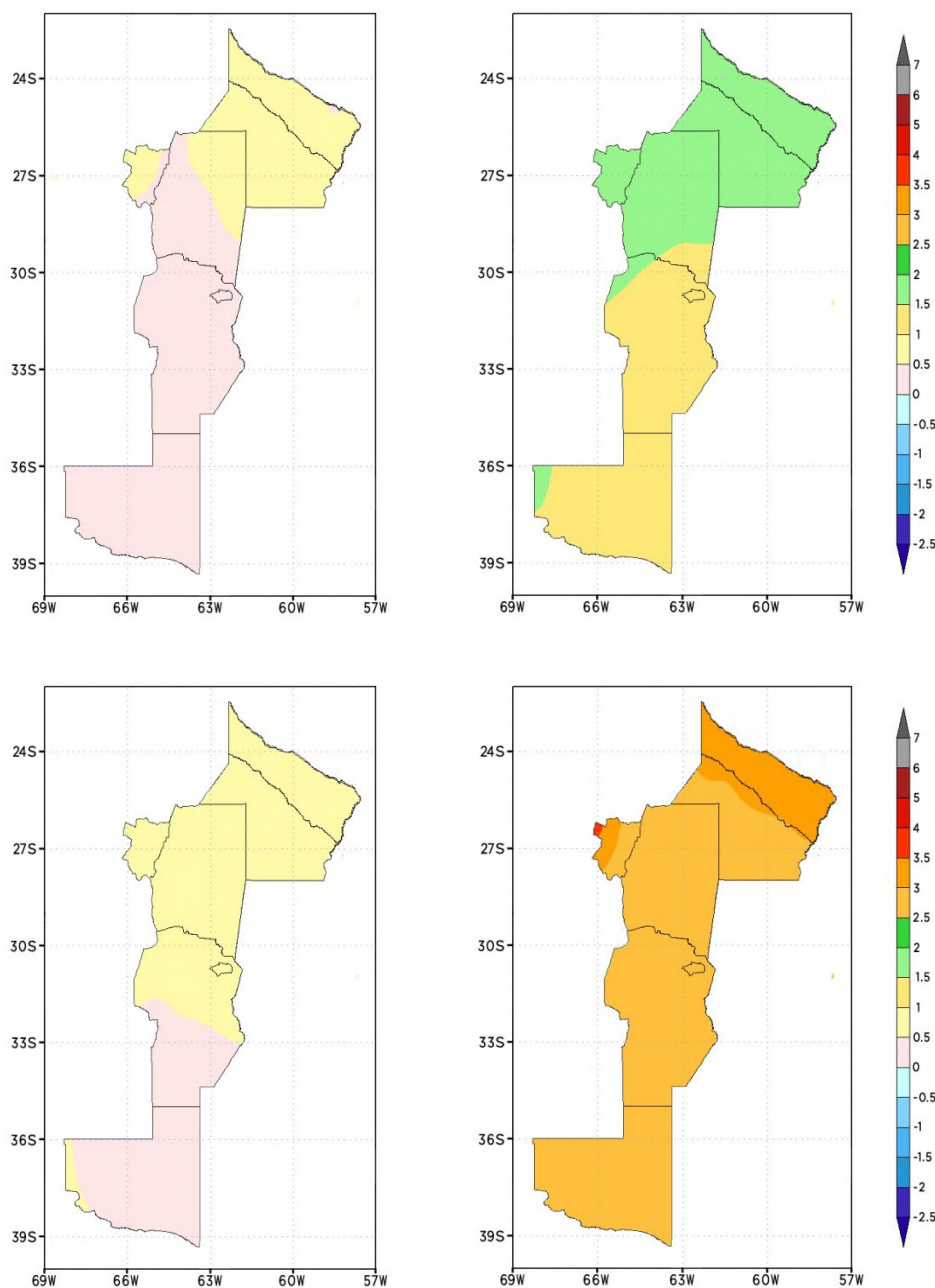
### 6.4.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

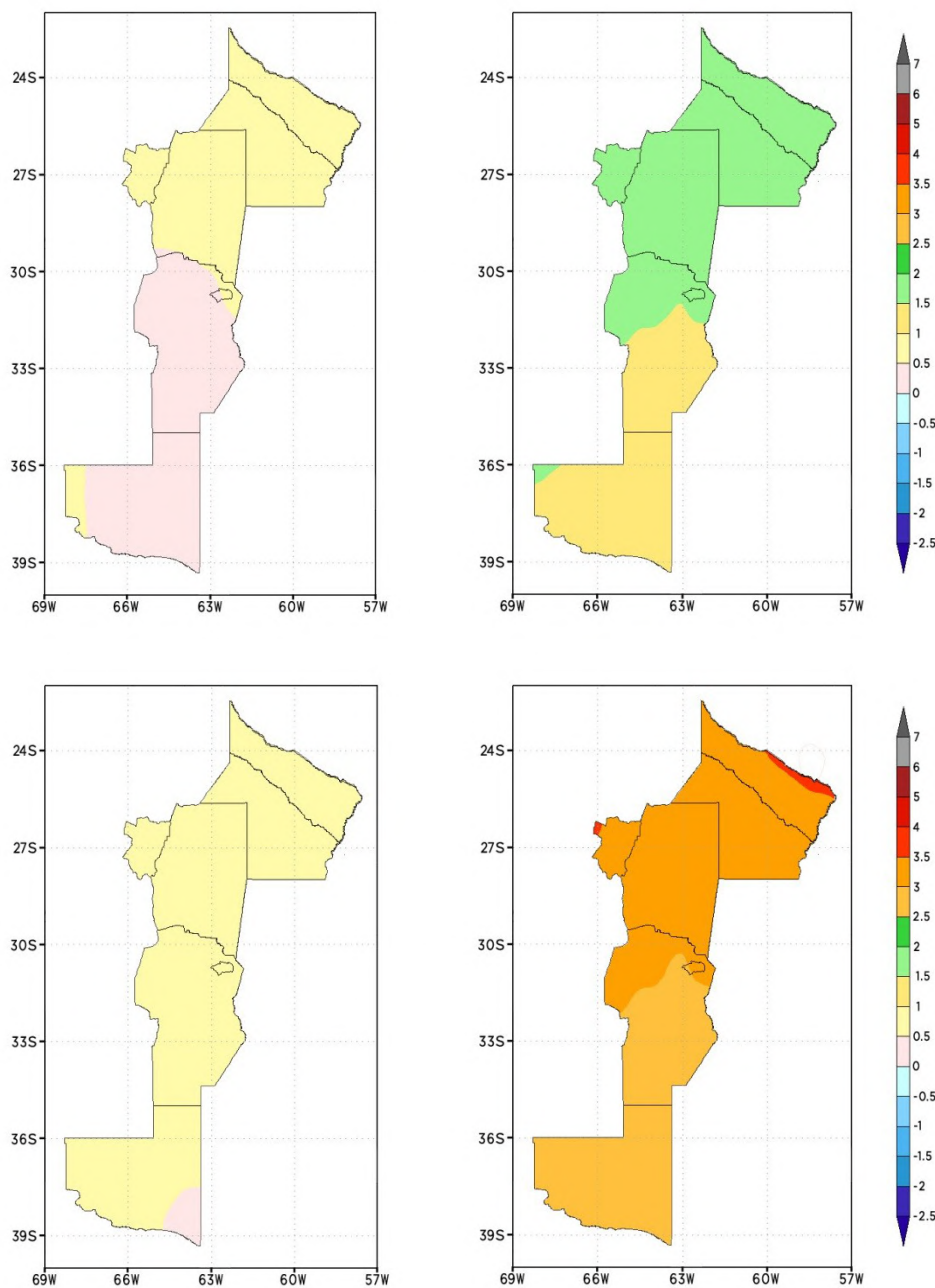
En los dos escenarios RCP, tanto para el futuro cercano como lejano, toda la región presenta calentamiento con respecto al periodo 1960-2010 que va de 0 y 1°C en el futuro cercano, sin mayores diferencias entre escenarios, hasta 2,5 a 3,5°C en el futuro lejano en el norte de la región en el RCP8.5.

En todos los casos el calentamiento es mayor en el norte que en el centro y sur de la región coincidiendo con los escenarios promedio de los 42 modelos del CMIP5, Figura 3.4.1. La temperatura mínima presenta mayor aumento que la máxima, siendo la diferencia más pronunciada en el futuro lejano, pero las diferencias entre estas dos variables no son muy grandes.

Las proyecciones de aumento de las temperaturas en esta región son menores que las de las regiones con las que limita al este y oeste (Húmeda y Andes). Este patrón geográfico continua lo observado en el periodo 1960-2010, Figura 2.2.1.

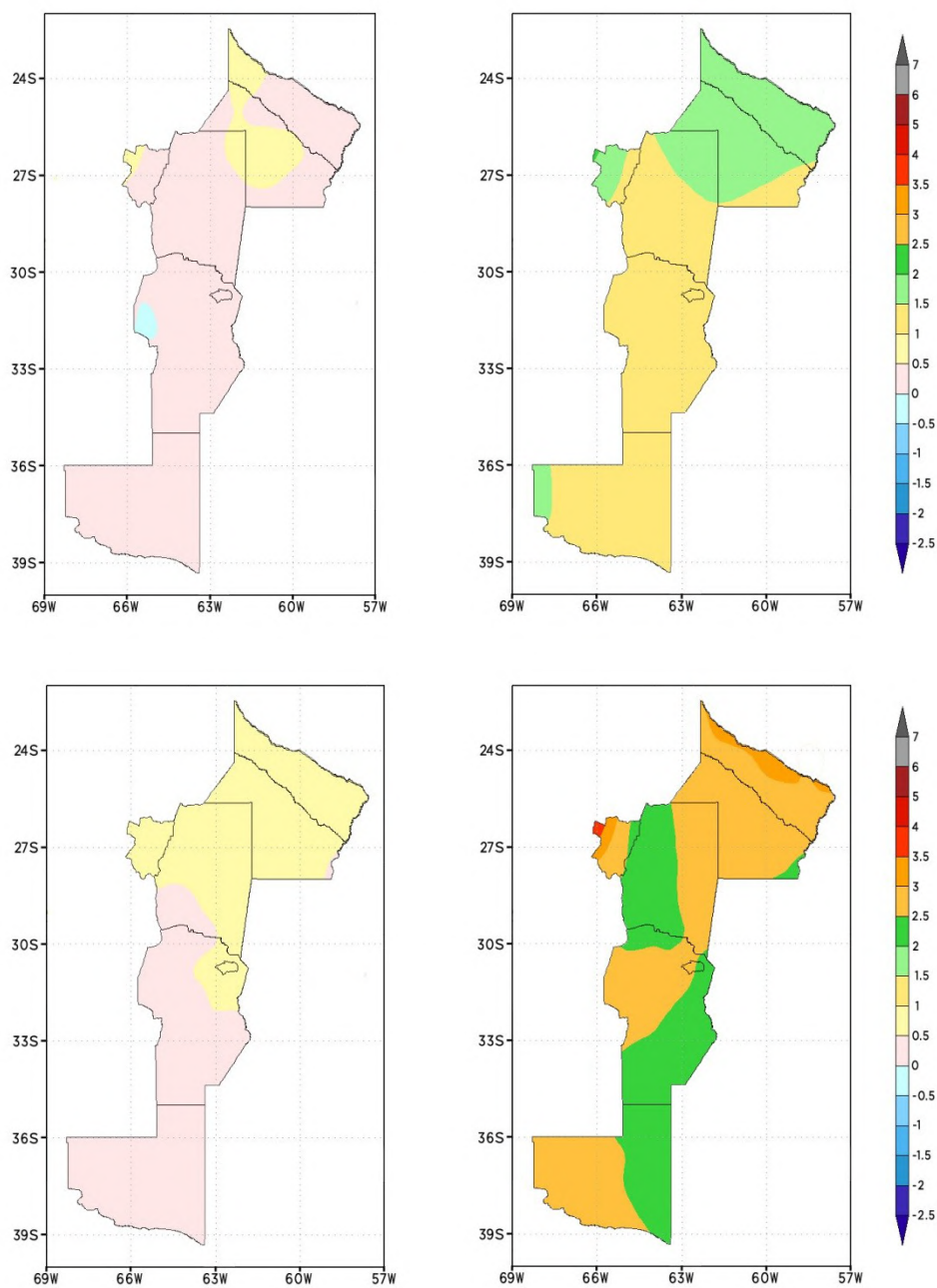


**Figura 6.4.1.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)



**Figura 6.4.1.2:** *Ídem figura 6.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual*





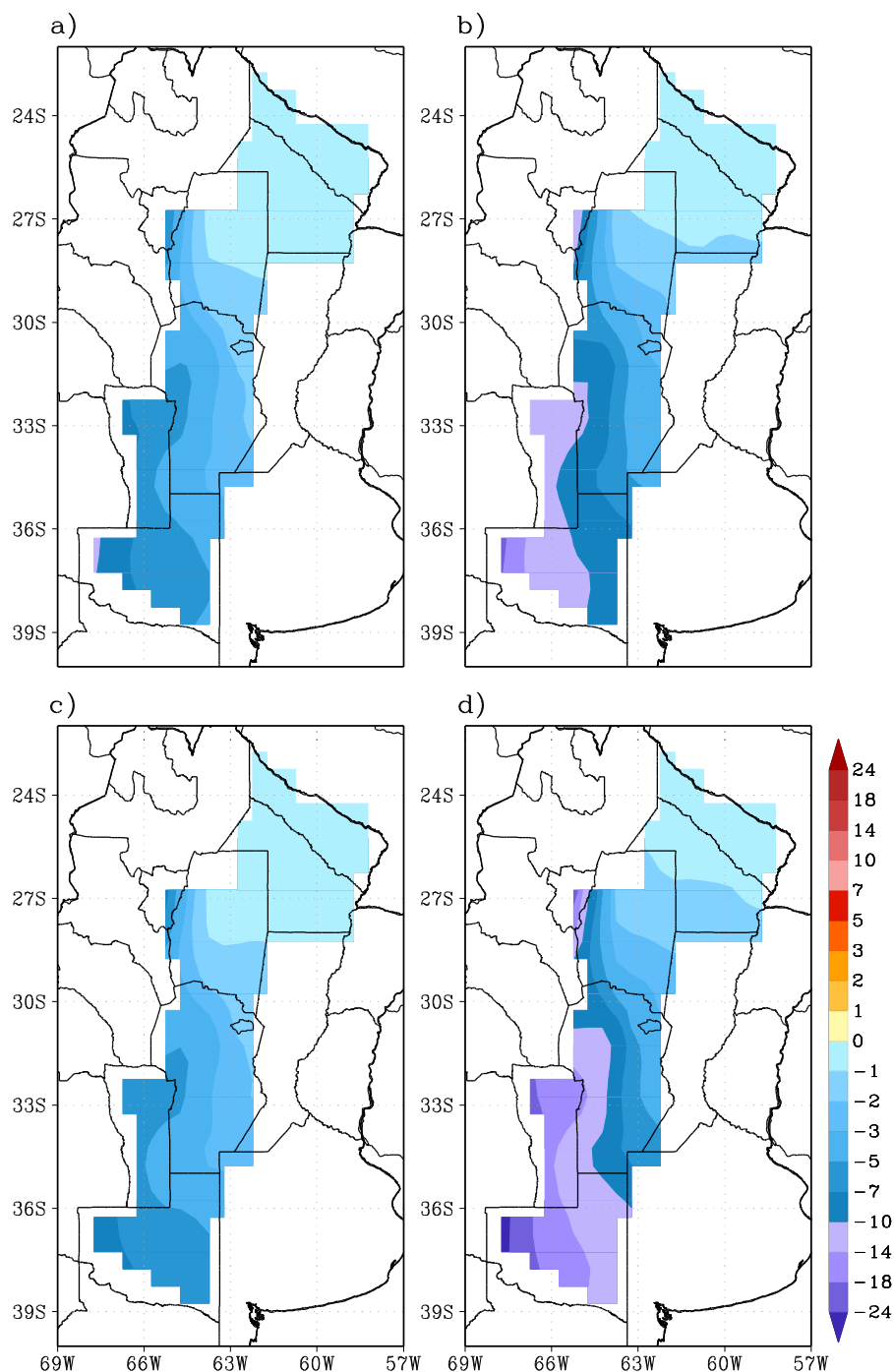
**Figura 6.4.1.3:** Ídem figura 6.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual

### *Extremos térmicos*

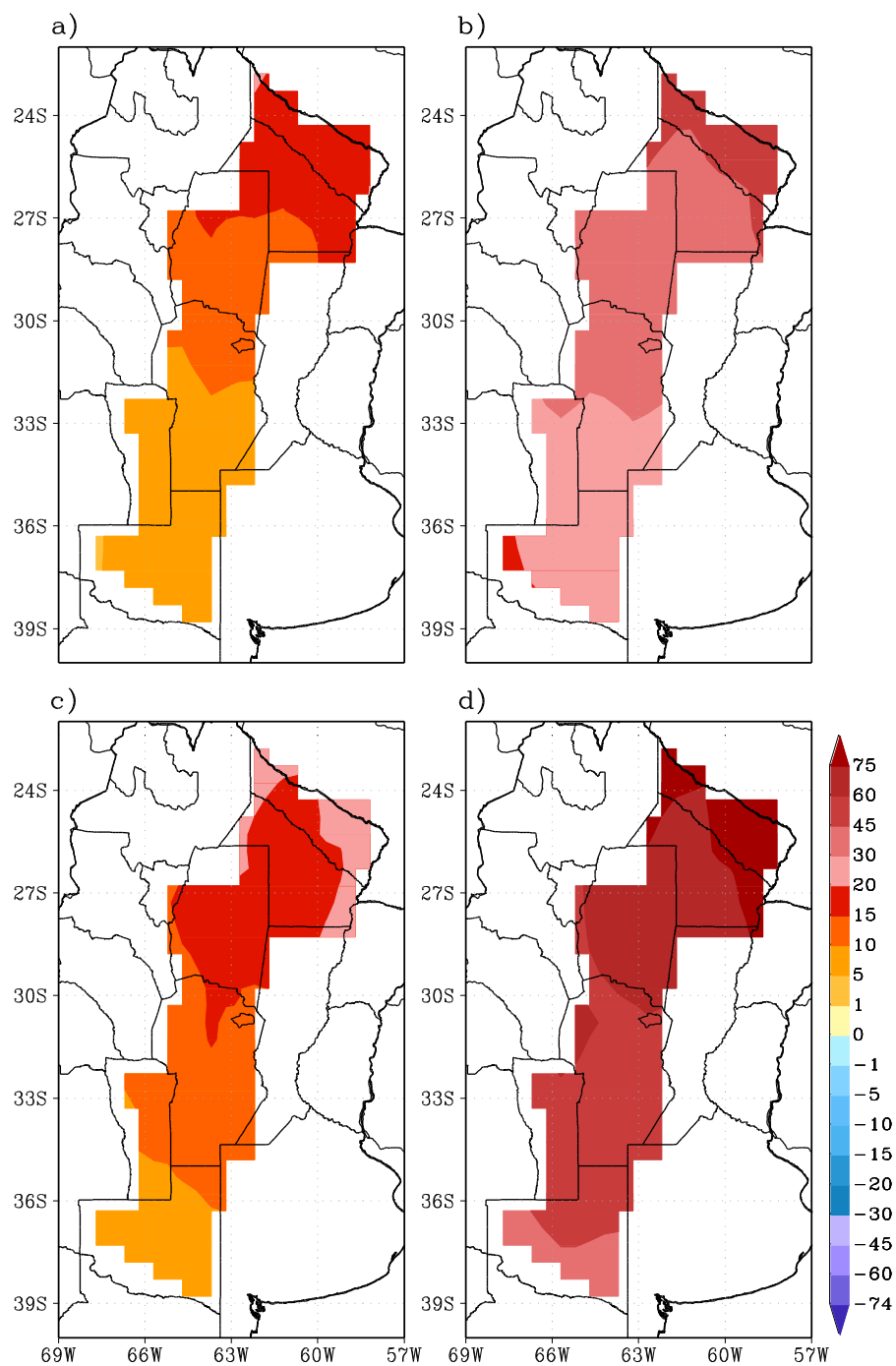
Como en la región Húmeda, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento esperado, Figuras 6.4.1.4 a 6.4.1.9. Los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 solo tienen pequeñas diferencias entre ellos en el futuro cercano, pero sus escenarios difieren bastante en el futuro lejano con mayores cambios en el RCP8.5, como es de esperar por el proceso de calentamiento global. En los dos escenarios, los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

Las heladas se reducirían sustancialmente en el sur de la región y tenderían a ser muy infrecuentes en el norte, Figuras 2.2.4 y 6.4.1.4. Las noches con temperaturas en exceso de 20 °C (noches tropicales) y las temperaturas máximas y mínimas del año aumentarían mucho más en el norte de la región que en el sur, Figuras 6.4.1.5, 6.4.1.6 y 6.4.1.7.

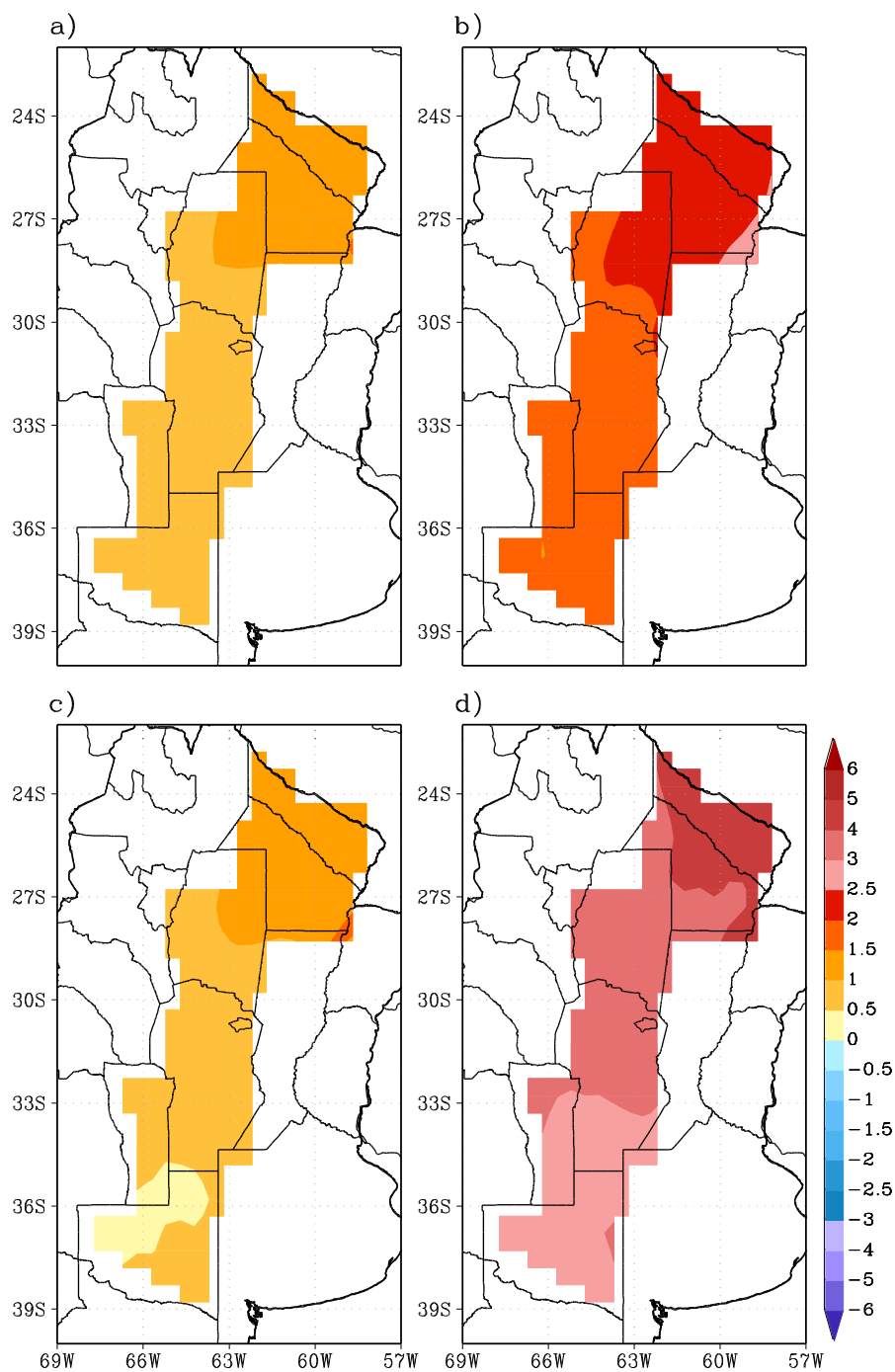
Esta región, a diferencia de las otras tres, no presentó un muy claro calentamiento en el periodo 1960-2010 con enfriamientos en algunas zonas. Por el contrario, los escenarios proyectados muestran un calentamiento general, Figuras 6.4.1.1 a 6.4.1.3. A pesar de esta discrepancia, los cambios observados en varios índices extremos tienen el mismo patrón espacial que los proyectados con mayores aumentos en el norte que en el sur de la región. Es el caso del número de noches tropicales, Figuras 2.2.5 y 6.4.1.5, en menor medida del valor mínimo anual de la temperatura anual, Figuras 2.2.6 y 6.4.1.6, el porcentaje de días con la temperatura máxima extremas, Figuras 2.2.8 y 6.4.1.8 (valores observados negativos en el sur y positivos en el norte) y el número de días con olas de calor, Figuras 2.2.9 y 6.4.1.9.



**Figura 6.4.1.4:** Cambios del número de días con heladas (FD) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

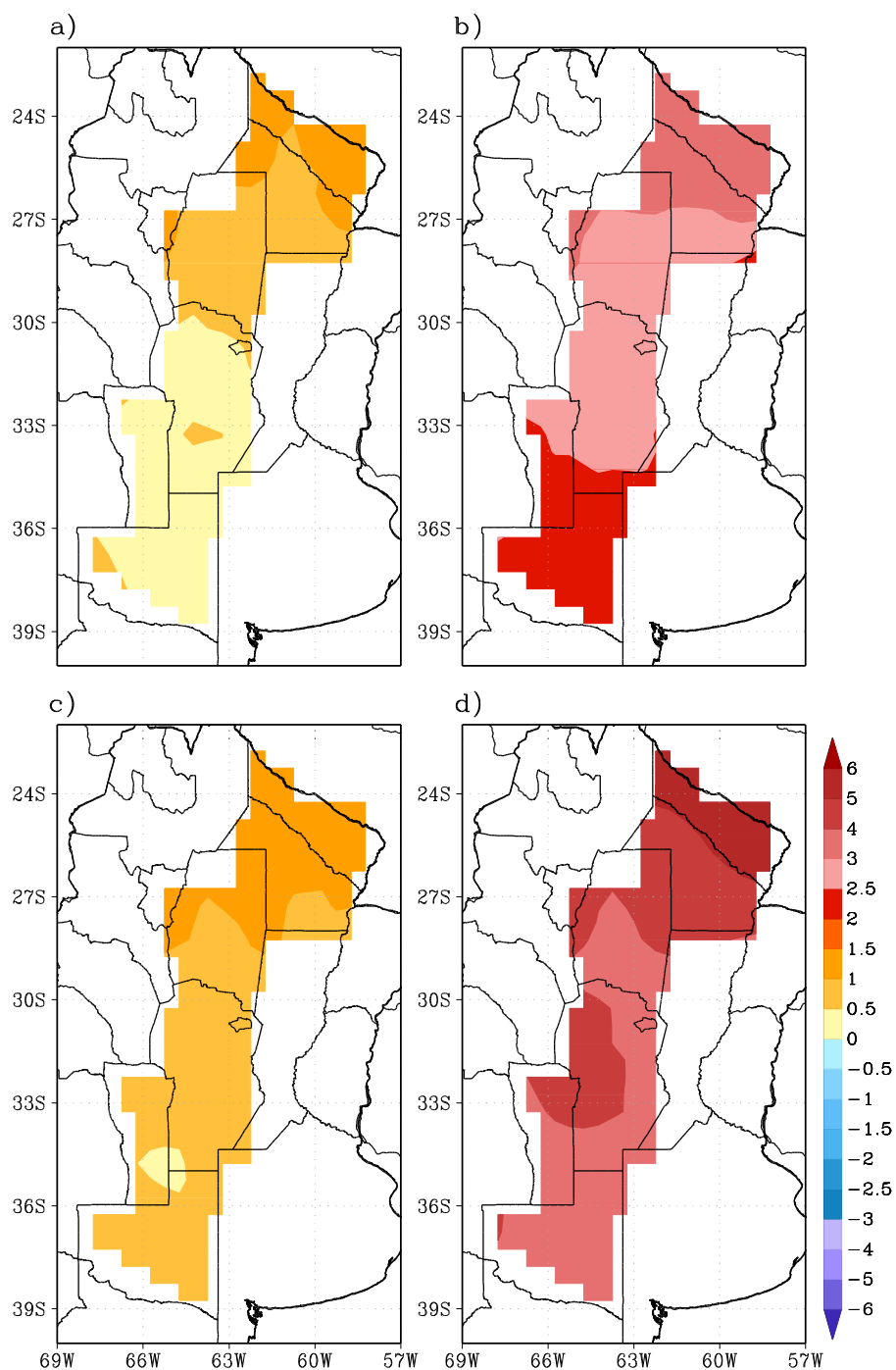


**Figura 6.4.1.5:** *Ídem Figura 6.4.1.4, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año*

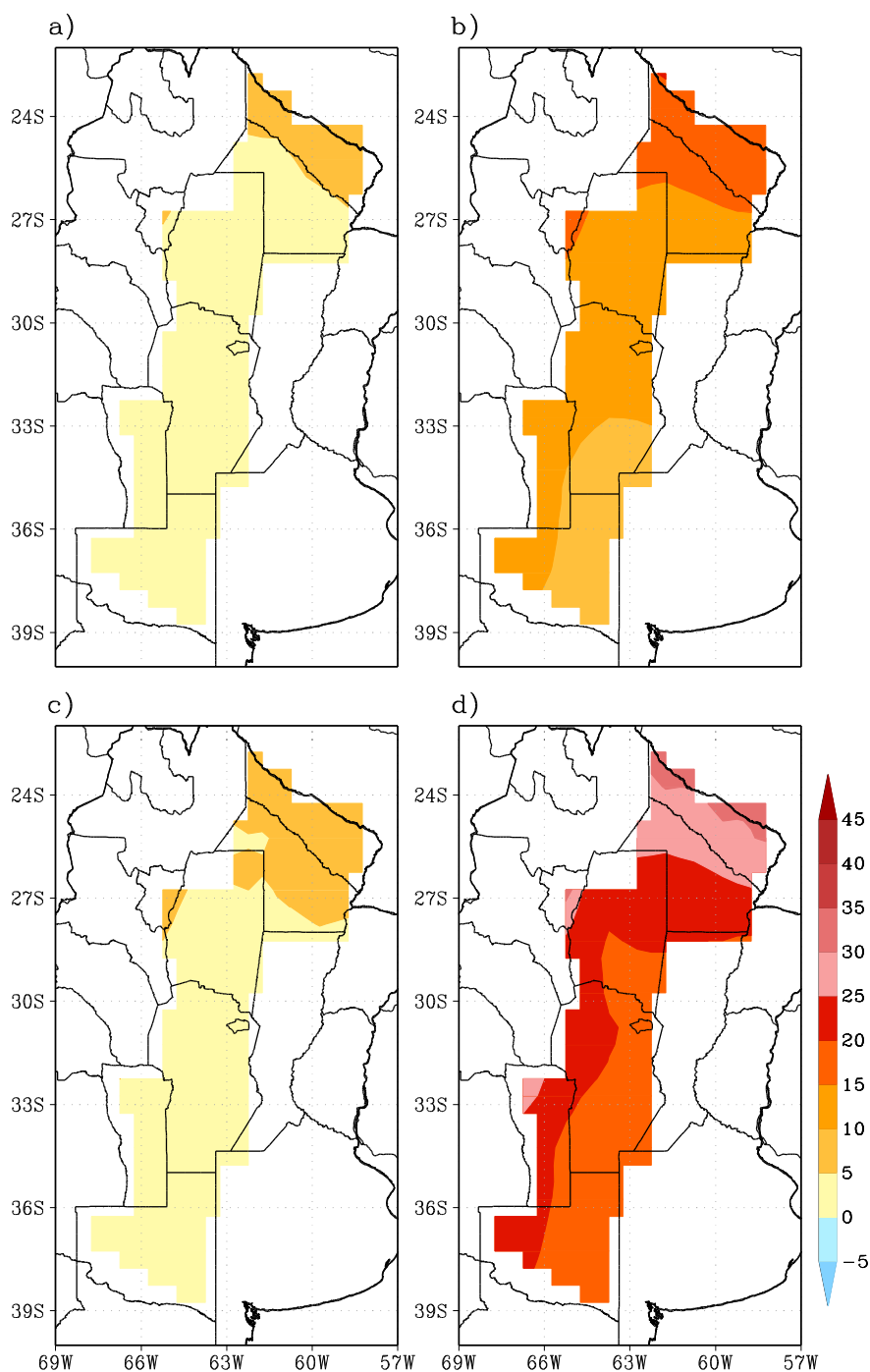


**Figura 6.4.1.6:** Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el valor anual mínimo de la temperatura anual (°C)



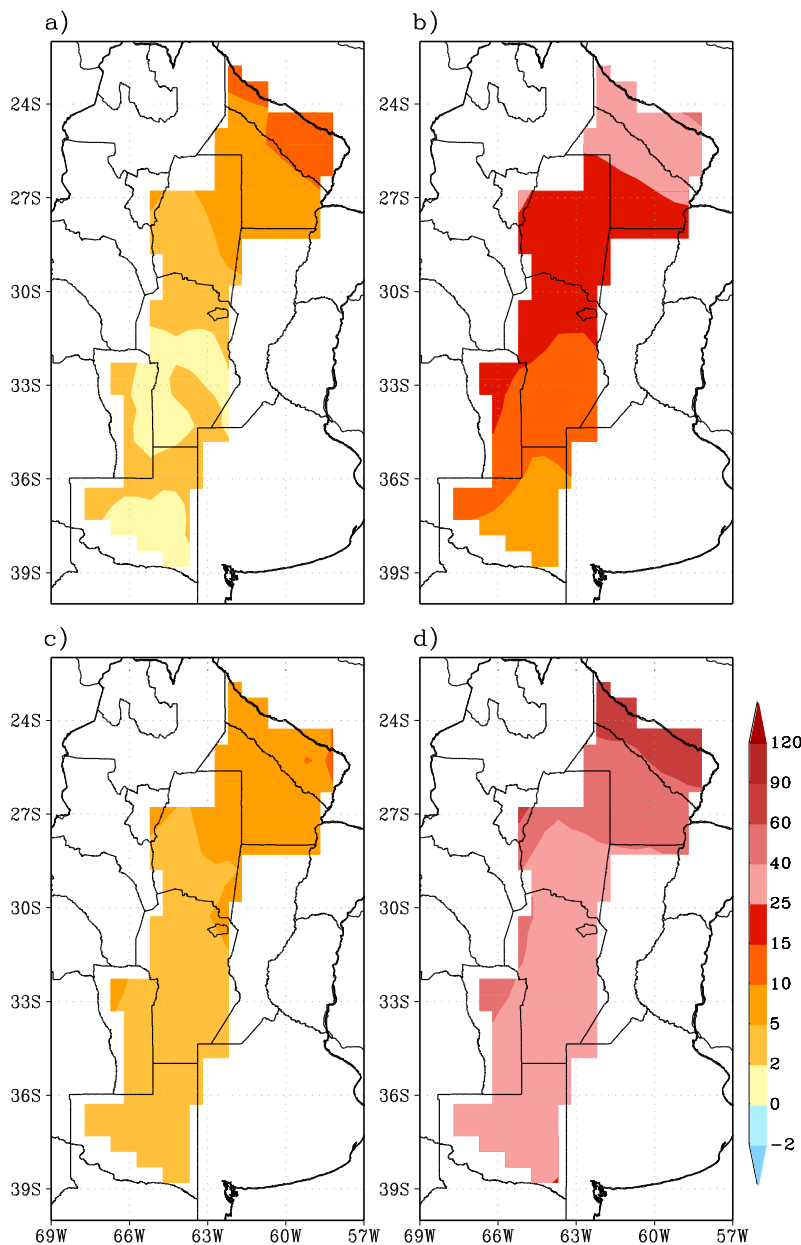


**Figura 6.4.1.7:** Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el valor anual máximo de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )



**Figura 6.4.8:** Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

Para el futuro cercano el número de días con olas de calor aumentaría moderadamente en el sur y algo más en el norte, pero no más de 15 días en Formosa, Figura 6.4.1.9. Para el horizonte temporal del futuro lejano el aumento de días con olas de calor sería más grande en ambos escenarios y mayor en el norte que en el sur. Cabe destacar que, como en el caso de la región Húmeda, de acuerdo a la definición del índice utilizado, este es independiente de las temperaturas absolutas por lo que esta diferenciación regional refleja el calentamiento diferente con la latitud que se observa en las figuras 6.4.1.1 y 6.4.1.3.

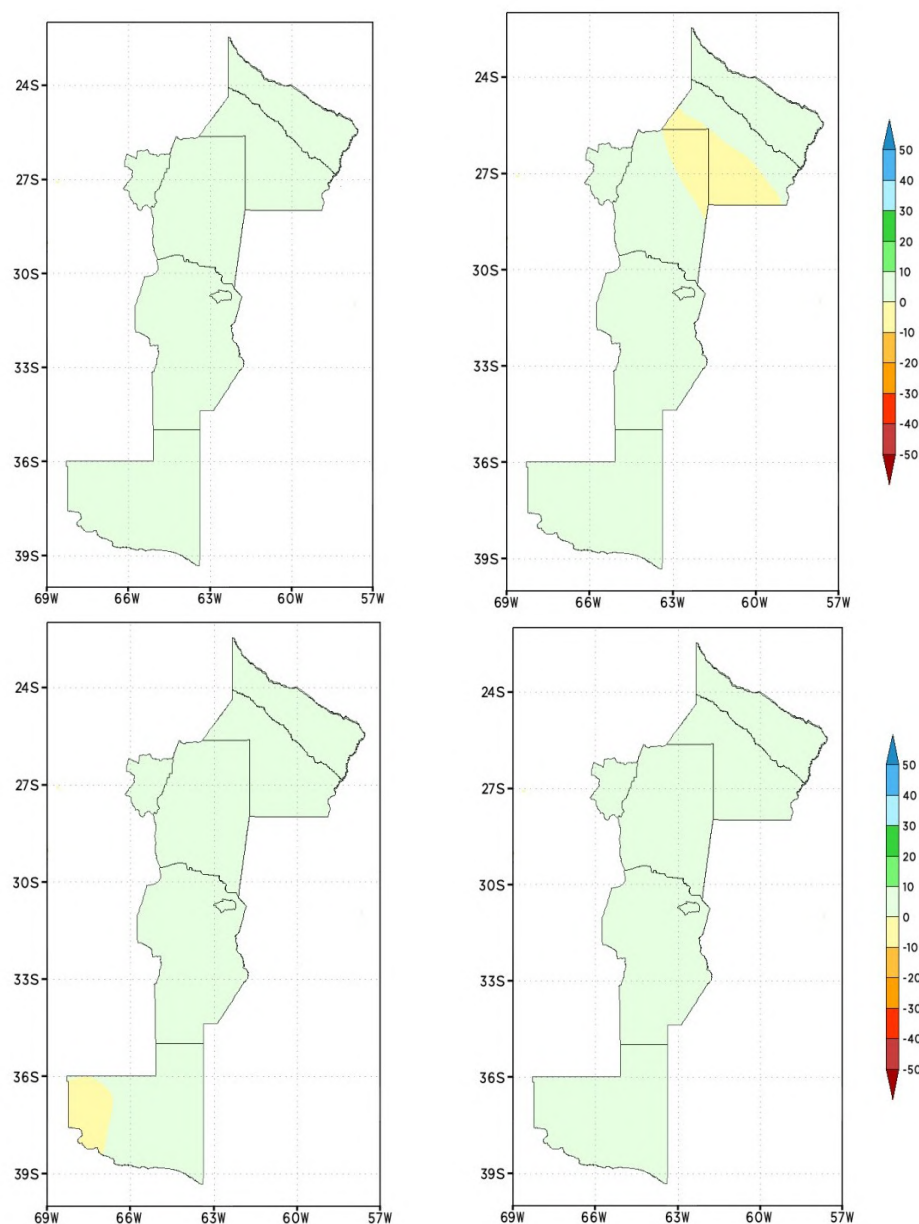


**Figura 6.4.1.9:** Ídem Figura 6.4.1.4, pero para los días en el año con ola de calor

## 6.4.2 Precipitación

### *Precipitación media*

Las diferencias de las proyecciones de la precipitación con la del periodo observado (1960-2010) se muestran en la figura 6.4.2.1. No hay mayores diferencias ni entre los dos escenarios ni entre el futuro cercano y el lejano.



**Figura 6.4.2.1:** Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

Las proyecciones en toda la región son de aumentos poco relevantes, 0 a 10%, que estarían dentro del margen de error de esta evaluación. Incluso, en algún caso y en zonas aisladas se proyectan ligeras disminuciones. En principio, se puede suponer que no habrá mayores cambios en la precipitación, aunque de acuerdo con lo obtenido del promedio de 42 modelos CMIP5, no se podría descartar una tendencia a algunos aumentos moderados en Córdoba, San Luis y La Pampa, Figura 3.4.2.

### *Precipitaciones extremas*

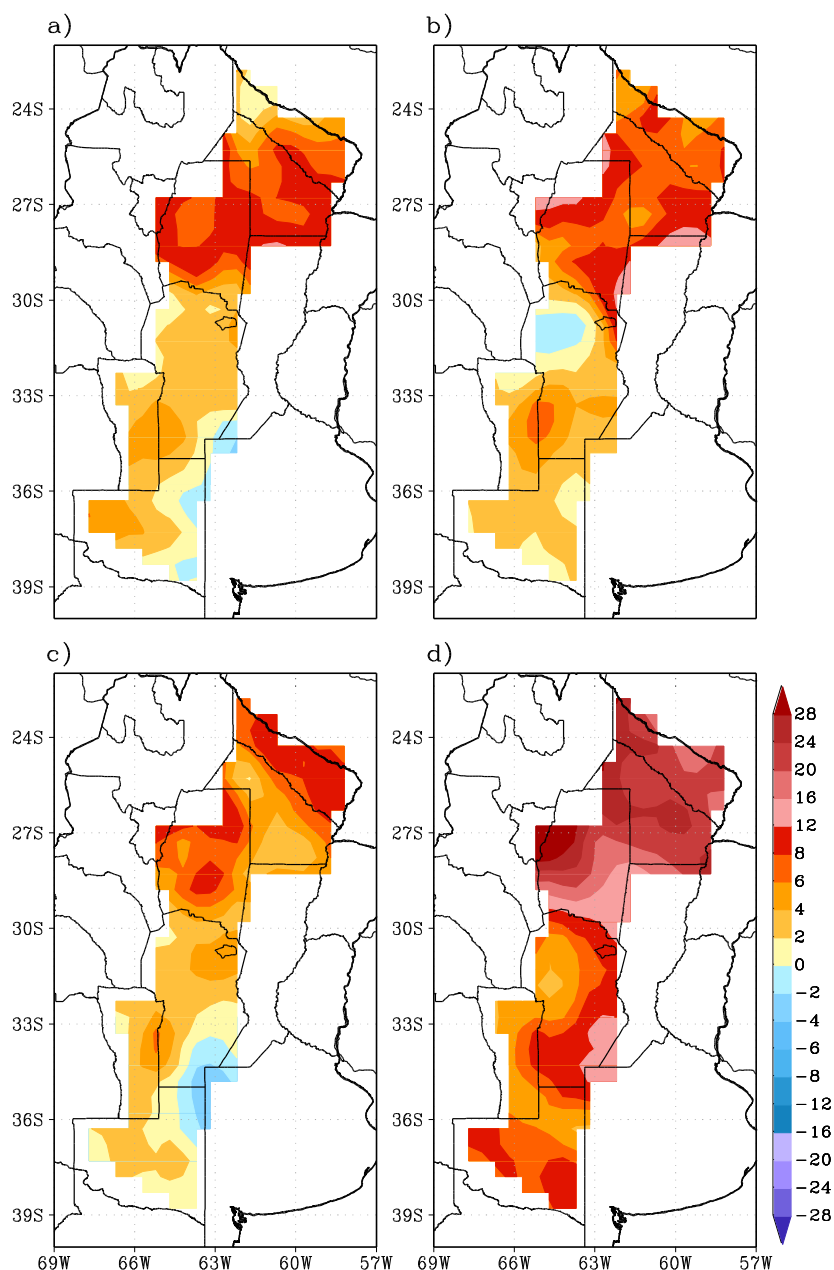
En casi toda la región, las precipitaciones extremas en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros tienden a aumentar, aunque con la excepción de algunas zonas aisladas, Figuras 6.4.2.2 a 6.4.2.4. Como en el caso de la temperatura, en general los escenarios RCP4.5 y

RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero sus escenarios en el futuro lejano son distintos con muchos mayores aumentos en el RCP8.5. En los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

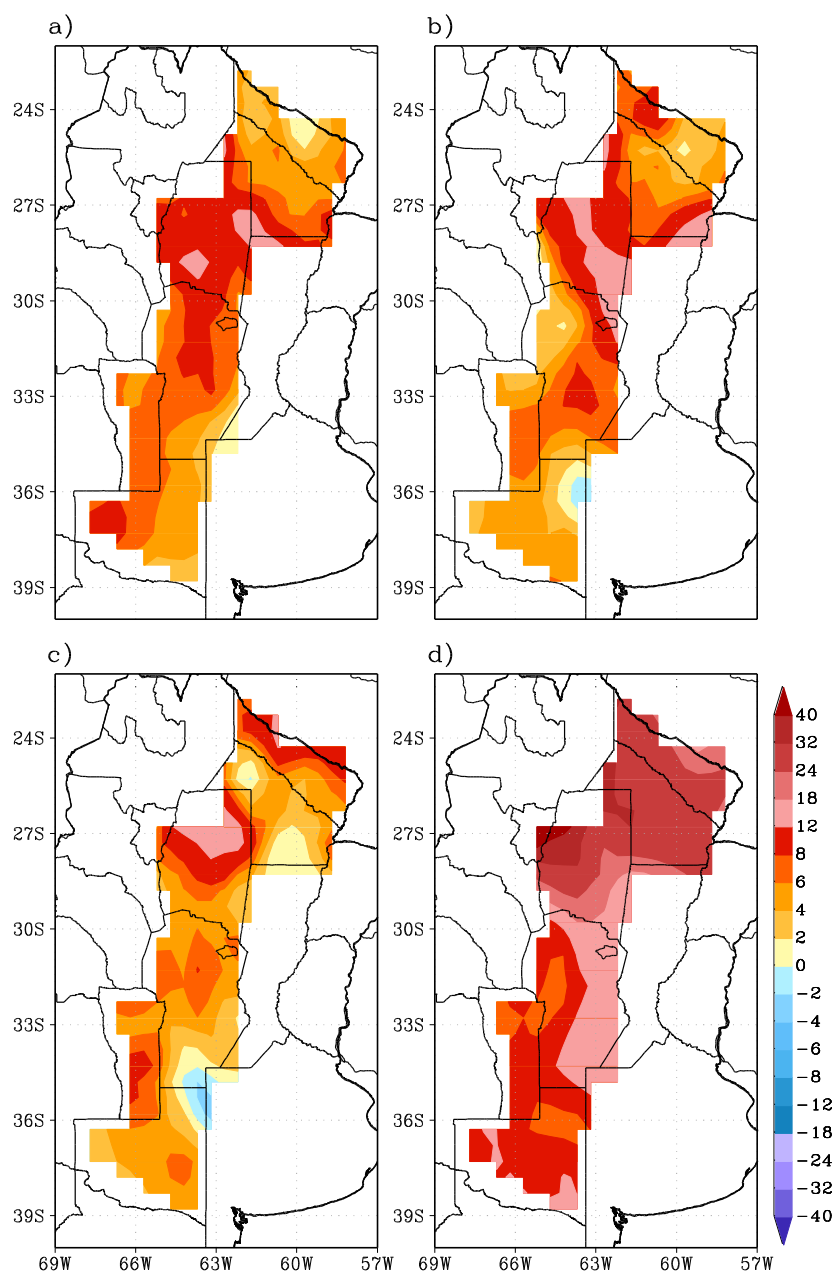
Al igual que en la región Húmeda, como resultado del cambio climático habría en toda la región una tendencia creciente con el tiempo en los valores de la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa, Figura 6.4.2.4.

Los cambios observados en los índices de precipitaciones extremas, Figuras 2.3.2 a 2.3.4 y los proyectados, Figuras 5.4.2.3 a 5.4.2.5 coinciden en un patrón regional de predominante aumento, aunque con variaciones regionales, que en el caso de las proyecciones también varía con el horizonte temporal y con el escenario.

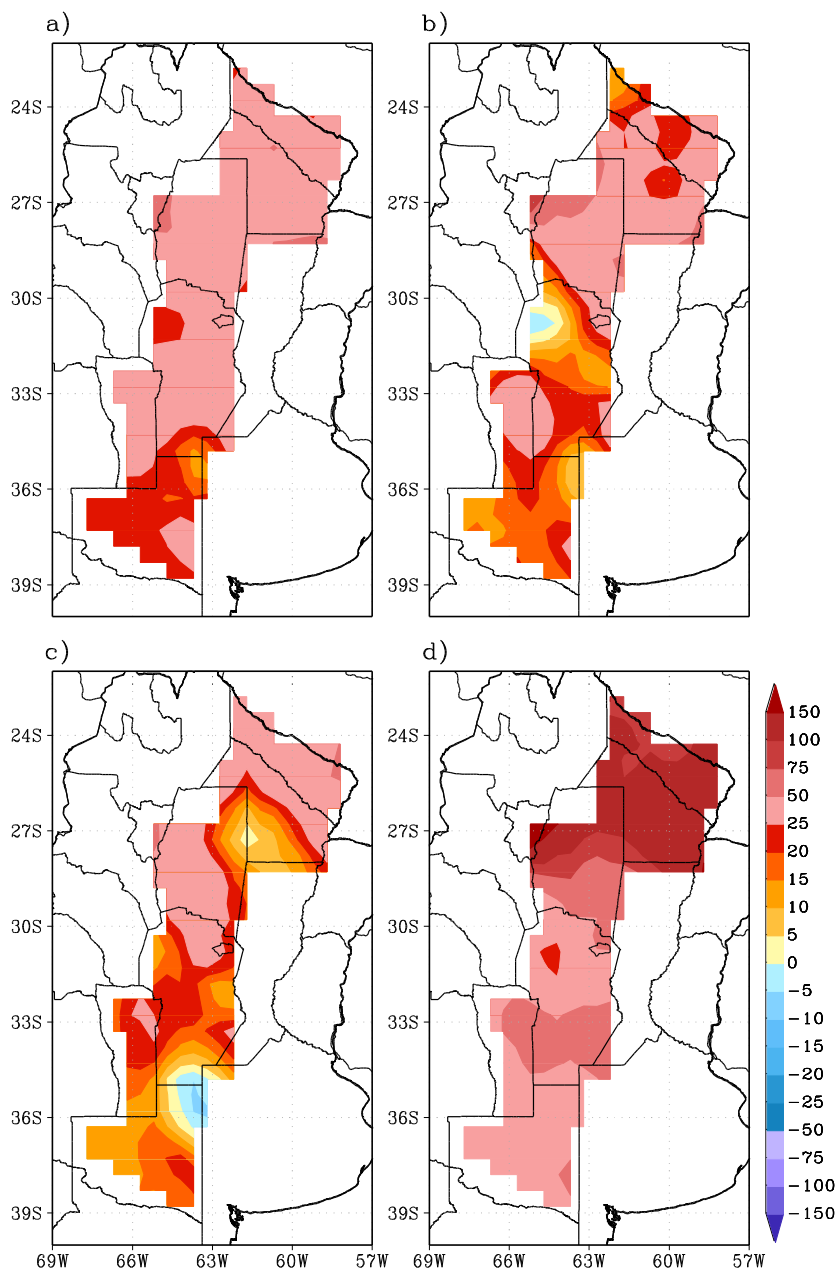




**Figura 6.4.2.2:** Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano



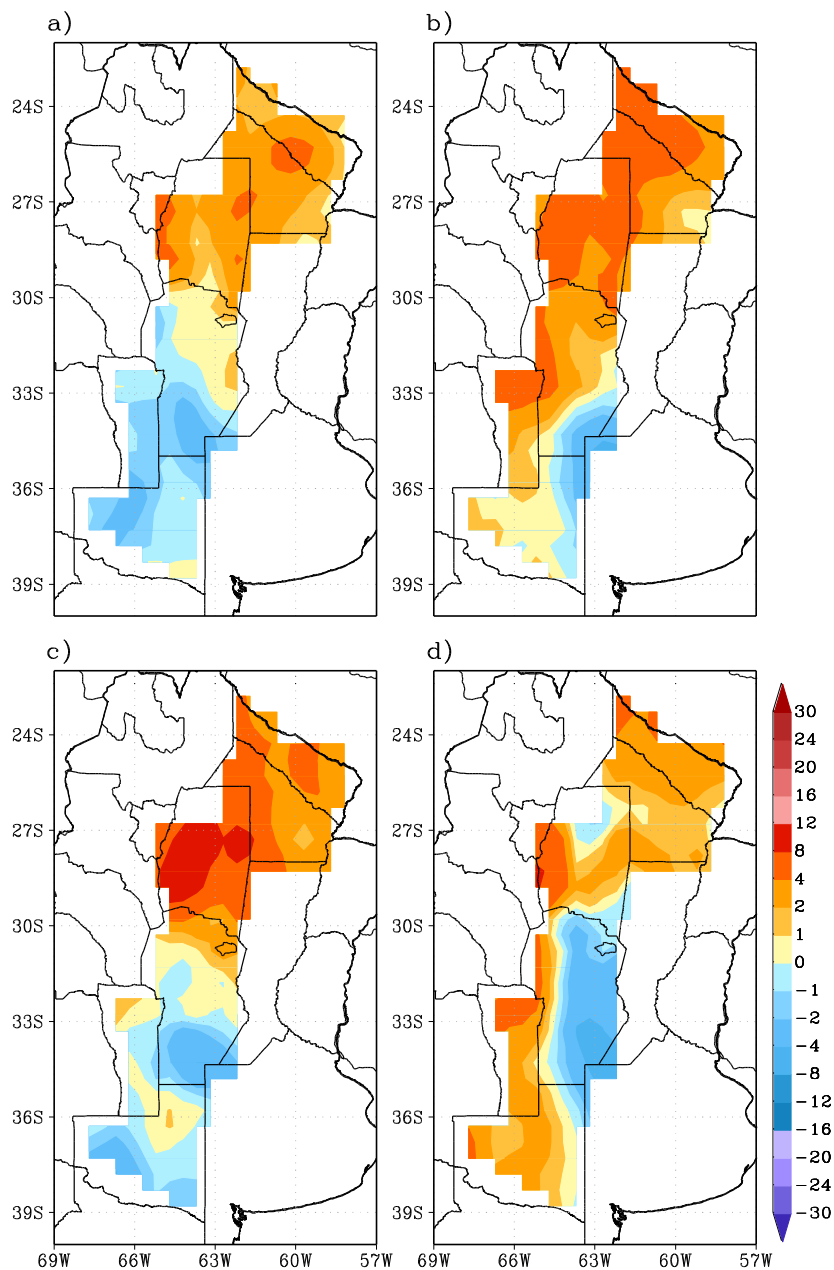
**Figura 6.4.2.3:** Ídem Figura 6.4.2.2, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)



**Figura 6.4.2.4:** Ídem Figura 6.4.2.2, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

El cambio en el número máximo anual de días consecutivos secos (máxima racha seca) en el futuro cercano es hacia una reducción en el sur de la región y un aumento en el norte, pero en ambos casos los valores son moderados. Para el futuro lejano habría una mayor tendencia al aumento de las rachas secas, pero sin gran aumento e incluso no sería mayor en el escenario RCP8.5. Es notable la coincidencia de este patrón geográfico con los cambios observados de este índice entre 1960 y 2010. En esta región, que tiene un largo periodo seco en el invierno, este

índice refleja la prolongación de ese periodo seco. La concordancia en este aspecto entre las observaciones y las proyecciones sería indicativa de un proceso de cambio asociado al calentamiento global.



**Figura 6.4.2.5:** Ídem Figura 6.6.2.2, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 6.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

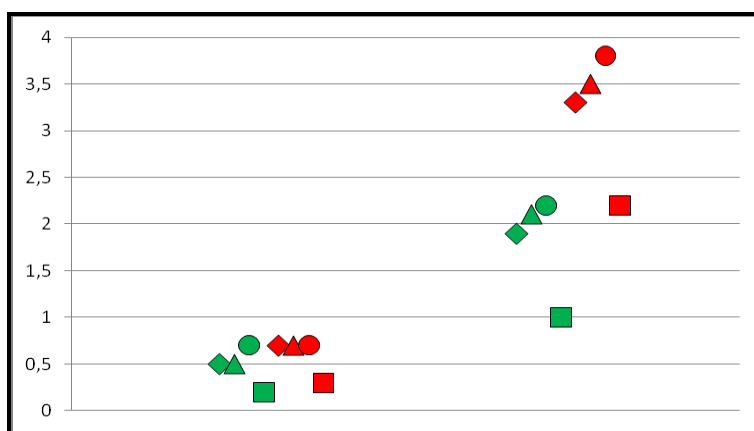
Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será relativamente menor que aquella y por consiguiente para este periodo, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones. En este estudio, se comparan dos escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales y el RCP4.5 de emisiones moderadas. En cuanto a los modelos, se utilizan los 4 MCGs de mejor performance en la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5. Lo mismo se hace para el futuro cercano, pero en ese caso hay que sumar cierto nivel de incerteza por la influencia de la variabilidad interdecadal, sobre todo en el caso de la precipitación,

### 6.5.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

En el futuro cercano, la diferencia de calentamiento de los distintos modelos en los dos escenarios es pequeña, variando alrededor de 0,5°C, Figura 6.5.1.1. No muy diferente es lo que resulta del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1.



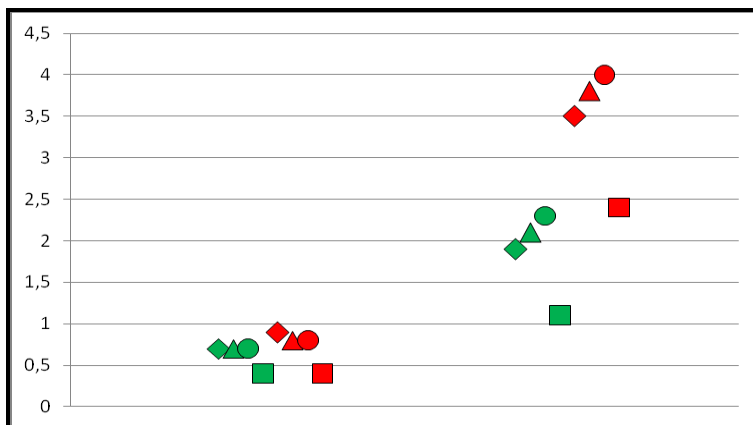
**Figura 6.5.1.1:** Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados)

Para el futuro lejano, la dispersión de aumento de la temperatura media regional es mayor, especialmente entre los 2 escenarios, aunque el modelo MRI/CGM3 proyecta considerablemente

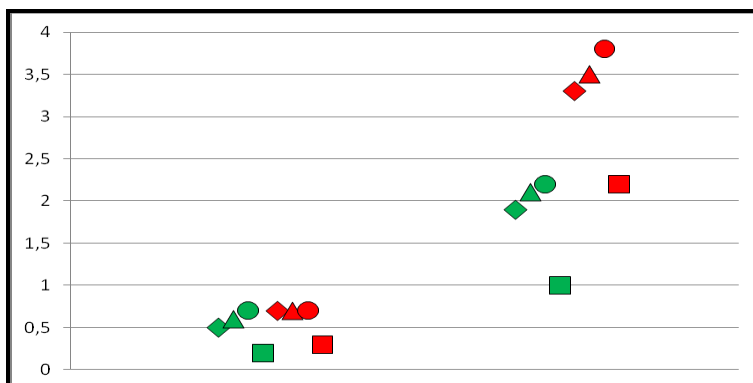


menos calentamiento que los otros tres modelos. El promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1, proyectan un promedio regional de cambio de 1,5°C en el escenario RCP4.5 y de 3°C en el RCP8.5, muy consistente con los resultados de los 4 modelos de mejor performance en la región, aquí utilizados.

En el caso de las temperaturas mínimas y máximas, las características de los cambios en los modelos y los dos escenarios son muy similares a las de las temperaturas medias, Figuras 6.5.1.2 y 6.5.1.2, por lo que valen los mismos comentarios.



**Figura 6.5.1.2:** Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional

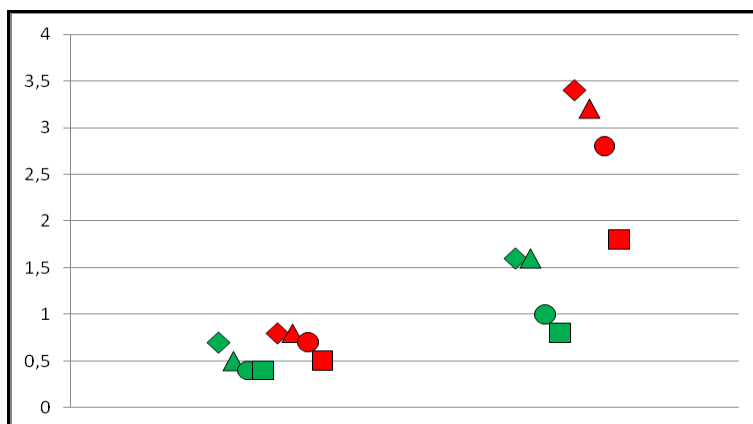


**Figura 6.5.1.3:** Ídem 6.5.1.1 pero para la temperatura máxima media regional

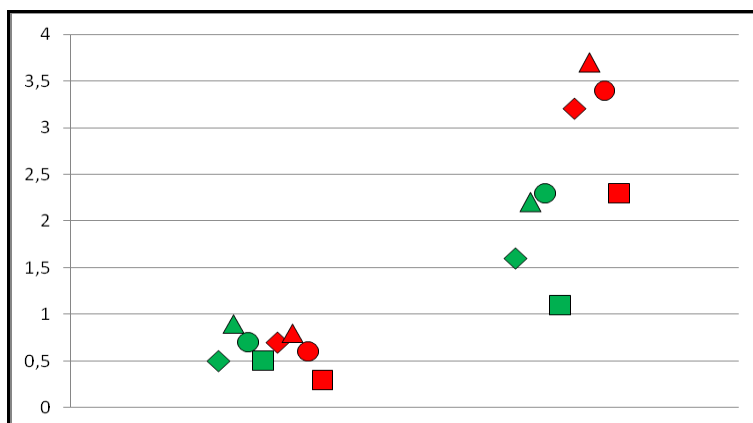
En el futuro cercano, los cambios en las temperatura media regional en el verano y en el invierno son similares entre si y no muy distintos con los de la temperatura media anual, por lo que para estas estaciones valen las mismas consideraciones que se han hecho respecto de la certeza de las proyecciones.

En el futuro lejano, los cambios en general son ligeramente mayores en el invierno que en el verano y los rangos de variación entre modelos y escenarios es similar al de la temperatura

media, por lo que otra vez las consideraciones sobre la certeza de las proyecciones son las mismas.



**Figura 6.5.1.4:** Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)



**Figura 6.5.1.5:** Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)

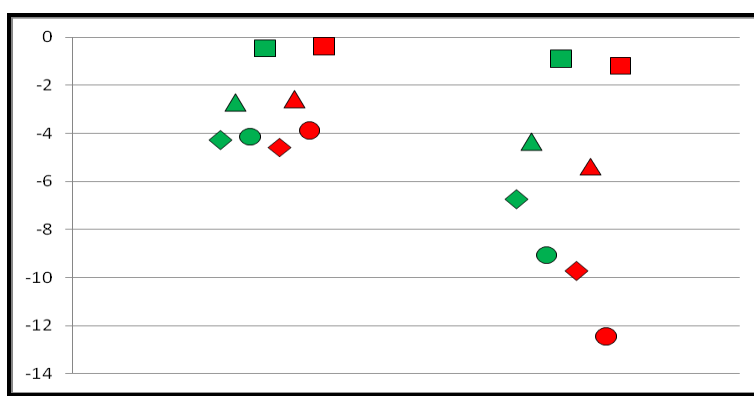
#### *Extremos térmicos*

Con pocas excepciones los promedios regionales de los 6 índices de extremos térmicos son consistentes con el calentamiento proyectado en todos los escenarios y modelos con los que en este estudio se construyeron los escenarios climáticos futuros, Figuras 6.4.1.1 y 6.5.1.6 a 6.5.1.11.

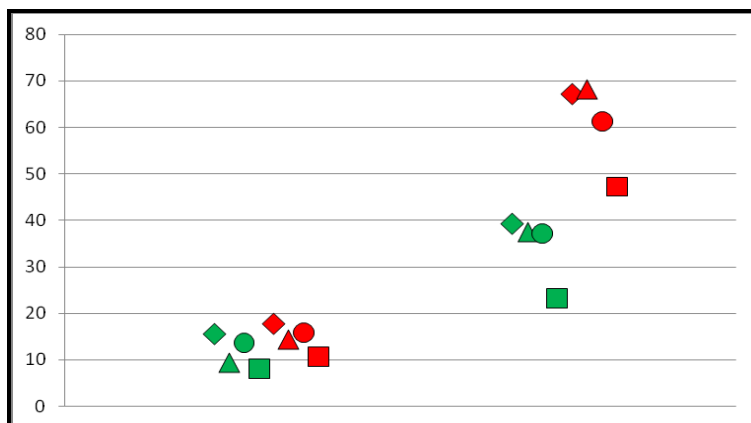
Las diferencias entre escenarios en el futuro cercano para cada modelo son ínfimas y mucho menores que las que existen entre los modelos, que ya de por sí son pequeñas. Se podría estimar que el rango probable de reducción de días con heladas estaría entre 0 y 4 días, el número de noches tropicales aumentarían entre algo menos de 10 a 20 y el valor anual mínimo de la temperatura entre 0,5 y de 1,5°C. No es tan seguro el signo en todo el rango probable en el caso

del valor anual máximo, el porcentaje de días con temperatura extrema y los días con olas de calor en los que los cambios serían en promedio consistentes con el calentamiento, pero pequeños.

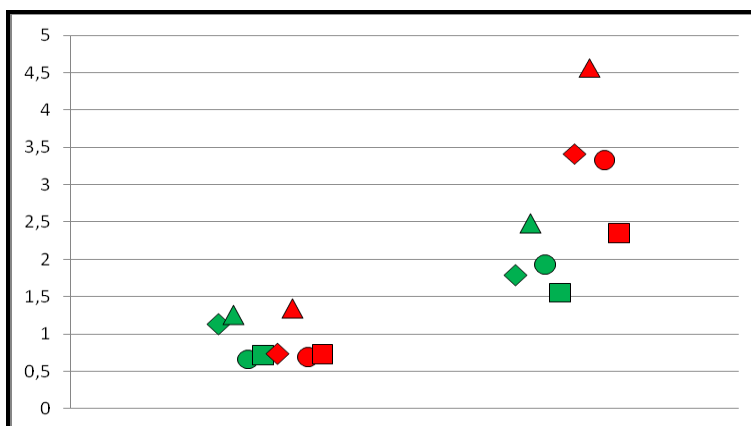
En el futuro lejano, las diferencias entre modelos es mayor que en el futuro cercano, pero como era de esperar las diferencias entre escenarios son mayores, excepto para el caso del cambio de días con heladas. En conclusión, para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos térmicos en el futuro cercano es muy pequeña o nula respecto del signo de los cambios y en cuanto a la magnitud de estos, en algunos casos está bastante acotada. En el caso del futuro lejano, hay bastante certeza respecto del signo de los cambios, pero en las magnitudes hay mucha dispersión entre modelos y escenarios de emisiones.



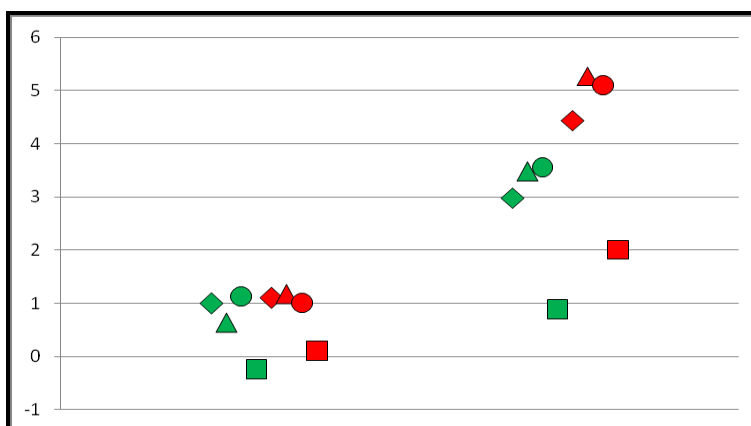
**Figura 6.5.1.6:** Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5



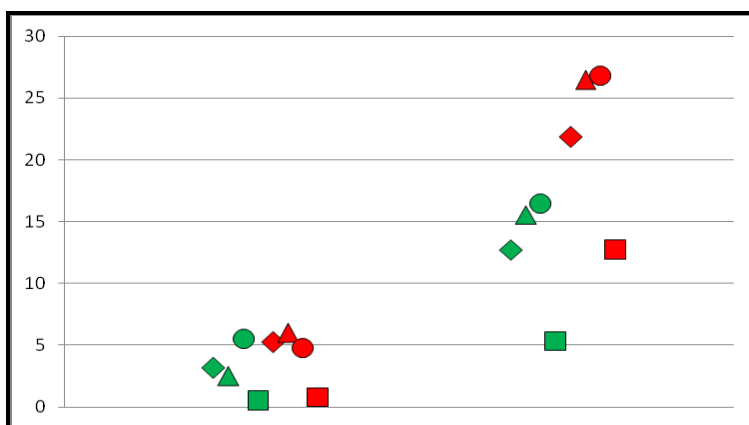
**Figura 6.5.1.7:** Ídem Figura 6.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



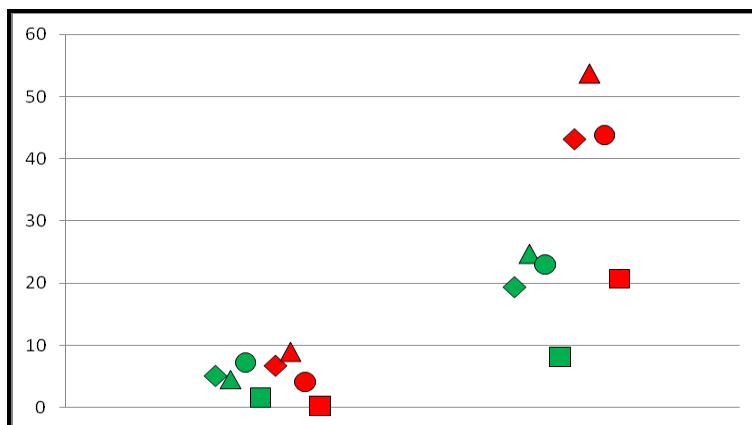
**Figura 6.5.1.8:** Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)



**Figura 6.5.1.9:** Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)



**Figura 6.5.1.10:** Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90



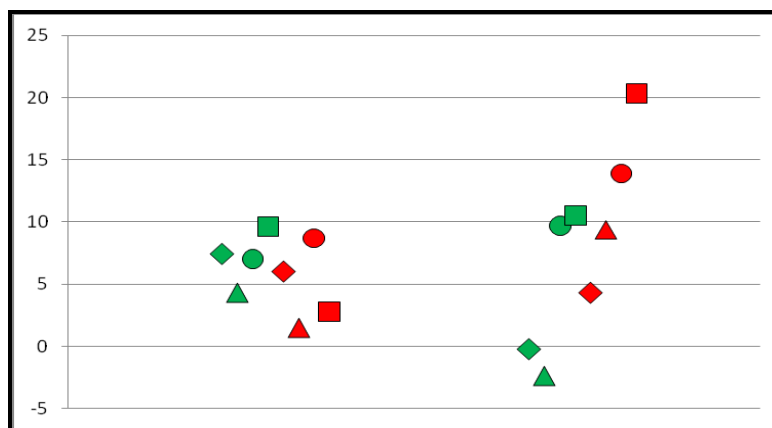
**Figura 6.5.1.11:** Ídem Figura 6.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

## 6.5.2 Precipitación

### *Precipitación media*

En el futuro cercano, el aumento en la precipitación es de apenas 0 a 10% entre los diferentes modelos y escenarios, Figura 6.5.2.1. Por el contrario el promedio de los 42 MCGs del CMIP5 tendrían una disminución promedio regional ligeramente negativa, Figura 3.4.2. En consecuencia, no se debería esperar mayores cambios en la precipitación regional para ese periodo. Sin embargo, como la precipitación de esta región ha tenido bastante variabilidad interdecadal en su zona norte y central, la incerteza sobre el signo del cambio es considerable.



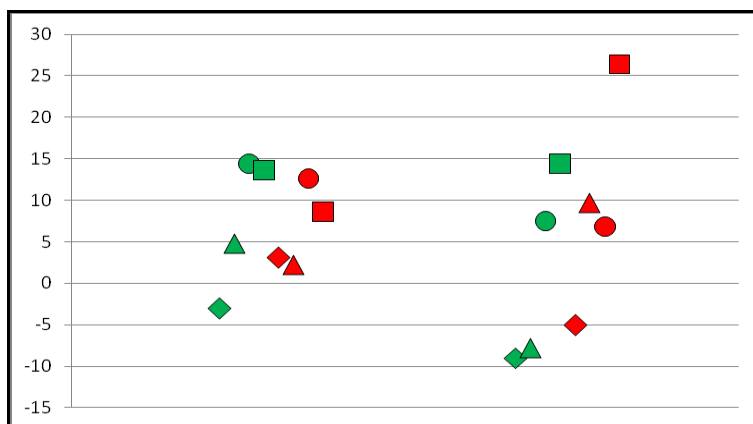


**Figura 6.5.2.1:** *Diferencia proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5. Modelos: Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados)*

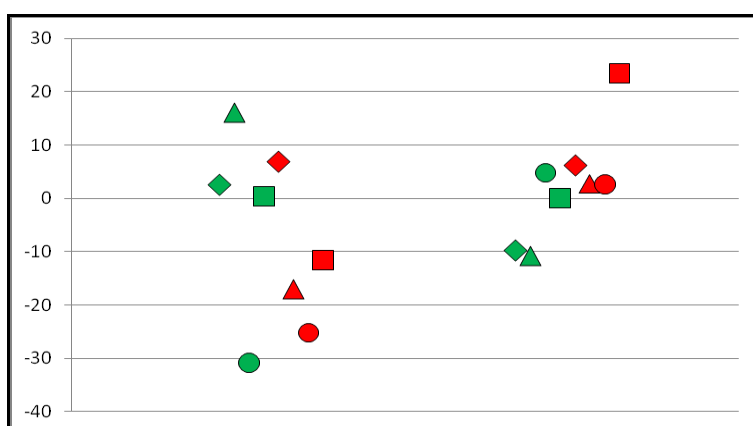
Para el futuro lejano hay una gran dispersión entre escenarios y entre modelos, variando desde algunos casos con pequeñas reducciones porcentuales hasta un aumento del 20%; Los aumentos promedio de cada escenario son muy próximos a los del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.2. Se estima que para este periodo es probable que haya un moderado aumento de la precipitación media anual, aunque con mucha incerteza por las mismas razones que en el caso del futuro cercano.

En el verano, la dispersión de los cambios de la precipitación entre modelos es mayor que en el caso anual, aunque alrededor de los mismos valores, en general de aumento, Figura 6.5.2.2, por lo que la incerteza sobre estos aumentos es también alta.

En el invierno, la dispersión de los cambios regionales de la precipitación entre modelos es mayor que en el verano y en valor anual en el futuro cercano, pero mucho menor en el futuro lejano, Figura 6.5.2.2. El aumento proyectado está entre 10 y 20% por lo que no se puede asegurar que la fuerte tendencia observada ente 1960 y 2010 hacia menores precipitaciones, Tabla 6.2.2.1, se vaya a mantener.



**Figura 6.5.2.2:** Ídem 6.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)

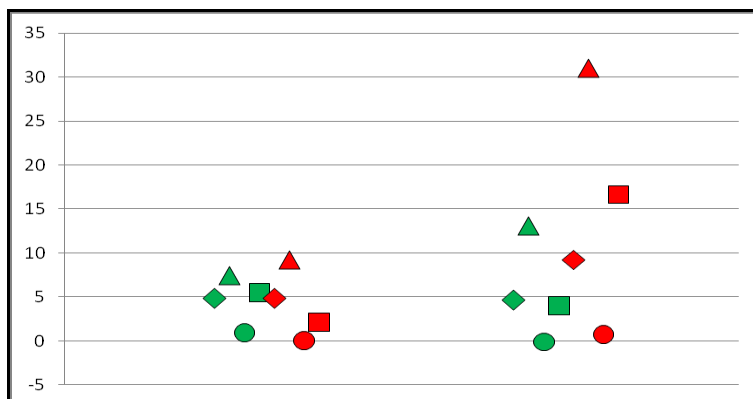


**Figura 6.5.2.3:** Ídem 6.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)

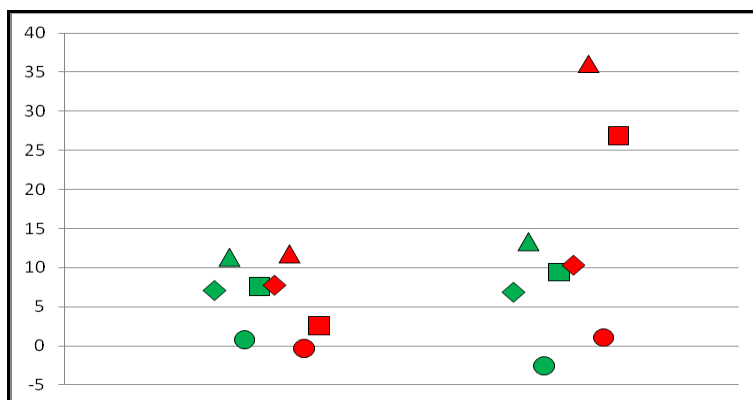
### *Precipitaciones extremas*

Los índices de precipitaciones extremas calculados indican que habrá una tendencia a que estas aumenten con el tiempo, Figuras 6.5.2.4, 6.5.2.5 y 6.5.2.6. Para el futuro cercano, aunque en el promedio de todos los modelos y escenarios habría una tendencia hacia mayores extremos, algunos índices en el escenario RCP4.5 tienen diferencias nulas o incluso negativas. No obstante, se podría estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos de precipitación es moderada con respecto del signo de los cambios, y en cuanto a la magnitud de estos, que no es grande en el caso del futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Las precipitaciones máximas de un día aumentarían menos de 10 mm y las acumuladas de 5 días en menos de 12mm. Para el escenario lejano, la mayor fuente de incerteza proviene del escenario de emisiones, pero también de los modelos en el caso del RCP8.5.

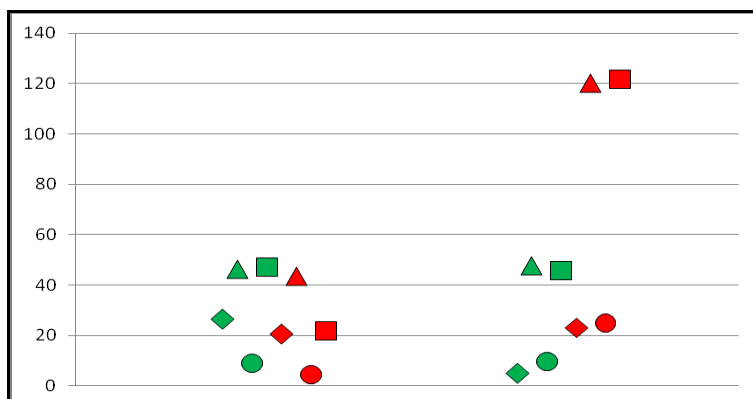
Las proyecciones del cambio en la duración de los periodos secos máximos del año van de -4 a +9 días, Figura 6.5.2.7, pero con un mayor número de casos con aumentos que con disminuciones. Estos aumentos continuarían la tendencia de 1960 -2010 hacia periodos secos más prolongados en el centro y norte de la región.



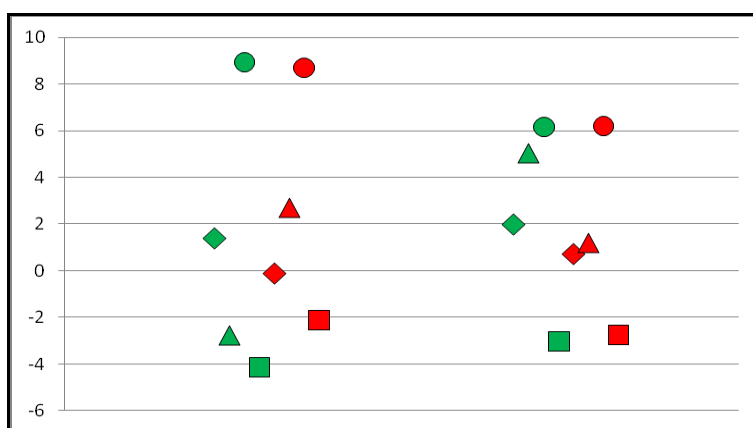
**Figura 6.5.2.4:** Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5



**Figura 6.5.2.5:** Ídem Figura 6.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)



**Figura 6.5.2.6:** Ídem Figura 6.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 6.5.2.7:** Ídem Figura 6.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 6.6 CONCLUSIONES

La temperatura media anual ha aumentado muy modestamente en la región Centro entre 1960 y 2010, 0,2°C en el promedio regional, mucho menos que en las otras regiones del país y del promedio global. Incluso, en el centro de la región se ha producido algún descenso de la temperatura media. Este aumento se debió en parte al aumento de la temperatura mínima mientras que la temperatura tuvo leves descensos (*Confianza alta*).

A pesar del modesto calentamiento promedio, los índices de extremos térmicos muestran cambios importantes con una disminución de los días con heladas, aumento de la cantidad de noches tropicales y de la temperatura mínima del año. Por otra parte no hubo un patrón definido para toda la región sobre las tendencias de los días con ola de calor (*Confianza alta*).

La precipitación media anual aumentó en casi toda la región, pero en el contexto de gran variabilidad interanual e interdecadal por lo que la tendencia no fue significativa estadísticamente. El aumento se produjo en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación (*Confianza media*).

Los indicadores de extremos que se asocian con potenciales desastres por inundaciones cambiaron moderadamente en forma consistente con las mayores precipitaciones, pero por otra parte aumentó el máximo de días consecutivos sin precipitación de cada año, lo que en esta región con una marcada estación seca es indicador de la prolongación de la misma (*Confianza alta*).

En los dos escenarios RCP, tanto para el futuro cercano como lejano, la región presenta calentamientos que van de 0 y 1°C en el futuro cercano hasta 2,5 a 3,5°C en el norte de la región en el futuro lejano. En todos los casos el calentamiento sería mayor en el norte que en el centro y sur de la región. Por otra parte, los aumentos de las temperaturas en esta región son menores que las de las regiones con las que limita al este y oeste (Húmeda y Andes). Este patrón geográfico continua lo observado en el periodo 1960-2010 (*Confianza media*).

Las proyecciones de las precipitaciones indican que no habrá mayores cambios en la precipitación en el futuro cercano (*confianza alta*), aunque la magnitud de los cambios presenta gran dispersión en el futuro lejano y no se podría descartar una tendencia a algunos aumentos moderados en Córdoba, San Luis y La Pampa (*confianza baja*). Las proyecciones de los índices de precipitaciones extremas para el siglo XXI presentan un patrón regional medio de predominante aumento, aunque con variaciones regionales, así como con el horizonte temporal y con el escenario de emisiones (*Confianza media*).

## Referencias

- Agosta, E. A., 2013: The 18.6-year nodal tidal cycle and the bi-decadal precipitation oscillation over the plains to the east of subtropical Andes, South America. *Int. J. Climatol.*, **34**, 1606–1614.
- Agosta, E. A., R. Compagnucci y W. Vargas, 1999: Cambios en el régimen interanual de la precipitación estival en la región Centro-Oeste Argentina. *Meteorológica*, **24**, 1–2, 63–84.
- Agosta, E. A. y R. H. Compagnucci, 2012: Central West Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections. *J. Climate*, **25**, 1657–1677.
- Agosta, E.A. y M.B. Barrucand, 2012: Condiciones medias de invierno y ondas cuasi-estacionarias de Rossby asociadas a la frecuencia invernal de noches frías y cálidas en Argentina subtropical. *Geoscientia*, **37(2)**, 147–146.
- Alexander, L.V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L.



Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci y J. L. Vazquez-Aguirre, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, Vol, **111**.

Barros, V., M. E. Castañeda y M. Doyle, 2000: Recent precipitation trends in Southern South America to the East of the Andes: an indication of a mode of climatic variability, 2000, Capitulo del libro “Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates, Concepts, Methods, Problems”, *Springer*.

Barros, V., M. E. Doyle e I. A. Camilloni, 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 19–33.

Barrucand, M. y M. Rusticucci, 2001: Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Variabilidad temporal y regional. *Meteorológica*, **26**, 85–101.

Compagnucci, R. H., E. A. Agosta y W. M. Vargas, 2002: Climatic change and quasi-oscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern Africa region. *Clim. Dyn.*, **18**, 421–435.

Fernández-Long, M. E., G. Müller, A. Beltrán-Przekurat A. y O. Scarpati O. E. 2012: Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina, *Int. J. Climatol.*, **33**, 1673–1686.

Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn y D. H. Lister, 2013: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623–642.

Haylock, M. R., T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. Anunciação, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. Garcia, A. M. Grimm, R. Jaido dos Anjos, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. Molion, D. F. Moncunill, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. I. Santos, L. Trebejo y L. Vincent, 2006: Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *J. Climate*, **19**, 1490–1512.

Krepper, C. M., B. V. Scian, y J. O. Pierini, 1989: Time and space variability of rainfall in central-east Argentina. *J. Climate*, **2**, 39–47.

Liebmann, B. y C. Vera, 2004: An observed trend in central South American precipitation. *J. Climate*, 4357–4367.

Mezher, R., M. Doyle y V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina, *Atmospheric Research*, **114–115**, 70–82.

Minetti, J. L. y W. M. Vargas, 1997: Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S, *Atmósfera*, **11**, 205–221.



- Minetti, J. L., W.M. Vargas, G. Poblete, L. Zerda, yL. Acuña, 2010: Regional droughts in southern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, **102** (3-4), 403–415.
- Naumann, G., M. Llano yW. M. Vargas, 2012: Climatology of the annual maximum daily precipitation in the La Plata Basin, *Int. J. Climatol.*, **32**, 247–260.
- Penalba, O. yW. Vargas, 2004: Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. Changes in the extreme precipitation seasonal cycle. *Int. J. Climatol.*, **24**, 12, 1565–1580.
- Penalba, O. yW. Vargas, 2008: Variability of low monthly rainfall in La Plata Basin. *Meteorological Applications*, **15**, 313–323.
- Penalba, O. y F. Robledo, 2010: Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change* **98**, 531–550.
- Penalba, O., J. Rivera, yV. Pántano, 2013: The CLARIS LPB database: constructing a long-term daily hydro-meteorological dataset for La Plata Basin, Southern South America. *Geoscience Data Journal*. En prensa.
- Re, M. y V. Barros, 2009: Extreme rainfalls in SE South America, *Climatic Change* **96**, 119–136.
- Rivera, J., O. Penalba, yM. Bettolli, 2013: Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *Int. J. Climatol.*, **33**, 834–842.
- Russián, G.F., E. Agosta y R. Compagnucci, 2010: Variabilidad interanual a interdecádica de la precipitación en Patagonia Norte, *Geoacta*, **35**, 27–43.
- Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2001: Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorológica*, **26**, 69–83.
- Rusticucci, M., y W. Vargas, 2001: Interannual variability of temperatura spells over Argentina, *Atmósfera*, **14**, 75–86.
- Schneider, U., 2013: GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical Theor. Appl. Climatol.*, **115**, 15–40.
- Vargas, W. M., G. Naumann y J. Minetti, 2006: Las Tendencias de la temperatura máxima y mínima en Series de Referencia del Sudeste de Sudamérica. Aspectos metodológicos. *Revista de Geografía*. **Año VIII, No 10**, 67–74.



Vincent, L.A., T. C. Peterson, V. Barros, M. B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L. M. Alves, T. Ambrizzi, M. A. Berlato, A. M. Grimm, J. A. Marengo, L. Molion, D. F. Moncunill, E. Rebello, Y. M. Anunciação, J. Quintana, J. L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M. R. Haylock y D. Karoly, 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000, *Climate*, **18**, 5011–5023.

## CAPITULO 7

### CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN ANDES

|              |  |          |
|--------------|--|----------|
| <b>7.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>  | pág. 212 |
| <b>7.1.1</b> | <b>Dominio espacial</b>  | pág. 213 |
| <b>7.1.2</b> | <b>Datos</b>   | pág. 213 |
| <b>7.2</b>   | <b>CAMBIOS Y TENDENCIAS</b>                                    | pág. 213 |
| <b>7.2.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 213 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 213 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 219 |
| <b>7.2.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 224 |
|              | <i>Precipitaciones medias</i>                                  | pág. 224 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>                                | pág. 229 |
| <b>7.2.3</b> | <b>Incerteza</b>   | pág. 235 |
| <b>7.2.4</b> | <b>Isoterma de 0°C</b>   | pág. 237 |
| <b>7.2.5</b> | <b>Otras variables</b>   | pág. 239 |
| <b>7.3</b>   | <b>VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES</b>                  | pág. 239 |
| <b>7.3.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 239 |
| <b>7.3.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 244 |
| <b>7.4</b>   | <b>ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)</b>                 | pág. 248 |
| <b>7.4.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 248 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 248 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 253 |
| <b>7.4.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 259 |
|              | <i>Precipitación media</i>                                     | pág. 259 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>                                | pág. 262 |
| <b>7.5</b>   | <b>EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b> | pág. 266 |
| <b>7.5.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 266 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 266 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 269 |
| <b>7.5.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 272 |
|              | <i>Precipitación media</i>                                     | pág. 272 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>                                | pág. 273 |
| <b>7.6</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | pág. 275 |
|              | <b>Referencias</b>   | pág. 276 |

## CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS EN LA REGIÓN ANDES

### 7.1 INTRODUCCIÓN

#### 7.1.1 Dominio espacial

La región a la que se refiere esta sección es la que comprende a las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza. Para el análisis de temperaturas y precipitación se definieron tres subregiones en base a las distintas características climáticas: la subregión NOA-Norte, provincias de Jujuy y Salta, la subregión NOA-Centro, provincias de Catamarca y La Rioja, y la subregión NOA-Sur, provincias de San Juan y Mendoza.

Los datos son muy pocos en la zona de alta montaña de las provincias de Salta, Catamarca y La Rioja. Esta restricción en las observaciones meteorológicas se aplica en general a toda la cordillera, aunque en menor medida en San Juan y Mendoza. Por lo tanto cabe advertir que los análisis y resultados de esta región no se aplican a las zonas de alta montaña.

#### 7.1.2 Datos

Las bases de datos utilizadas y las razones de su selección están descriptas en la sección 2.1 del capítulo 2. Se utilizó para la temperatura de superficie y la precipitación la base CRU TS3.1, producida en el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris y otros 2013) que tiene temperatura y precipitación mensual y se extiende en su versión 3.20 hasta el 2010 (<http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk>). Para la descripción de las tendencias de los índices de extremos se usó la base CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) donde están calculados siguiendo las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

Dada la baja resolución del conjunto de datos de la base ETCCDI empleada para el análisis de extremos, los promedios regionales se muestran sobre dos sub-regiones, lo más semejantes posibles a las empleadas en el análisis de temperatura y precipitación: NOA-N (Norte, promedio de los 3 puntos ubicados entre 22.5°S, 63,5°O y 25°S, 63,75°O y 67,5°O) y NOA-S (Sur, promedio de los 2 puntos ubicados entre 32.5°S, 67,5°O y 35°S, 67,5°O), donde se han observado señales coherentes. En cada una de las sub-regiones seleccionadas hay al menos dos estaciones sinópticas empleadas por el ETCCDI.

### 7.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

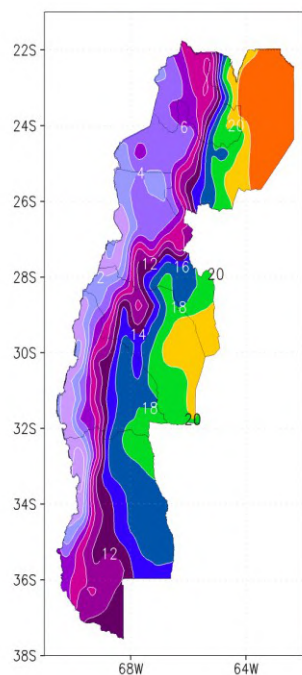
#### 7.2.1 Temperatura

##### *Temperaturas medias*

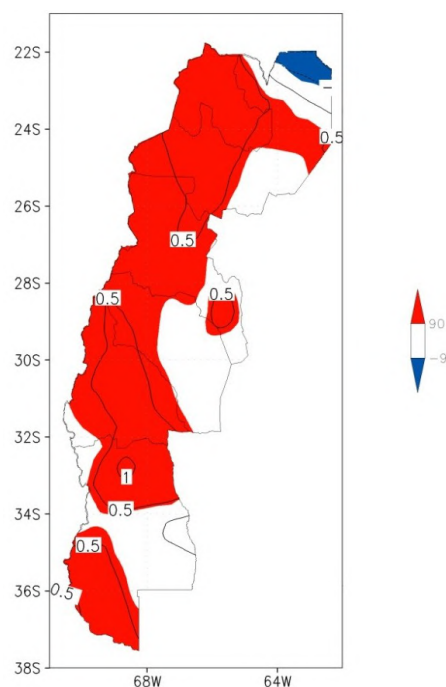
**La temperatura media anual aumentó (alta confianza) entre 1960 y 2010 sobre casi la totalidad de las subregiones NOA-Norte y Cuyo (alta confianza) y en muchas zonas en más de 0.5°C, siendo los cambios más notables los de la primavera, Figura 7.2.1.1b. Este incremento fue superior a 1°C sobre la región metropolitana de Mendoza. Para el período 1950-2010 el**

aumento de la temperatura media anual alcanzó a  $0,6^{\circ}\text{C}$  en promedio sobre toda la región, llegando a  $0,7^{\circ}\text{C}$  en Salta y Jujuy (significancia al 95%).

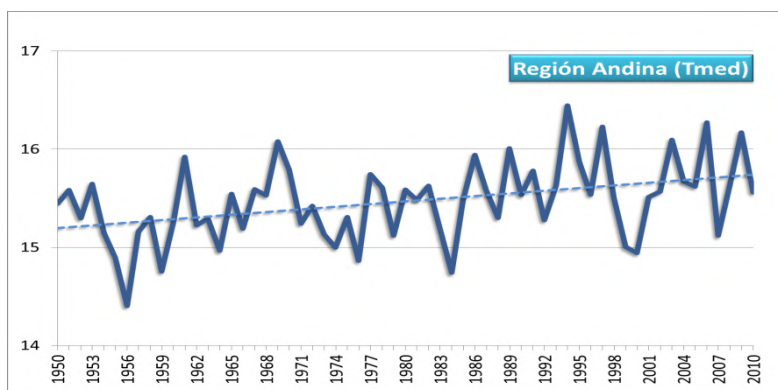
a)



b)



c)



**Figura 7.2.1.1:** a) Campo medio de la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en  $^{\circ}\text{C}$  por tendencia lineal para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; c) serie anual de la temperatura media integrada en las 6 provincias

Estos aumentos se deben a una tendencia positiva que se ha sostenido a lo largo del período, desde los valores menores observados a mediados de la década del 50 hasta los mayores registros a mediados de los 90s, Figura 7.2.1.1c.

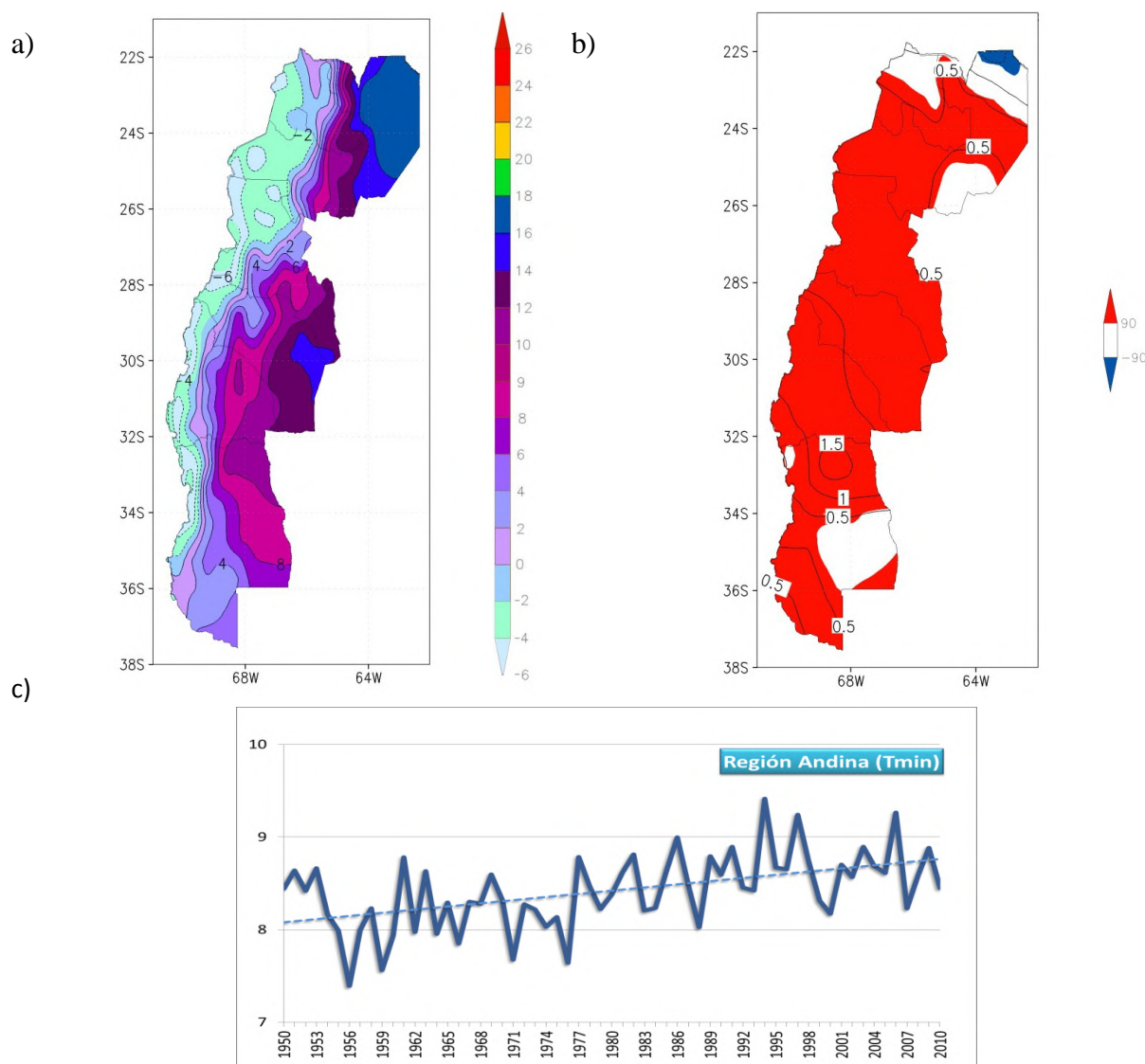
En el período 1950-2010 los mayores incrementos en la temperatura media se registraron en la primavera, sobre todo en Catamarca y La Rioja donde el cambio superó 1°C, seguido por el otoño con un cambio significativo superior a 0,7°C para Salta y Jujuy. La mayoría de estos cambios son significativos al 95% de confianza. Estos resultados son coherentes con los reportados por Agosta y Martín (2008) para la región centro-oeste del país (incluyendo NOA-Sur), sobre un incremento en la temperatura media estival de alrededor de 1°C en el período 1959-2004. Durante el invierno se observaron aumentos de la temperatura media en todas las subregiones, aunque ninguno de ellos es significativo.

|                             |               | <b>TEMPERATURA MEDIA 1950-2010</b> |              |      |              |              |
|-----------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|------|--------------|--------------|
|                             |               | DEF                                | MAM          | JJA  | SON          | ANUAL        |
| <b>Salta – Jujuy</b>        | <i>Medio</i>  | 20,0                               | 19,3         | 10,6 | 17,1         | 15,8         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>0,5**</b>                       | <b>0,7**</b> | 0,55 | <b>0,9**</b> | <b>0,7**</b> |
| <b>Catamarca - La Rioja</b> | <i>Medio</i>  | 25,1                               | 24,2         | 11,7 | 20,1         | 18,8         |
|                             | <i>Cambio</i> | 0,4                                | 0,3          | 0,4  | <b>1,1**</b> | <b>0,5**</b> |
| <b>Mendoza - San Juan</b>   | <i>Medio</i>  | 18,3                               | 17,5         | 5,2  | 12,1         | 11,8         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>0,5*</b>                        | <b>0,6**</b> | 0,3  | <b>0,8**</b> | <b>0,5**</b> |
| <b>REGION ANDES</b>         | <i>Medio</i>  | 20,6                               | 19,9         | 9,0  | 16,1         | 15,2         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>0,5**</b>                       | <b>0,6**</b> | 0,4  | <b>0,9**</b> | <b>0,6**</b> |

**Tabla 7.2.1.1:** Valores medios y cambios de la temperatura media para la región Andes y para 3 subregiones (°C). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

En casi la totalidad de la región Andes la temperatura mínima media aumentó en el período 1960-2010, en algunas localidades en más de 0,5°C y en más de 1°C en el norte de Cuyo, alcanzando a superar 1,5°C sobre el oasis norte de Mendoza (alta confianza), siendo los cambios más marcados en la primavera, Figura 7.2.1.2b. Consistentes con estos resultados, trabajos previos han mostrado en la subregión de Cuyo un aumento en el porcentaje de noches cálidas y una disminución en el porcentaje de las noches frías, estadísticamente significativos al 95% (Vincent y otros 2005). El cambio medio durante el período 1950-2010 alcanza los 0,7°C (Tabla 7.2.1.2) para toda la región, siendo las provincias de Catamarca y La Rioja las que mayores aumentos presentan, 0,8°C, todos significativos al 95% (Tabla 7.2.1.2). Este incremento de la temperatura mínima en la región se vio reforzado por un salto abrupto a mediados de la década de 1970, a partir del cual hubo una tendencia positiva sostenida, Figura 7.2.1.2c. El cambio relativamente rápido ocurrido alrededor de los años 1977/78 ha sido observado también en variables como la precipitación estival para gran parte de la región (Agosta 2013; Agosta y Compagnucci 2012). Al igual que lo ocurrido con la temperatura media, las temperaturas mínimas también muestran sus menores valores a mediados de la década de 1950 y sus registros mayores durante los '90.





**Figura 7.2.1.2:** Ídem Figura 7.2.1.1, pero para la temperatura mínima anual ( $^{\circ}\text{C}$ )

Los mayores incrementos de la temperatura mínima en la región Andes entre los años 1950 y 2010 se observan en la primavera, con un aumento medio de  $1^{\circ}\text{C}$ , siendo las provincias de Catamarca y La Rioja las que mayor variación muestran superando  $1^{\circ}\text{C}$ ; seguidos por los aumentos registrados en verano, de  $0,8^{\circ}\text{C}$ , sobre todo en Cuyo (Tabla 7.2.1.2). Estos resultados son consistentes con los hallados en trabajos previos, donde se muestra que el verano es la época con la mayor disminución de noches frías, especialmente en el período 1964-1979 (Barrucand y otros 2008). En este sentido, estos autores también hallan tendencias negativas en la frecuencia de noches frías para estaciones meteorológicas de las subregiones NOA-Norte y Sur. Los menores incrementos se observan en invierno, con variaciones marginales positivas aunque no significativas.

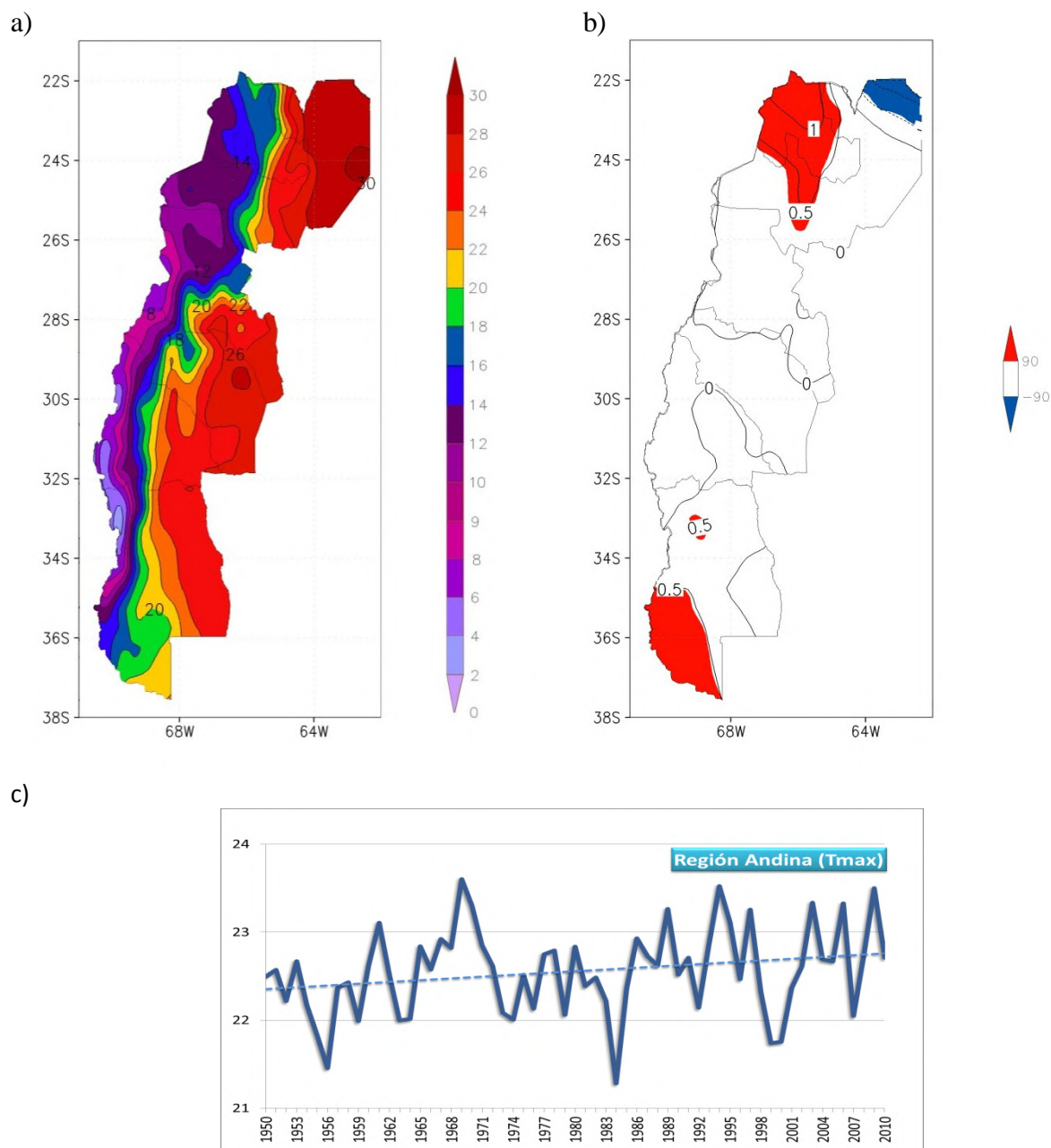
|                             |        | <b>TEMPERATURA MÍNIMA 1950-2010</b> |             |      |              |              |
|-----------------------------|--------|-------------------------------------|-------------|------|--------------|--------------|
|                             |        | DEF                                 | MAM         | JJA  | SON          | ANUAL        |
| <b>Salta – Jujuy</b>        | Medio  | 13,7                                | 9,0         | 2,5  | 9,3          | 8,6          |
|                             | Cambio | <b>0,7**</b>                        | <b>0,6*</b> | 0,4  | <b>0,7**</b> | <b>0,6**</b> |
| <b>Catamarca - La Rioja</b> | Medio  | 18,2                                | 11,8        | 4,3  | 12,5         | 11,7         |
|                             | Cambio | <b>0,7**</b>                        | 0,6         | 0,5  | <b>1,2**</b> | <b>0,8**</b> |
| <b>Mendoza - San Juan</b>   | Medio  | 11,0                                | 5,1         | -1,4 | 4,9          | 4,9          |
|                             | Cambio | <b>0,8**</b>                        | <b>0,6*</b> | 0,5  | <b>1,0**</b> | <b>0,7**</b> |
| <b>REGION ANDES</b>         | Medio  | 13,9                                | 8,3         | 1,6  | 8,6          | 8,1          |
|                             | Cambio | <b>0,8**</b>                        | <b>0,6*</b> | 0,4  | <b>0,9**</b> | <b>0,7**</b> |

**Tabla 7.2.1.2:** Ídem Tabla 7.2.1.1, pero para la temperatura mínima

Entre 1960 y 2010, las temperaturas máximas, sólo tuvieron incrementos significativos (al 95% de confianza) superiores a 0,5°C en los extremos norte y sur de la región, Figura 7.2.1.3b. La mayor variación anual se dio en la subregión Norte (sobre todo en la provincia de Jujuy), con un incremento medio entre los años 1950 y 2010 superior a 0,7°C (significativo al 95% de confianza), e incrementos marginales para las demás subregiones (Tabla 7.2.1.3). El cambio medio en la región superó 0,4°C (significativo al 90%), debido principalmente al incremento observado en la zona norte. La serie de valores medios de temperatura máxima anual presenta gran variabilidad, con una tendencia positiva sostenida durante todo el período, Figura 7.2.1.3c. Adicionalmente, los años previos a la década de 1970 presentan mayor variabilidad y tendencia que los años posteriores, lo cual también podría relacionarse con el aumento de las precipitaciones estivales a partir de esa década sobre la región de los llanos, lo cual pudo reducir la variabilidad y tendencia de las temperaturas máximas por una mayor frecuencia de días nublados.

|                             |        | <b>TEMPERATURA MAXIMA 1950-2010</b> |      |             |              |              |
|-----------------------------|--------|-------------------------------------|------|-------------|--------------|--------------|
|                             |        | DEF                                 | MAM  | JJA         | SON          | ANUAL        |
| <b>Salta – Jujuy</b>        | Medio  | 26,3                                | 21,8 | 18,8        | 24,9         | 23,0         |
|                             | Cambio | 0,4                                 | 0,6  | <b>0,8*</b> | <b>1,2**</b> | <b>0,7**</b> |
| <b>Catamarca - La Rioja</b> | Medio  | 32,1                                | 24,9 | 19,0        | 27,6         | 25,9         |
|                             | Cambio | -0,0                                | -0,2 | 0,4         | <b>1,0**</b> | 0,3          |
| <b>Mendoza - San Juan</b>   | Medio  | 25,5                                | 18,5 | 11,9        | 19,4         | 18,8         |
|                             | Cambio | 0,2                                 | -0,0 | 0,1         | <b>0,6*</b>  | 0,2          |
| <b>REGION ANDES</b>         | Medio  | 27,0                                | 21,4 | 16,5        | 23,7         | 22,3         |
|                             | Cambio | <b>0,2*</b>                         | 0,2  | 0,4         | <b>0,9**</b> | <b>0,4**</b> |

**Tabla 7.2.1.3:** Ídem Tabla 7.2.1.1, pero para la temperatura máxima



**Figura 7.2.1.3:** Ídem figura 7.2.1.1, pero para la temperatura máxima anual ( $^{\circ}\text{C}$ )

Los incrementos en las temperaturas máximas se deben principalmente a los aumentos significativos (al 95% de confianza) en primavera, superiores a  $0,9^{\circ}\text{C}$ , principalmente observados en las subregiones Norte y Centro. Las demás estaciones del año tuvieron aumentos no significativos, e incluso algunas subregiones muestran disminuciones para algunas estaciones (como Catamarca y La Rioja en otoño, con un valor de  $-0,2^{\circ}\text{C}$ ). Estos resultados son consistentes con los encontrados por Rusticucci y Barrucand (2004), quienes encontraron tendencias negativas

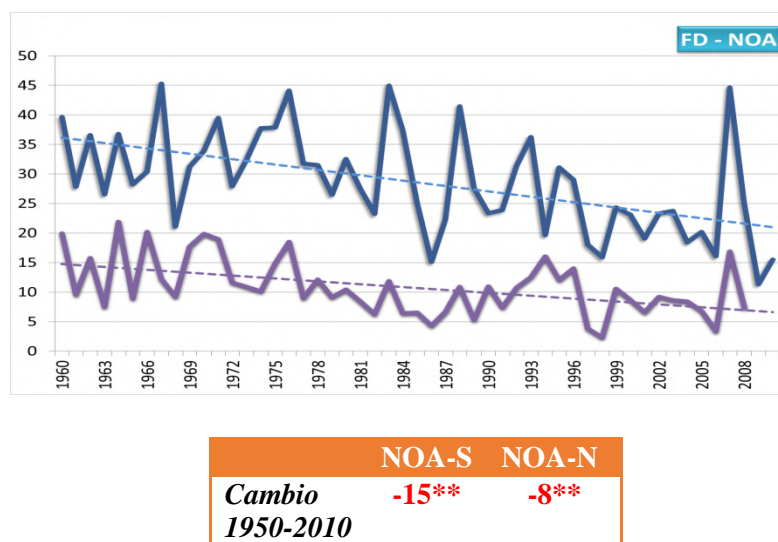
de la temperatura máxima para la estación cálida, y positivas para la estación fría, a lo largo del período 1959-98.

### ***Extremos térmicos***

En general, la literatura presenta análisis globales y en los casos de trabajos específicos sobre la Argentina, no se refieren a la región Andes, debido en parte a la escasa cantidad de series prolongadas y completas en la región, lo que es una deficiencia mayor en áreas con topografía compleja. Por ello se ha recurrido fundamentalmente al análisis de la base ETCCDI para el período comprendido entre 1960 y 2010.

**Del análisis conjunto de los distintos índices se destacan cambios más significativos en los extremos fríos (días con helada, o temperaturas mínimas extremas) caracterizados por una reducción en sus condiciones extremas (confianza alta).**

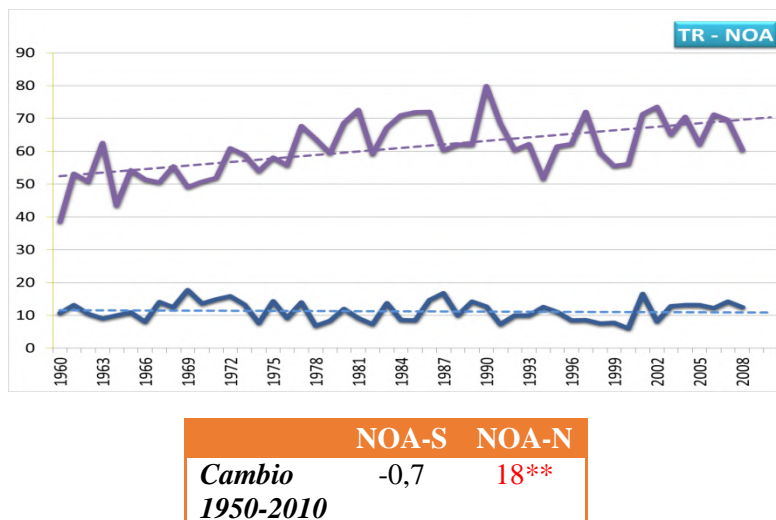
La región presenta disminuciones en los días con heladas, con valores significativos al 90% ó 95%, que varían entre -3 y -24 días en toda la región excepto entre las provincias de San Juan y La Rioja, Figura 2.2.4 (Ver capítulo 2), donde la tendencia es positiva pero no significativa. En magnitud estos cambios son importantes, ya que en muchos casos son mayores al 50% del valor total del índice. La Figura 7.2.1.4 muestra la variabilidad interanual del cambio, que es más marcada en la región sur.



**Figura 7.2.1.4:** Promedio regional del número de días con heladas definido como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue menor a 0°C y cuadro por subregión. NOA-S en azul y NOA-N en violeta. \* al 90% de confianza, \*\* al 95% de confianza

En el número de días en el año con temperatura mínima diaria mayor a 20°C (noches tropicales) hubo una gran variabilidad dentro de la región, Figura 2.2.5. Además de la dependencia con la latitud, es un índice muy afectado por la altura sobre el nivel del mar, presentando fuertes contrastes entre zonas altas (donde hay menos noches tropicales) y bajas a una misma latitud (por ejemplo en Salta). El cambio de este índice, Figura 2.2.5, presenta un comportamiento diferente

entre las regiones norte y sur. En las provincias de Jujuy y Salta, los cambios son positivos y significativos al 95%. En la zona límite entre Jujuy, Chile y Bolivia, el cambio sería casi igual a la magnitud del índice. A partir de La Rioja y hacia el sur (San Juan y Mendoza), el índice presenta cambios negativos, pero la zona sur en conjunto no muestra una tendencia determinada.



**Figura 7.2.1.5:** Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el número de noches tropicales definido como número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20°C (TR)

El análisis de la variabilidad interanual, Figura 7.2.1.5, muestra una tendencia clara al aumento de noches tropicales en el NOA-N, significativo al 95%, con una mayor tendencia antes de los 80s y atenuada posteriormente. En estas series se ha descartado el valor de los años 2009 y 2010 por considerárselos poco confiables en relación con los valores típicos de la variable.

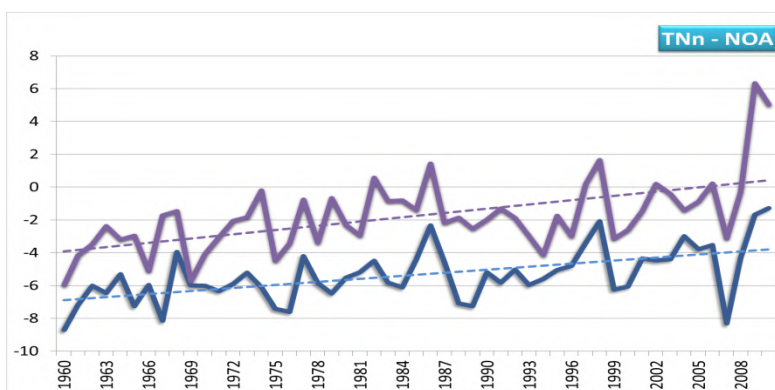
De la combinación de los índices FD y TR, en Jujuy, Salta y Catamarca, existe una disminución de días con helada y un aumento de noches tropicales, en tanto hacia el sur, y particularmente en Mendoza, se observa una disminución de días con helada pero también una disminución de noches tropicales.

A pesar de trabajar con otro período (1959-1998), los resultados de Rusticucci y Barrucand (2004), coinciden con estas conclusiones y permiten complementar la estacionalidad de este cambio; en invierno no encontraron tendencias significativas pero en verano hallaron un aumento significativo del número de noches cálidas en NOA-N y NOA-S y una disminución en NOA-S de las noches frías. En la franja central andina, encontraron un aumento de los días fríos y una disminución de los días cálidos.

La señal de cambio del valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria es coherente en toda la región, con signo positivo (la mayoría cercanos a 3°C) y significativa al 95%, salvo entre San

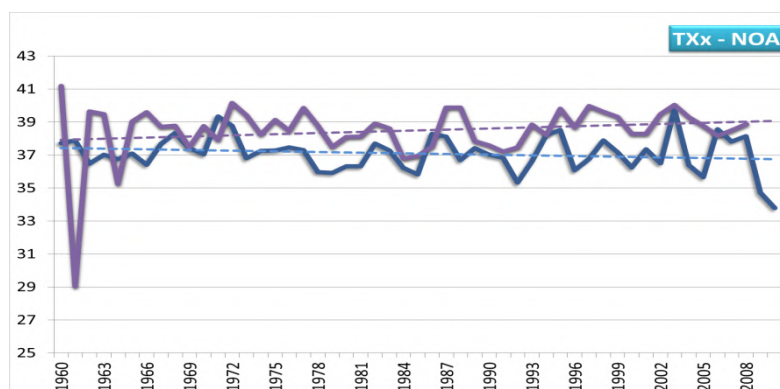


Juan y La Rioja donde la mayoría de los índices no cambian significativamente, Fig. 2.2.6. Este resultado coincide con lo documentado por Rusticucci y Tencer (2008) para el período 1953-2003 en el que las estaciones sinópticas del NOA tuvieron un incremento significativo de lo que denominan “las más bajas temperaturas mínimas”.



**Figura 7.2.1.6:** Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima (TNn) en °C

En la evolución temporal de TNn se evidencia que la tendencia tiene un comportamiento distinto antes y después de los 80; las primeras décadas tienen una tendencia definida (positiva y más marcada en NOA-N) y las últimas denotan una oscilación cuasi-decadal superpuesta con una tendencia decreciente en ambas regiones, Figura 7.2.1.6. TNn tuvo una variabilidad interanual muy semejante en toda la región. En relación con los ciclos de variabilidad de los extremos térmicos, Barrucand y otros (2008) identifican un pico cercano a los 8 años que es más evidente durante la primavera en los extremos fríos.

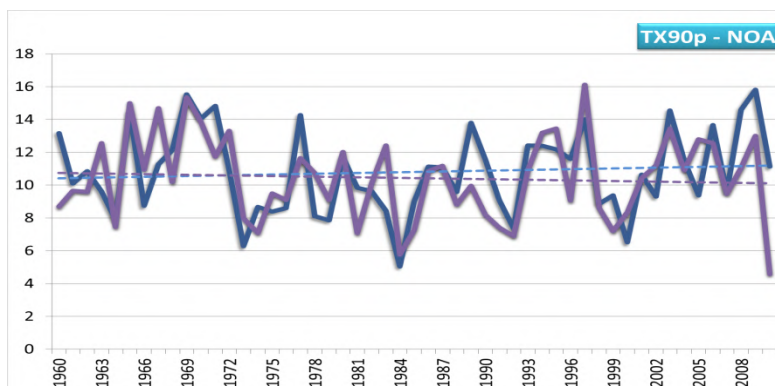


|                  | NOA-S | NOA-N |
|------------------|-------|-------|
| <b>Cambio</b>    | -0,6  | 1     |
| <b>1950-2010</b> |       |       |

**Figura 7.2.1.7:** Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima (TX) en °C

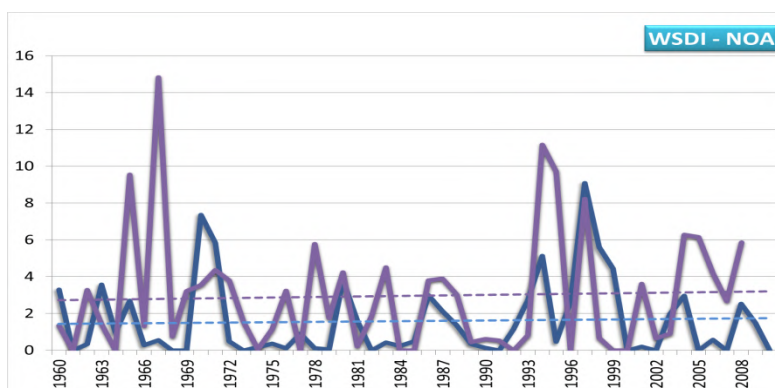


Los cambios en el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima no son significativos salvo en el extremo Noroeste, Figura 2.2.7, donde hay un aumento de 3°C. En todos los puntos, excepto en esa zona, el cambio no excede el grado centígrado en los 50 años de análisis.



|                         | NOA-S | NOA-N |
|-------------------------|-------|-------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | 0,7   | -0,6  |

**Figura 7.2.1.8:** Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 (TX90p) en%



|                         | NOA-S | NOA-N |
|-------------------------|-------|-------|
| <b>Cambio 1950-2010</b> | 0,3   | 0,5   |

**Figura 7.2.1.9:** Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el índice de la duración de olas de calor definido como el número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el respectivo valor del percentil 90 (WSDI)

El comportamiento de TX90p prácticamente no presenta cambios en el período, y los pequeños cambios que registra no son significativos en ninguno de los puntos analizados, Figura 2.2.8 y Figura 7.2.1.8.

Los cambios en el índice de olas de calor no son significativos en ningún punto de la región, Figura 2.2.9, y no se puede distinguir un patrón regional. La presencia de altos valores del índice en la primera parte del período (alrededor del año 1966) y la tendencia positiva desde 1990, hacen que no se evidencie una tendencia de largo plazo clara, Figura 7.2.1.9.

Los resultados obtenidos para este informe así como también los relevados de la literatura marcan que la región NOA ha sido afectada por un incremento de la temperatura media que es mayormente explicada por el incremento de la temperatura mínima. En términos estacionales, los cambios han sido más marcados en primavera y verano y en general no han sido significativos en invierno. Si bien la región tiene un comportamiento homogéneo en lo que refiere a temperaturas medias, mínimas y máximas, no necesariamente se observa lo mismo en relación con los valores extremos, donde se han encontrado comportamientos opuestos al norte y al sur, por ejemplo en la cantidad de noches tropicales.

Del análisis conjunto de los distintos índices se desprende una tendencia a cambios más marcados en lo que hace a los extremos fríos (días con helada, o temperaturas mínimas extremas) con valores menos extremos. En cuanto a la variabilidad temporal, varias de las cantidades analizadas muestran tendencias diferentes antes y después de las décadas de 1970 o de 1980 según el caso.

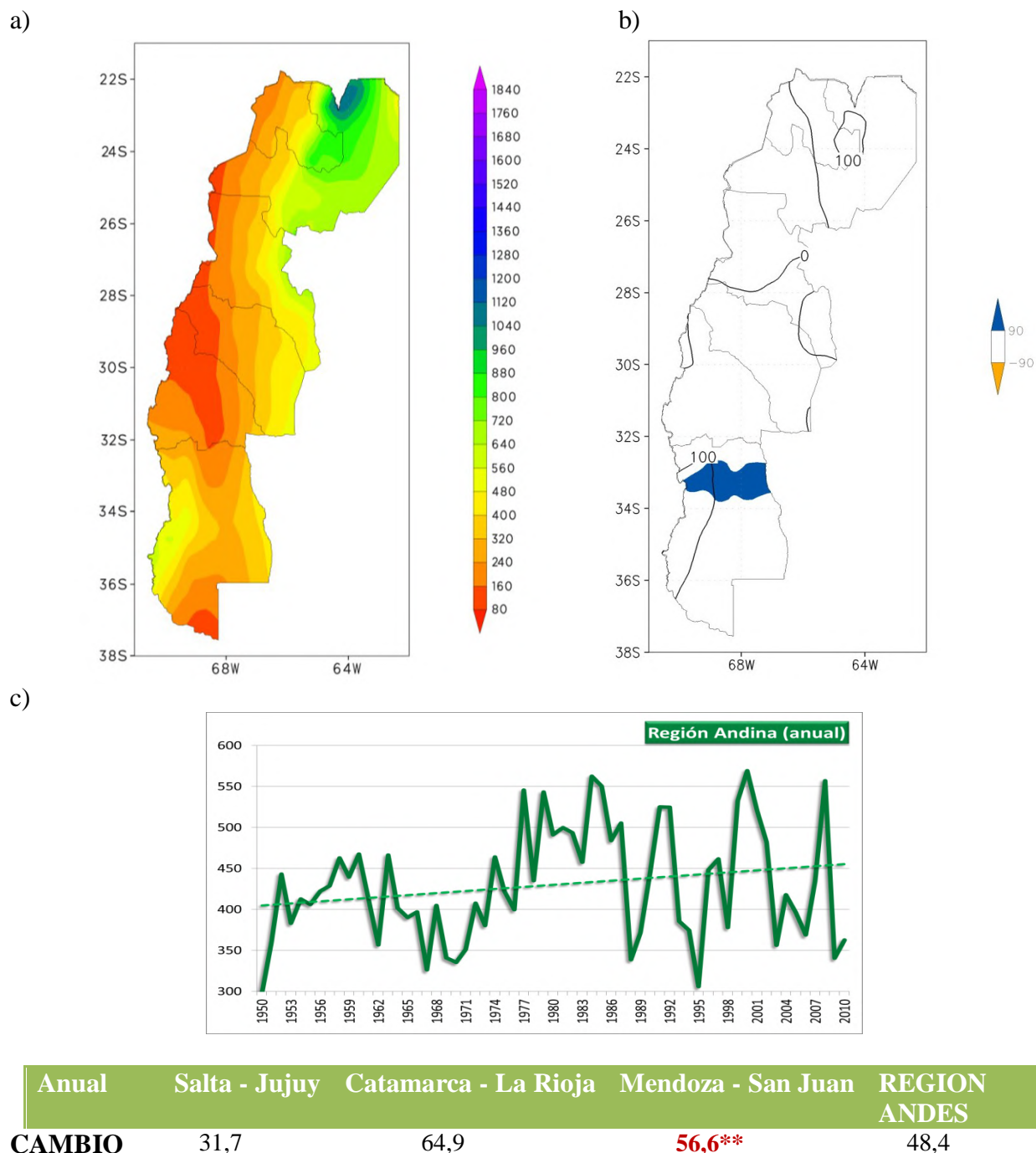
### 7.2.2 Precipitación

#### *Precipitaciones medias*

**Entre los años 1960 y 2010, la precipitación anual en la región Andes aumentó en la mayor parte de la región Andes con excepción de la provincia de Catamarca, con valores significativos superiores a 100 mm sobre el norte de Mendoza (confianza media), Figura 7.2.2.1b.**

Estas tendencias se encuentran en concordancia con las reportadas por Castañeda y Barros (1994), y Barros y otros (2008); quienes señalan tendencias positivas significativas en toda la región entre 1956-91, y significativas positivas entre 1960-99 sobre NOA-Centro y Sur con mayores valores de octubre a marzo, respectivamente. Consistentemente, Minetti y otros (2010) observaron una disminución en la ocurrencia de sequías sobre las regiones del norte y centro oeste del país y Masiokas y otros (2006) reportaron una tendencia positiva, aunque no significativa, en el equivalente agua-nieve sobre las altas cumbres de la subregión NOA-Sur. Empero, cabe recordar que debido a la ausencia de series prolongadas de datos en la cordillera, los posibles cambios deben inferirse de otras variables como los caudales de los ríos y estos han mostrado en el norte de Mendoza y sur de San Juan fuertes variaciones interdecadales dentro de una leve tendencia negativa durante el siglo XX (Camilloni, 2006).

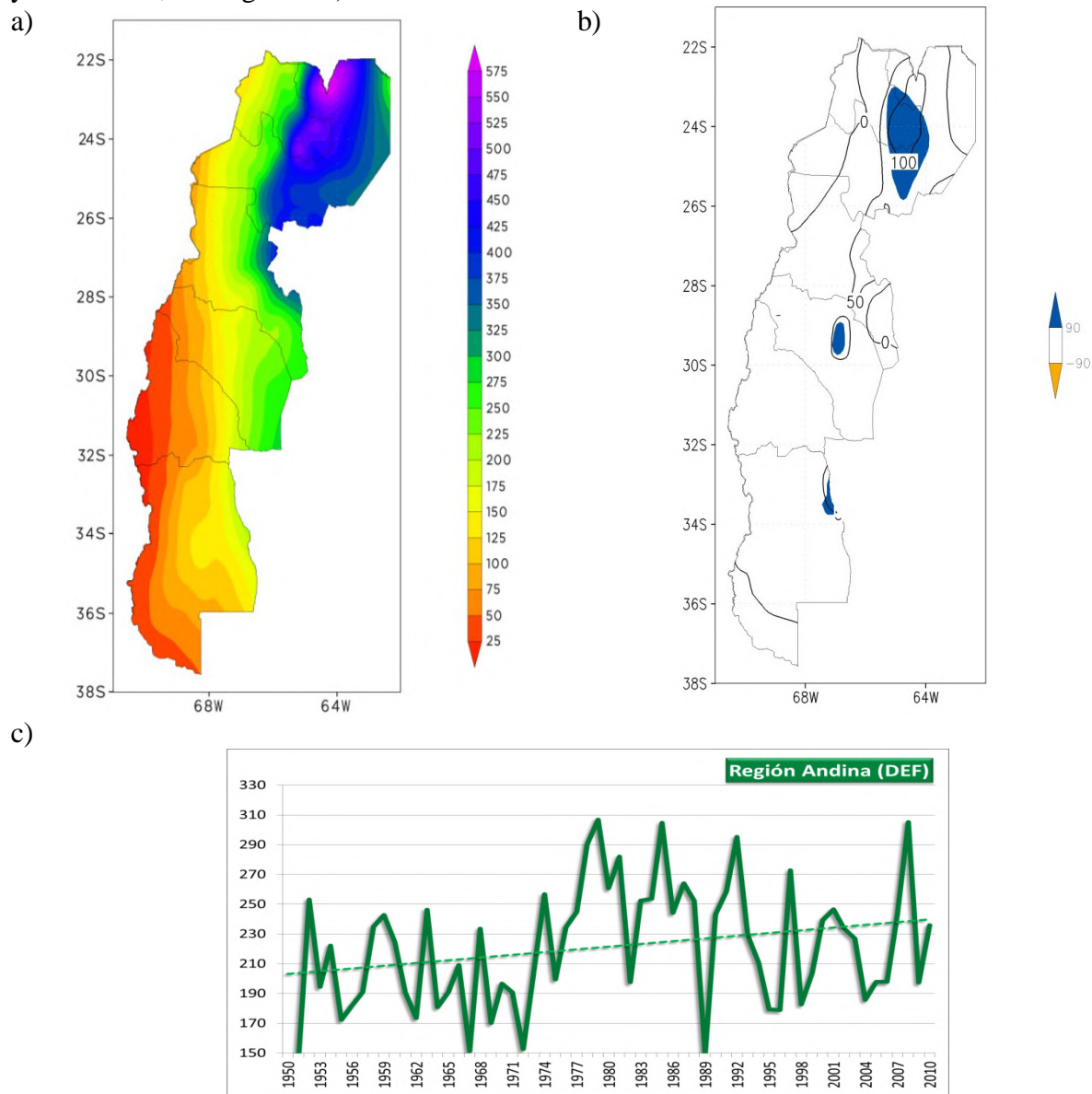
Estos cambios se han debido principalmente a un salto abrupto en la serie de valores medios sobre la región producido a mediados de la década del '70, sobre todo en la estación cálida (Agosta 2013; Agosta y Compagnucci, 2012) Figura 7.2.2.1c.



**Figura 7.2.2.1:** a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960/2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, c) Serie del promedio regional de precipitación anual y cuadro de cambios por provincias con \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

Las mayores precipitaciones se observan en la década del '80, registrándose una disminución en los años posteriores que no alcanza a revertir la tendencia positiva inicial. Debido a ello, otros

autores han reportado tendencias negativas sobre la subregión NOA-Norte, San Juan y el norte de Mendoza, para el período que va desde finales de los '70 hasta principios de los 2000 (Liebmann y otros 2004; Labraga 2010).



| DEF    | Salta - Jujuy | Catamarca - La Rioja | Mendoza - San Juan | REGION ANDES |
|--------|---------------|----------------------|--------------------|--------------|
| CAMBIO | 30,8          | 54,2                 | 24,4**             | 34,4         |

**Figura 7.2.2.2:** Ídem Figura 7.2.2.1, pero para el verano

Para el período 1950-2010 todas las sub-regiones muestran aumentos de la precipitación media anual, pero el único significativo se observa en la subregión NOA -Sur.

Es importante señalar que la Figura 7.2.2.1c, al incluir datos desde la década del 50 hasta el año 2010, incluye un período muy seco al principio que acentúa la tendencia positiva. Los distintos trabajos citados, al estudiar diferentes sub-períodos, pueden estar resaltando otros comportamientos ya que es claro que superpuesta con la tendencia de largo plazo, se han producido variaciones interdecadales que son sumamente importantes.

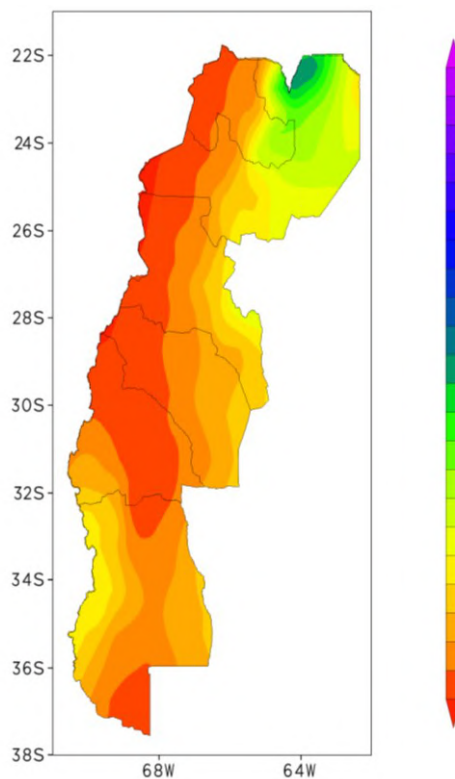
En el caso de las precipitaciones de verano se observan cambios con las mismas características que en el caso anual para el período 1960-2010, con aumentos sobre todo en el Chaco jujeño, significativos al 90% de confianza, Figura 7.2.2.2b. También las series de verano presentan un salto a mediados de los '70, y los aumentos del periodo 1950-2000 en la subregión de NOA-Sur son los únicos significativos al 95% de confianza en la región.

En el otoño, hubo aumentos significativos de precipitación que superan los 100 mm en algunas zonas al oeste de Cuyo para el período 1960-2010, Figura 7.2.2.3b. Toda la región se ve caracterizada por cambios significativos al considerar el período 1950-2010, ya que la década del '50 presenta los menores valores medios en toda la región, lo cual refuerza la tendencia positiva, Figura 7.2.2.3c. El otoño es la única estación del año que presenta un aumento significativo al 95% de confianza que resulta más acentuado en la zona de Cuyo.

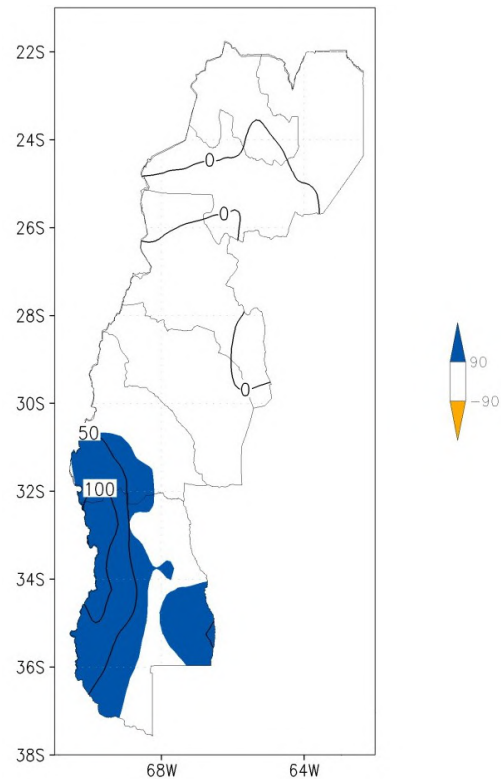
En el invierno, para el período 1960-2010, se observan tendencias negativas en casi la totalidad de la región, a excepción de la provincia de Mendoza, con valores significativos al 90% de confianza, Figura 7.2.2.4b.

Los cambios negativos de precipitación también se generalizan a toda la región en el caso de la primavera, con una disminución media de -13 mm, aunque no significativa, Figura 7.2.2.5. La tendencia negativa es sostenida durante todo el período 1950-2010.

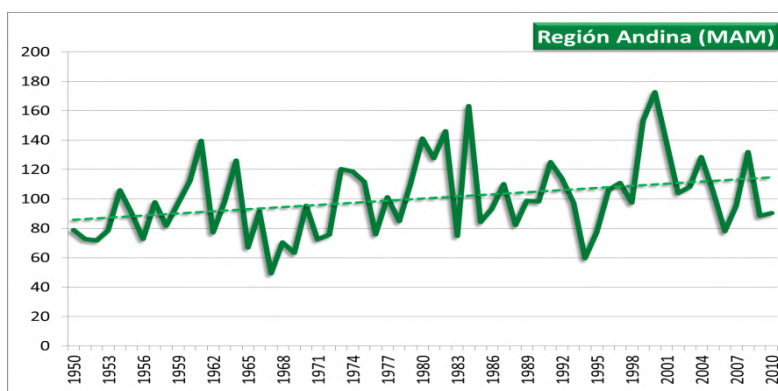
a)



b)



c)

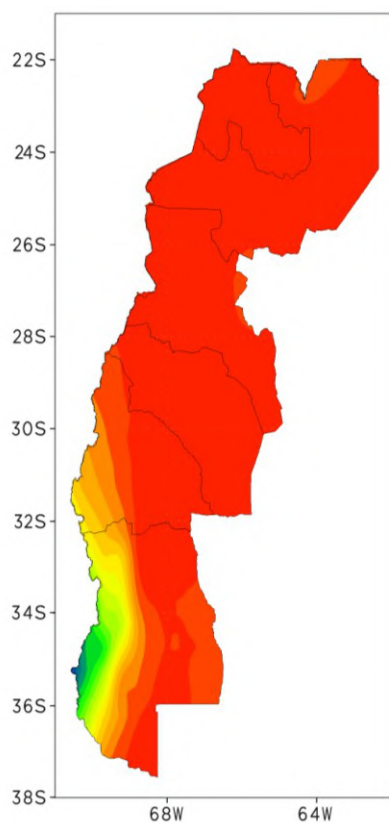


| MAM    | Salta - Jujuy | Catamarca - La Rioja | Mendoza - San Juan | REGION ANDES |
|--------|---------------|----------------------|--------------------|--------------|
| CAMBIO | 28,0*         | 28,9**               | 31,6**             | 29,5**       |

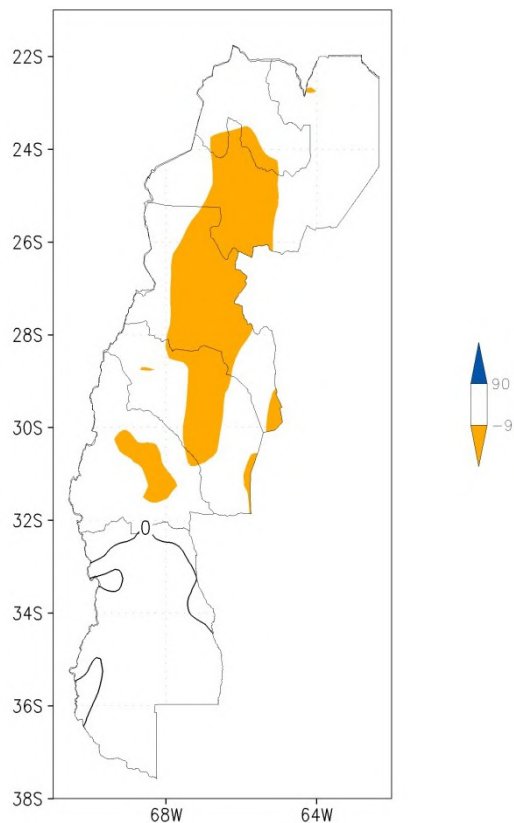
**Figura 7.2.2.3** Ídem Figura 7.2.2.1, pero para el otoño



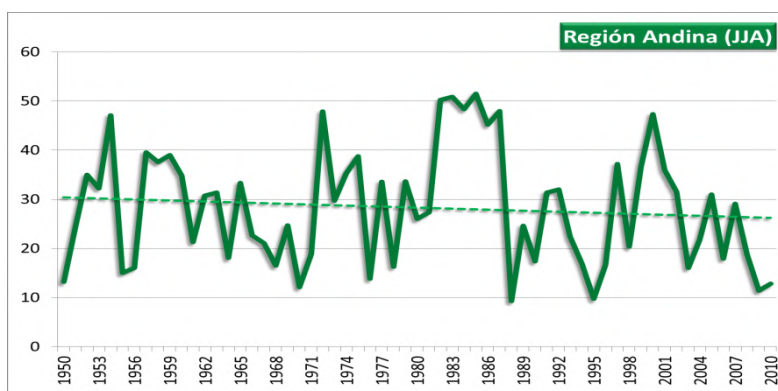
a)



b)



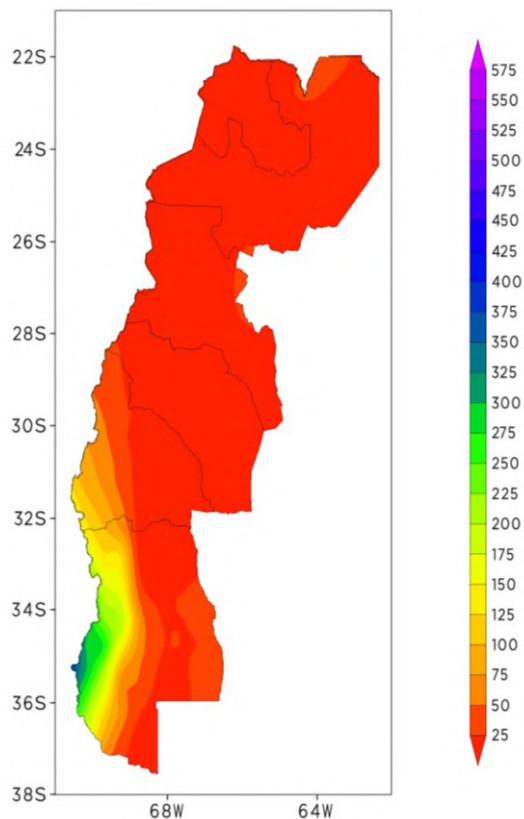
c)



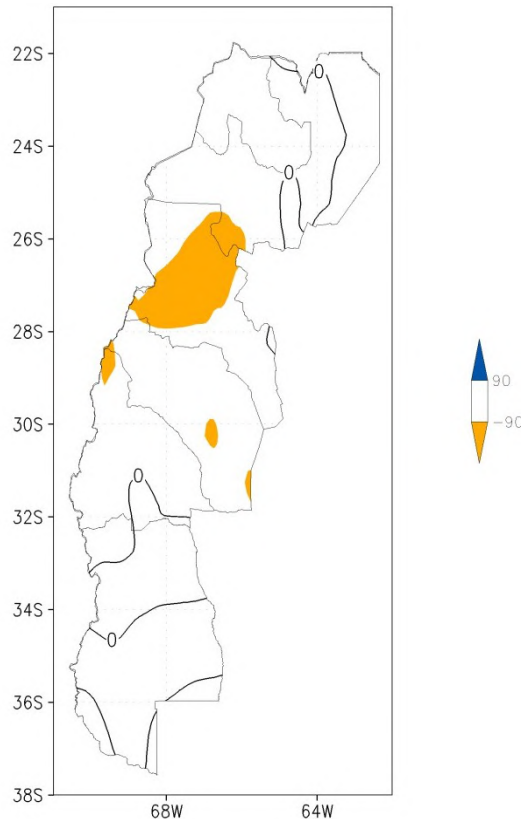
| JJA    | Salta - Jujuy | Catamarca - La Rioja | Mendoza - San Juan | REGION ANDES |
|--------|---------------|----------------------|--------------------|--------------|
| CAMBIO | -9,4**        | -7,0*                | 3,8                | -4,3         |

**Figura 7.2.2.4:** Ídem Figura 7.2.2.1, pero para el invierno

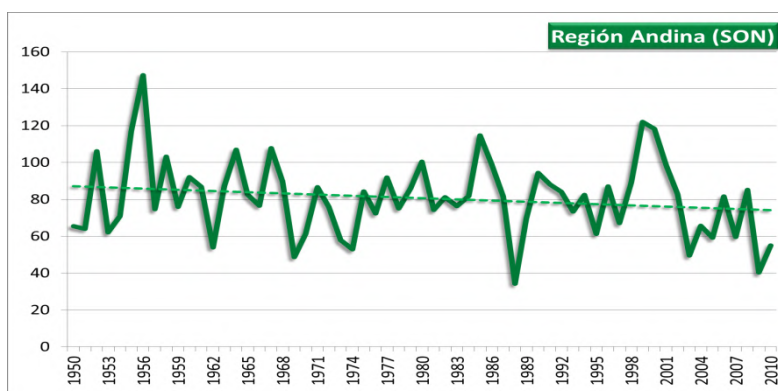
a)



b)



c)



| SON    | Salta - Jujuy | Catamarca - La Rioja | Mendoza - San Juan | REGION ANDES |
|--------|---------------|----------------------|--------------------|--------------|
| CAMBIO | -14,1         | -18,6                | -6,6               | -12,6        |

**Figura 7.2.2.5:** Ídem Figura 7.2.2.1, pero para la primavera

Como los caudales de los ríos que alimentan los oasis de riego de las provincias de San Juan y Mendoza dependen fundamentalmente de las precipitaciones en la cordillera, estas son muy relevantes para la vida, la economía y las ciudades de estos oasis. Por lo tanto es importante comentar el estado del conocimiento sobre estas precipitaciones. Como ya se mencionó, Masiokas y otros (2006) informaron una tendencia positiva, aunque no significativa, en el

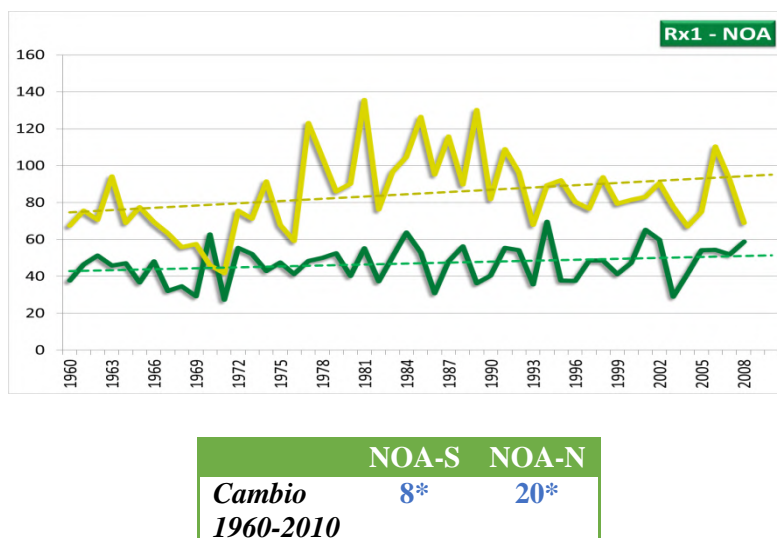
equivalente agua-nieve sobre las altas cumbres de la subregión a partir de seis estaciones, cuatro de las cuales reportan esos valores desde la década de 1950. Sin embargo estas series muestran una gran variabilidad anual e interdecadal con un mínimo alrededor de 1970 y desde entonces una fuerte tendencia positiva hasta 1987. A partir de este año, la tendencia se revierte siendo fuertemente negativa. Las tendencias y variaciones anuales e interdecadales de los ríos de la región son similares y los caudales medios anuales de diez ríos de Cuyo y Chile se correlacionan fuertemente (0,95) con la precipitación medida sobre la cordillera (Masiokas y otros, 2006). Se puede concluir que los caudales de los ríos pueden ser una medida aproximada de la precipitación sobre la cordillera antes de 1950, como es el caso de tres ríos que presentan la misma variabilidad que esta precipitación a partir de esa fecha y que cuentan con medidas de aforo de sus caudales desde comienzos del siglo pasado. Son los ríos San Juan, Los Patos y Atuel que con una tendencia negativa de largo plazo y gran variabilidad interanual tuvieron un descenso en sus caudales hasta comienzos de la década de 1970 y luego un pronunciado tren positivo hasta fines de la década de 1980 en que volvieron a presentar una tendencia negativa (Camilloni, 2006; Masiokas y otros, 2006).

### ***Precipitaciones extremas***

Debe destacarse que en los índices que involucran precipitación, la cantidad de datos faltantes es mucho mayor que en el caso de la temperatura lo cual acota el grado de confianza de los resultados. En particular los puntos 27,5°S, 67,5°O (representativo de Catamarca); 25°S, 67,5°O (representativo del oeste de Salta); 22,5°S, 67,5 °O (representativo de Jujuy) y 22,5°S, 63,5°O (representativo del noreste de Salta) presentan muchos años datos faltantes en Rx5 y en R95p.

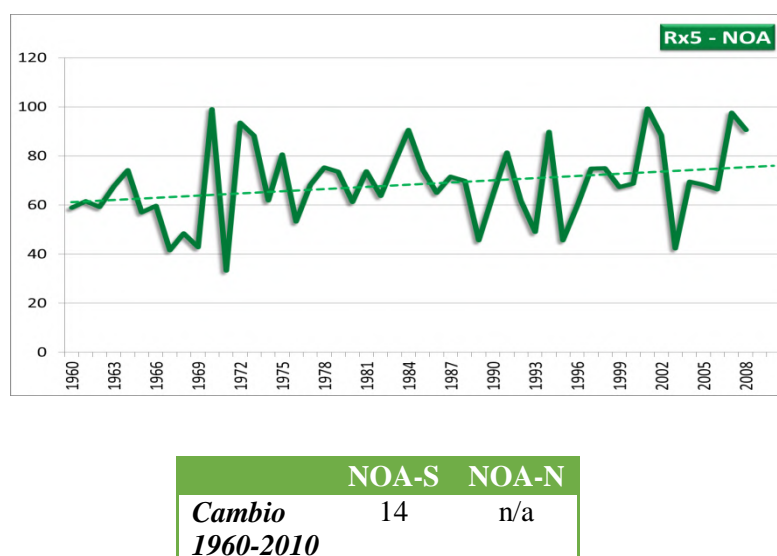
**La región muestra un aumento significativo de la máxima anual de precipitación diaria, particularmente en Salta y Mendoza (confianza media). Combinando el análisis de índices de precipitación extrema con el índice de longitud de rachas secas, se puede concluir que ha habido cambios en el régimen de precipitación. Hubo una tendencia a que la lluvia se acumule en pocos días en que resulta más intensa entre períodos sin lluvia relativamente más largos (confianza media).** También habría un aumento significativo de la máxima precipitación acumulada en 5 días en Mendoza, pero este cambio es menos confiable dada la gran cantidad de datos faltantes. En la zona donde hay datos, NE de Salta y Mendoza, también hubo un aumento en la cantidad de lluvia caída durante eventos extremos, que es consistente con el aumento de días con lluvia por encima de los 10 mm en el NE de Salta y Mendoza.

La máxima anual de la precipitación diaria en los extremos norte y sur de la región particularmente en Salta y Mendoza, tuvo aumentos significativos, Figura 2.3.2. En la zona de transición, las tendencias no son significativas pero además no son datos representativos debido a la falta de observaciones durante períodos prolongados, particularmente en 27,5°S, 67,5°O y en 25,5°S, 67,5°O.



**Figura 7.2.2.6:** Promedios regionales de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) en mm y cuadro de cambios por subregión. NOA-S en verde, NOA –N en amarillo. \* al 90% de confianza, \*\* al 95% de confianza

La variabilidad interanual es marcada, registrándose en la región NOA-N, representativa fundamentalmente del este de Salta, un período con máximas mayores entre los años 1978 y 1992, Figura 7.2.2.6. De los índices discutidos en esta sección para la región Andes, la variabilidad de Rx1 en la zona norte es la que muestra de manera más clara una oscilación de baja frecuencia, con un período mayor a los 20 años.

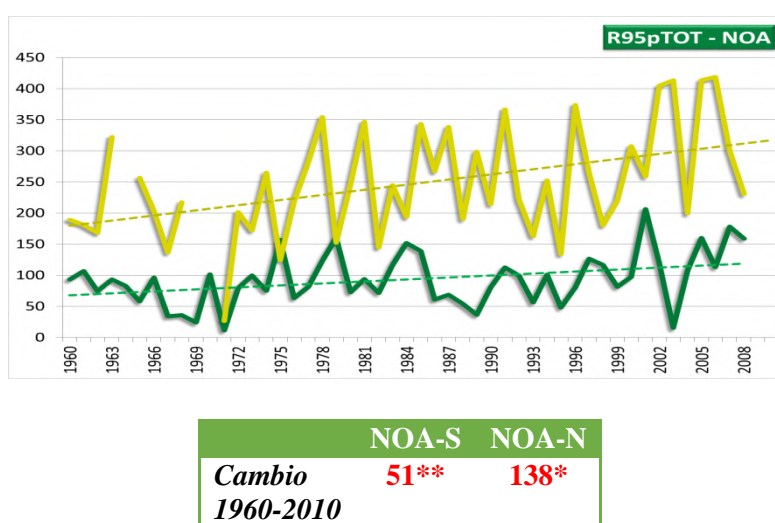


**Figura 7.2.2.7:** Ídem Figura 7.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) en mm en NOA-S.

Con respecto al cambio de Rx5, Figura 2.3.3, no se analiza el comportamiento en la región norte, por considerárselo poco representativo debido a la falta de datos mencionada al inicio de la sección. El único valor significativo y positivo de Rx5 se da en Mendoza. Las restantes estaciones de la subregión sur también exhiben un aumento que no resulta significativo. La variabilidad interanual en esa subregión es marcada, tal como lo indica la Figura 7.2.2.7.

El cambio de R95pTOT es positivo en todos los lugares donde hay datos, Figura 2.3.4. La significancia es baja porque, o bien el cambio es débil o bien hay demasiados faltantes. Es significativo y positivo en Mendoza y en el límite NE de Salta. Este índice suma lo que llueve (en cantidad) sólo en los eventos por encima del percentil 95. Que este índice haya aumentado es otra indicación de lluvias extremas concentradas en pocos eventos. El índice muestra una gran variabilidad interanual, Figura 7.2.2.8. En la zona norte, la tendencia parece leve y sostenida desde la década del 70.

Los cambios en los distintos índices asociados con precipitaciones por encima de la media discutidos hasta este punto, se comparan bien con el trabajo de Penalba y Robledo (2010) quienes analizan la cantidad de días con lluvias por encima del percentil 75 en el período 1961-2000, y encuentran un incremento significativo en Mendoza, San Juan y La Rioja.



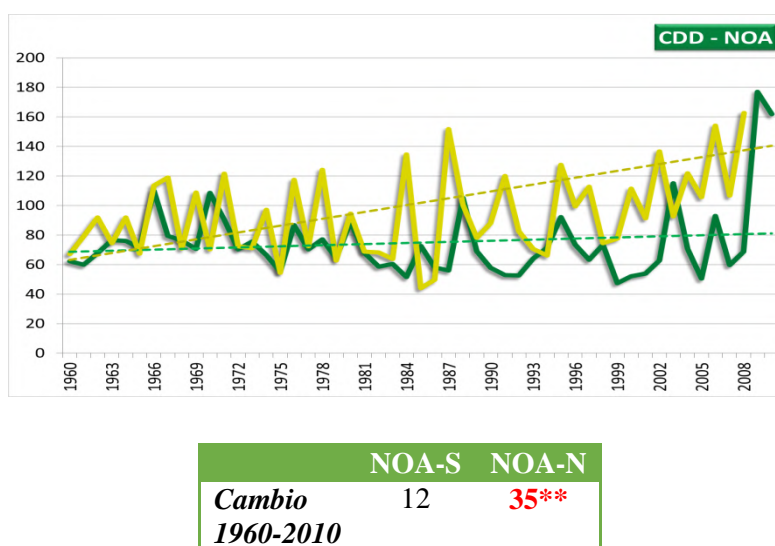
**Figura 7.2.2.8:** Ídem figura 7.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT) en mm. NOA-S en verde, NOA –N en amarillo.

El cambio del número máximo de días consecutivos sin lluvia (CDD) es positivo en toda la región con valores altos y significativos en Salta y en el límite de Jujuy con Bolivia y Chile, Figura 2.3.5, pero estos últimos son poco confiables debido a que fueron calculados con series que presentan muchos faltantes de datos. En casi todos los puntos, las series temporales presentan pocos cambios previos a mediados de la década del 80. A partir de ese momento, se hace más evidente la tendencia positiva, la que registra una pendiente más marcada en la última década, Figura 7.2.2.9. Este comportamiento es muy marcado en el punto representativo de Jujuy. El



análisis conjunto de este índice con Rx1 y R95pTOT refuerza la idea que si bien hay eventos de lluvia más intensos, estos son concentrados en pocos días y la tendencia es a que haya más días sin lluvia. Además hay que considerar que como esta región es de extrema sequedad en invierno, las máximas rachas de días sin lluvia del año solo reflejan esta característica estacional. Su aumento está indicando un cambio hacia una prolongación del periodo invernal seco. Este efecto es notoriamente significativo y porcentualmente muy elevado en el norte argentino.

Varios trabajos aportan información en relación con la máxima duración de rachas secas. Debe destacarse que en la región NOA-N, la tendencia positiva del índice CDD más marcada se observa con posterioridad al año 2000. Eso explica la diferencia entre la tendencia aquí reportada y el trabajo de Llano y Penalba (2011) que analizan datos de estaciones en el período 1961–2000, y encuentran una disminución en el índice sobre las estaciones representativas del NOA excepto en la Rioja.



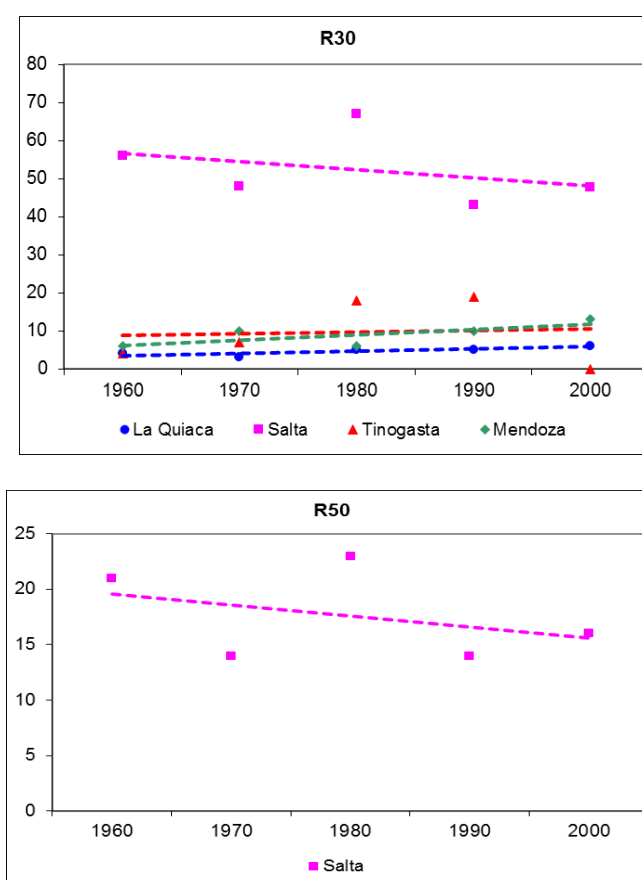
**Figura 7.2.2.9:** Ídem Figura 7.2.2.6, pero para la máxima longitud de racha seca definida como el número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD).NOA-S en verde, NOA –N en amarillo

El estudio realizado por Minetti y otros (2010) basado en un índice representativo de sequías, para el período 1901-2000 también da como resultado una tendencia negativa en varias regiones argentinas y en particular el NOA y la zona oeste-Centro. Sin embargo, señalan la diferencia de comportamiento entre ese período y la década subsiguiente, donde se daría una señal opuesta. En Minetti y otros (2010) se discute la importancia de la variabilidad de baja frecuencia (períodos multidecadales) en la modulación de la frecuencia de sequías. Más recientemente, Rivera y otros (2013) analizaron la frecuencia de días secos en el período 1960-2005, encontrando un decrecimiento significativo en Mendoza, y un decrecimiento seguido de un incremento (alrededor de 1980) en Salta. Estos resultados estarían en acuerdo con la variabilidad de la tendencia entre distintas décadas que se observa en la Figura 7.2.2.9 para ambas regiones.



Aunque las lluvias por encima de 30 mm podrían no considerarse precipitaciones extremas en el este del país, en esta región son eventos poco frecuentes que pueden ocasionar daños como por ejemplo deslizamientos. Se ha contado la cantidad de eventos por encima de 30 mm en cada década empleando datos diarios provenientes de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional. Estas fueron elegidas por ser las más completas entre 1960 y 2010. Para el caso particular de Salta Aero también se presenta R50 mm, dado que el régimen de precipitaciones es más abundante allí que en el resto de la zona de estudio.

La regresión lineal muestra comportamientos semejantes en La Quiaca y Mendoza, marcando una leve tendencia al incremento de eventos intensos en las últimas 4 décadas para esas localidades. La variabilidad interdecadal es más marcada en Salta y Tinogasta, por lo cual resulta menos ilustrativo inferir una tendencia de largo plazo, Figura 7.2.2.10a. Sin embargo, y para el caso particular de Salta, se observa una tendencia al decrecimiento de eventos con lluvias por encima de 30 y de 50 mm que se superpone con una clara oscilación decadal, Figura 7.2.2.10b.



**Figura 7.2.2.10:** a) Series de R30 mm (en días por década) para La Quiaca; Salta Aero; Tinogasta; Mendoza Aero. B) Serie de R50 mm (en días por década) para Salta Aero

En resumen, del análisis de valores medios se desprende que la región Andes ha tenido un aumento en la cantidad de precipitaciones, excepto en la zona linder a Catamarca y Salta.

Las tendencias acompañan la estacionalidad de la precipitación con máximos en verano y otoño y eventualmente con valores negativos en invierno y primavera. Esto indicaría una tendencia a una mayor diferencia entre la estación lluviosa y la estación seca. En cuanto a los índices de extremos, la mayoría de los que se asocian a eventos de lluvia más intensa presentan un incremento, pero también se observa un incremento en la longitud de las rachas secas. Combinando ambas tendencias, debería señalarse una tendencia a un régimen de precipitación donde la precipitación aumenta como resultado de la ocurrencia de precipitaciones más intensas concentradas en pocos eventos.

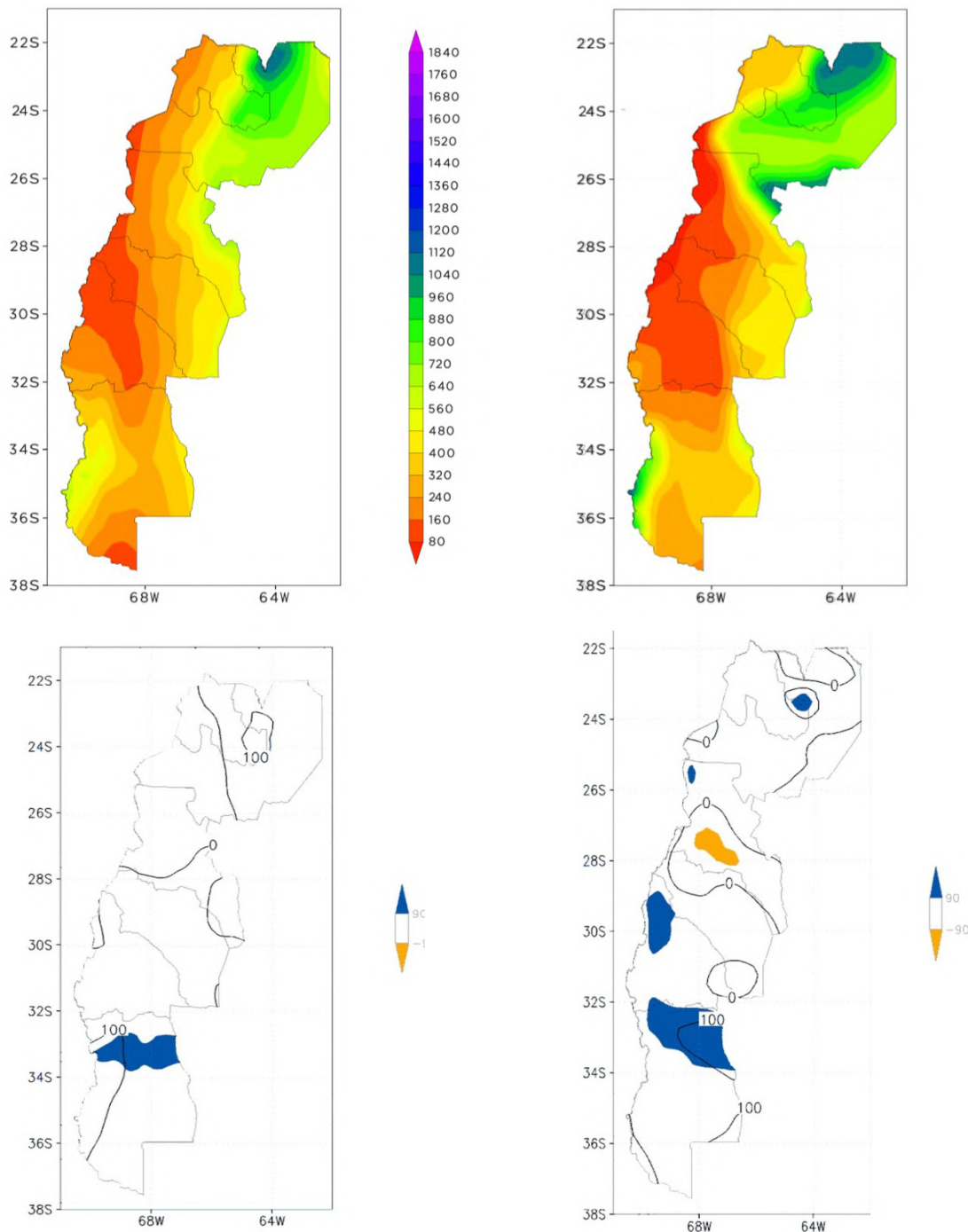
### **7.2.3 Incertezas**

Hay diversas fuentes de incerteza que deben ser tenidas en cuenta al interpretar la información climática. Las bases de datos empleadas para este análisis se construyen a partir de datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, a los que se les aplica un control de calidad y consistencia para luego emplear algoritmos matemáticos que interpolan desde donde hay información hacia donde la misma no existe, para obtener así un campo continuo. Para la temperatura, se suma otra corrección que busca considerar el efecto urbano. Este efecto genera un aumento relativo de las temperaturas mínimas en zonas urbanas respecto de la temperatura en zonas rurales. Para cuantificar la incerteza asociada con el efecto urbano es necesario tener estaciones de medición relativamente cercanas, ubicadas en la ciudad y el campo. Tal diversidad de estaciones no se presenta en la zona andina, por lo que no se puede determinar el efecto urbano. Por el modo en que se generan las bases de datos, puede inferirse que los resultados de cualquier análisis de variabilidad climática se verán afectados por la diferente manera en que se tratan los datos originales y por los métodos de interpolación. A su vez, en la medida que la proporción de datos originales es mayor, es decir, presenta una buena cobertura geográfica, la incerteza tiende a ser menor, porque la incidencia de los métodos de interpolación disminuye.

Teniendo en cuenta las fuentes de incerteza, se puede anticipar que el mayor problema sobre la región Andes se asocia con la baja densidad de estaciones con que cuenta y a la complejidad de su topografía. Este último aspecto afecta fuertemente la representatividad geográfica de cada dato, dado que hay importantes cambios asociados con las diversas alturas sobre el nivel del mar que no pueden ser interpolados de manera confiable. Una manera de ilustrar la incerteza es analizar dos fuentes de datos cuyos métodos de interpolación y fuentes de observación no necesariamente son los mismos. La Figura 7.2.3.1 muestra los campos del valor medio anual y de la tendencia de precipitación, obtenidas con CRU (que es la base empleada en la sección 7.2) y con la base del GPCC. En la misma se observa que el patrón general del campo es semejante pero se pueden detectar algunas diferencias, fundamentalmente sobre el límite oeste de la provincia de Salta, y en general donde la topografía cambia de manera más abrupta. El patrón de diferencias entre ambas bases, se caracteriza porque el campo medio de GPCC representa cambios en la dirección oeste-este más rápidos, pasando en pocos kilómetros de 80 mm a 800 mm al año (ver el oeste de Salta, por ejemplo), en tanto que el CRU presenta un cambio menos acentuado. Así, un punto ubicado aproximadamente en 68°O, 25°S puede presentar una precipitación media anual de 320mm en una base de datos (CRU) y 720 mm en otra. Este punto representaría una situación de mayor incerteza para esta variable, en relación a lo que ocurre en otras regiones. Estas diferencias en los campos medios, no se ven reflejadas con igual magnitud en el análisis de tendencias,



básicamente porque si hay algún grado de diferencia sistemática, la misma desaparece en el campo de tendencias. Sin embargo, en la provincia de Catamarca se registran diferencias importantes entre una y otra base de datos, pasando de tendencias negativas significativas en GPCC a cambios no significativos para CRU.



**Figura 7.2.3.1:** a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960/2010, obtenido a partir de CRU, b) ídem a) pero obtenido a partir de GPCC; c) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, obtenido a partir de CRU, d) ídem c) pero obtenido a partir de GPCC

## 7.2.4 Isoterma de 0°C

La altura de la isoterma de 0° C puede ser un indicador del límite aproximado del hielo y la nieve en la cordillera de los Andes. En rigor, la temperatura del cambio de fase depende de la presión, con lo cual el punto de fusión se modifica con la altura. De todos modos, es un indicador aproximado que permite inferir de qué manera puede estar cambiando el ambiente en las zonas con glaciares y nieves perennes.

Para efectuar un cálculo preciso de la altura de la isoterma de 0°C es necesario contar con datos de radiosondeo. Lamentablemente, sólo dos estaciones en toda la región Andes, Salta y Mendoza, realizan este tipo de mediciones las que, a su vez, no han sido continuas a lo largo del período de estudio. La gran cantidad de datos faltantes impide hacer un análisis representativo de la región empleando datos observados, por lo que se ha recurrido a la utilización de los reanálisis del NCEP (National Centre for Environmental Prediction). Estos reanálisis tienen una resolución horizontal de aproximadamente 250 km. De manera semejante a las secciones previas, se trabajó con promedios areales de temperatura en 850, 700, 600 y 500 hPa sobre las regiones NOA-Sur: 36°S, 29,5°S; 70°O, 67.5°O; NOA-Centro; 32°S, 27.5°S; 67.5°O, 65°O; NOA-Norte: 26°S, 22°S; 67°O, 62.5°O.

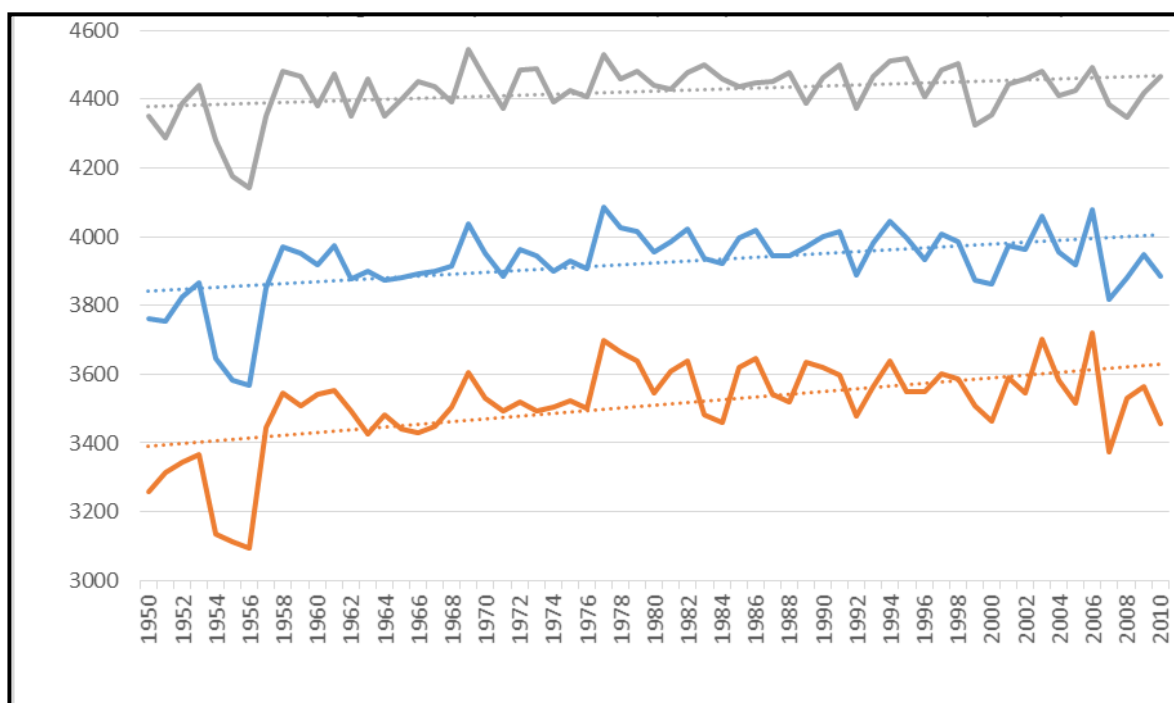
La Tabla 7.2.4.1 muestra aumentos significativos en todas las regiones y estaciones del año, excepto para Salta y Jujuy en primavera. Estos resultados van en la misma dirección que los documentados en la Segunda Comunicación Nacional (Barros y otros, 2006), aunque en aquél caso el énfasis estuvo en el análisis de la Patagonia. No obstante, para la estación aerológica de Mendoza, informaron un aumento de 340m, entre 1977 y 1996, algo más pronunciado de lo que aquí se indica para la zona NOA-Sur, aunque debe tenerse en cuenta que la tendencia ha presentado cambios débiles o con signo negativo en la última década.

|                             |               | <b>ISOTERMA DE 0°C 1950-2010</b> |              |              |              |              |
|-----------------------------|---------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             |               | DEF                              | MAM          | JJA          | SON          | ANUAL        |
| <b>Salta – Jujuy</b>        | <i>Medio</i>  | 4690                             | 4485         | 4130         | 4396         | 4423         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>98**</b>                      | <b>107**</b> | <b>109*</b>  | 72           | <b>96**</b>  |
| <b>Catamarca - La Rioja</b> | <i>Medio</i>  | 4323                             | 4014         | 3368         | 3759         | 3859         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>161**</b>                     | <b>172**</b> | <b>162**</b> | <b>164**</b> | <b>164**</b> |
| <b>Mendoza - San Juan</b>   | <i>Medio</i>  | 4086                             | 3713         | 2929         | 3345         | 3508         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>183**</b>                     | <b>210**</b> | <b>322**</b> | <b>280**</b> | <b>252**</b> |
| <b>REGION ANDES</b>         | <i>Medio</i>  | 4363                             | 4091         | 3509         | 3861         | 3955         |
|                             | <i>Cambio</i> | <b>144**</b>                     | <b>160**</b> | <b>201**</b> | <b>171**</b> | <b>170**</b> |

**Tabla 7.2.4.1:** Valores medios y cambios de la altura de la isoterma de 0°C para la región Andes y para 3 subregiones (°C). \*significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

La Figura 7.2.4.1 muestra la evolución temporal de los valores medios anuales para toda la región Andes y para las subregiones NOA-N y NOA-S, a los fines de resaltar el comportamiento latitudinal. Cabe señalar que en un estudio en Mendoza se encontró que la base de los glaciares había subido 300m, lo que se compara muy bien con los cambios de la isoterma de 0°C, Tabla 7.2.4.1 (Trombotto y otros, 1997).

Puede observarse que la tendencia lineal ha sido positiva y aumenta de norte a sur. El comportamiento en la última década, sin embargo, es una tendencia levemente negativa en todas las sub-regiones y consecuentemente en el promedio del área total. Esto indica que el ambiente en zonas elevadas tiende a ser más cálido, lo cual coincide con el decrecimiento de la masa de hielo en glaciares documentado en Masiokas y otros (2009).



|                 | NOA-S | NOA-N |
|-----------------|-------|-------|
| <b>PROMEDIO</b> | 3508  | 4423  |
| <b>CAMBIO</b>   | 252** | 96**  |

**Figura 7.2.4.1:** Serie del promedio anual de la altura de la isoterma de 0°C (en m) promedio para toda la región Andes (celeste), para NOA-N (gris) y NOA-S (naranja) y cuadro de cambios por provincias y estación del año con \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

Para estimar los cambios en la altura de la isoterma de 0° C en el futuro se eligió el modelo global IPSL-CM5A-MR que es uno de los que mejor representaron el clima observado (capítulo 3 sección 3.3.6) y el escenario de emisión RCP4.5. La Tabla 7.2.4.2 muestra que los cambios esperados son de aumento de la altura de la isoterma positivos en todas las subregiones, sosteniéndose la tendencia observada entre 1950 y 2010.



Al igual que en el clima actual, la región NOA-S (Mendoza y San Juan), registraría cambios más intensos que el resto de la Región Andes. La magnitud de los cambios es importante: los valores se duplican entre el futuro cercano y el lejano. Con esta proyección, es de esperar que continúe y se acelere la recesión de los glaciares y aún más si se concretara un escenario de mayor calentamiento.

|                         | NOA-S | NOA-N | Región Andes |
|-------------------------|-------|-------|--------------|
| <b>CAMBIO 2015-2039</b> | 260   | 221   | 236          |
| <b>CAMBIO 2075-2099</b> | 513   | 478   | 492          |

**Tabla 7.2.4.2:** *Cambios proyectados en la altura media de la isoterma de 0°C en m, para dos subregiones y promedio en la región Andes. El período de referencia es 1981-2005.*

#### 7.2.4 Otras variables

La mayoría de los trabajos sobre otras variables, se concentran en otras zonas del país, dado los escasos datos en la región Andes.

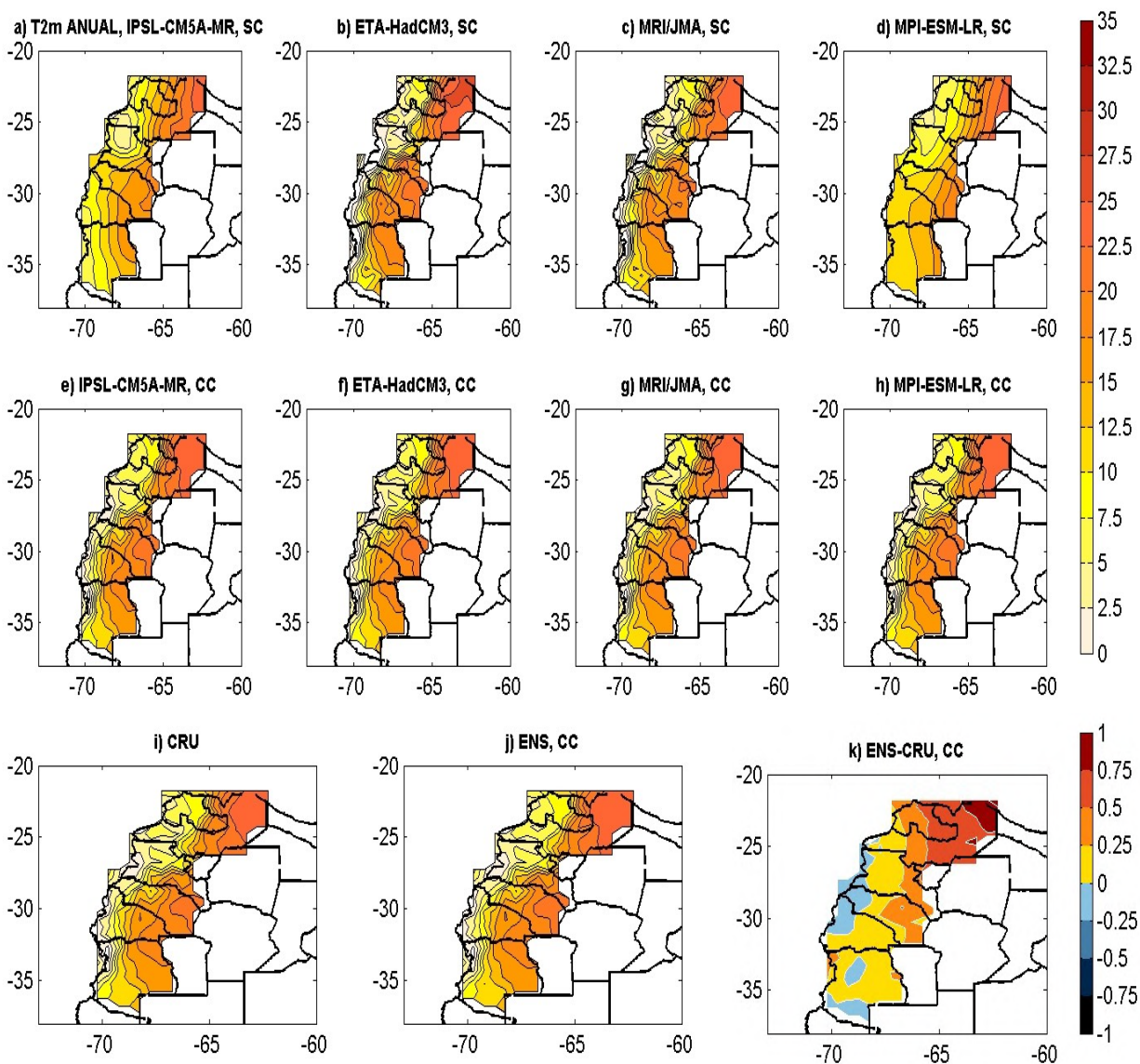
Mezher y otros (2012) documentaron la frecuencia de granizo y sus tendencias en todo el país. El estudio es sobre el período 1960-2008 y no detecta una tendencia significativa en Cuyo pero sí en el NOA. En Cuyo se observa un ciclo de baja frecuencia que es de aproximadamente 20 años de duración y también una alta variabilidad interanual

### 7.3 VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES

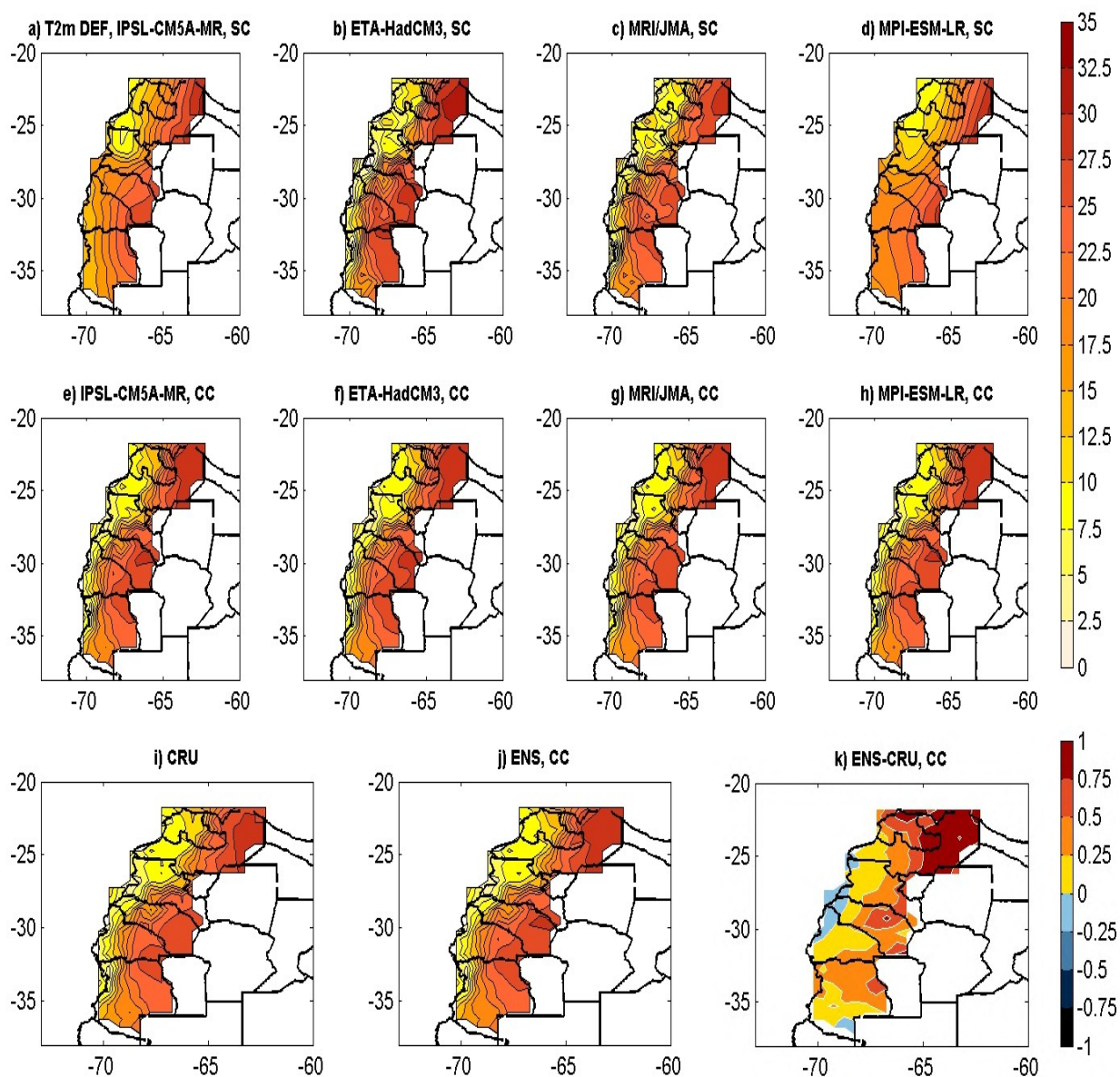
Se muestran resultados de la corrección de los errores sistemáticos de los modelos seleccionados para las proyecciones climáticas en periodos futuros del siglo XXI, para la región Andes. La explicación de la metodología empleada se describe en el capítulo 3, secciones 3.3.7 y 3.3.8.

#### 7.3.1 Temperatura

Como en el caso de la región Húmeda y Centro, el ajuste de los modelos a los datos observados es bueno en esta región, aun para los datos sin corregir, excepto en el este de Salta, pero mejora con la corrección, Figura 7.3.1.



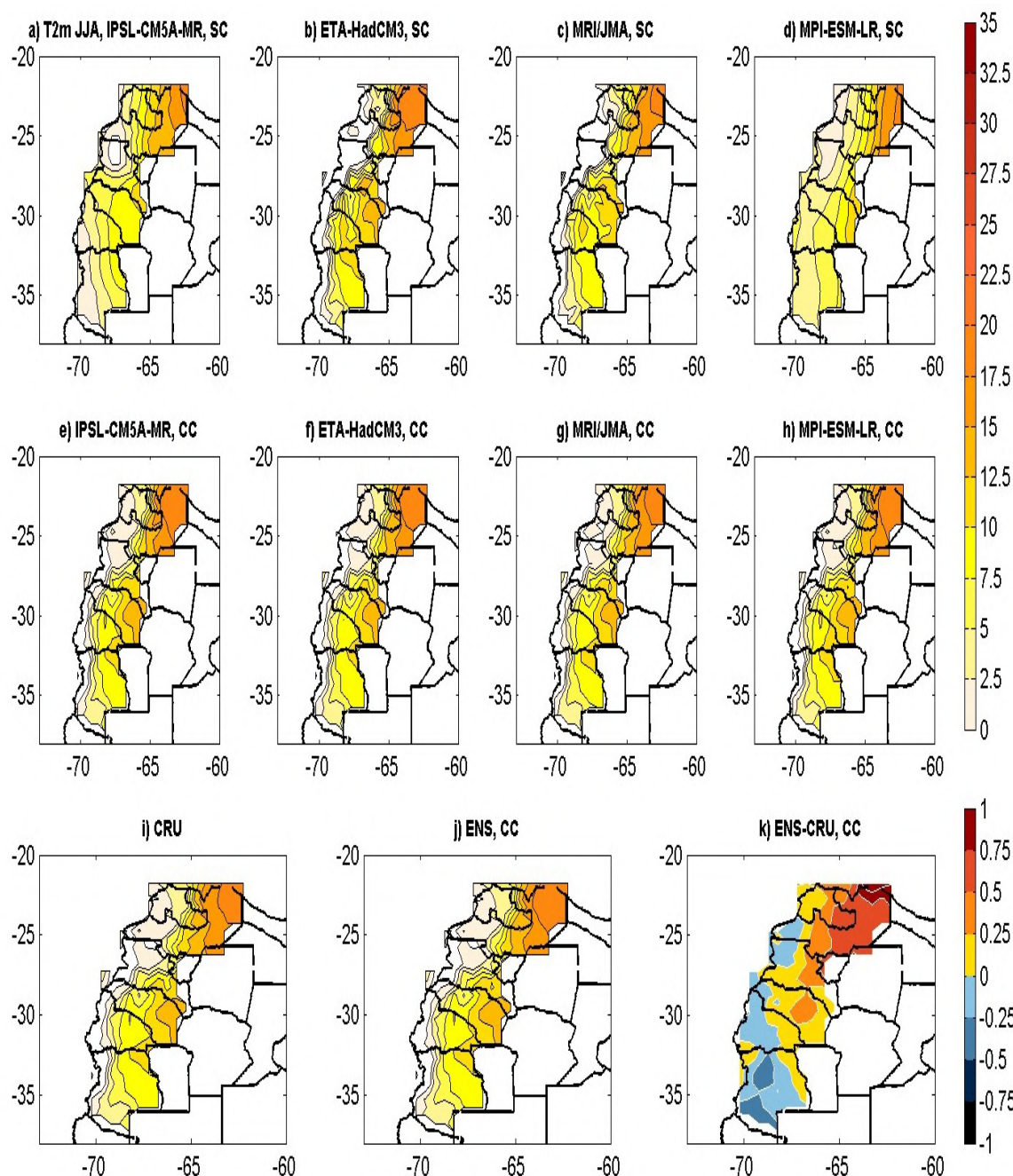
**Figura 7.3.1:** Validación de la temperatura media anual para la región Andes. 1976/1990 (Excepto para el modelo MRI que es 1979/1990). Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección, Panel inferior, valores observados según CRU, ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU



**Figura 7.3.2:** Ídem Figura 7.3.1, pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)

El promedio de los modelos corregidos tiene en la mayor parte de la región un error menor a 0,25 °C y solo en el noreste, esto es en el este de Salta es mayor a 0,5 °C y donde en alguna zona se acerca a 1° C, Figura 7.3.2.

En el verano la situación es muy similar al caso anual, pero con errores algo mayores en el este de Salta mientras que en el invierno el ajuste es ligeramente mejor que en el caso anual, figura 7.3.3. Cabe resaltar que este ajuste a los valores observados es excelente por tratarse de una región con fuertes gradientes térmicos.

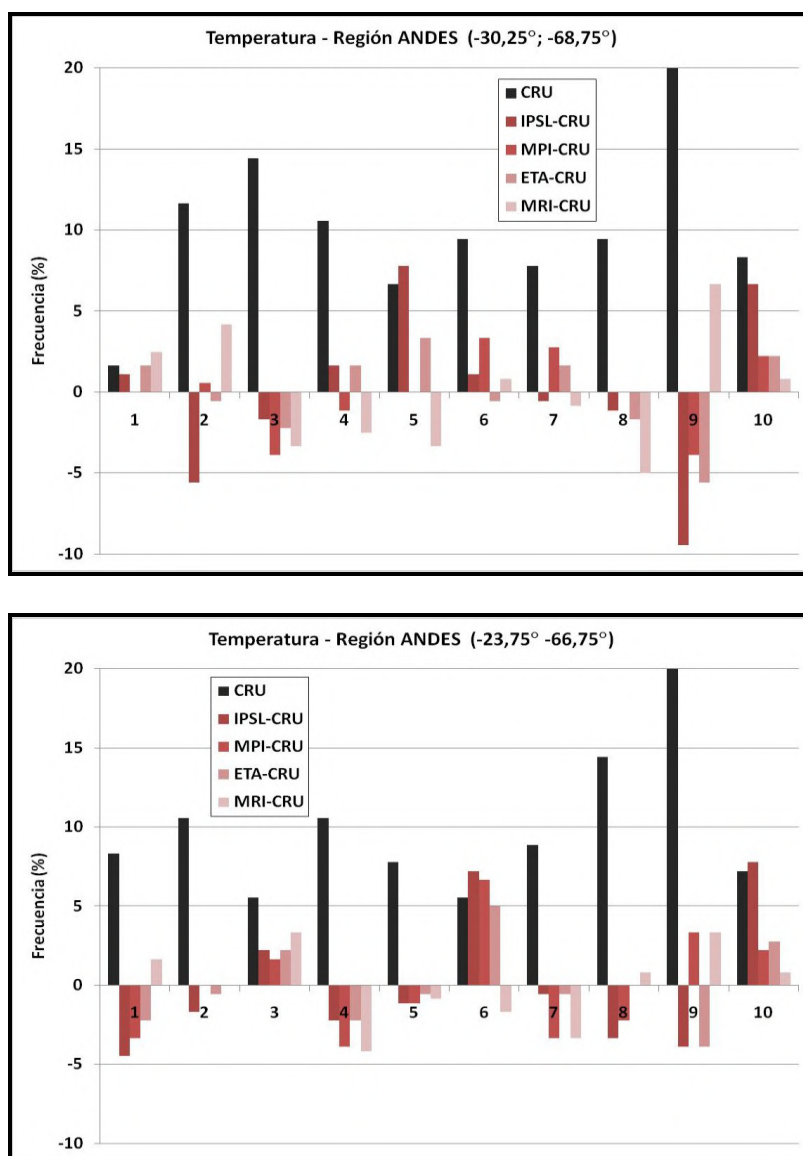


**Figura 7.3.3:** Ídem Figura 7.3.1, pero para la temperatura del invierno (junio, julio y agosto)

La Figura 5.3.4 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos representativos de la región. La distribución de temperatura mensual es también bimodal como en las otras regiones, aunque con cierta asimetría hacia los valores altos más frecuentes, Figura 7.3.4. Los errores en la frecuencia de los modelos son, en general, bastante menores que las frecuencias observadas en los dos puntos y en casi todas las frecuencias. En el caso de las temperaturas mensuales más cálidas,



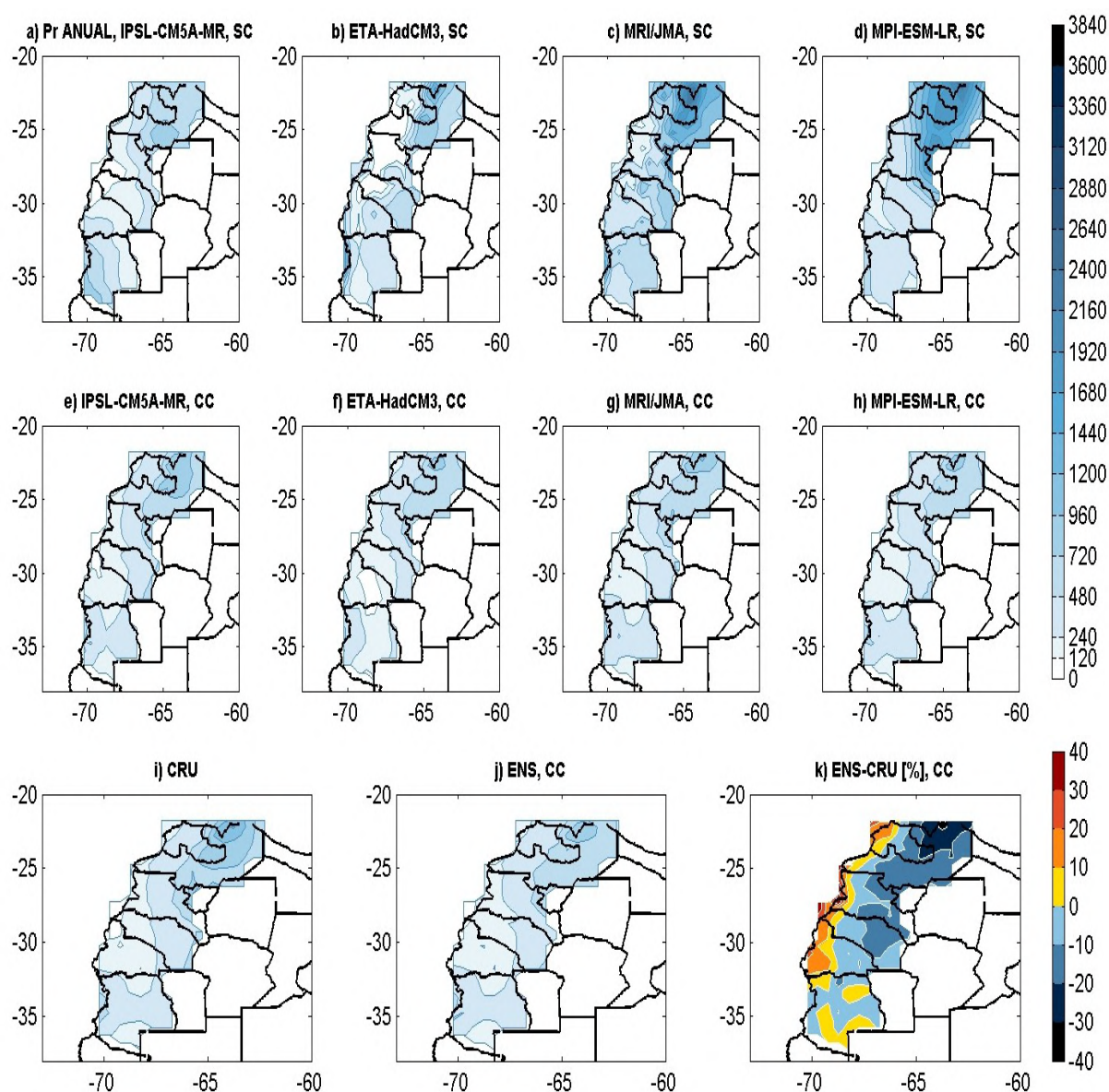
excepto para el modelo IPSL, estos resultados indican que las frecuencias de temperaturas extremas del futuro podrían proyectarse con algún grado de certidumbre.



**Figura 7.3.4:** Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Andes. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales

### 7.3.2 Precipitación

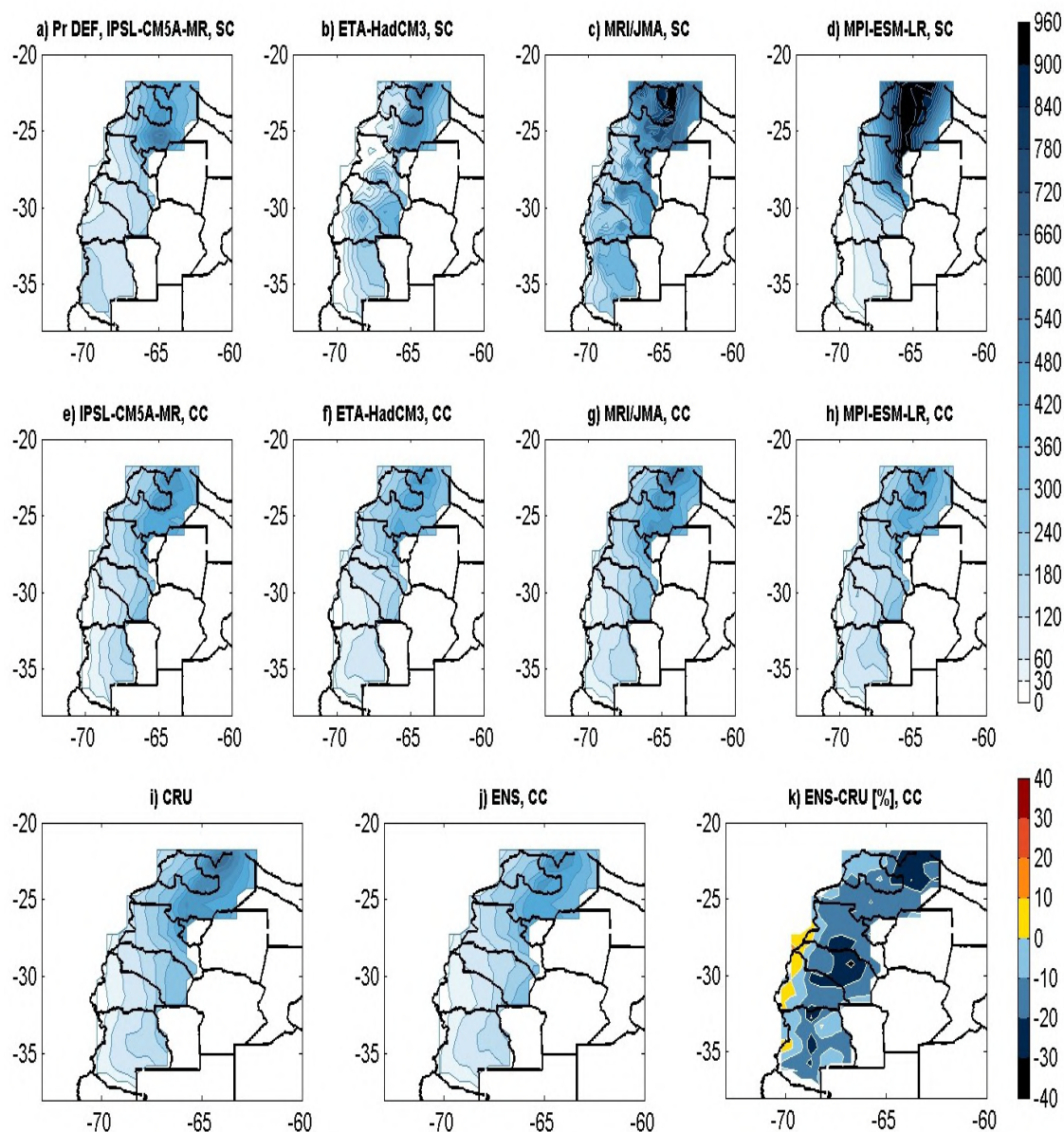
La precipitación anual corregida es sustancialmente más representativa del campo anual observado que la no corregida, especialmente en la zona de mayor error en las provincias de Salta y Jujuy. Aunque esta zona persiste con mayor error en los mapas corregidos que el resto de la región, sus errores se reducen notoriamente, Figura 7.3.5. El promedio de los modelos presenta diferencias con el campo observado según CRU, en general, menor al 10%. Como esta zona es predominantemente árida y con fuertes gradientes, a este ajuste se lo pudo considerar como muy bueno.



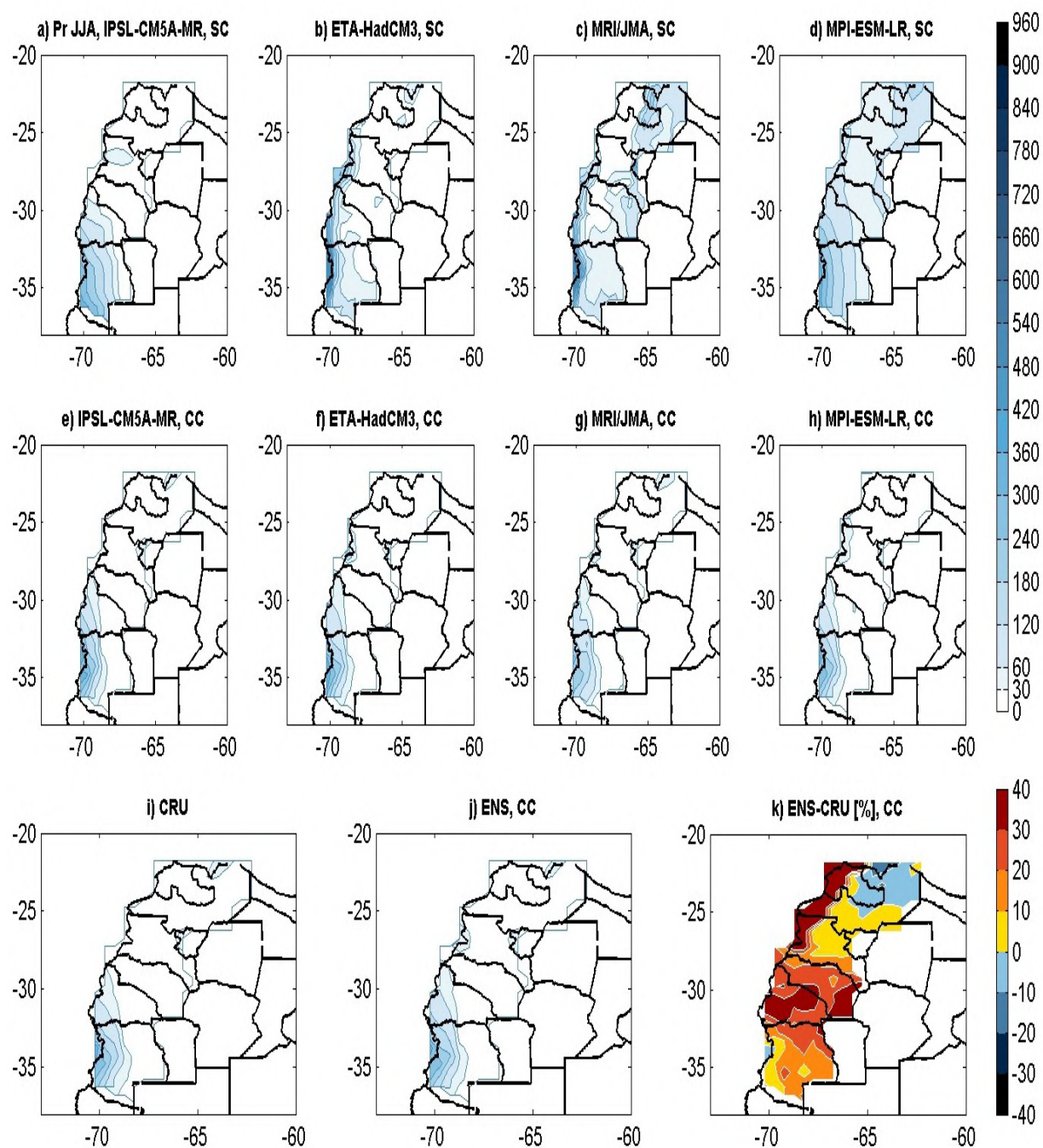
**Figura 7.3.5:** Ídem Figura 7.3.1, pero para la precipitación de la región Andes



Sin embargo, la buena representación del valor anual se debe a una subestimación en el verano y una sobrestimación en el invierno. En el verano, a lo largo del este de la región el error está entre el 10 y 20%, Figura 7.3.6. En invierno en casi toda la región la precipitación es sobrestimada por los modelos y en algunas zona hasta entre un 30 y 40% por encima del campo observado, Figura 7.3.7. Como esta región también es de precipitaciones con características extremadamente monzónicas, el invierno es muy seco, Figura 7.3.7i, y por lo tanto los errores relativos como los que aparecen en el panel k de la figura 7.3.7 representan valores muy pequeños en valor absoluto.



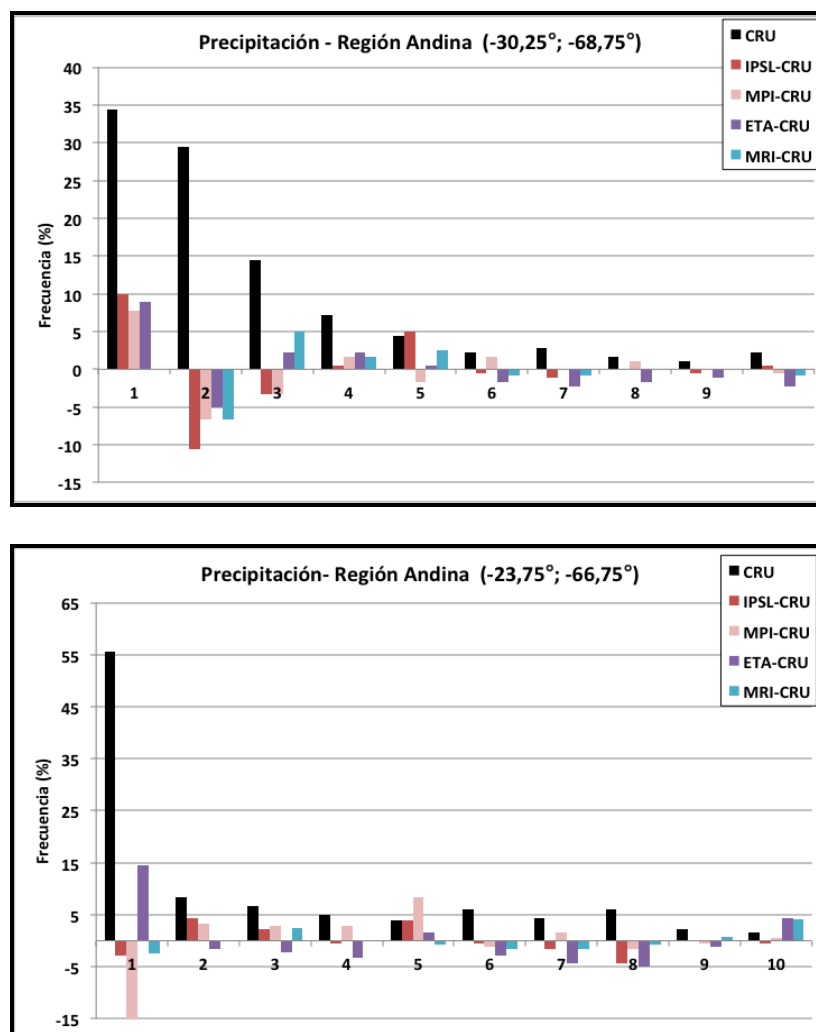
**Figura 7.3.6:** Ídem Figura 7.3.5, pero para la precipitación del verano (diciembre, enero y febrero)



**Figura 7.3.7:** Ídem Figura 7.3.5, pero para la precipitación del invierno (junio, julio y agosto)

La figura 7.3.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos representativos de la región Andes. Como en el caso de la región Centro, la distribución de la lluvia mensual tiene la forma de una distribución Gama, típica de la precipitación mensual de las regiones donde los meses con

precipitaciones muy escasas o nulas son los más frecuentes. Excepto en las precipitaciones mensuales más bajas los errores en las otras frecuencias son iguales o mayores que la frecuencia observada indicando la dificultad con que nos encontramos para captar la correcta frecuencia de las precipitaciones mensuales en las proyecciones del clima futuro.



**Figura 7.3.8:** Ídem Figura 7.3.4, pero para la precipitación de la región Andes

Con la selección de los modelos de mejor performance y el método de corrección de sus errores sistemáticos se logró representar los valores medios de la precipitación y la temperatura anual con errores pequeños en la mayor parte de la región Andes. Igualmente, también se logra representar las distribuciones estadísticas con poco error, excepto para algún modelo y particularmente en los extremos de las distribuciones de lluvia, lo cual es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la región.

## 7.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

### 7.4.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

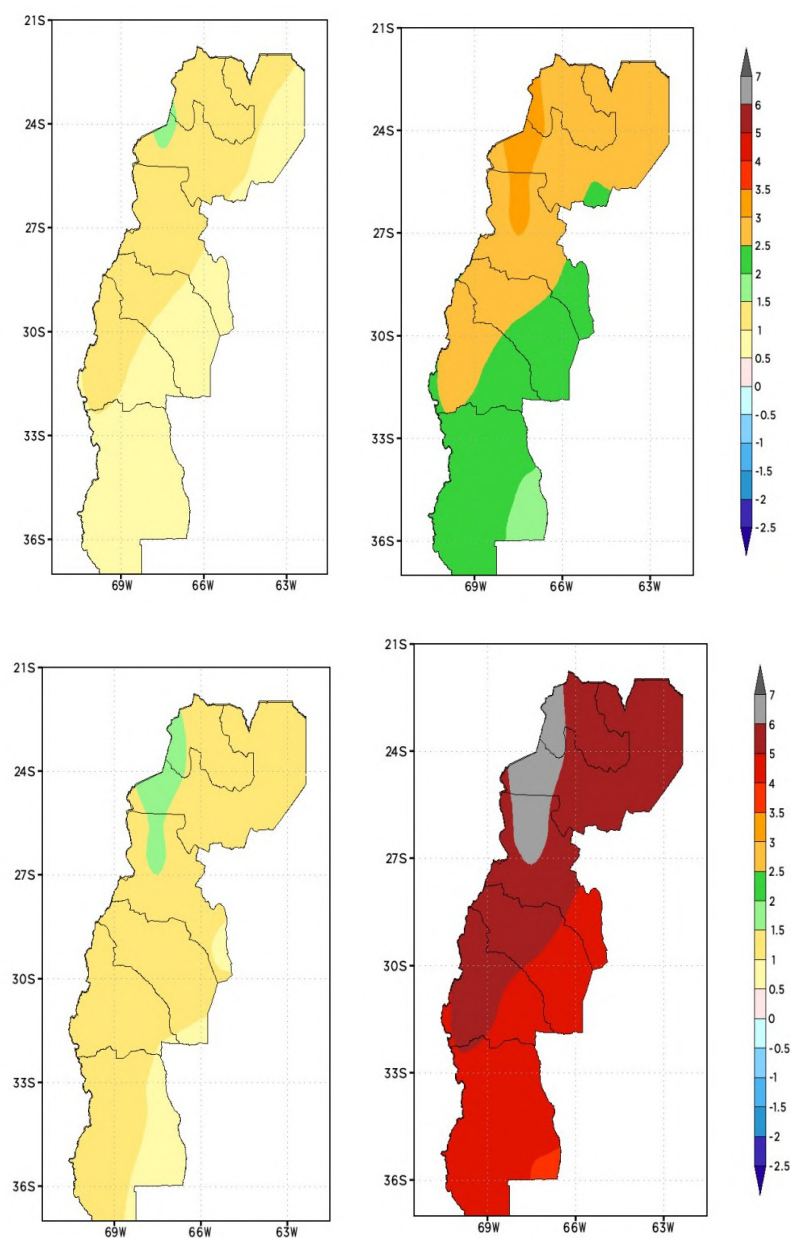
El elemento común a todos los modelos y escenarios es un calentamiento muy importante, Figuras 7.4.1.1 a 7.4.1.6. En el futuro cercano, el escenario RCP4.5 es el de menor aumento de temperatura, pero aun en este caso el calentamiento es más rápido que el observado entre 1960 y 2010, Figura 7.2.2.1, indicando una aceleración que se confirma con el calentamiento proyectado para fin de siglo. De acuerdo con estas proyecciones, esta región es la que presentaría el mayor calentamiento, lo que también resulta del promedio de los 42 modelos del CMIP 5, figura 3.4.1. Este resultado se relacionaría con su condición continental y concuerda con lo que se obtiene a escala global (los continentes se están calentando más rápido que los océanos). Asimismo, la región está bastante aislada por montañas desde el oeste, norte y este, por lo que el mayor ingreso de aire en capas bajas proviene del sur, principalmente asociado con el pasaje de frentes fríos. Con el calentamiento global, se especula que el pasaje de estos frentes sería cada vez más esporádico, agravando de esta forma el calentamiento local resultante del aumento de los GEI.

El patrón geográfico de calentamiento proyectado es distinto en el caso de los modelos globales que en el de los regionales. En los primeros, con menor posibilidad de representar adecuadamente la orografía y sus diferencias climáticas asociadas, el mayor calentamiento se proyecta para la zona norte, lo que es consistente con las proyecciones del ensamble de los modelos CMIP5 presentados en el quinto informe del IPCC (IPCC 2013, Figura RRP8a). La magnitud del calentamiento es también acorde con los de ese informe en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. En cambio, el escenario A1B, muestra mayor calentamiento en la zona cordillerana, lo que se hace más notorio hacia fin de siglo. Este escenario fue construido con dos MCRs, MRI/JMA y ETA-HADCM3, que, por su mayor resolución horizontal, permiten distinguir mejor las diferencias climáticas que genera la orografía.

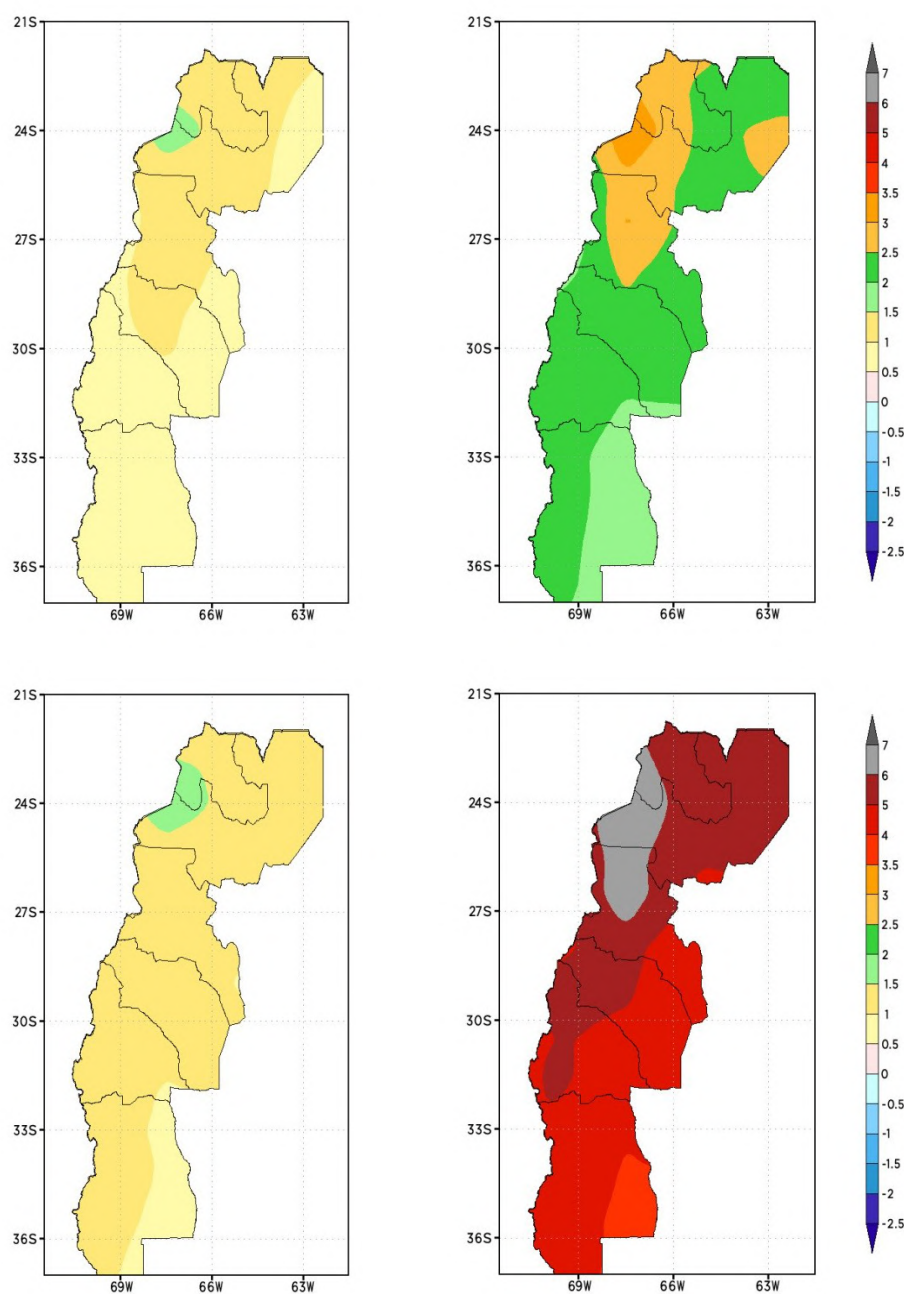
Las diferencias en el aumento de temperatura entre escenarios no son muy notorias en el futuro cercano, excepto para el escenario A1B, pero ello puede deberse a que este escenario se construyó con MCRs basados en modelos globales de una generación anterior (CMIP3). Asimismo, los aumentos de temperatura proyectados son muy similares en la temperatura mínima media y en la máxima media en los escenarios RCP y en los dos horizontes temporales; Figuras 7.4.1.2, 7.4.1.3. En cambio en el escenario A1B, los cambios en las temperaturas mínimas son mayores que en las máximas, Figuras 7.4.1.5 y 7.4.1.6, tal como se ha estado registrando en el periodo 1960-2010, Figuras 7.2.1.2 y 7.2.1.3. Incluso, en el caso del escenario A1B en el futuro cercano hay numerosas zonas aisladas con reducciones en la temperatura máxima media.

Los valores excepcionales de más de 5 y 6°C de calentamiento en la temperatura hacia fin de siglo parecen exagerados, pero sin embargo son compatibles con el calentamiento promedio global de 4°C proyectado en el escenario RCP8.5. Debe considerarse que este valor resulta del promedio de menor calentamiento en los océanos y mayor en las zonas continentales, alejadas de los océanos.



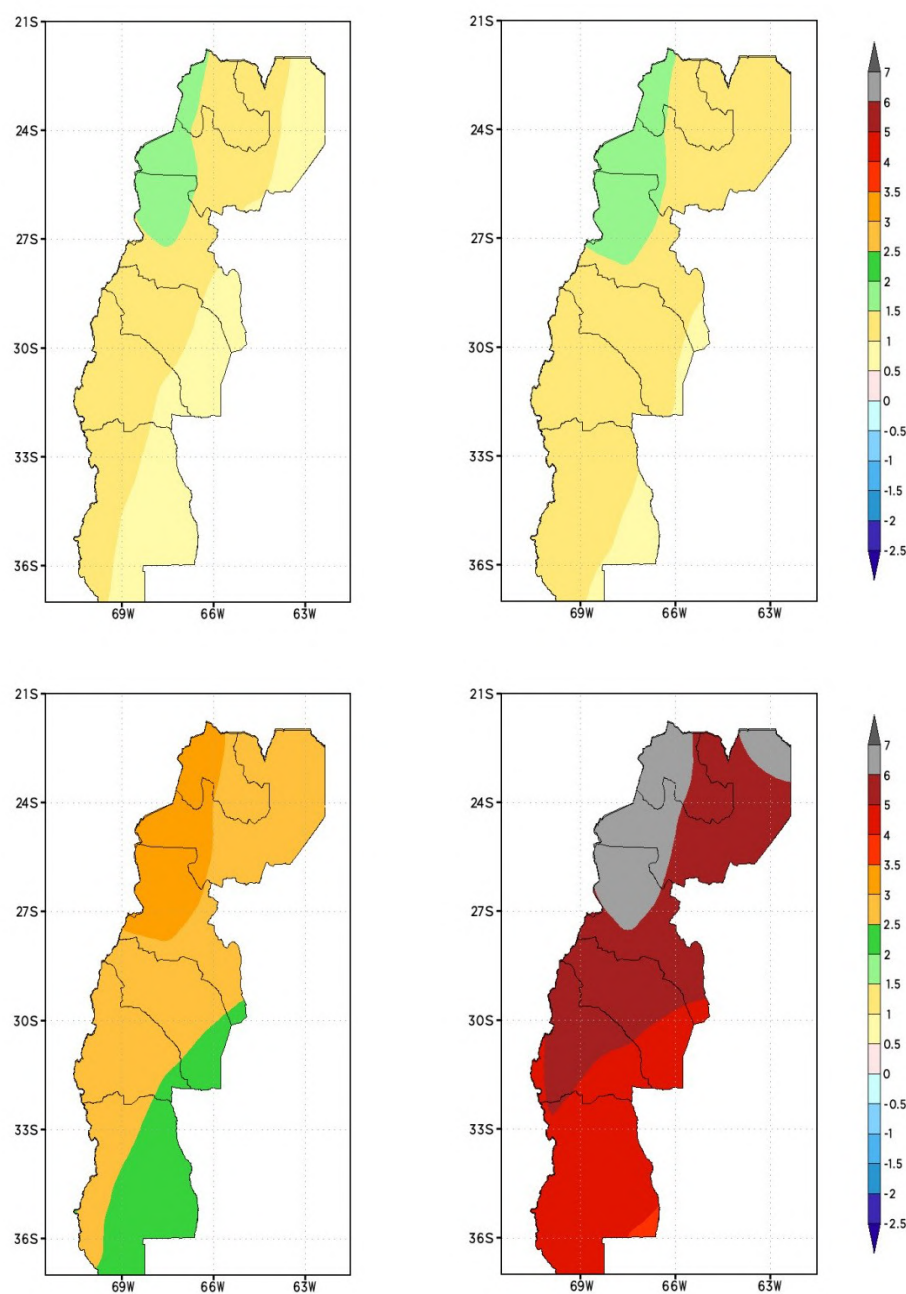


**Figura 7.4.1.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL\_CM5A-MR y MPI.ESM-LR. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

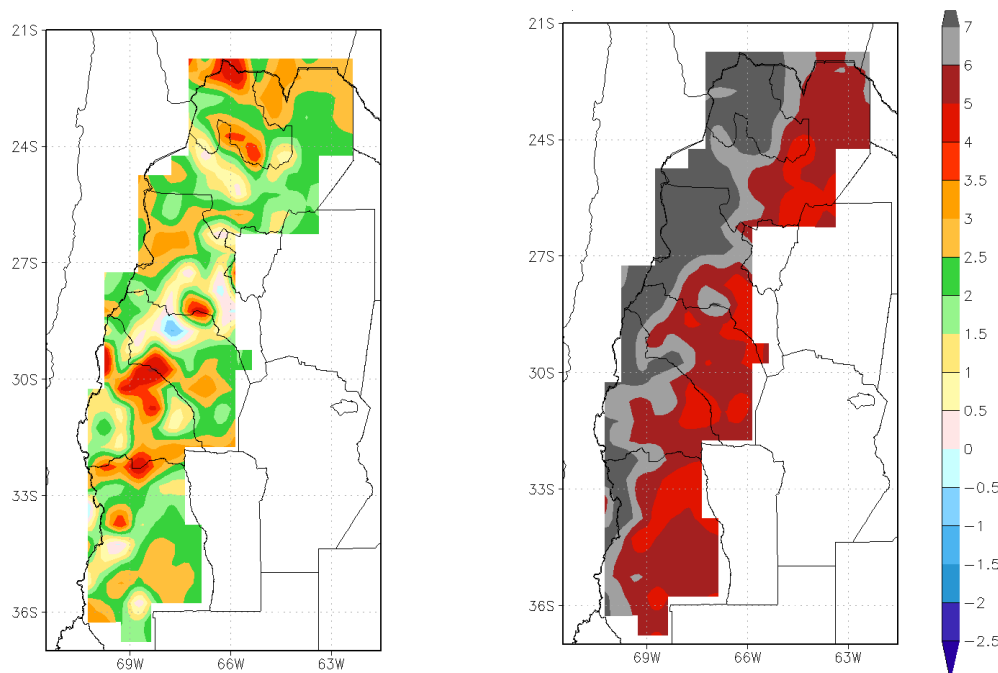


**Figura 7.4.1.2:** *Ídem figura 7.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual*

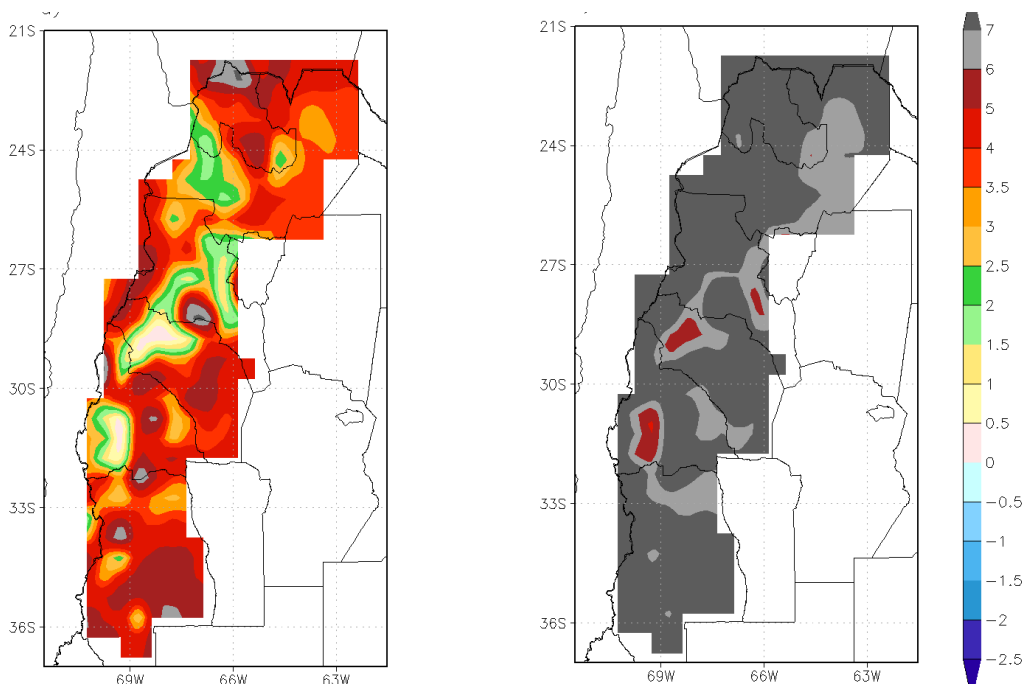




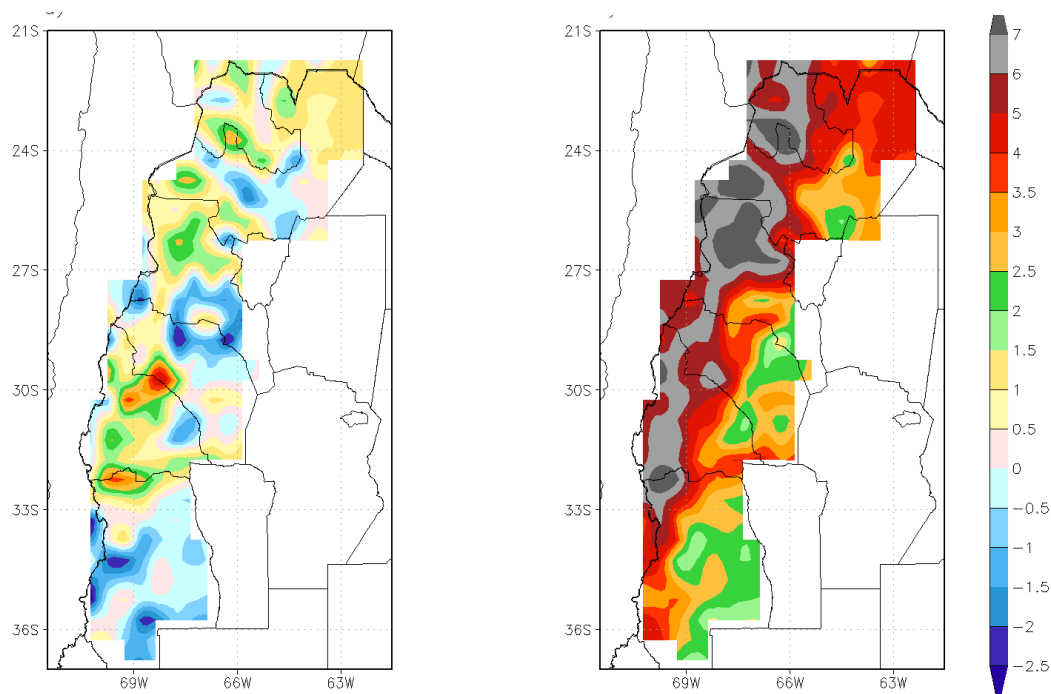
**Figura 7.4.1.3:** Ídem figura 7.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual



**Figura 7.4.1.4:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos MRI/JMA y ETA- HADCM3. Escenario A1B; a la izquierda, futuro cercano (2015-2039) y a la derecha, futuro lejano (2075-2099)



**Figura 7.4.1.5:** Ídem figura 7.4.1.4, pero para la temperatura mínima media anual

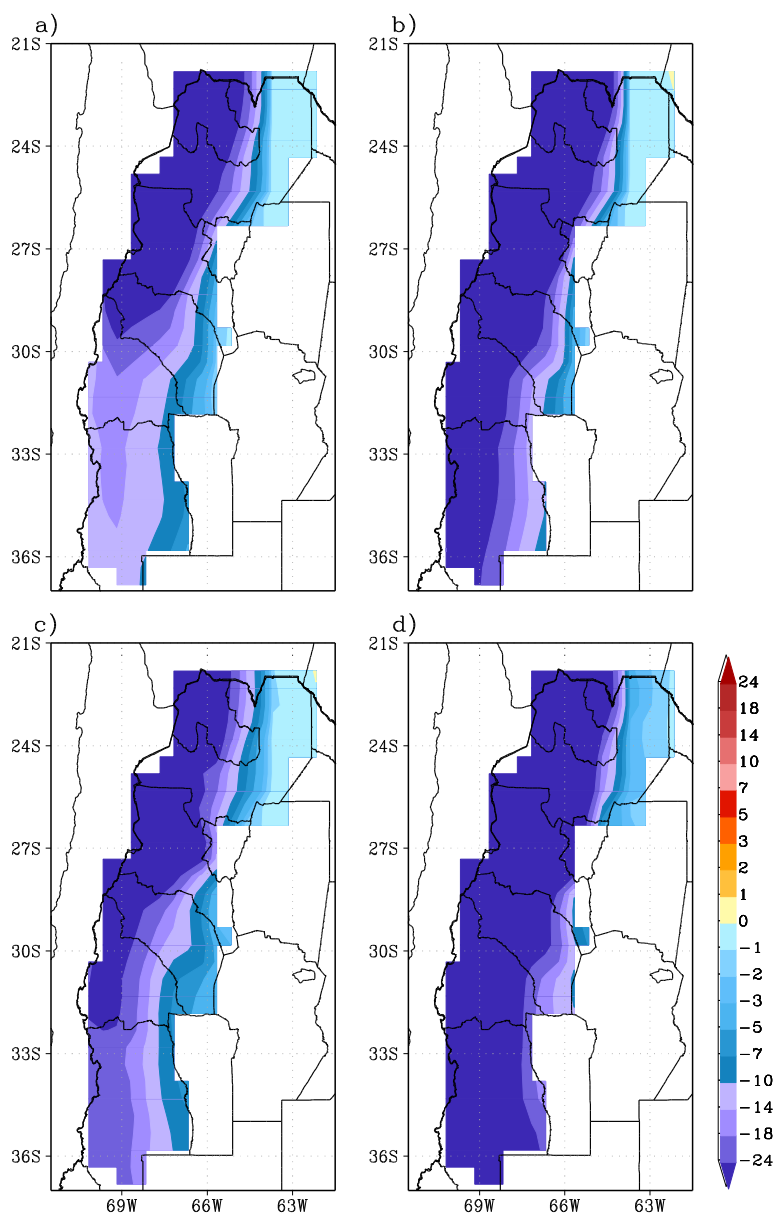


**Figura 7.4.1.6:** Ídem figura 7.4.1.4, pero para la temperatura máxima media anual

#### *Extremos térmicos*

En casi toda la región, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento proyectado, Figuras 7.4.1.7 a 7.4.1.12. En estos índices, los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en el futuro cercano solo tienen pequeñas diferencias entre ellos, pero difieren bastante en el futuro lejano. En ese futuro, en el escenario RCP8.5 se proyectan mayores cambios, como es de esperar por el mayor calentamiento asociado a este escenario.

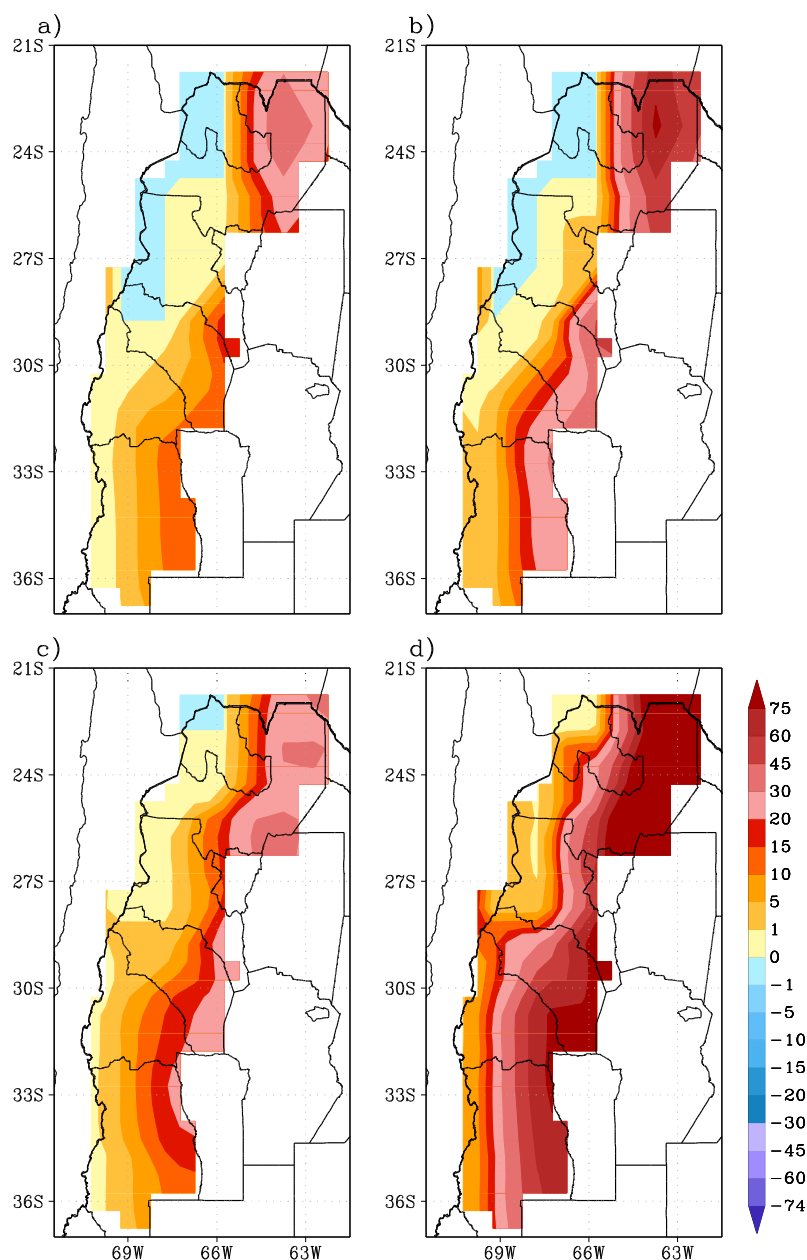
Las heladas se reducirían sustancialmente especialmente en la zona de la cordillera tendiendo a desaparecer, al menos en zonas no muy elevadas, Figura 2.2.4 y 7.4.1.7. Esto tendría lugar primero en el norte en el futuro cercano y luego en toda la franja cordillerana hacia fin de siglo. En la franja cordillerana, desde La Rioja hacia el norte, las noches con temperaturas en exceso de 20°C (noches tropicales) disminuirían en el escenario RCP4.5, y en ambos escenarios el mayor aumento de este tipo de noches se daría en el este de la región fuera de la franja cordillerana, Figura 7.4.1.8. Las temperaturas máximas y mínimas del año aumentarían en toda la región en forma creciente con el tiempo y en el escenario de mayor forzamiento radiativo (RCP 8.5), mucho más en el norte de la región que en el sur, Figuras 7.4.1.9 y 7.4.1.10. Esto también ocurriría con el aumento del porcentaje de días con temperaturas máximas extremas y con el número de días con olas de calor, con la peculiaridad de que el mayor aumento de estos índices se centraría en el extremo noroeste de la región disminuyendo en magnitud hacia el sur y el este, Figuras 7.4.1.11 y 7.4.1.12.



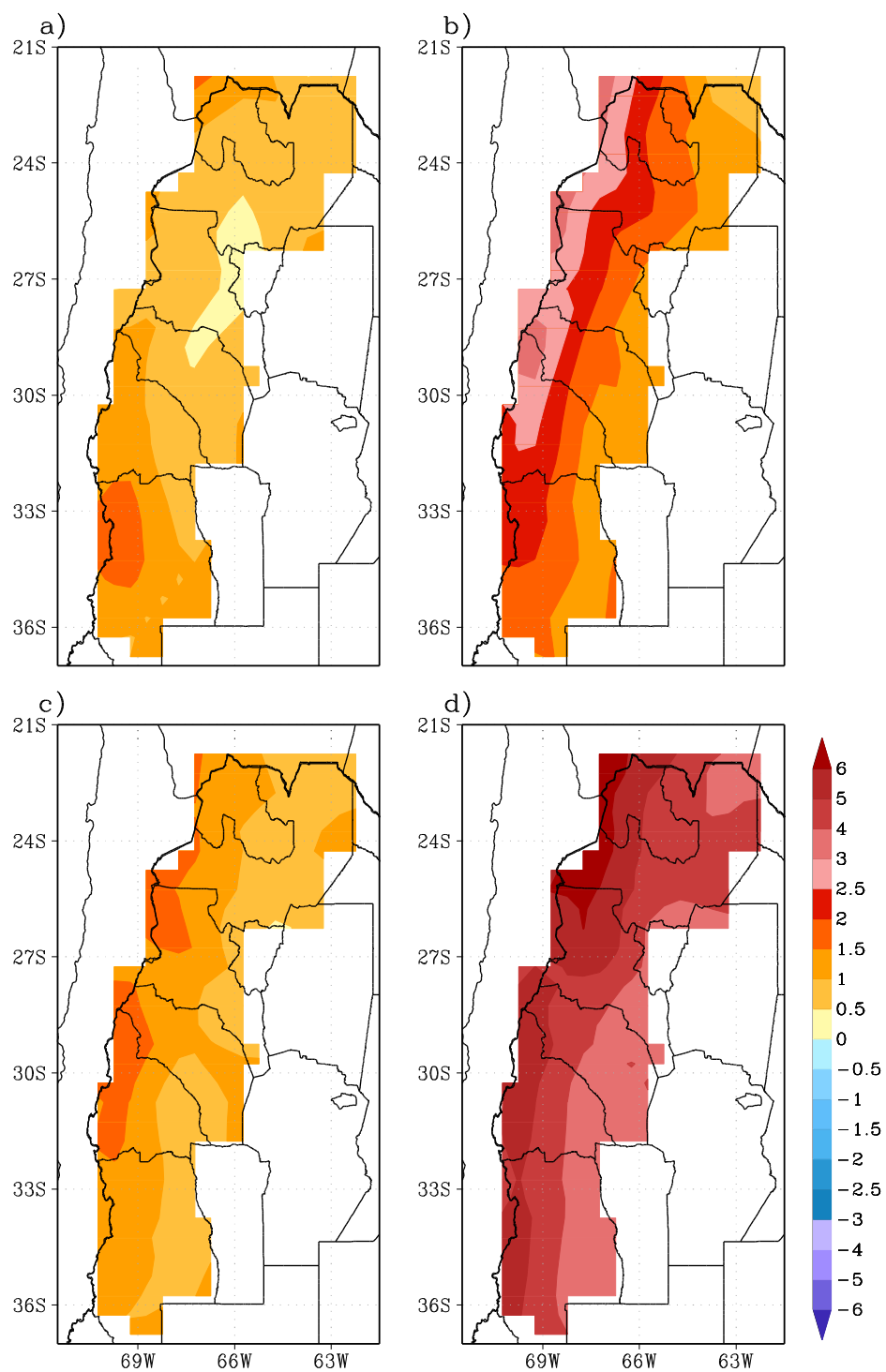
**Figura 7.4.1.7:** Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1986-2006, Promedio de los modelos IPSL\_CM5A- y MPI.ESM-LR. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

Debido a las escasas y dispersas observaciones, los cambios observados no presentan patrones geográficos confiables para su comparación con los proyectados y solo se puede considerar el

signo de su cambio regional. Pero solo coinciden en signo los cambios observados y proyectados en el número de días con heladas en el mínimo anual de la temperatura mínima; además en ambos casos los cambios son mayores en la franja cordillerana, Figuras 2.2.4, 2.2.6, 5.4.1.7 y 5.4.1.9.

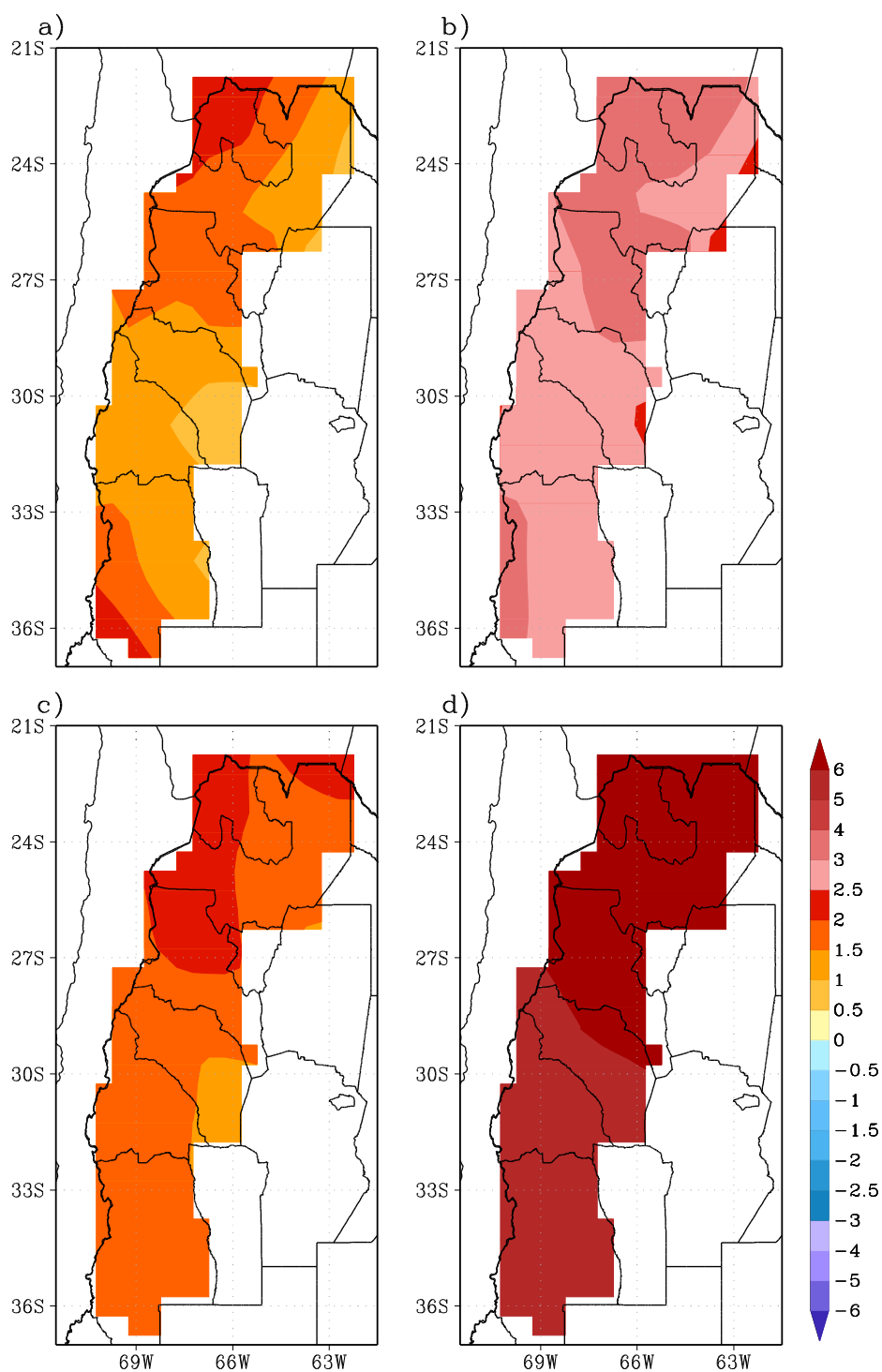


**Figura 7.4.1.8:** Ídem Figura 7.4.1. 7, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

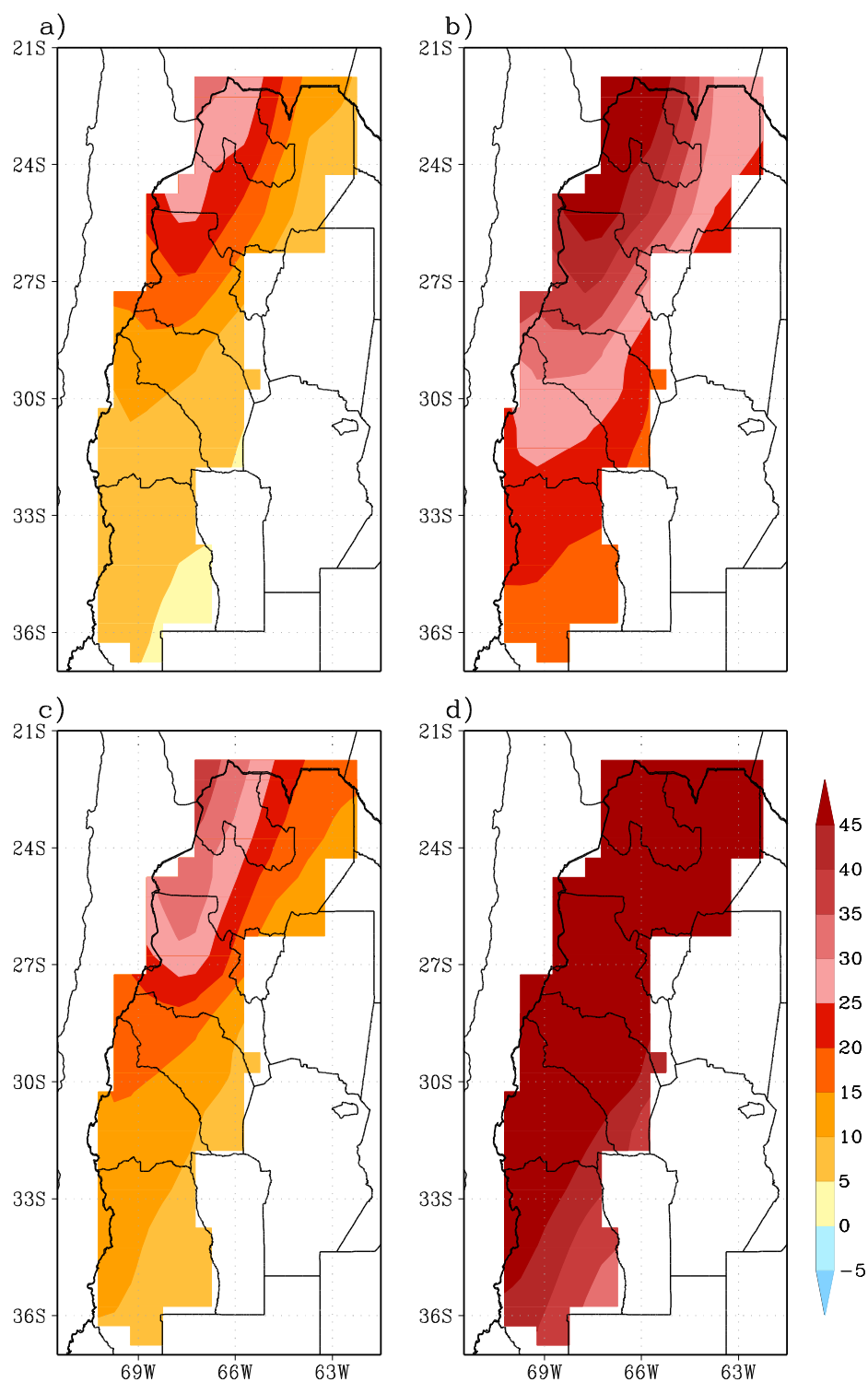


**Figura 7.4.1.9:** Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)

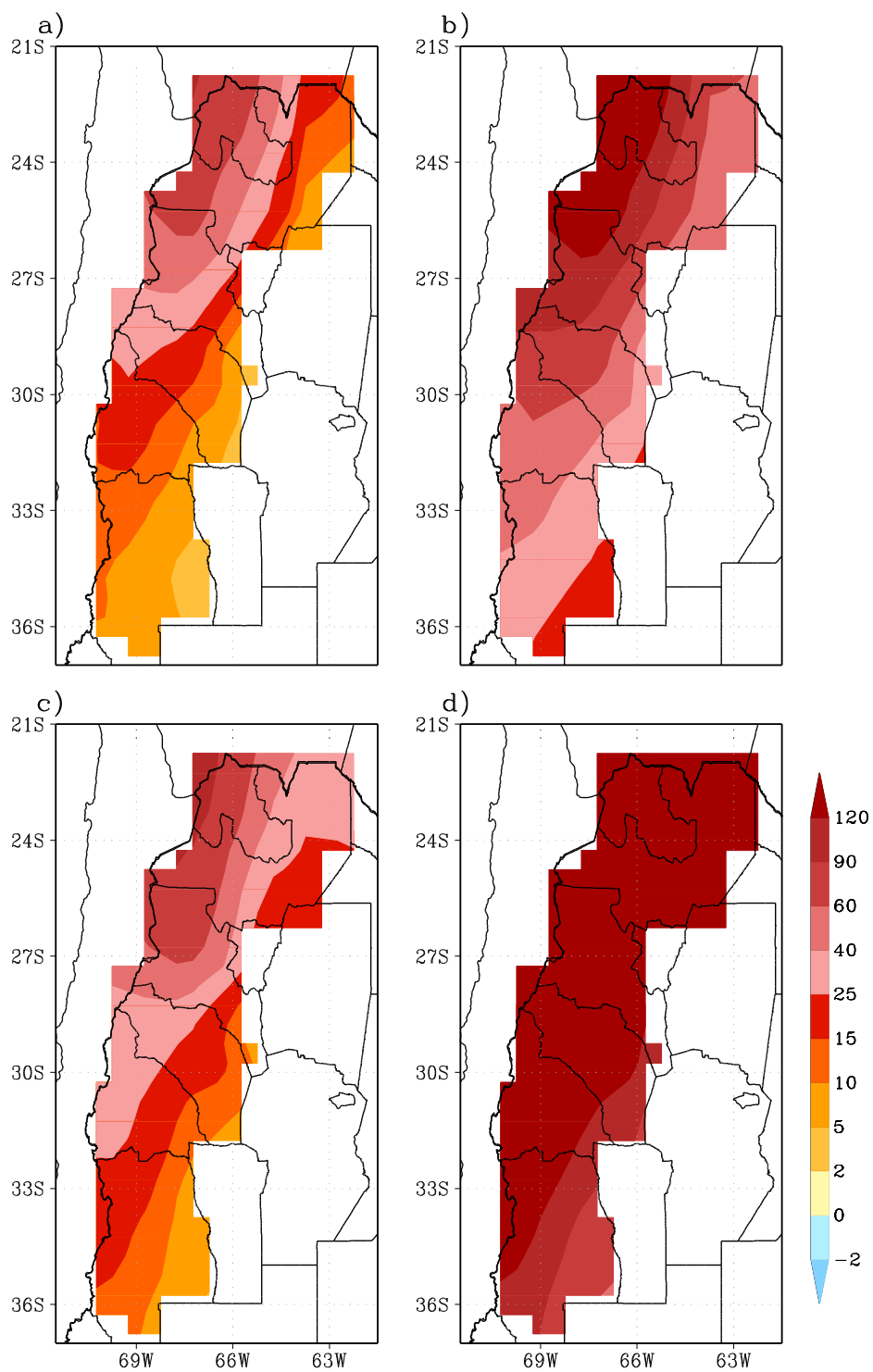




**Figura 7.4.1.10:** Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)



**Figura 7.4.1.11:** *Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90*



**Figura 7.4.1.12:** Ídem Figura 7.4.1.7, pero para los días en el año con ola de calor

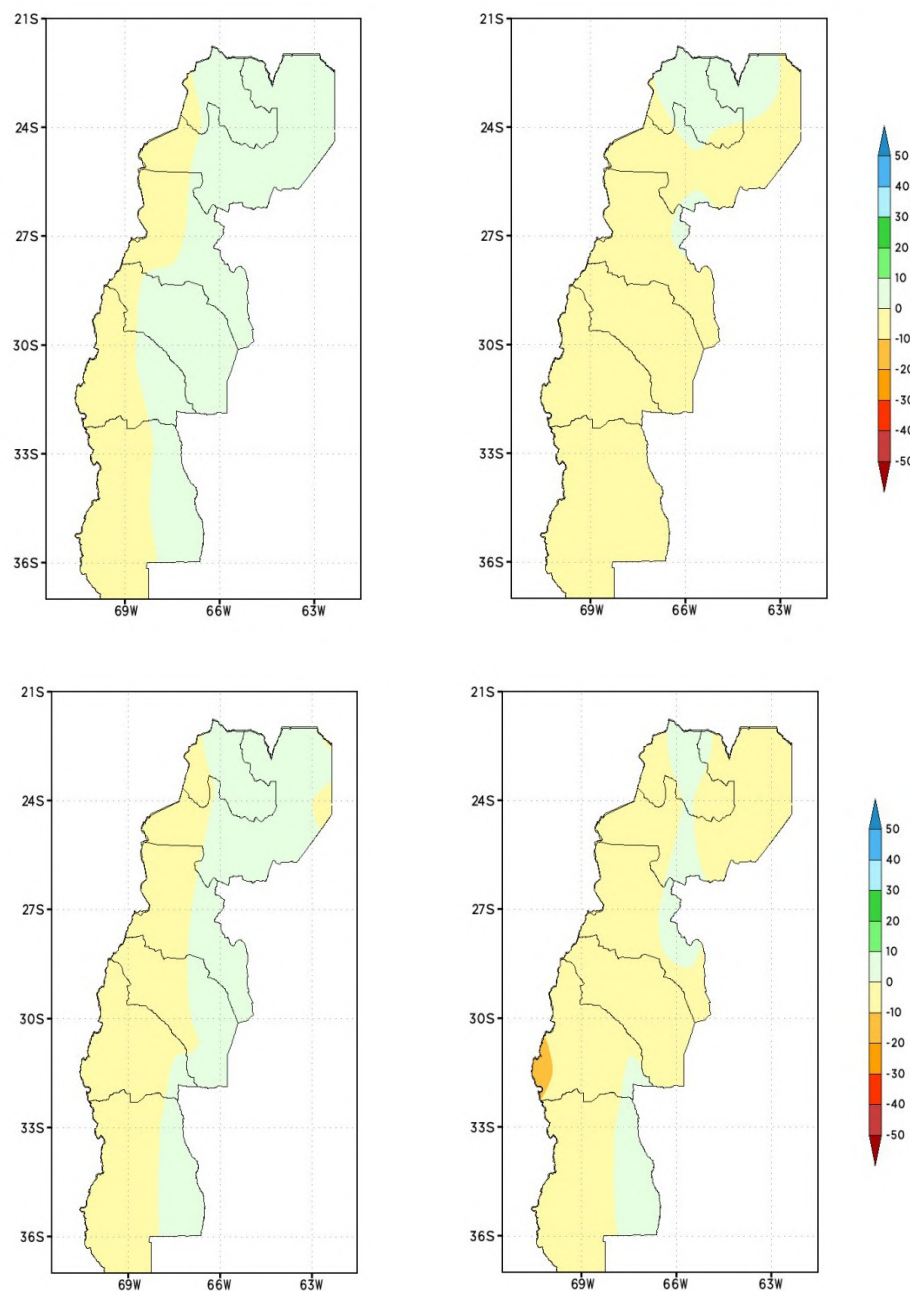
## 7.4.2 Precipitación

### *Precipitación media*

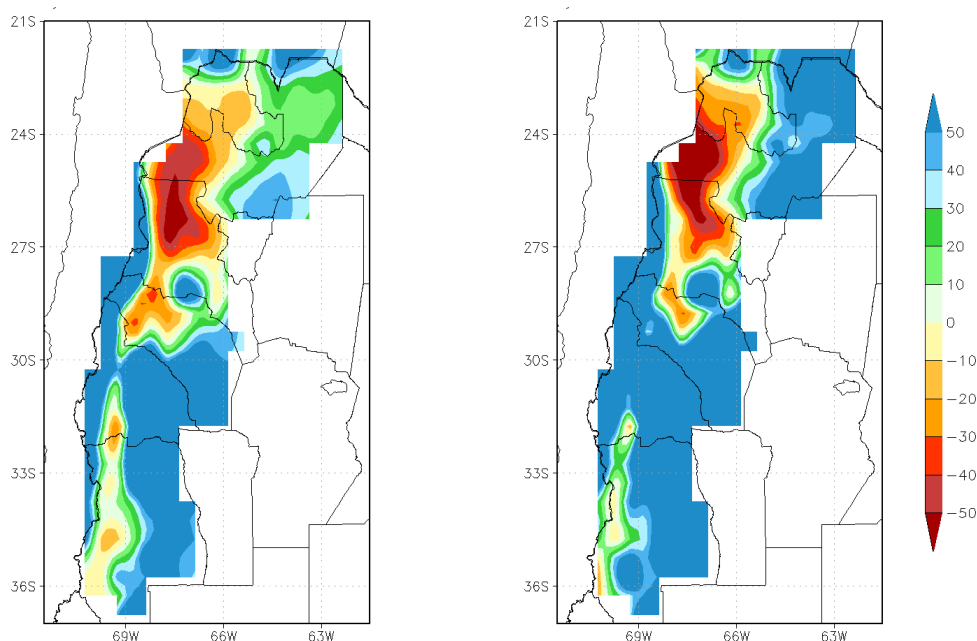
Los patrones de cambio en los escenarios RCP son parecidos en los dos horizontes temporales y entre escenarios. Sin embargo, hay notorias diferencias entre el escenario A1B, construido con los MCRs y los escenarios RCP contruidos con MCGs, Figuras 7.4.2.2 y 7.4.2.1. Esto genera incerteza, incluso sobre el signo del cambio en muchas zonas. No obstante, como las precipitaciones en esta región son en general muy exiguas, los cambios porcentuales y sus diferencias entre escenarios son de escasa relevancia.

Por otra parte, hay concordancia en las reducciones observadas y proyectadas buena parte de la zona cordillerana de Salta y Catamarca donde la precipitación también disminuyó entre 1960 y 2010, Figura 7.2.2.1. Esto muestra que en esa zona el cambio proyectado para este siglo en todos los escenarios es la prolongación de lo que ya ha estado ocurriendo. Otra similitud, común a los distintos escenarios de los MCRs y del RCP4.5 es el aumento de la precipitación en el futuro cercano en casi todo el este de la región desde el sur de Salta hasta Mendoza, lo que también coincide en signo con el cambio observado entre 1960 y 2010.

La proyección de menores precipitaciones, al menos en los MCGs, en la franja cordillerana configuraría un escenario de riesgo para los recursos hídricos de los oasis del piedemonte cordillerano, que se verían disminuidos además en un contexto además de mayor demanda por un fuerte y rápido calentamiento.



**Figura 7.4.2.1:** Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL\_CM5A-MRy MPI.ESM-LR. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

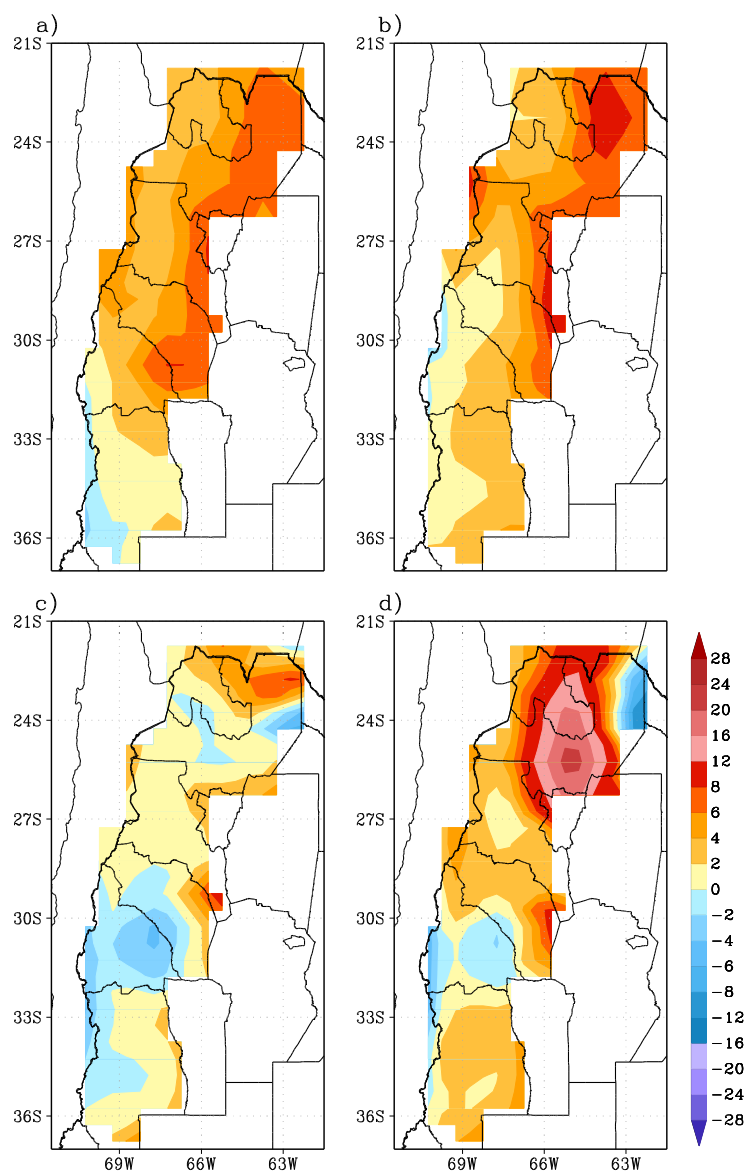


**Figura 7.4.2.2:** Cambio en precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos MRI/JMA y ETA- HADCM3. Escenario A1B. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

#### *Precipitaciones extremas*

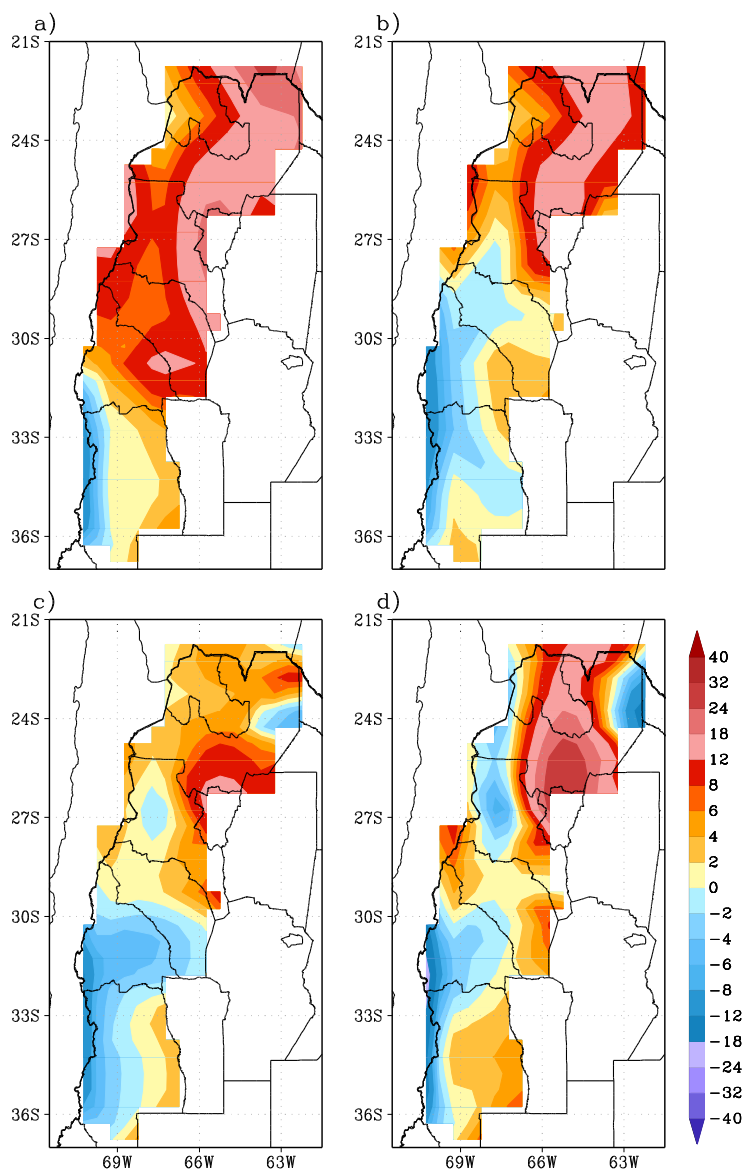
Para los cuatro indicadores proyectados, el signo del cambio regional coincide con los observados en el periodo 1960-2010, Figuras 2.3.2 a 2.3.4 y 7.2.2.6 a 7.2.2.9, lo cual es un indicio más de que los cambios en la precipitación observados en la segunda mitad del siglo pasado se intensificarán durante el siglo actual.





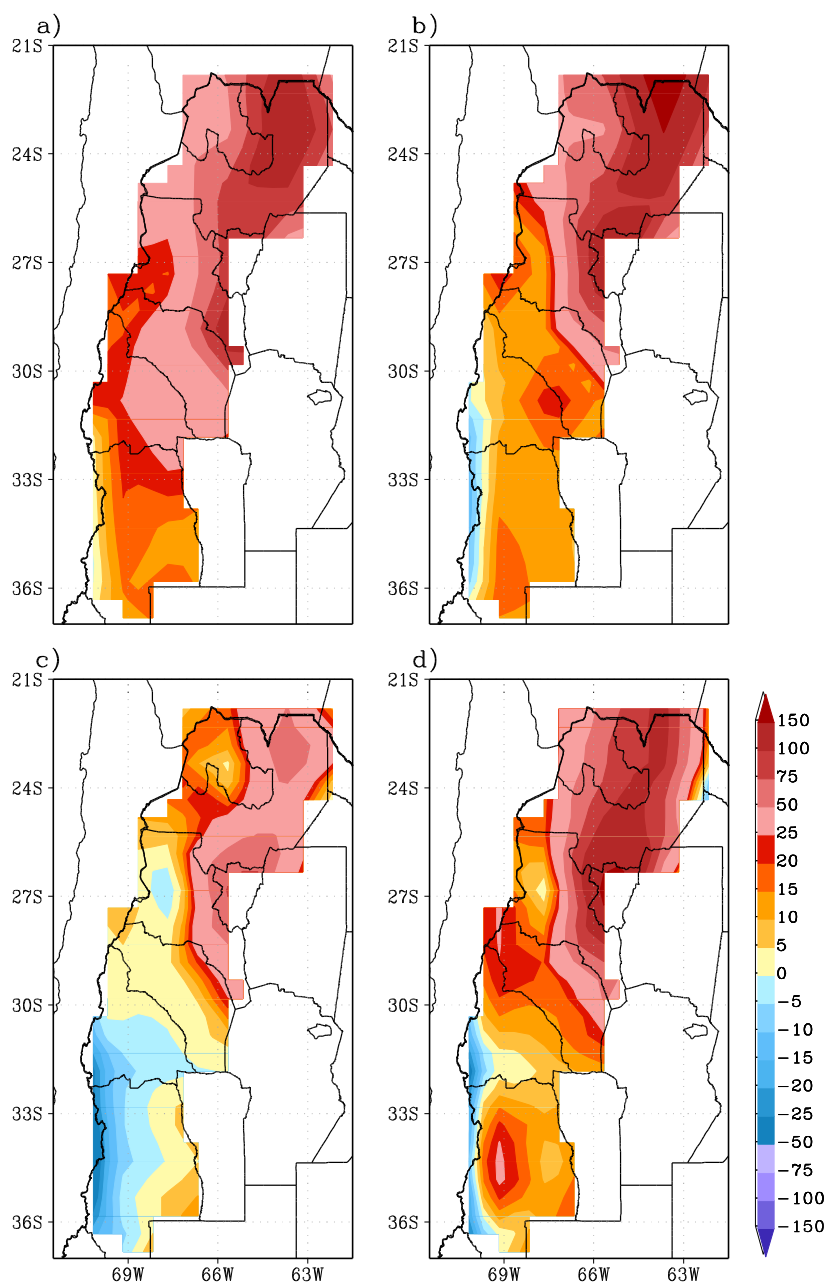
**Figura 7.4.2.3:** Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL\_CM5A-MR y MPI.ESM-LR a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

Para la precipitación diaria máxima del año y la acumulada máxima anual en 5 días se proyectan aumentos en ambos escenarios y horizontes temporales en casi toda la región excepto en el sudoeste de la misma y en particular sobre la cordillera en San Juan y Mendoza. Figuras 7.4.2.3 y 7.4.2.4. El mayor aumento se proyecta para el noreste, con centro en la provincia de Salta. Este gradiente noreste-sudoeste presenta pocas distorsiones locales en la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa que es en general un indicador más robusto de las precipitaciones extremas, Figura 7.4.2.5.

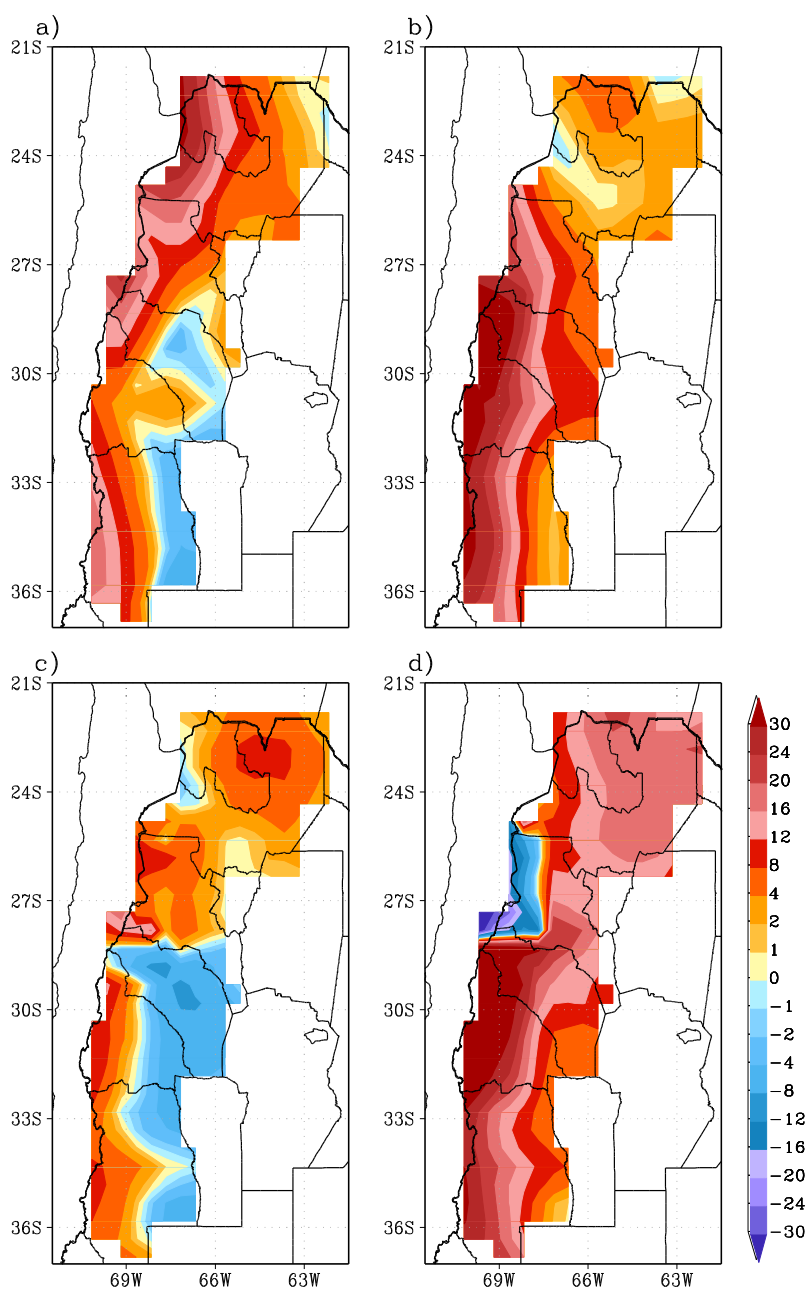


**Figura 7.4.2.4:** Ídem Figura 7.4.2.3, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

Como en la región Centro, las proyecciones indican que habría en general una prolongación de la racha seca máxima anual, la que en estas regiones es prácticamente el periodo invernal sin lluvia. La excepción es la región este de la Rioja hasta Mendoza que tiene un comportamiento opuesto en el escenario RCP 4.5, Figura 7.4.2.6. En general, en esta región como en otras zonas del país, las proyecciones indican no solo cambios en las precipitaciones medias anuales, sino en las características de las mismas, con lluvias más intensas y más días sin precipitación.



**Figura 7.4.2.5:** Ídem Figura 7.4.2.3, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 7.4.2.6:** Ídem Figura 7.7.2.3, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 7.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones.

En este estudio, se comparan tres escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales, el RCP4.5 de emisiones moderadas y el A1B de emisiones intermedias entre las de los dos anteriores. En cuanto a los modelos, se utilizan los dos MCGs y los dos MCRs seleccionados para la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5. En esta región hay que considerar cierto nivel de incerteza adicional en el escenario cercano, especialmente en el caso de la precipitación por la variabilidad interdecadal, ya que esta puede ser importante como ya lo ha sido en el periodo 1960-2010.

### 7.5.1 Temperatura

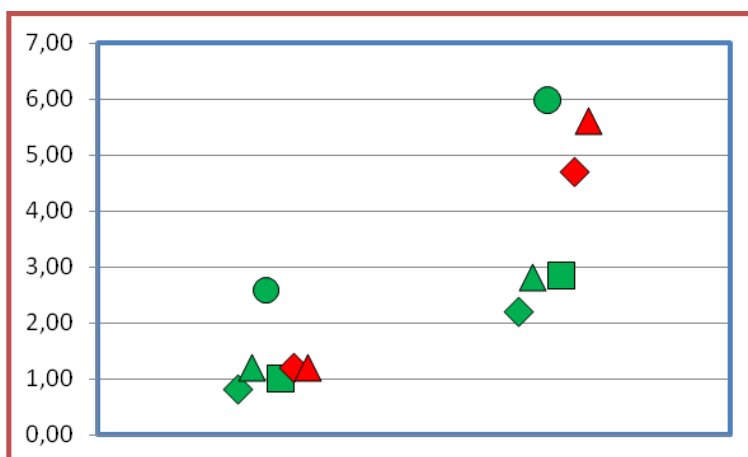
#### *Temperaturas medias*

El modelo ETA-HADCM3 proyecta calentamientos para el futuro cercano y lejano mucho mayores que el resto de los modelos en los tres escenarios y que el promedio de los 42 modelos CMIP5. En consecuencia, la probabilidad de que sus proyecciones sean correctas es muy pequeña y la discusión que sigue se hace sobre la base de los otros tres modelos seleccionados para esta región.

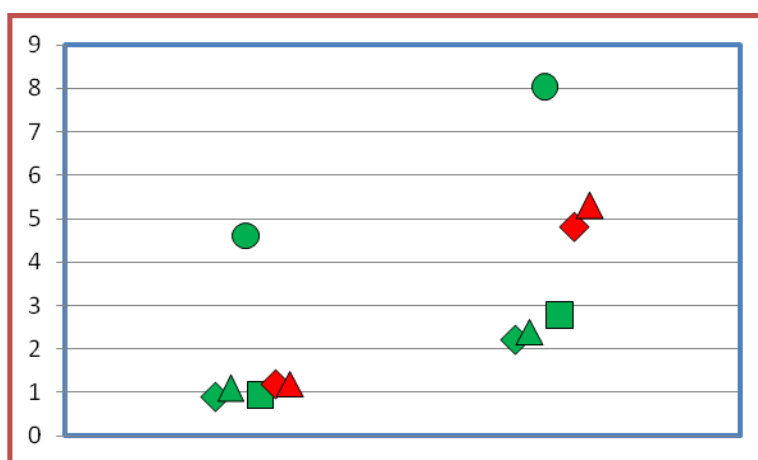
En el futuro cercano, la diferencia de calentamiento de los otros tres modelos en los tres escenarios es pequeña con promedios regionales de calentamientos de alrededor de 1°C, Figura 7.5.1.1. En el promedio de los 42 MCGs del CMIP5 el calentamiento promedio es algo menor, menos de 1°C, Figura 3.4.1. Para el futuro lejano, la dispersión de aumento de la temperatura media regional es mayor, especialmente entre escenarios. El promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1, proyecta un aumento regional de 2°C en el escenario RCP4.5 y de 3,5 a 4°C en el RCP8.5, muy consistente con los resultados de los modelos de mejor performance en la región, en el escenario RCP4.5, pero menor en el escenario RCP8.5. De todos modos, aún en el promedio de los 42 modelos, el calentamiento regional en el escenario RCP8.5 es muy importante y por lo tanto con poca incerteza se debería esperar que sea mayor a 3,5°C.

En el caso de las temperaturas mínimas y máximas, las características de los cambios en los modelos y en los dos escenarios RCP son muy similares a las de las temperaturas medias, Figuras

7.5.1.2 y 7.5.1.3, por lo que valen los mismos comentarios y por lo tanto, se puede estimar que esta región tendrá importantes aumentos en todas las temperaturas, mínimas, medias y máximas.



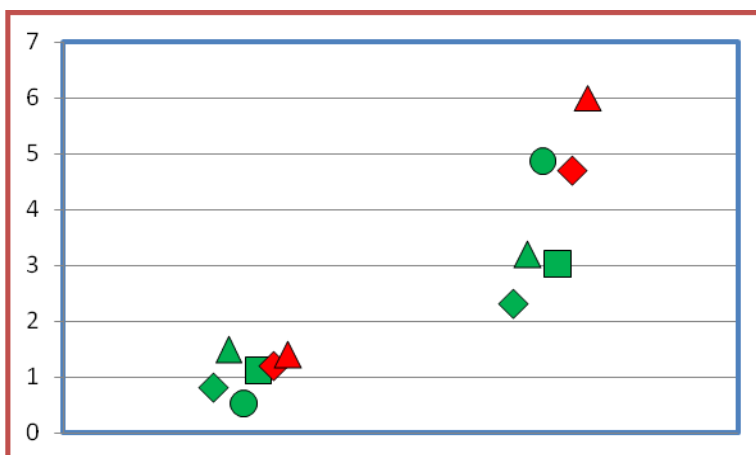
**Figura 7.5.1.1:** Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: IPSL\_CM5A-MR (triángulos), MPI.ESM-LR (rombos) y ETA-HADCM3 (círculos) y MRI/JMA (cuadrados)



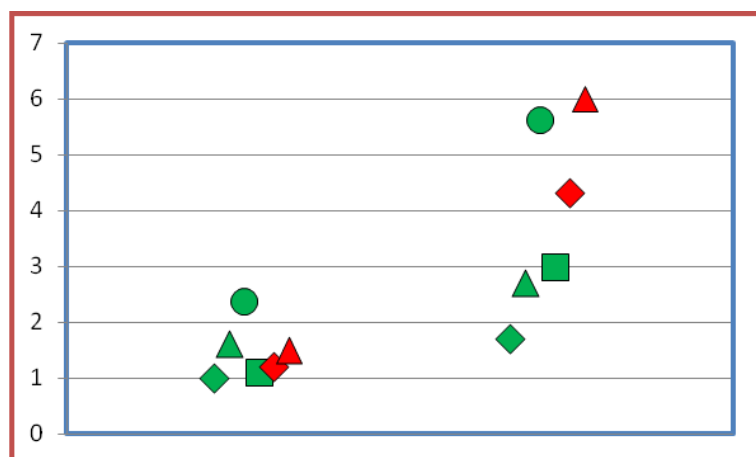
**Figura 7.5.1.2:** Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional

Los calentamientos de verano e invierno, son similares en su distribución por escenarios, modelos y horizontes temporales, pero en el verano son en promedio de 0,5 a 1°C mayores que en el invierno, Figuras 7.5.1.4 y 7.5.1.5. En cuanto a la incerteza, valen los mismos comentarios que para la temperatura media anual.

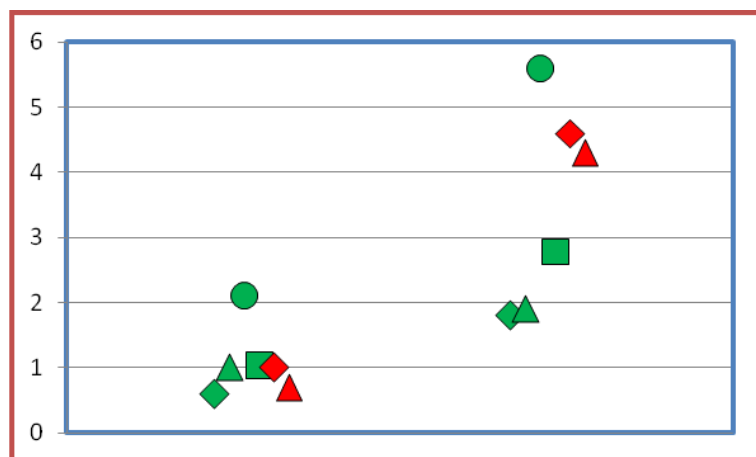




**Figura 7.5.1.3:** *Idem 7.5.1.1 pero para la temperatura máxima media regional*



**Figura 7.5.1.4:** *Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

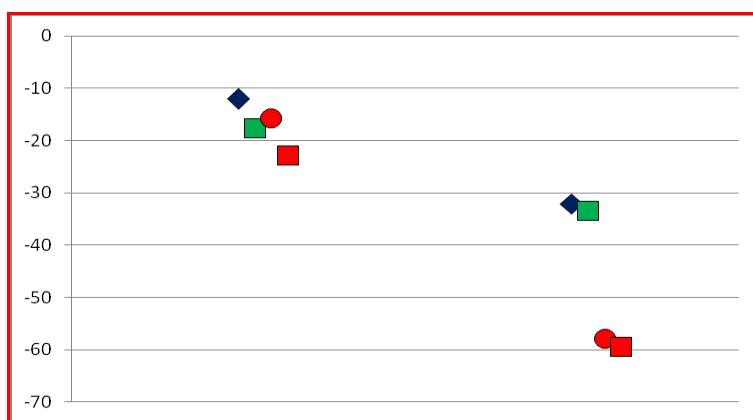


**Figura 7.5.1.5:** *Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

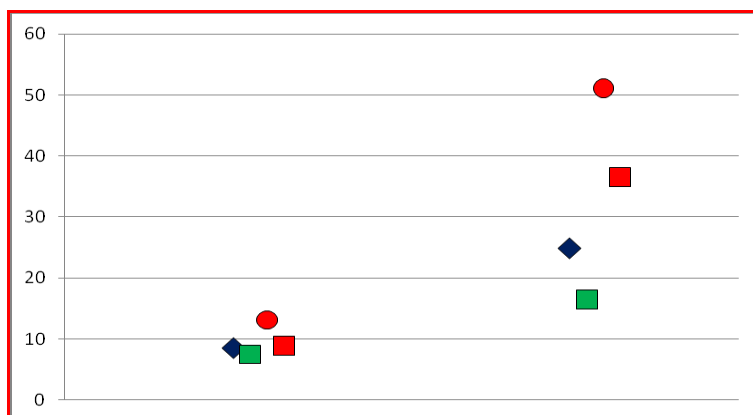
### *Extremos térmicos*

Todos los índices de extremos térmicos en el futuro cercano tienen pocas diferencias en su promedio regional entre escenarios y modelos, con lo cual habría poca incerteza en su signo y magnitud por estas dos fuentes de posibles incertezas (modelos y escenarios), Figuras 7.5.1.6 a 7.5.1.11 y son consistentes con el fuerte calentamiento regional proyectado. De esta forma se puede esperar en el promedio regional una reducción del número de heladas de entre 10 y 25 días, un aumento de alrededor de 10 noches tropicales en el año, un aumento de las temperaturas mínimas y máximas del año de alrededor de 1 a 2°C, un aumento del porcentaje de días con temperaturas máximas extremas de entre 10 y 20% y unos 25 a 40 días de aumento en el año de días con olas de calor.

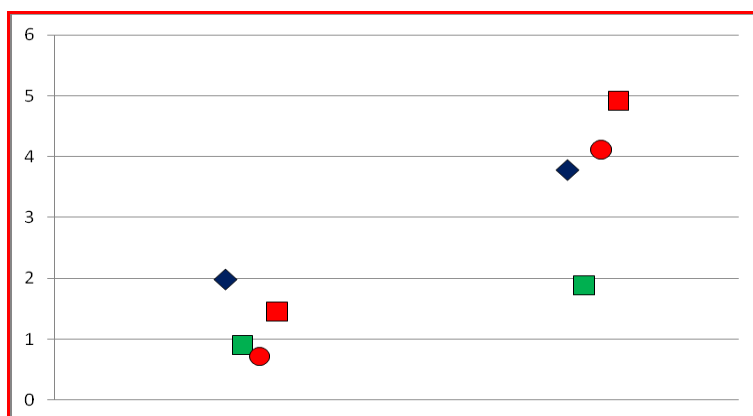
Hacia fin de siglo los cambios proyectados en los 6 índices se intensifican con respecto al futuro cercano, pero con mayor dispersión, especialmente entre escenarios, lo cual es consistente con los cambios esperados en las temperaturas medias en los casos más extremos habría 60 días menos de heladas en el promedio regional, unas 50 noches tropicales adicionales, la mínima extrema del año aumentaría en 5°C y la máxima anual en 7°C, habría un 60% más de días con temperaturas extremas y hasta 200 días más con olas de calor. Habida cuenta que las máximas extremas del año ya están entre 35 y 42°C, Figura 2.2.7, si se concretara este escenario extremo, muchas zonas de la región tendrían serias limitaciones para las actividades al aire libre y para la vida en general.



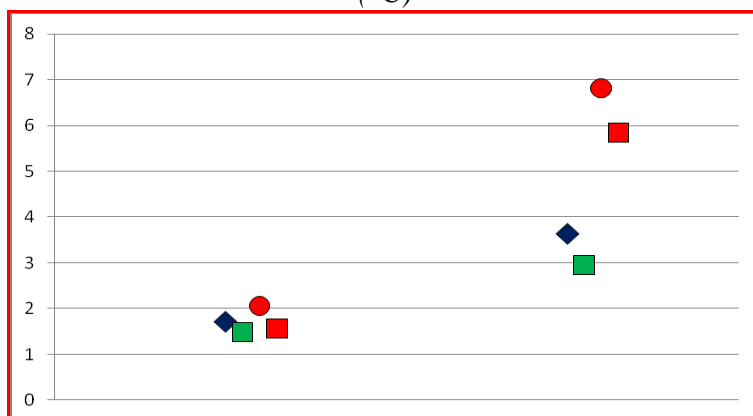
**Figura 7.5.1.6:** Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos IPSL\_CM5A-MR (círculos), MPI\_ESM-LR (cuadrados) y MRI/JMA (rombos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En azul escenario A1B en verde RCP4.5 y en rojo RCP8.5



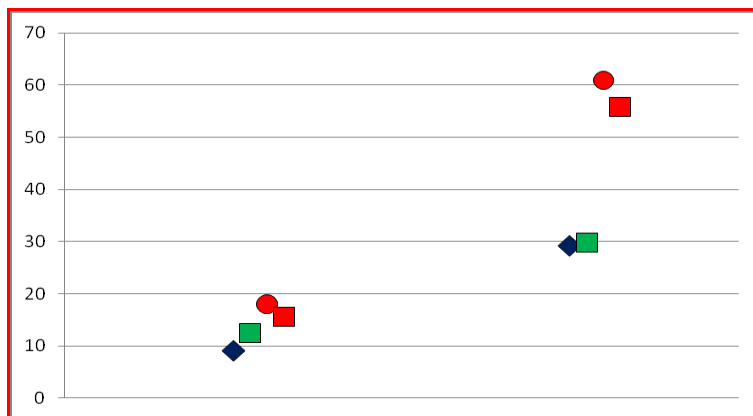
**Figura 7.5.1.7:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



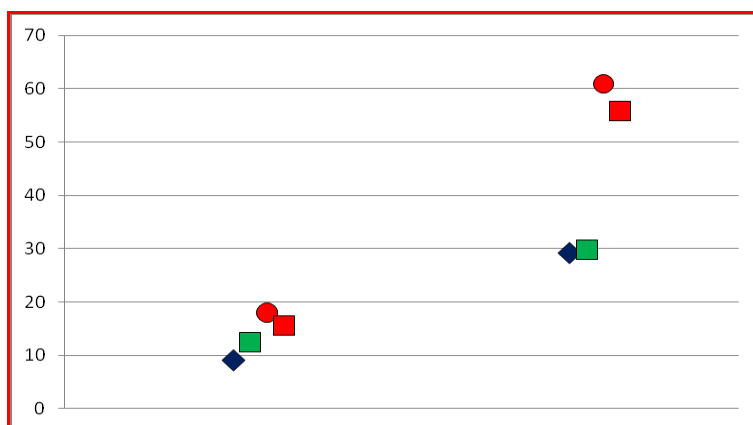
**Figura 7.5.1.8:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual ( $^{\circ}\text{C}$ )



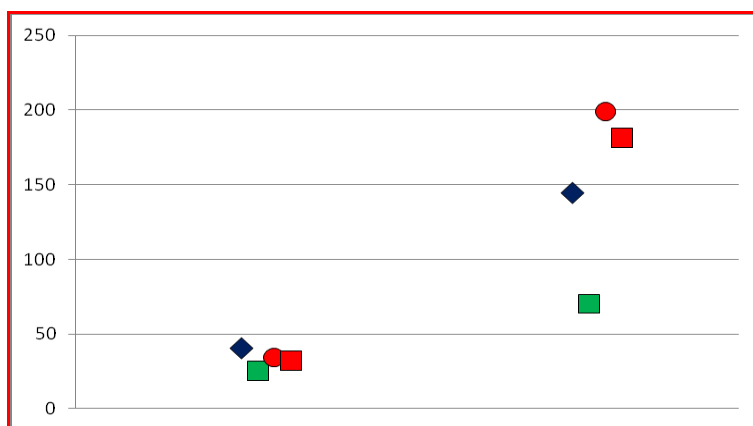
**Figura 7.5.1.9:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el valor máximo de la temperatura anual ( $^{\circ}\text{C}$ )



**Figura 7.5.1.10:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90



**Figura 7.5.1.10:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

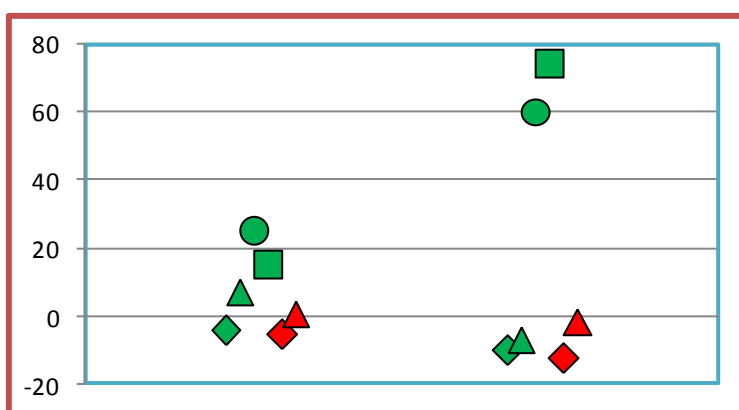


**Figura 7.5.1.11:** Ídem Figura 7.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

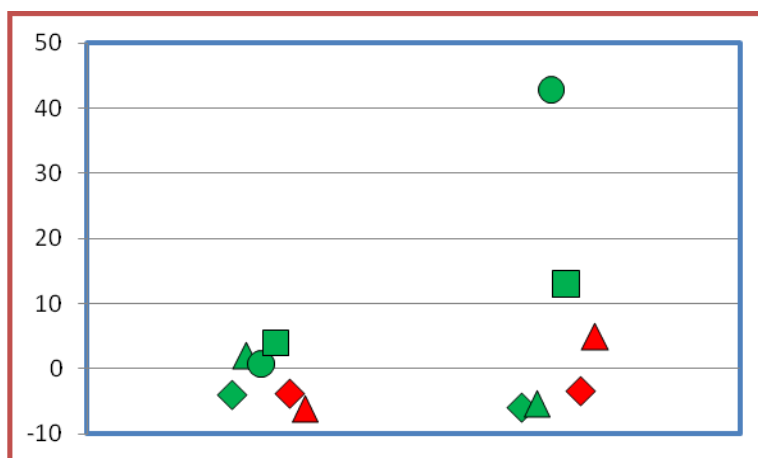
## 7.5.2 Precipitación

### *Precipitación media*

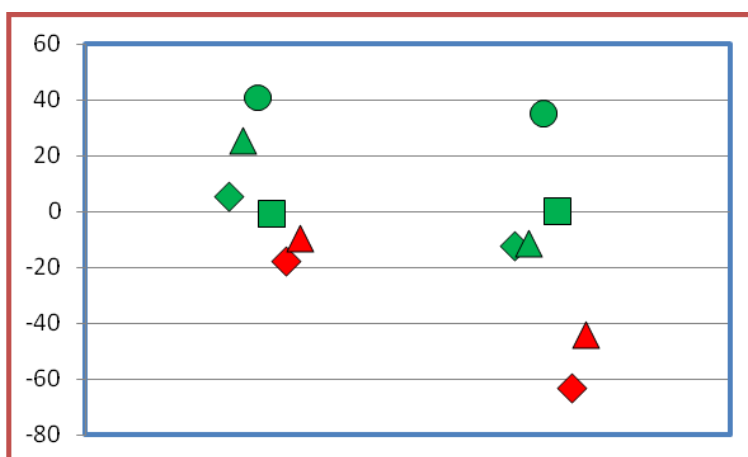
Los MCGs en los dos escenarios y horizontes temporales proyectan escasos cambios, porcentuales predominantemente negativos, pero como el promedio de la región es muy bajo, ello no representa cambios importantes en valor absoluto, Figura 7.5.2.1. Lo mismo puede decirse de la precipitación del verano, Figura 7.5.2.2. En el caso del invierno, las disminuciones porcentuales de la precipitación son más grandes, Figura 7.5.2.1, pero como esta región es muy seca en esa estación, esos cambios son totalmente irrelevantes; figura 7.2.2.4. Los modelos MCRs y escenario A1B, tienden por el contrario a proyectar aumentos de la precipitación que aun siendo altos, por la misma razón, son pequeños en valor absoluto.



**Figura 7.5.2.1:** Diferencia porcentual proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: IPSL\_CM5A-MR (triángulos), MPI.ESM-LR (rombos) y ETA- HADCM3 (círculos) y MRI/JMA (cuadrados)



**Figura 7.5.2.2:** Ídem 7.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)



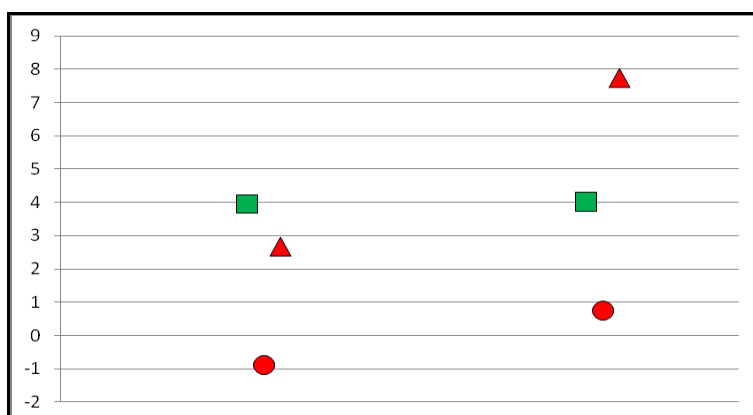
**Figura 7.5.2.3:** Ídem 7.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)

#### *Precipitaciones extremas*

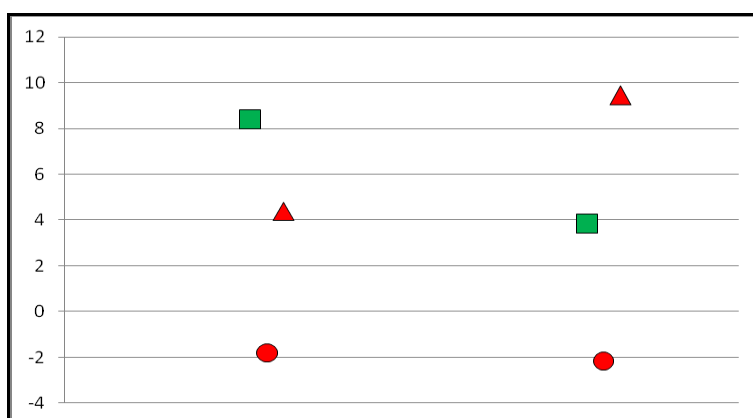
Las diferencias en los cambios de los promedios regionales de los índices de precipitaciones extremas entre los distintos escenarios, modelos y horizontes temporales son grandes en términos relativos, pero pequeños en valor absoluto, Figuras 7.2.5.4 a 7.2.5.6, e incluso sus rangos abarcan cambios con signos opuestos. De todos modos estos cambios serían en general irrelevantes frente a los valores del periodo 1960-2010, Figuras 2.3.2 y 2.3.3, excepto para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa que en un modelo y escenario de fin de siglo aumentaría en más de 80 mm y en otro se reduciría en 10 mm, Figura 7.2.5.4 y 2.3.4.

Sobre el cambio en el número máximo anual de días consecutivos secos no parece haber mucha certeza para el futuro cercano ya que el rango abarca casos con distinto signo, pero parece más definido el signo en el futuro lejano con prolongaciones que van de 8 a 17 días, Figura 7.2.5.7.

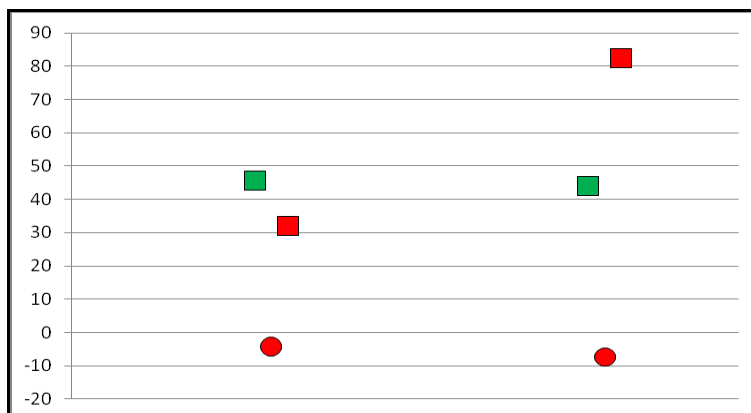




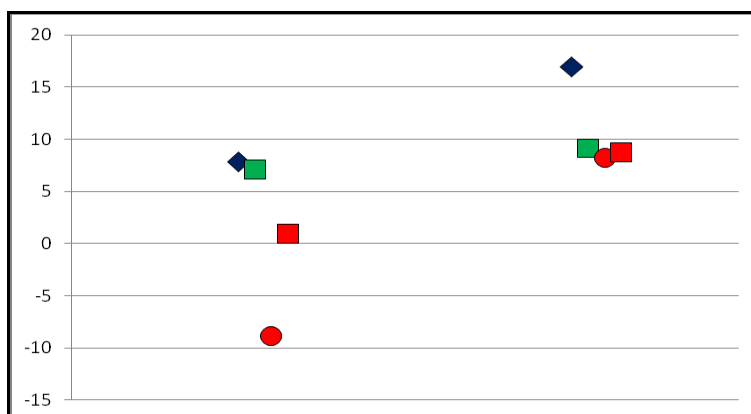
**Figura 7.5.2.4:** Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos IPSL\_CM5A-MR (círculos) y MPI.ESM-LR (cuadrados) y MRI-CGCM3 (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5, y en rojo RCP8.5



**Figura 7.5.2.5:** Ídem Figura 7.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)



**Figura 7.5.2.6:** Ídem Figura 7.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 7.5.2.7:** Ídem Figura 7.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos y con el agregado en rombo azul del modelo MRI/JMA, escenario A1B

## 7.6 CONCLUSIONES

La región Andes no cuenta con muchas series largas de datos y además las pocas existentes no son muy representativas de un gran entorno porque la complejidad topográfica genera grandes gradientes climáticos. En particular, hay muy pocas series representativas de la alta montaña. Estas condiciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar las tendencias y cambios climáticos estimados con estas pocas series de datos.

La temperatura media anual aumentó entre 1960 y 2010 sobre casi la totalidad del norte de la región y en Cuyo, y muy fuertemente en la región metropolitana de Mendoza, donde fue superior a 1°C. El aumento de la temperatura fue más pronunciado en la temperatura mínima que en la máxima. Como reflejo del mayor cambio en las temperaturas mínimas, los cambios más significativos en los extremos térmicos se registraron en los índices relacionados con los

extremos fríos, esto es en los días con helada, y en las temperaturas mínimas extremas. (*Confianza alta*)

Coincidente con el aumento generalizado de la temperatura, la altura de la isoterma de 0°C aumento entre 1950 y 2010, (*confianza alta*), en 100 m en el norte de la región y 250 m en el sur de la misma, (*Confianza media*). La altura de la isoterma de 0° C puede ser un indicador del límite aproximado del hielo y la nieve en la cordillera de los Andes, y este aumento ha sido acompañado con el retroceso generalizado de los glaciares.

Entre los años 1960 y 2010, la precipitación anual en la región Andes aumentó en la mayor parte del territorio, a excepción de la provincia de Catamarca, con valores significativos superiores a 100 mm sobre el norte de Mendoza, (*confianza media*). Estos cambios se han debido principalmente a un salto abrupto producido a mediados de la década de 1970, sobre todo en la estación estival. La variabilidad interdecadal de la precipitación en esta región ha sido muy importante, de modo que cuando se calculan tendencias en periodos de tres o cinco décadas puede arribarse a conclusiones diferentes, según sea la fecha de inicio y/o fin de la serie. Los caudales de unos pocos ríos de San Juan y Mendoza pueden servir como aproximación a la precipitación sobre la cordillera en esa provincia y presentaron una tendencia decreciente de largo plazo desde comienzos del siglo pasado con fuerte variabilidad que dio lugar a una fuerte recuperación en las décadas de 1970 y 1980 y luego un nuevo tren negativo (*confianza media*).

En general se observó un incremento de la cantidad de lluvia por evento, pero no así un aumento de la cantidad de días con lluvia, pero este resultado varía dentro de la región. El número máximo de días consecutivos sin lluvia de cada año se incrementó en toda la región con valores muy altos y significativos en el norte de la región, especialmente a partir de la década de 1980 (*Confianza media*). Como esta región tiene un periodo invernal con poca o ninguna precipitación, este índice reflejó en realidad la prolongación del periodo seco invernal.

El calentamiento para el siglo XXI sería más rápido que el observado entre 1960 y 2010, indicando una aceleración que lleva a valores muy altos para fin de siglo en el escenario RCP8.5 (*Confianza alta*). Las diferencias en el aumento de temperatura entre escenarios no son muy notorias en el futuro cercano. Los valores excepcionales de más de 5 y 6°C de calentamiento en la temperatura para el futuro lejano parecen exagerados, pero son compatibles con el calentamiento promedio global de 4°C proyectado en el escenario RCP8.5 para el año 2100 (*Confianza media*). Este valor resultaría del promedio de menor calentamiento en los océanos y mucho mayor en las zonas continentales alejadas de los océanos. Precisamente esa es la condición geográfica de esta región, agravada al estar aislada por montañas desde el oeste, norte y este.

La isoterma de 0°C ascendería otros 250m en el futuro cercano y 500m en el futuro lejano, continuando la tendencia observada entre 1950 y 2010 y acentuando el retroceso de los glaciares andinos (*Confianza alta en el signo del cambio, media-baja en su magnitud*).

En casi toda la región, la evolución proyectada para el siglo XXI de los 6 índices de extremos térmicos considerados en este estudio es compatible con el calentamiento proyectado. Las

heladas se reducirían sustancialmente especialmente en la zona de la cordillera tendiendo a desaparecer, al menos en zonas no muy elevadas. Las temperaturas máximas y mínimas del año, el porcentaje de días con temperaturas máximas extremas aumentarían en toda la región. Lo mismo ocurriría con el número de días con olas de calor, especialmente en el extremo noroeste de la región (**Confianza media**).

Las proyecciones tanto para el futuro cercano como lejano, no indican cambios sustanciales en la precipitación media de la región (**Confianza baja**), presentando grandes dispersiones entre modelos. Las serias deficiencias que los modelos todavía presentan en representar adecuadamente la complejidad del clima en una región montañosa como esta, limita seriamente el poder concluir si los cambios observados en la precipitación media hasta 2010 continuarán o no en el futuro. Asimismo, las proyecciones en promedio indicarían una continuación del incremento de los extremos de precipitación (**confianza media**) aunque con gran incerteza en cuanto a su magnitud.

## Referencias

Agosta, E.A. y R.H. Compagnucci, 2012: Central West Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections. *J. Climate*, **25**, 1657–1677.

Agosta, E. A. 2013: The 18.6-year nodal tidal cycle and the bi-decadal precipitation oscillation over the plains to the east of subtropical Andes. *South America. International Journal of Climatology*, n/a–n/a. doi:10.1002/joc.3787

Barros, V., A. Fernández, C. Vera e I. Camilloni 2006: Identificación de las tendencias climáticas, Capítulo 2 del estudio habilitante de la Segunda Comunicación Nacional. Patagonia y sur de las provincias de la Pampa y Buenos Aires. Fundación Torcuato Di Tella, Buenos Aires, 186 pag.

Barros, V., M. E. Doyle e I. A. Camilloni, 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 19–33.



Barrucand, M., M. Rusticucci y W. Vargas, 2008: Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *J. Geophys. Res.*, **113**, D20111.

Camilloni, I., 2006. Tendencias Hidrológicas en Argentina. Capítulo del libro República Argentina: Vulnerabilidad a Cambios Climáticos e Hidrológicos. Editores V. Barros y D. Perczyk, SA y DS y Fundación Instituto Di Tella. Buenos Aires 2006, 389 pág.

Castañeda, E. y V.R. Barros, 1994: Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al este de los Andes, *Meteorológica*, **19**, 23–32.

Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn y D. H. Lister 2013. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623–642.

Labraga, J. C., 2009: Statistical downscaling estimation of recent rainfall trends in the eastern slope of the Andes mountain range in Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, **99**(3-4), 287–302.

Liebmann, B. y C. Vera, 2004: An observed trend in central South American precipitation. *J. Climate*, 4357–4367.

Llano, M. P. y O. Penalba, 2011: A climatic analysis of dry sequences in Argentina. *Int. J. Climatol.*, **31**, 504–513.

Masiokas, M., R. Villalba y B. Luckman, 2006: Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources, *J. Climate*, **19**, 6334–6352.

Masiokas, M., A. I. Rivera, R. Villalba, S. Delgado y J. Aravena, 2009: Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **281**, 242–268.

Minetti, J. L., W. Vargas, G. Poblete, L. Zerda y L. Acuña, 2010: Regional droughts in southern South America. *Theor. Appl. Climatol.*, **102** (3-4), 403–415.

Rivera, J. A., O. Penalba y M. Bettolli, 2013: Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *Int. J. Climatol.*, **33**, 834–842.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2004: Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, **17**, 4099–4107.

Rusticucci, M. y B. Tencer, 2008: Observed Changes in Return Values of Annual Temperature Extremes over Argentina. *J. Climate*, **21**, 5455–5467.



Trombotto, D., E. Buk y J. Hernandez, 1997: Monitoring of Mountain Permafrost in the Central Andes, Cordon del Plata, Mendoza, Argentina. *Permafrost Periglac. Process.*, **8**, 123-129.

Vincent, L. A., T. C. Peterson, V. Barros, M. B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L. M. Alves, T. Ambrizzi, M. A. Berlato, A. M. Grimm, J. A. Marengo, L. Molion, D. F. Moncunill, E. Rebello, Y. M. Anunciação, J. Quintana, J. L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M. R. Haylock y D. Karoly, 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000, *J. Climate*, **18**, 5011–5023.





## **CAPITULO 8**

### **CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN PATAGONIA, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLANTICO SUR**

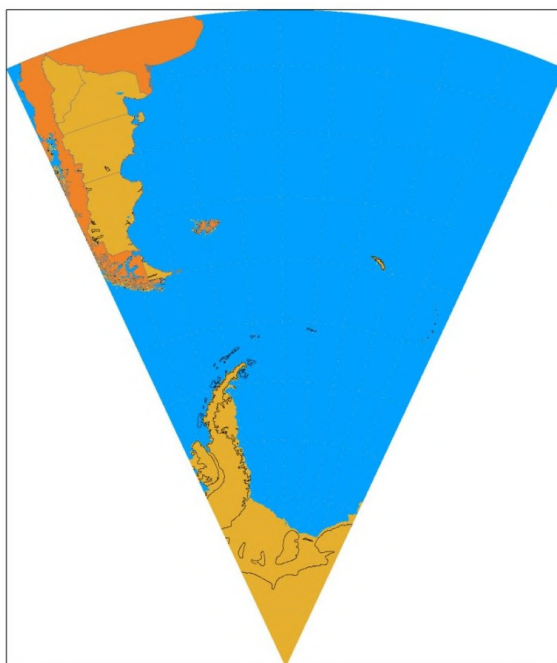
|              |  |          |
|--------------|--|----------|
| <b>8.1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>  | pág. 280 |
| <b>8.1.1</b> | <b>Dominio espacial y datos</b>                                | pág. 280 |
| <b>8.2</b>   | <b>CAMBIOS Y TENDENCIAS</b>                                    | pág. 281 |
| <b>8.2.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 281 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 281 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 286 |
| <b>8.2.2</b> | <b>Precipitación</b>   |          |
|              | <i>Precipitaciones medias</i>                                  | pág. 288 |
|              | <i>Extremos de precipitación</i>                               | pág. 295 |
| <b>8.3</b>   | <b>REGIÓN ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLÁNTICO SUR</b>              | pág. 297 |
| <b>8.4</b>   | <b>VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES</b>                  | pág. 300 |
| <b>8.4.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 300 |
| <b>8.4.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 304 |
| <b>8.5</b>   | <b>ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)</b>                 | pág. 308 |
| <b>8.5.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 308 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 309 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 314 |
| <b>8.5.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 322 |
|              | <i>Precipitación media</i>                                     | pág. 322 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>                                | pág. 324 |
| <b>8.6</b>   | <b>EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS</b> | pág. 328 |
| <b>8.6.1</b> | <b>Temperatura</b>   | pág. 329 |
|              | <i>Temperaturas medias</i>                                     | pág. 329 |
|              | <i>Extremos térmicos</i>                                       | pág. 332 |
| <b>8.6.2</b> | <b>Precipitación</b>   | pág. 335 |
|              | <i>Precipitación media</i>                                     | pág. 335 |
|              | <i>Precipitaciones extremas</i>                                | pág. 336 |
| <b>8.7</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | pág. 338 |
|              | <b>Referencias</b>   | pág. 339 |

## CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN PATAGONIA, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLANTICO SUR

### 8.1 INTRODUCCIÓN

#### 8.1.1 Dominio espacial y datos

La región a la que se refiere esta sección incluye las provincias de Río Negro, Neuquén, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur (Figura 8.1). La región continental fue subdividida latitudinalmente en 4 regiones con límites en los paralelos 42°S, 46°S y 52,5°S que corresponden a las provincias de Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego y a Río Negro-Neuquén. La disponibilidad de observaciones *in situ* es notablemente menor que en el resto del país, y aunque hay muchas localidades con registros recientes, estos no son suficientemente prologados para el estudio de las tendencias climáticas.



**Figura 8.1:** *En marrón claro, la región de este capítulo*

Las bases de datos utilizadas y las razones de su selección están descriptas en la sección 2.1 del capítulo 2. Se utilizó para la temperatura de superficie y la precipitación la base CRU TS3.1, producida en el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris y otros 2013) que tiene temperatura y precipitación mensual y se extiende en su versión 3.20 hasta el 2010 (<http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk>). Para la descripción de las tendencias de los índices de extremos se usó la base CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) donde

están calculados siguiendo las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Estos índices fueron calculados con datos de muy pocas estaciones y por lo tanto solo los cambios de algunos de estos índices en ciertas áreas de la región ameritan cierta confiabilidad. En consecuencia solo se presentan estos pocos casos.

La Antártida y las islas del Atlántico sur se analizan aparte de la Patagonia, ya que debido a la muy escasa información de estaciones meteorológicas que hayan medido por un largo período de tiempo como para evaluar los cambios, su tratamiento y análisis es notoriamente diferente.

## 8.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

### 8.2.1 Temperatura

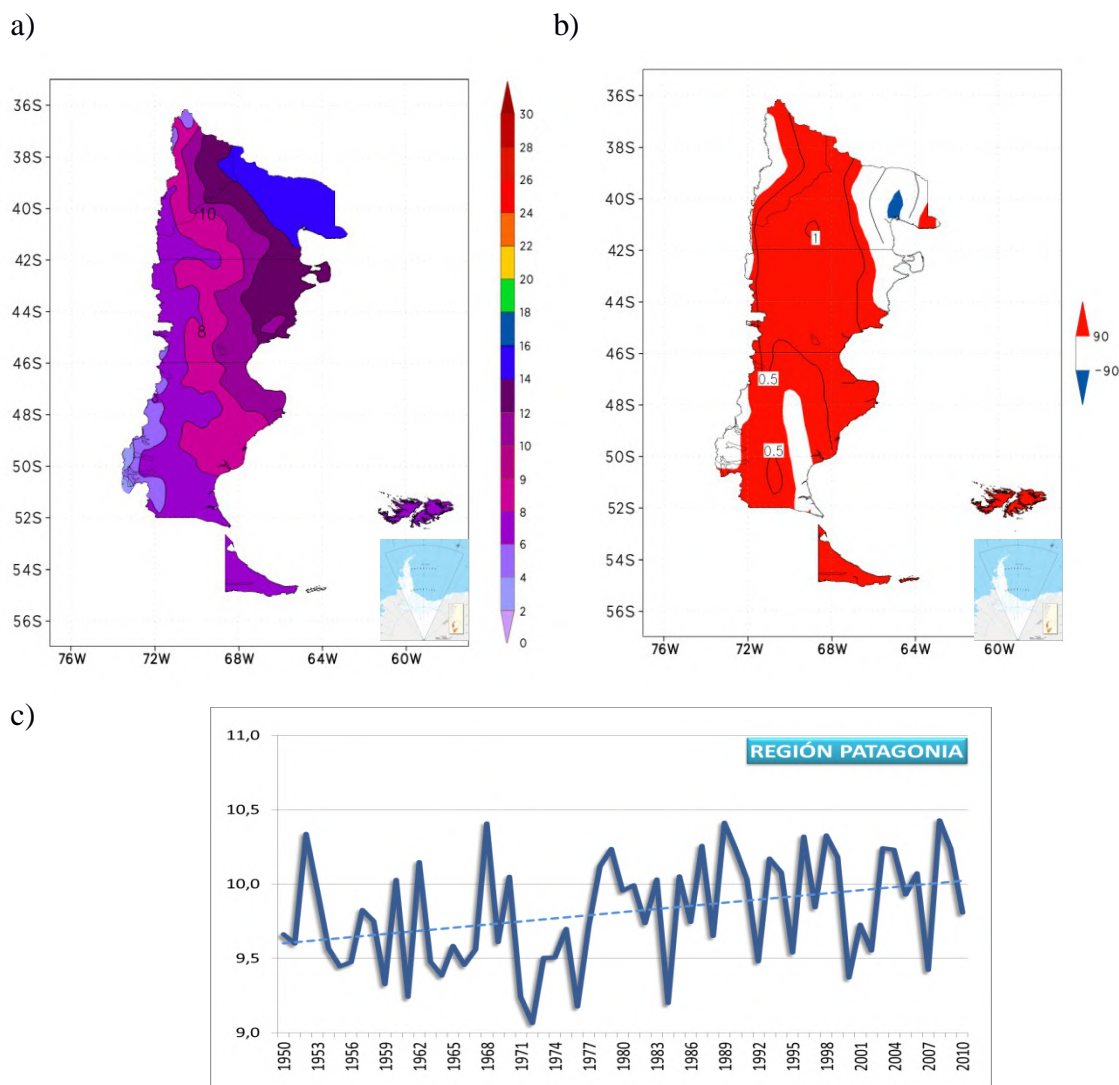
#### *Temperaturas medias*

**La Temperatura media anual aumentó significativamente entre 0,5°C y 1°C en el centro de la región (confianza alta) y 0,4°C en promedio para toda la Patagonia.** En verano e invierno, el cambio anual entre 1960 y 2010 llegó hasta 1,4°C, principalmente localizado sobre el oeste de la región. En la Tabla 8.2.1.1 se sintetizan los cambios y los valores medios estacionales y anuales para las subregiones consideradas, cuando estos cambios resultaron significativos se encuentran en color rojo al 90% y en azul al 95%.

|                          |               | <b>TEMPERATURA MEDIA 1950-2010</b> |              |              |      |              |
|--------------------------|---------------|------------------------------------|--------------|--------------|------|--------------|
|                          |               | DEF                                | MAM          | JJA          | SON  | ANUAL        |
| <b>TIERRA del FUEGO</b>  | <i>Medio</i>  | 8,8                                | 5,3          | 1,1          | 5,1  | 5,1          |
|                          | <i>Cambio</i> | <b>0,8**</b>                       | <b>0,8**</b> | <b>0,7**</b> | 0,2  | <b>0,6**</b> |
| <b>SANTA CRUZ</b>        | <i>Medio</i>  | 13,2                               | 7,6          | 1,9          | 8,1  | 7,7          |
|                          | <i>Cambio</i> | <b>0,9**</b>                       | <b>0,6**</b> | 0,3          | 0,3  | <b>0,5**</b> |
| <b>CHUBUT</b>            | <i>Medio</i>  | 16,0                               | 10,2         | 4,0          | 10,1 | 10,1         |
|                          | <i>Cambio</i> | <b>1,0**</b>                       | 0,4          | 0,5          | 0,4  | <b>0,7**</b> |
| <b>RÍO NEGRO NEUQUÉN</b> | <i>Medio</i>  | 18,7                               | 11,7         | 5,1          | 12,0 | 11,8         |
|                          | <i>Cambio</i> | 0,5                                | -0,1         | 0,2          | 0,4  | 0,3          |
| <b>REGION PATAGONIA</b>  | <i>Medio</i>  | 15,9                               | 9,8          | 3,6          | 10,0 | 9,8          |
|                          | <i>Cambio</i> | <b>0,8**</b>                       | 0,3          | 0,3          | 0,4  | <b>0,4**</b> |

**Tabla 8.2.1.1:** Valores medios y cambios de la temperatura media para la región Patagonia y para 4 subregiones (°C). \* Significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

En la Fig.8.2.1.1 se presenta el cambio de temperatura calculado entre 1960 y 2010, según una tendencia lineal, así como la significancia de este cambio. Los mayores valores se encuentran en el centro de la región, con significancia superior al 90%. La serie temporal que se presenta en la parte inferior de la figura, es el promedio de toda la región. Se destaca una gran variabilidad interanual, con una tendencia lineal positiva.

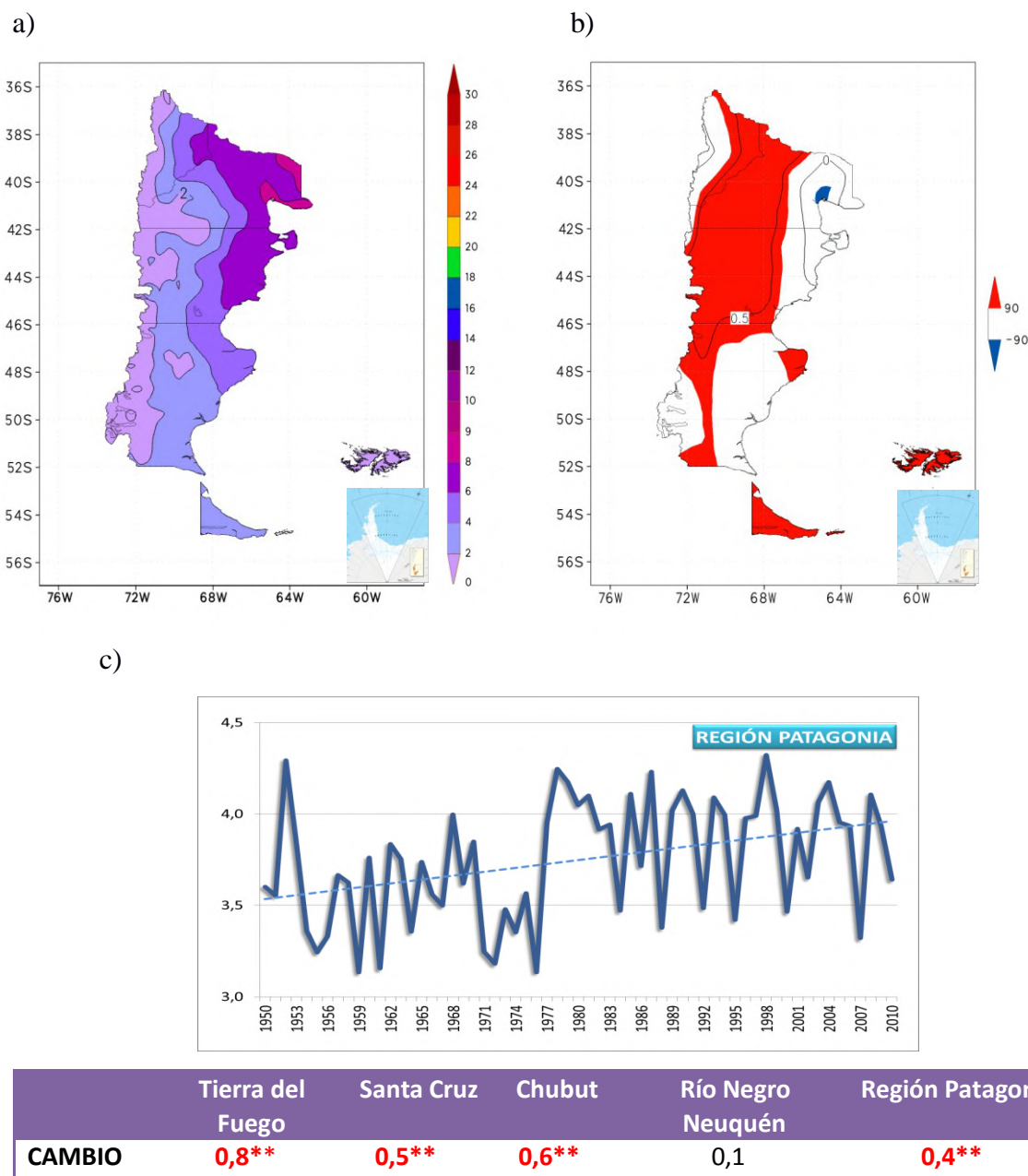


|               | Tierra del Fuego | Santa Cruz   | Chubut       | Río Negro<br>Neuquén | Región Patagonia |
|---------------|------------------|--------------|--------------|----------------------|------------------|
| <b>CAMBIO</b> | <b>0,6**</b>     | <b>0,5**</b> | <b>0,6**</b> | 0,4                  | <b>0,4**</b>     |

**Figura 8.2.1.1:** a) temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) cambio de la temperatura media anual entre 1960 y 2010 ( $^{\circ}\text{C}$ ), serie temporal promedio de la temperatura media anual para toda la Patagonia entre 1950 y 2010. \* significancia al 90%. \*\* Significancia al 95%

**La temperatura mínima media anual ha tenido un aumento significativo entre 0,4 y 0,8 $^{\circ}\text{C}$  (*confianza alta*) en casi toda la región.** Estos aumentos son principalmente mayores en verano con hasta 1,2 $^{\circ}\text{C}$  y sólo en el centro de la región son importantes en el invierno. Excepto en el verano, hubo un enfriamiento significativo en el este de Chubut y Río Negro en todas las estaciones. En la Figura 8.2.1.2 se observa la distribución espacial de los

valores medios calculados para el período 1960-2010 y en la Tabla 8.2.1.2 se sintetizan los cambios y los valores medios estacionales y anuales para las 4 subregiones.



**Figura 8.2.1.2:** Ídem Figura 8.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)

| TEMPERATURA MÍNIMA 1950-2010 |     |     |     |       |
|------------------------------|-----|-----|-----|-------|
| DEF                          | MAM | JJA | SON | ANUAL |

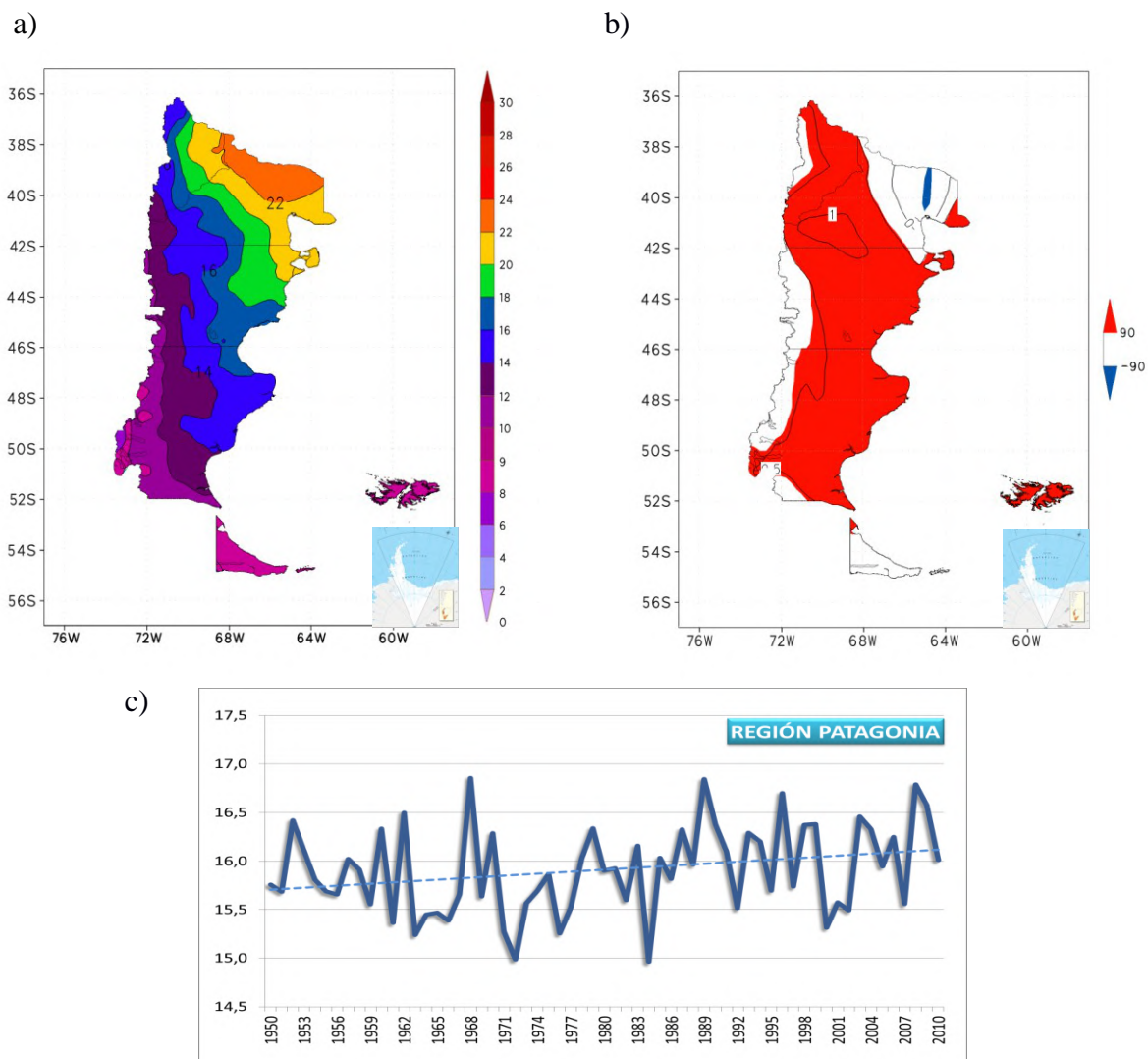
|                              |        |              |              |              |             |              |
|------------------------------|--------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| <b>TIERRA del FUEGO</b>      | Medio  | 4,7          | 1,9          | -1,7         | 1,2         | 1,5          |
|                              | Cambio | <b>0,8**</b> | <b>1,0**</b> | <b>0,9**</b> | 0,3         | <b>0,8**</b> |
| <b>SANTA CRUZ</b>            | Medio  | 7,4          | 2,6          | -2,1         | 2,5         | 2,6          |
|                              | Cambio | <b>0,9**</b> | <b>0,5**</b> | 0,1          | 0,3         | <b>0,5**</b> |
| <b>CHUBUT</b>                | Medio  | 9,1          | 4,3          | -0,8         | 3,7         | 4,1          |
|                              | Cambio | <b>1,0**</b> | <b>0,4*</b>  | 0,4          | 0,5*        | <b>0,6**</b> |
| <b>RÍO NEGRO<br/>NEUQUÉN</b> | Medio  | 10,4         | 4,5          | -0,8         | 4,5         | 4,7          |
|                              | Cambio | 0,5          | 0,0          | 0,2          | 0,3         | 0,3          |
| <b>REGION<br/>PATAGONIA</b>  | Medio  | 8,9          | 3,8          | -1,2         | 3,5         | 3,7          |
|                              | Cambio | <b>0,8**</b> | 0,3          | 0,3          | <b>0,4*</b> | <b>0,4**</b> |

**Tabla 8.2.1.2:** Ídem Tabla 8.2.1.1, pero para la temperatura mínima media para la región Patagonia

**La temperatura máxima media ha aumentado significativamente entre 0,5°C y 1°C en la mayor parte de la región entre 1960 y 2010 (confianza alta)** con un máximo en el noroeste de la región en todas las estaciones excepto en otoño. El noreste de la Patagonia tuvo una disminución de los valores de esta variable, aunque no significativa (0,25°C), como también ocurrió en la franja húmeda cordillerana (Figura 8.2.1.3). En la Tabla 8.2.1.3 se sintetizan los cambios y los valores medios estacionales y anuales para las 4 subregiones.

Rusticucci y Barrucand (2004) estudiaron las tendencias de las variables temperatura máxima y mínima media en verano e invierno entre 1959 y 1998. En esos 40 años de datos las temperaturas mínimas y máximas medias han presentado tendencias positivas más intensas en invierno que en verano en la mayoría de las 8 estaciones de la Patagonia analizadas. Estos cambios se encuentran enmarcados en cambios de más largo plazo, ya que en el último informe del IPCC (2013), se muestra que el aumento de la temperatura media anual de la Patagonia superó 0,8°C en toda la región y 1°C en el norte de la misma, considerando la tendencia lineal entre 1901 y 2012.





|               | Tierra del Fuego | Santa Cruz   | Chubut       | Río Negro<br>Neuquén | Región Patagonia |
|---------------|------------------|--------------|--------------|----------------------|------------------|
| <b>CAMBIO</b> | <b>0,5*</b>      | <b>0,6**</b> | <b>0,5**</b> | 0,3                  | <b>0,4**</b>     |

**Figura 8.2.1.3:** Ídem Figura 8.2.1.1, pero para la temperatura máxima media anual (°C)

|                              |        | TEMPERATURA MÁXIMA 1950-2010 |       |      |      |       |
|------------------------------|--------|------------------------------|-------|------|------|-------|
|                              |        | DEF                          | MAM   | JJA  | SON  | ANUAL |
| <b>TIERRA del FUEGO</b>      | Medio  | 12,9                         | 8,8   | 4,0  | 9,0  | 8,7   |
|                              | Cambio | 0,7                          | 0,5   | 0,5  | 0,1  | 0,5*  |
| <b>SANTA CRUZ</b>            | Medio  | 19,0                         | 12,5  | 5,8  | 13,8 | 12,8  |
|                              | Cambio | 0,9**                        | 0,6** | 0,4  | 0,4  | 0,6** |
| <b>CHUBUT</b>                | Medio  | 23,0                         | 16,2  | 8,8  | 16,5 | 16,1  |
|                              | Cambio | 0,9**                        | 0,3   | 0,5  | 0,3  | 0,5** |
| <b>RÍO NEGRO<br/>NEUQUÉN</b> | Medio  | 27,0                         | 18,9  | 10,9 | 19,5 | 19,1  |
|                              | Cambio | 0,5                          | -0,2  | 0,2  | 0,4  | 0,3   |
| <b>REGION<br/>PATAGONIA</b>  | Medio  | 22,9                         | 15,8  | 8,5  | 16,5 | 15,8  |
|                              | Cambio | 0,7**                        | 0,2   | 0,4  | 0,4  | 0,4** |

**Tabla 8.2.1.3:** Ídem Tabla 8.2.1.1, pero para la temperatura máxima media para la región Patagonia

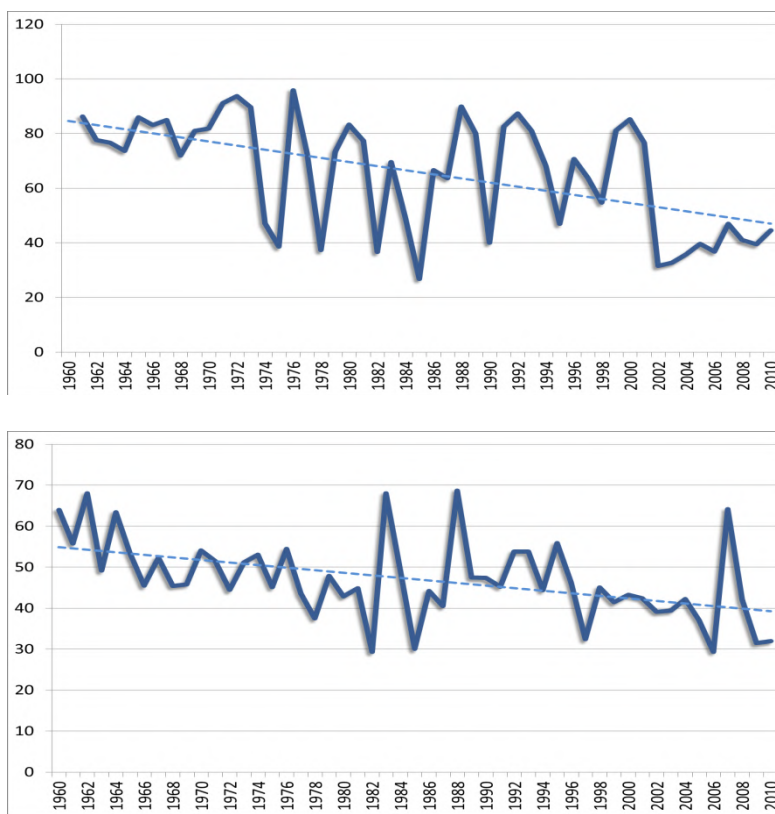
### **Extremos térmicos**

Como el cómputo de los índices de extremos se ha calculado con muy pocas estaciones, debido a la ausencia de series con observaciones sin discontinuidades en el periodo 1960-2010, se ha limitado el análisis a los índices con resultados más homogéneos y relevantes.

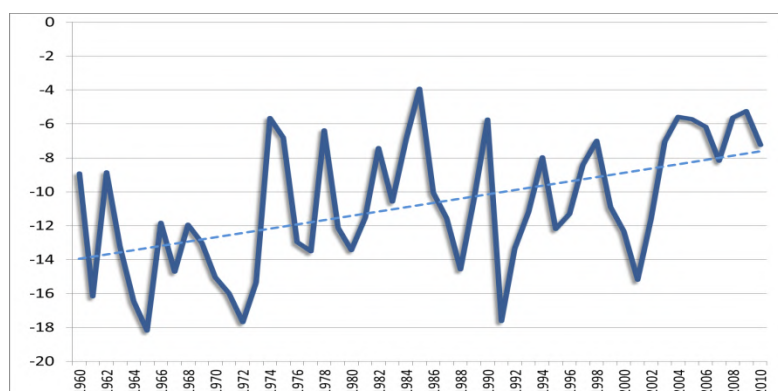
**Los días con heladas sobre todo el período calculado muestran una disminución significativa en muchos casos del orden del 50% (confianza media).** En la Figura 8.2.1.4 se presentan dos series con cambios significativos. Si bien hay una variabilidad interanual marcada, hay diferencias sustanciales entre el comienzo y el fin del período y en ambos casos, el número anual de días con heladas se reduce a la mitad.

En este sentido, la excepción es la cuadrícula centrada en -45°S, -67.5°W, que tuvo un aumento significativo de días con temperatura mínima por debajo de 0°C. En esta cuadrícula se encuentra la estación Trelew, que tuvo un aumento en los días con heladas de un promedio de 40 días por año antes de 1980 a 55 después de ese año.

La temperatura mínima (TNn) tuvo un cambio significativo con un aumento de hasta 6°C en el oeste, Figura 8.2.1.5. Este aumento se vio muy influenciado por una temperatura muy baja que ocurrió en la estación Bariloche cerca del comienzo del record, en junio de 1963 con -21,1° C.



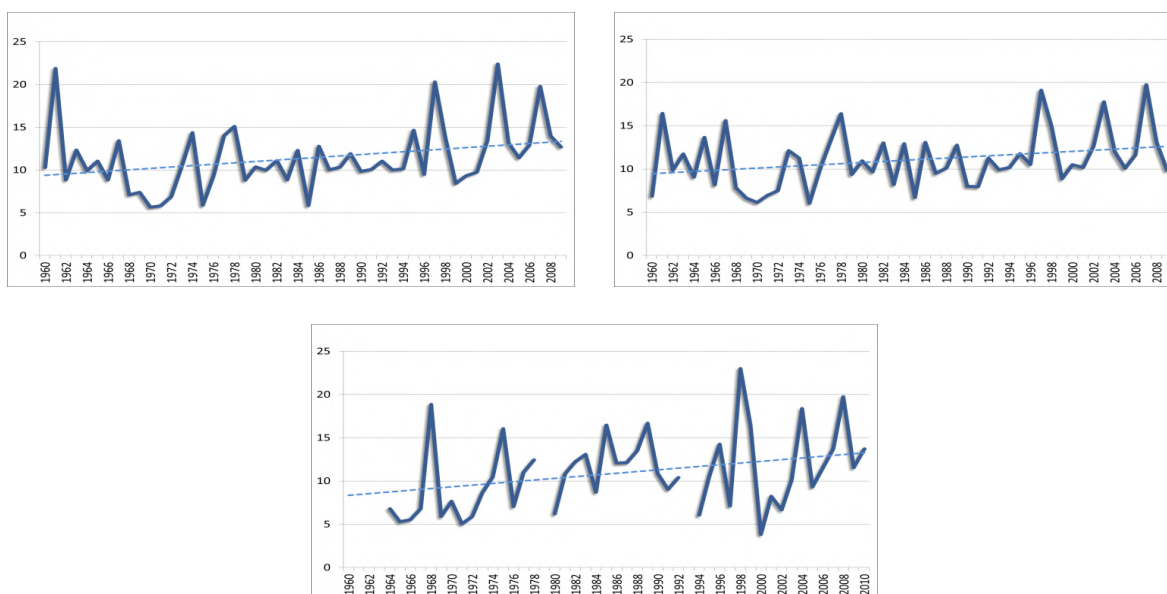
**Figura 8.2.1.4:** Índice de días con heladas para dos puntos de retícula, panel superior en 42,5°S, 71,25°W y panel inferior en 40°S, 67,5°W entre 1960 y 2010



**Figura 8.2.1.5:** Mínimo valor anual de la temperatura mínima  $TN_n$  para un punto de retícula ubicado en 42.5 °S y 71.25 W

El máximo de la temperatura máxima (TXx) ha disminuido significativamente, hasta 4°C entre 1960 y 2010, mientras que el porcentaje de días con temperatura máxima por encima del percentil 90 (TX90) ha aumentado en el mismo período. Esto también ocurrió en

Comodoro Rivadavia y Trelew donde el máximo de la temperatura máxima tuvo gran variabilidad interanual con una tendencia negativa, pero el índice de días cálidos (TX90) tuvo tendencia significativa hacia una mayor cantidad de días con temperaturas máximas por encima del percentil 90, Figura 8.2.1.6.



**Figura 8.2.1.6:** Índice TX90 entre 1860 y 2010. En el panel superior, dos puntos de retícula (52.5°S, 71.25°W y 50°S, 71.25°W) y en el de abajo, Río Gallegos

Los días con olas de calor según el índice WSDI en esta región tiene un valor medio de un día, pero se triplicó o cuadruplicó entre 1960 y 2010. En realidad este índice para esta región presenta muchos años con ningún caso y en promedio la tendencia lineal no es significativa.

Cuando se analizan las series individuales de las pocas estaciones disponibles entre 1959 y 1998, en general los valores extremos de temperatura han mostrado tendencias significativas hacia el calentamiento, disminución de noches y días fríos y aumento de noches y días cálidos (Tx90) (Rusticucci y Barrucand 2004).

## 8.2.2 Precipitación media

Tres zonas pueden ser consideradas sobre toda la extensión de la región patagónica respecto de la precipitación. Una zona andina, con las precipitaciones superiores a los 650 mm anuales y más importantes en la estación de invierno, particularmente en el norte; una central y costera con escasas precipitaciones cuyos valores anuales rondan los 200 mm y una zona austral con precipitaciones bastante uniformes a lo largo del año de alrededor de 600mm. Toda la región presenta un gradiente de precipitación muy marcado con orientación este-oeste.

Es escasa la literatura sobre las tendencias de la precipitación en la Patagonia, en parte por la falta de adecuadas series de datos. Aravena y Luckman (2009) en un estudio sobre los patrones de precipitación, desde 1950 a 2000 con valores mensuales encontraron que en el noroeste de la Patagonia las tendencias de precipitación fueron negativas, mientras que en la Patagonia central hubo un aumento brusco en la cantidad de precipitación alrededor de 1960 y la región costera tuvo oscilaciones significativas de entre 3 a 7 años.

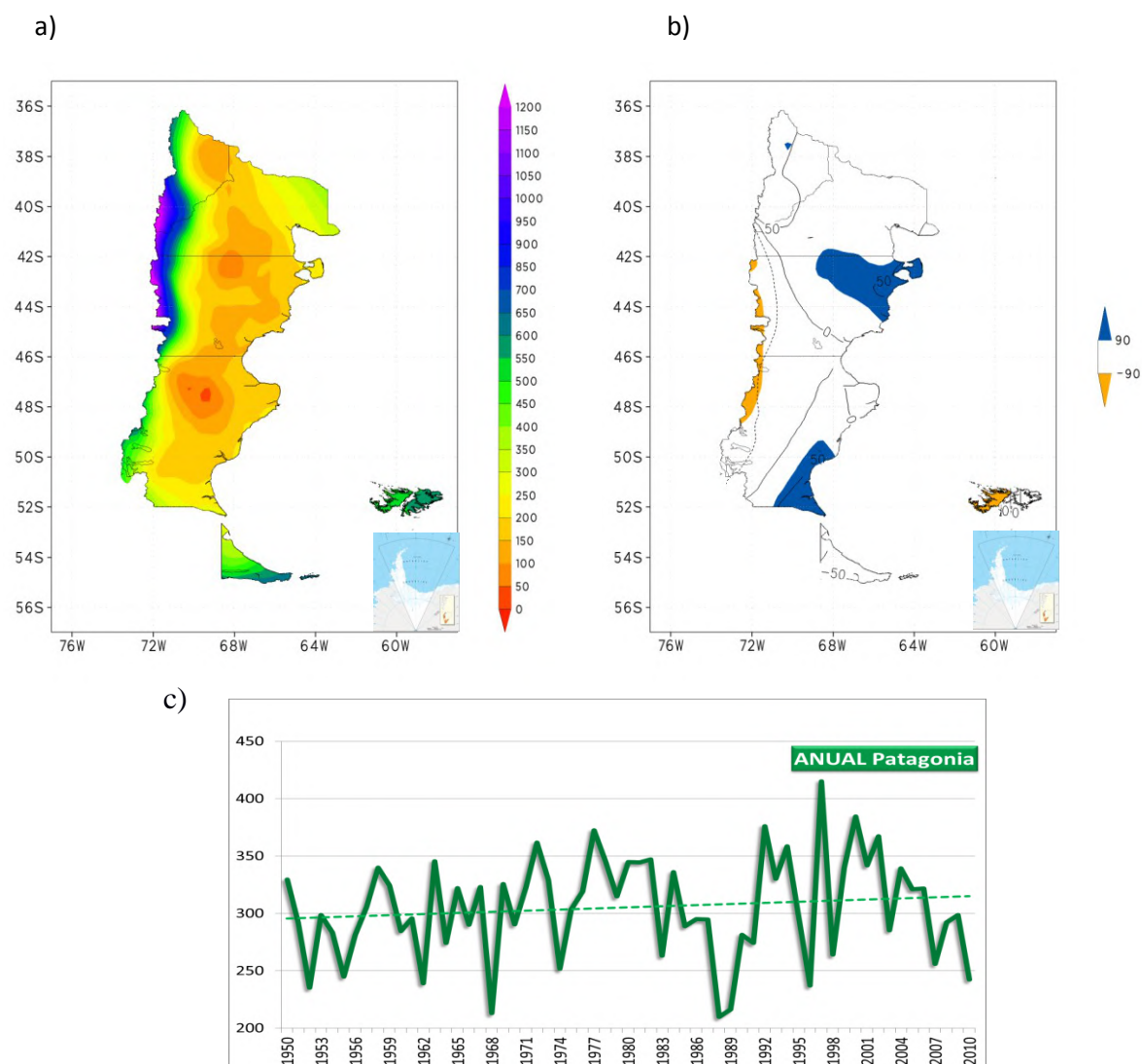
Garreaud y otros (2013), estudiaron las anomalías de precipitación en verano y las encontraron relacionadas con la circulación circumpolar, mientras que en invierno sólo están correlacionadas con el viento del oeste de niveles bajos de la atmósfera. Entre 1968 y 2001 los vientos del oeste han disminuido en el norte de la Patagonia hasta Chubut, junto con un aumento más al sur que llegó hasta Tierra del Fuego con tendencias significativas en el verano. Estos cambios en la intensidad del viento fueron consistentes con los de la precipitación que tuvo disminuciones en la zona cordillerana norte y un aumento al sur de 50°S.

De acuerdo a los trabajos publicados y a la elaboración de los datos CRU **no hubo cambios significativos en la precipitación en la mayor parte de la Patagonia (*Confianza media*)**. En la Figura 8.2.2.1 se presentan los valores medios y cambio de la precipitación total anual. Se nota la fuerte y significativa disminución de precipitación anual sobre la cordillera, en el oeste de la región, y un aumento en el este y en el sur en pequeñas zonas.

En el noroeste de la región en la zona cordillerana de Río Negro y Neuquén, la figura 8.2.2.1 muestra erróneamente un aumento de la precipitación. Ello se debe a que la base CRU utilizó solo datos de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional que están fuera de la cordillera. Todo indica que por el contrario en esa zona hubo una importante disminución como lo indica los trabajos citados (Garreaud y otros 2013; Aravena y Luckman 2009), el estudio sobre la Patagonia de la Segunda Comunicación Nacional (Vera y Camilloni 2006) y las tendencias hidrológicas de los ríos cuya fuente principal está sobre la cordillera (Seoane y López 2006), aunque si bien las tendencias de los caudales de estos ríos fueron negativas, no lo fueron en forma estadísticamente significativas, dada su alta variabilidad interanual.

Lo que se resalta en la serie temporal es una gran variabilidad interanual con variaciones de hasta el 100% entre un año y otro, superpuesto a una variabilidad decadal importante. Esta fuerte variabilidad interanual hace que los cambios no sean estadísticamente significativos.

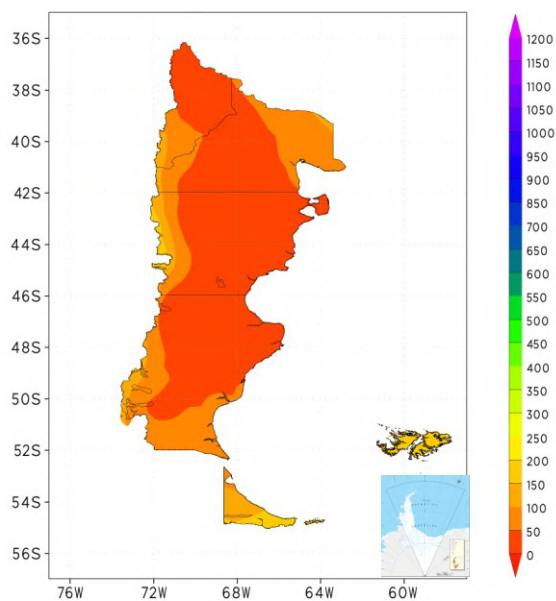
Los cambios son similares en todas las estaciones del año. Predomina la variabilidad interanual sobre la variación a largo plazo en la mayor parte de la región, excepto en la cordillera, que acompaña la fuerte disminución de precipitación que ha ocurrido al otro lado de la misma.



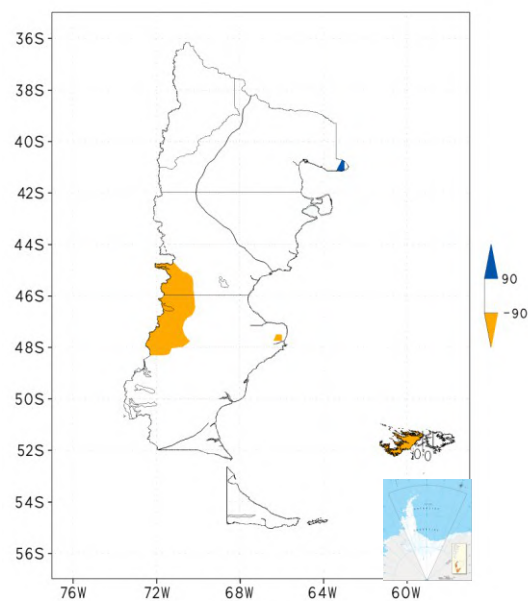
**Figura 8.2.2.1:** Precipitación total anual media período 1960-2010 (mm). Cambio de precipitación total anual según una tendencia lineal entre 1960 y 2010 y serie temporal 1950-2010 del total anual de precipitación para toda la región (mm)



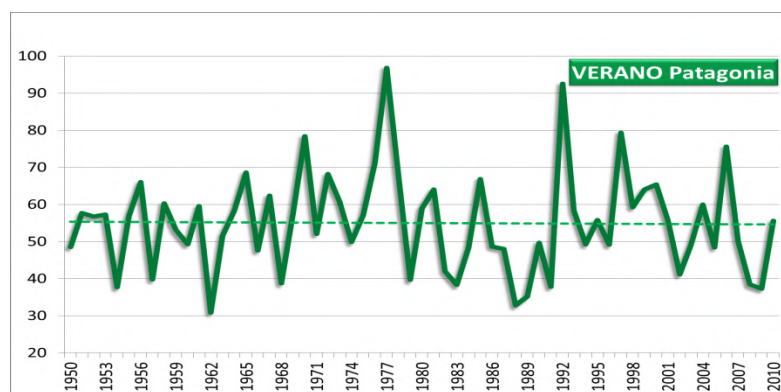
a)



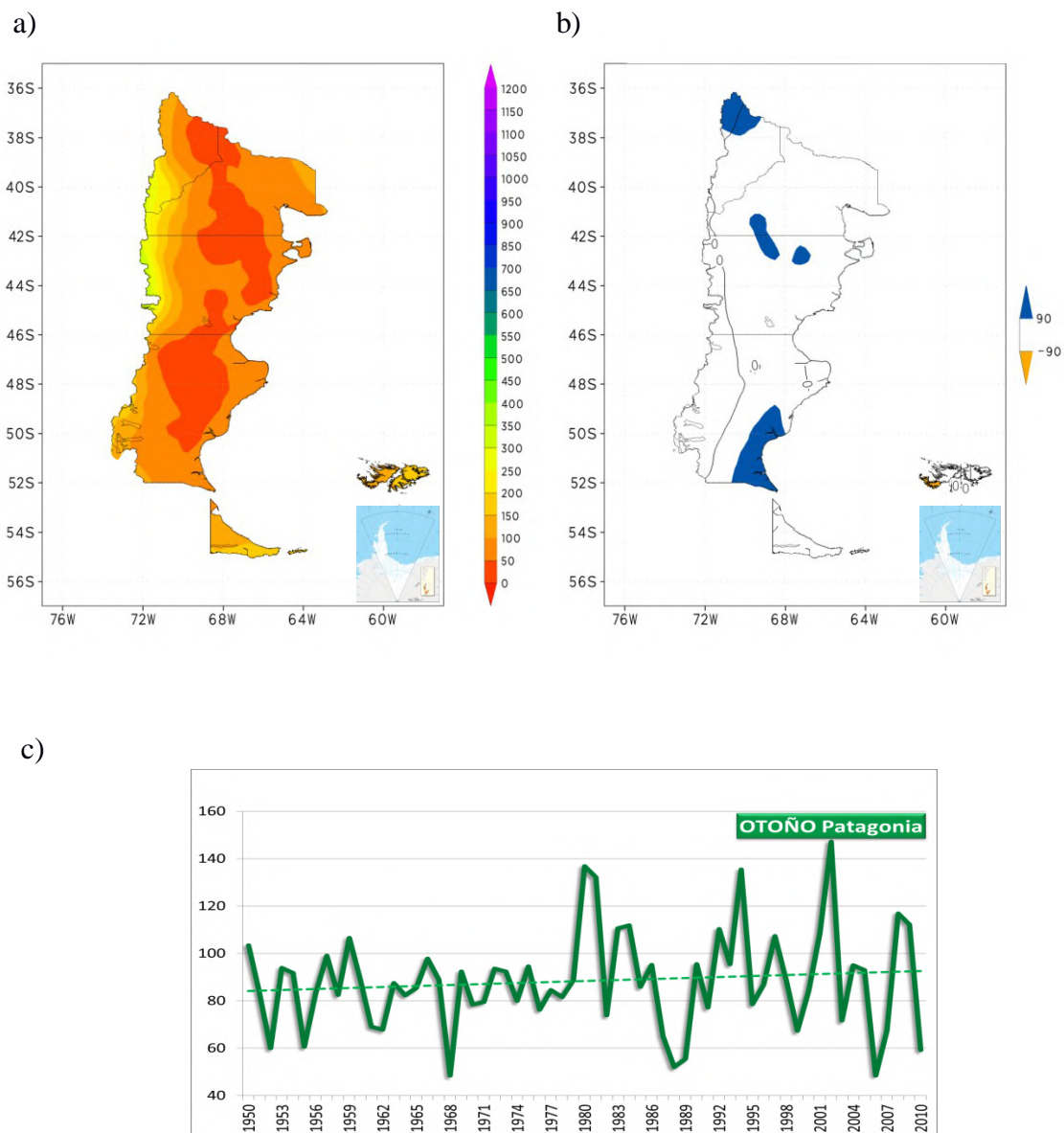
b)



c)

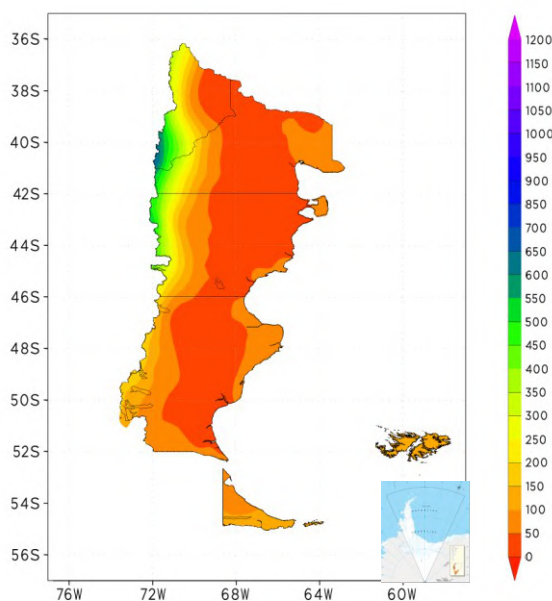


**Figura 8.2.2.2:** Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el verano

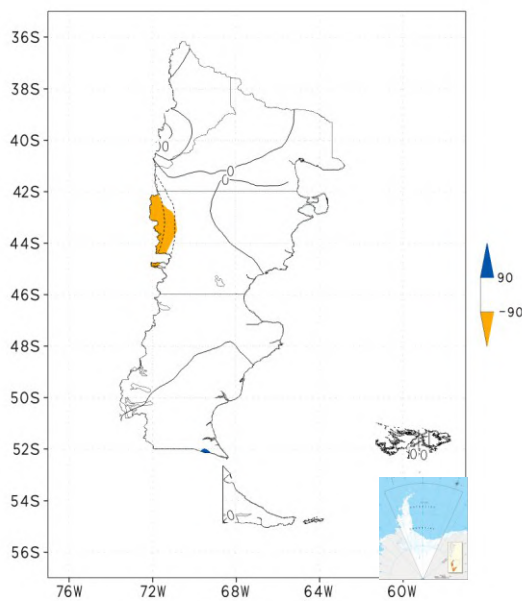


**Figura 8.2.2.3:** Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el otoño

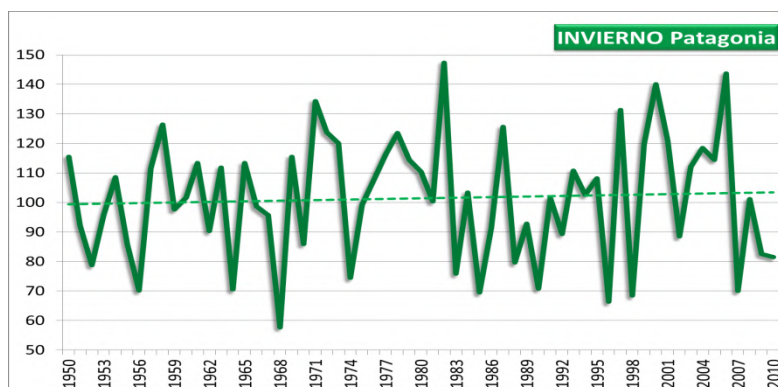
a)



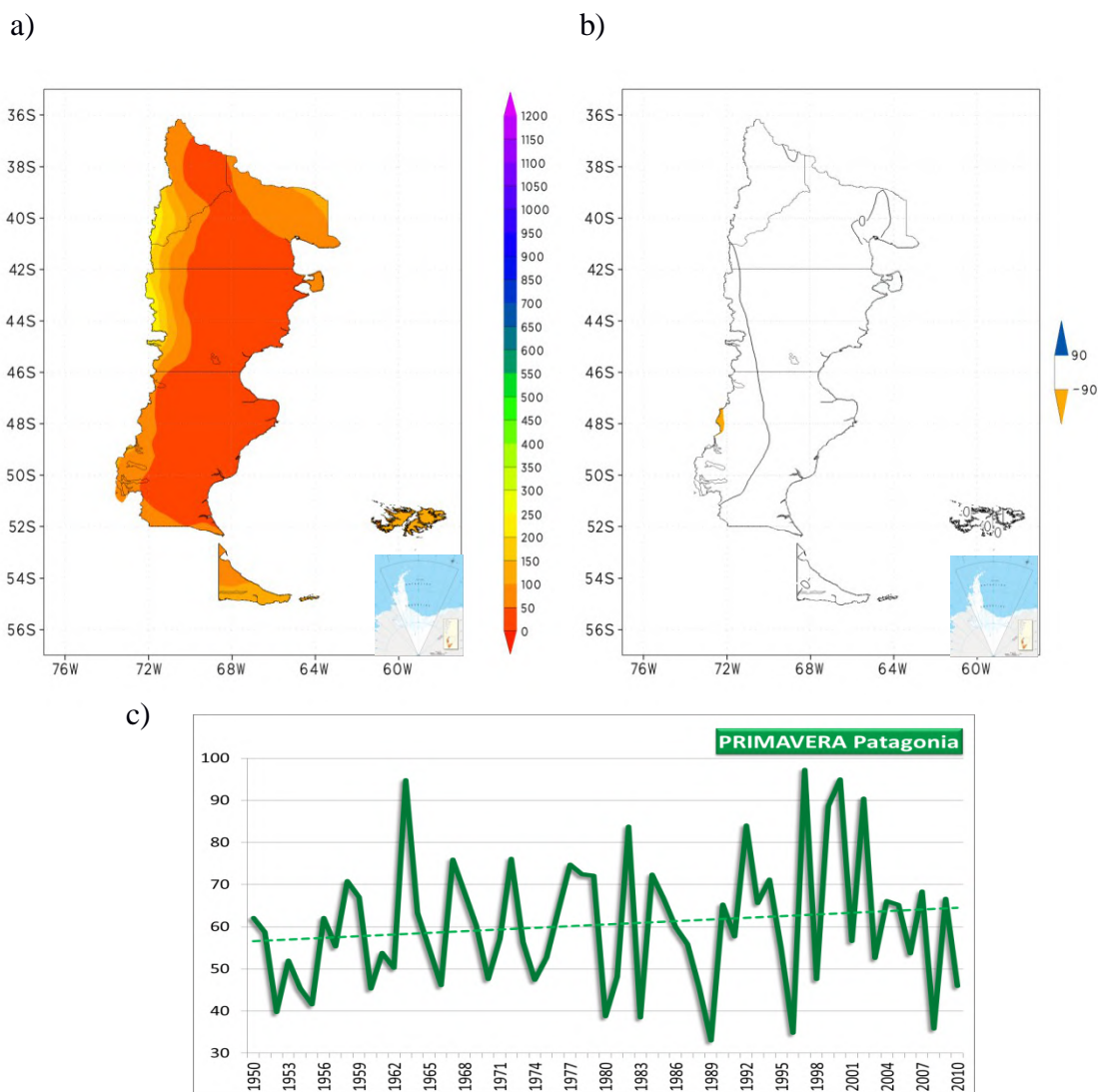
b)



c)



**Figura 8.2.2.4:** Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el invierno



**Figura 8.2.2.5:** Ídem Figura 8.2.2.1, pero para la primavera

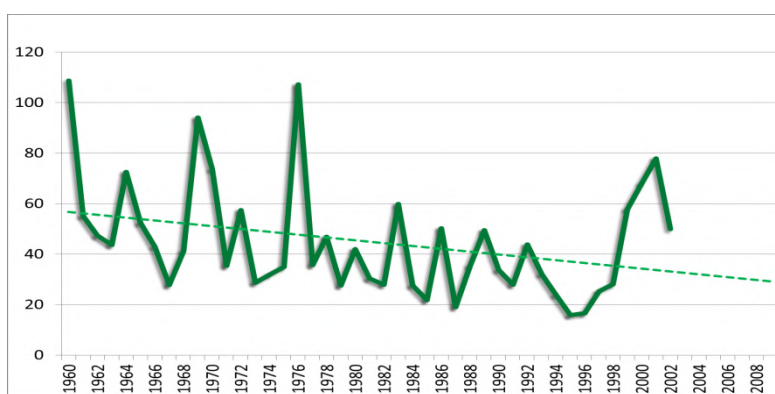
En la Tabla 8.2.2.1 se muestran los valores de precipitación media anual y por estación y el cambio por provincia de la Patagonia. Se distingue los valores muy bajos en casi todos los casos y también cambios negativos en el verano para las tres provincias del sur.

|                              |        | <b>PRECIPITACIÓN MEDIA 1950-2010</b> |       |       |       |       |
|------------------------------|--------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                              |        | DEF                                  | MAM   | JJA   | SON   | ANUAL |
| <b>TIERRA del FUEGO</b>      | Medio  | 132,4                                | 130,3 | 98,4  | 105,2 | 466,3 |
|                              | Cambio | -4,3                                 | 9,1   | 8,1   | -1,9  | 10,9  |
| <b>SANTA CRUZ</b>            | Medio  | 50,2                                 | 66,6  | 63,4  | 40,4  | 220,6 |
|                              | Cambio | -6,4                                 | 2,2   | 2,7   | 5,9   | 4,4   |
| <b>CHUBUT</b>                | Medio  | 50,9                                 | 96,7  | 108,6 | 59,0  | 315,3 |
|                              | Cambio | -2,2                                 | 11,6  | -8,3  | 9,0   | 10,1  |
| <b>RÍO NEGRO<br/>NEUQUÉN</b> | Medio  | 53,3                                 | 95,0  | 127,0 | 72,9  | 348,2 |
|                              | Cambio | 5,4                                  | 11,6  | 13,9  | 10,1  | 40,9  |
| <b>REGION<br/>PATAGONIA</b>  | Medio  | 55,0                                 | 88,4  | 101,4 | 60,5  | 305,3 |
|                              | Cambio | -0,7                                 | 8,7   | 4,1   | 8,1   | 20,0  |

**Tabla 8.2.2.1:** Valores medios y cambios de la precipitación para la región Patagonia y para 4 subregiones (mm). \* significancia al 90% y \*\* significancia al 95%

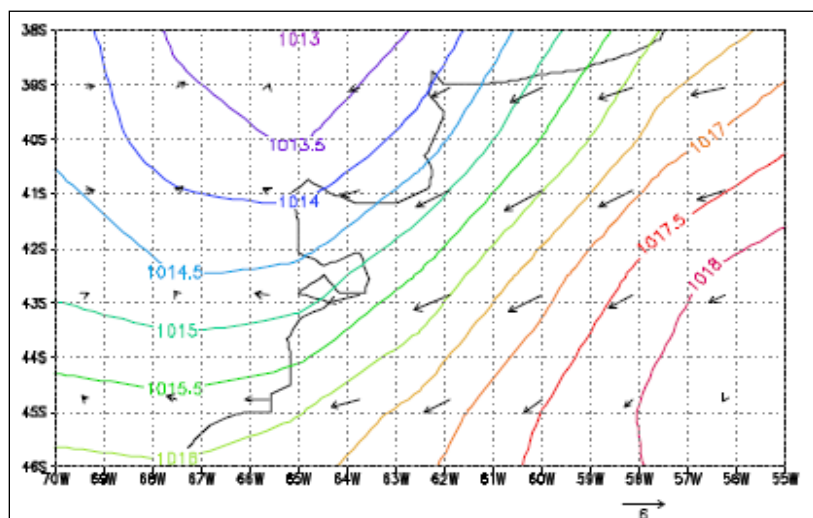
#### *Precipitaciones extremas*

Como se aprecia en la Figura 2.3.2 (capítulo 2), hay sólo una cuadrícula con cambios significativos en la máxima precipitación anual de un día y es en la región de mayor disminución significativa de la precipitación anual. El valor medio es de 45 mm y disminuyó 29 mm en este período. Como se puede observar en la Figura 8.2.2.6, la variabilidad interanual es marcada, y si bien a comienzo del periodo se presentaron más casos con valores altos que al final, también hubo tres casos en la década del 2000 que superaron 55 mm.



**Figura 8.2.2.6:** Máximo valor de precipitación en un día (R1X) en la cuadrícula centrada en 42.5°S, 71.25°W

Los eventos de lluvias intensas (para los estándares regionales) en localidades de la costa patagónica de Chubut están asociados a sistemas de circulación como el que se presenta en la figura 8.2.2.7 con una fuerte componente de viento desde el océano Atlántico. Analizando la serie de la estación Puerto Madryn, en los últimos 30 años la mayor cantidad de casos extremos ocurrieron entre 1997 y 1999, con valores de hasta 143 mm en un día.



**Figura 8.2.2.7:** *Promedio de la presión a nivel del mar y viento a 10 m (media diaria) para 24 eventos de precipitaciones superiores a 20mm diarios en la ciudad de Puerto Madryn*

El índice de la cantidad máxima de precipitación acumulada en 5 días solo tiene datos en tres cuadrículas sobre los Andes; en una de ellas la cantidad media anual es 99 mm y la disminución fue de 72 mm, Figura 2.3.3.

Solo en el norte no andino de la región disminuyó el máximo anual de días consecutivos sin precipitación, aunque no de forma estadísticamente significativa, Figura 2.3.5.

Haylocky otros (2006) utilizaron tres estaciones de la Patagonia: Esquel, Neuquén y Trelew. Las estaciones Esquel (en el oeste de la región) y Trelew (sobre la costa) tuvieron mayormente índices de casos con precipitaciones extremas con tendencias significativas de signo opuesto entre 1960 y 2000, con aumento en Trelew y disminución en Esquel. Ciertas diferencias con lo hallado aquí están influenciadas por el período de estudio, ya que aquí se extendió el análisis a la primera década del siglo actual.

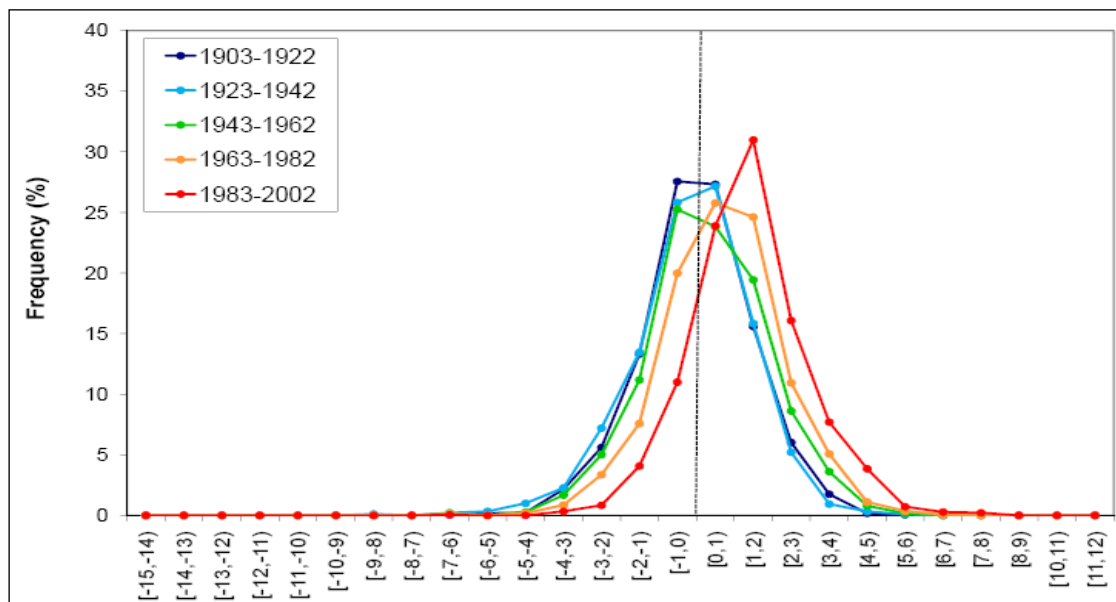


### 8.3 REGIÓN ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLÁNTICO SUR

Esta región se considera aparte de la Patagonia, ya que el tratamiento y análisis de la información meteorológica es notoriamente diferente. En particular, es una zona con muy pocas estaciones que hayan medido por un largo período de tiempo, como para evaluar los cambios.

En el caso de las islas Orcadas (Zazulie y otros 2010) hubo un calentamiento estadísticamente significativo en las cuatro estaciones del año desde 1950. Sobre todo en otoño e invierno, el calentamiento de los extremos fríos supera sustancialmente el calentamiento de la media o de los días más cálidos. La estación Orcadas es relevante para la región, ya que es la primera estación meteorológica, instalada en 1903 y es el único sitio de altas latitudes del hemisferio sur donde los datos se extienden por más de un siglo.

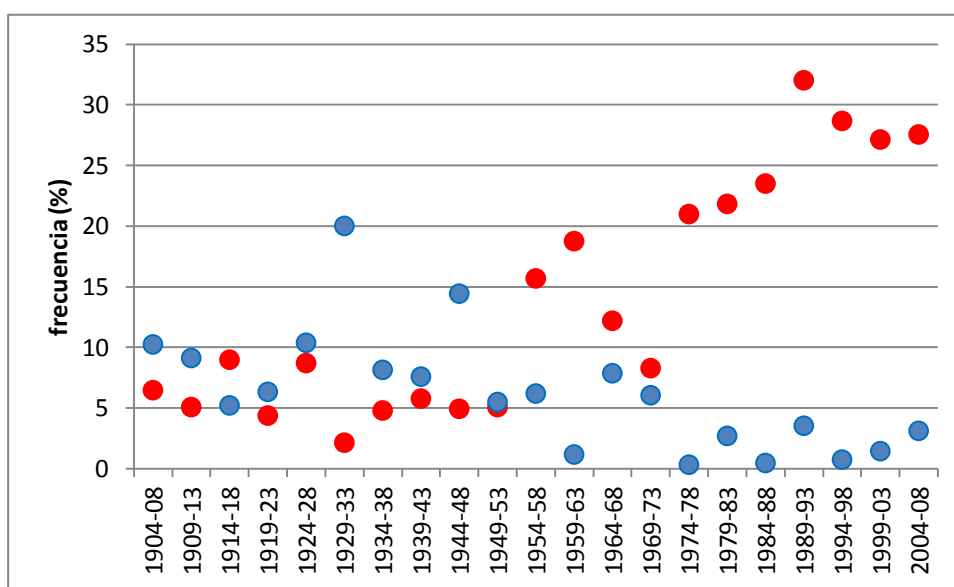
Las tendencias en los valores medios y los extremos de verano desde 1970 son aproximadamente dos veces más intensas que las observadas anteriormente, lo que es consistente con las teorías de que el calentamiento regional en esa estación del año fue debido a los efectos del agotamiento del ozono en la circulación atmosférica. Por otra parte, en las estaciones de primavera y verano, un calentamiento medio importante también ocurrió antes de la aparición del agujero de ozono antártico (desde 1950 hasta 1970), lo que es indicativo de la influencia en el calentamiento regional de procesos distintos a la destrucción del ozono, como el aumento de la concentración de GEI.



**Figura 8.3.1:** Frecuencia porcentual de ocurrencia de temperatura media diaria para distintos períodos sucesivos de 20 años, estación Orcadas

La distribución de frecuencias de temperaturas diarias en verano, para períodos de 20 años desde 1903, se puede observar en la figura 8.3.1. Se nota un desplazamiento hacia valores más cálidos, principalmente a partir de 1963, y muy significativamente en el último período 1983-2002.

La figura 8.3.2 muestra los extremos de temperatura, aquí definidos como los días en los que la temperatura media diaria estuvo por encima de  $2^{\circ}\text{C}$  o por debajo de  $-2^{\circ}\text{C}$ , en verano. El gráfico muestra el número de esos extremos en periodos de 5 años. Muestran una frecuencia similar hasta el quinquenio 1954-58 y a partir de ese período se empiezan a diferenciar, aumentando la frecuencia de los extremos cálidos (temperatura mayor a  $2^{\circ}\text{C}$ ) llegando a partir de 1974-78 a valores que triplican los originales en los extremos cálidos y disminuyendo a casi 0 en los extremos fríos (temperatura menor a  $-2^{\circ}\text{C}$ ), Figura 8.3.2.



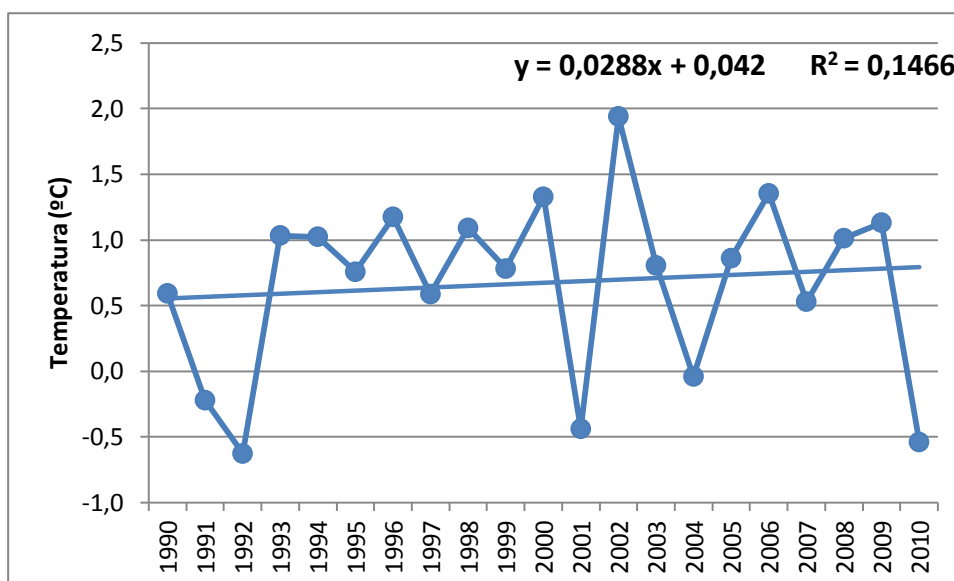
**Figura 8.3.2:** Frecuencia porcentual de ocurrencia de valores de Temperatura diaria  $>2^{\circ}\text{C}$  (rojo) y  $<-2^{\circ}\text{C}$  (azul) para cada quinquenio comenzando en 1904-2008, verano, estación Orcadas

Vaughan et al (2003) discuten la importancia del calentamiento regional en la Península Antártica, donde el calentamiento resultó mucho más rápido y evidente que en el resto de la Antártida. Además del calentamiento observado hubo una sustantiva reducción de la duración del hielo marino. Las tendencias de temperatura entre 1950 y 2001 tuvieron aumentos de entre  $2$  y  $4^{\circ}\text{C}$  en toda la península y en Orcadas específicamente de  $2^{\circ}\text{C}/100$  años.

Turner et al (2005) describen las tendencias de la temperatura en el período 1971-2000 en varias estaciones. En Orcadas y Esperanza, el calentamiento es estadísticamente significativo en los valores anuales de temperatura y se deben principalmente al

calentamiento en el verano, mientras que en Bellingshausen la tendencia al calentamiento es significativa sólo en verano.

Las evaluaciones de los cambios de temperatura de la Antártida principalmente ocurridos desde la segunda mitad del siglo 20 muestran un fuerte calentamiento de la Península Antártica y un ligero enfriamiento del interior del continente antártico. Este patrón sin embargo tiene un grado de incerteza debido a la escasez y la corta duración de las observaciones disponibles. El calentamiento de la Antártida Occidental excede 0,1 °C por década en los últimos 50 años, y es más fuerte en invierno y primavera. Como un ejemplo del calentamiento observado en los últimos 30 años se presenta la Figura 8.3.3, tomada de Costa y Agosta (2012), de la temperatura de verano promediada entre tres estaciones Antárticas (Jubany, Esperanza y Marambio). Esta serie muestra una tendencia positiva y significativa de 0.3°C por década.



**Figura 8.3.3:** *Temperatura media de verano promedio de tres estaciones antárticas*

El calentamiento importante del clima a lo largo de las últimas décadas ha influido en las propiedades y la distribución del permafrost en la región de la Península Antártica. Los reportes anteriores a 1980 mencionan en áreas libres de hielo la presencia de permafrost a profundidades de solo 25 a 35 cm, mientras que las observaciones recientes muestran la ausencia de permafrost en niveles de hasta 14 m de profundidad (Bockheimy otros 2013).

El último informe del IPCC (2013) concluyó que existe gran incerteza en la determinación de tendencias en la ocurrencia de nevadas en la Antártica así como que no es posible todavía atribuir el posible calentamientos de ese continente a la influencia antropogénica. En cambio sí existe alta confianza en que la cubierta de hielo antártico ha ido disminuyendo durante las últimas dos décadas. Existe también una confianza muy alta en que estas pérdidas ocurrieron principalmente en el norte de la Península Antártica y en el sector del mar de Amudsen. Asimismo, existe una alta confianza que las barreras de hielo alrededor

de la península Antártica continúan con la pérdida de masa y en el colapso parcial que comenzado hace algunas décadas.

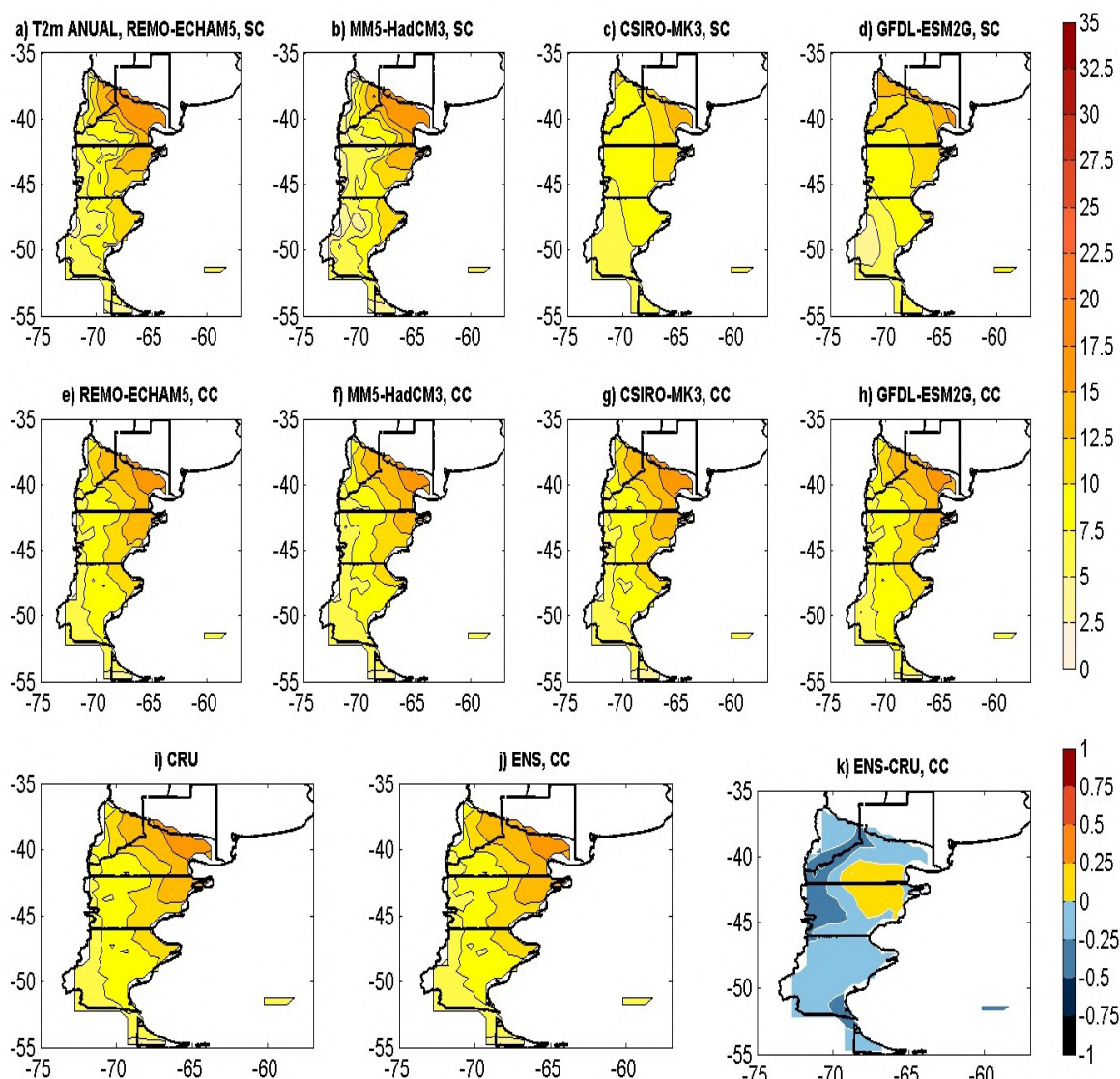
El calentamiento de la Península Antártica y de las del Atlántico Sur seguiría a lo largo del siglo XXI en todos los escenarios probables. En el futuro cercano, la temperatura en los meses de verano (diciembre, enero y febrero) aumentaría menos de  $0,5^{\circ}\text{C}$  y en el invierno (junio, julio, agosto) en alrededor de  $1^{\circ}\text{C}$ . Hacia fin del siglo, en el escenario RCP2.6, de gran reducción de emisiones, la Península Antártica se calentaría cerca de  $1^{\circ}\text{C}$  y en el escenario extremo RCP8.5, entre  $3$  y  $5^{\circ}\text{C}$  (IPCC 2013).

## **8.4 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN DE ERRORES SISTEMÁTICOS DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS**

### **8.4.1 Temperatura**

Como en el caso de las otras regiones, la representación de la temperatura media anual por los modelos, comparada con los datos observados es buena en esta región, aún para los datos sin corregir, pero mejora claramente con la corrección, Figura 8.4.1.

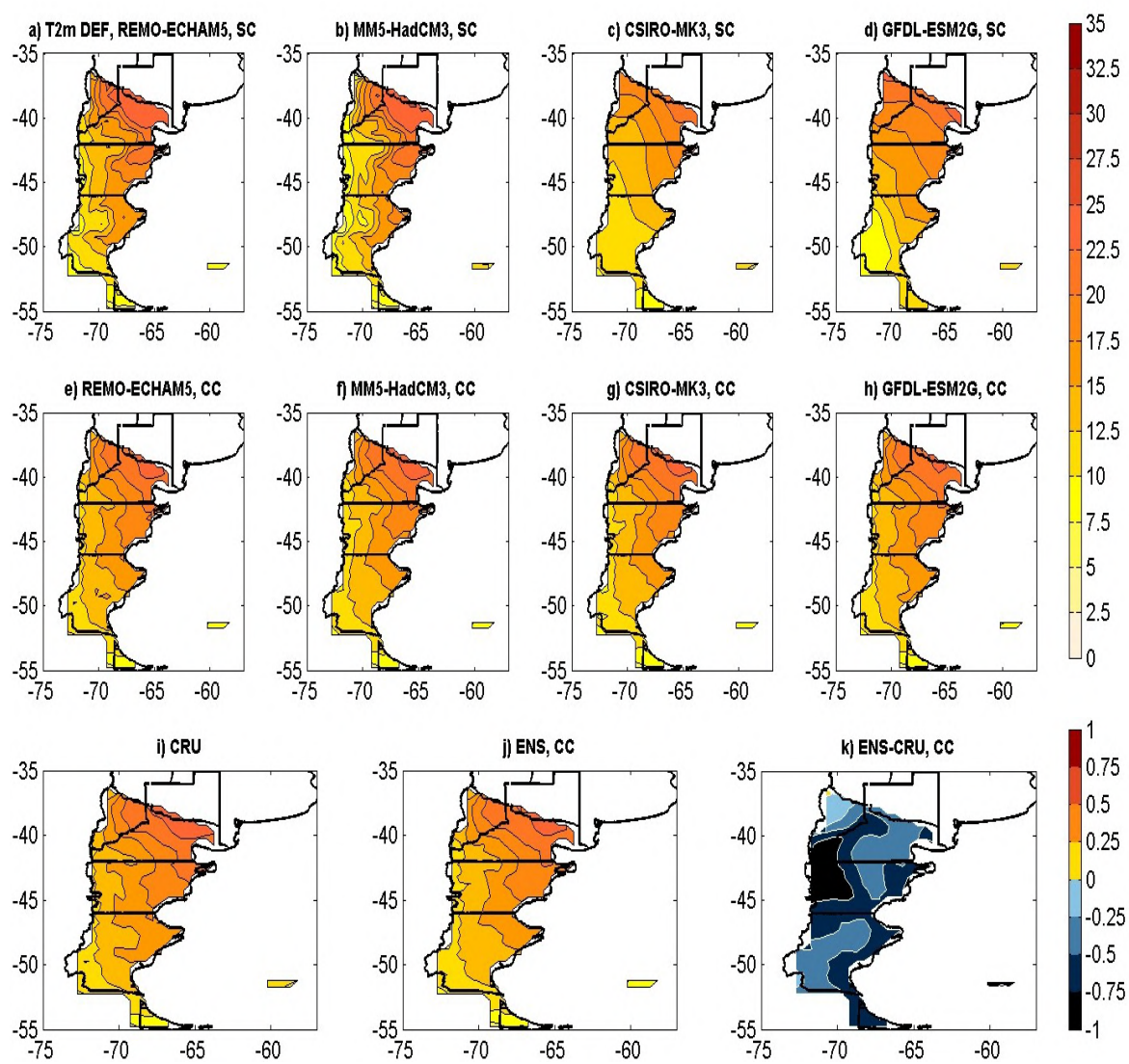
El promedio de los modelos corregidos tiene en casi toda la región un error menor a  $0,25^{\circ}\text{C}$  y solo en el noroeste de la región hay una franja donde se encuentra entre  $0,25$  y  $0,5^{\circ}\text{C}$ , Figura 8.4.1.



**Figura 8.4.1:** Validación de la temperatura media anual para la región Patagonia, 1976/1990. Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección, Panel inferior, valores observados según CRU, ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU

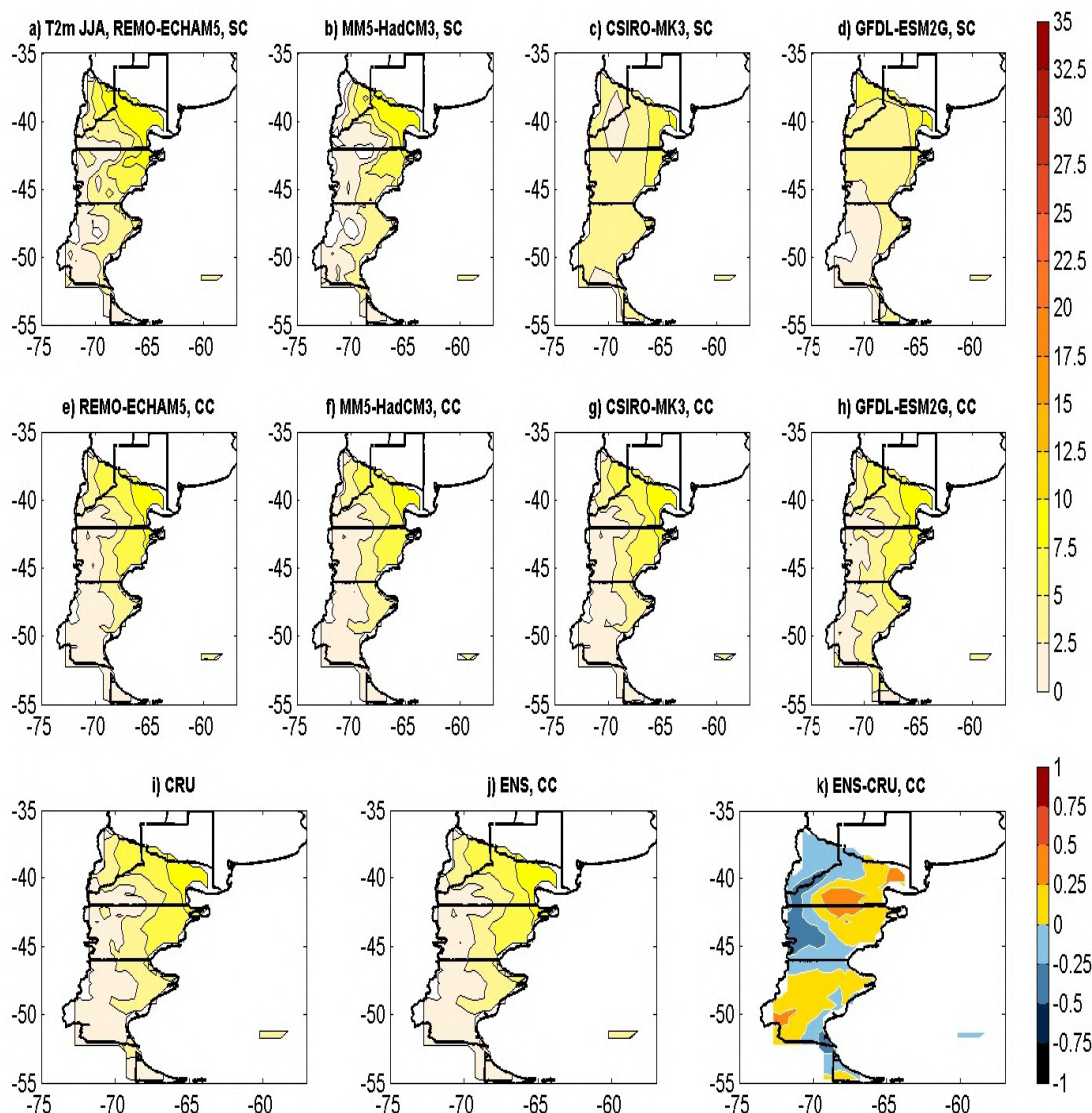
En el verano, Figura 8.4.2, la situación es muy distinta del caso anual, con una subestimación en el promedio de los modelos mayor a  $0,25^{\circ}\text{C}$  en casi toda la región, e incluso con una vasta región en el oeste donde el error del promedio de los modelos se encuentra entre  $0,75$  y  $1^{\circ}\text{C}$ . En cambio en el invierno el ajuste del promedio de los modelos a los datos es muy bueno con errores similares a los del caso anual, Figura 8.4.3.





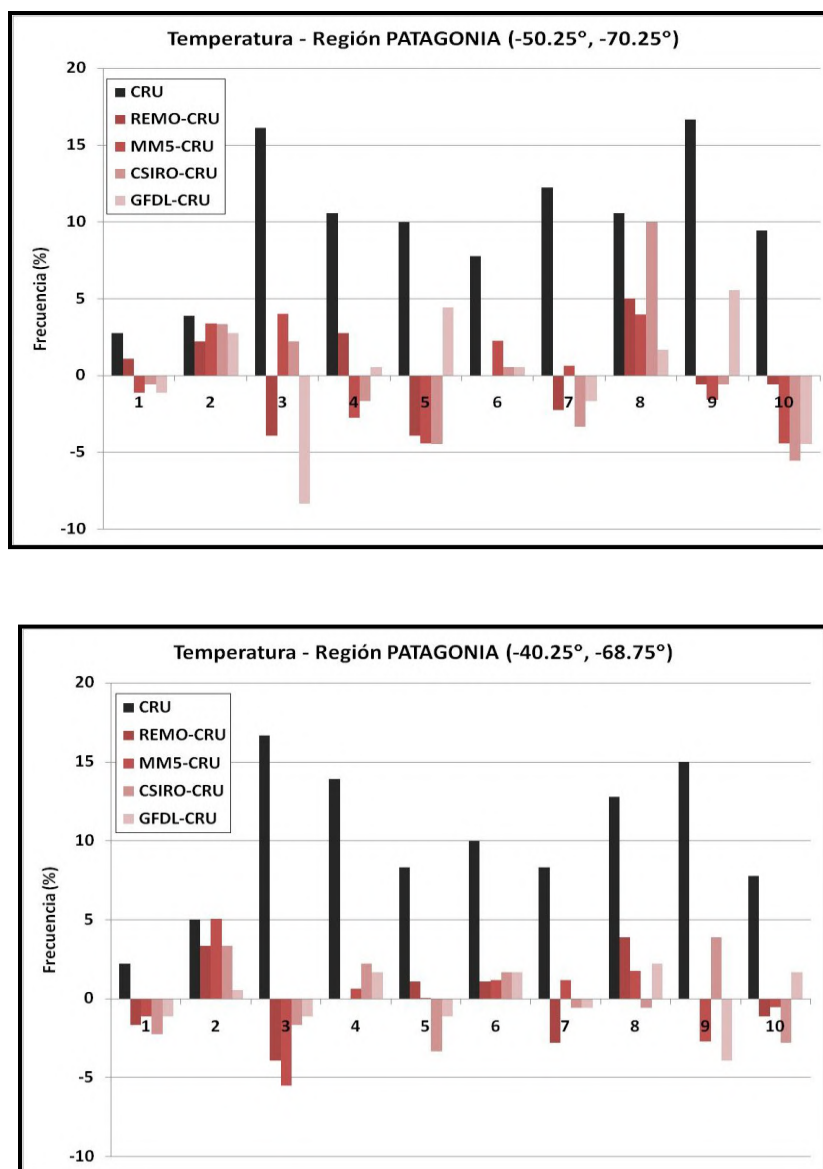
**Figura 8.4.2:** Ídem Figura 8.4.1 pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)





**Figura 8.4.3:** Ídem Figura 8.4.1 pero para la temperatura del invierno (junio, julio y agosto)

La Figura 8.4.4 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos representativos de la región. La distribución de temperatura mensual es bimodal como en las otras regiones. Los errores en la frecuencia de los modelos son, en general, bastante menores que las frecuencias observadas en los dos puntos. En el caso de las temperaturas mensuales más cálidas, estos resultados indican que las frecuencias de temperaturas mensuales extremas podrían proyectarse para el futuro con algún grado de certidumbre.

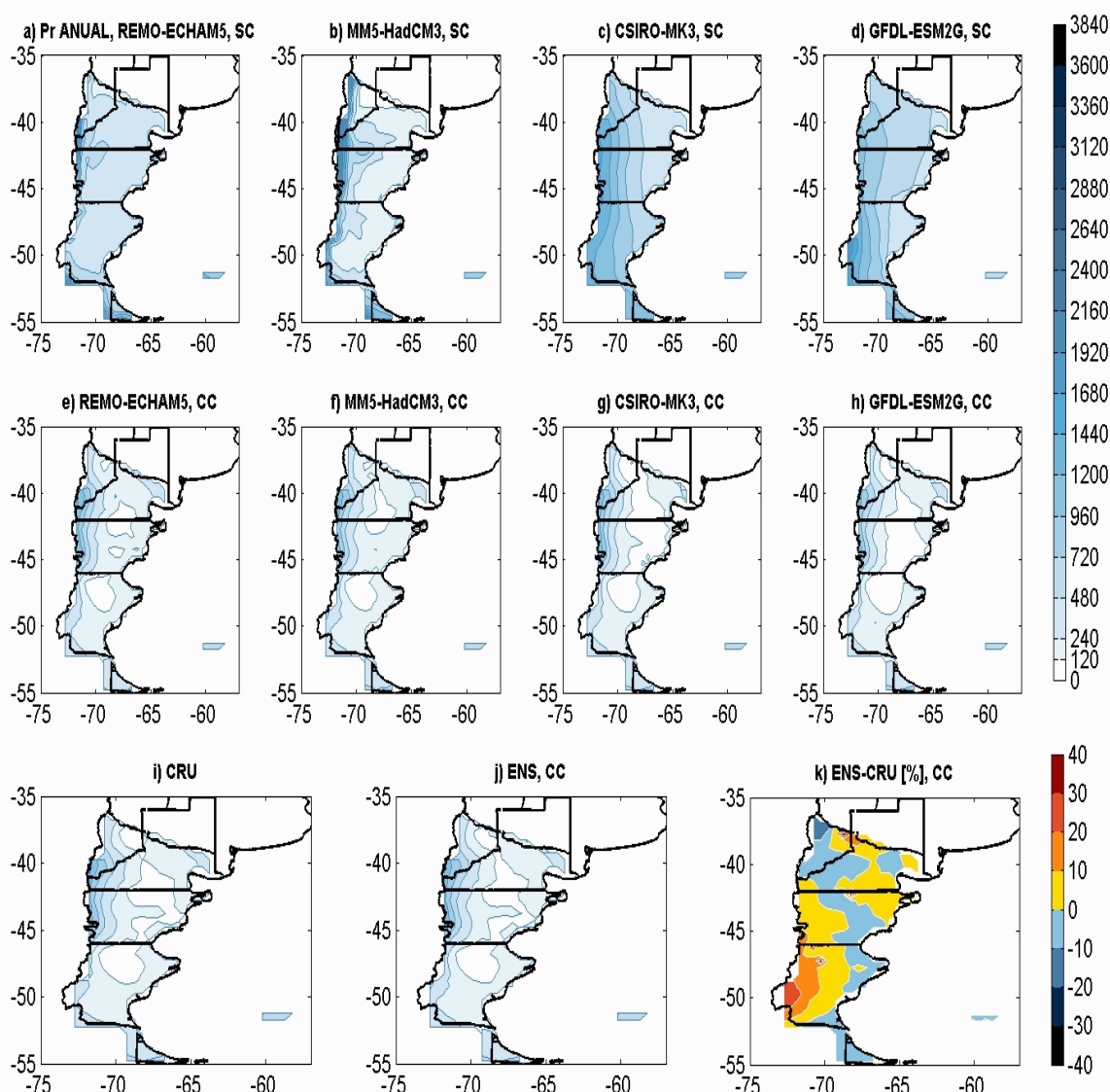


**Figura 8.4.4:** Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Patagonia. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales

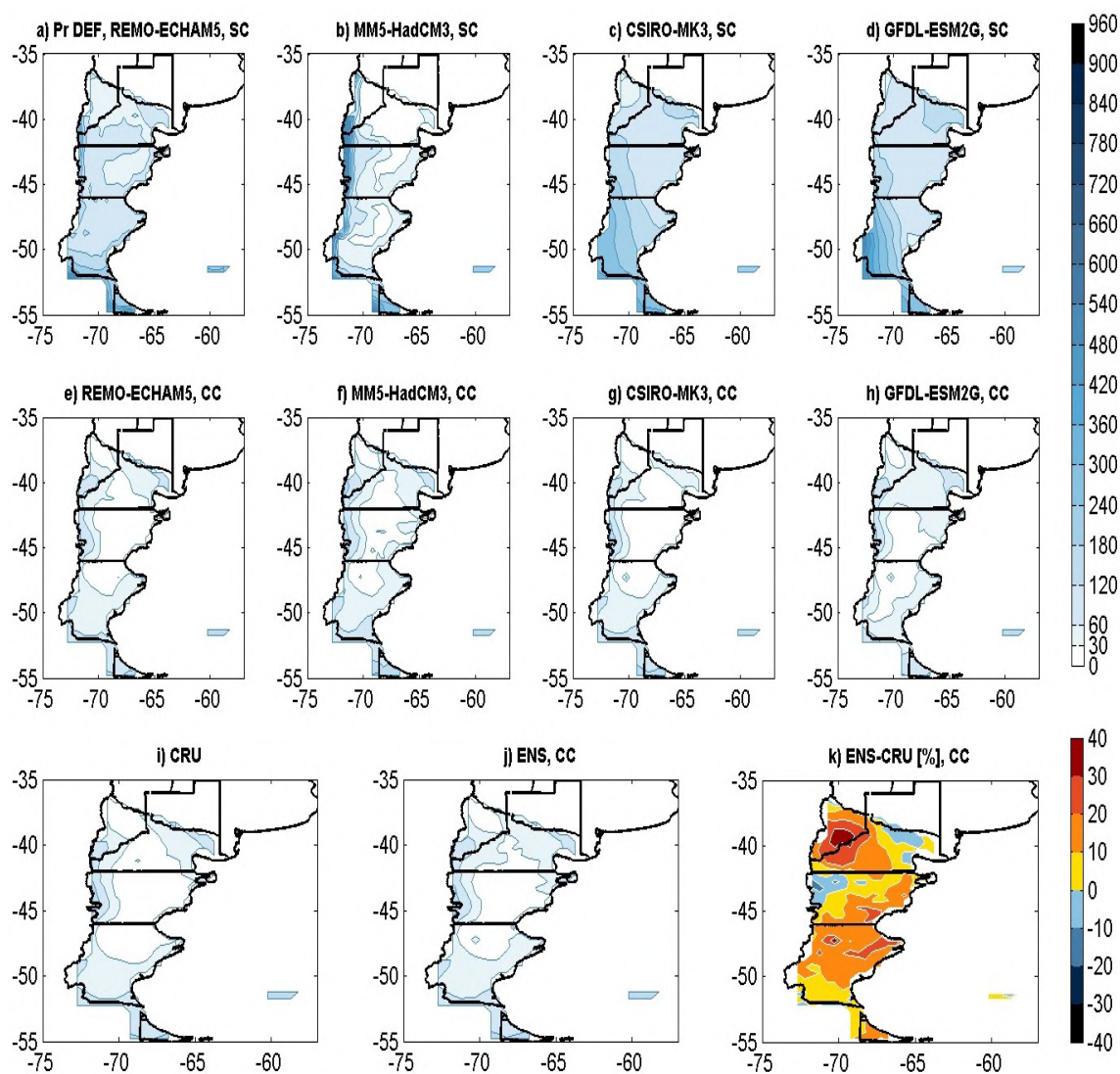
## 4.2 Precipitación

La precipitación anual corregida es sustancialmente más representativa del campo anual observado que la no corregida, especialmente en la zona cordillerana, aunque en el extremo sur de esta zona persiste un error en los mapas corregidos, de hasta 30%.

En el resto de la región, esto es en su mayor parte, el promedio de los modelos se ajusta a los datos con errores inferiores al 10%. Figura 8.5.5. Como esta región es predominantemente árida, a esta representación de la precipitación anual se lo puede considerar como muy buena. Sin embargo en el verano y el invierno, el ajuste al campo observado ya no es tan bueno con amplias zonas en donde el error es mayor al 10% y en el caso del invierno hay dos zonas en el norte y sur de la región con subestimaciones y sobrestimaciones de entre 30 y 40% por encima de los valores observados, Figura 8.4.6 y 8.4.7.

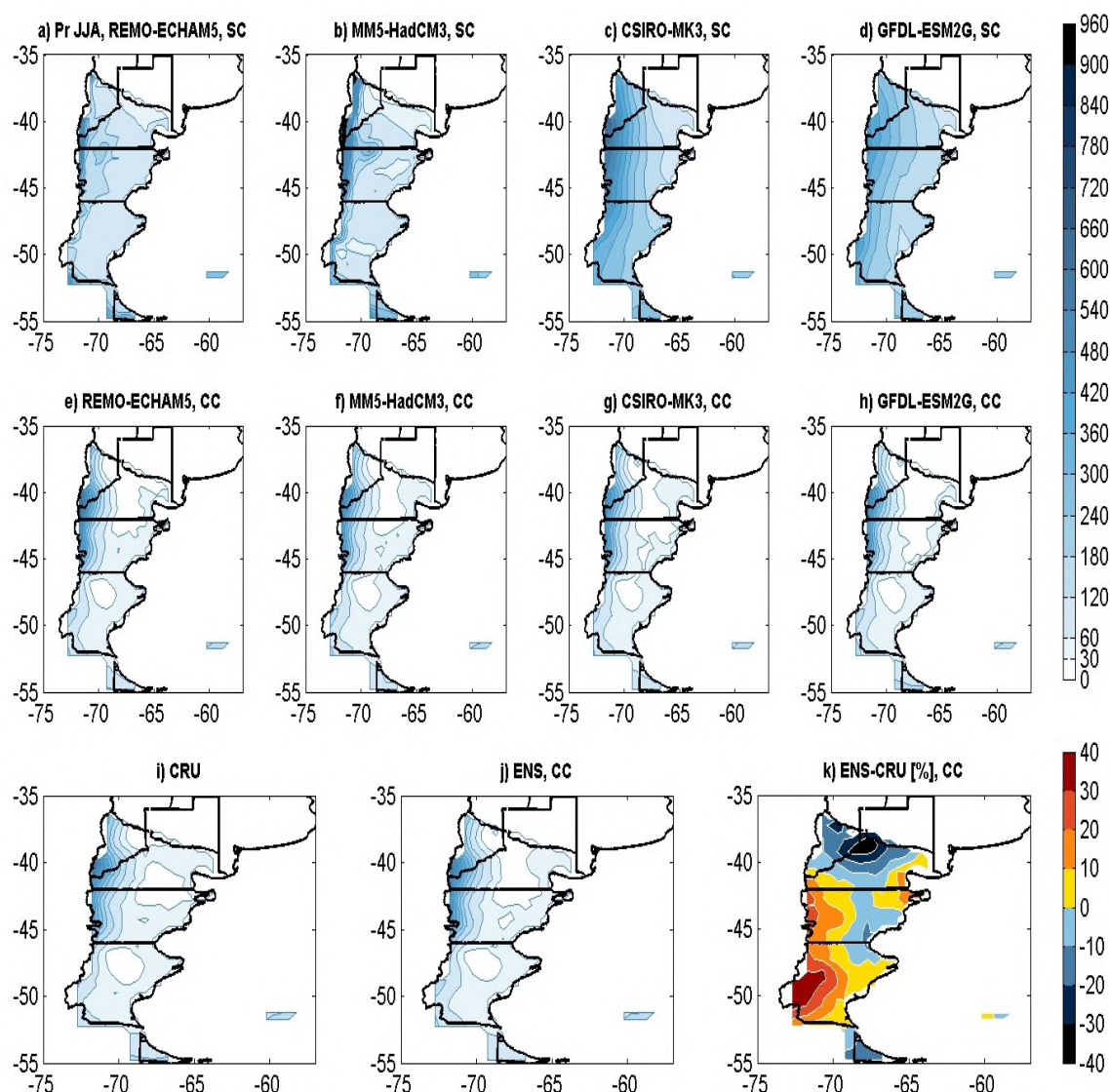


**Figura 8.4.5:** Ídem figura 8.4.1, pero para la precipitación



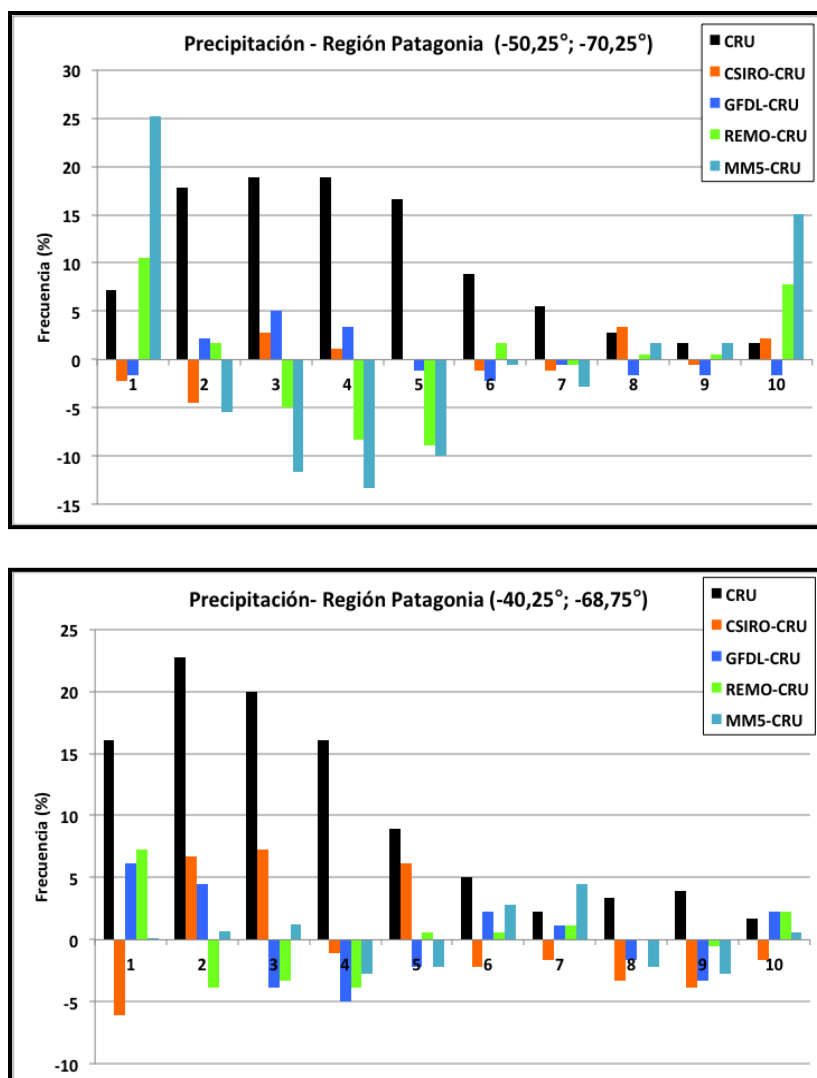
**Figura 8.4.6:** Ídem Figura 8.4.5 pero para la precipitación del verano (diciembre, enero y febrero)





**Figura 8.4.7:** Ídem Figura 8.4.5 pero para la precipitación del invierno (junio, julio y agosto)

La figura 8.4.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos del retículo de la región Patagonia. Como en las otras regiones, la distribución de la lluvia mensual tiene la forma de una distribución Gama. Excepto en las precipitaciones mensuales más altas y en el decil más bajo, los errores en las otras frecuencias son bastante menores que la frecuencia observada. Esto indica la dificultad para captar la correcta frecuencia de las precipitaciones mensuales más altas en las proyecciones del clima futuro. En el caso del modelo MM5 hay también errores muy grandes en el decil inferior que corresponde mayormente a los meses sin lluvia.



**Figura 8.4.8:** Ídem Figura 8.4.4, pero para la precipitación

## 8.5 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

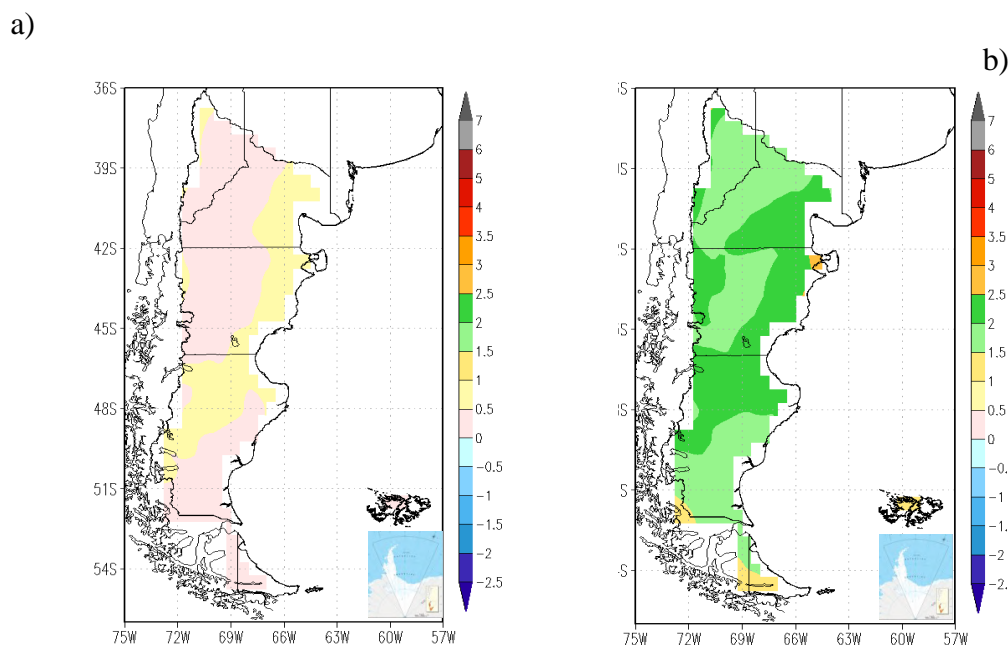
### 8.5.1 Temperatura

Se utilizan modelos climáticos para estimar los cambios climáticos en la Patagonia. Sobre la Antártida, las islas del Océano Atlántico y el Mar Argentino, no hay suficientes datos para aplicar los métodos de selección y corrección de los modelos y por eso solo se mencionan en la sección 8.3 los escenarios proyectados por el IPCC. Para estas regiones, y para valores diarios, se puede recurrir directamente a los modelos de la base CMIP5 y a la base del CIMA, (Capítulo 4).



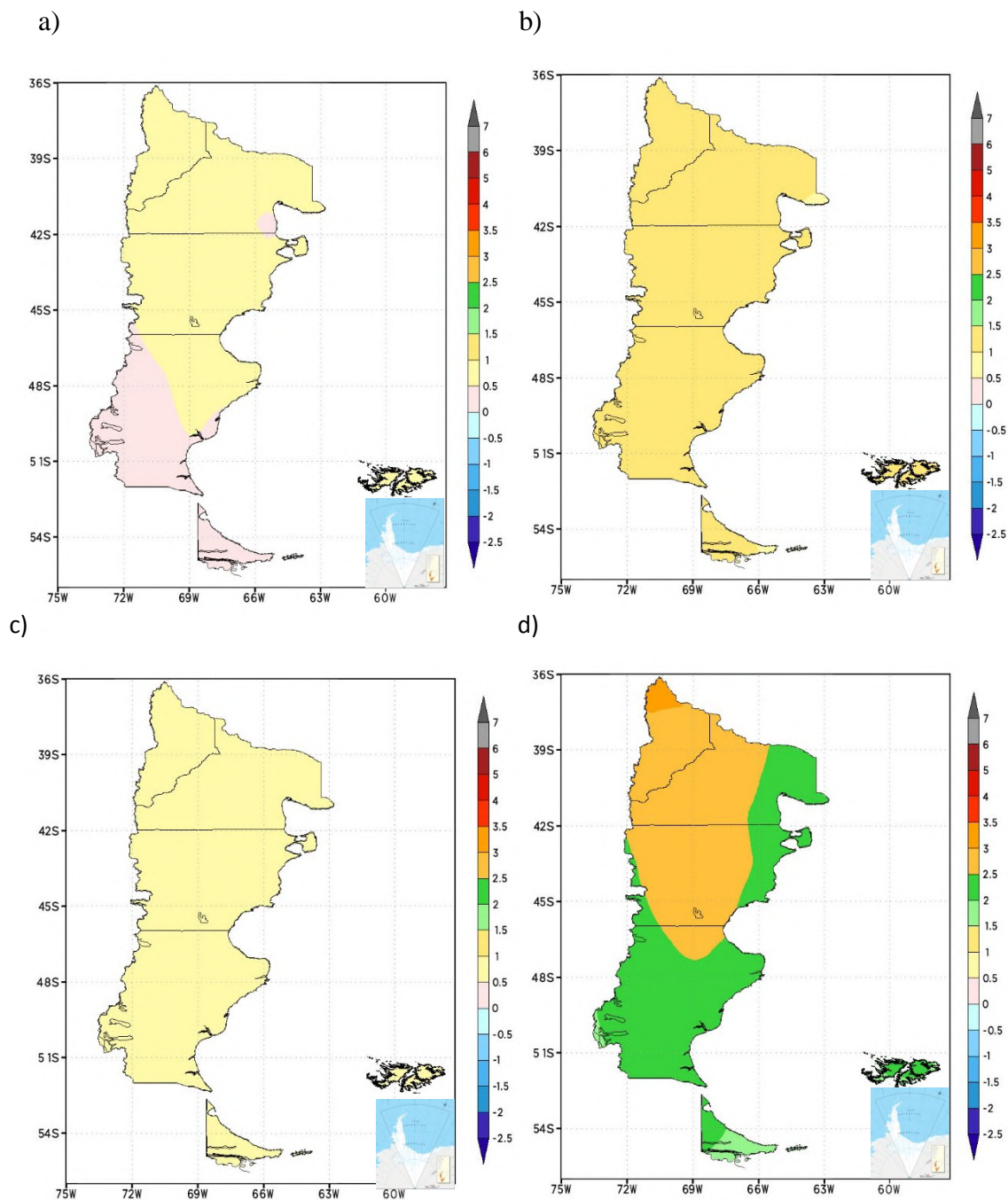
### *Temperaturas medias*

En el futuro cercano se proyecta para toda la Patagonia un calentamiento moderado de 0 a 1°C, que en el escenario RCP4.5 es menor a 0,5°C en el sur de la región al igual que en buena parte de la región en el escenario SRES A1B, Figuras 8.5.1.1 y 8.5.1.2. En el norte de la Patagonia este calentamiento sería aproximadamente del mismo orden que el observado entre 1960 y 2010, Tabla 8.2.2.1.

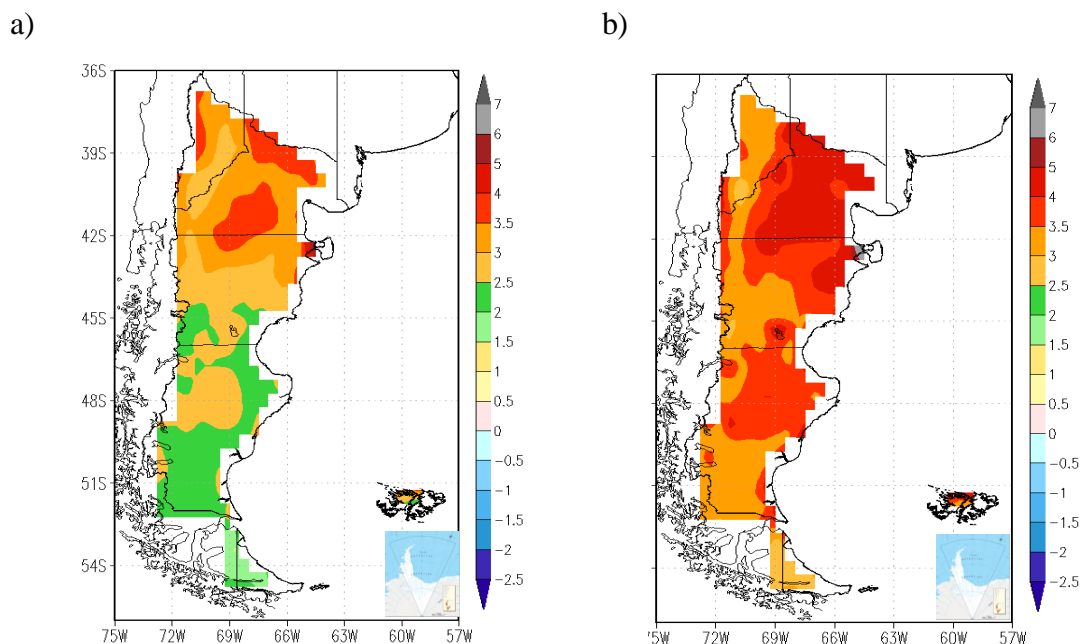


**Figura 8.5.1.1:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Escenario SRES A1B a) Promedio de los modelos REMO-ECHAM5 y MM5-HadCM3, futuro cercano (2015-2039), b) Modelo REMO-ECHAM5 futuro lejano (2075-2099)

En el futuro lejano en el escenario RCP8.5 hay una lengua de calentamiento a lo largo del centro de la Patagonia llegando hasta el norte de Santa Cruz con valores entre 2,5 y 3°C y con menor calentamiento sobre la cordillera y la costa. En todos los escenarios el calentamiento es mayor a 1°C y tiende a ser mayor en el SRES A1B.

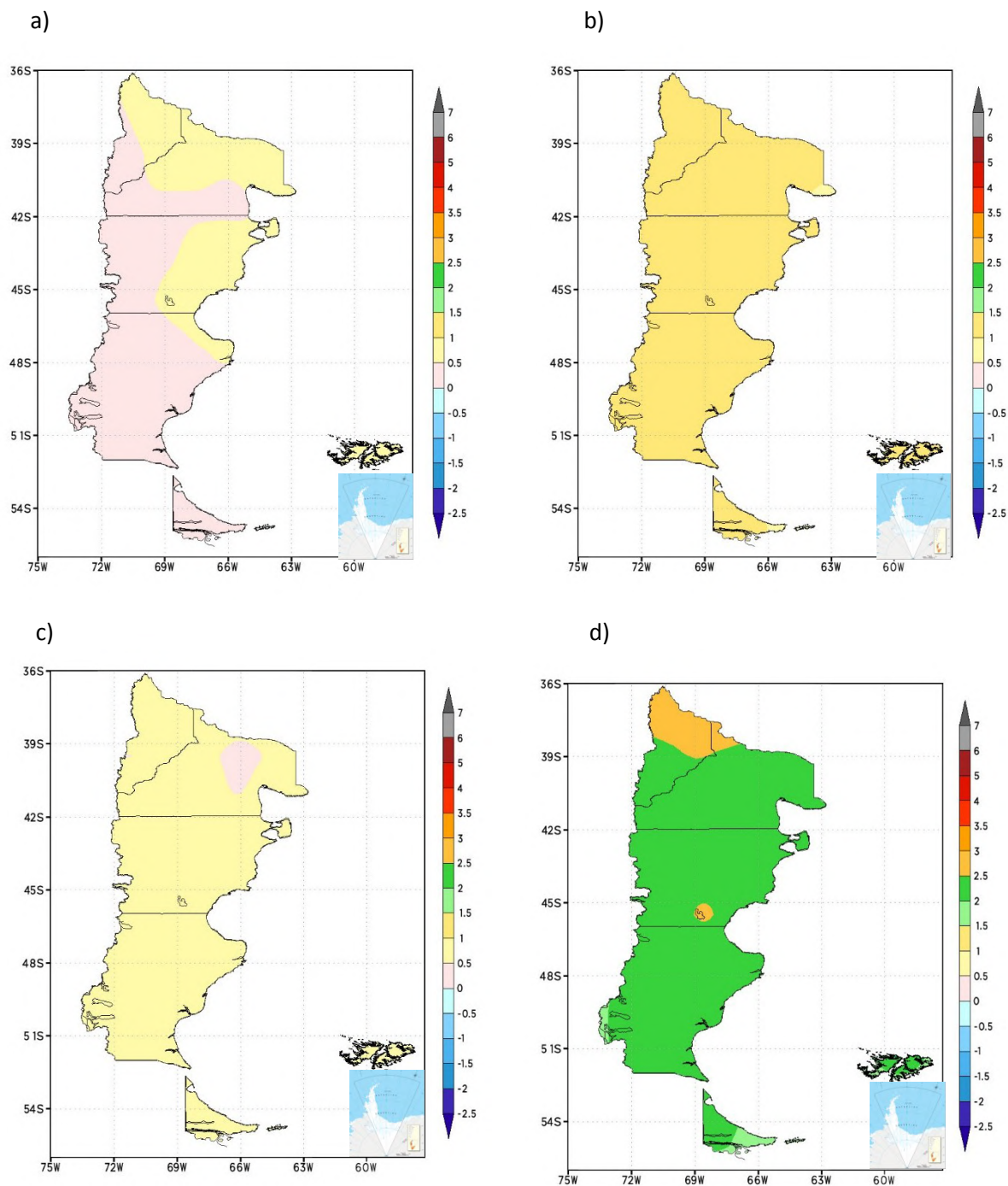


**Figura 8.5.1.2:** Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y GFDL-ESM2G, a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099) y c) escenario RCP8.4, futuro cercano y d) escenario 8.4, futuro lejano



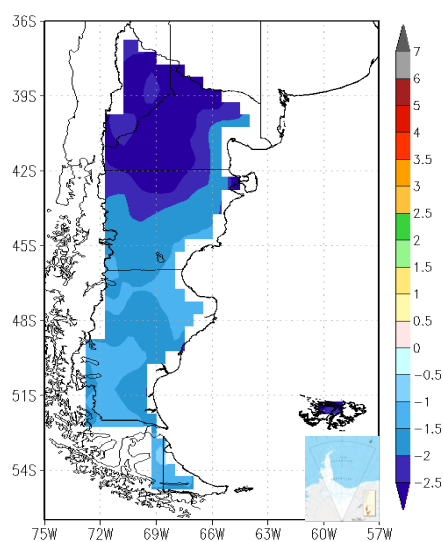
**Figura 8.5.1.3:** Ídem Figura 8.5.1.1, pero para la temperatura mínima media anual

A diferencia de otras regiones más continentales y como ocurrió en el periodo 1960-2010, en los escenarios RCP el calentamiento en las temperaturas mínima y máxima no sería muy distinto y en consecuencia su patrón geográfico y magnitudes serían similares al de la temperatura media. En este aspecto, la diferencia con otras regiones es tan marcada que incluso los aumentos en las temperaturas máximas serían algo mayores que en las mínimas. Por el contrario, el escenario SRES A1B presenta calentamientos mayores que los de los escenarios RCP en las temperaturas mínimas y enfriamientos muy marcados para el futuro cercano, Figuras 8.5.1.3 a 8.5.1.6. En consecuencia, y aunque para el caso de las temperaturas media y mínima no habría mucha incertidumbre sobre el signo del cambio, sí lo hay para las temperaturas máximas medias.

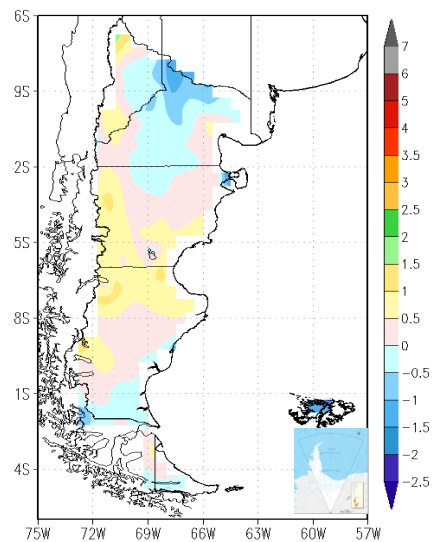


**Figura 8.5.1.4:** Ídem figura 8.5.1.2, pero para la temperatura mínima media anual

a)

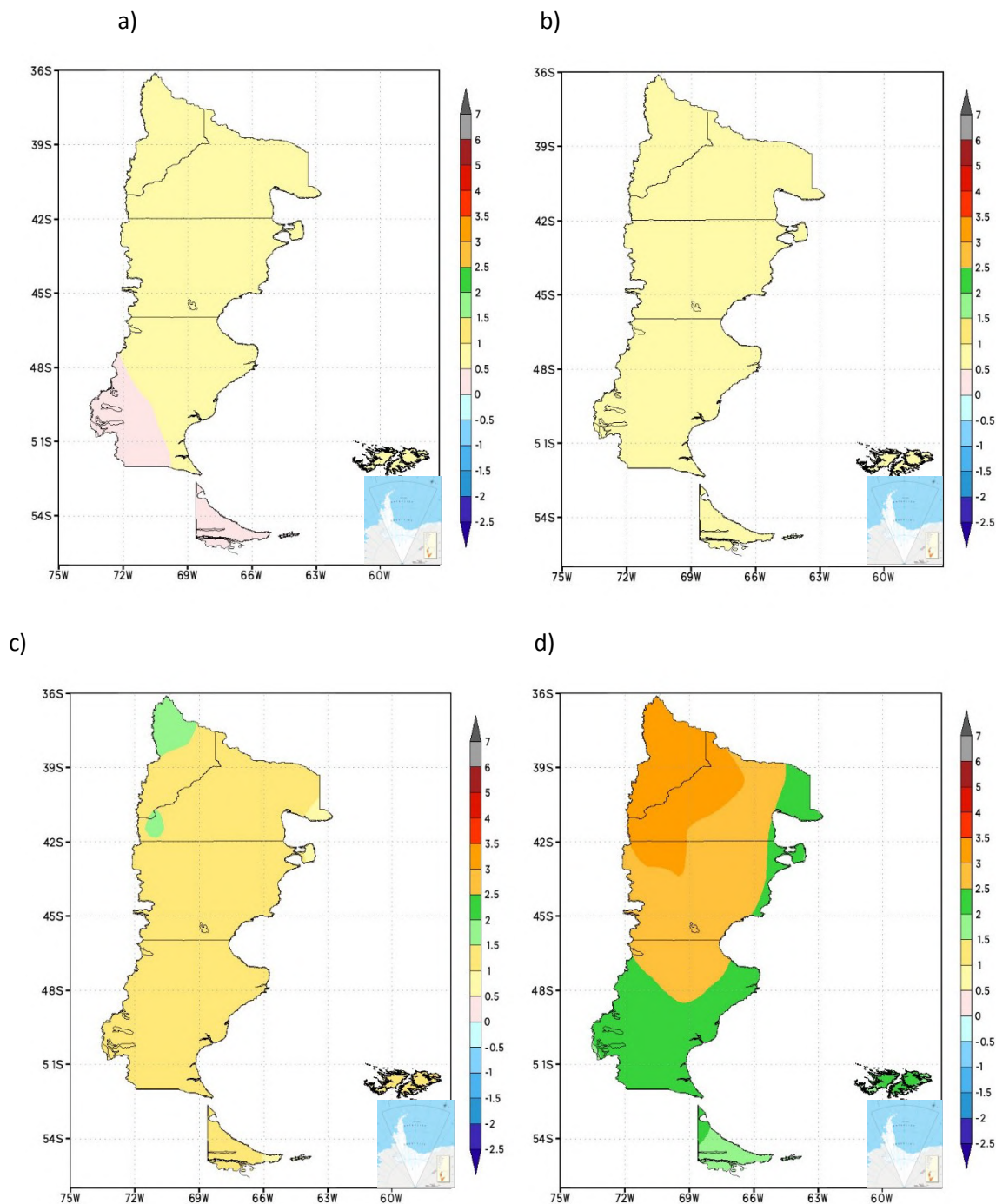


b)



**Figura 8.5.1.5:** Ídem Figura 8.5.1.1, pero para la temperatura máxima media anual





**Figura 8.5.1.6:** Ídem figura 8.5.1.1, pero para la temperatura máxima media anual

#### *Extremos térmicos*

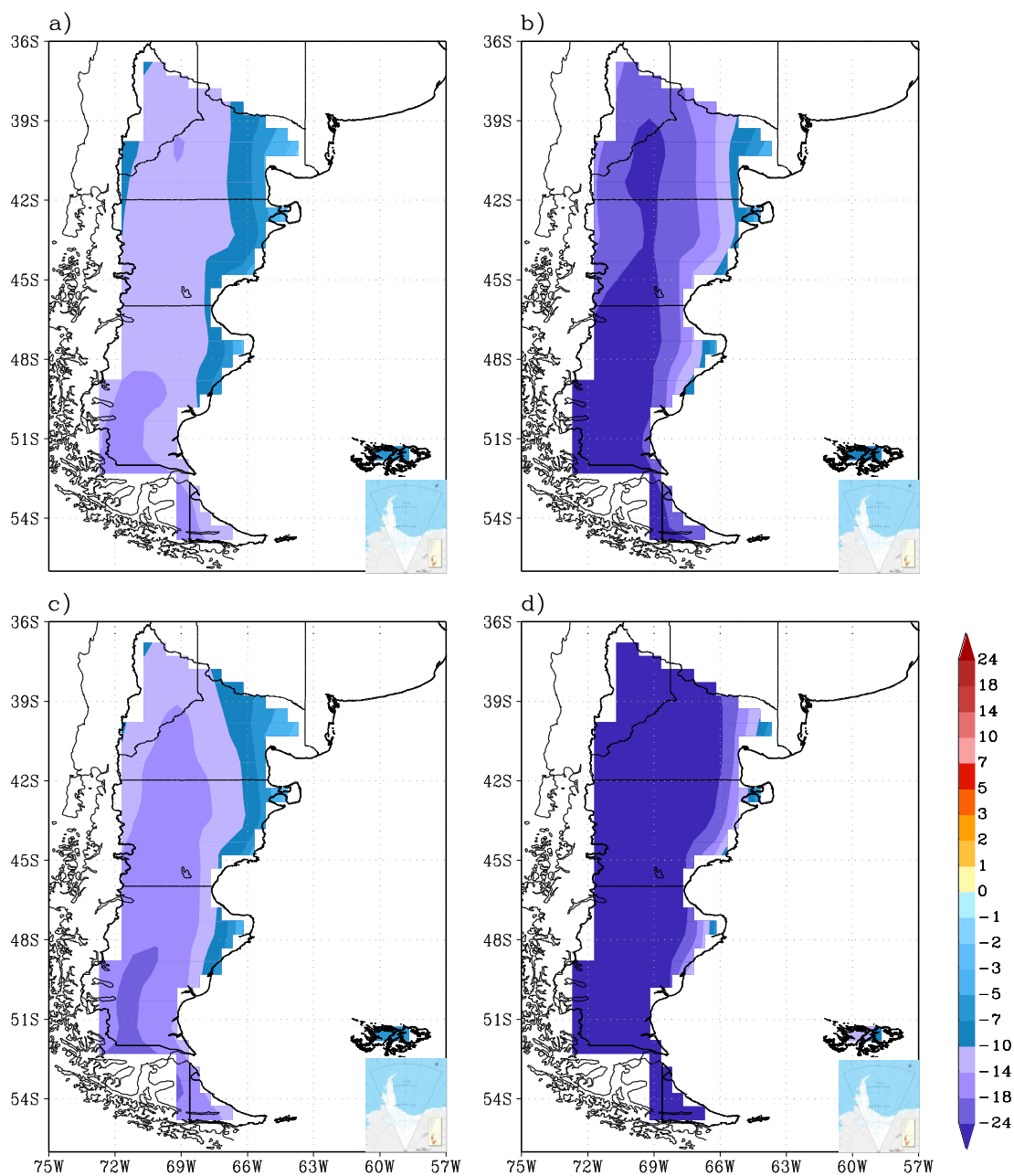
En casi toda la región, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento proyectado, Figuras 8.5.1.7 a 8.5.1.12. Como ocurre en otras regiones, los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en el futuro cercano solo tienen pequeñas diferencias entre ellos, pero difieren bastante en el



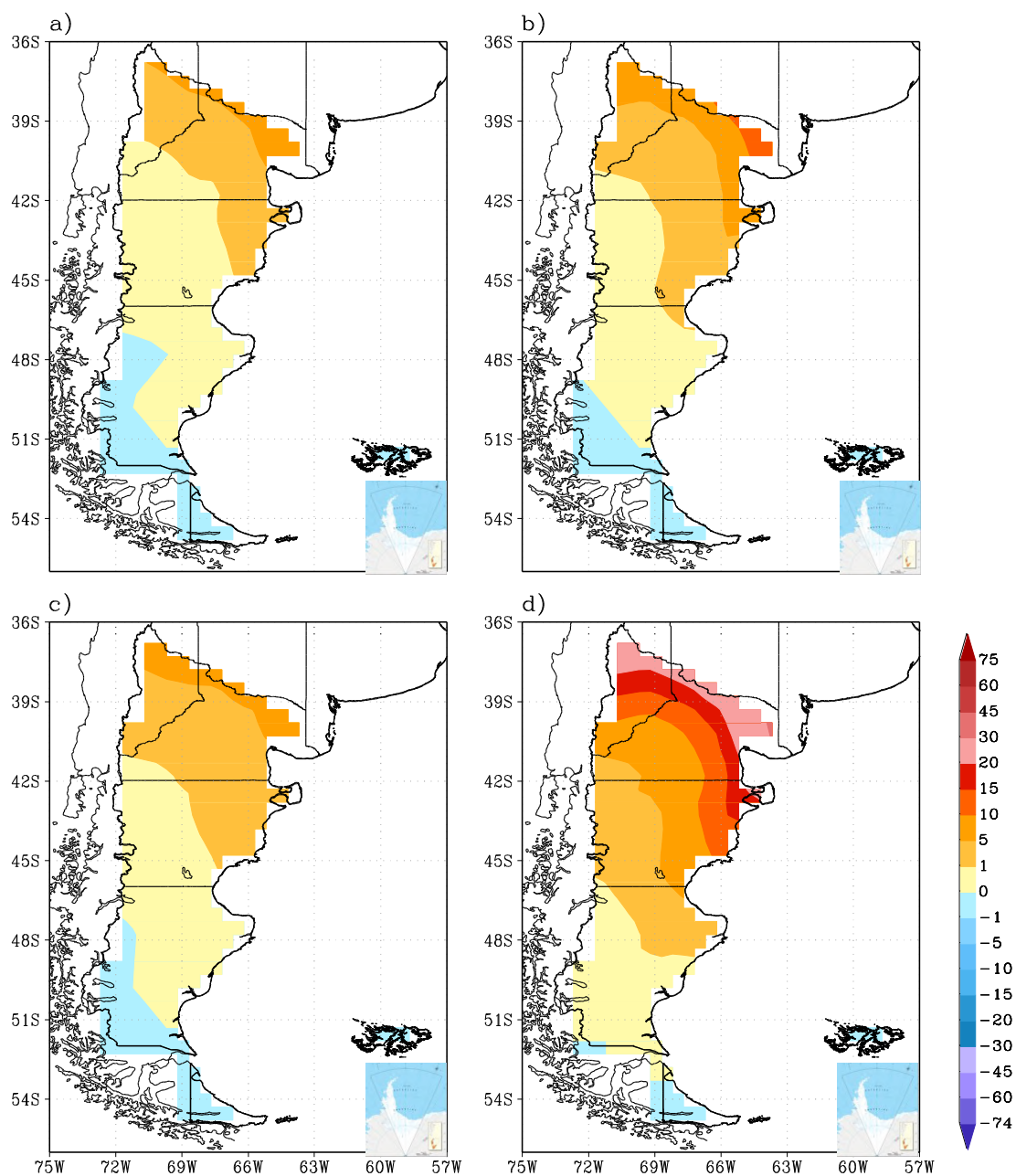
futuro lejano con mayores cambios en el RCP8.5, como es de esperar por el mayor calentamiento asociado a este escenario.

Los días con heladas se reducirían sustancialmente en más de 10 días en casi toda la región, Figura 8.5.1.7. Excepto en el extremo sur, las proyecciones del número de noches con temperaturas en exceso de 20°C (noches tropicales) indican un aumento que es mayor en el norte de la Patagonia, Figura 8.5.1.8. Esto es esperable debido al gradiente norte sur de la temperatura dentro de rangos que hacen más factible la superación de ese umbral por un calentamiento en el norte de la región. Las temperaturas máximas y mínimas del año aumentarían en toda la región en forma creciente con el tiempo y en el escenario de mayor forzamiento radiativo (RCP 8.5), Figuras 8.5.1.9 y 8.5.1.10. Esto también ocurriría con el aumento del porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90, y con el número de días con olas de calor, Figuras 8.5.1.11 y 8.5.1.12. Cabe mencionar que debido a la forma en que se definieron las olas de calor, estos aumentos no serían relevantes por sus impactos, excepto en la parte norte de la Patagonia.

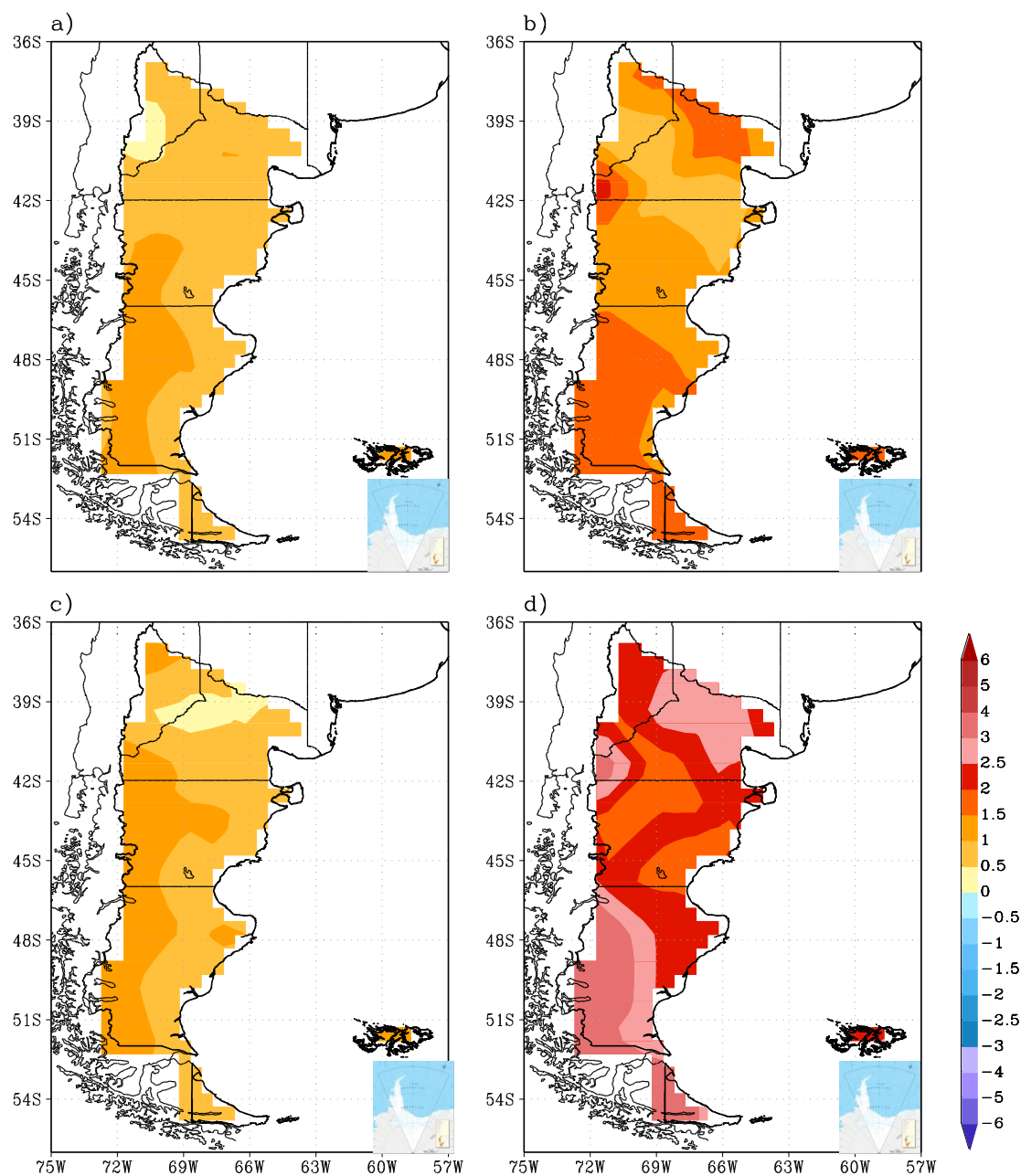
Debido a las escasas y dispersas observaciones prolongadas y continuas, los cambios observados en los valores extremos no son muy confiables y no se han analizado a nivel regional, sino para algunas zonas. La única excepción es el aumento en el porcentaje anual de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 que tuvo una tendencia positiva como la que se proyecta a futuro. La pocas observaciones existentes de días con heladas (excepto en Trelew) y de olas de calor también presentan la misma tendencia que los cambios proyectados.



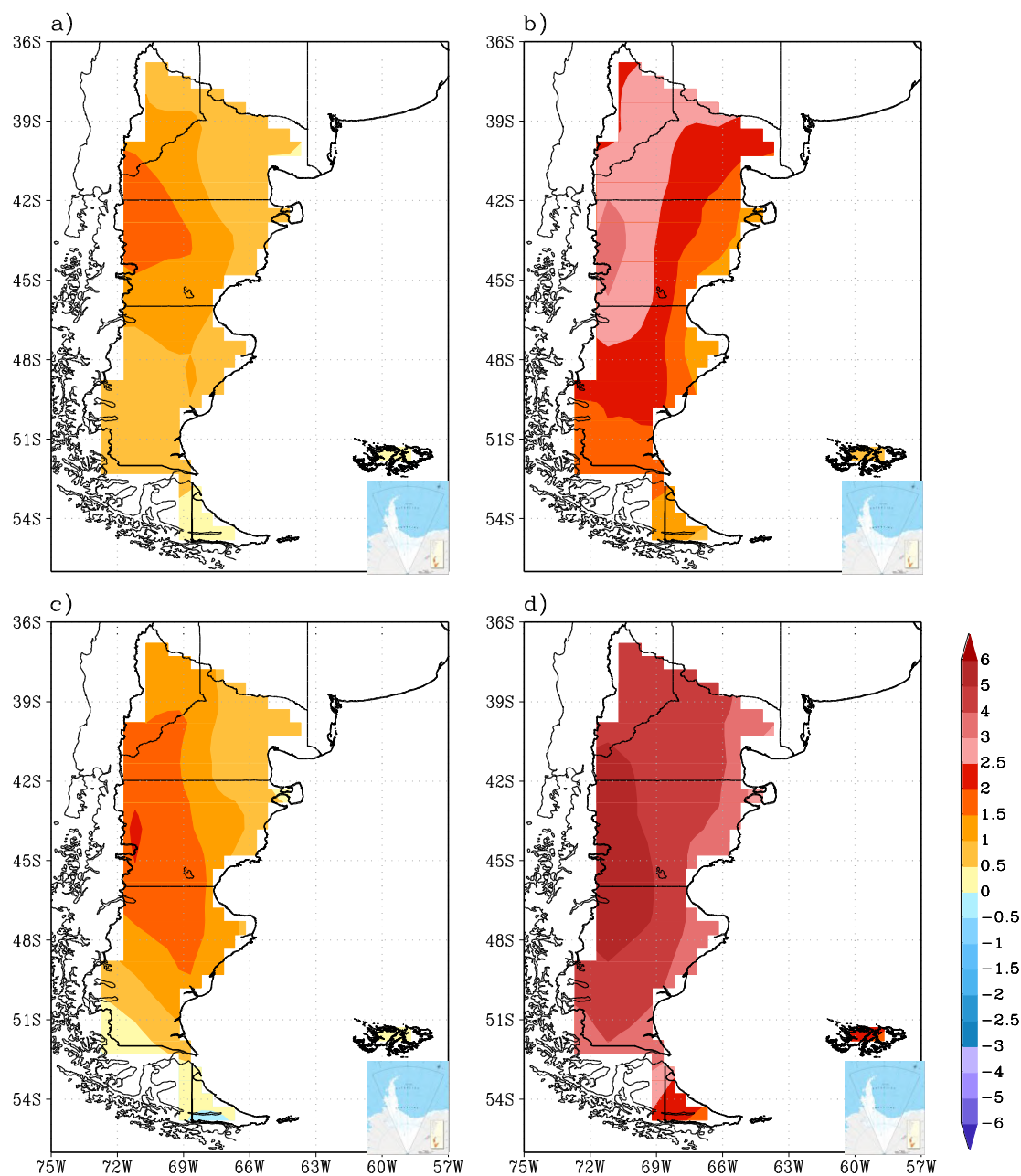
**Figura 8.5.1.7:** Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1986-2006. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y GFDL-ESM2G, a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039); b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.4, futuro cercano; d) escenario 8.4, futuro lejano



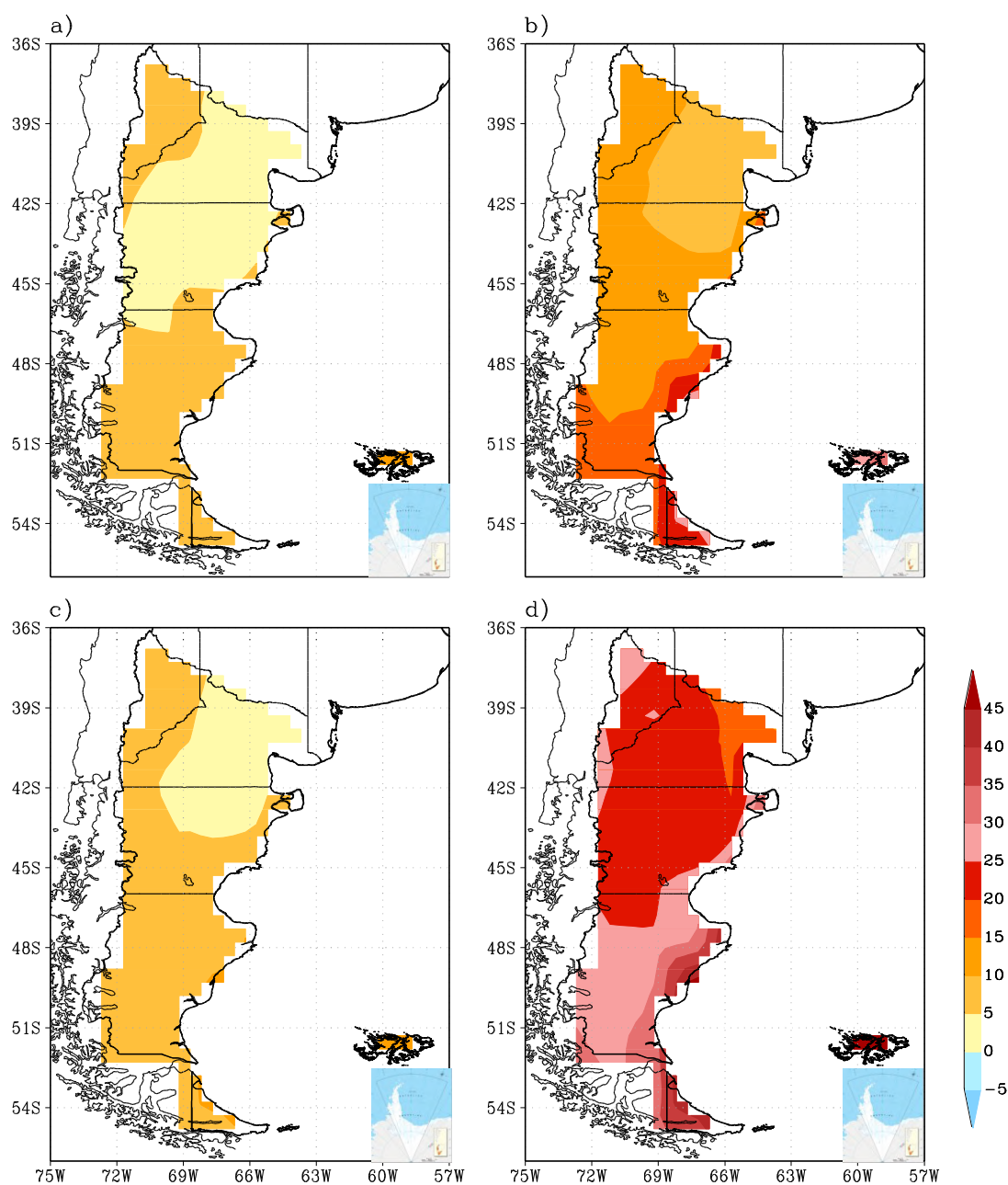
**Figura 8.5.1.8:** Ídem Figura 8.5.1.4, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



**Figura 8.5.1.9:** Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual ( $^{\circ}\text{C}$ )

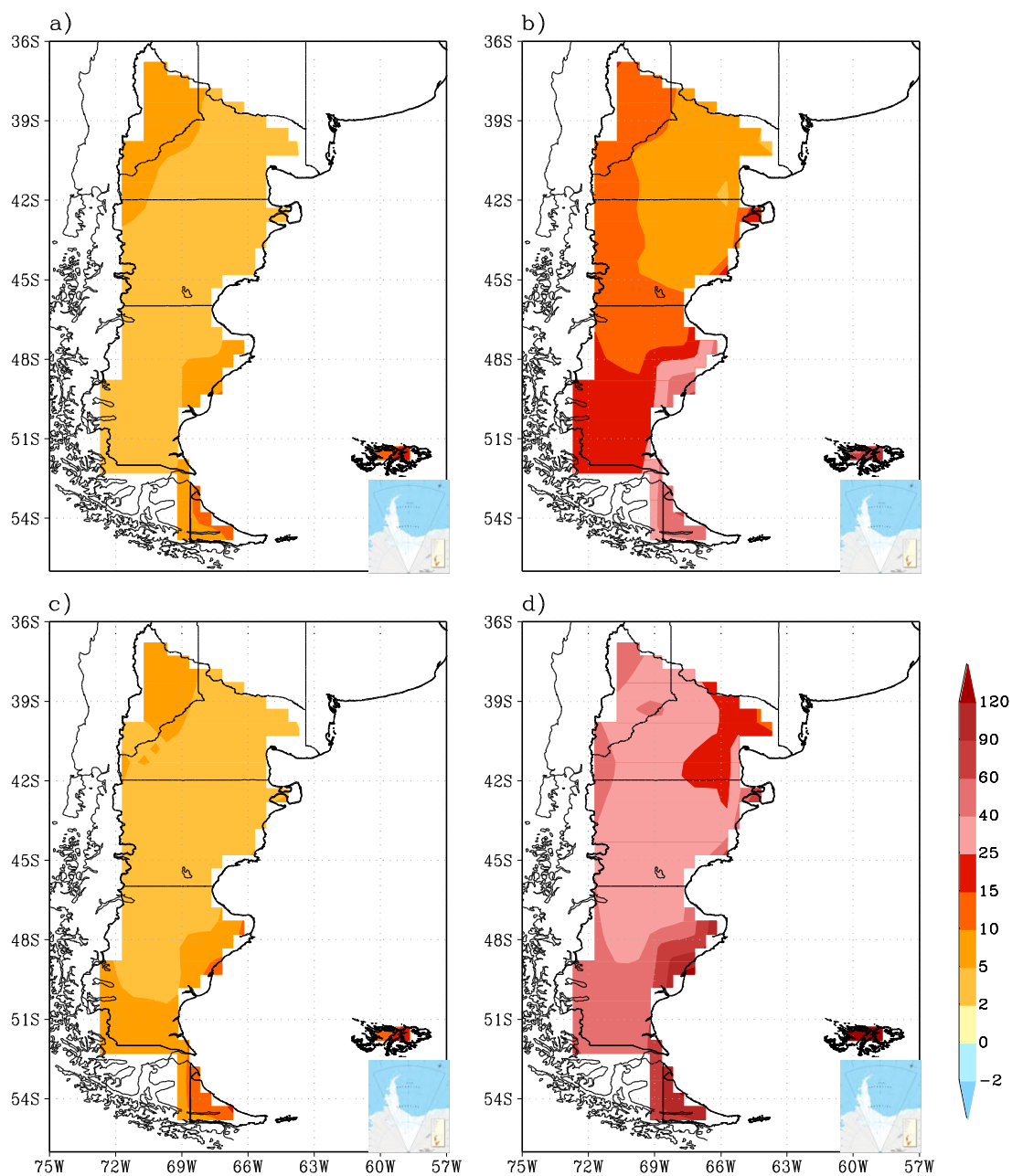


**Figura 8.5.1.10:** Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)



**Figura 8.5.1.11.** Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90



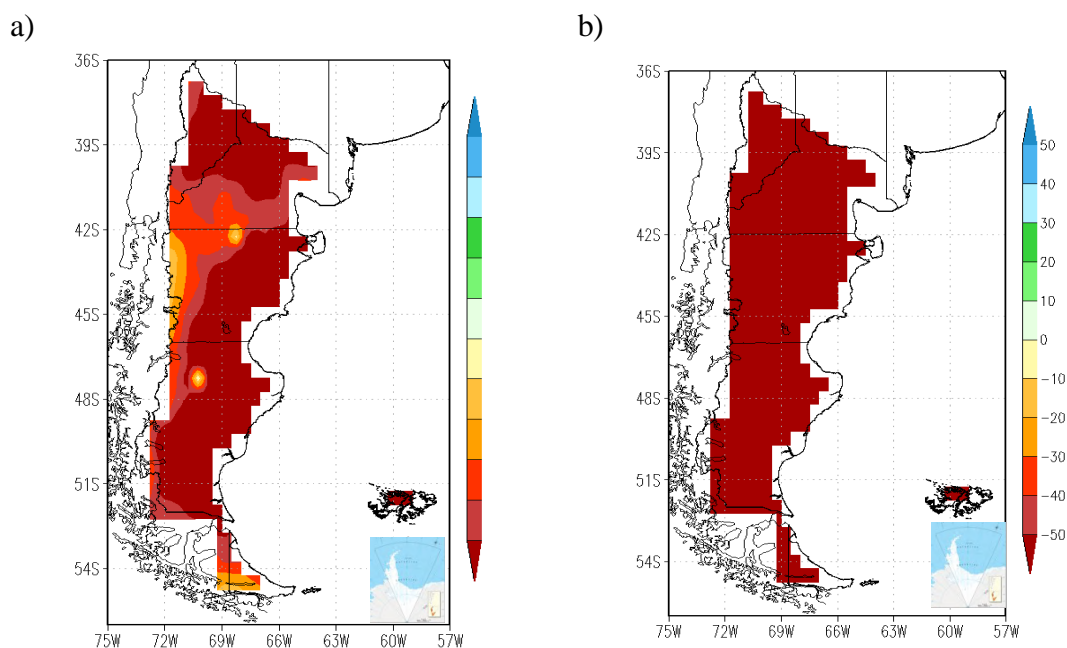


**Figura 8.5.1.12:** Ídem Figura 8.5.1.4, pero para los días en el año con ola de calor

## 8.5.2 Precipitación

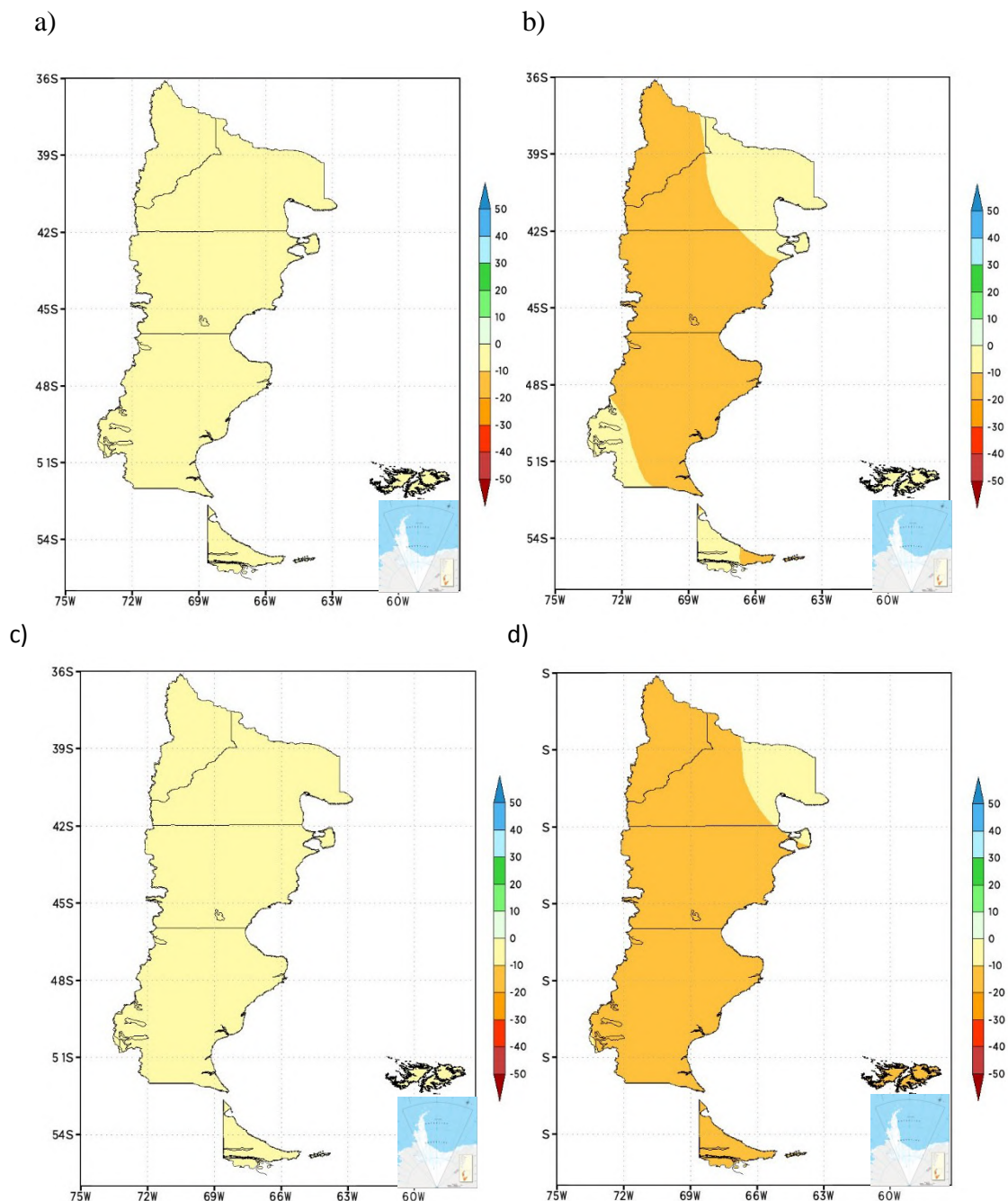
### *Precipitación media*

La figura 8.5.2.1 y 8.5.1.3 muestran los escenarios de precipitación para el futuro cercano y lejano de los escenarios SRES A1B y RCP4.5 y 8.5 respectivamente.



**Figura 8.5.2.1:** Cambio en la precipitación media anual con respecto al periodo 1986-2005. Escenario SRES A1B a) Promedio de los modelos REMO-ECHAM5 y MM5-HadCM3, futuro cercano (2015-2039), b) Modelo REMO-ECHAM5 futuro lejano (2075-2099)

Los escenarios RCP, 4.5 y 8.5 no tienen casi diferencia y en el futuro cercano ambos presentan una reducción de 0 a 10%, mientras que en futuro lejano, esta reducción se acentúa para situarse entre 10 y 20%. Las reducciones porcentuales son mucho mayores en el caso del escenario SRES A1B. No obstante como excepto sobre la cordillera y en la zona muy próxima a la misma, la Patagonia es una región árida con escasa precipitación, en general del orden de 200 mm anuales o menos, estas reducciones porcentuales representan pocos milímetros anuales y por lo tanto las diferencias entre escenarios no son importantes. Sobre la zona cordillerana, esta reducción de la precipitación en valores absolutos es más importante, continuando la tendencia observada entre 1860 y 2010, Figura 8.2.2.1b. Esto último puede tener consecuencias desfavorables para el uso de los recursos hídricos en una zona donde la disponibilidad de agua es un factor crítico para la generación de electricidad.



**Figura 8.5.2.2:** Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-ESM2G. Panel superior, escenario RCP 4.5; panel inferior, escenario RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039); derecha, futuro lejano

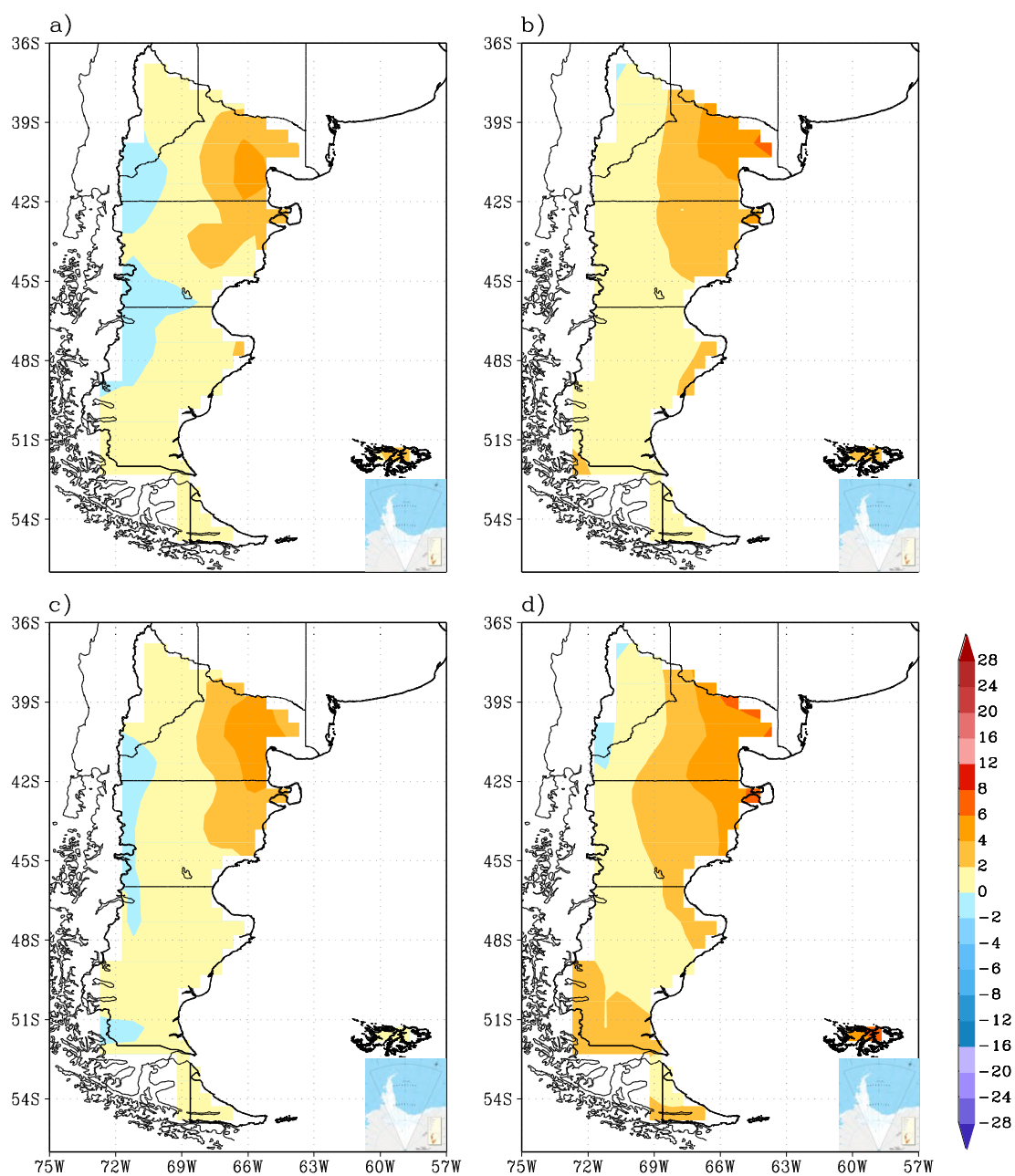
### *Precipitaciones extremas*

Como con la temperatura, en general los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero tampoco en sus escenarios en el futuro lejano. En los dos escenarios, los cambios son solo algo más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

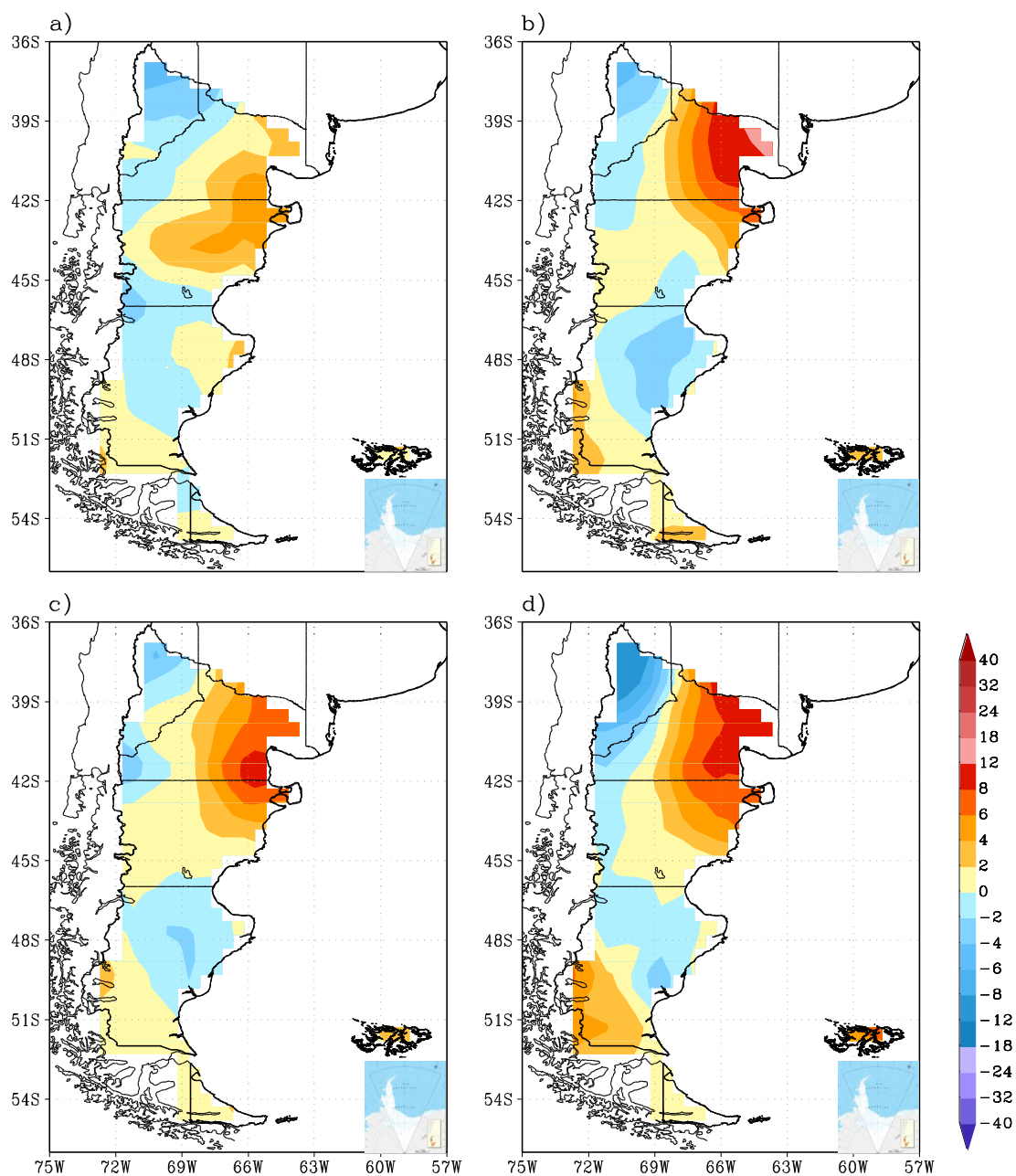
Las características comunes a los cuatro casos son mayores precipitaciones extremas en el noreste y menores en la zona cordillerana norte y central, Figuras 8.5.2.3 a 8.5.2.5. El aumento en las precipitaciones extremas proyectadas se extiende hasta el centro este de la Patagonia en algunos índices. En este sentido, la región comparte de alguna manera con el resto del país la tendencia al aumento en las precipitaciones intensas, a pesar de las proyecciones de disminución generalizada de la precipitación media en toda la región.

Las escasas observaciones solo permitieron estimar los cambios en los índices de precipitaciones extremas en la franja cordillerana de Neuquén a Chubut, Figuras 2.3.2 a 2.3.4 donde coinciden en signo con los valores proyectados, Figuras 8.5.2.3 a 8.5.2.5.

Con el paso del tiempo y con un escenario de más calentamiento habría una creciente prolongación de la racha seca máxima anual en toda la Patagonia. Sin embargo este índice se reduciría en el noreste de la Patagonia para el futuro cercano y para el escenario RCP4.5 en los dos horizontes temporales, Figura 8.5.2.6.

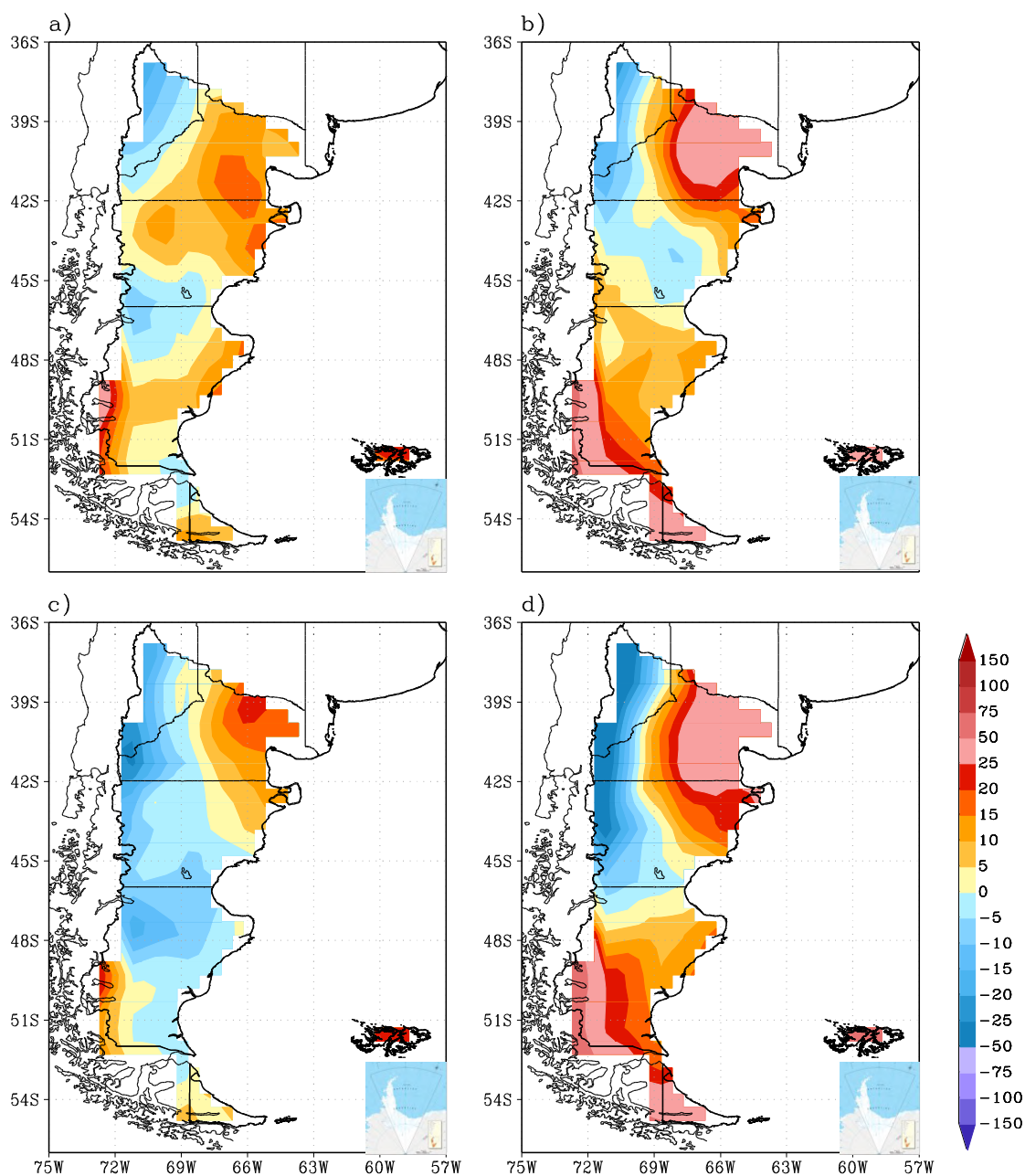


**Figura 8.5.2.3:** Cambios de precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 , GFDL-ESM2G, a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.4, futuro lejano

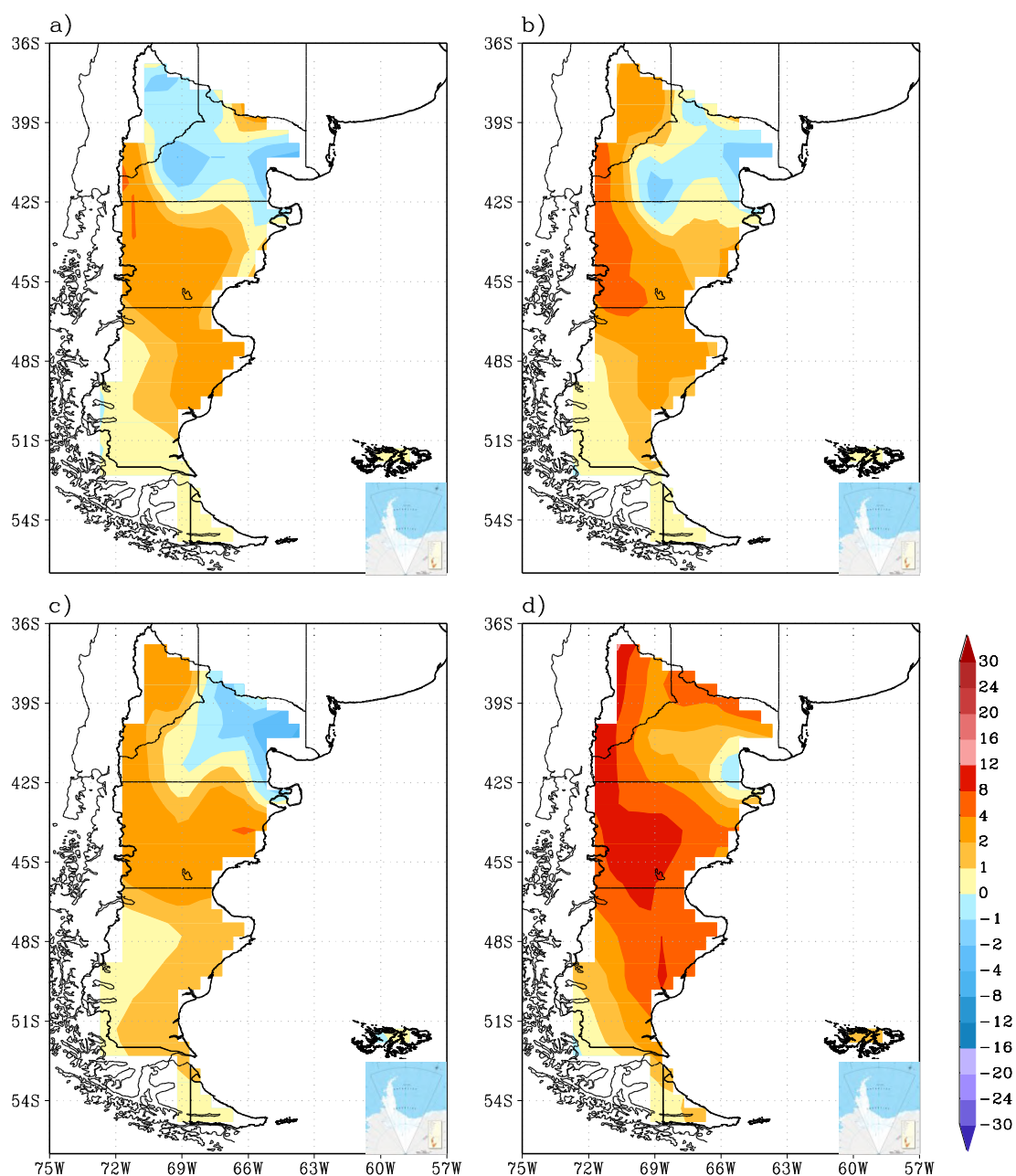


**Figura 8.5.2.4:** Ídem Figura 8.5.2.2, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)





**Figura 8.5.2.5:** Ídem Figura 8.5.2.2, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 8.5.2.6:** Ídem Figura 8.5.2.2, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 8.6 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA ASOCIADA A LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima

regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente por los modelos climáticos.

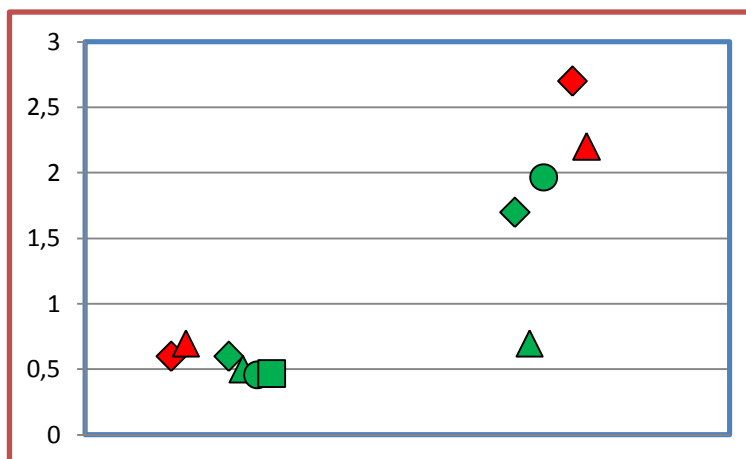
En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones. En este estudio, se comparan dos escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales, el RCP4.5 de emisiones moderadas y el escenario SRES A1B. En cuanto a los modelos, se utilizan cuatro MCGs de mejor performance en la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5.

### 8.6.1 Temperatura

#### *Temperaturas medias*

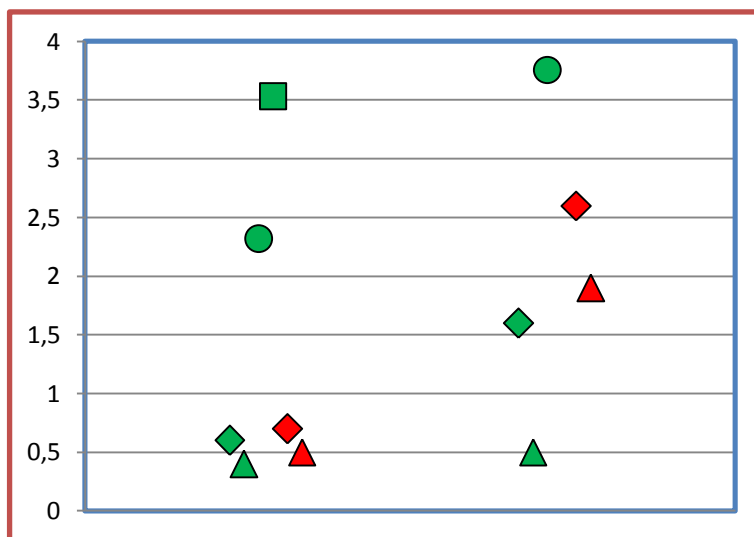
En el futuro cercano, la diferencia de calentamiento entre los cuatro modelos y los tres escenarios es pequeña, con promedios regionales de calentamientos de 0,5 a 0,7°C, Figura 8.6.1.1. En el promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1, el calentamiento promedio es muy similar.

Para el futuro lejano, la dispersión en el aumento de la temperatura media regional es mayor, especialmente entre los 2 escenarios RCP. El promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1, proyectan un aumento promedio regional de cambio de 1 a 1,5°C en el escenario RCP4.5 y de 2,5 a 3°C en el RCP8.5, muy consistente con los resultados de los modelos de mejor performance en la región. Como conclusión se puede esperar que la región Patagonia siga con el calentamiento observado en 1960-2010, pero con mayor rapidez.

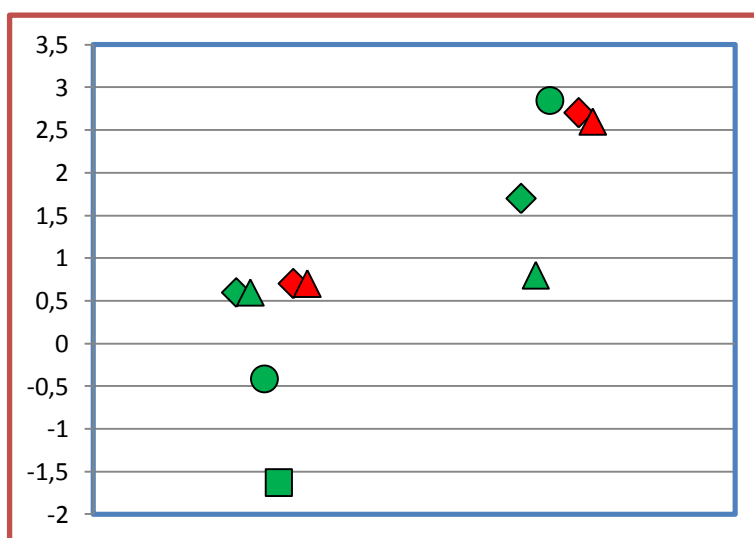


**Figura 8.6.1.1:** Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y SRES A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (triángulos), GFDL-ESM2G (rombos); REMO-ECHAM5 (círculos) y MM5-HadCM3 (cuadrado)

En el caso de las temperaturas mínimas y máximas, las características de los cambios en los modelos y en los dos escenarios RCP son muy similares a las de las temperaturas medias, Figuras 8.6.1.2 y 8.6.1.2, por lo que valen los mismos comentarios. Pero el caso de los escenarios SRES es muy distinto, presentan un marcado calentamiento en la temperatura mínima y un igualmente pronunciado enfriamiento en la temperatura máxima especialmente en el modelo MM5. HadCM3.



**Figura 8.6.1.2:** Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura mínima media regional

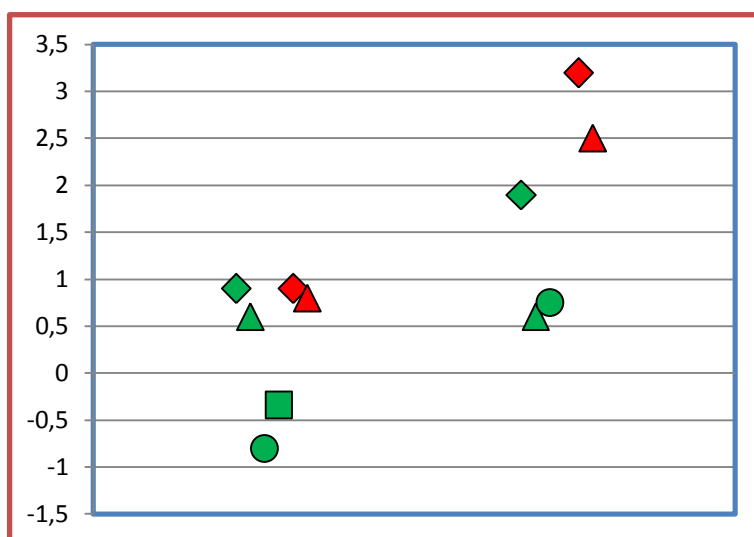


**Figura 8.6.1.3:** Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura máxima media regional

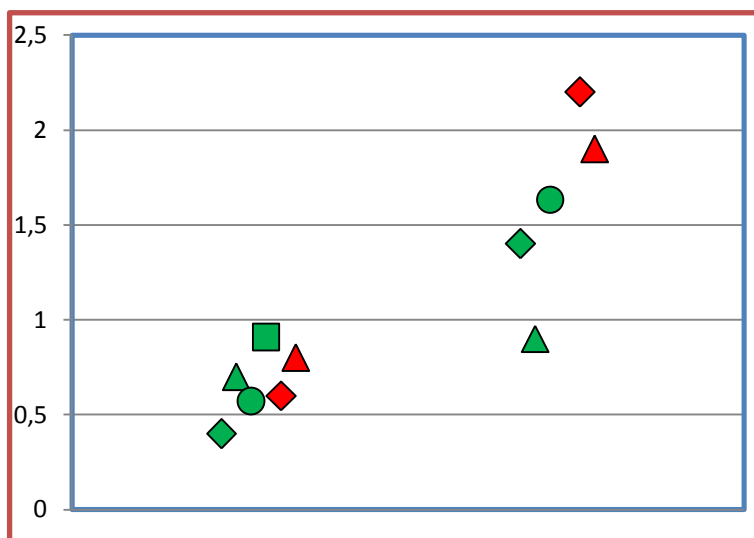
En el futuro cercano, los cambios en las temperatura media regional en el verano son ligeramente mayores a los del invierno y no muy distintos con los de la temperatura media

anual para los escenarios RCP y SRES en invierno, pero los modelos del escenario SRES A1B dan un enfriamiento en verano. Por lo que excepto para el verano valen las mismas consideraciones que se han hecho respecto de la certeza de las proyecciones.

En el futuro lejano, los cambios en general son ligeramente mayores en el invierno que en el verano y los rangos de variación entre modelos y escenarios es similar al de la temperatura media, por lo que otra vez las consideraciones sobre la certeza de las proyecciones son las mismas.



**Figura 8.6.1.4:** Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)



**Figura 8.6.1.5:** Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura media regional del invierno (junio, julio y agosto)

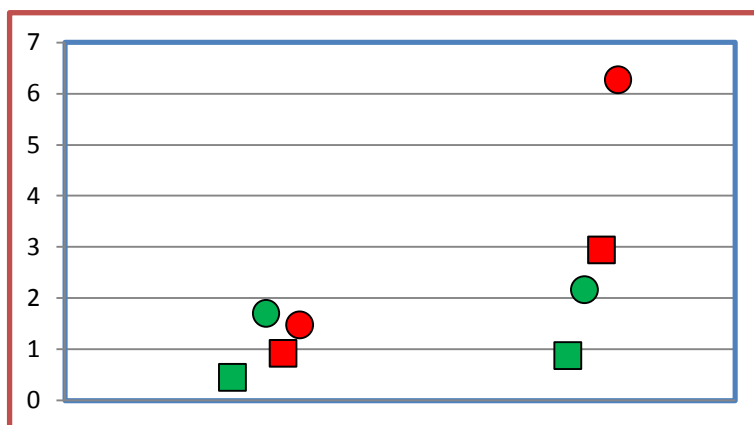
#### *Extremos térmicos*

Excepto en el caso de las heladas los promedios regionales de los otros 5 índices de extremos térmicos son consistentes con el calentamiento proyectado en todos los escenarios y modelos con los que en este estudio se construyeron los escenarios climáticos futuros, Figuras 8.4.1.1 y 8.6.1.7 a 8.6.1.11.

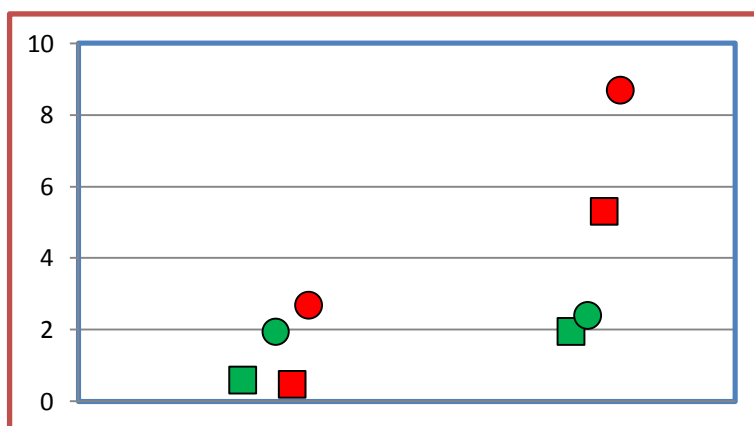
Las diferencias entre escenarios en el futuro cercano entre modelos y escenarios son muy pequeñas. Se podría estimar que el rango probable de aumento de días con heladas estaría entre 0 y 2 días y el número de noches tropicales casi no aumentaría ya que en esta región en promedio está y estaría casi siempre por debajo del valor que las define. El valor anual mínimo y máximo de la temperatura aumentarían entre 0,5 y de 1,5°C y el aumento en el porcentaje de días con temperatura extrema y de días con olas de calor serían en promedio consistentes con el calentamiento, pero pequeños. Debido al clima de la región y la forma en que se definen las olas de calor, su aumento carece de relevancia.

En el futuro lejano, las diferencias entre modelos son mayores que en el futuro cercano al igual que las diferencias entre escenarios. En conclusión, para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos térmicos en el futuro cercano es pequeña respecto del signo de los cambios y en cuanto a la magnitud de estos, en algunos casos está bastante acotada. En el caso del futuro lejano, hay bastante certeza respecto del signo de los cambios, pero en las magnitudes hay mucha dispersión entre modelos y escenarios de emisiones.

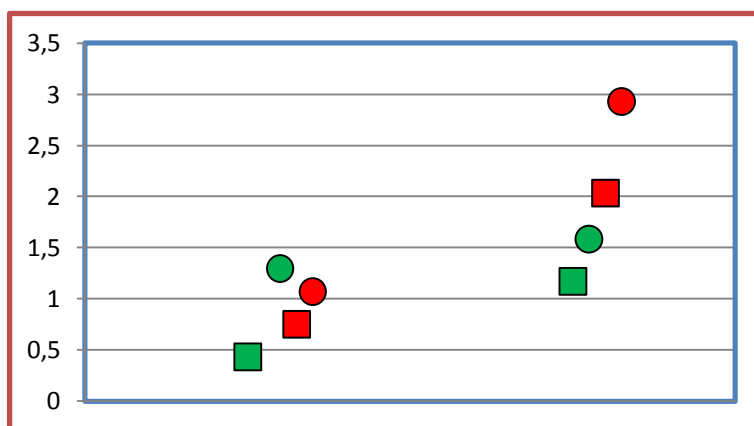




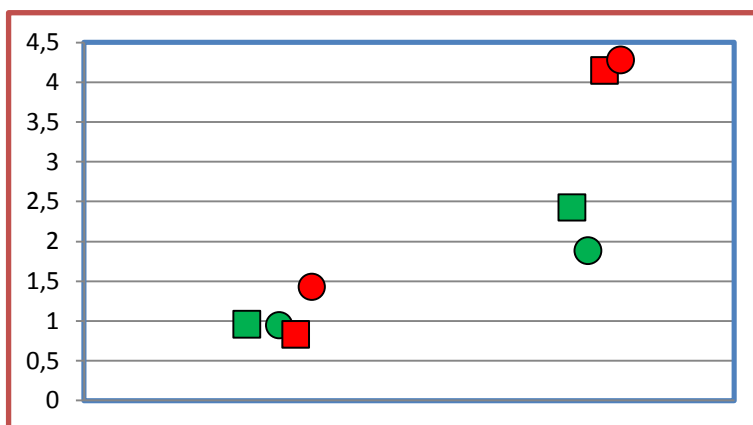
**Figura 8.6.1.6:** Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. CSIRO-Mk3-6-0 (cuadrados) y GFDL-ESM2G (círculos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo, RCP8.4



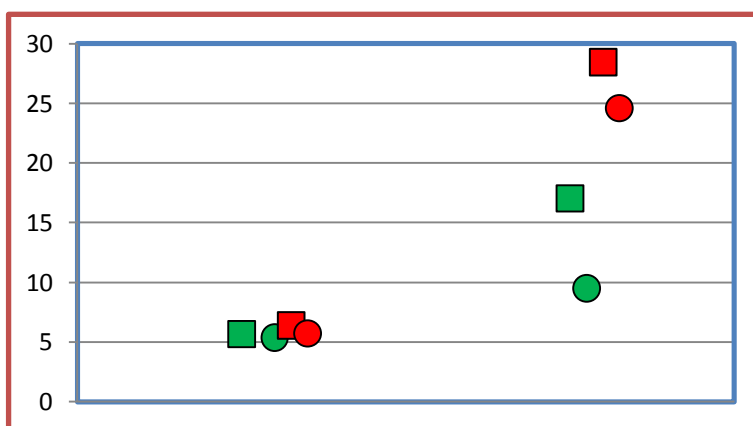
**Figura 8.6.1.7:** Ídem Figura 8.6.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año



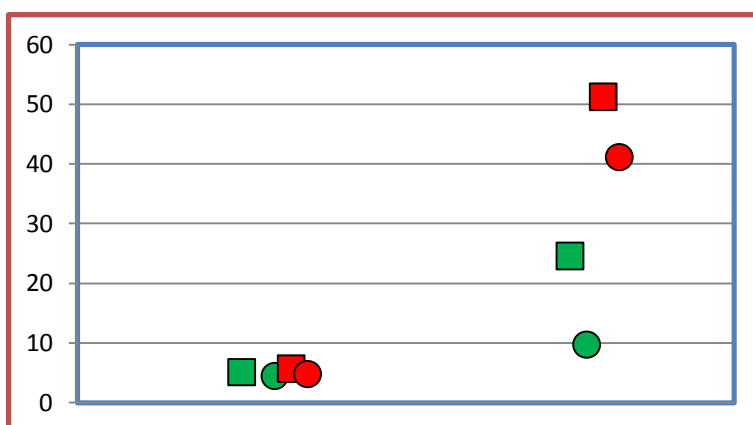
**Figura 8.6.1.8:** Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)



**Figura 8.6.1.9:** Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)



**Figura 8.6.1.10:** Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

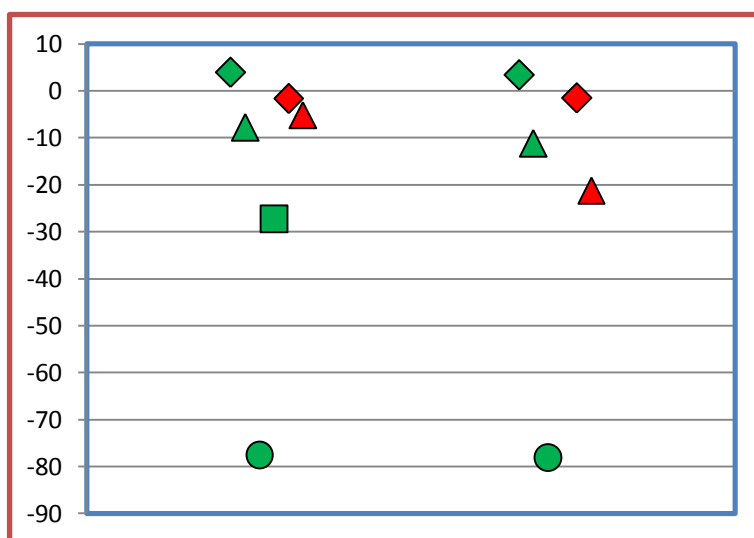


**Figura 8.6.1.11:** Ídem Figura 8.6.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

## 8.6.2 Precipitación

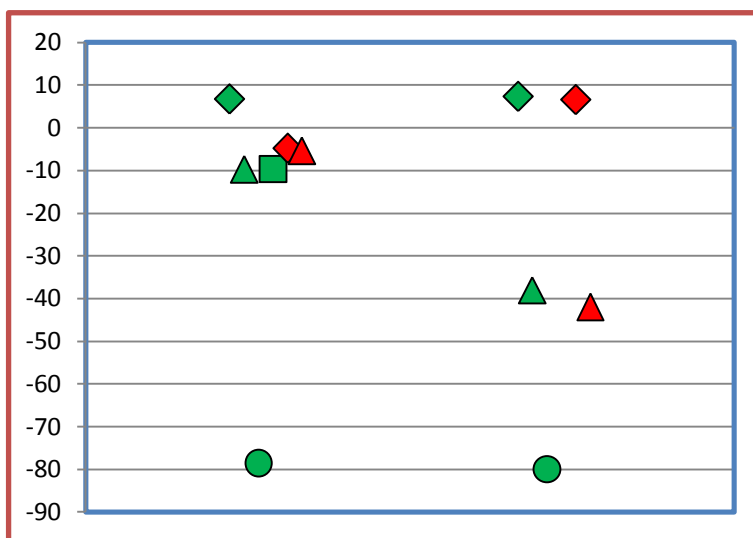
### *Precipitación media*

Los dos modelos con el escenario RCP4.5 muestran cambios porcentuales en la precipitación media regional de signo opuesto y en el RCP8.5 un cambio porcentual negativo, Figura 8.5.2.1. Los modelos con el escenario A1B proyectan cambios porcentuales negativos importantes, especialmente en el caso del modelo REMO-ECHAM5. Pero, como el promedio de la región es muy bajo, ello no representa cambios importantes en valor absoluto, excepto en la zona andina. Los cambios son muy semejantes en los dos horizontes temporales.

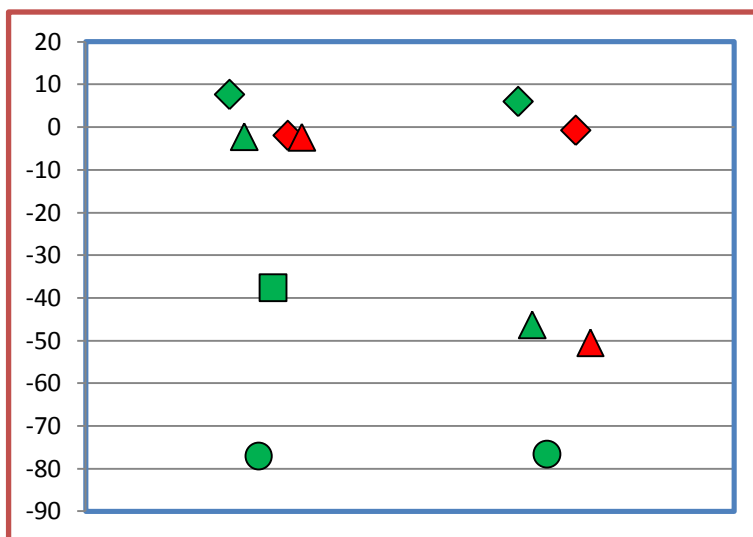


**Figura 8.6.2.1:** Diferencia proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099 En verde, escenarios RCP4.5 y SRES A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (triángulos), GFDL-ESM2G (rombos); REMO-ECHAM5 (círculos) y MM5-HadCM3 (cuadrado)

En el futuro cercano en la precipitación de verano los cambios porcentuales proyectados por estos dos modelos son muy pequeños, Figura 8.6.2.2, e irrelevantes en valor absoluto. En el caso del invierno, los cambios son similares al verano en el futuro cercano, pero porcentuales muy grandes en algunos casos en el futuro lejano, Figura 8.6.2.3, pero con gran dispersión, incluso en signo por lo que es poco lo que puede estimarse con alguna certeza hacia futuro.



**Figura 8.6.2.2:** *Idem8.6.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

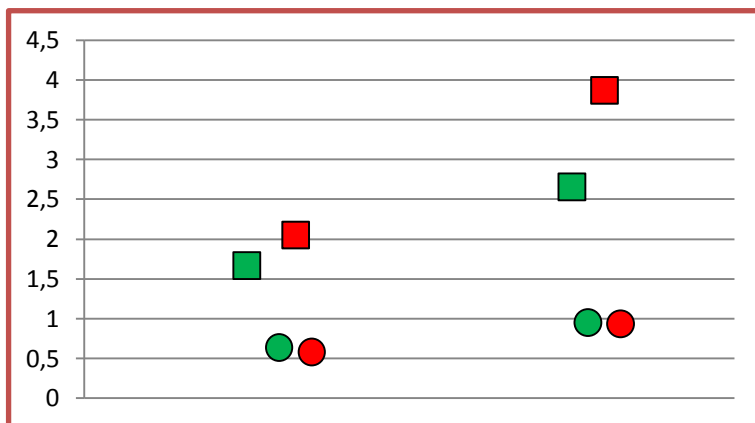


**Figura 8.6.2.3:** *Idem8.6.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

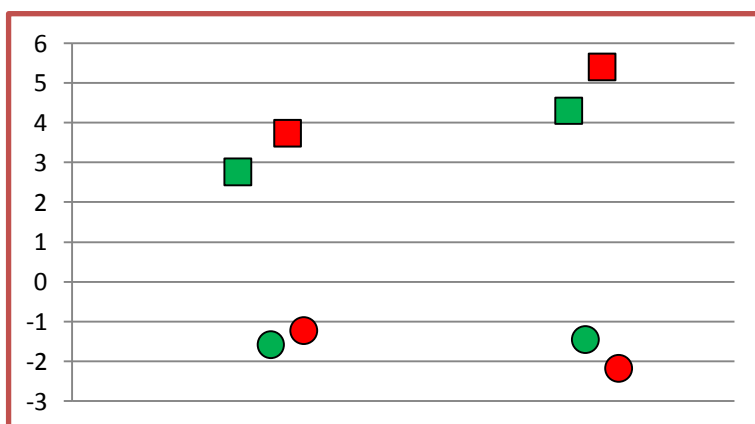
#### *Precipitaciones extremas*

Las diferencias en los cambios de los promedios regionales de los índices de precipitaciones extremas entre los distintos escenarios, modelos y horizontes temporales son casi siempre pequeñas, especialmente si se considera su valor absoluto, Figuras 8.6.2.4 a 8.6.2.6, e incluso sus rangos abarcan cambios con signos opuestos. La excepción es la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa que en un modelo en los dos escenarios de fin de siglo aumentaría en más de 30mm.

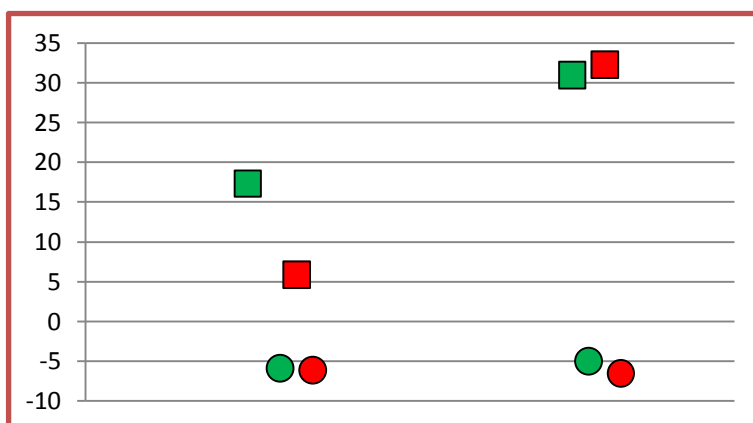
Sobre el cambio en el número máximo anual de días consecutivos secos, todos los casos indican un aumento, que de todos modos sería poco relevante frente al valor actual, Figura 8.6.2.7.



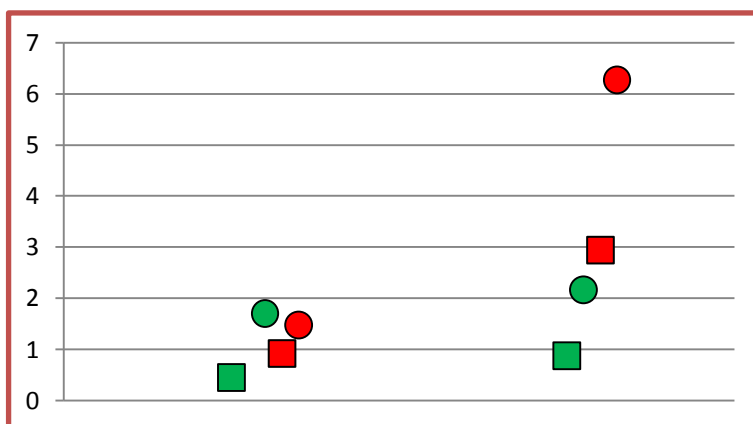
**Figura 8.6.2.4:** Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (cuadrados) y GFDL (círculos) A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.4



**Figura 8.6.2.5:** Ídem Figura 8.6.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)



**Figura 8.6.2.6:** Ídem Figura 8.6.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)



**Figura 8.6.2.7:** Ídem Figura 8.6.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

## 8.7 CONCLUSIONES

En la Patagonia las series con datos meteorológicos completas en periodos que abarcan 4 o más décadas son pocas y muy dispersas en un enorme territorio. Este es un factor que debe evaluarse al considerar estos resultados, en particular en la escala local lejos de lugares con datos climáticos de largo plazo. En el caso de la temperatura en el oeste de la región se han podido confirmar las tendencias de la temperatura mediante la inferencia del calentamiento por el retroceso de los glaciares (Skvarka 2006).

La región Patagónica no tuvo cambios de largo plazo relevantes en la precipitación media, excepto un descenso pronunciado en la zona cordillerana norte y central, pero si una gran variabilidad interanual. Por otro lado, la temperatura aumentó en forma estadísticamente significativa en sus valores medios en el centro de la región entre 0,5°C y 1°C en el periodo 1960-2010 y 0,4°C en promedio para toda la Patagonia. Excepto en Tierra del Fuego, donde



la temperatura mínima aumento más que la máxima, en el resto de las provincias, ambas temperaturas han aumentado en forma similar con pocas diferencias en algunas zonas; en particular la temperatura máxima descendió levemente en el noreste de Río Negro y en la franja cordillerana. (*Confianza alta*)

En el futuro cercano se proyecta para toda la Patagonia un calentamiento moderado de 0,5 a 1°C, que en escenario RCP4.5 es menor a 0,5°C en el sur de la región mientras que en el futuro lejano habría un máximo de calentamiento a lo largo del centro de la Patagonia hasta el norte de Santa Cruz con valores entre 2,5 y 3 °C y con menos calentamiento sobre la cordillera y la costa. A diferencia de otras regiones más continentales, el calentamiento en las temperaturas mínima y máxima no sería muy distinto. (*Confianza alta en el signo del cambio, confianza media-baja en su cuantificación*)

En casi toda la región, los 6 índices de extremos térmicos estudiados en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento proyectado. Los días con heladas se reducirían sustancialmente en más de 10 días en casi toda la región y las temperaturas máximas y mínimas del año aumentarían en toda la región en forma creciente con el tiempo. (*Confianza alta en el signo del cambio, confianza media-baja en su cuantificación*)

La precipitación en el siglo XXI proyectada por el limitado conjunto de modelos disponibles, tendría muy pequeñas reducciones (*Confianza baja*). Solo en la cordillera y en la zona muy próxima a la misma, tendrían alguna relevancia y podrían tener consecuencias desfavorables para la generación de electricidad. El promedio de las proyecciones indica que la Patagonia compartiría con el resto del país la tendencia al aumento en las precipitaciones intensas (*Confianza media*), aunque la cuantificación de tal cambio por los modelos disponibles presenta una gran dispersión.

En la Península Antártica e islas del Atlántico Sur, la temperatura ha experimentado una tendencia positiva en las últimas décadas (*Confianza alta*). Este calentamiento ha impactado tanto en la masa de hielo continental como en las barreras de hielo sobre los mares circundantes que han experimentado pérdidas de masa llegando en algunos casos a su colapso. Este calentamiento seguiría a lo largo del siglo XXI en todos los escenarios probables (*Confianza alta*). Hacia fin del siglo, en el escenario RCP2.6, de gran reducción de emisiones, la Península Antártica se calentaría cerca de 1°C y en el escenario extremo RCP8.5 entre 3 y 5°C (IPCC 2013b).

## Referencias

Aravena, J. y B. Luckman, 2009: Space-temporal rainfall patterns in Southern South America. *Int. J. Climatol.* **29**, 2106–2120.

Bockheim, J., G. Vieira, M. Ramos, J. López-Martínez, E. Serrano, M. Guglielmin y A. Nieuwendam, 2013: Climate warming and permafrost dynamics in the antarctic peninsula region. *Global and Planetary Change*, **100**, 215–223.



Costa, A. J. y E. Agosta, 2012: South pacific quasi-stationary waves and anomalously cold summers in the northernmost antarctic peninsula. *Geoacta*, **37(2)**: 73–82.

Garreaud, R., P. Lopez, M. Minvielle y M. Rojas, 2013: Large-scale control on the patagonian climate. *J. Climate*, **26(1)**, 215–230.

Haylock, M. R., T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. Anunciação, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. Garcia, A. M. Grimm, R. Jaido dos Anjos, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. Molion, D. F. Moncunill, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. L. Santos, L. Trebejo y L. Vincent, 2006: Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *J. Climate*, **19**, 1490–1512.

IPCC, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pag.

IPCC, 2013b: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mitchell, T. D. y P. D. Jones, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids'. *Int. J. Climatol.*, **25**, 693–712.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2004: Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, **17**, 4099–4107.

Seoane, R. y P. López 2006: Capítulo 4.1 en Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Estudio habilitante para la Segunda Comunicación Nacional a la UNFCCC. SAYDS-Fundación e Instituto T. Di Tella, Buenos Aires. Pag. 89-96.

Schneider, U., T. Fuchs, A. Meyer-Christoffer y B. Rudolf, 2008: Global precipitation analysis products of the GPCC, Deutscher Wetterdienst: Offenbach, Germany, Disponible en: <http://gpcc.dwd.de>.



Skvarka, P., 2006: En Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Estudio base para la Segunda Comunicación Nacional a la UNFCCC. Fundación e Instituto T. Di Tella, Buenos Aires, 129–146.

Turner, J., S. Colwell, G. Marshall, T. Lachlan-Cope, A. Carleton, P. D. Jones, V. Lagun, P. Reide y S. Iagovkina, 2005: Antarctic climate change during the last 50 years, *Int. J. Climatol.* **25**, 279–294.

Vaughan D. G., G. Marshall, W. Connolley, C. Parkinson, R. Mulvaney, D. Hodgson, J. King, C. Pudsey y J. Turner, 2003: Recent rapid regional climate warming on the Antarctic peninsula, *Climatic Change*, **60**, 243–274.

Vera, C. e I. Camilloni, 2006: Capítulo 3.2 en Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las provincias de Buenos Aires y La Pampa. Estudio habilitante para la Segunda Comunicación Nacional a la UNFCCC. SAyDS-Fundación e Instituto T. Di Tella, Buenos Aires. Pag. 54-88.

Zazulie, N., M. Rusticucci y S. Solomon, 2010: Changes in Antarctic Climate: A Unique Daily Record at Orcadas spanning 1903-2008. *J. Climate*, **23** 189–196.