



CAPITULO 8

CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN PATAGONIA, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLANTICO SUR

8.1	INTRODUCCIÓN	pág. 280
8.1.1	Dominio espacial y datos	pág. 280
8.2	CAMBIOS Y TENDENCIAS	pág. 281
8.2.1	Temperatura	pág. 281
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 281
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 286
8.2.2	Precipitación	
	<i>Precipitaciones medias</i>	pág. 288
	<i>Extremos de precipitación</i>	pág. 295
8.3	REGIÓN ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLÁNTICO SUR	pág. 297
8.4	VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES	pág. 300
8.4.1	Temperatura	pág. 300
8.4.2	Precipitación	pág. 304
8.5	ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)	pág. 308
8.5.1	Temperatura	pág. 308
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 309
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 314
8.5.2	Precipitación	pág. 322
	<i>Precipitación media</i>	pág. 322
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 324
8.6	EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	pág. 328
8.6.1	Temperatura	pág. 329
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 329
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 332
8.6.2	Precipitación	pág. 335
	<i>Precipitación media</i>	pág. 335
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 336
8.7	CONCLUSIONES	pág. 338
	Referencias	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.

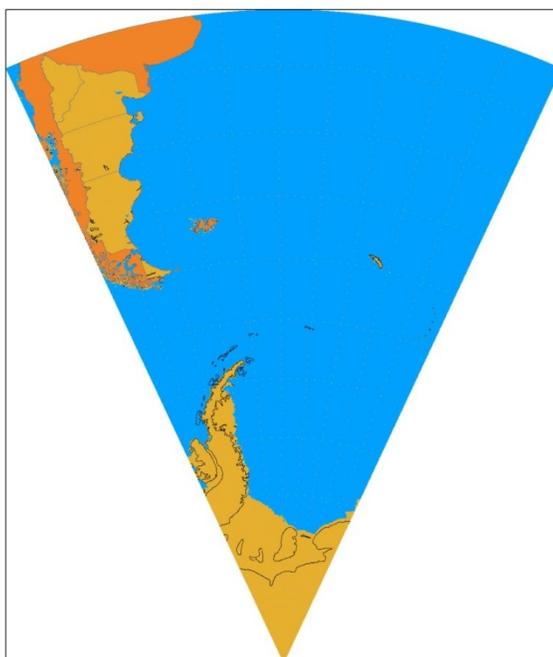


Figura 8.1: *En marrón claro, la región de este capítulo*

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

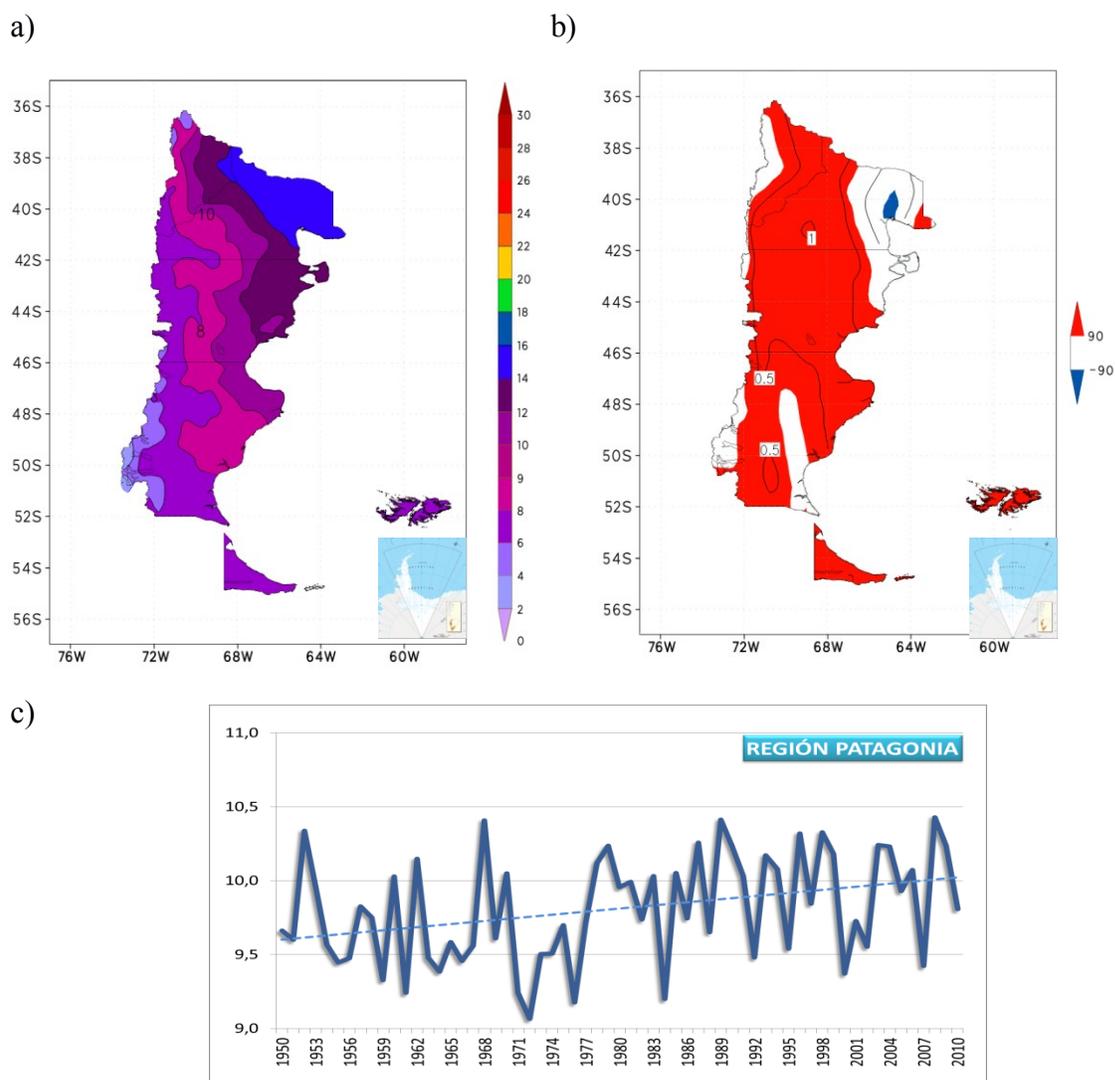
Temperaturas medias

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%.

		TEMPERATURA MEDIA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
TIERRA del FUEGO	<i>Medio</i>	8,8	5,3	1,1	5,1	5,1
	<i>Cambio</i>	0,8**	0,8**	0,7**	0,2	0,6**
SANTA CRUZ	<i>Medio</i>	13,2	7,6	1,9	8,1	7,7
	<i>Cambio</i>	0,9**	0,6**	0,3	0,3	0,5**
CHUBUT	<i>Medio</i>	16,0	10,2	4,0	10,1	10,1
	<i>Cambio</i>	1,0**	0,4	0,5	0,4	0,7**
RÍO NEGRO NEUQUÉN	<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
REGION PATAGONIA	<i>Medio</i>	15,9	9,8	3,6	10,0	9,8
	<i>Cambio</i>	0,8**	0,3	0,3	0,4	0,4**

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 Neuquén	Región Patagonia
CAMBIO	0,6**	0,5**	0,6**	0,4	0,4**

Figura 8.2.1.1: a) temperatura media anual (°C), b) cambio de la temperatura media anual entre 1960 y 2010 (°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°C (confianza alta) en casi toda la región. Estos aumentos son principalmente mayores en verano con hasta 1,2°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.

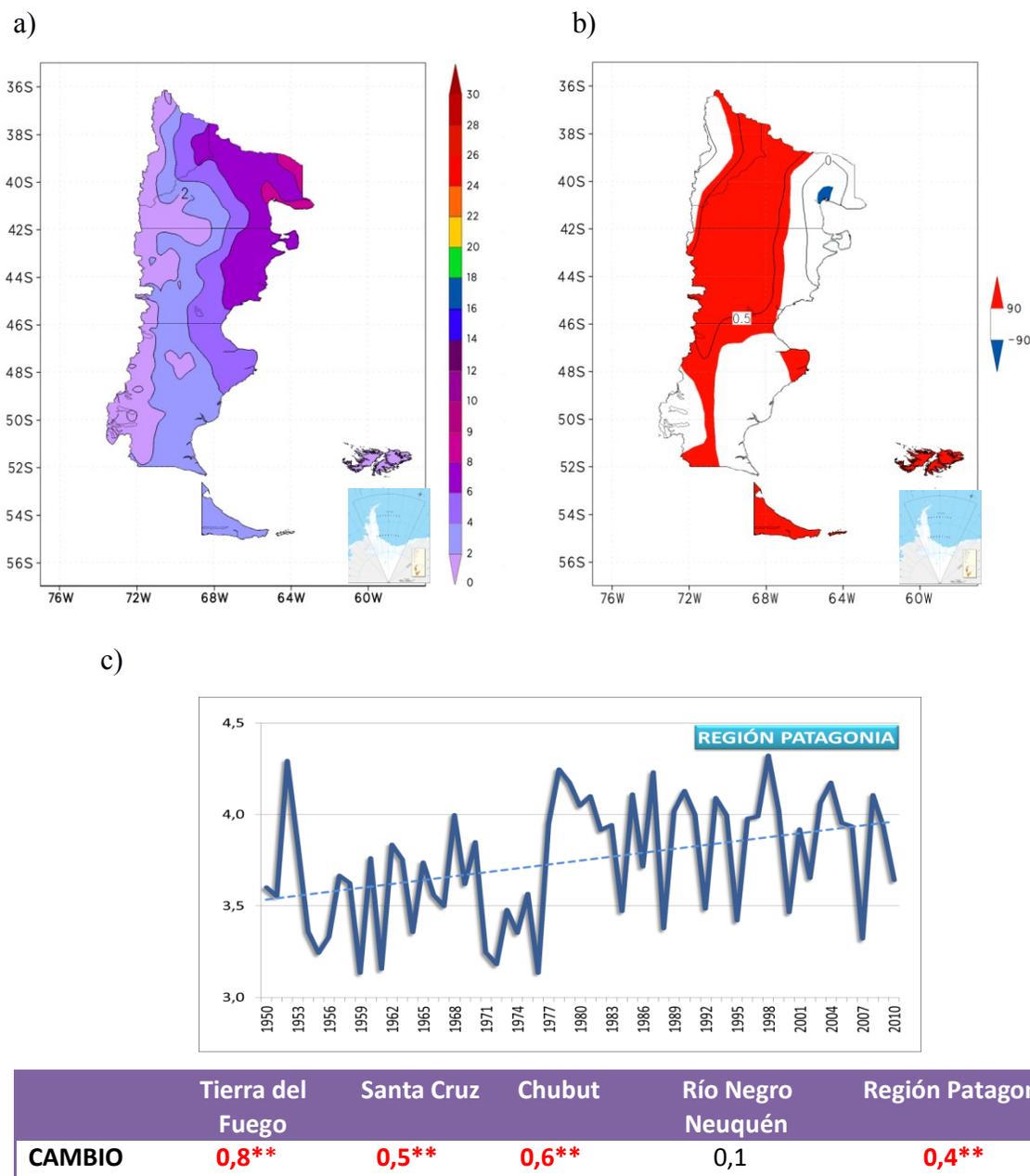


Figura 8.2.1.2: Ídem Figura 8.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)

TEMPERATURA MÍNIMA 1950-2010				
DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL

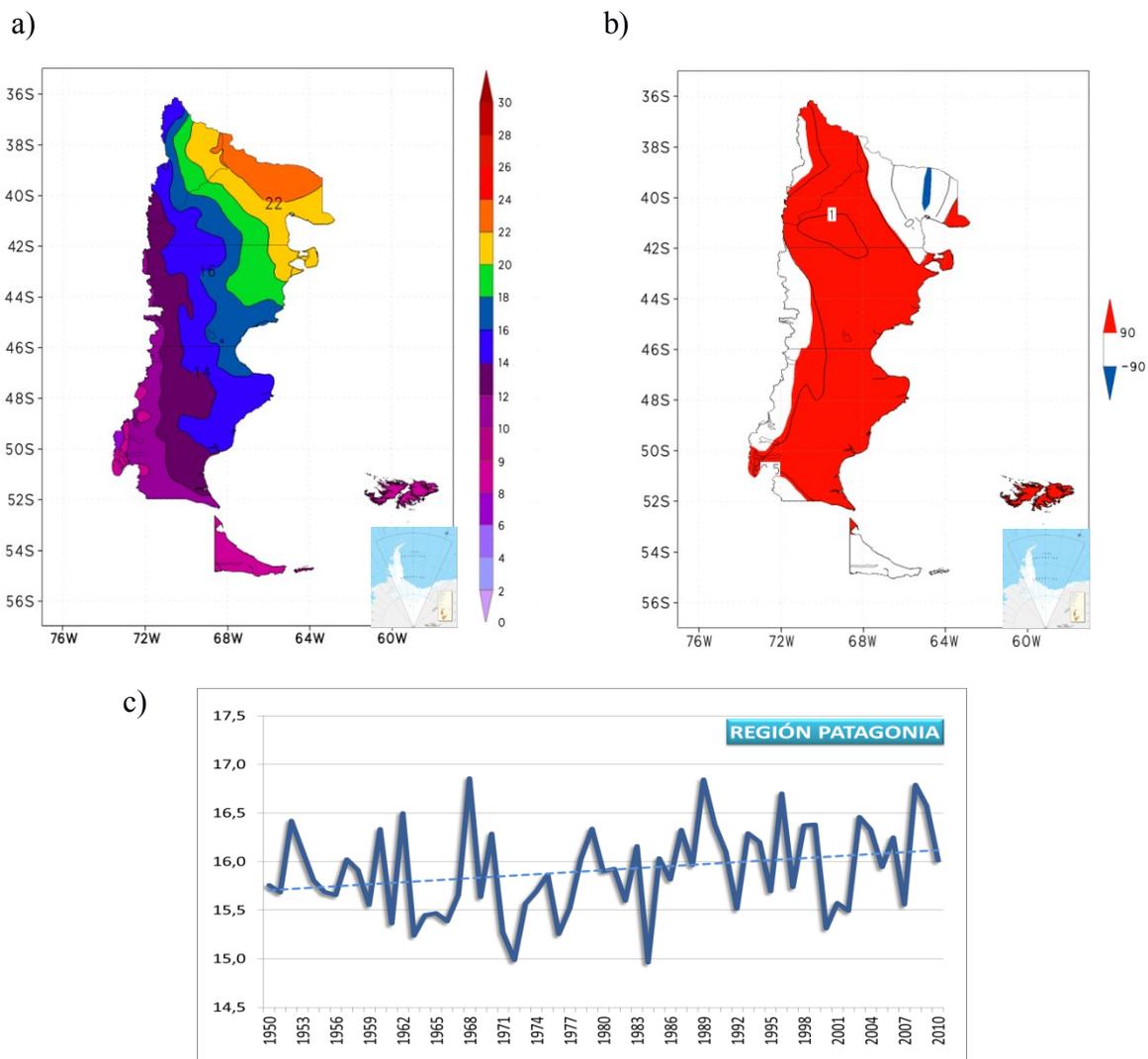


TIERRA del FUEGO	Medio	4,7	1,9	-1,7	1,2	1,5
	Cambio	0,8**	1,0**	0,9**	0,3	0,8**
SANTA CRUZ	Medio	7,4	2,6	-2,1	2,5	2,6
	Cambio	0,9**	0,5**	0,1	0,3	0,5**
CHUBUT	Medio	9,1	4,3	-0,8	3,7	4,1
	Cambio	1,0**	0,4*	0,4	0,5*	0,6**
RÍO NEGRO NEUQUÉN	Medio	10,4	4,5	-0,8	4,5	4,7
	Cambio	0,5	0,0	0,2	0,3	0,3
REGION PATAGONIA	Medio	8,9	3,8	-1,2	3,5	3,7
	Cambio	0,8**	0,3	0,3	0,4*	0,4**

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 Neuquén	Región Patagonia
CAMBIO	0,5*	0,6**	0,5**	0,3	0,4**

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
TIERRA del FUEGO	Medio	12,9	8,8	4,0	9,0	8,7
	Cambio	0,7	0,5	0,5	0,1	0,5*
SANTA CRUZ	Medio	19,0	12,5	5,8	13,8	12,8
	Cambio	0,9**	0,6**	0,4	0,4	0,6**
CHUBUT	Medio	23,0	16,2	8,8	16,5	16,1
	Cambio	0,9**	0,3	0,5	0,3	0,5**
RÍO NEGRO NEUQUÉN	Medio	27,0	18,9	10,9	19,5	19,1
	Cambio	0,5	-0,2	0,2	0,4	0,3
REGION PATAGONIA	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 $-21,1^{\circ}\text{C}$.

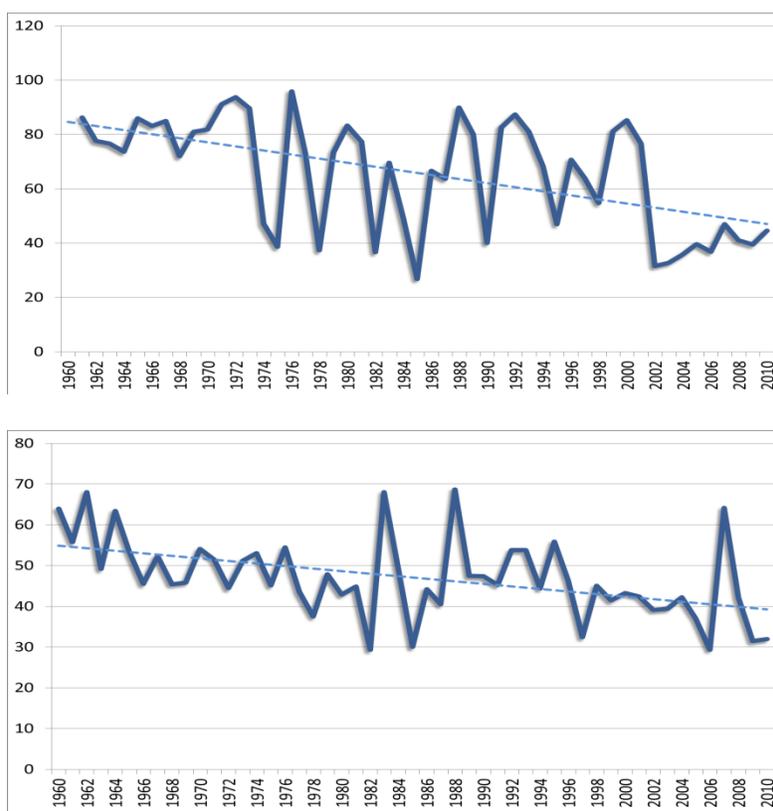


Figura 8.2.1.4: Índice de días con heladas para dos puntos de retícula, panel superior en 42,5°S, 71,25°W y panel inferior en 40°S, 67,5°W entre 1960 y 2010

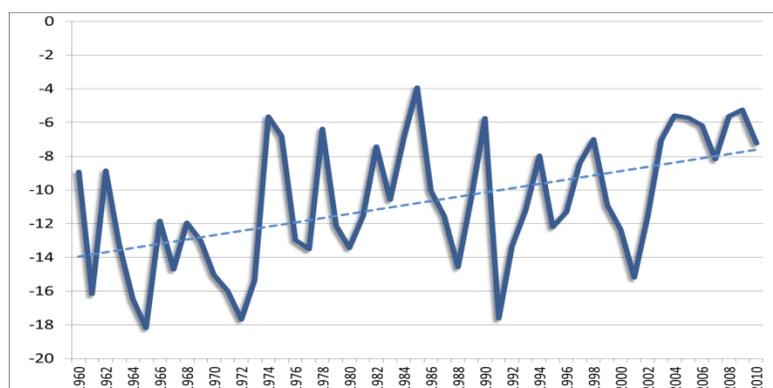


Figura 8.2.1.5: Mínimo valor anual de la temperatura mínima Tn para un punto de retícula ubicado en 42.5 °S y 71.25 W

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.

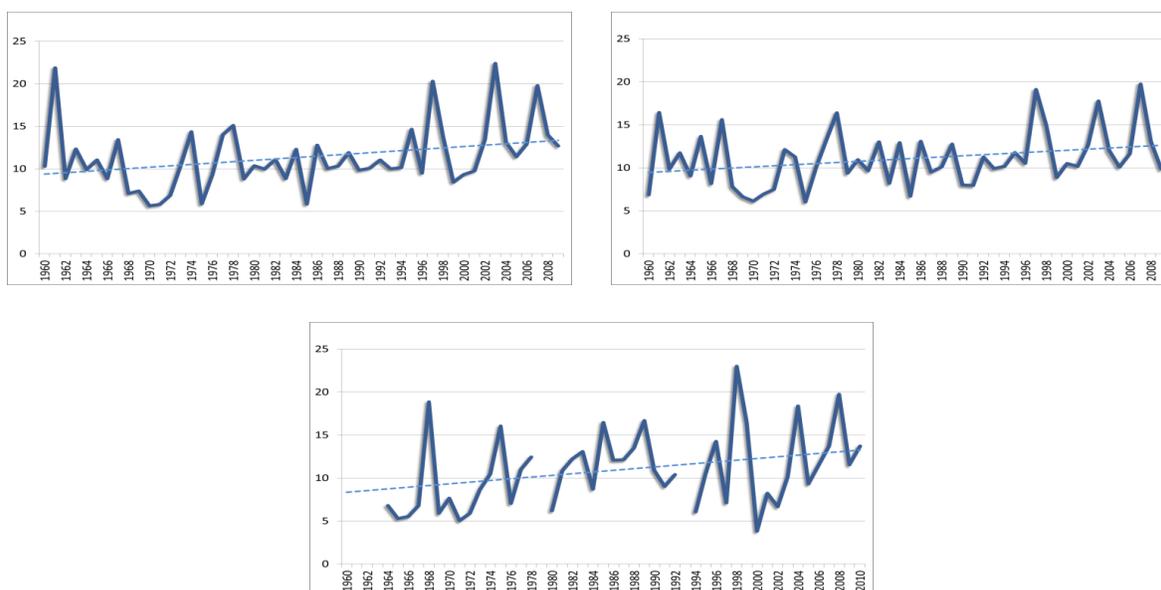


Figura 8.2.1.6: Índice TX90 entre 1860 y 2010. En el panel superior, dos puntos de retícula (52.5°S , 71.25°W y 50°S , 71.25°W) y en el de abajo, Río Gallegos

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.

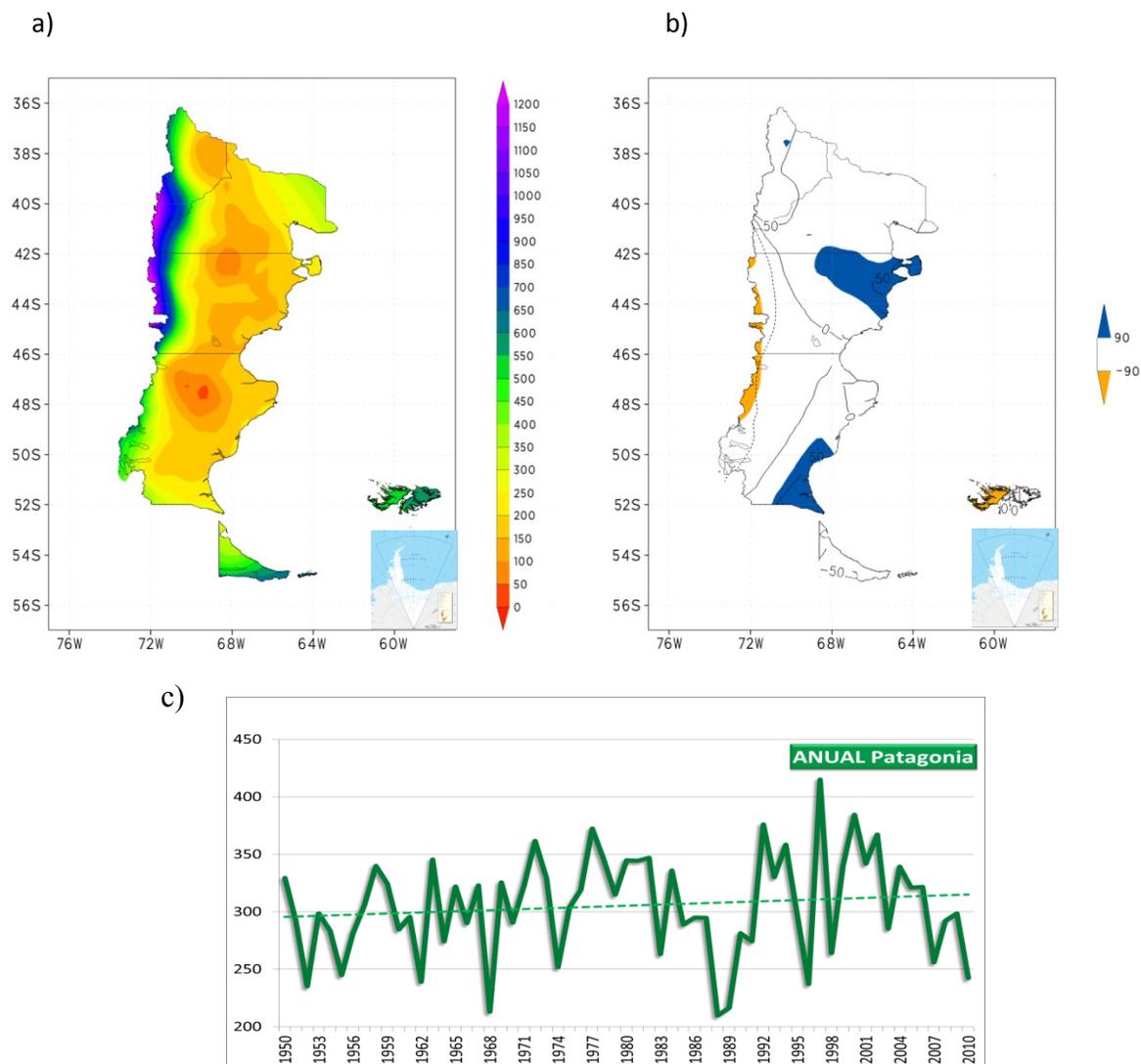
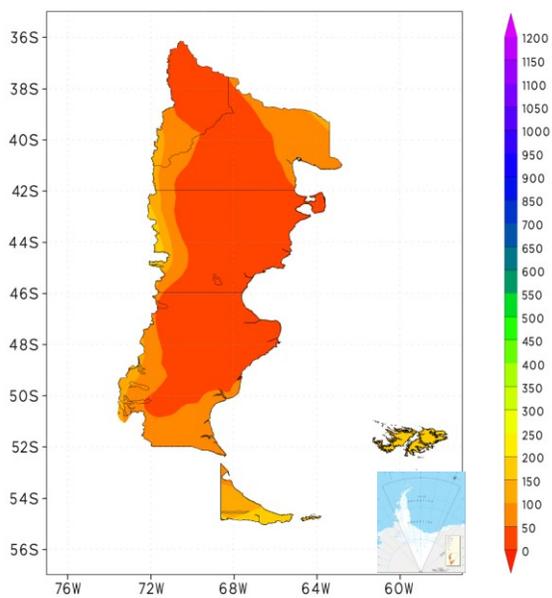
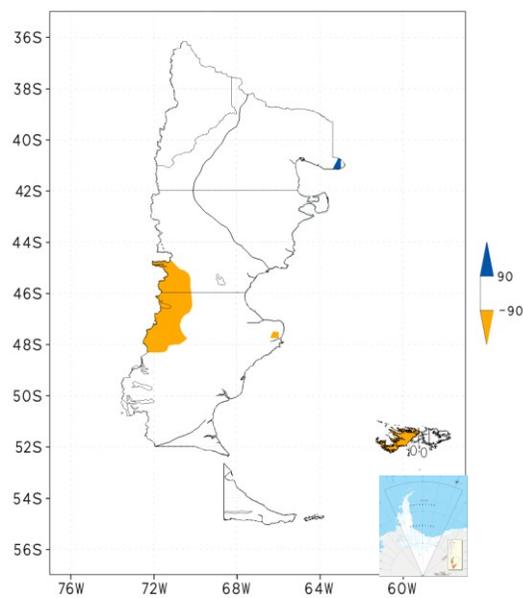


Figura 8.2.2.1: Precipitación total anual media período 1960-2010 (mm). Cambio de precipitación total anual según una tendencia lineal entre 1960 y 2010 y serie temporal 1950-2010 del total anual de precipitación para toda la región (mm)

a)



b)



c)

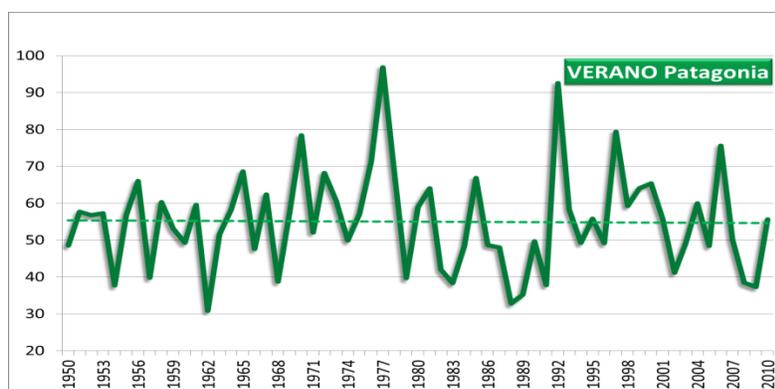


Figura 8.2.2.2: Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el verano

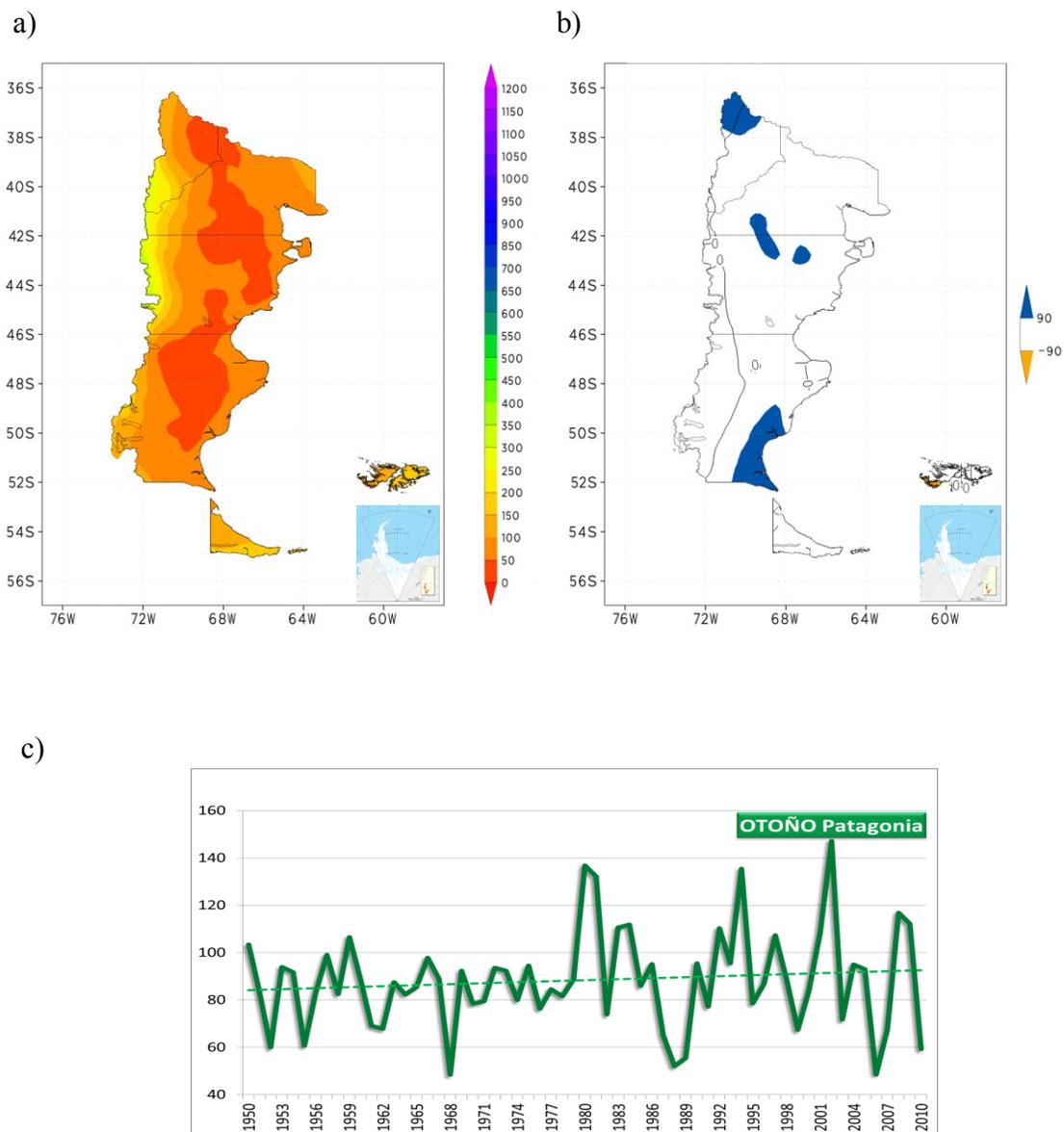
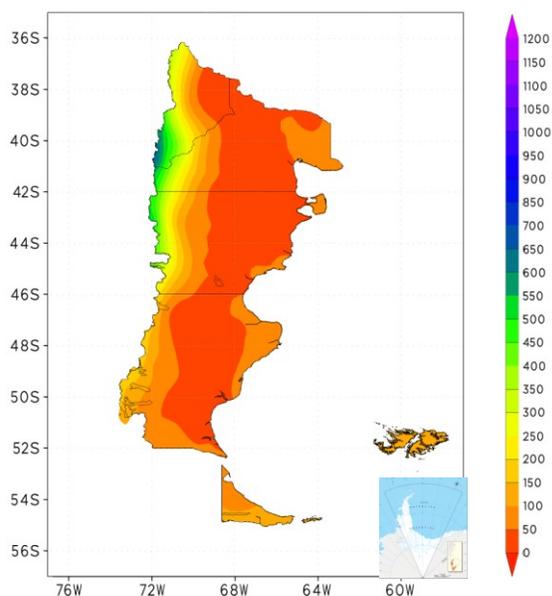
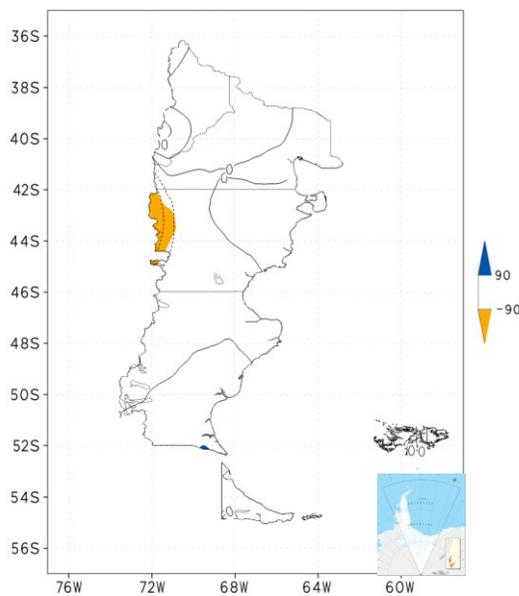


Figura 8.2.2.3: Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el otoño

a)



b)



c)

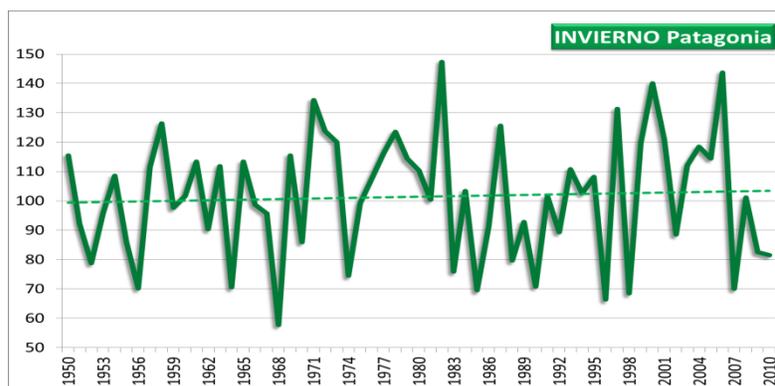


Figura 8.2.2.4: Ídem Figura 8.2.2.1, pero para el invierno

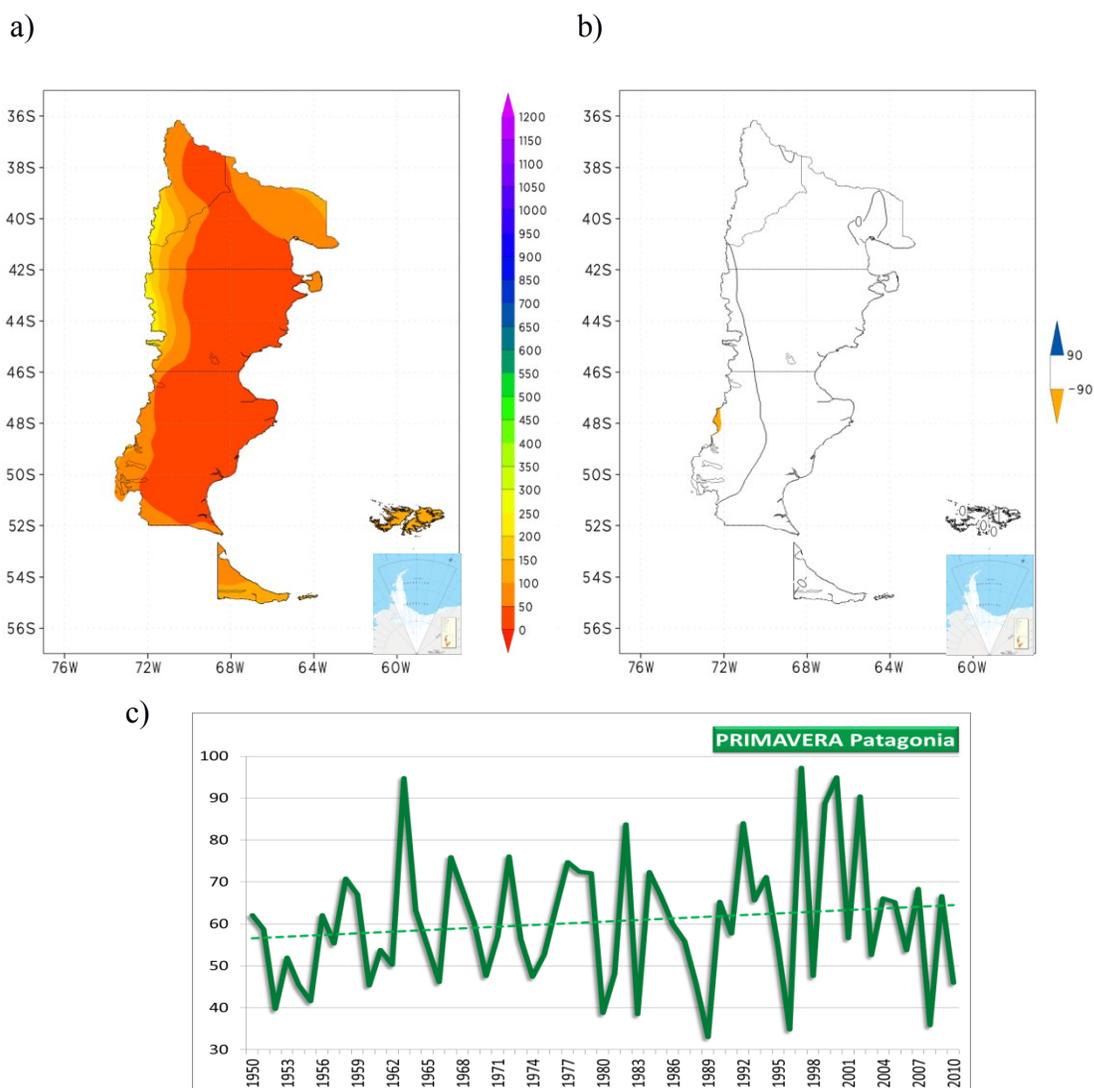


Figura 8.2.2.5: Ídem Figura 8.2.2.1, pero para la primavera

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.



		PRECIPITACIÓN MEDIA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
TIERRA del FUEGO	Medio	132,4	130,3	98,4	105,2	466,3
	Cambio	-4,3	9,1	8,1	-1,9	10,9
SANTA CRUZ	Medio	50,2	66,6	63,4	40,4	220,6
	Cambio	-6,4	2,2	2,7	5,9	4,4
CHUBUT	Medio	50,9	96,7	108,6	59,0	315,3
	Cambio	-2,2	11,6	-8,3	9,0	10,1
RÍO NEGRO NEUQUÉN	Medio	53,3	95,0	127,0	72,9	348,2
	Cambio	5,4	11,6	13,9	10,1	40,9
REGION PATAGONIA	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.

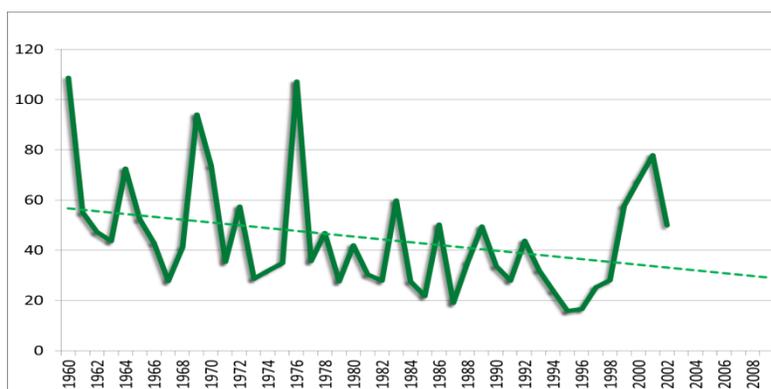


Figura 8.2.2.6: Máximo valor de precipitación en un día (RIX) en la cuadrícula centrada en 42.5°S, 71.25°W

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.

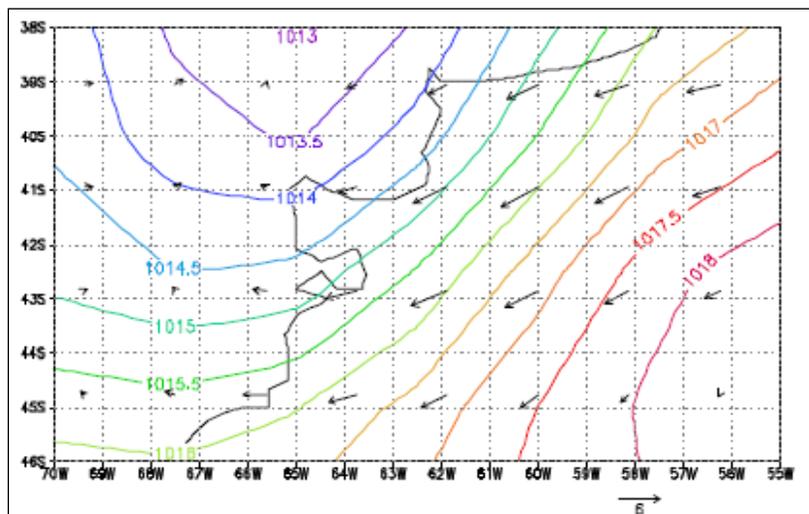


Figura 8.2.2.7: Promedio de la presión a nivel del mar y viento a 10 m (media diaria) para 24 eventos de precipitaciones superiores a 20mm diarios en la ciudad de Puerto Madryn

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.

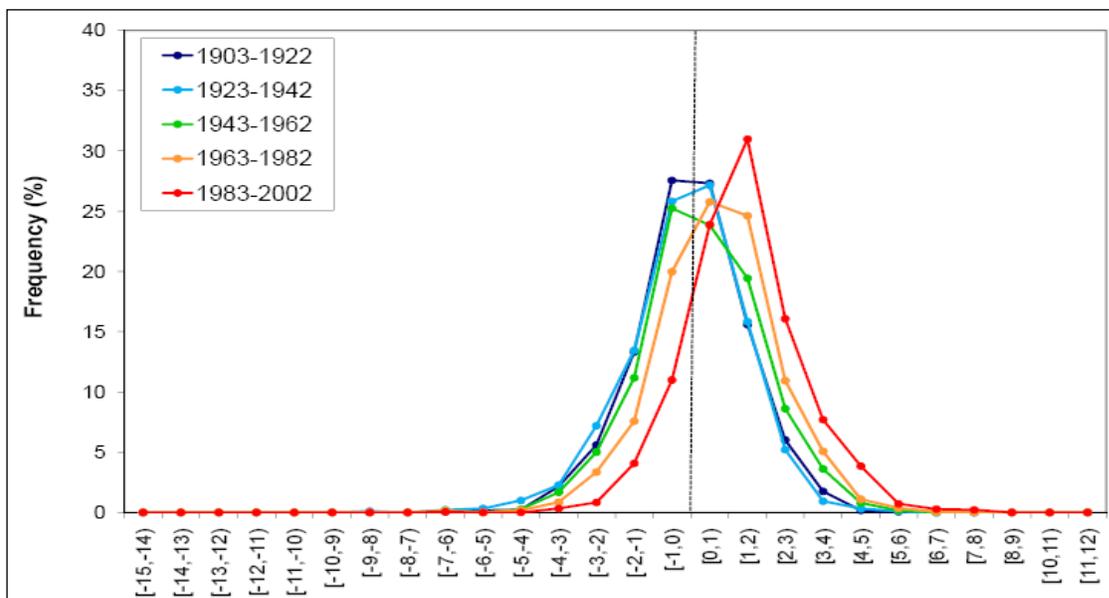


Figura 8.3.1: Frecuencia porcentual de ocurrencia de temperatura media diaria para distintos períodos sucesivos de 20 años, estación Orcadas



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°C o por debajo de -2°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°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°C), Figura 8.3.2.

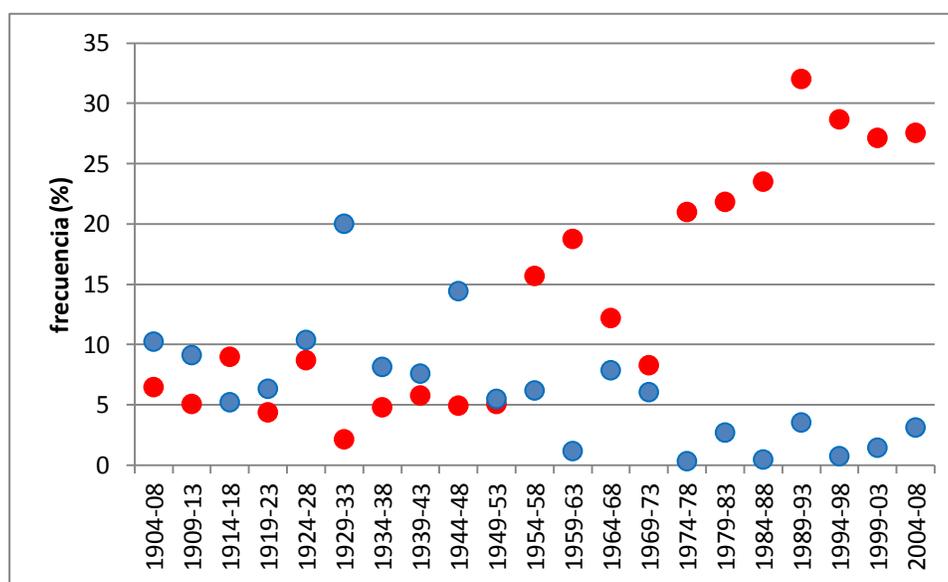


Figura 8.3.2: Frecuencia porcentual de ocurrencia de valores de Temperatura diaria $>2^{\circ}\text{C}$ (rojo) y $<-2^{\circ}\text{C}$ (azul) para cada quinquenio comenzando en 1904-2008, verano, estación Orcadas

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°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 $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $0,3^{\circ}\text{C}$ por década.

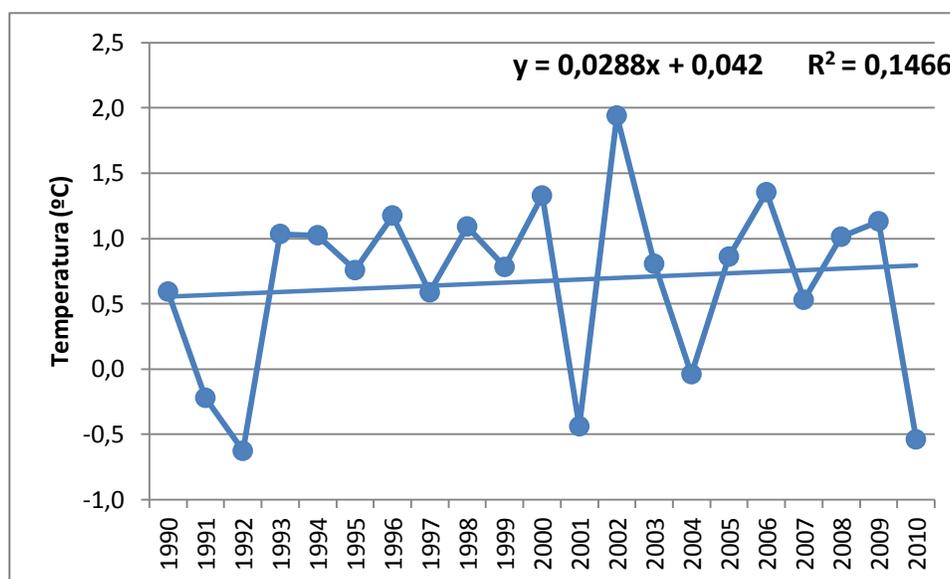


Figura 8.3.3: *Temperatura media de verano promedio de tres estaciones antárticas*

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°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).

8.4 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 °C y solo en el noroeste de la región hay una franja donde se encuentra entre 0,25 y 0,5 °C, Figura 8.4.1.

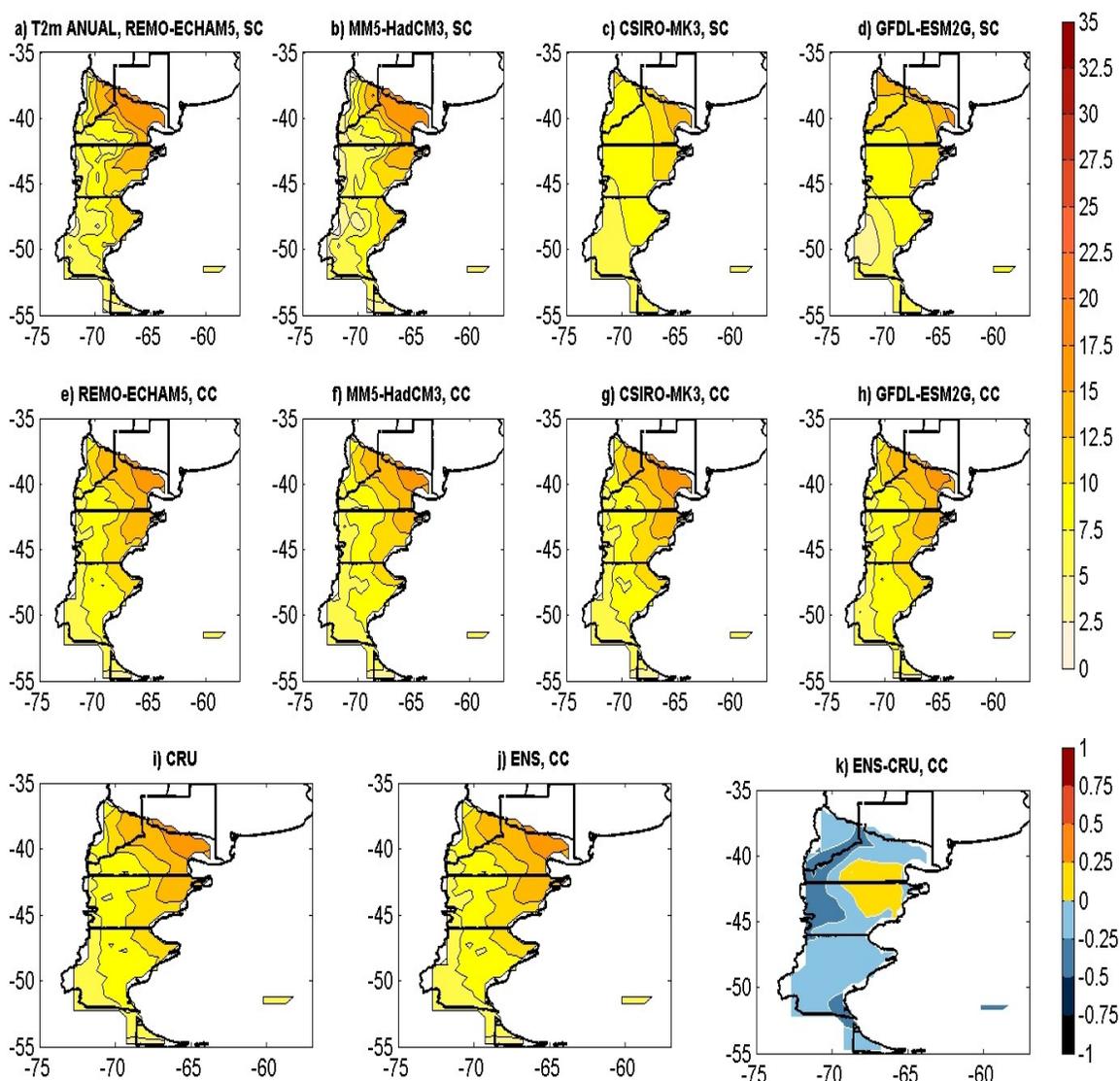


Figura 8.4.1: Validación de la temperatura media anual para la región Patagonia. 1976/1990. Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección, Panel inferior, valores observados 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°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.

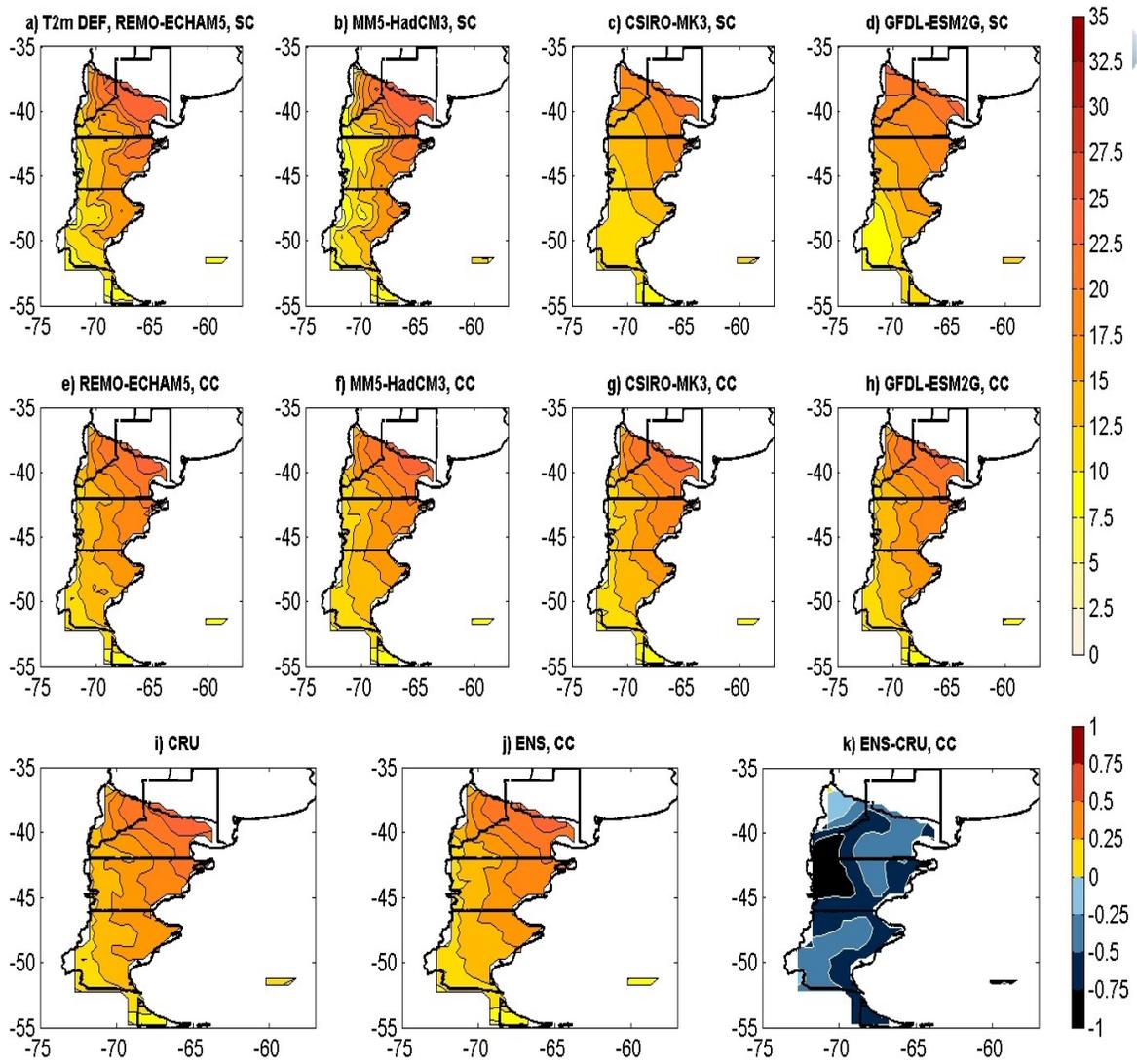


Figura 8.4.2: Ídem Figura 8.4.1 pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)

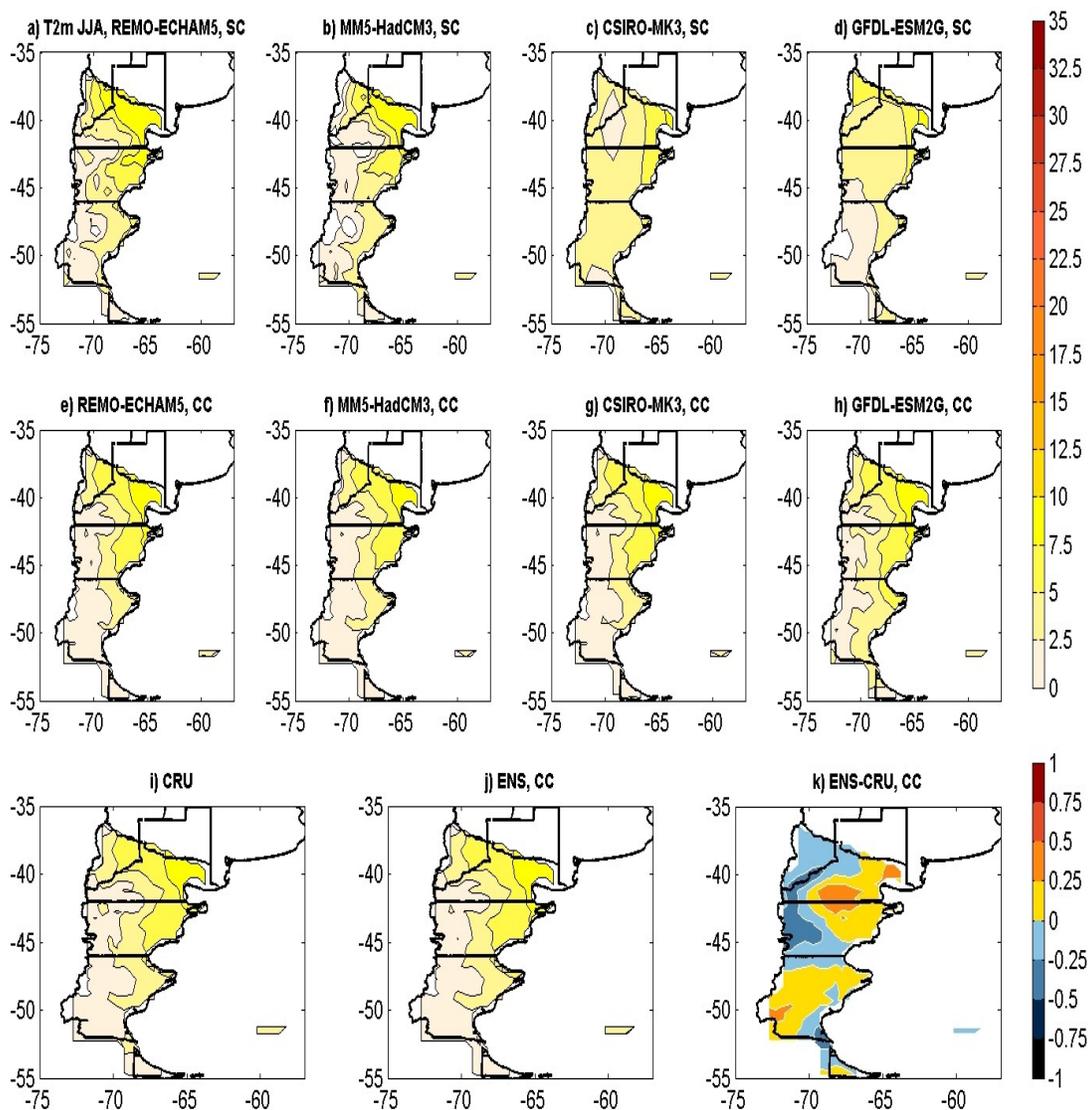


Figura 8.4.3: Ídem Figura 8.4.1 pero para la temperatura del invierno (junio, julio y agosto)

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.

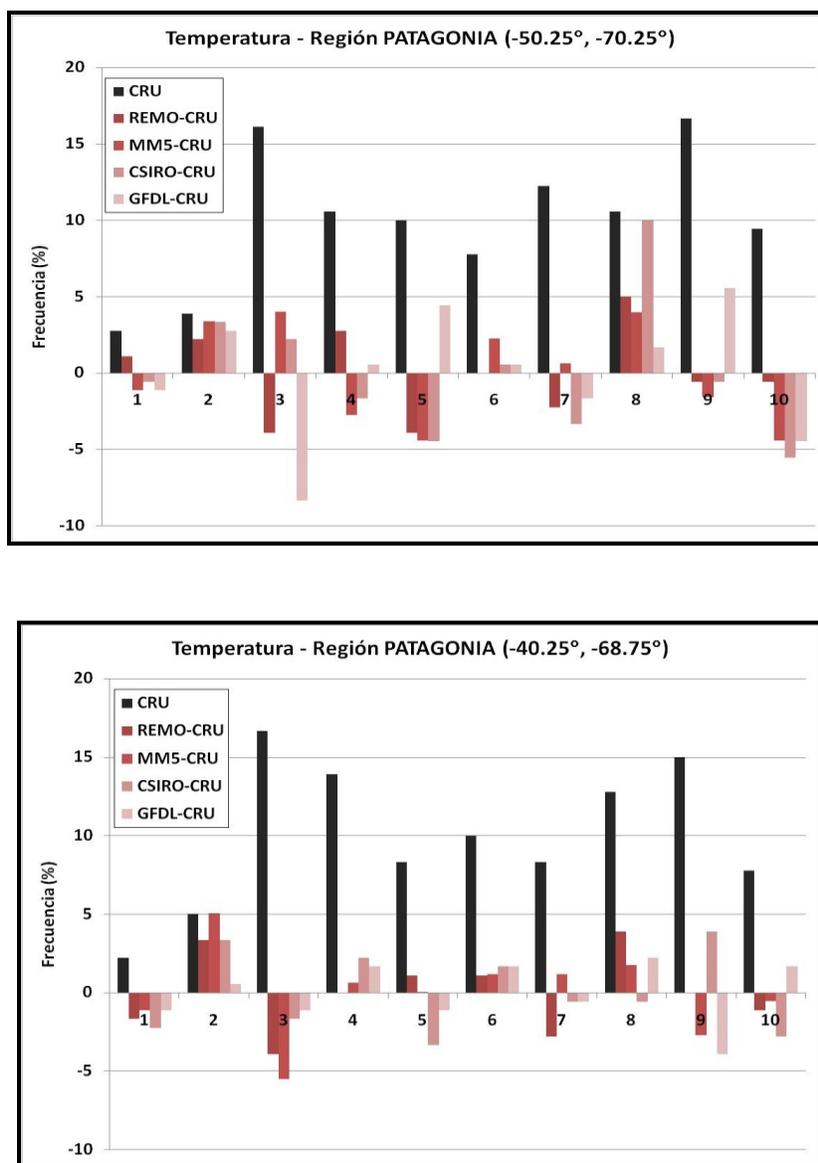


Figura 8.4.4: Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Patagonia. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa el rango de los valores observados dividido en 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.

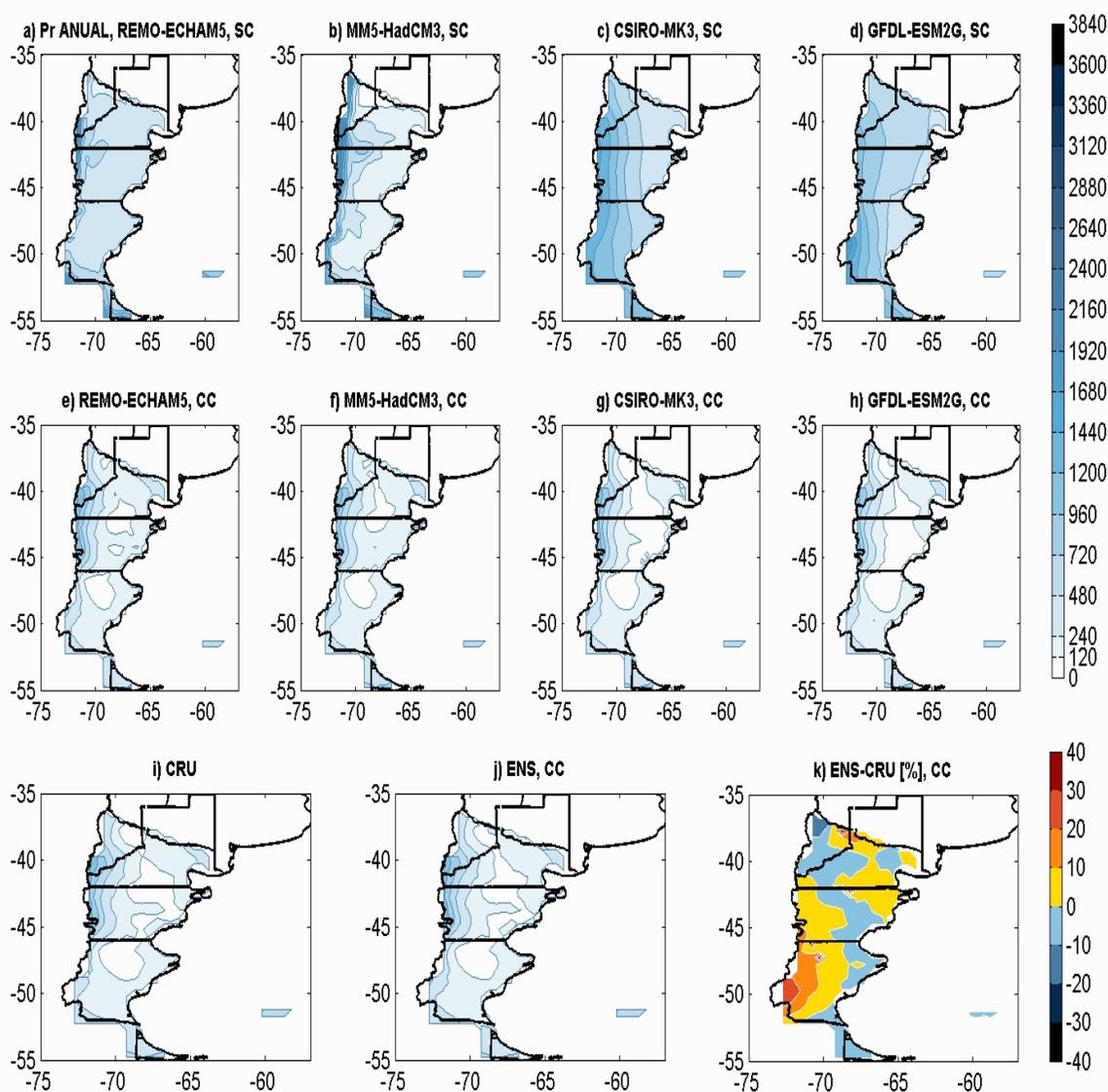


Figura 8.4.5: Ídem figura 8.4.1, pero para la precipitación

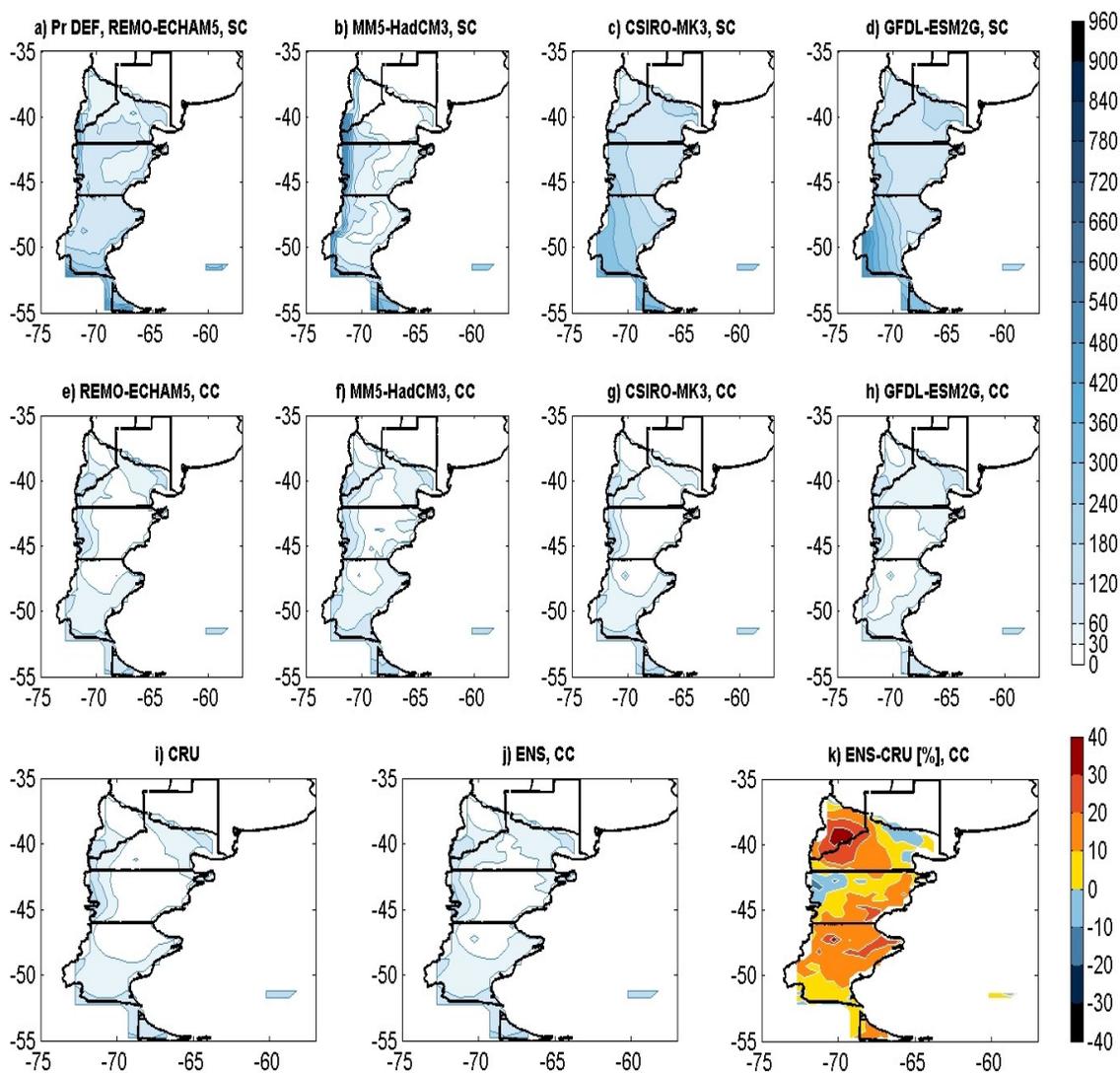


Figura 8.4.6: Ídem Figura 8.4.5 pero para la precipitación del verano (diciembre, enero y febrero)

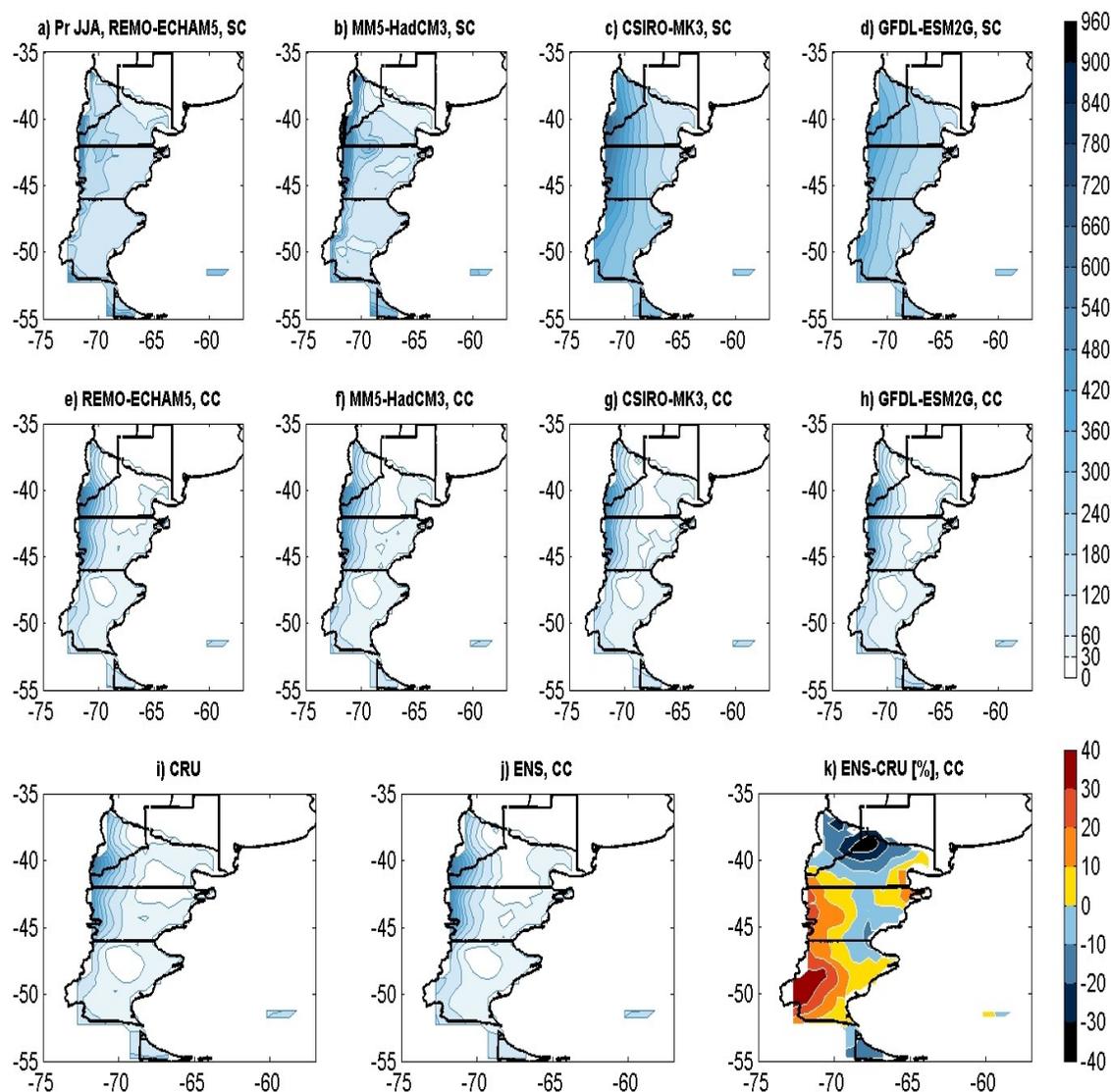


Figura 8.4.7: Ídem Figura 8.4.5 pero para la precipitación del invierno (junio, julio y agosto)

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.

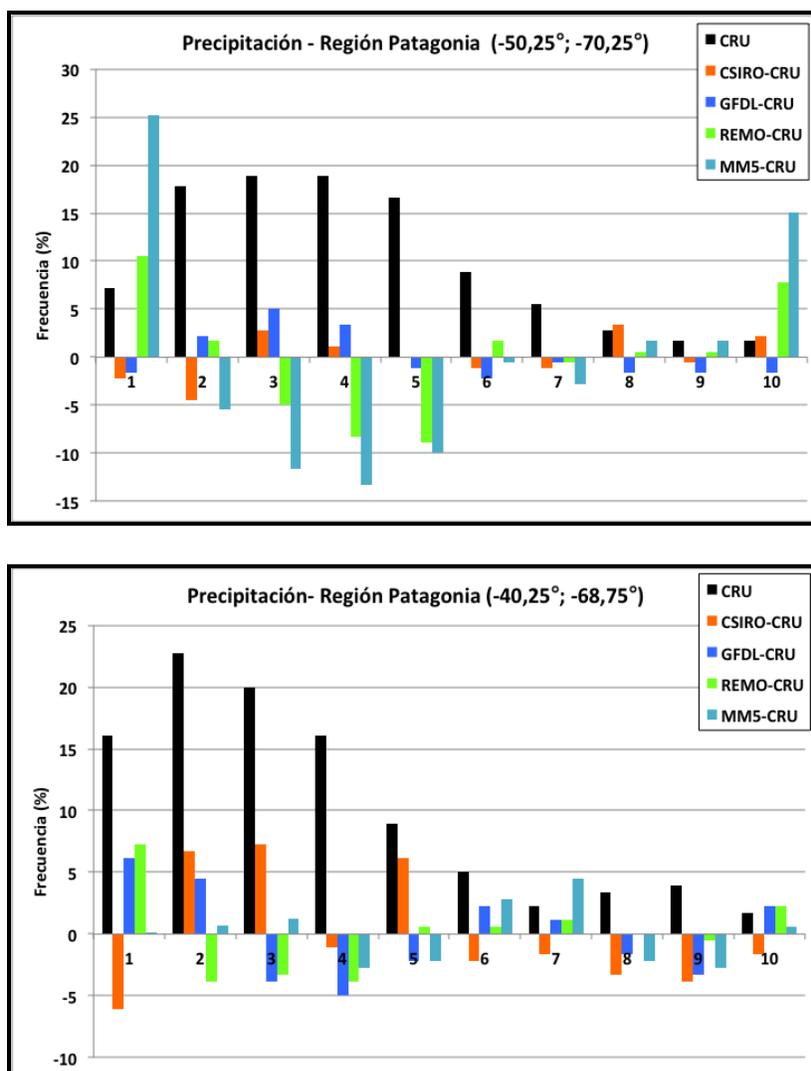


Figura 8.4.8: Ídem Figura 8.4.4, pero para la precipitación

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.

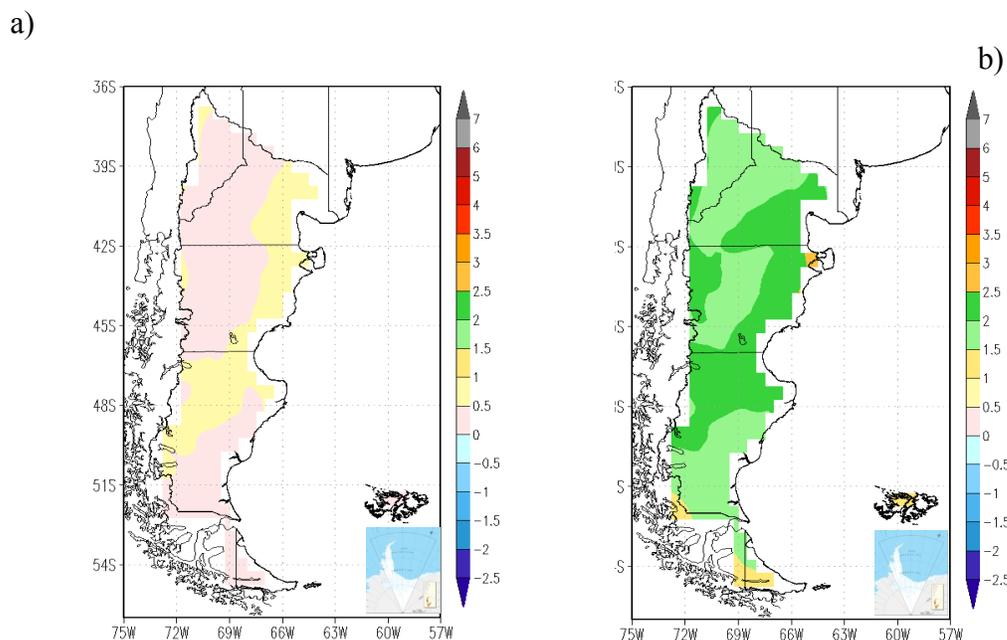


Figura 8.5.1.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Escenario SRES A1B a) Promedio de los modelos REMO-ECHAM5 y MM5-HadCM3, futuro cercano (2015-2039), b) Modelo REMO-ECHAM5 futuro lejano (2075-2099)

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.

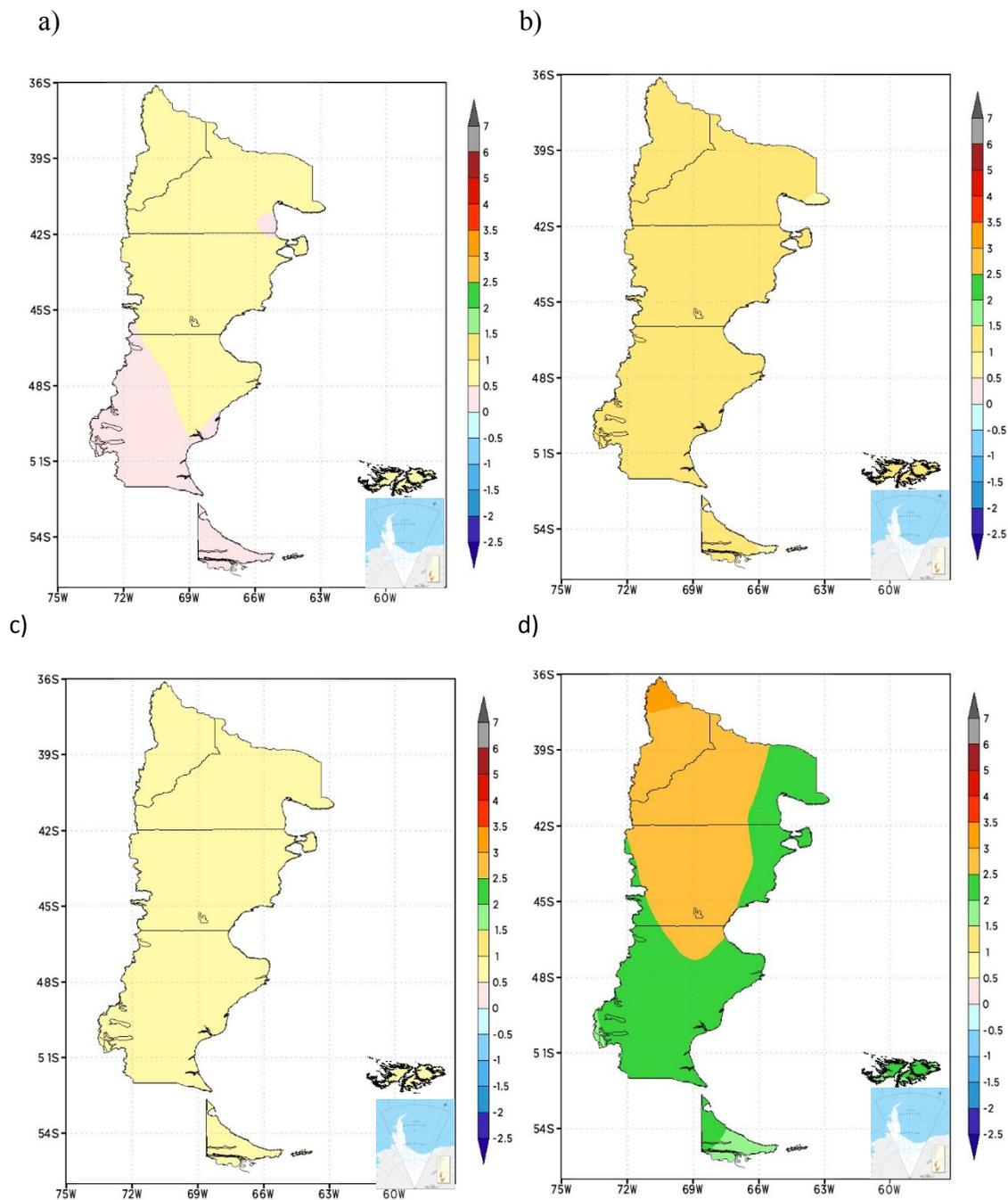


Figura 8.5.1.2: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y GFDL-ESM2G, a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099) y c) escenario RCP8.4, futuro cercano y d) escenario 8.4, futuro lejano

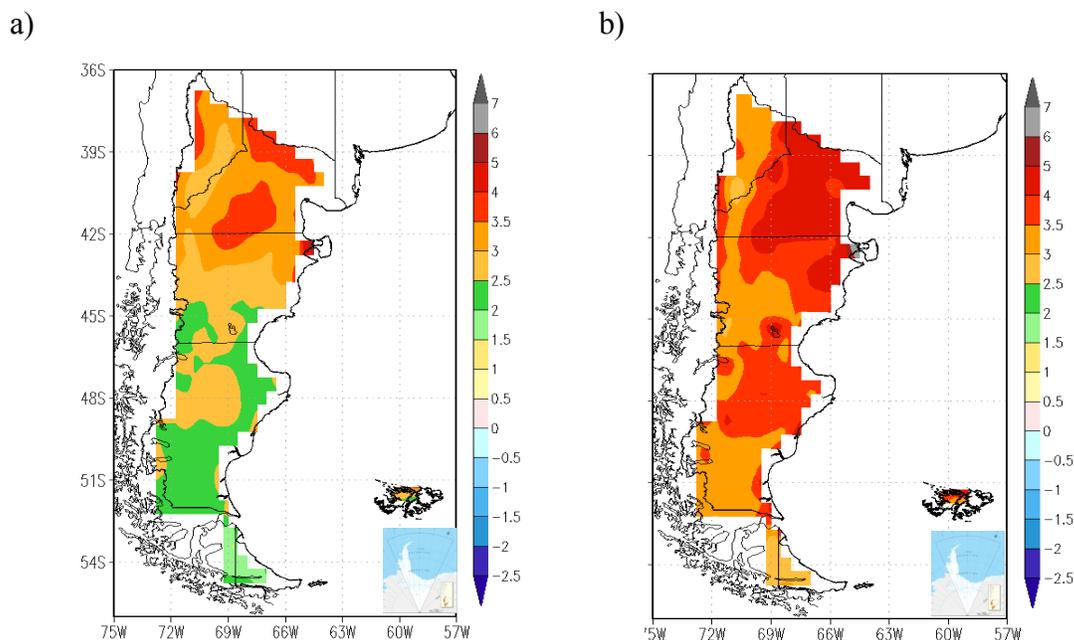


Figura 8.5.1.3: Ídem Figura 8.5.1.1, pero para la temperatura mínima media anual

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.

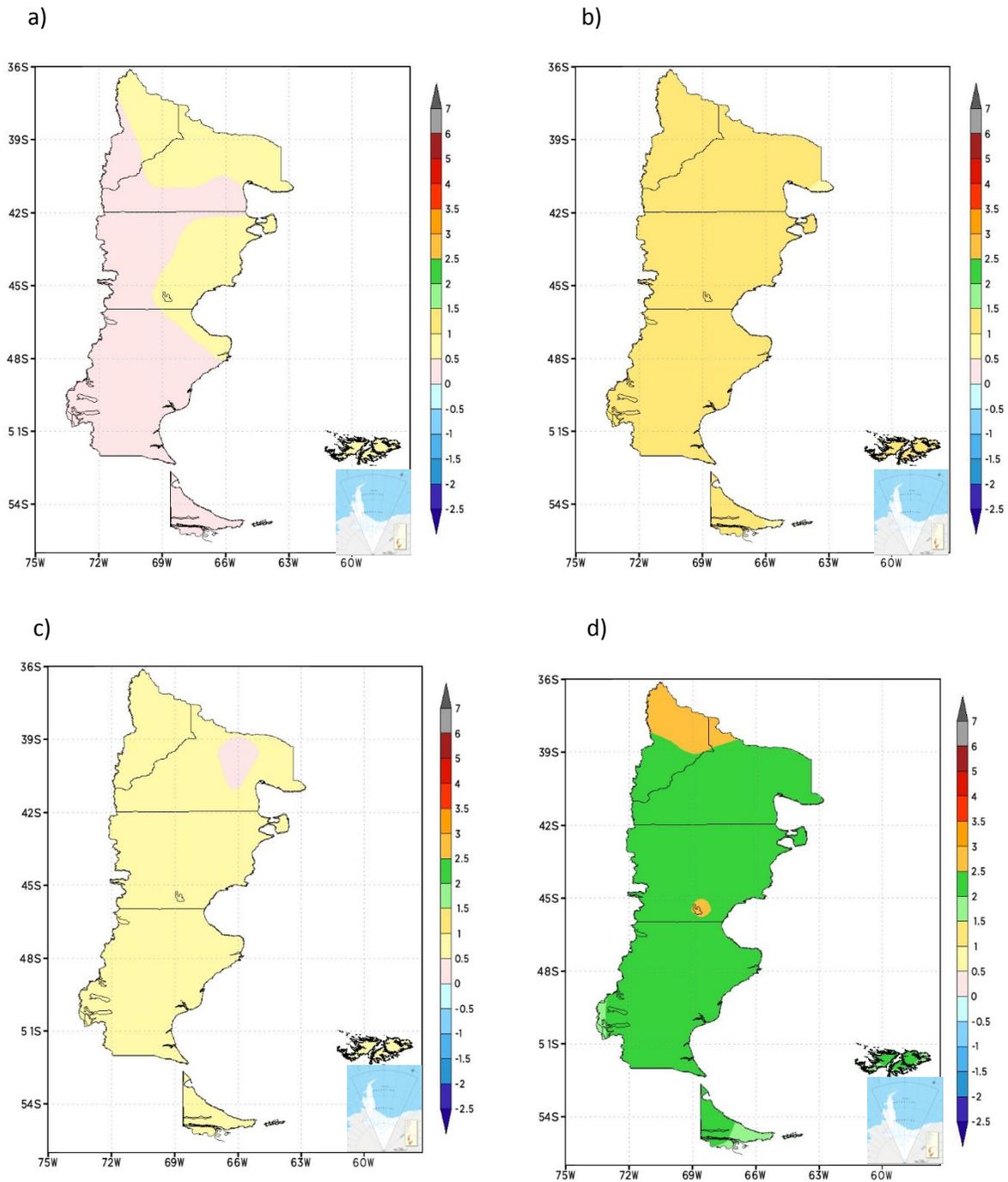
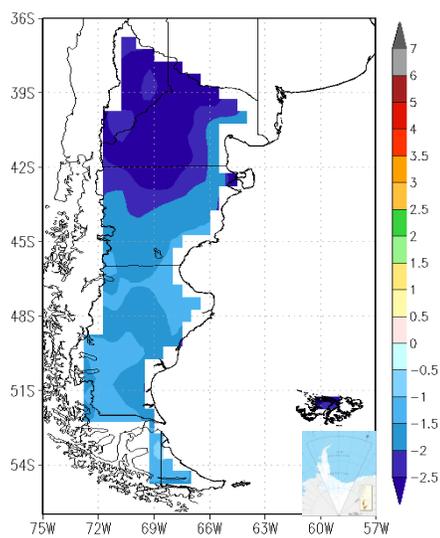


Figura 8.5.1.4: Ídem figura 8.5.1.2, pero para la temperatura mínima media anual

a)



b)

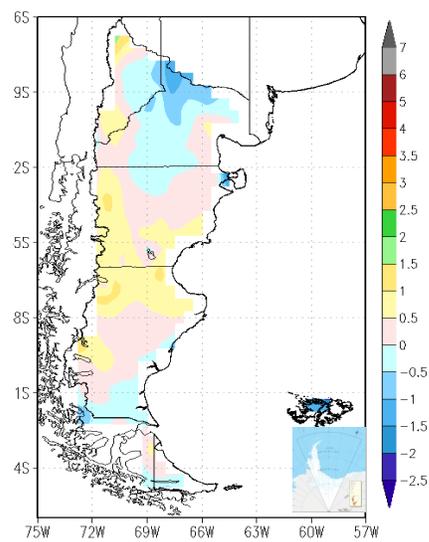


Figura 8.5.1.5: Ídem Figura 8.5.1.1, pero para la temperatura máxima media anual

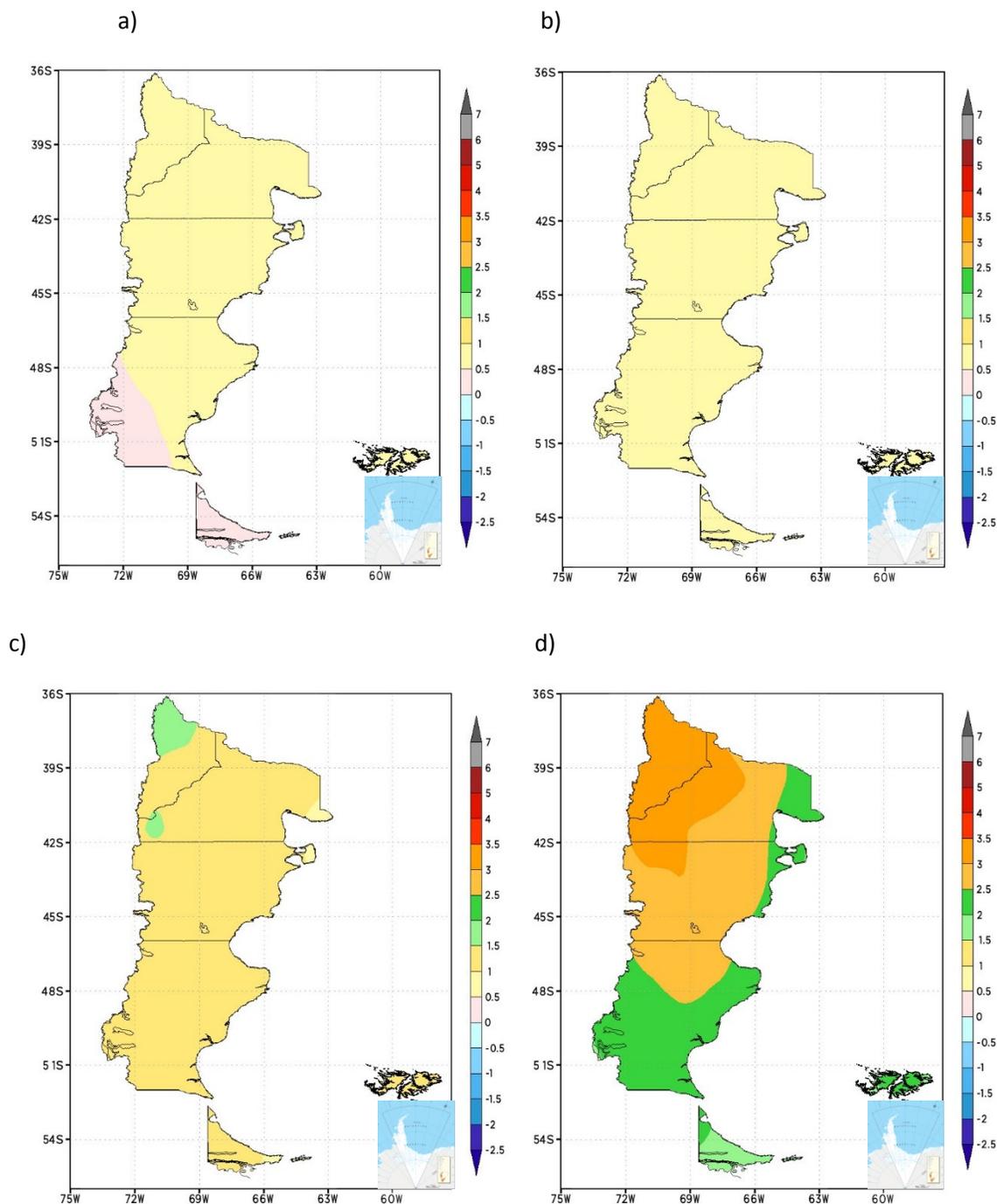


Figura 8.5.1.6: Ídem figura 8.5.1.1, pero para la temperatura máxima media anual

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.

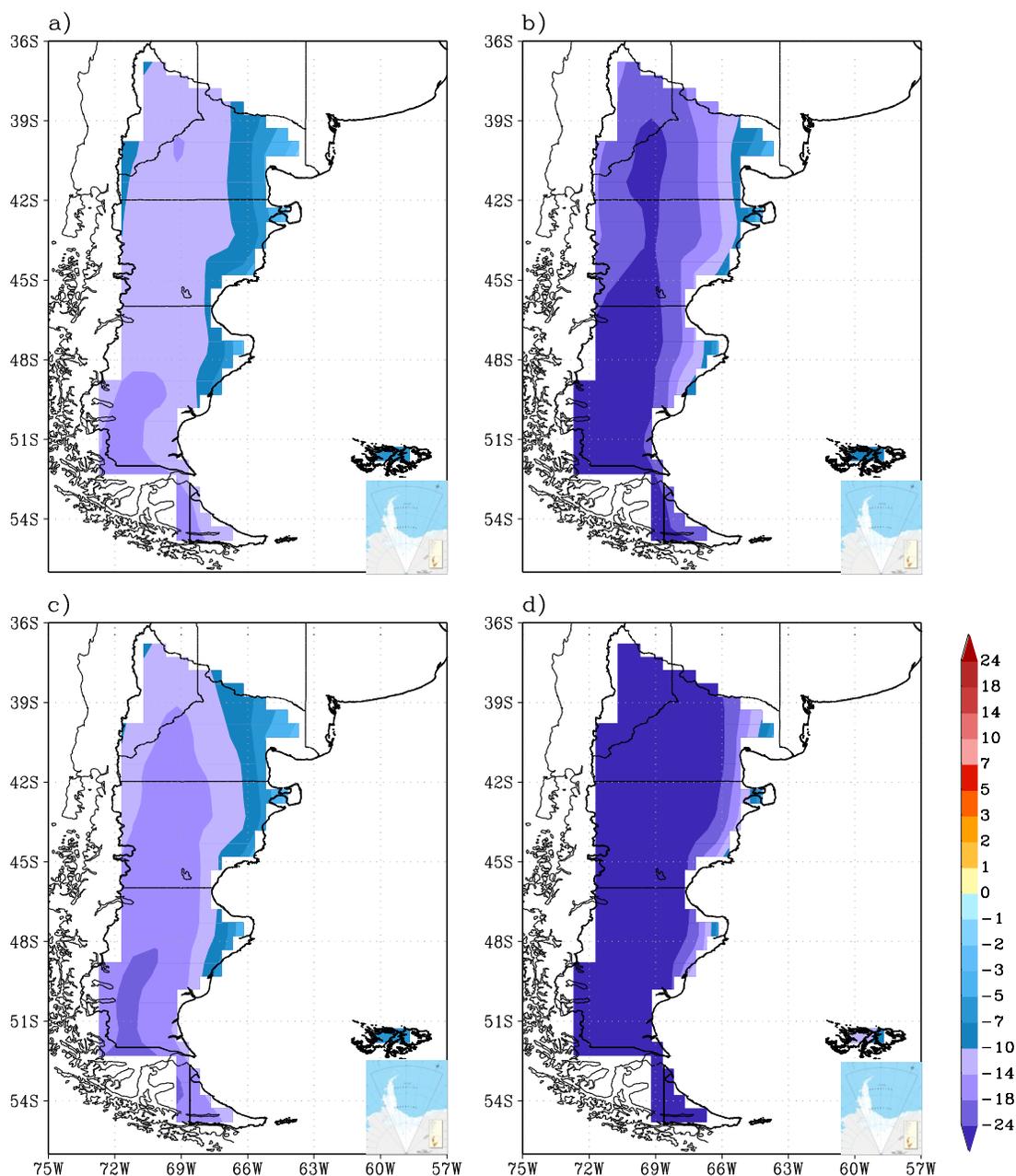


Figura 8.5.1.7: Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1986-2006. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y GFDL-ESM2G, a), escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039); b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.4, futuro cercano; d) escenario 8.4, futuro lejano

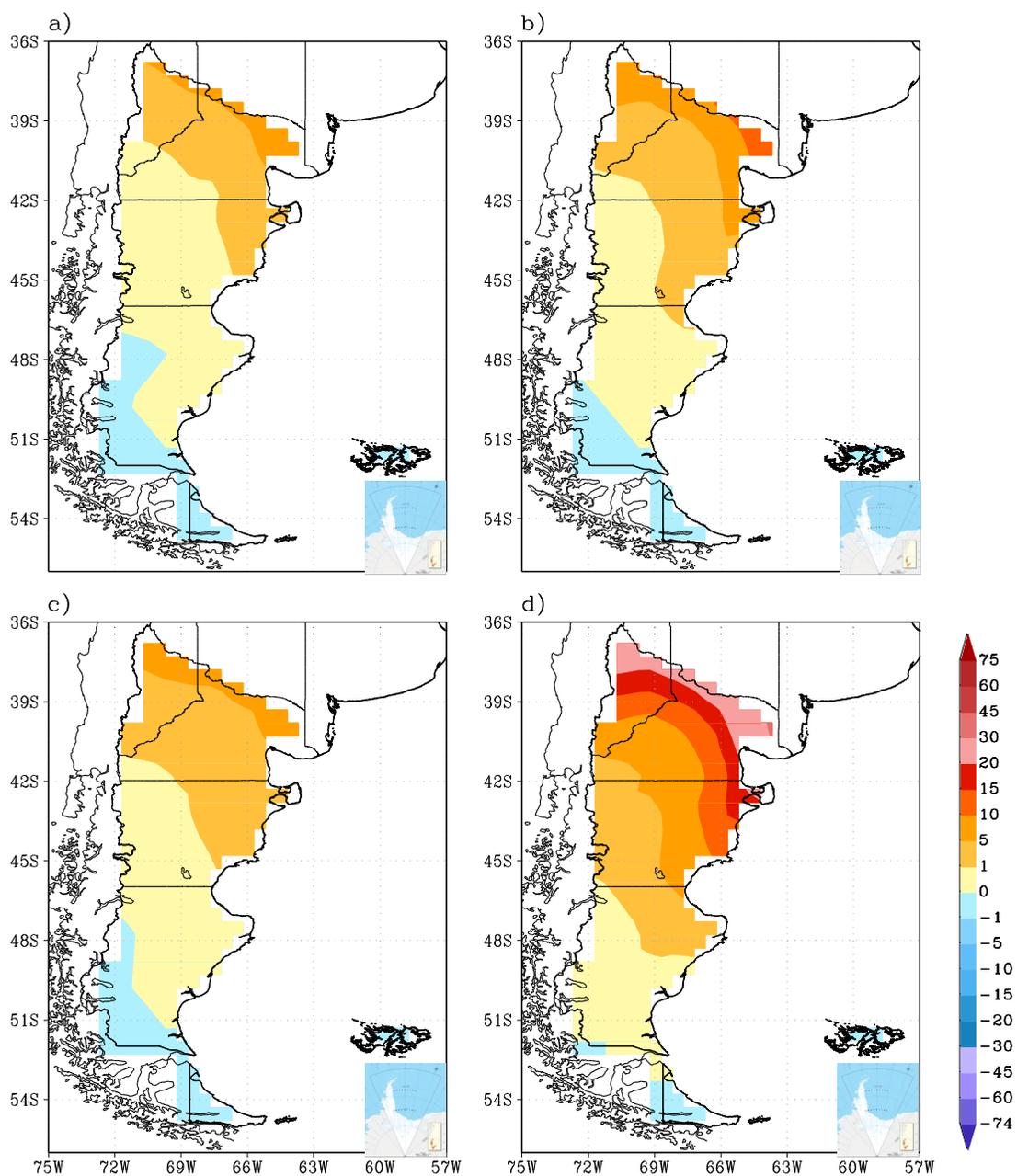


Figura 8.5.1.8: Ídem Figura 8.5.1.4, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

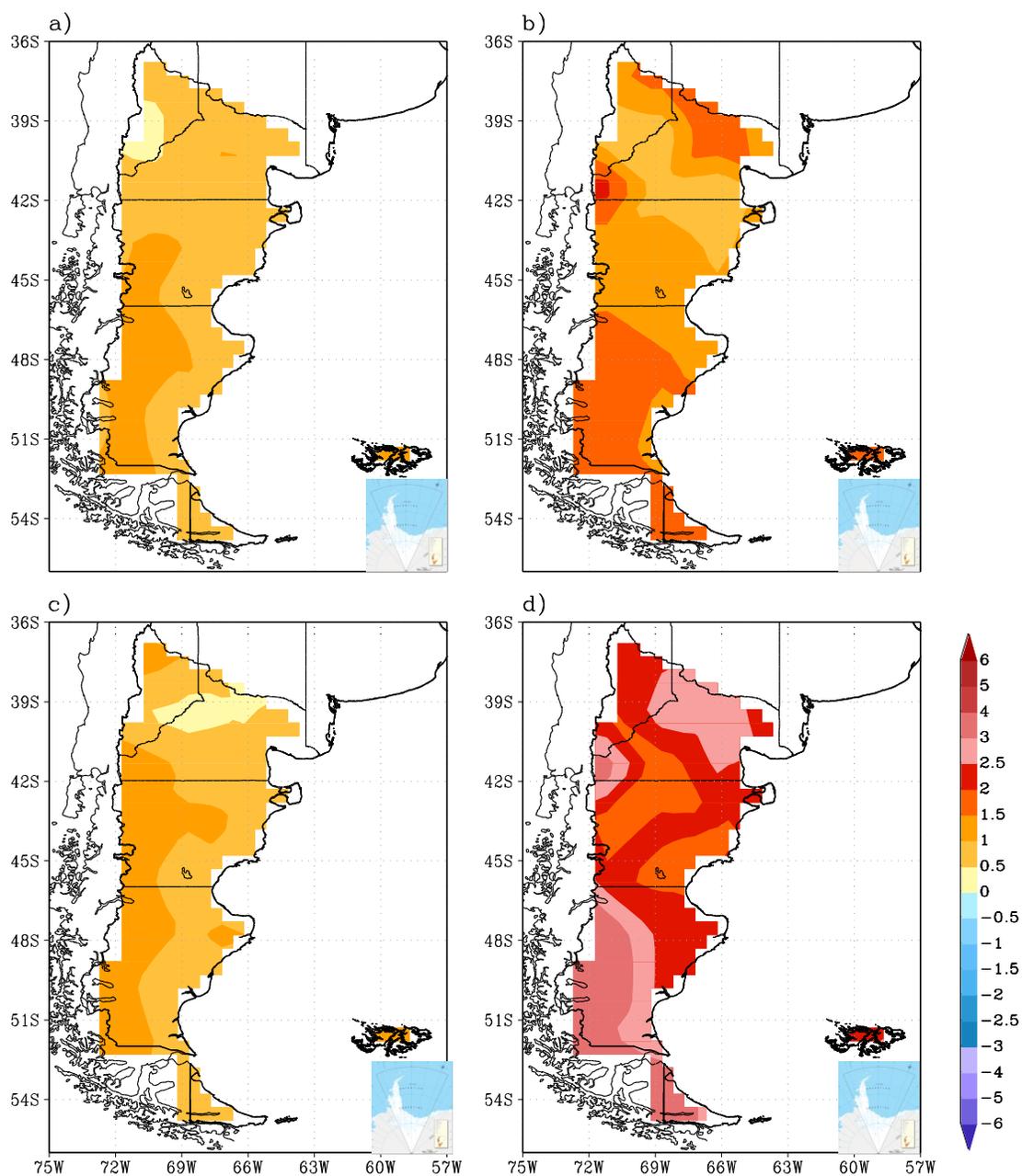


Figura 8.5.1.9: Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)

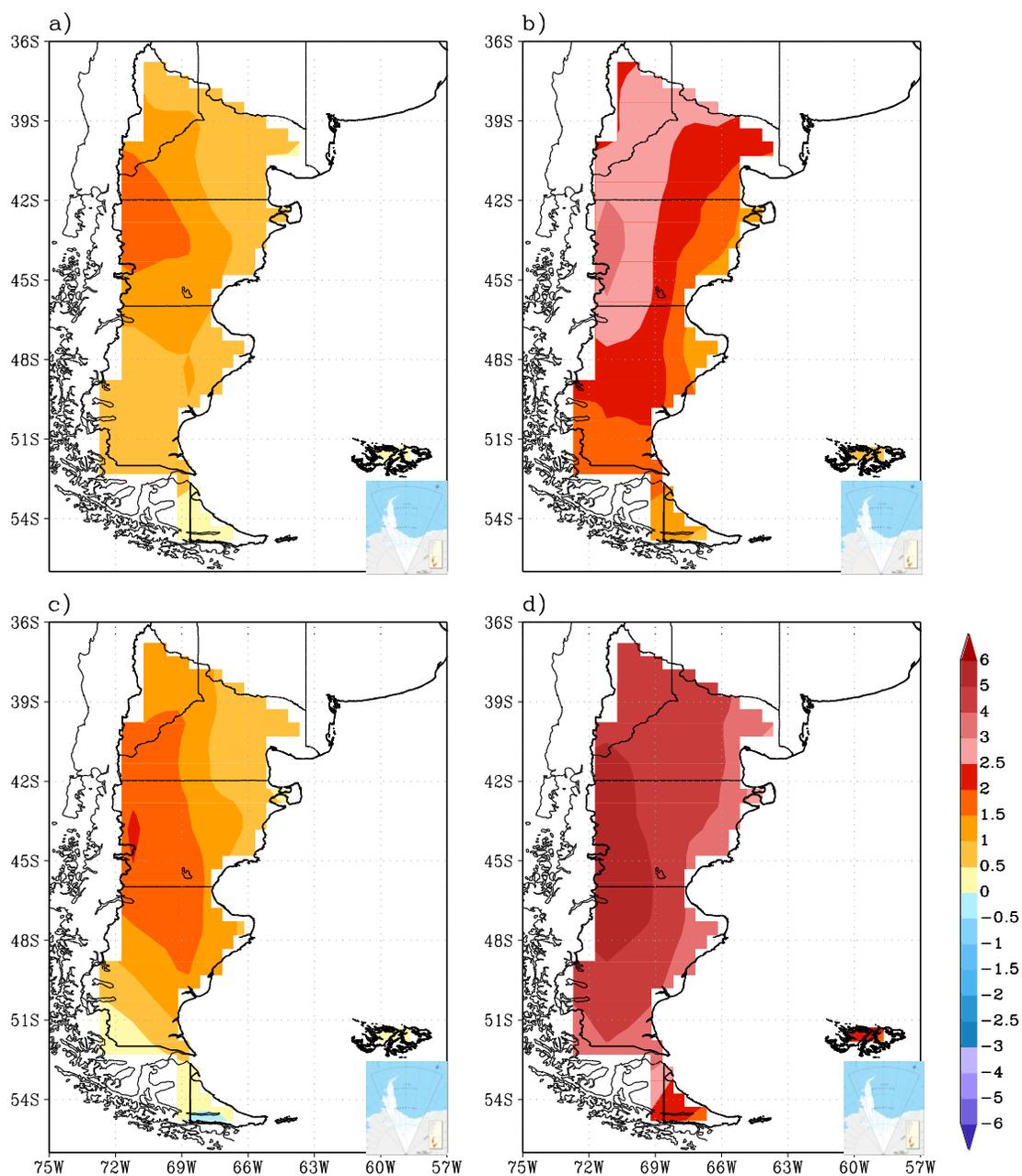


Figura 8.5.1.10: Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)

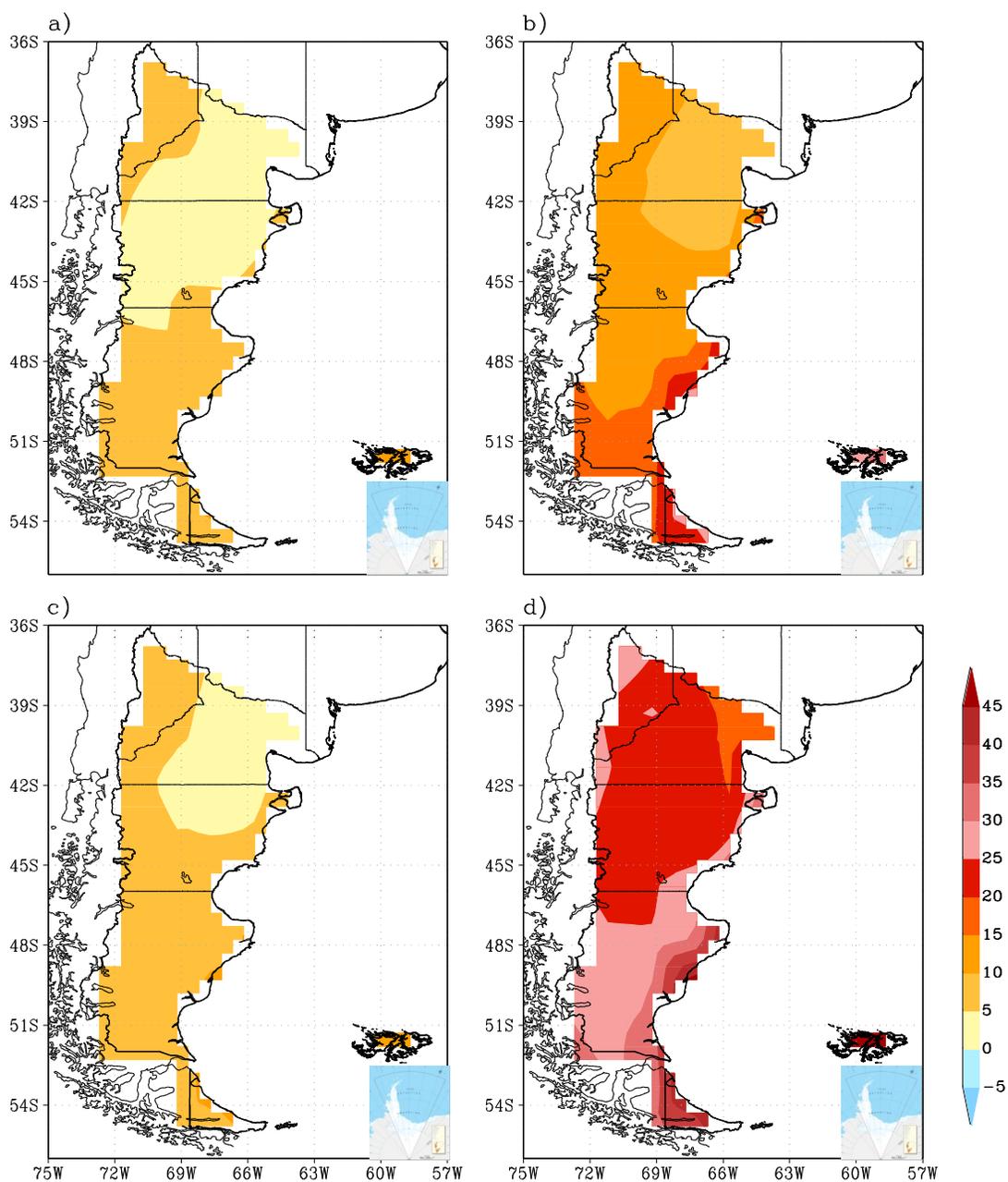


Figura 8.5.1.11. Ídem Figura 8.5.1.4, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

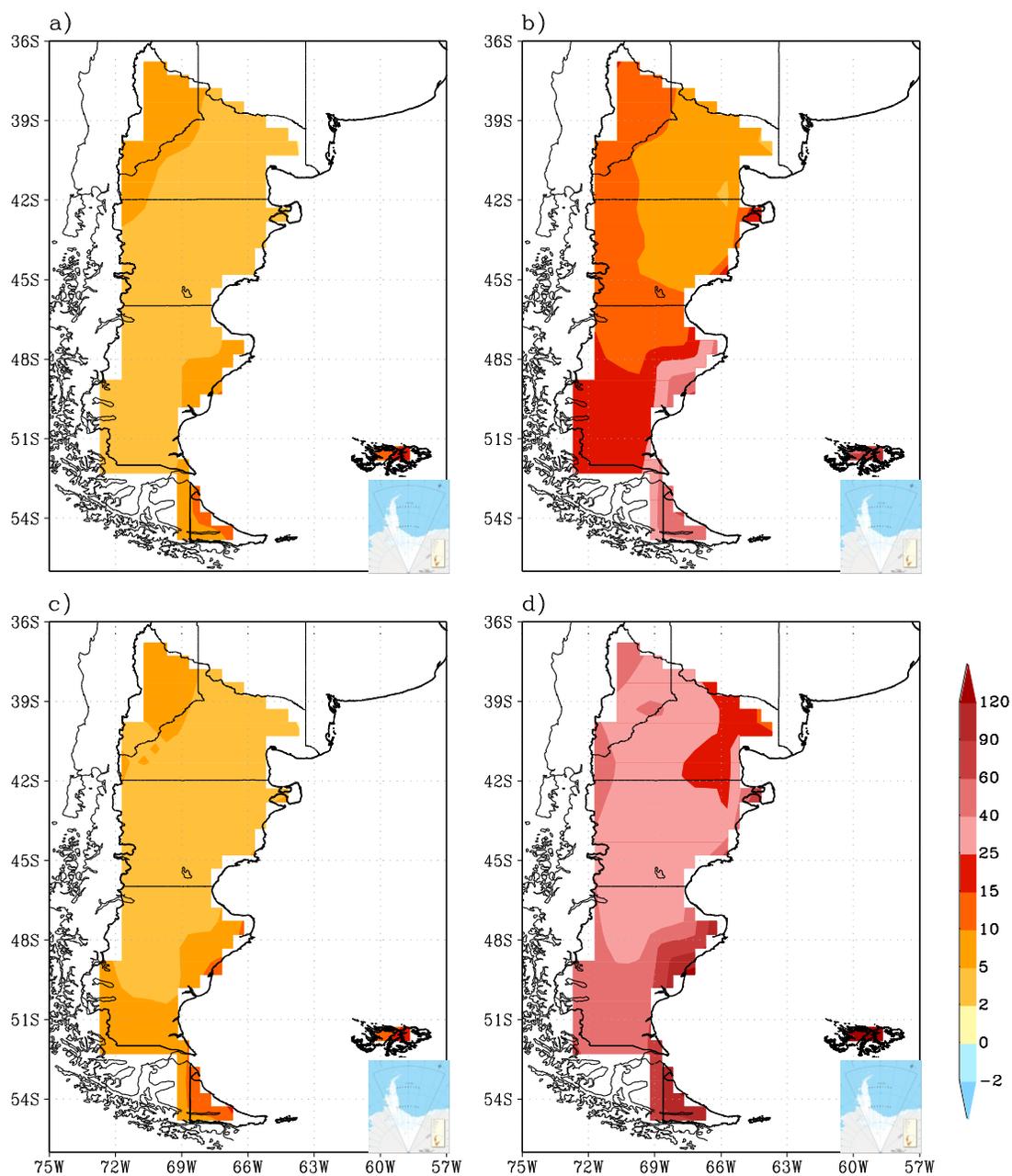


Figura 8.5.1.12: Ídem Figura 8.5.1.4, pero para los días en el año con ola de calor

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.

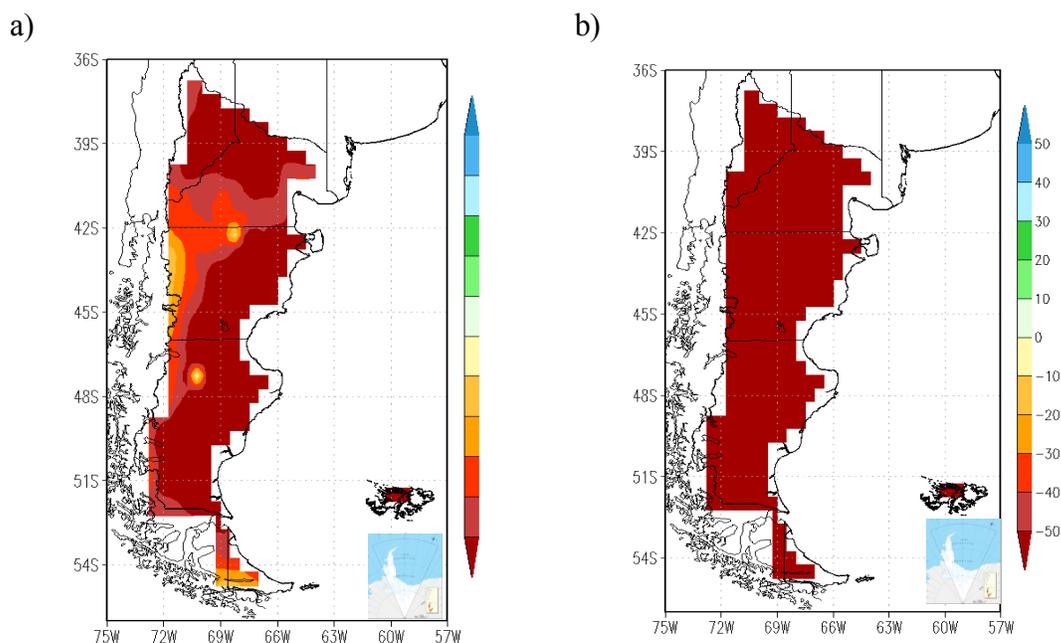


Figura 8.5.2.1: Cambio en la precipitación media anual con respecto al periodo 1986-2005. Escenario SRES A1B a) Promedio de los modelos REMO-ECHAM5 y MM5-HadCM3, futuro cercano (2015-2039), b) Modelo REMO-ECHAM5 futuro lejano (2075-2099)

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.

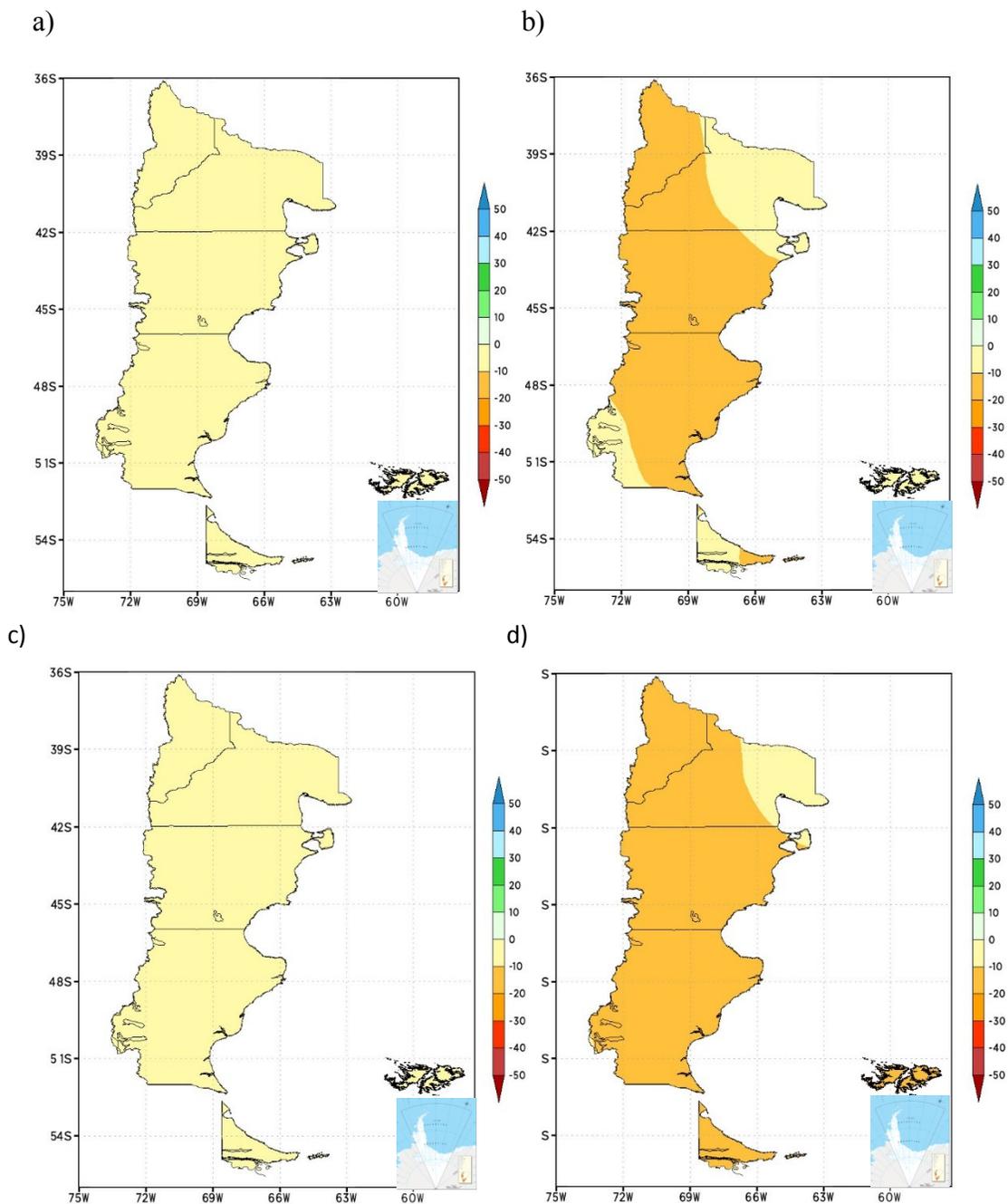


Figura 8.5.2.2: Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-ESM2G. Panel superior, escenario RCP 4.5; panel inferior, escenario RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039); derecha, futuro lejano



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.

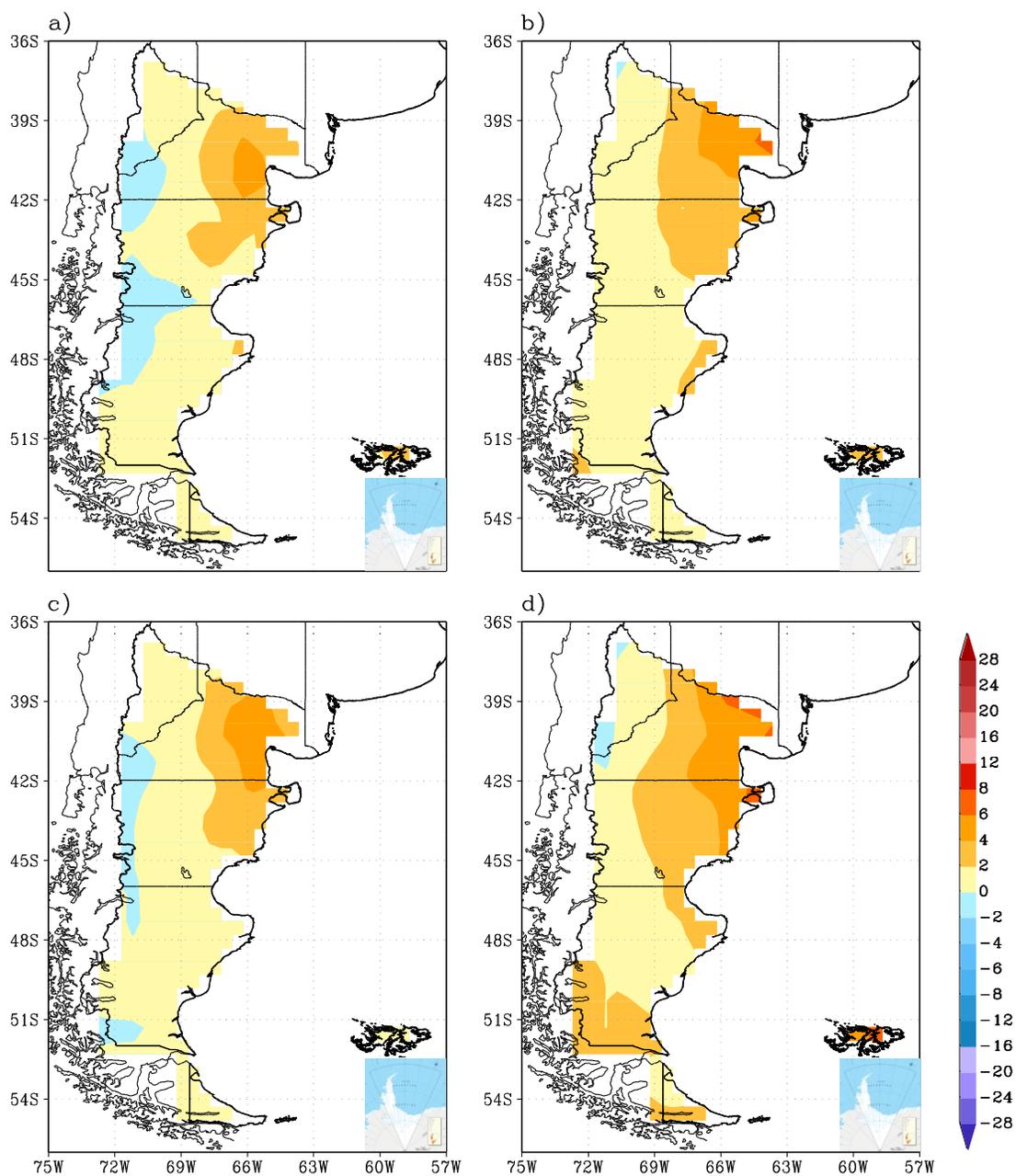


Figura 8.5.2.3: Cambios de precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 , GFDL-ESM2G, a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.4, futuro lejano

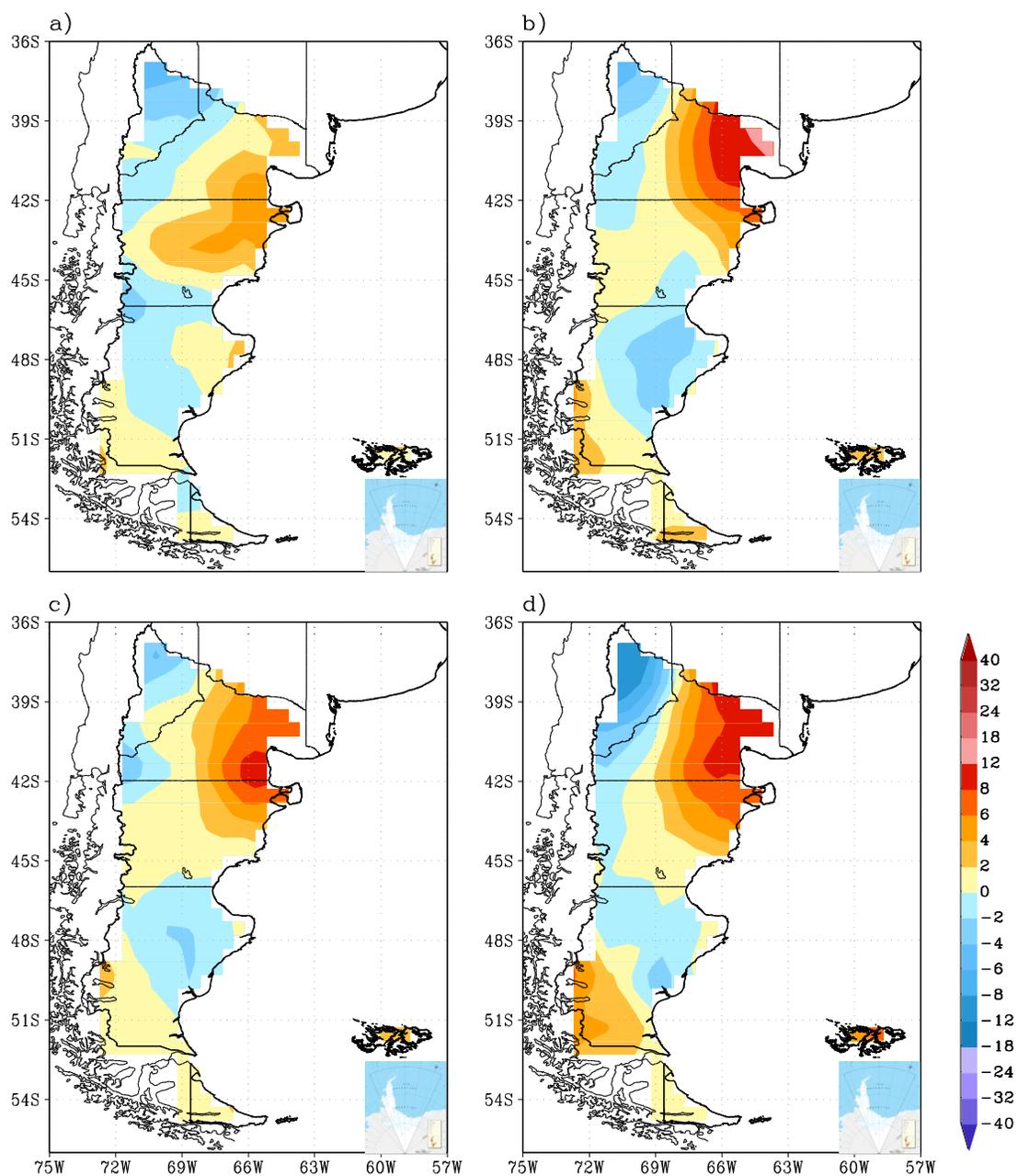


Figura 8.5.2.4: Ídem Figura 8.5.2.2, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

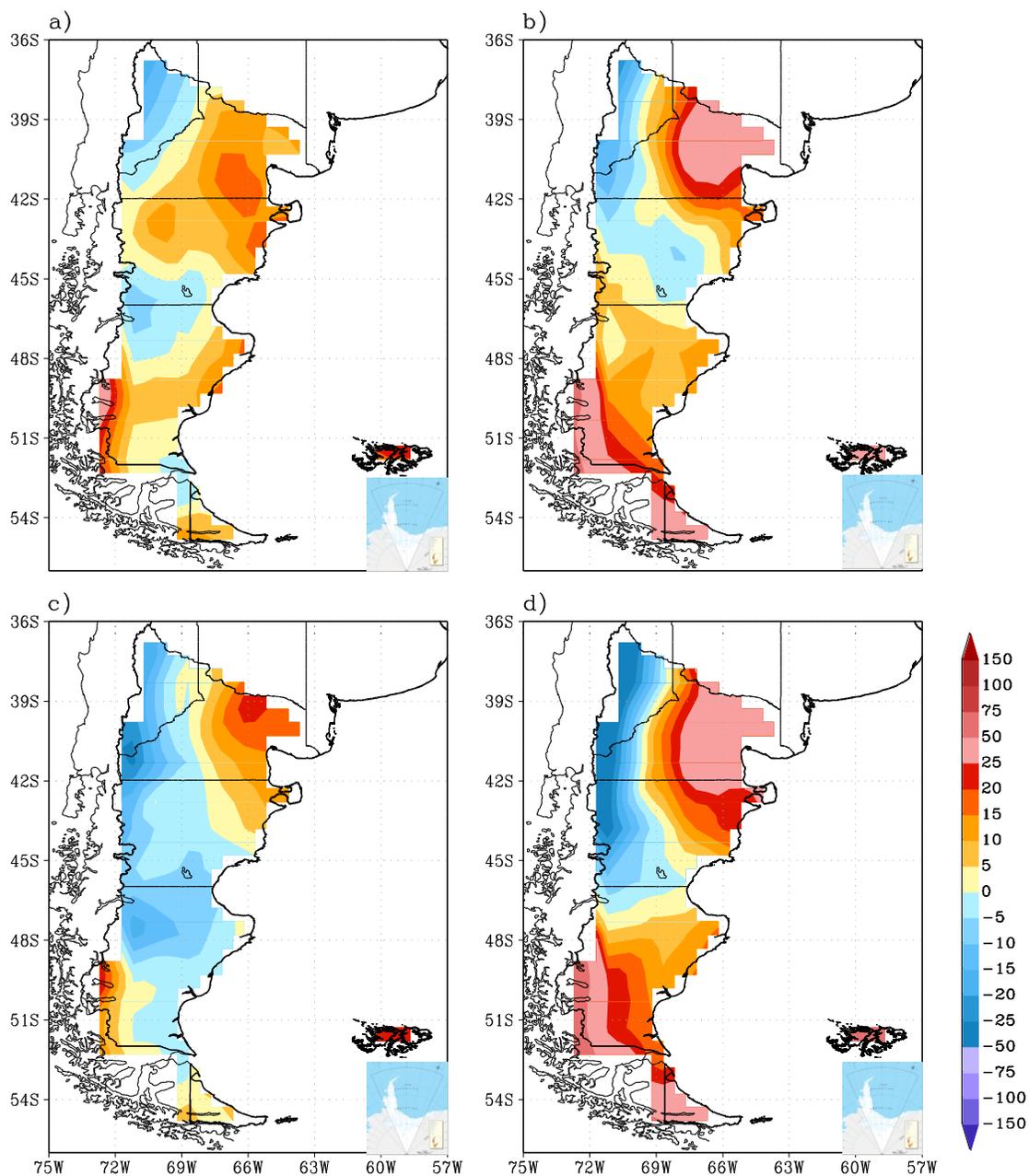


Figura 8.5.2.5: Ídem Figura 8.5.2.2, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

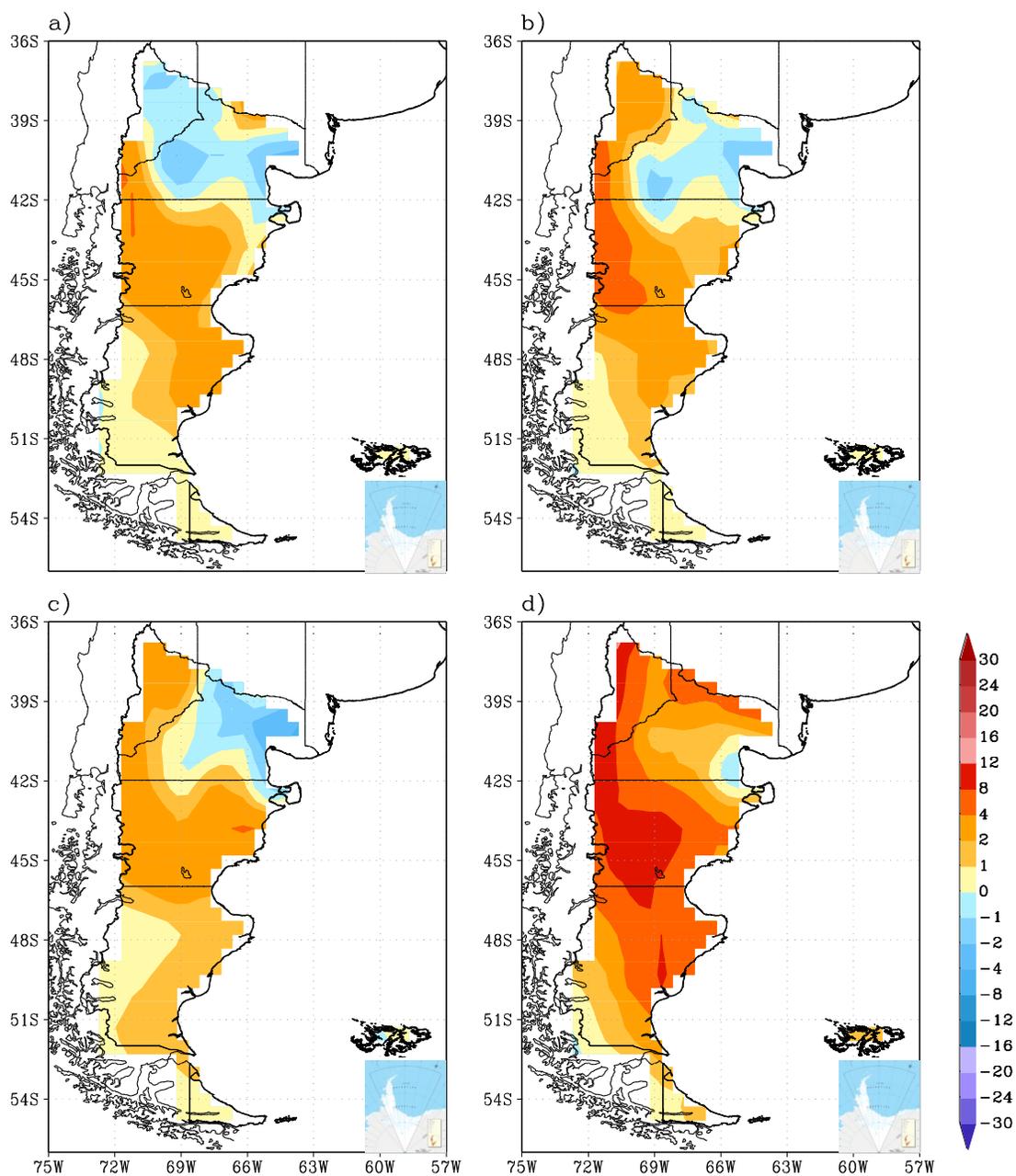


Figura 8.5.2.6: Ídem Figura 8.5.2.2, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

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 cuatros 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.

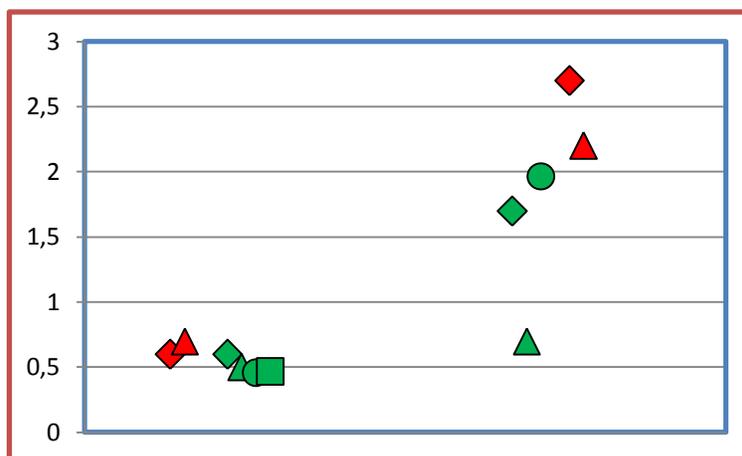


Figura 8.6.1.1: Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y SRES A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (triángulos), GFDL-ESM2G (rombos); REMO-ECHAM5 (círculos) y MM5-HadCM3 (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.

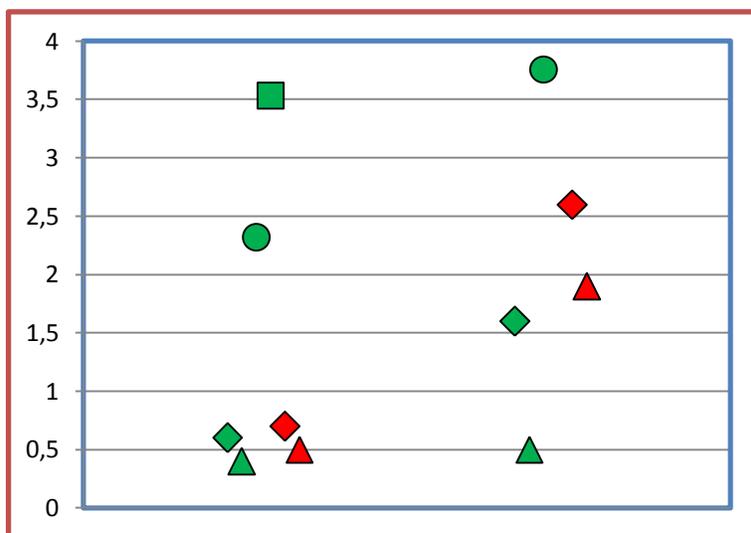


Figura 8.6.1.2: Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura mínima media regional

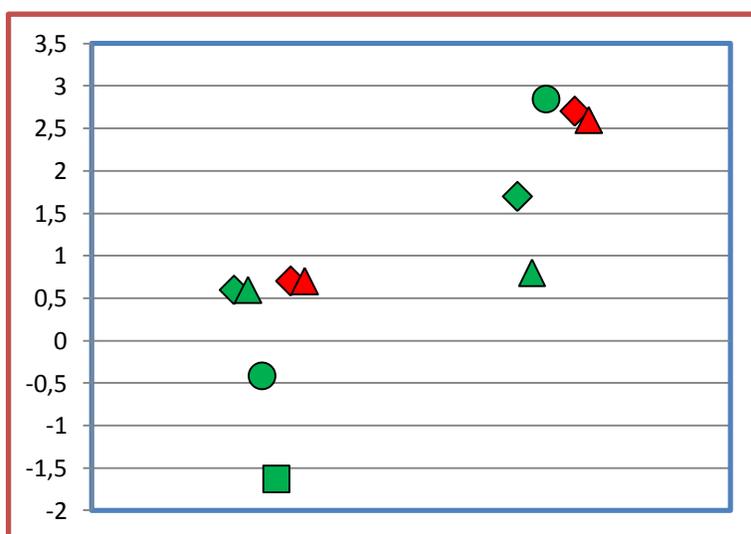


Figura 8.6.1.3: Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura máxima media regional

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.

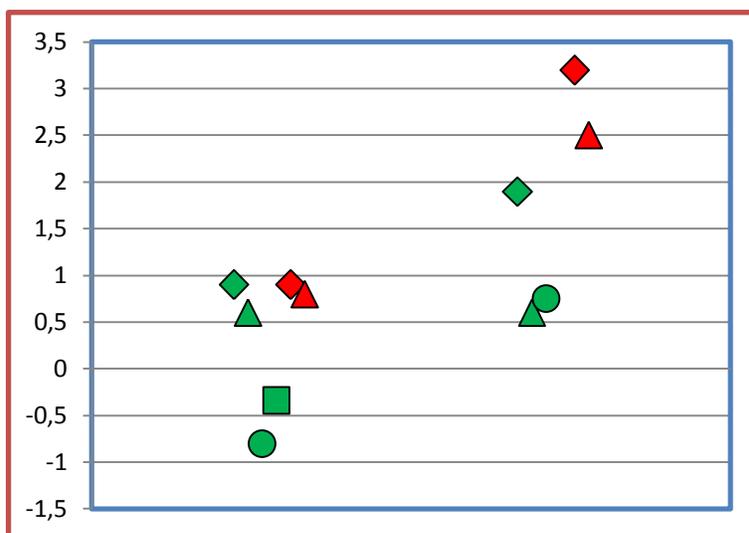


Figura 8.6.1.4: *Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

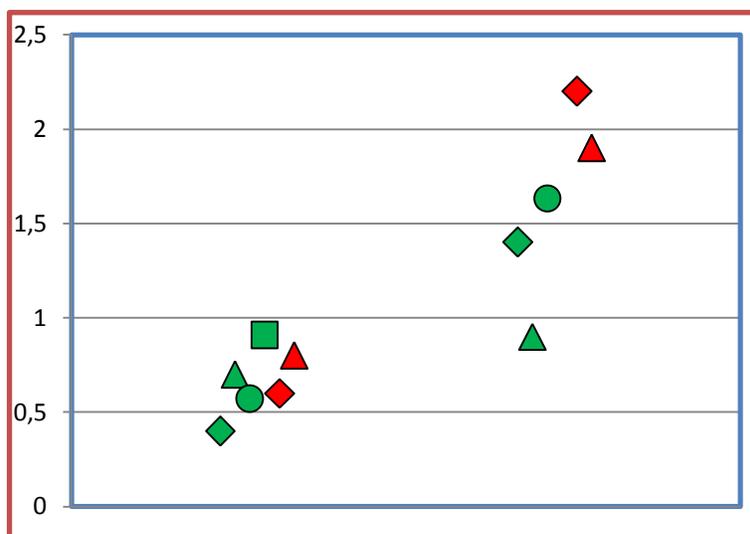


Figura 8.6.1.5: Ídem 8.6.1.1, pero para la temperatura media regional del invierno (junio, julio y agosto)

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.

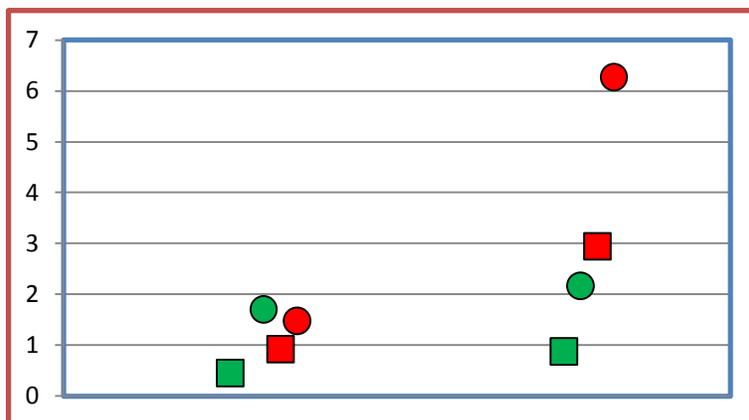


Figura 8.6.1.6: Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. CSIRO-Mk3-6-0 (cuadrados) y GFDL-ESM2G (círculos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo, RCP8.4

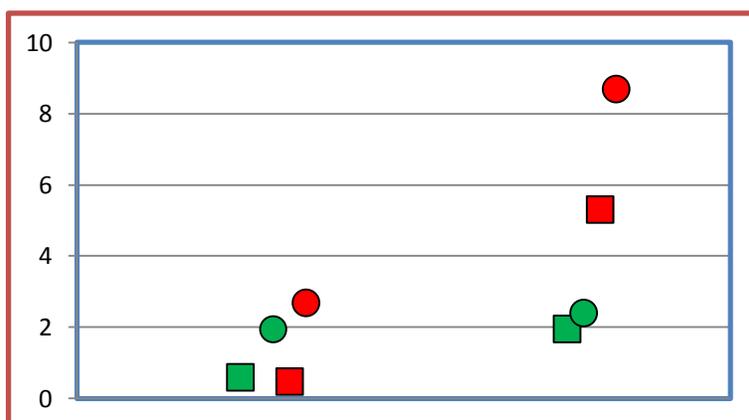


Figura 8.6.1.7: Ídem Figura 8.6.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

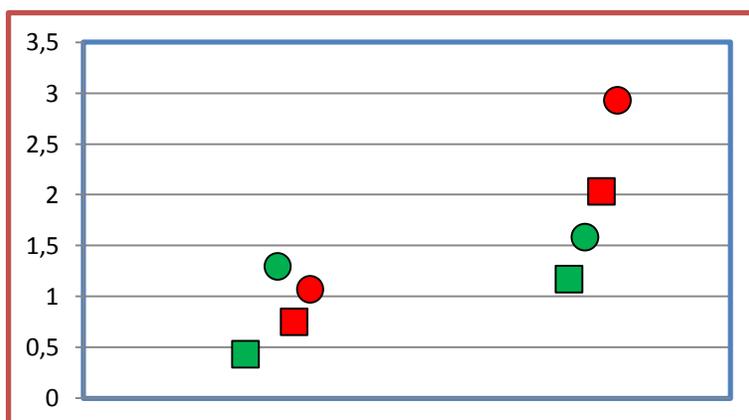


Figura 8.6.1.8: Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)

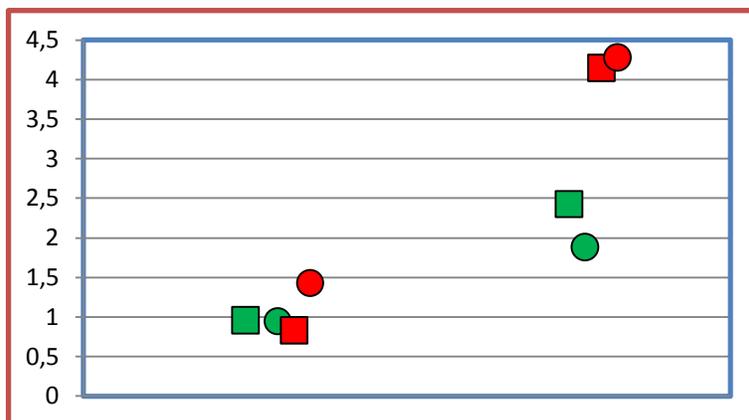


Figura 8.6.1.9: Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)

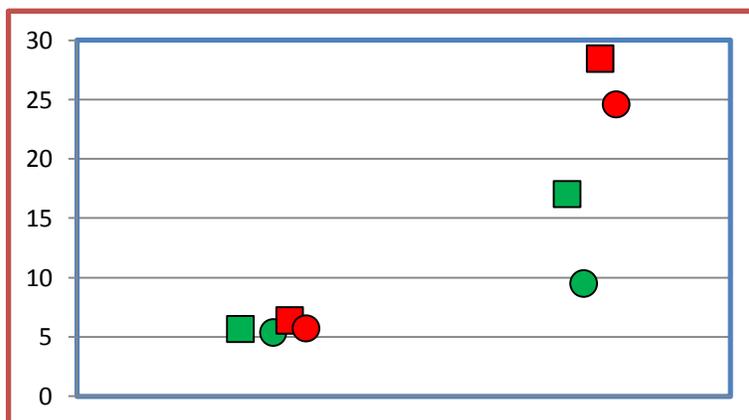


Figura 8.6.1.10: Ídem Figura 8.6.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

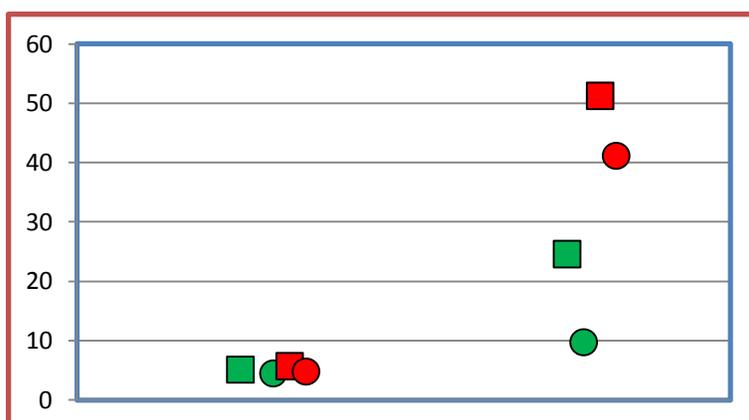


Figura 8.6.1.11: Ídem Figura 8.6.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

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.

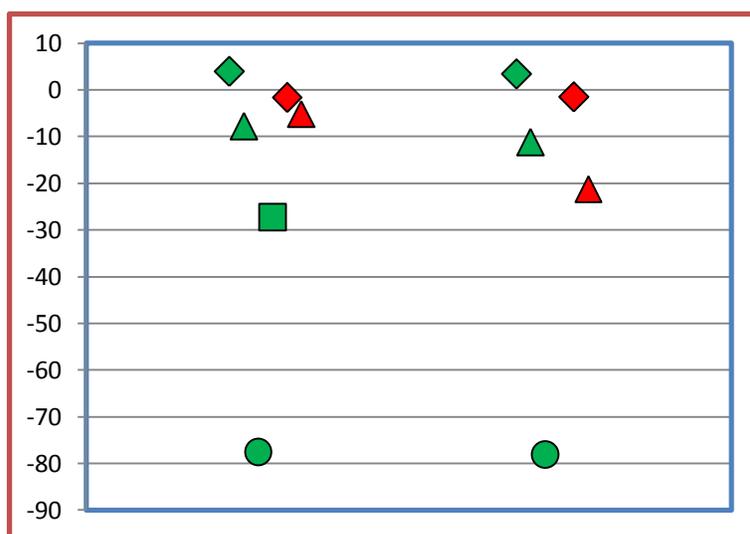


Figura 8.6.2.1: Diferencia proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099 En verde, escenarios RCP4.5 y SRES A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (triángulos), GFDL-ESM2G (rombos); REMO-ECHAM5 (círculos) y 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.

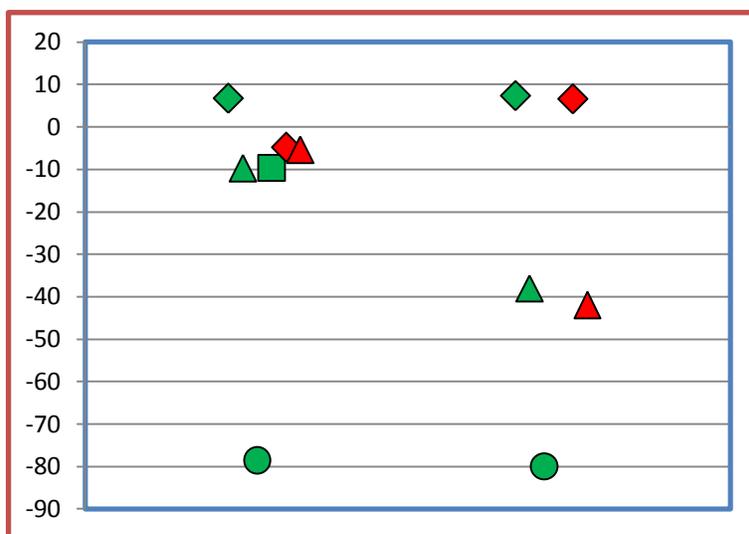


Figura 8.6.2.2: *Idem 8.6.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

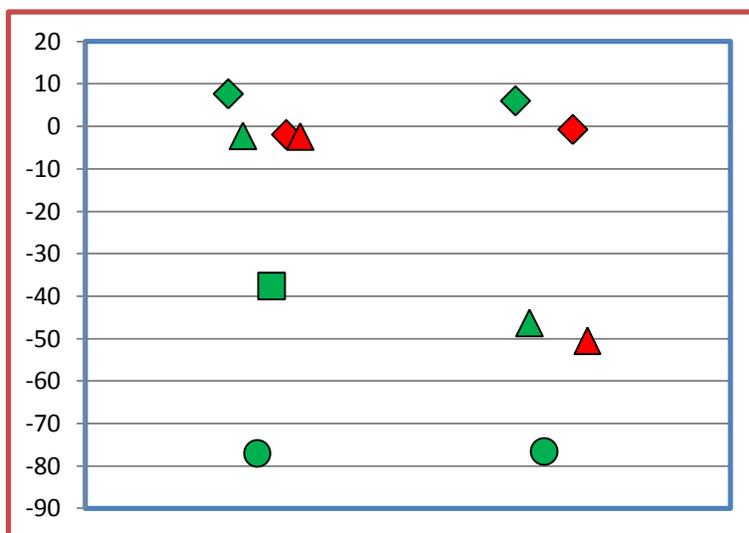


Figura 8.6.2.3: *Idem 8.6.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

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.

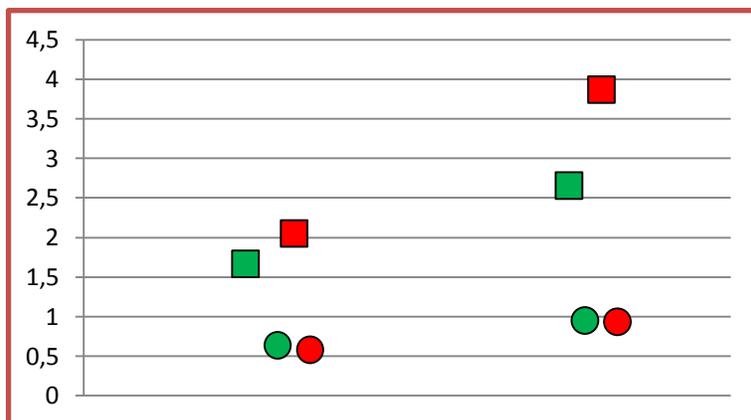


Figura 8.6.2.4: Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CSIRO-Mk3-6-0 (cuadrados) y GFDL (círculos) A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.4

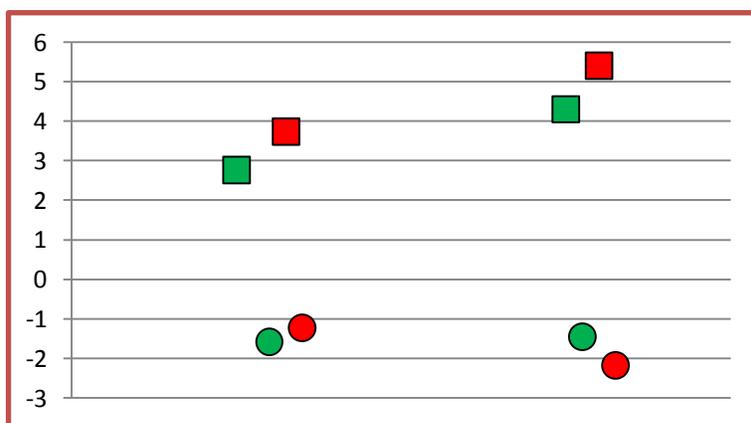


Figura 8.6.2.5: Ídem Figura 8.6.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

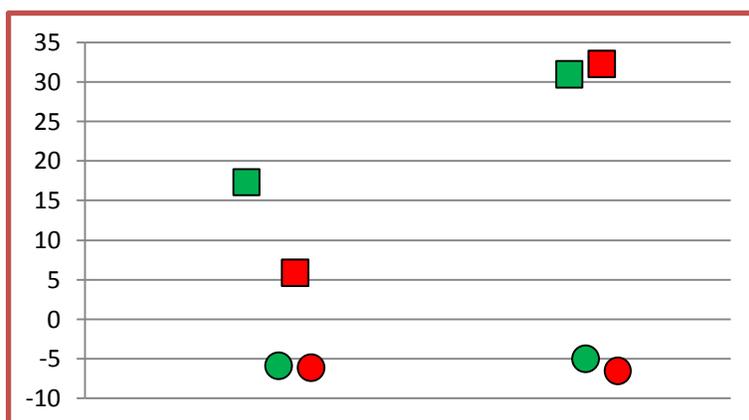


Figura 8.6.2.6: Ídem Figura 8.6.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

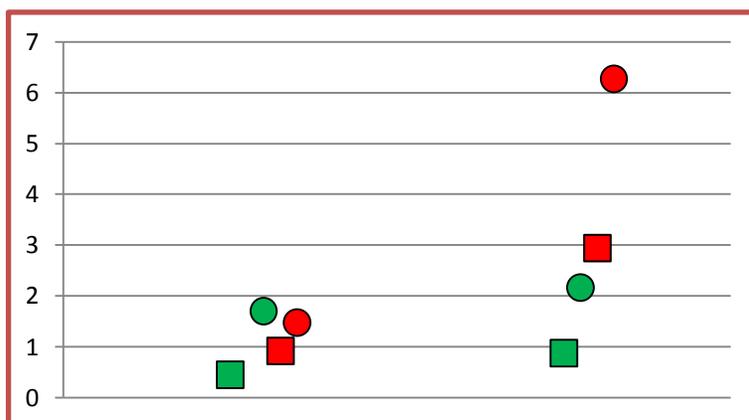


Figura 8.6.2.7: Ídem Figura 8.6.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

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.