

CAPITULO 7

CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN ANDES

7.1	INTRODUCCIÓN	pág. 212
7.1.1	Dominio espacial	pág. 213
7.1.2	Datos	pág. 213
7.2	CAMBIOS Y TENDENCIAS	pág. 213
7.2.1	Temperatura	pág. 213
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 213
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 219
7.2.2	Precipitación	pág. 224
	<i>Precipitaciones medias</i>	pág. 224
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 229
7.2.3	Incerteza	pág. 235
7.2.4	Isoterma de 0°C	pág. 237
7.2.5	Otras variables	pág. 239
7.3	VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES	pág. 239
7.3.1	Temperatura	pág. 239
7.3.2	Precipitación	pág. 244
7.4	ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)	pág. 248
7.4.1	Temperatura	pág. 248
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 248
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 253
7.4.2	Precipitación	pág. 259
	<i>Precipitación media</i>	pág. 259
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 262
7.5	EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	pág. 266
7.5.1	Temperatura	pág. 266
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 266
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 269
7.5.2	Precipitación	pág. 272
	<i>Precipitación media</i>	pág. 272
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 273
7.6	CONCLUSIONES	pág. 275
	Referencias	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

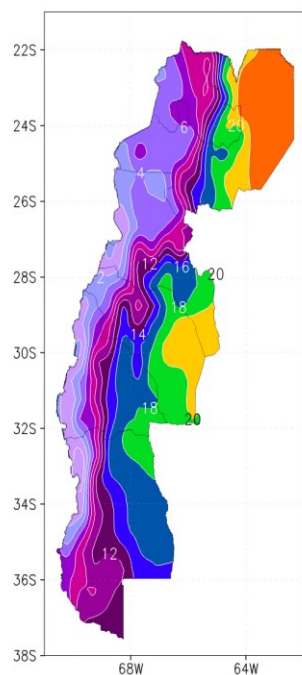
7.2.1 Temperatura

Temperaturas medias

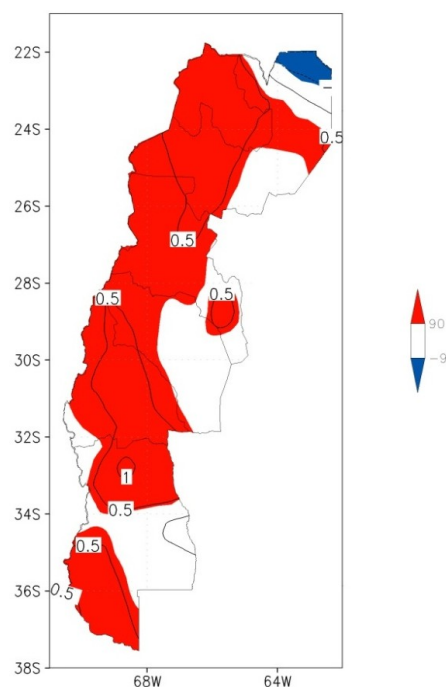
La temperatura media anual aumentó (alta confianza) entre 1960 y 2010 sobre casi la totalidad de las subregiones NOA-Norte y Cuyo (alta confianza) y en muchas zonas en más de 0.5°C, siendo los cambios más notables los de la primavera, Figura 7.2.1.1b. Este incremento fue superior a 1°C sobre la región 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)

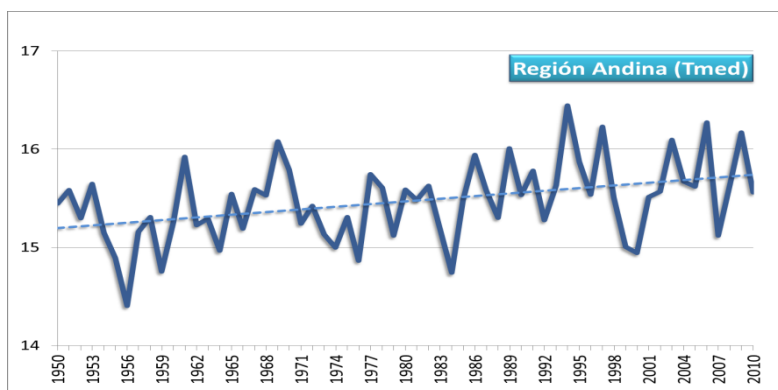


Figura 7.2.1.1: a) Campo medio de la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$ por tendencia lineal para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; 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.

		TEMPERATURA MEDIA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
Salta – Jujuy	<i>Medio</i>	20,0	19,3	10,6	17,1	15,8
	<i>Cambio</i>	0,5**	0,7**	0,55	0,9**	0,7**
Catamarca - La Rioja	<i>Medio</i>	25,1	24,2	11,7	20,1	18,8
	<i>Cambio</i>	0,4	0,3	0,4	1,1**	0,5**
Mendoza - San Juan	<i>Medio</i>	18,3	17,5	5,2	12,1	11,8
	<i>Cambio</i>	0,5*	0,6**	0,3	0,8**	0,5**
REGION ANDES	<i>Medio</i>	20,6	19,9	9,0	16,1	15,2
	<i>Cambio</i>	0,5**	0,6**	0,4	0,9**	0,6**

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.

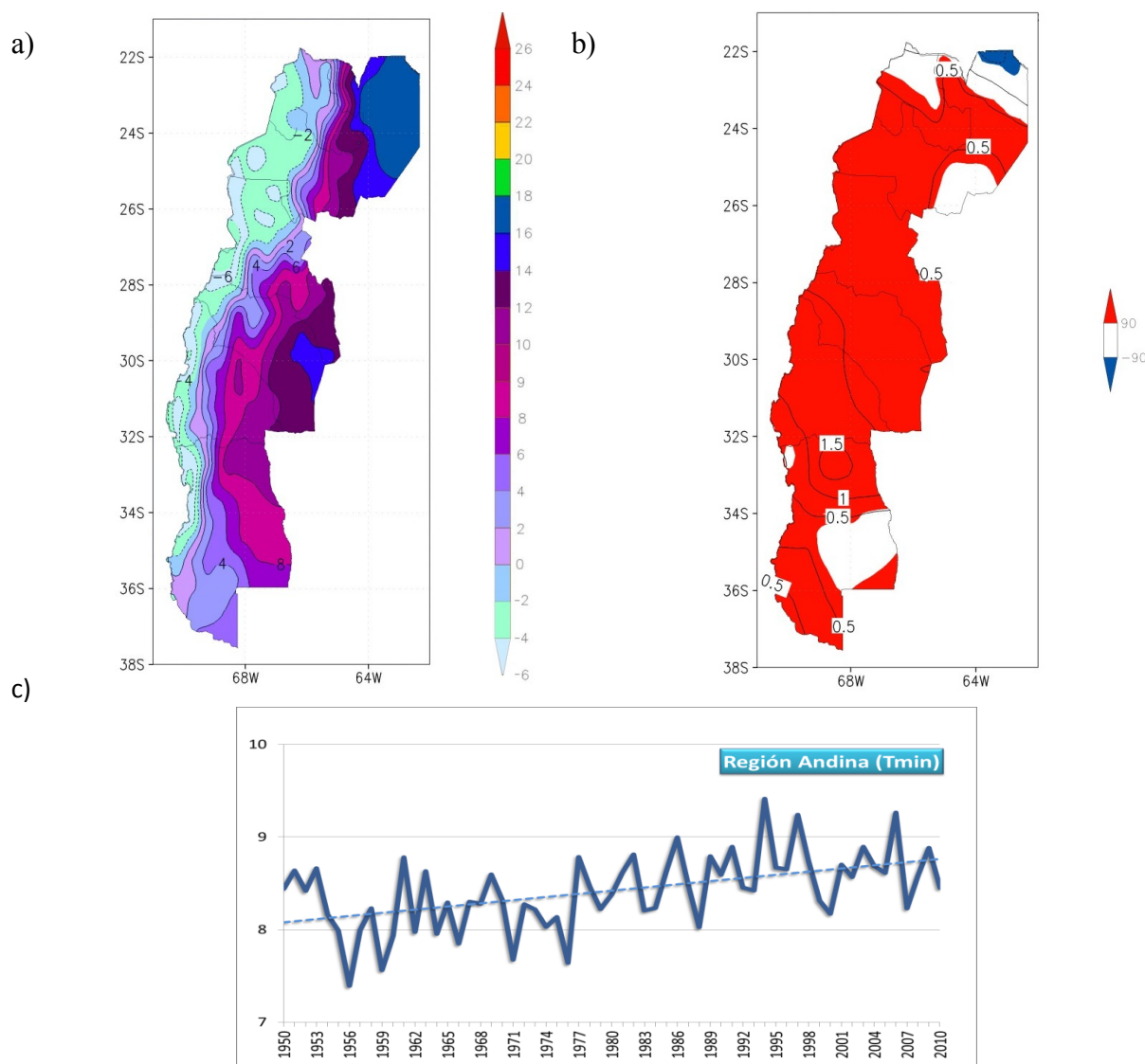


Figura 7.2.1.2: Ídem Figura 7.2.1.1, pero para la temperatura mínima anual ($^{\circ}\text{C}$)

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°C , siendo las provincias de Catamarca y La Rioja las que mayor variación muestran superando 1°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.

		TEMPERATURA MÍNIMA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
Salta – Jujuy	Medio	13,7	9,0	2,5	9,3	8,6
	Cambio	0,7**	0,6*	0,4	0,7**	0,6**
Catamarca - La Rioja	Medio	18,2	11,8	4,3	12,5	11,7
	Cambio	0,7**	0,6	0,5	1,2**	0,8**
Mendoza - San Juan	Medio	11,0	5,1	-1,4	4,9	4,9
	Cambio	0,8**	0,6*	0,5	1,0**	0,7**
REGION ANDES	Medio	13,9	8,3	1,6	8,6	8,1
	Cambio	0,8**	0,6*	0,4	0,9**	0,7**

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.

		TEMPERATURA MAXIMA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
Salta – Jujuy	Medio	26,3	21,8	18,8	24,9	23,0
	Cambio	0,4	0,6	0,8*	1,2**	0,7**
Catamarca - La Rioja	Medio	32,1	24,9	19,0	27,6	25,9
	Cambio	-0,0	-0,2	0,4	1,0**	0,3
Mendoza - San Juan	Medio	25,5	18,5	11,9	19,4	18,8
	Cambio	0,2	-0,0	0,1	0,6*	0,2
REGION ANDES	Medio	27,0	21,4	16,5	23,7	22,3
	Cambio	0,2*	0,2	0,4	0,9**	0,4**

Tabla 7.2.1.3: Ídem Tabla 7.2.1.1, pero para la temperatura máxima

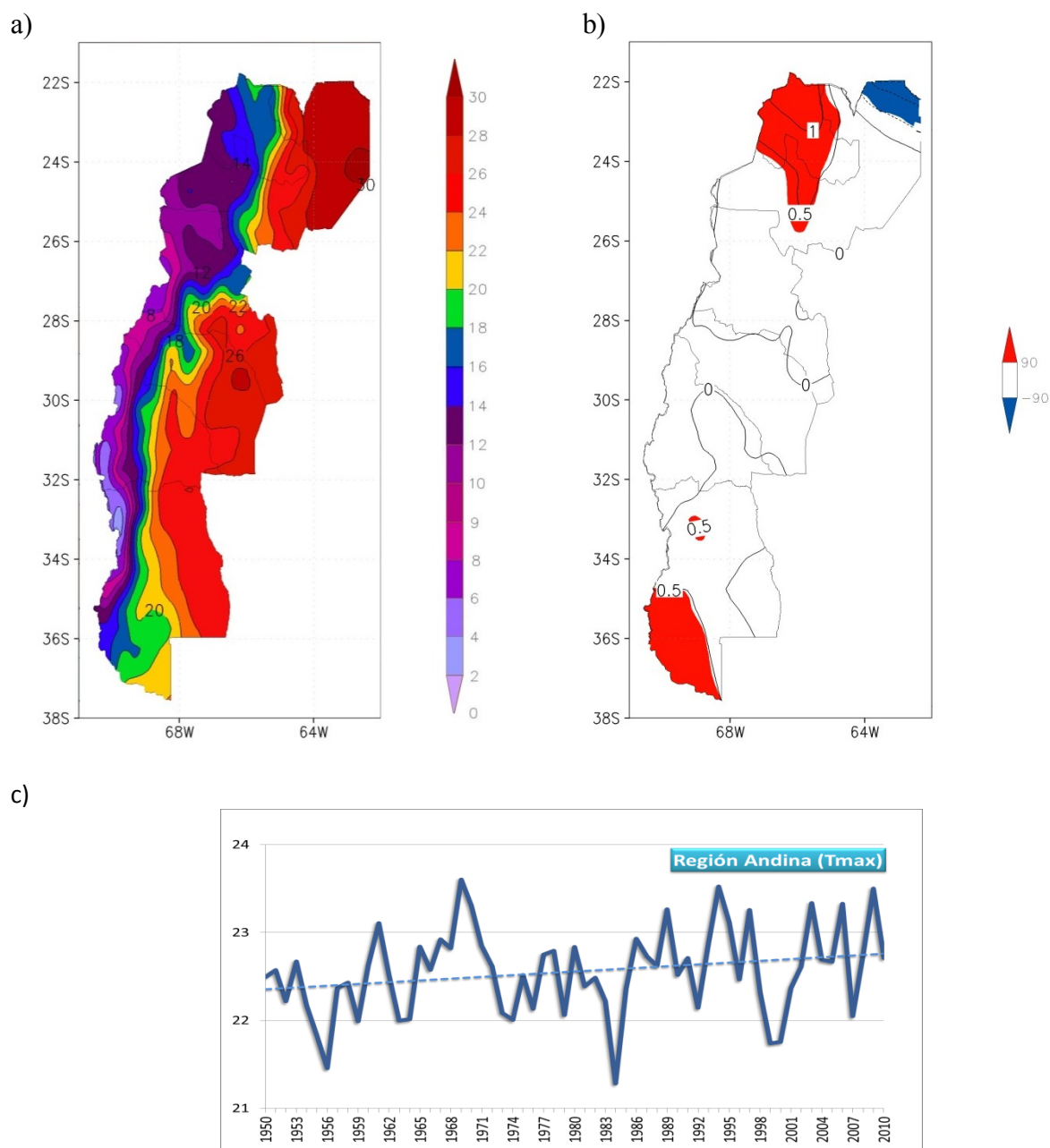


Figura 7.2.1.3: Ídem figura 7.2.1.1, pero para la temperatura máxima anual (°C)

Los incrementos en las temperaturas máximas se deben principalmente a los aumentos significativos (al 95% de confianza) en primavera, superiores a 0,9°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°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.

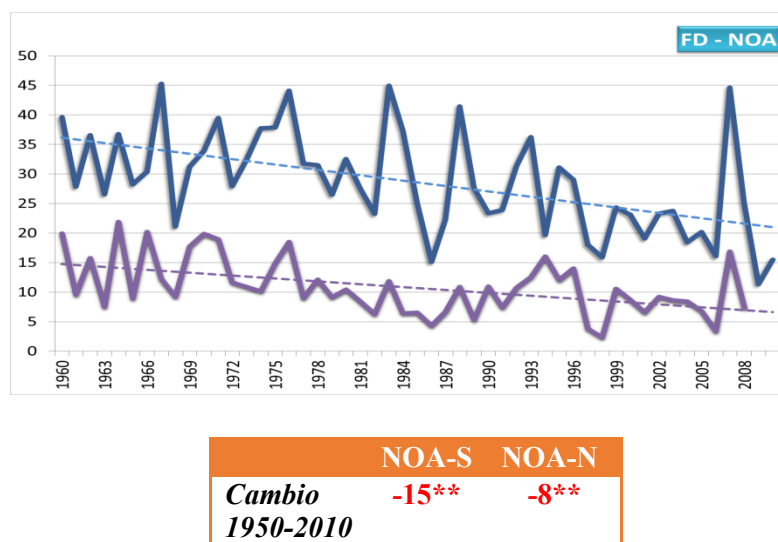


Figura 7.2.1.4: Promedio regional del número de días con heladas definido como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue menor a 0°C y cuadro por subregión. NOA-S en azul y NOA-N en violeta. * al 90% de confianza, ** al 95% de confianza

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.

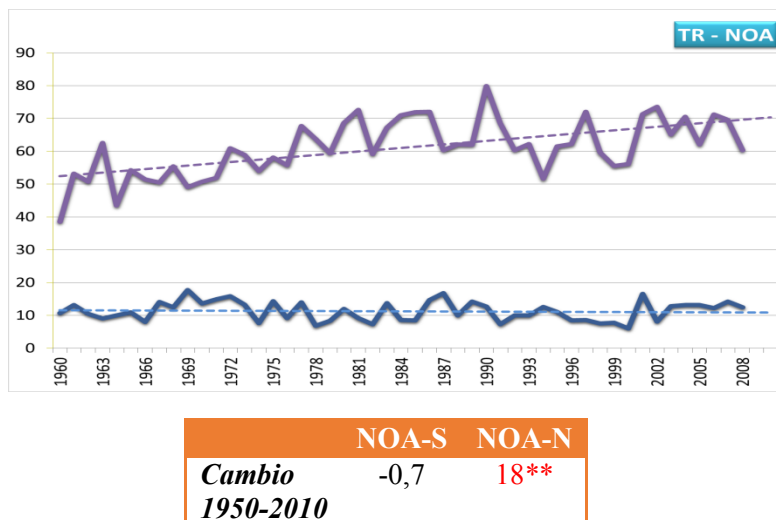


Figura 7.2.1.5: Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el número de noches tropicales definido como número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20°C (TR)

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”.

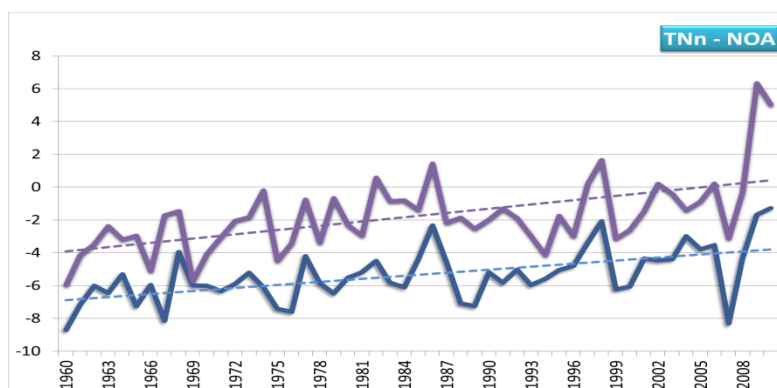
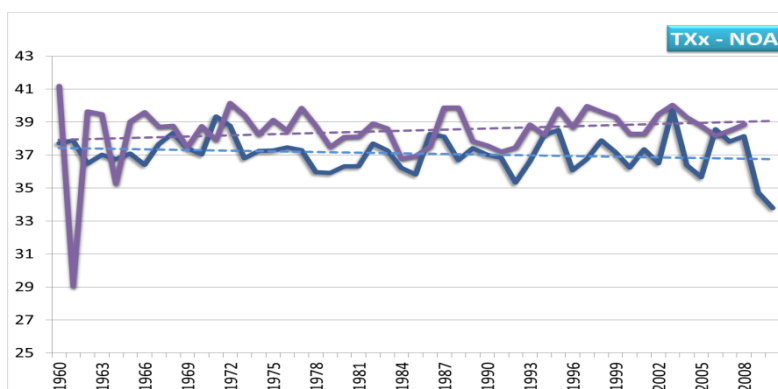


Figura 7.2.1.6: Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima (TNn) en °C

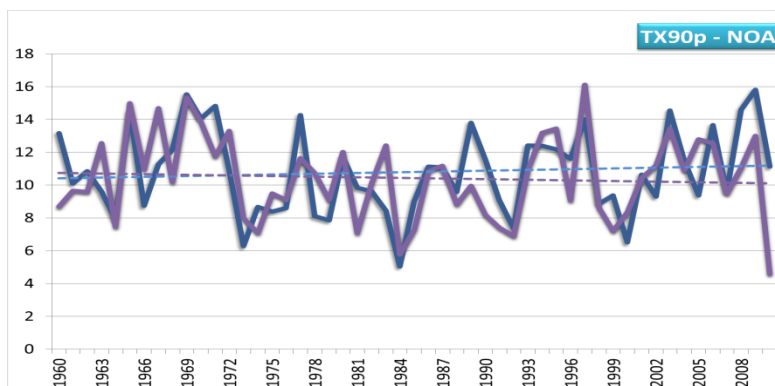
En la evolución temporal de TNn se evidencia que la tendencia tiene un comportamiento distinto antes y después de los 80; las primeras décadas tienen una tendencia definida (positiva y más marcada en NOA-N) y las últimas denotan una oscilación cuasi-decadal superpuesta con una tendencia decreciente en 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
Cambio	-0,6	1
1950-2010		

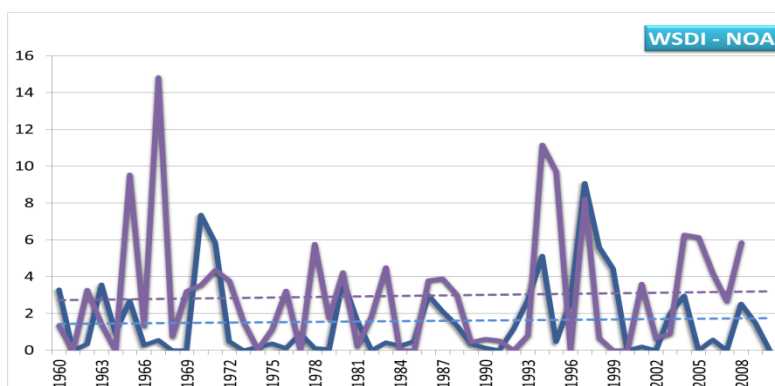
Figura 7.2.1.7: Ídem Figura 7.2.1.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima (TX) en °C

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
Cambio	0,7	-0,6
1950-2010		

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
Cambio	0,3	0,5
1950-2010		

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.

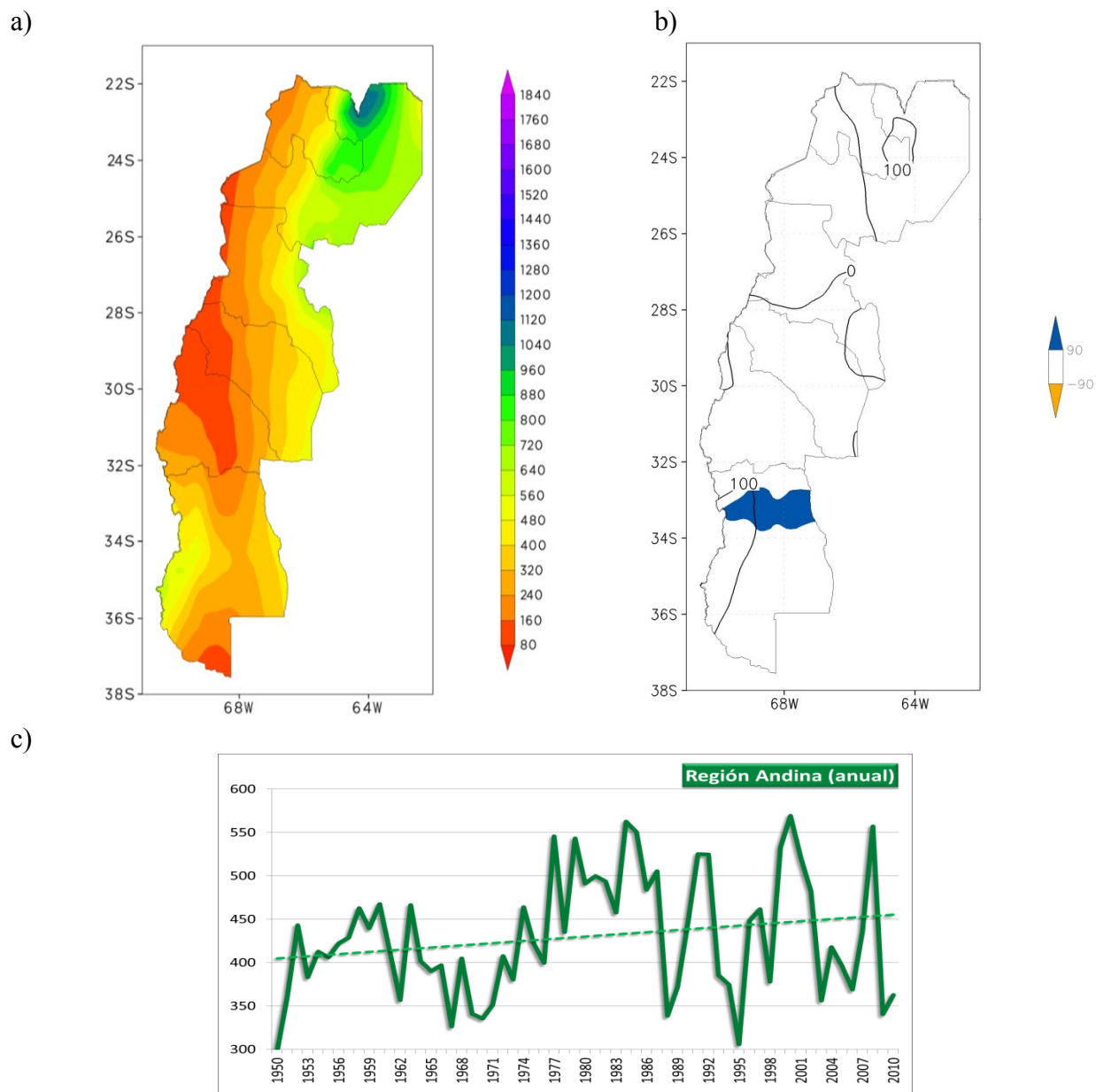
7.2.2 Precipitación

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.

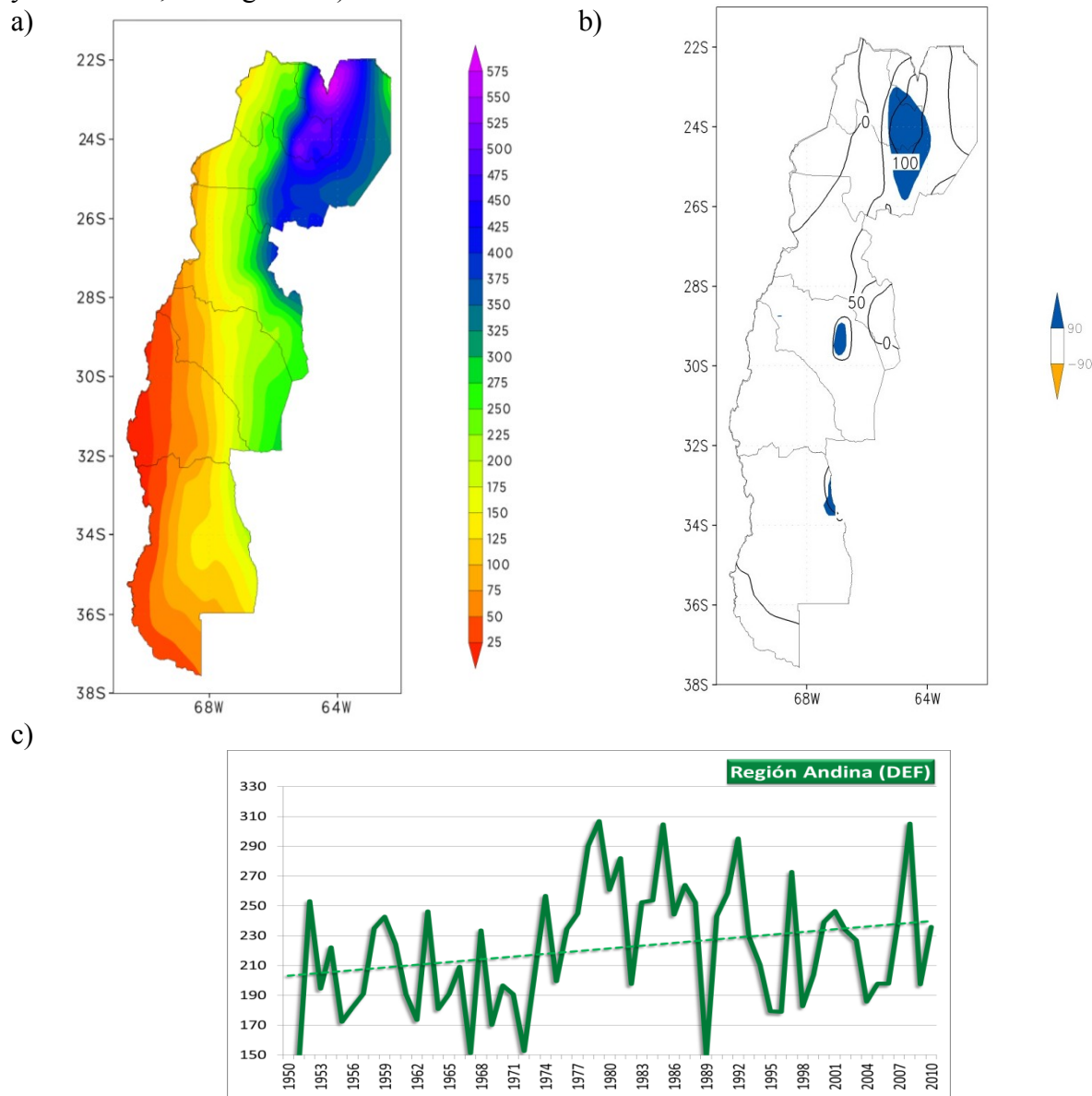


Anual	Salta - Jujuy	Catamarca - La Rioja	Mendoza - San Juan	REGION ANDES
CAMBIO	31,7	64,9	56,6**	48,4

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.

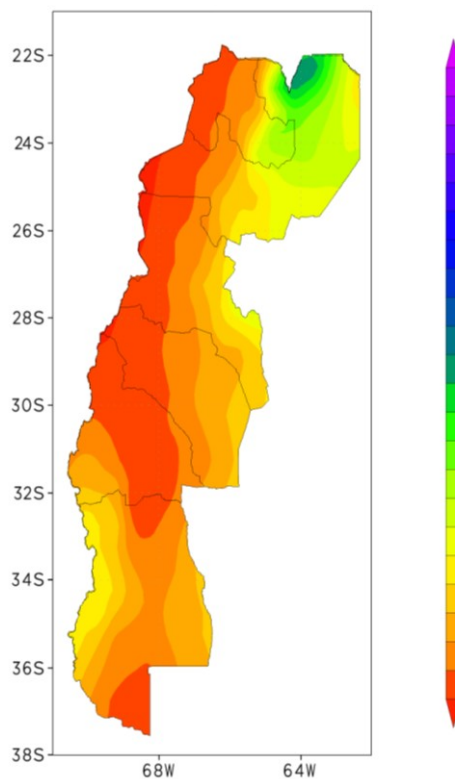
En el caso de las precipitaciones de verano se observan cambios con las mismas características que en el caso anual para el período 1960-2010, con aumentos sobre todo en el Chaco jujeño, significativos al 90% de confianza, Figura 7.2.2.2b. También las series de verano presentan un salto a mediados de 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.

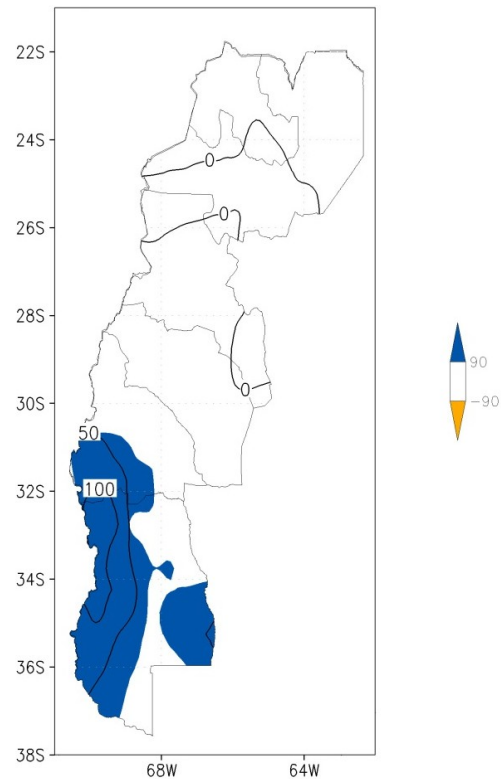
En el invierno, para el período 1960-2010, se observan tendencias negativas en casi la totalidad de la región, a excepción de la provincia de Mendoza, con valores significativos al 90% de confianza, Figura 7.2.2.4b.

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.

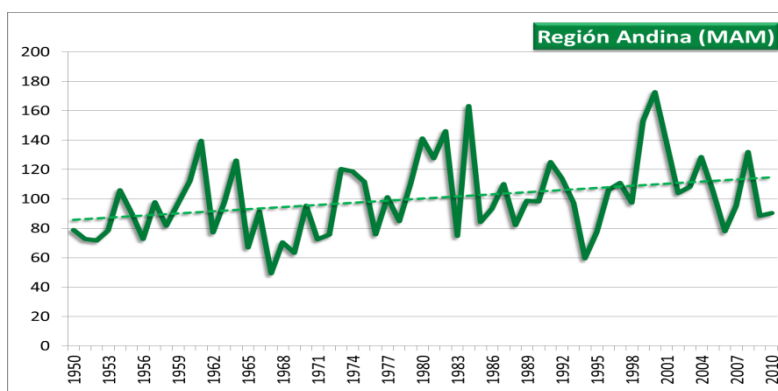
a)



b)



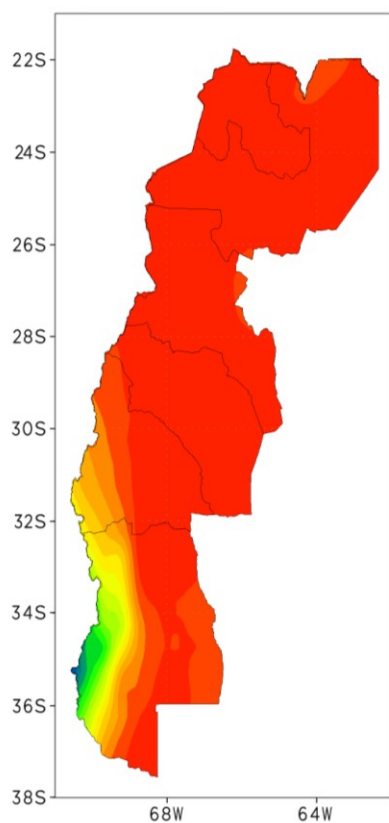
c)



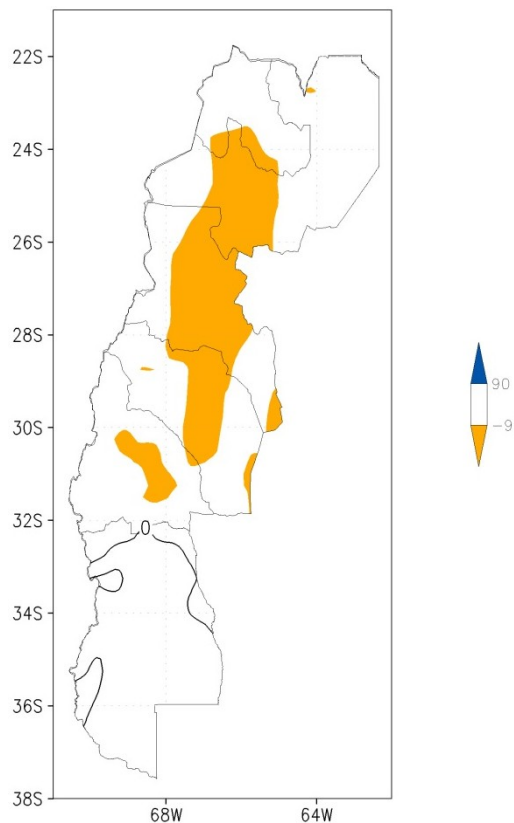
MAM	Salta - Jujuy	Catamarca - La Rioja	Mendoza - San Juan	REGION ANDES
CAMBIO	28,0*	28,9**	31,6**	29,5**

Figura 7.2.2.3 Ídem Figura 7.2.2.1, pero para el otoño

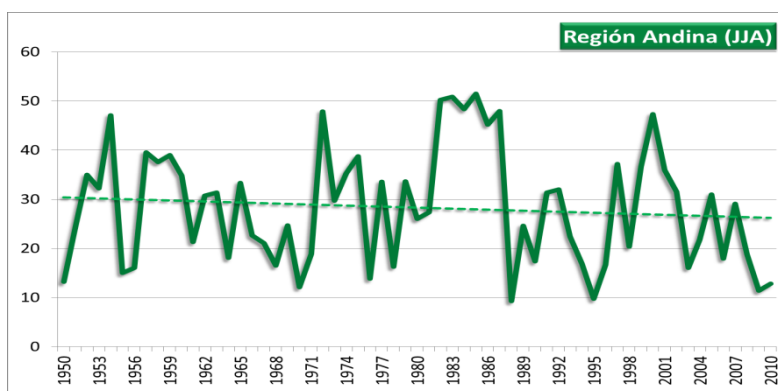
a)



b)



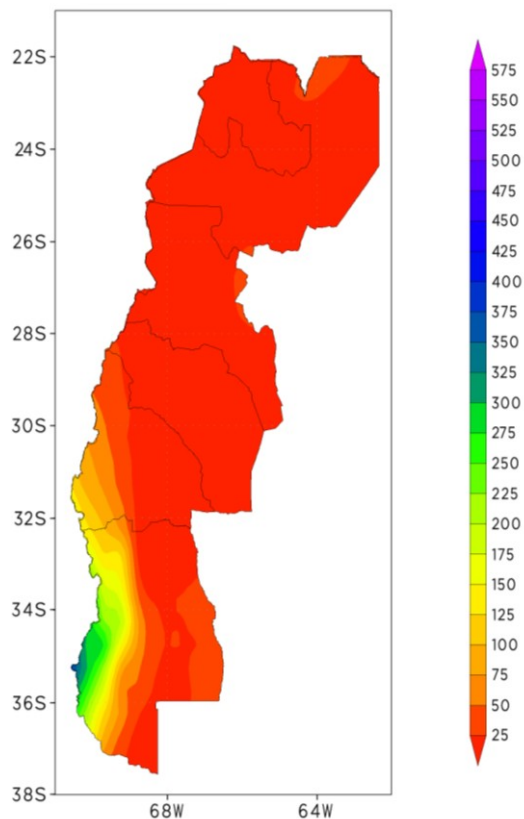
c)



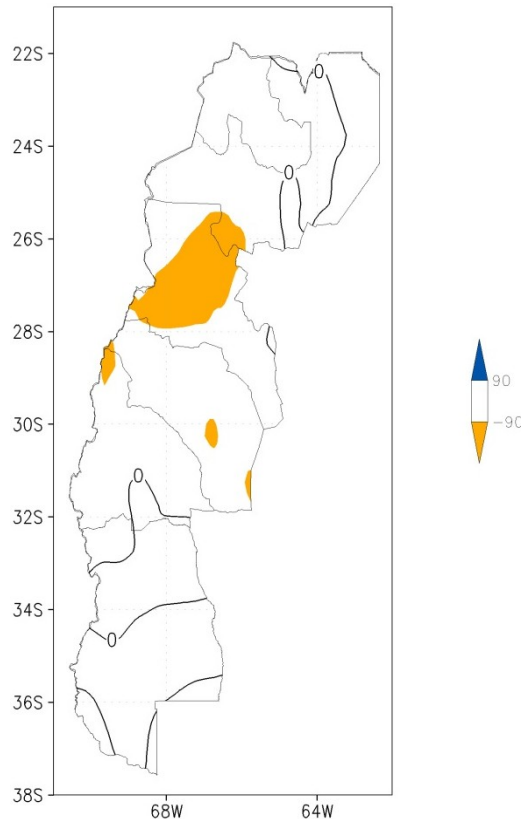
JJA	Salta - Jujuy	Catamarca - La Rioja	Mendoza - San Juan	REGION ANDES
CAMBIO	-9,4**	-7,0*	3,8	-4,3

Figura 7.2.2.4: Ídem Figura 7.2.2.1, pero para el invierno

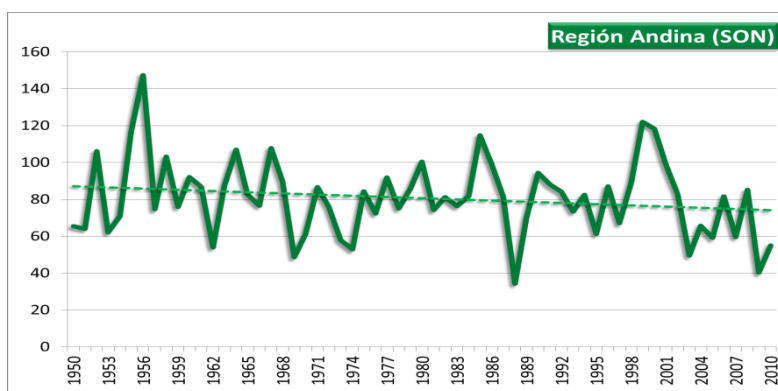
a)



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.

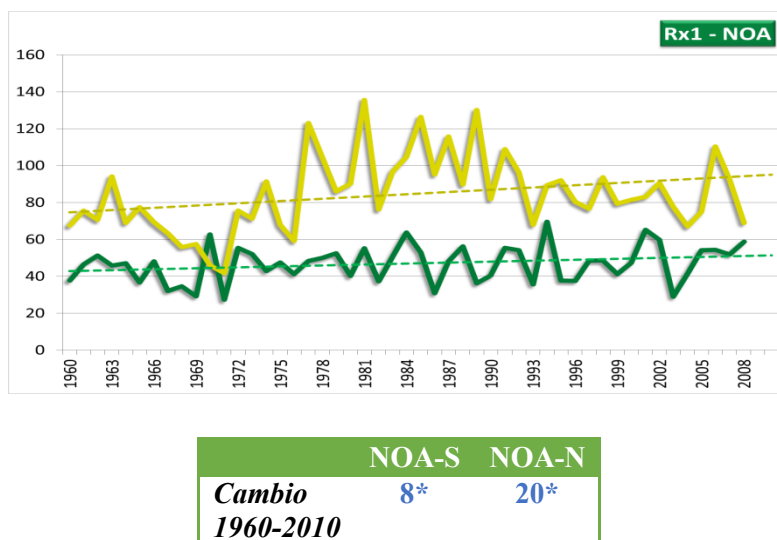


Figura 7.2.2.6: Promedios regionales de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) en mm y cuadro de cambios por subregión. NOA-S en verde, NOA –N en amarillo. * al 90% de confianza, ** al 95% de confianza

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.

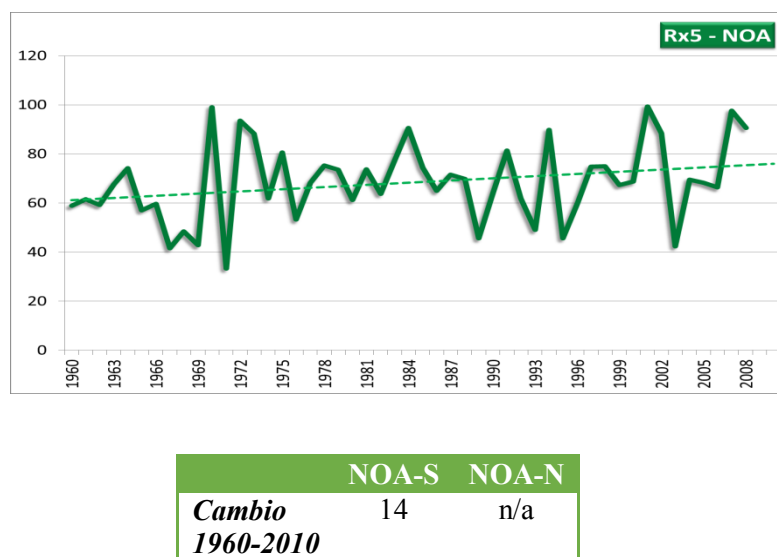


Figura 7.2.2.7: Ídem Figura 7.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) en mm en NOA-S.

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.

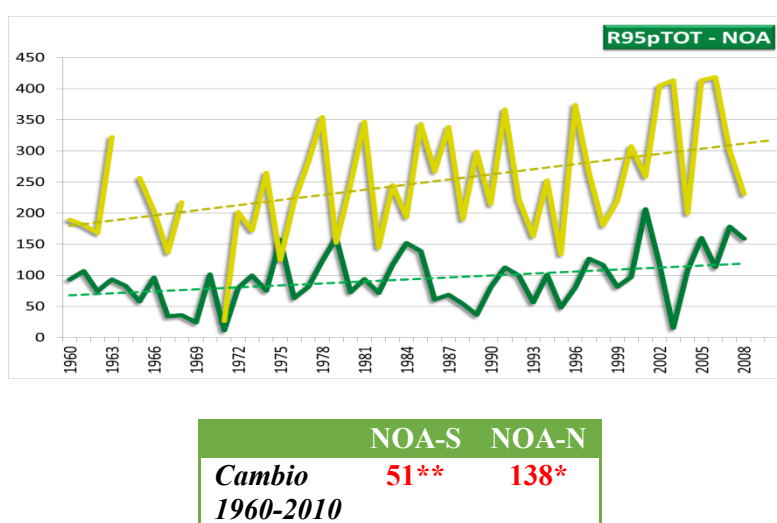


Figura 7.2.2.8: Ídem figura 7.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT) en mm. NOA-S en verde, NOA –N en amarillo.

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.

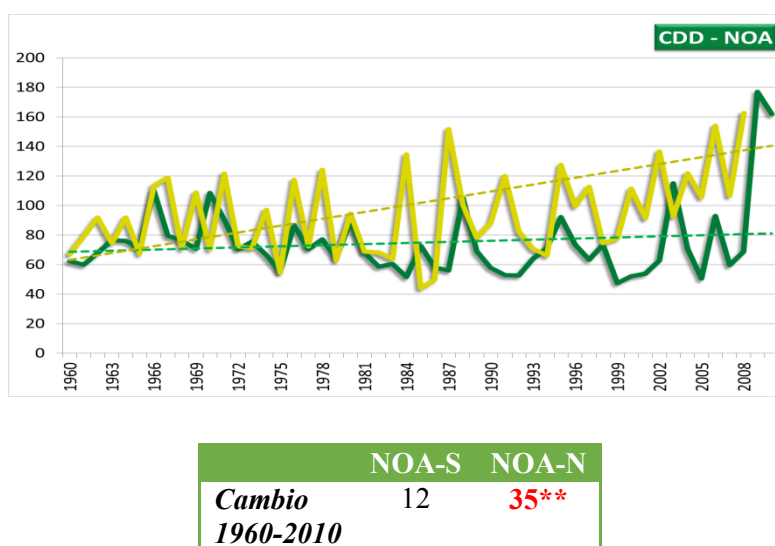


Figura 7.2.2.9: Ídem Figura 7.2.2.6, pero para la máxima longitud de racha seca definida como el número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD). NOA-S en verde, NOA –N en amarillo

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.

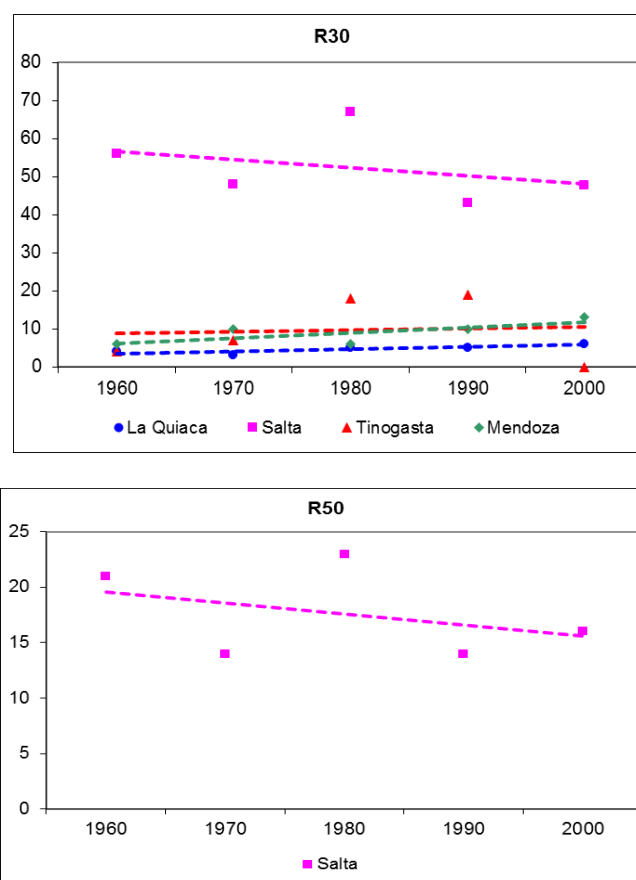


Figura 7.2.2.10: a) Series de R30 mm (en días por década) para La Quiaca; Salta Aero; Tinogasta; Mendoza Aero. B) Serie de R50 mm (en días por década) para Salta Aero

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.

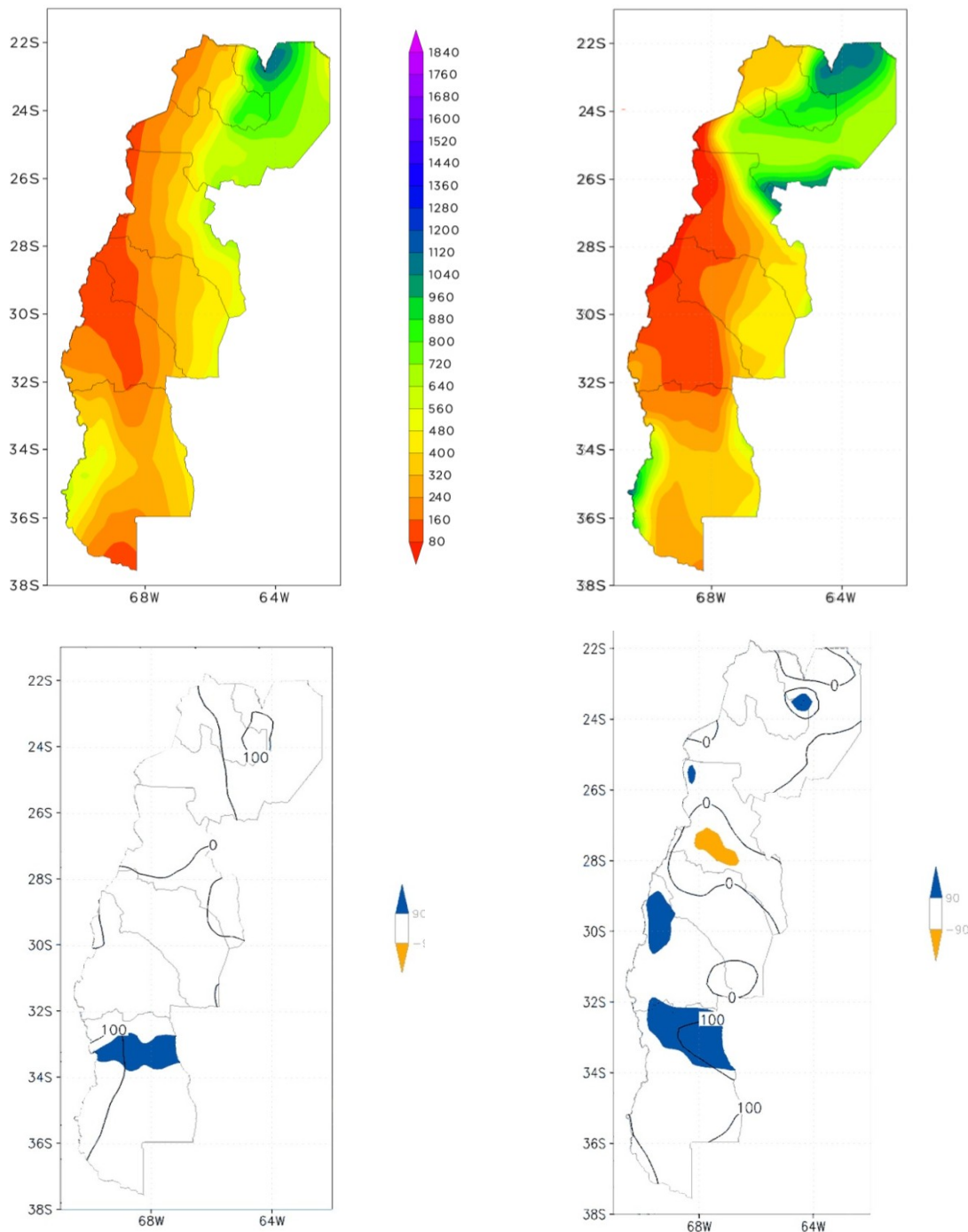


Figura 7.2.3.1: a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960/2010, obtenido a partir de CRU, b) ídem a) pero obtenido a partir de GPCC; c) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, obtenido a partir de CRU, d) ídem c) pero obtenido a partir de GPCC

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.

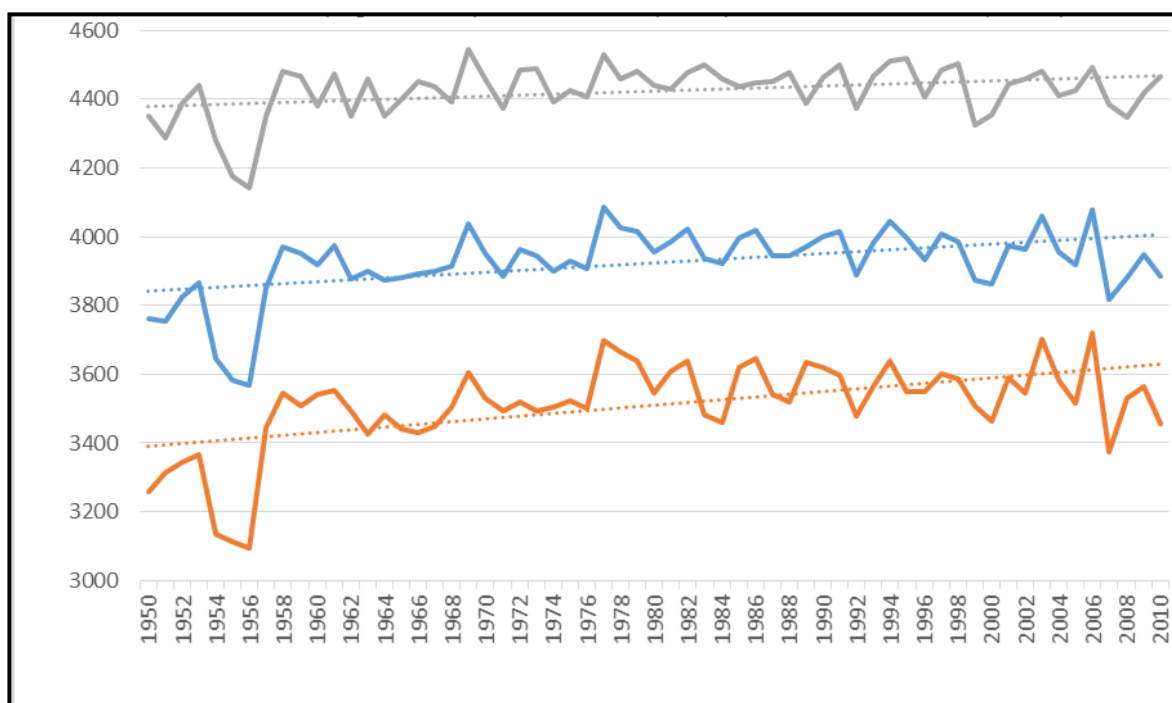
La Tabla 7.2.4.1 muestra aumentos significativos en todas las regiones y estaciones del año, excepto para Salta y Jujuy en primavera. Estos resultados van en la misma dirección que los documentados en la Segunda Comunicación Nacional (Barros y otros, 2006), aunque en aquél caso el énfasis estuvo en el 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.

		ISOTERMA DE 0°C 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
Salta – Jujuy	<i>Medio</i>	4690	4485	4130	4396	4423
	<i>Cambio</i>	98**	107**	109*	72	96**
Catamarca - La Rioja	<i>Medio</i>	4323	4014	3368	3759	3859
	<i>Cambio</i>	161**	172**	162**	164**	164**
Mendoza - San Juan	<i>Medio</i>	4086	3713	2929	3345	3508
	<i>Cambio</i>	183**	210**	322**	280**	252**
REGION ANDES	<i>Medio</i>	4363	4091	3509	3861	3955
	<i>Cambio</i>	144**	160**	201**	171**	170**

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
PROMEDIO	3508	4423
CAMBIO	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
CAMBIO 2015-2039	260	221	236
CAMBIO 2075-2099	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.

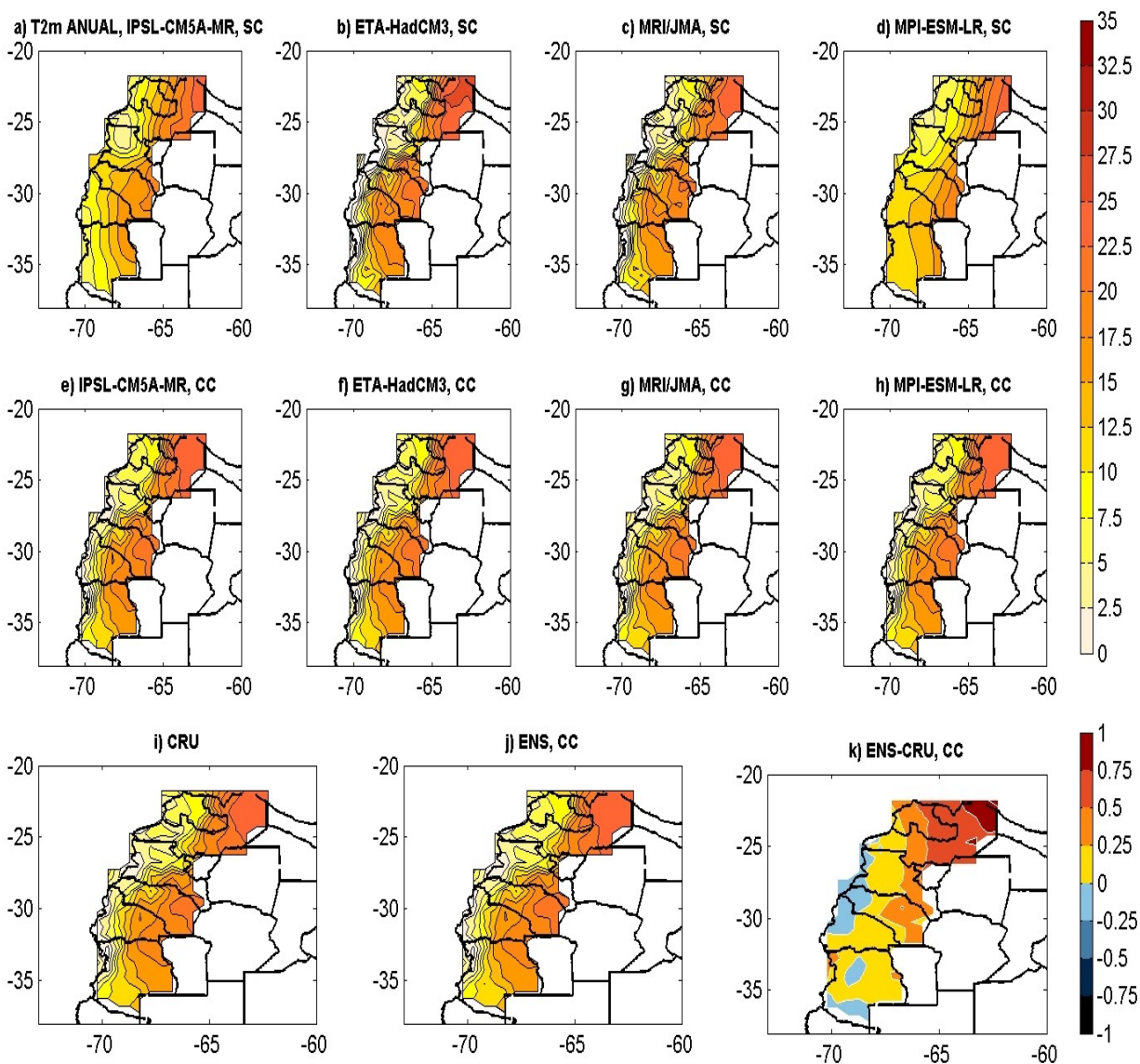


Figura 7.3.1: Validación de la temperatura media anual para la región Andes. 1976/1990 (Excepto para el modelo MRI que es 1979/1990). Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección, Panel inferior, valores observados según CRU, ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU

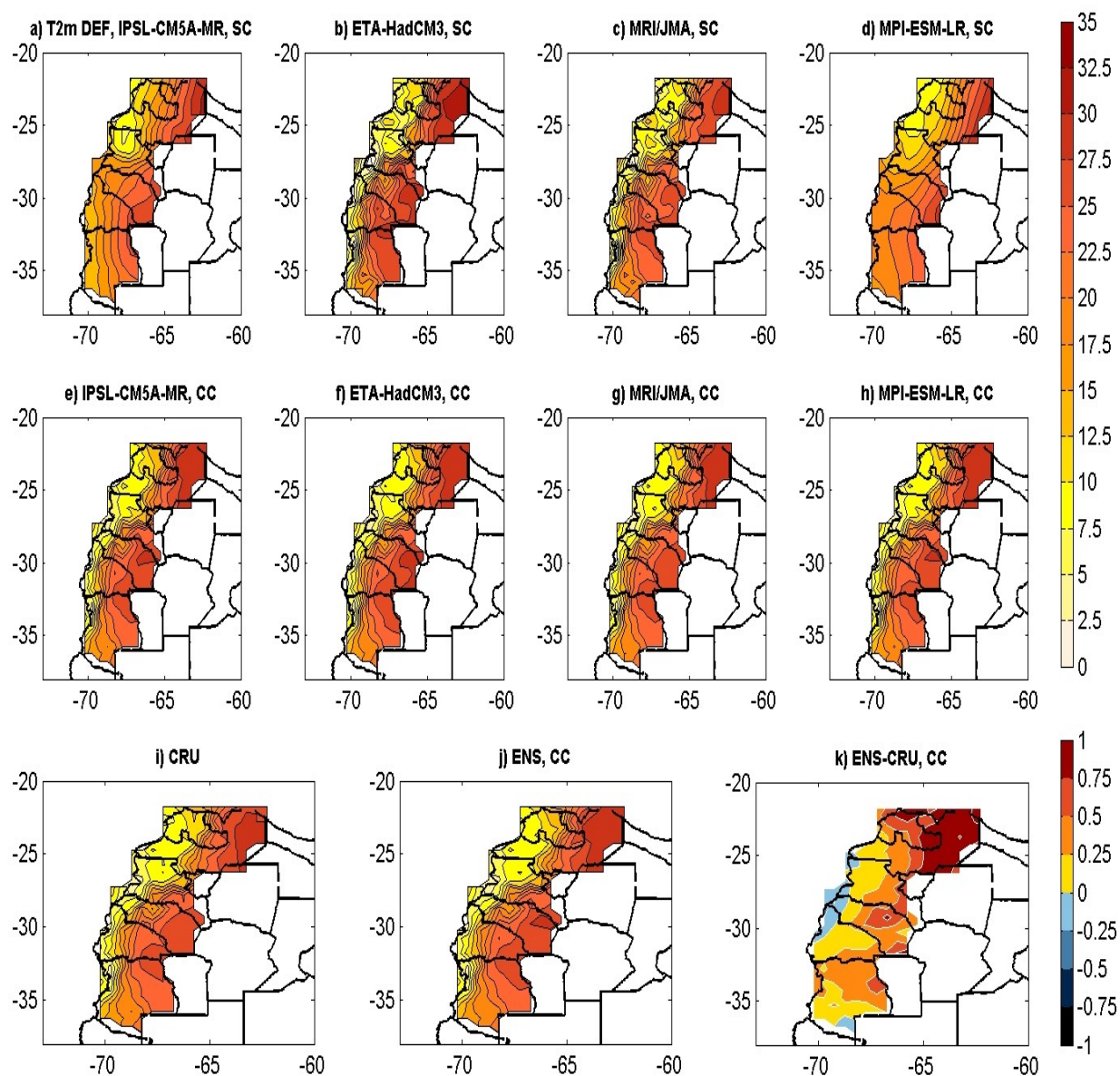


Figura 7.3.2: Ídem Figura 7.3.1, pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)

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.

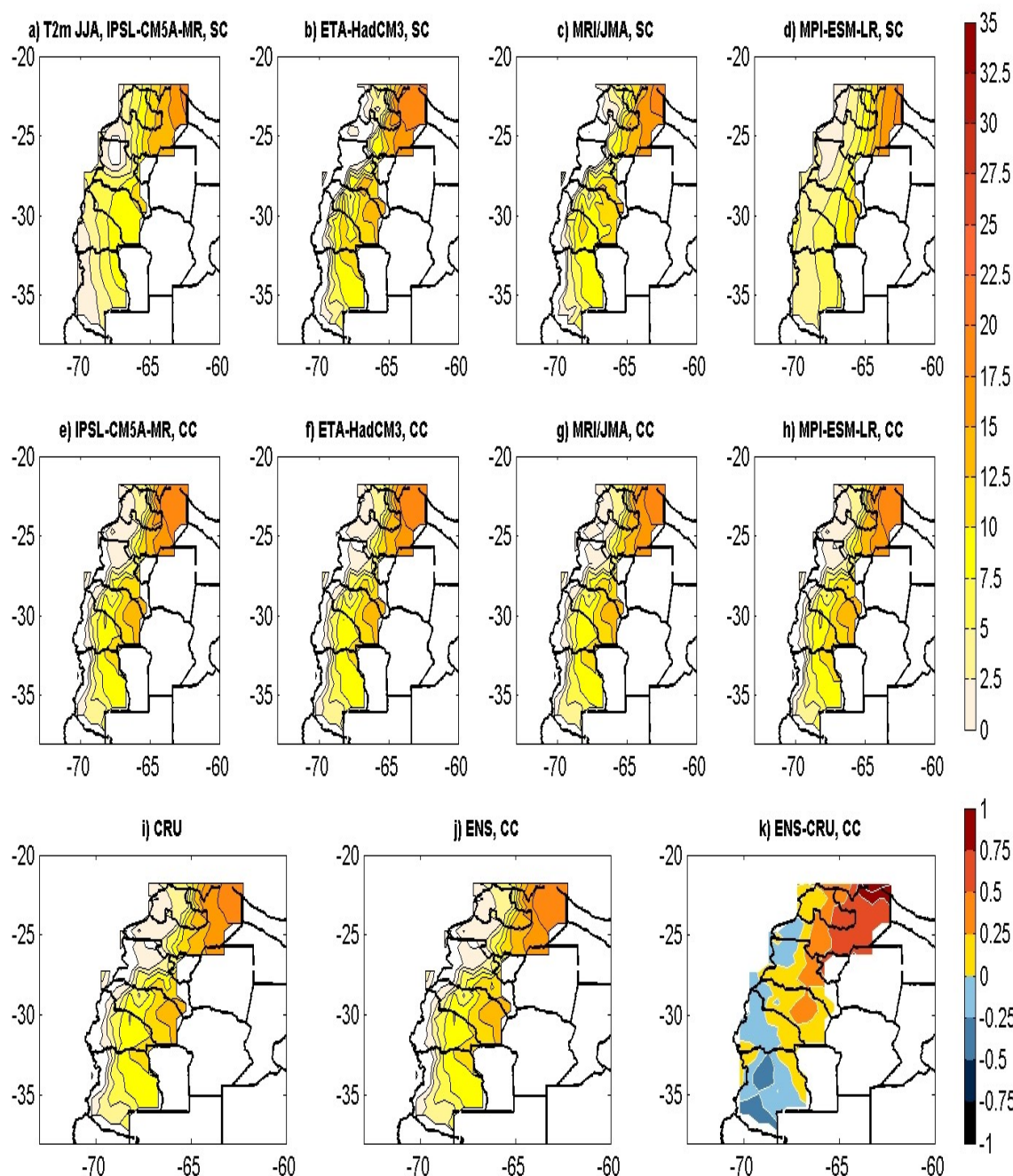


Figura 7.3.3: Ídem Figura 7.3.1, pero para la temperatura del invierno (junio, julio y agosto)

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.

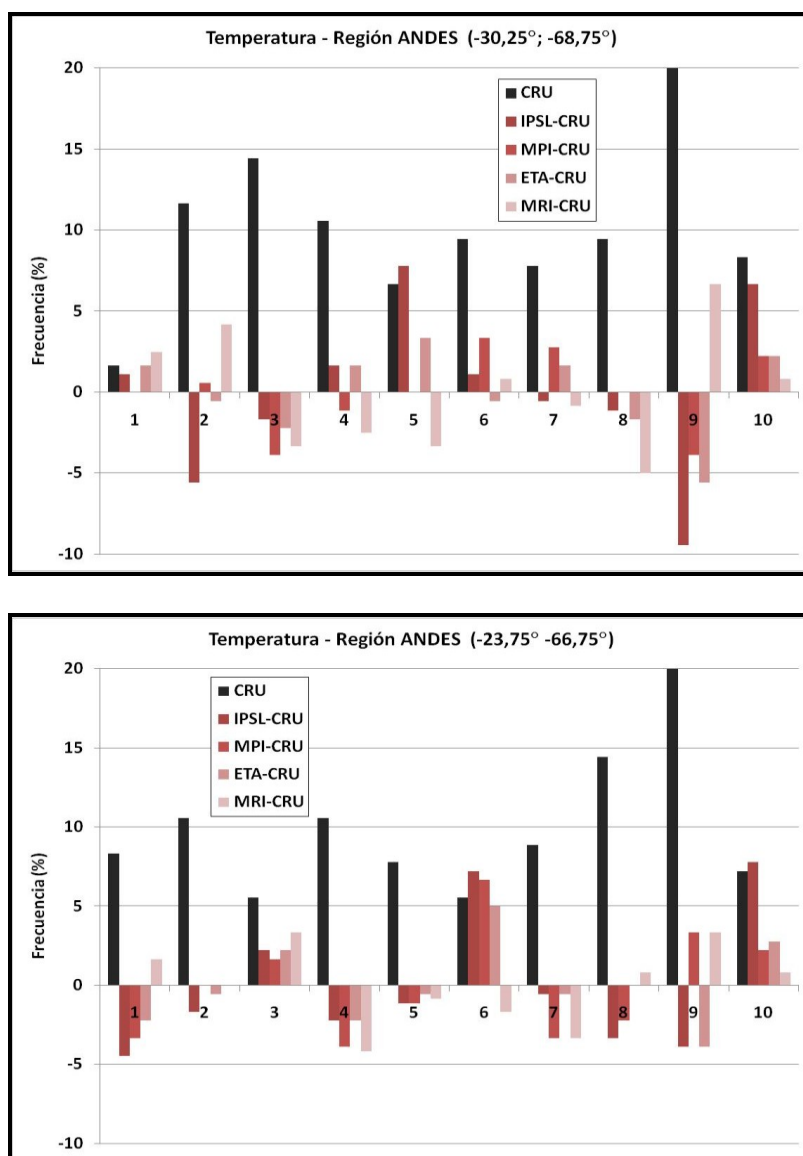


Figura 7.3.4: Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Andes. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez 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.

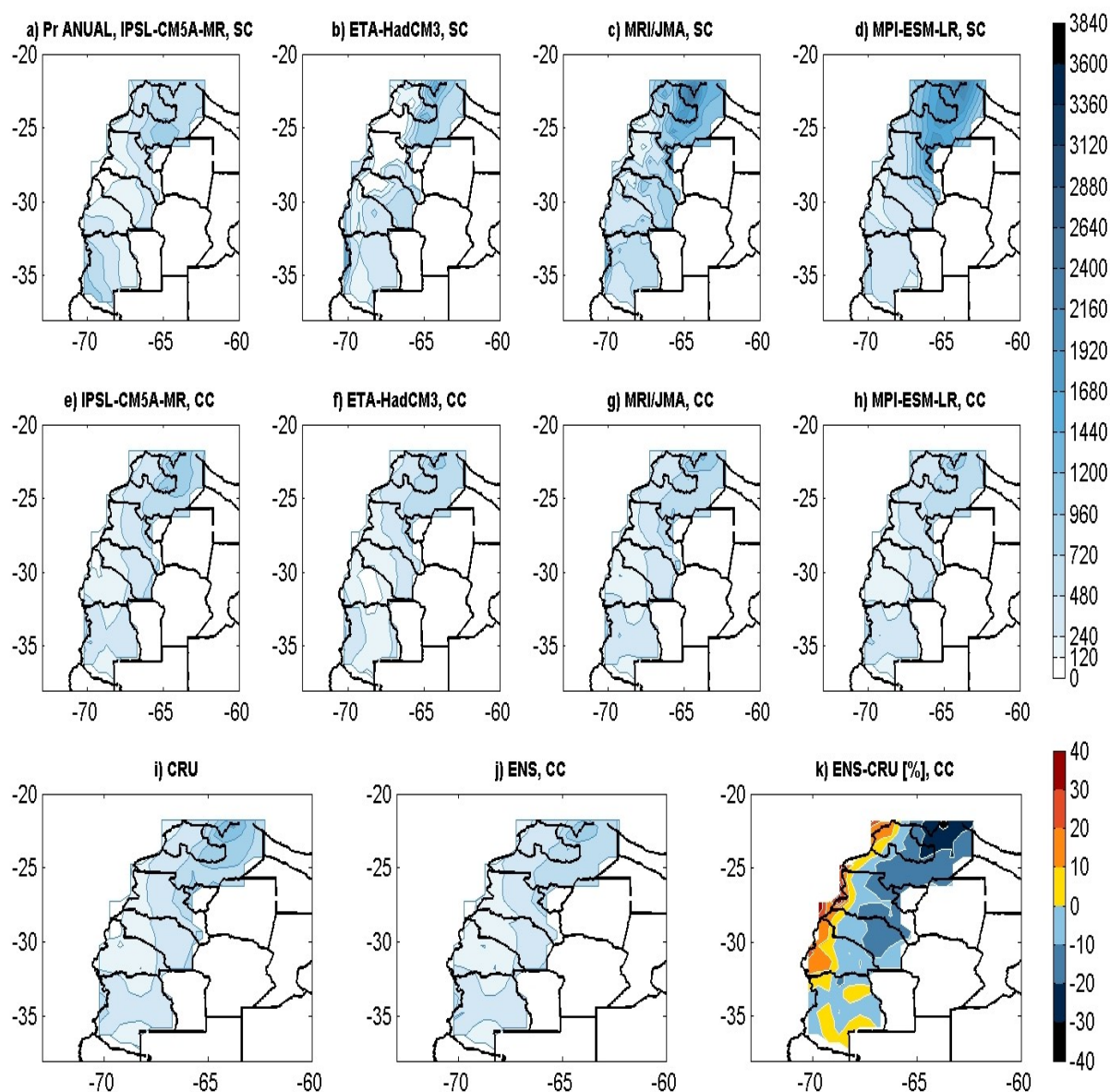


Figura 7.3.5: Ídem Figura 7.3.1, pero para la precipitación de la región Andes

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.

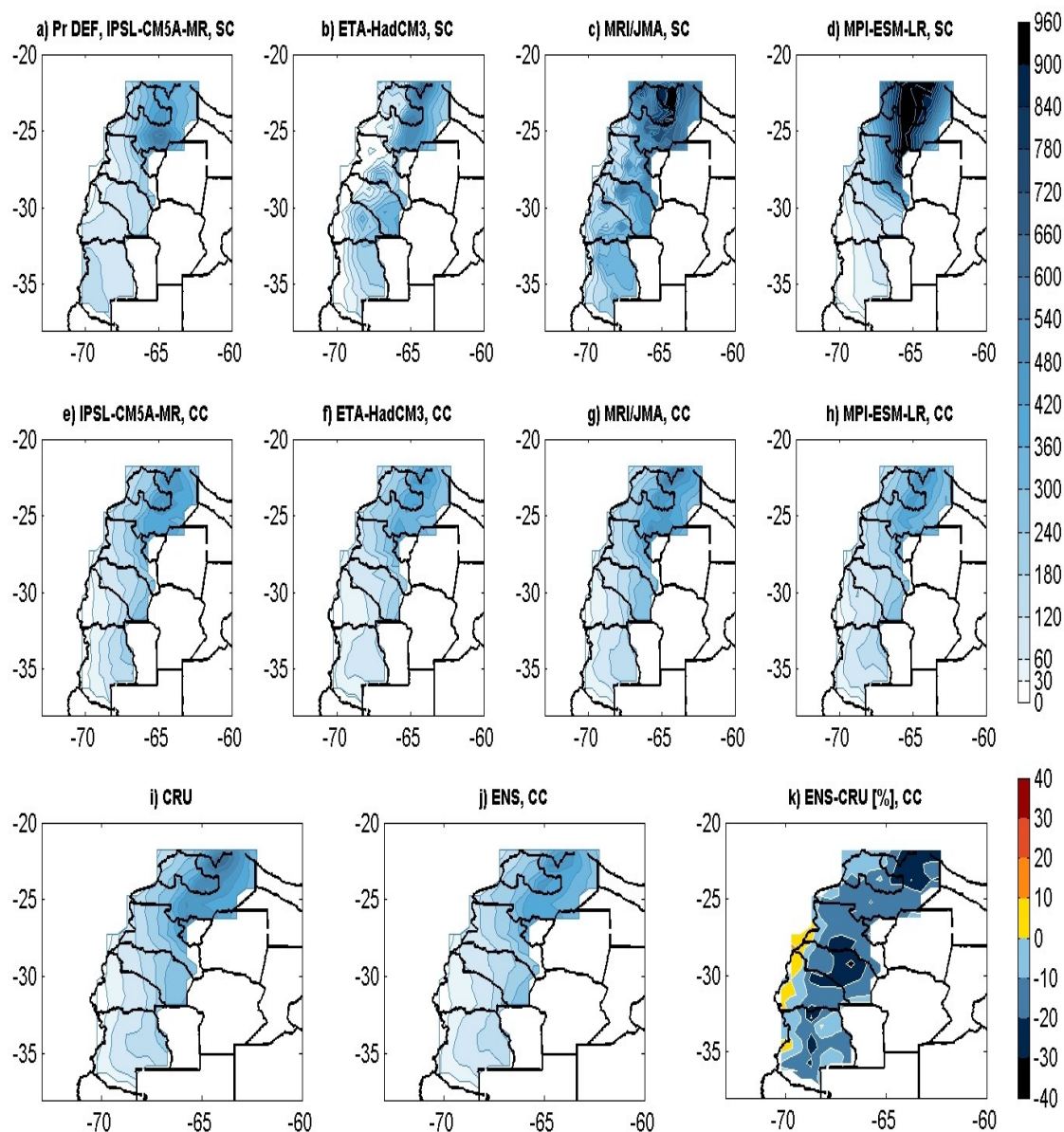


Figura 7.3.6: Ídem Figura 7.3.5, pero para la precipitación del verano (diciembre, enero y febrero)

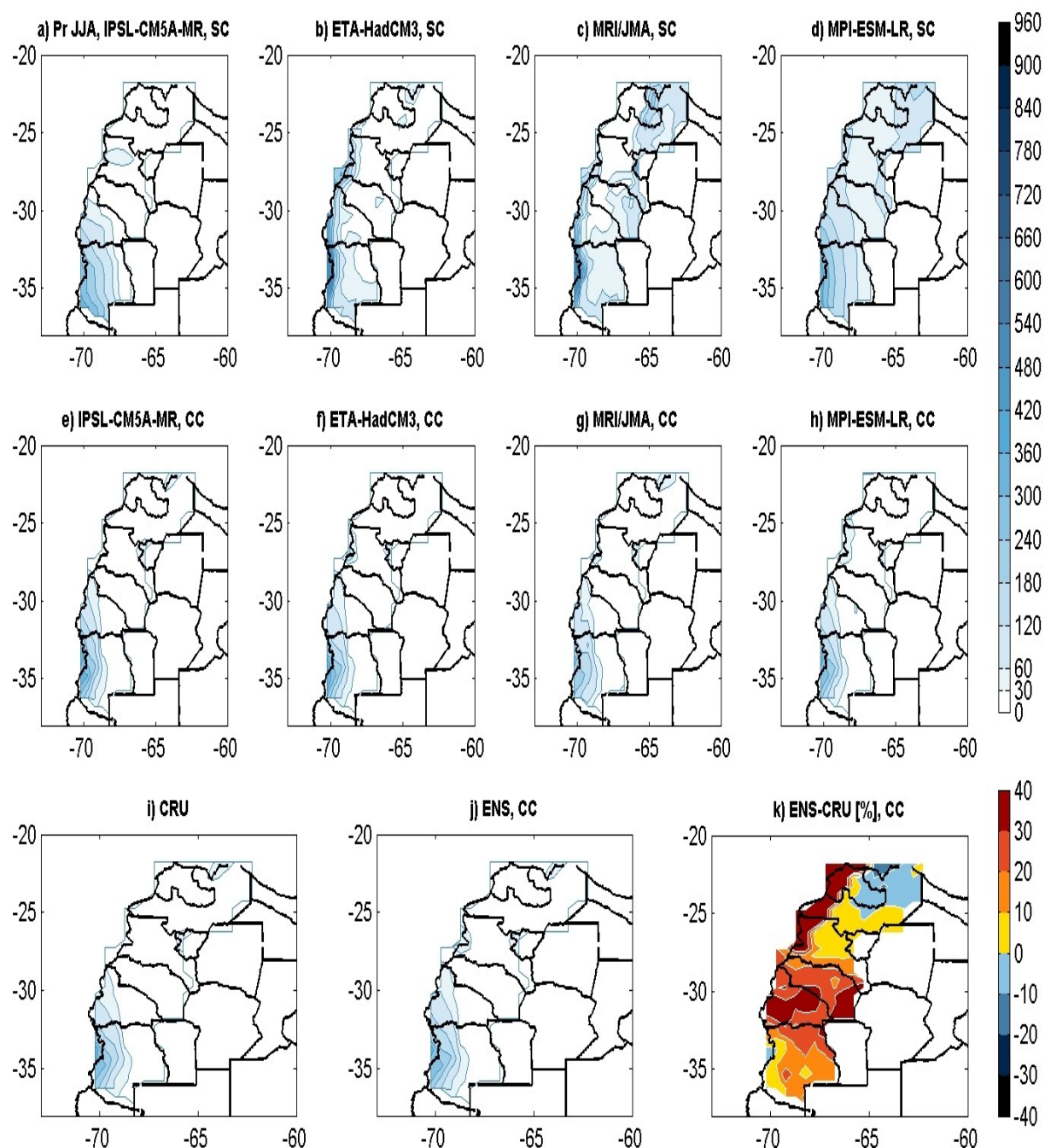


Figura 7.3.7: Ídem Figura 7.3.5, pero para la precipitación del invierno (junio, julio y agosto)

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.

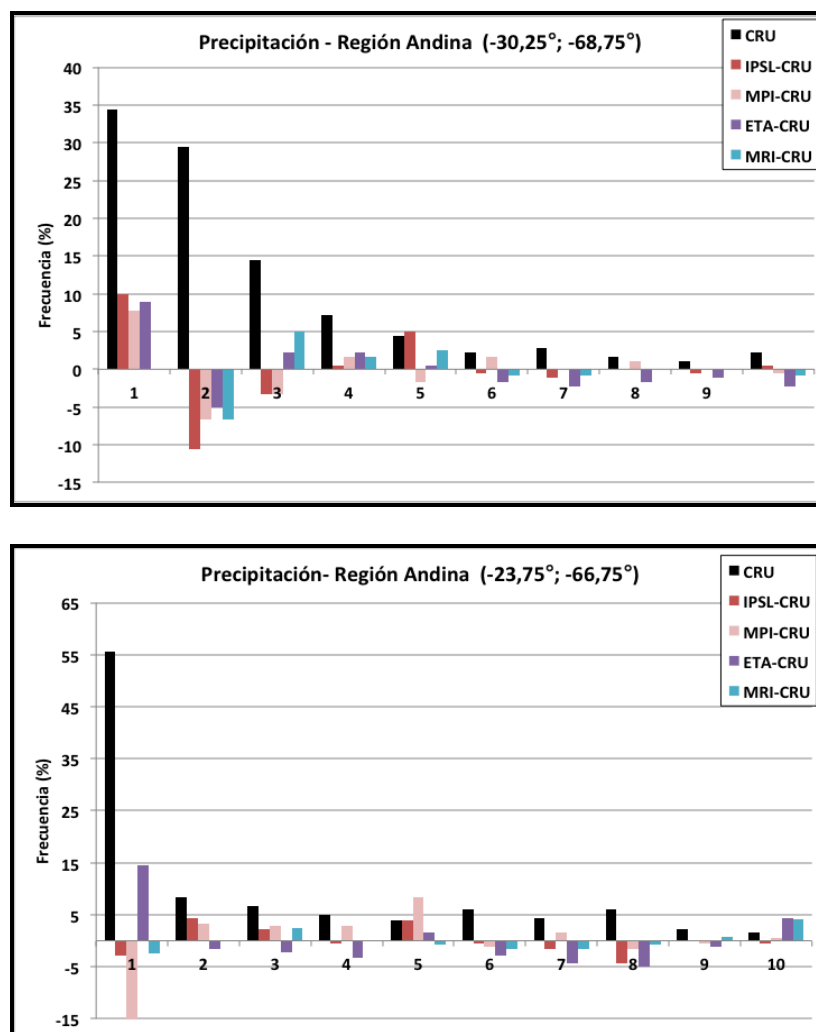


Figura 7.3.8: Ídem Figura 7.3.4, pero para la precipitación de la región Andes

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.

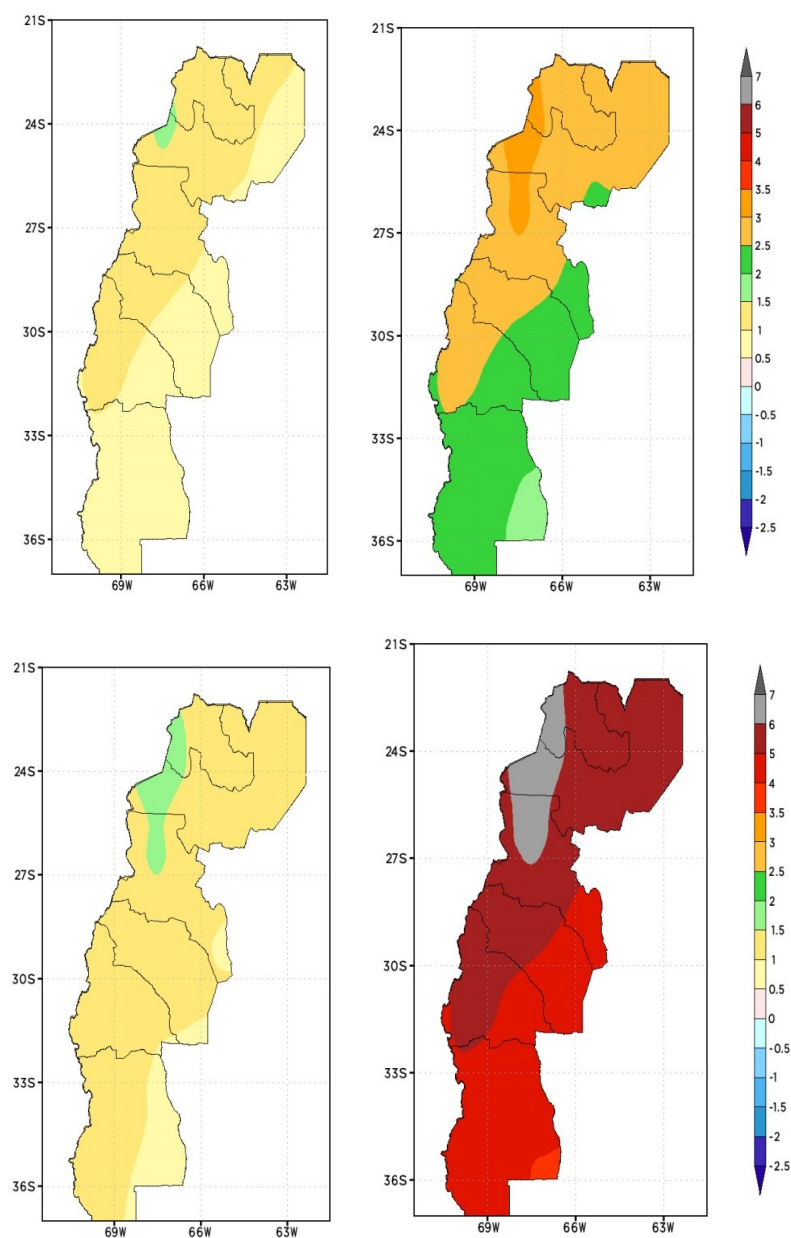


Figura 7.4.1.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL_CM5A-MR y MPI.ESM-LR. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

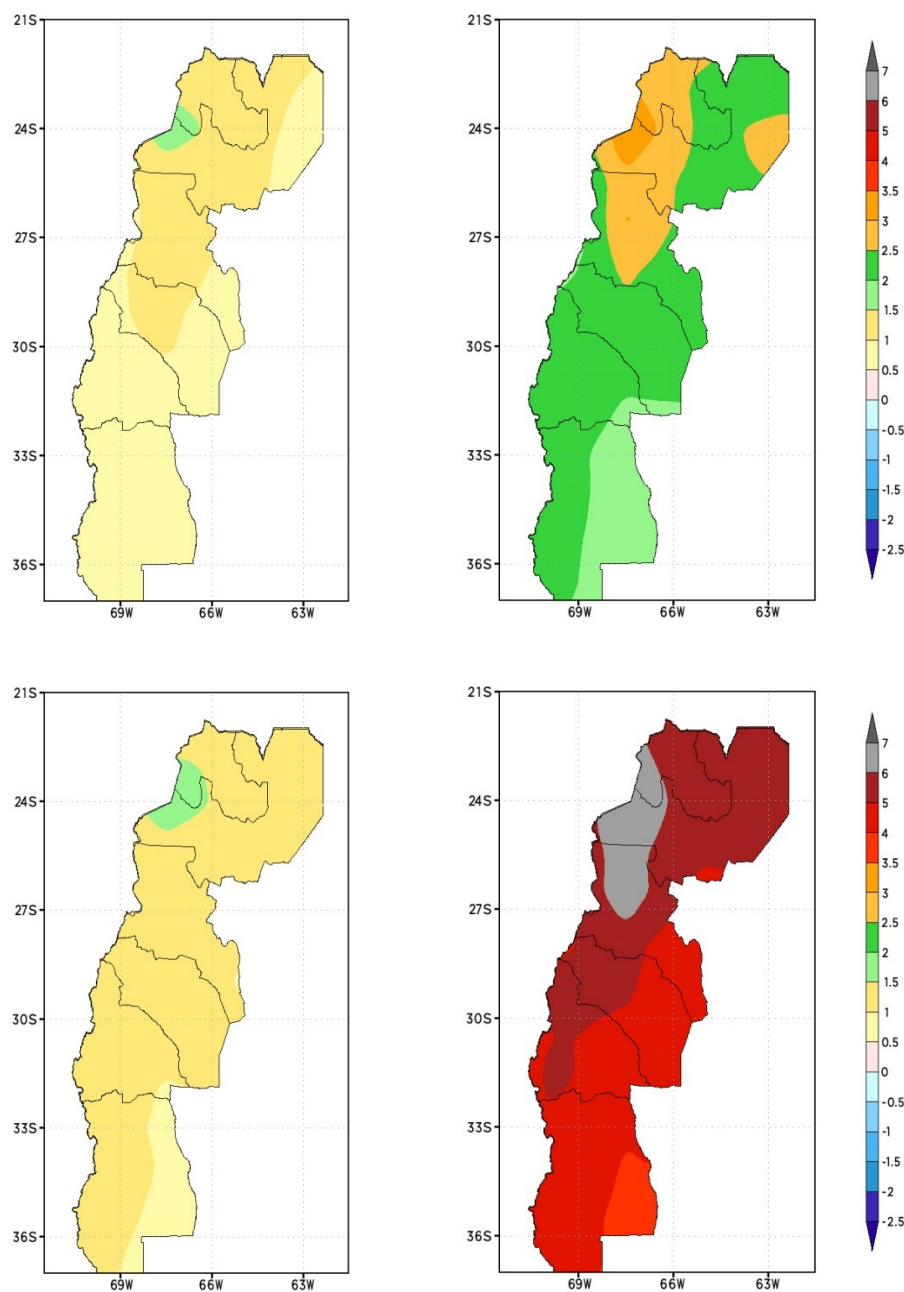


Figura 7.4.1.2: *Ídem figura 7.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual*

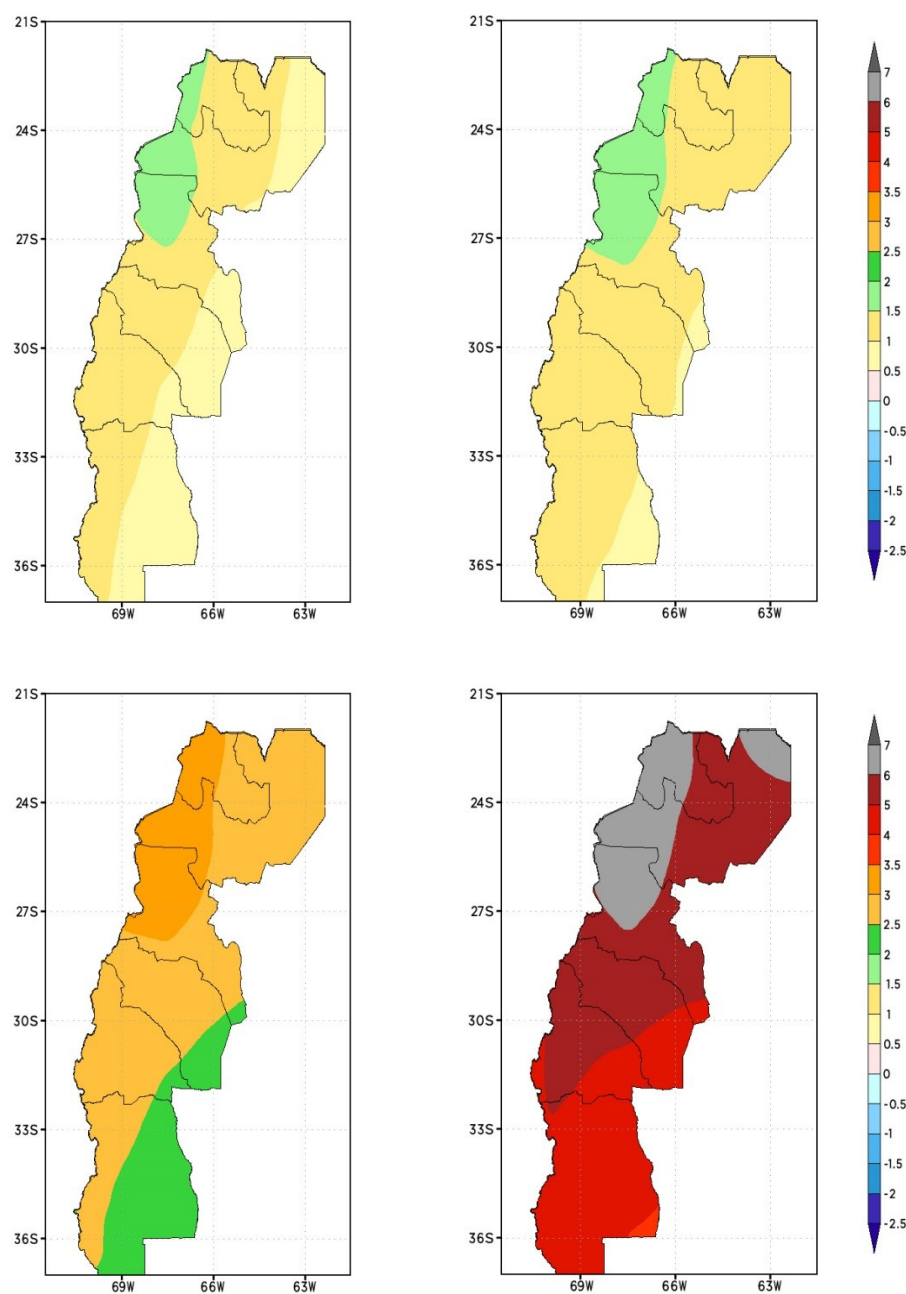


Figura 7.4.1.3: Ídem figura 7.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual

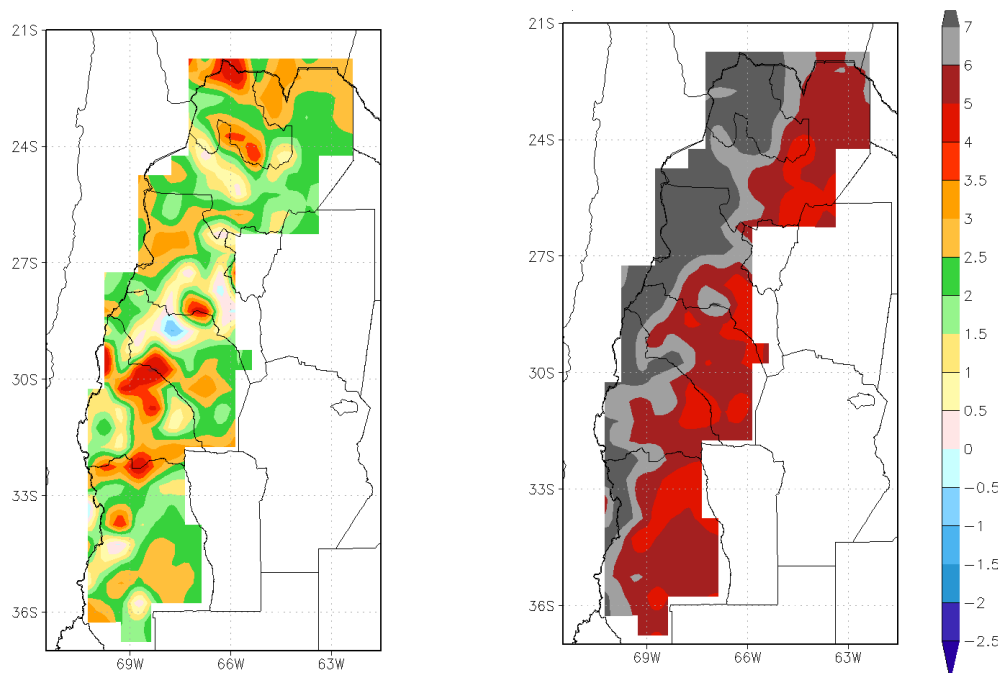


Figura 7.4.1.4: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos MRI/JMA y ETA- HADCM3. Escenario A1B; a la izquierda, futuro cercano (2015-2039) y a la derecha, futuro lejano (2075-2099)

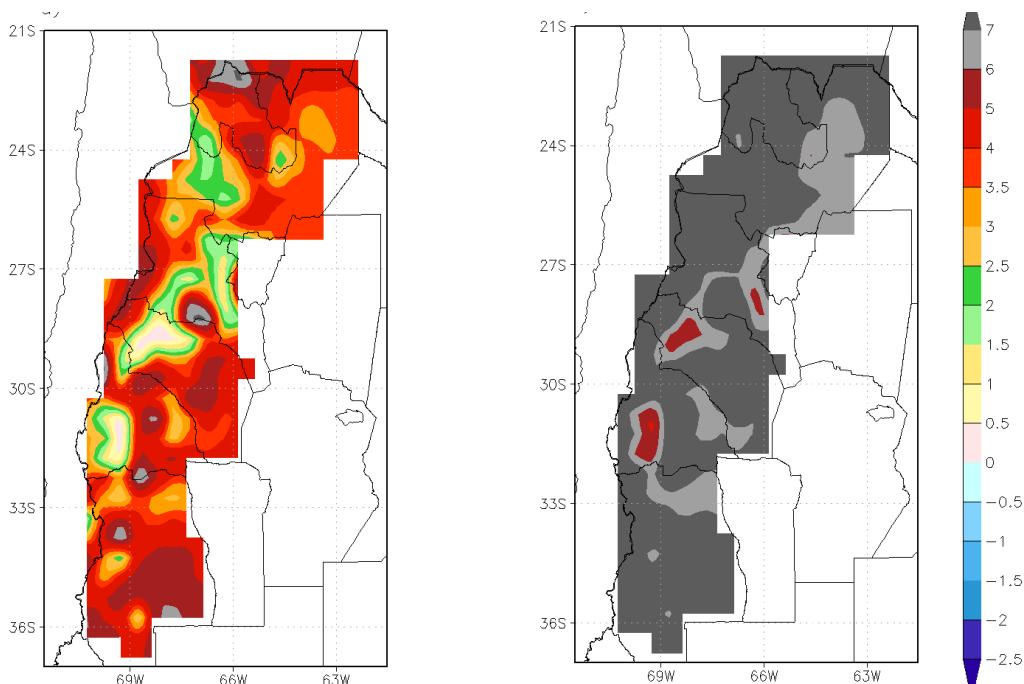


Figura 7.4.1.5: Ídem figura 7.4.1.4, pero para la temperatura mínima media anual

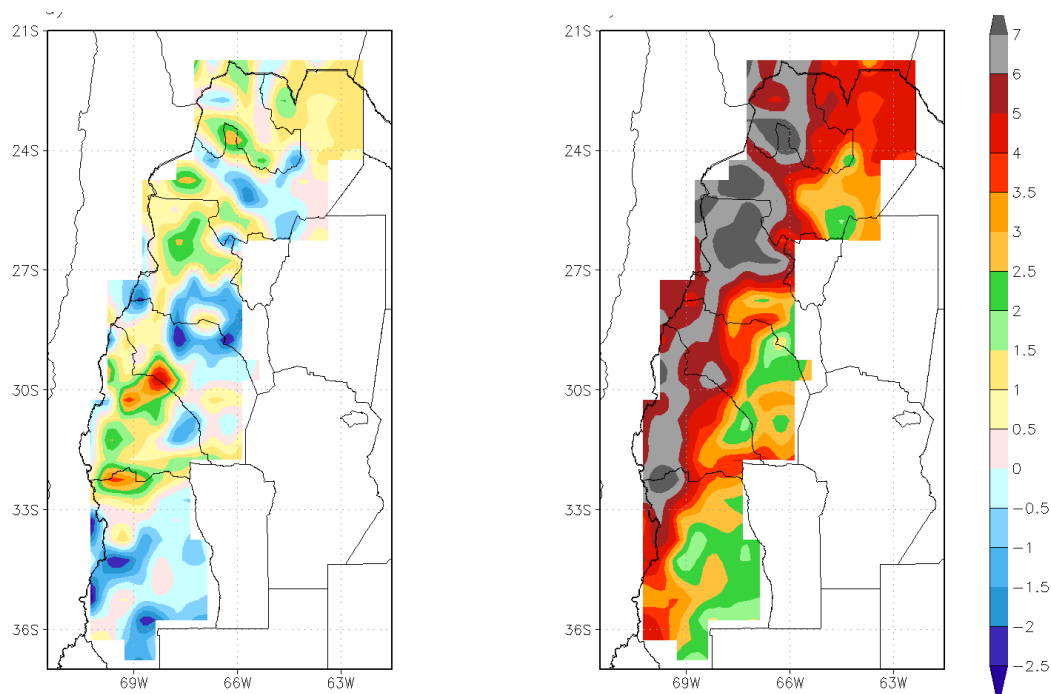


Figura 7.4.1.6: Ídem figura 7.4.1.4, pero para la temperatura máxima media anual

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.

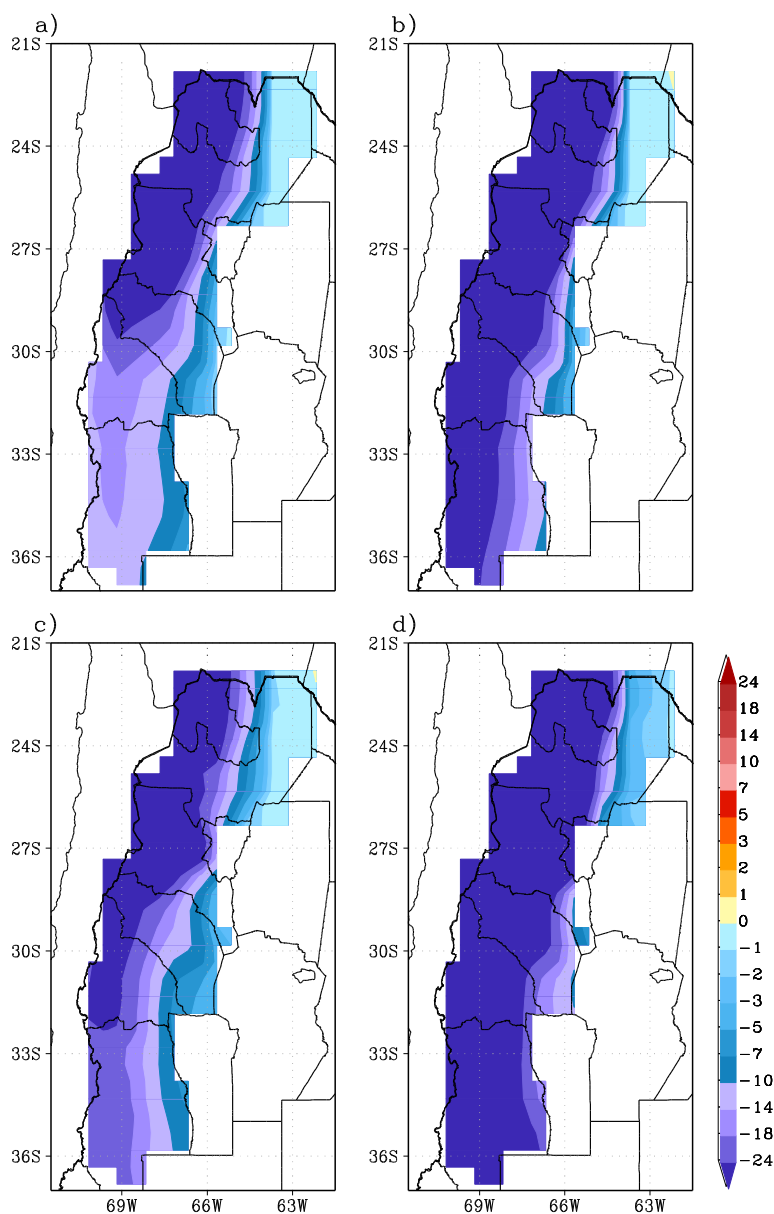


Figura 7.4.1.7: Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1986-2006, Promedio de los modelos IPSL_CM5A- y MPI.ESM-LR. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

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.

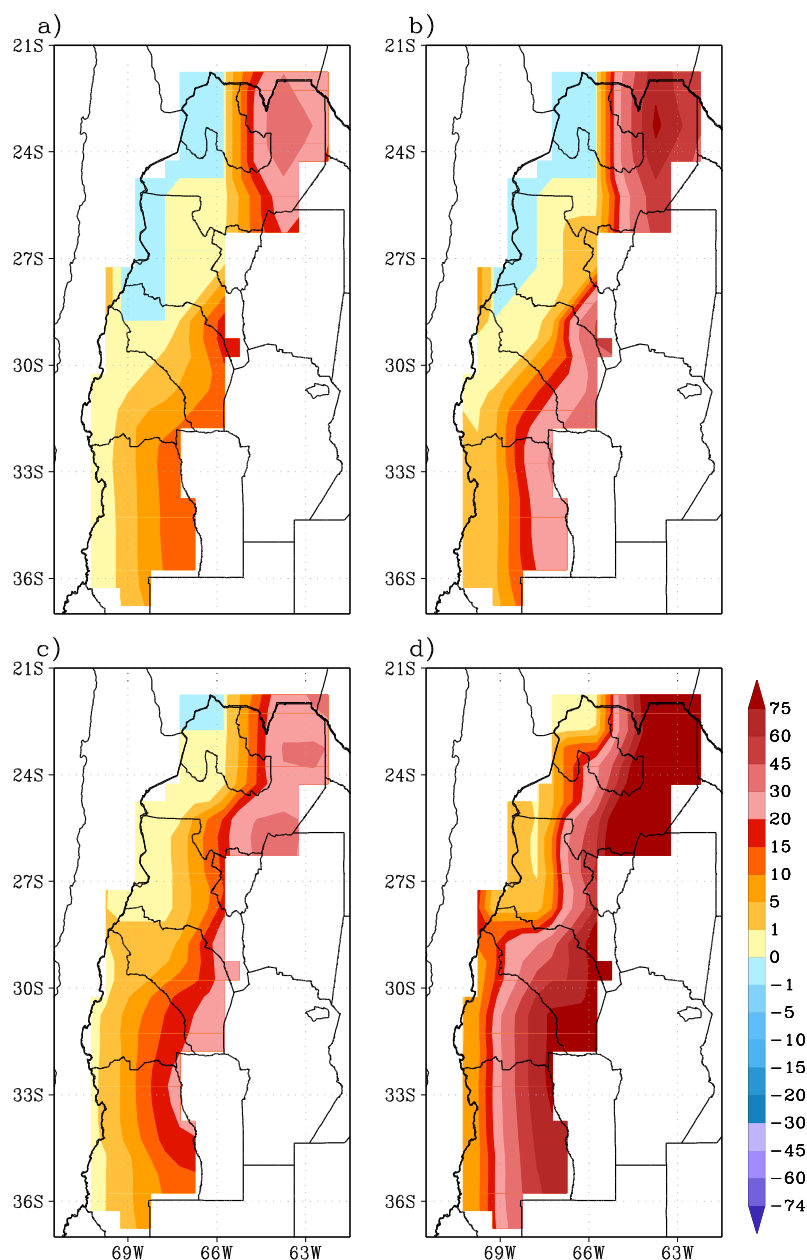


Figura 7.4.1.8: Ídem Figura 7.4.1. 7, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

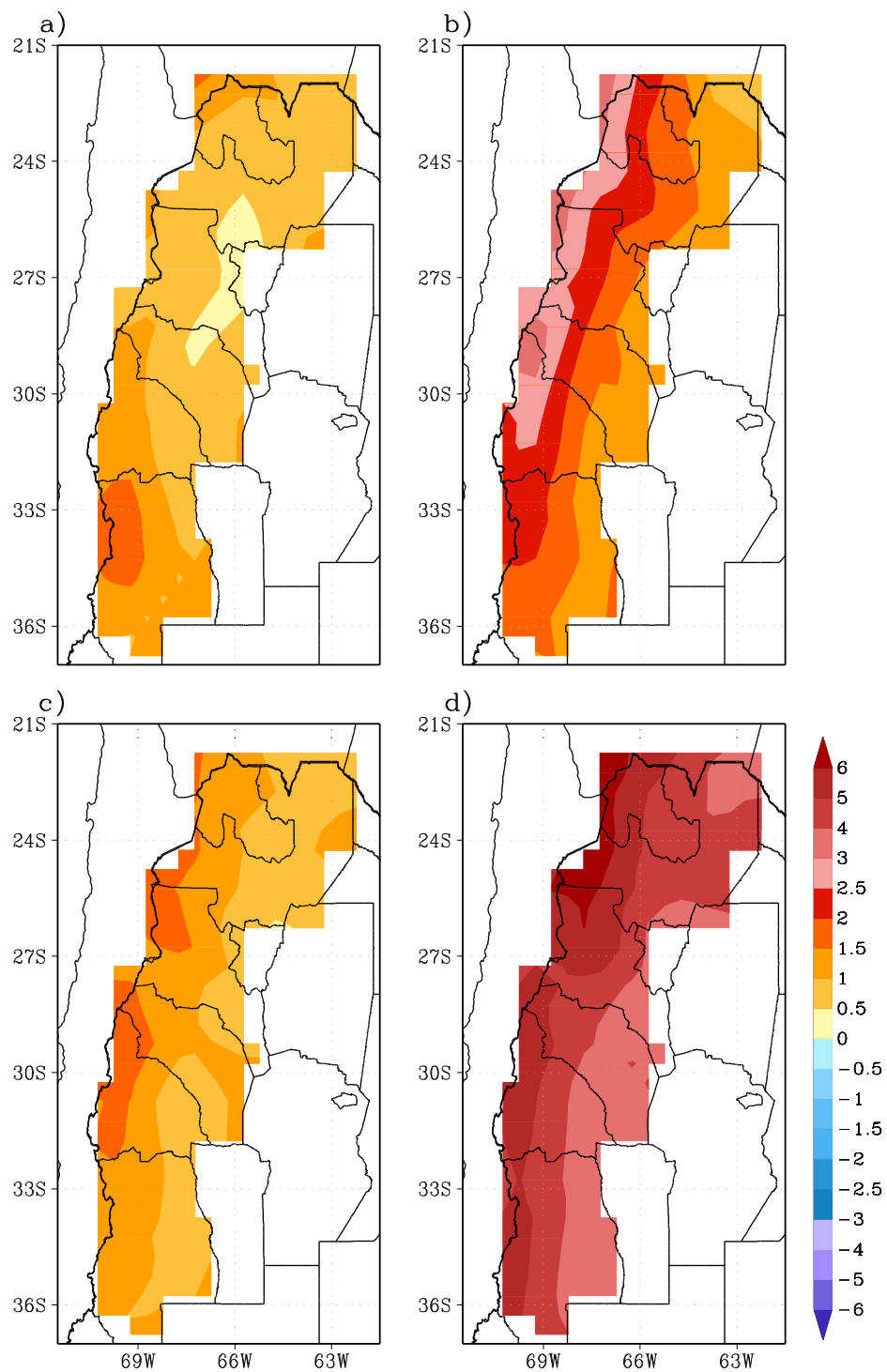


Figura 7.4.1.9: Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)

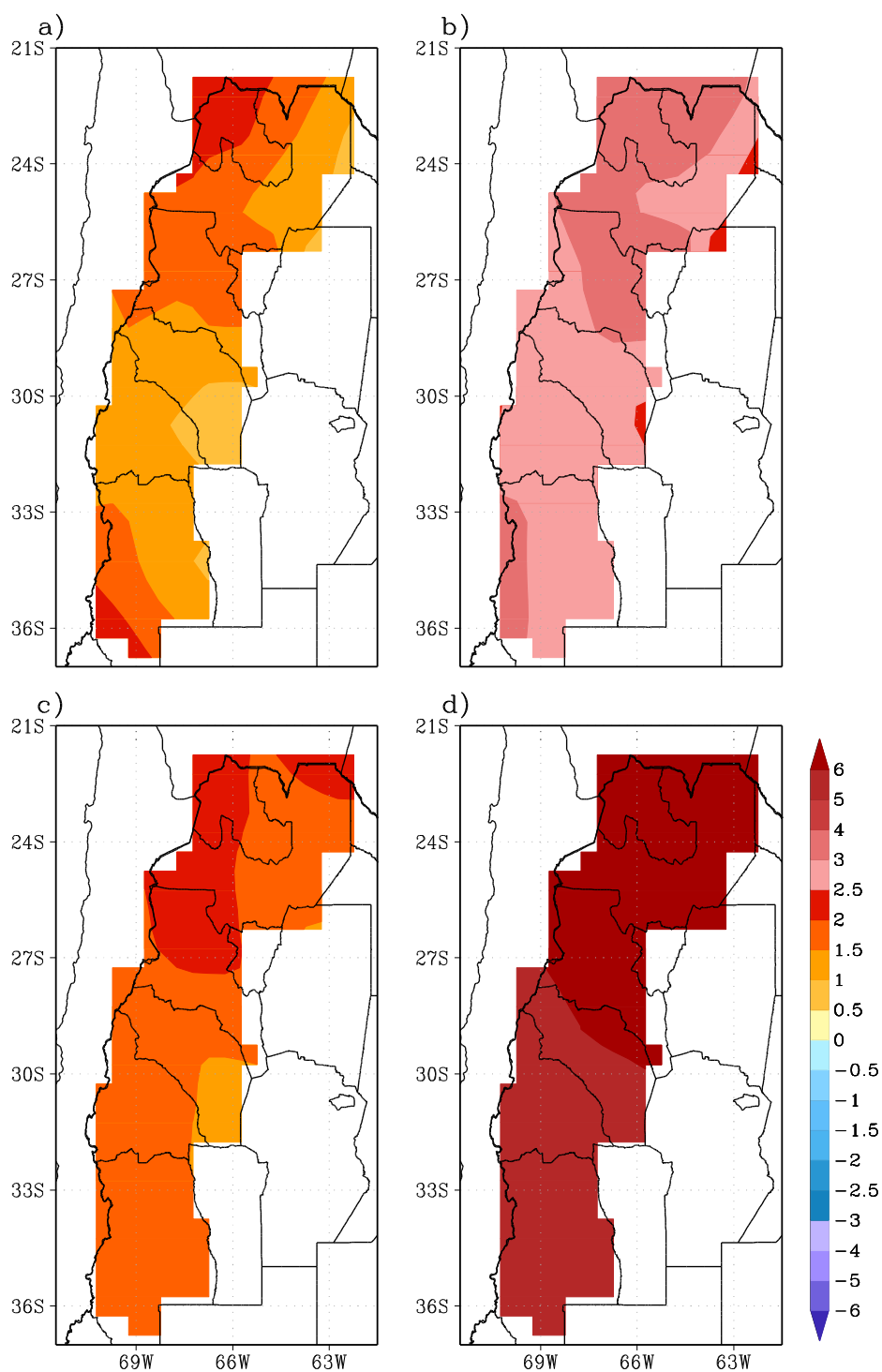


Figura 7.4.1.10: Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)

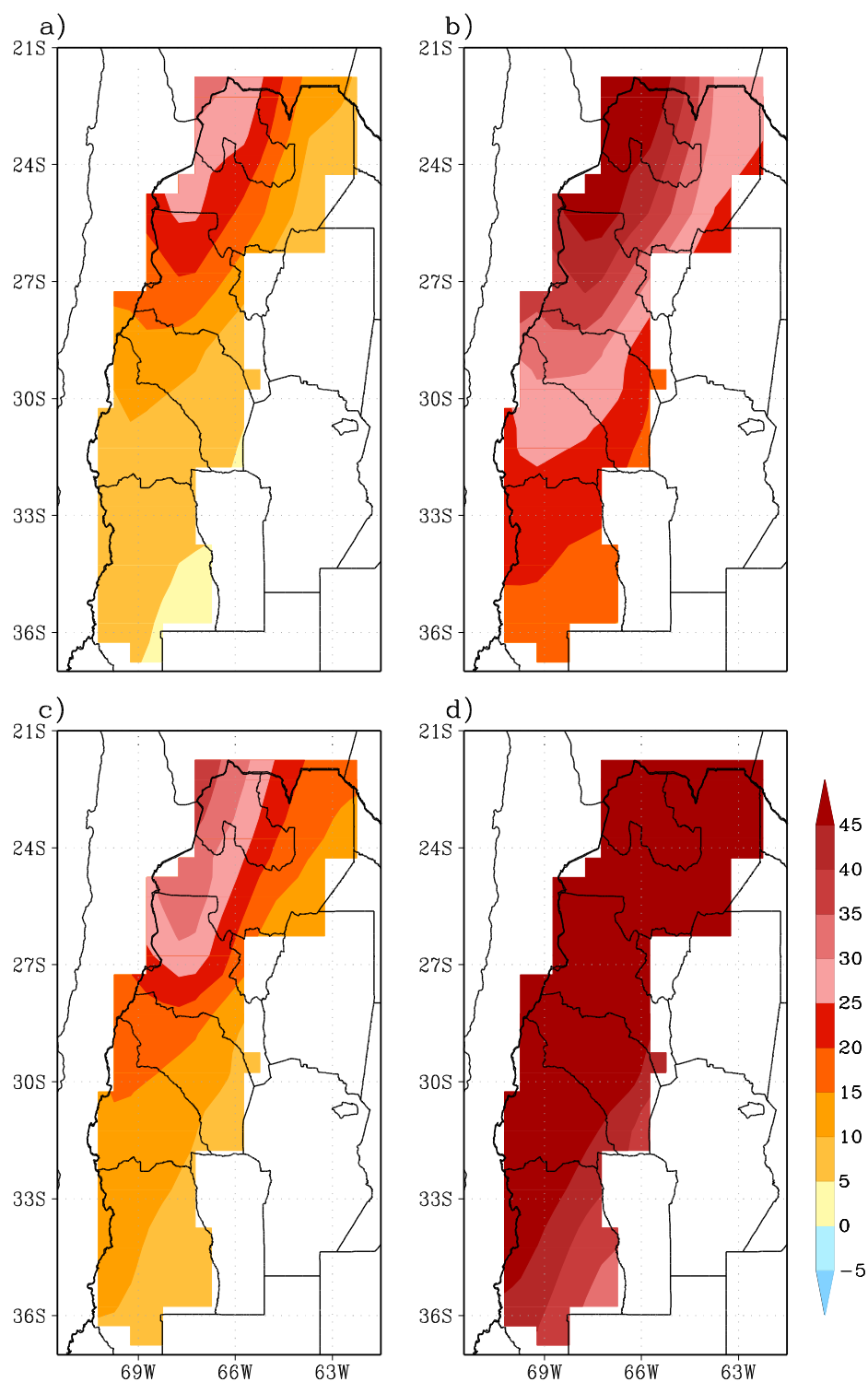


Figura 7.4.1.11: *Ídem Figura 7.4.1.7, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90*

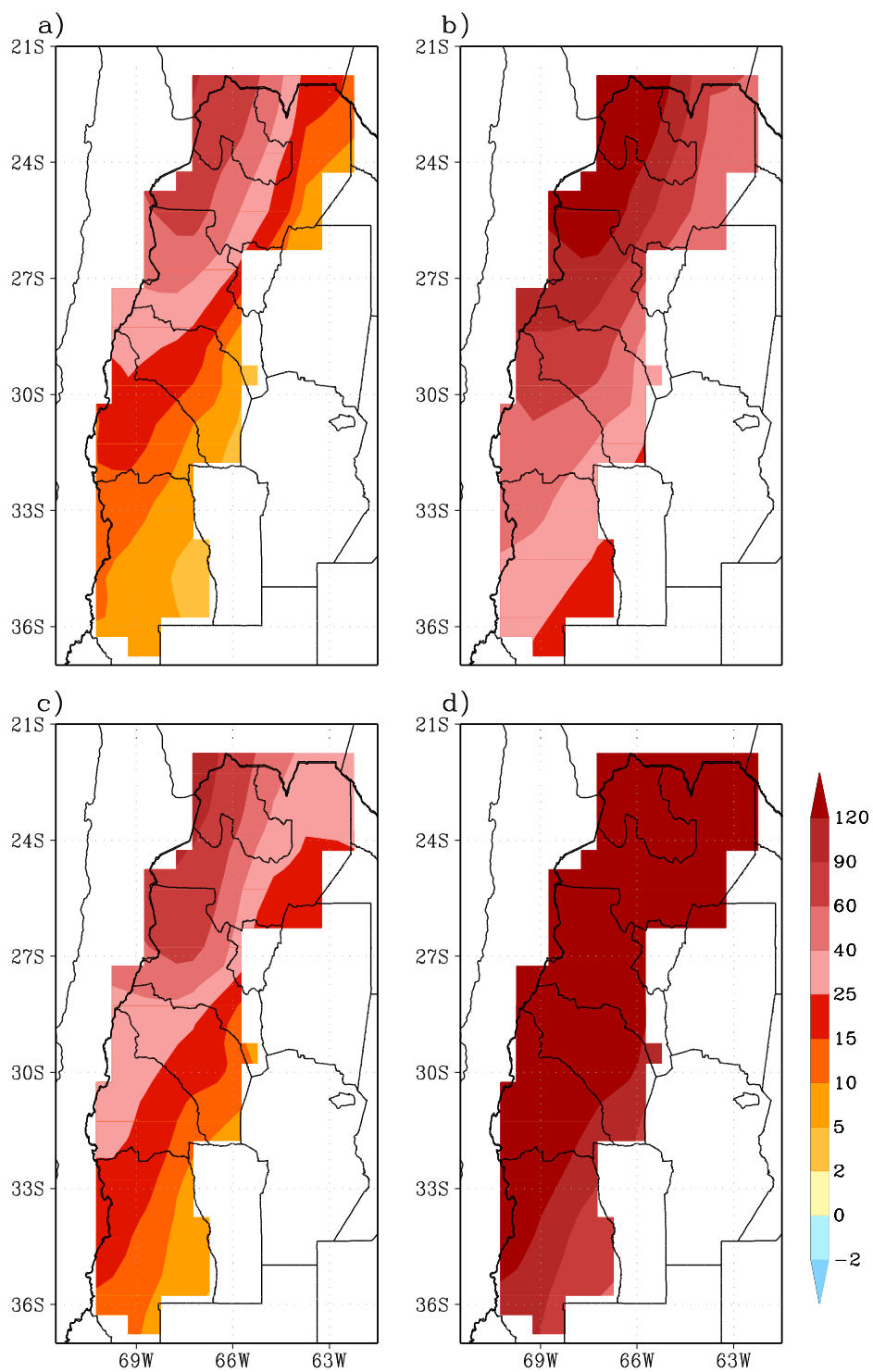


Figura 7.4.1.12: Ídem Figura 7.4.1.7, pero para los días en el año con ola de calor

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.

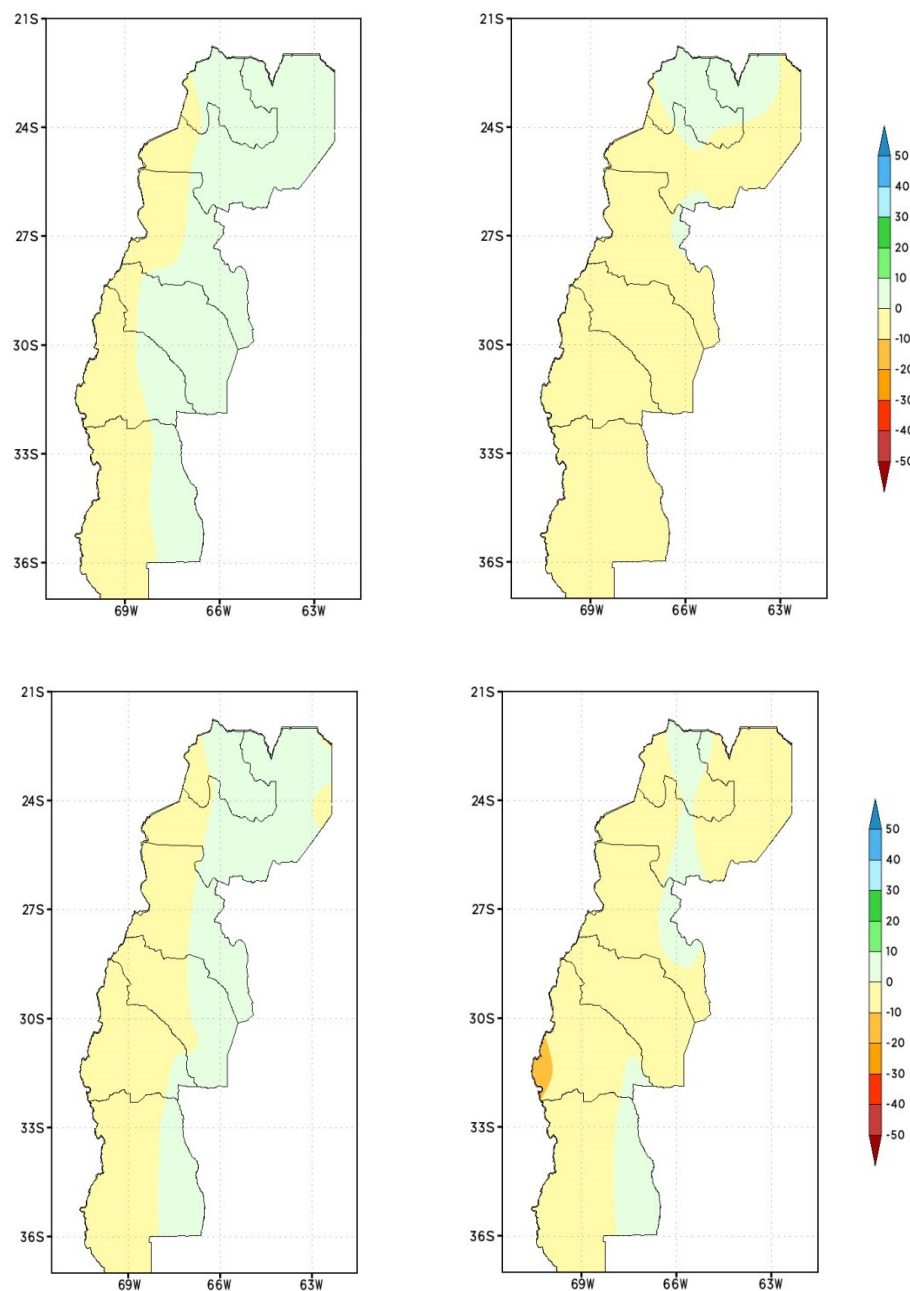


Figura 7.4.2.1: Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL_CM5A-MRy MPI.ESM-LR. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

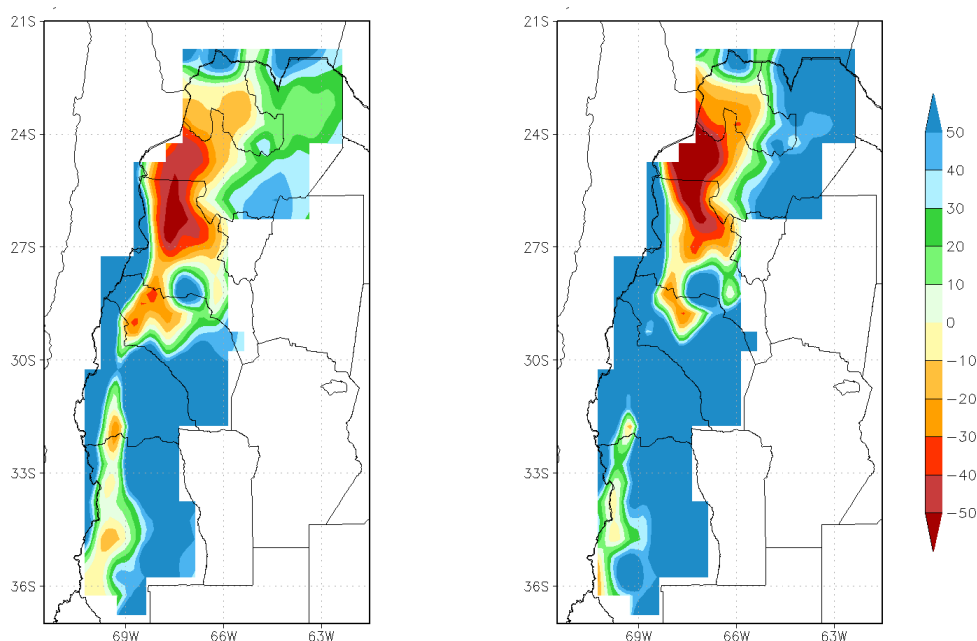


Figura 7.4.2.2: Cambio en precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos MRI/JMA y ETA- HADCM3. Escenario A1B. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

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.

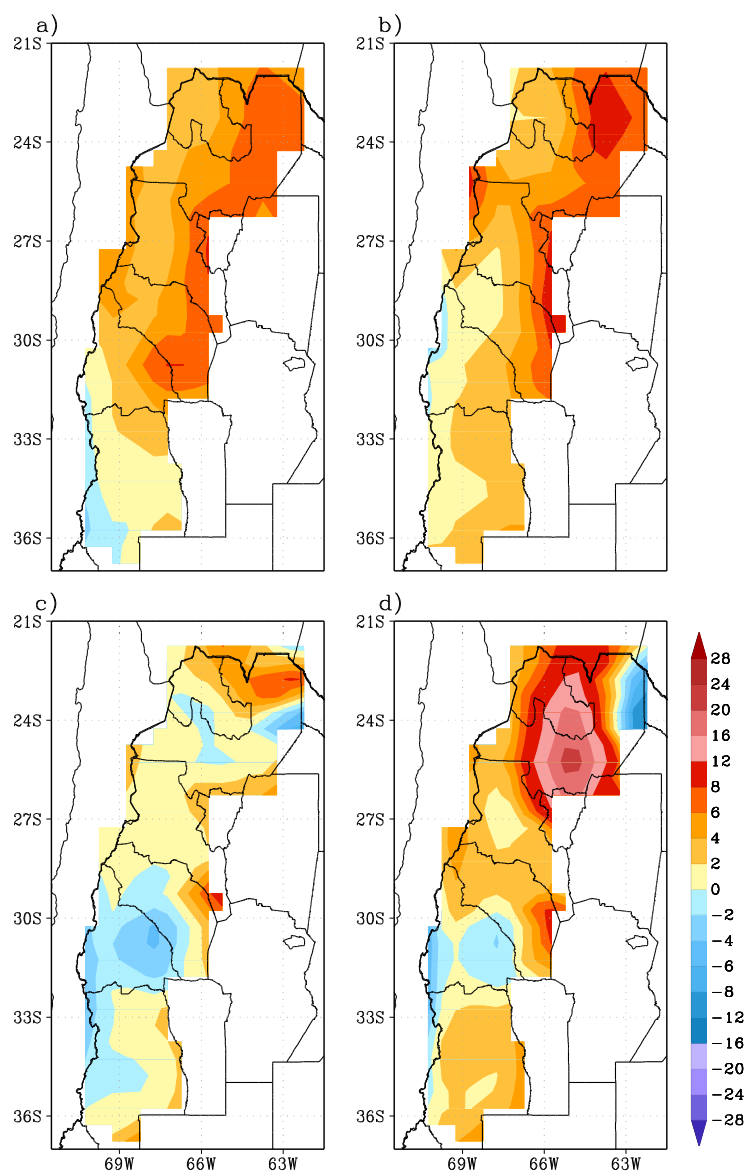


Figura 7.4.2.3: Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos IPSL_CM5A-MR y MPI.ESM-LR a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099); c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 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.

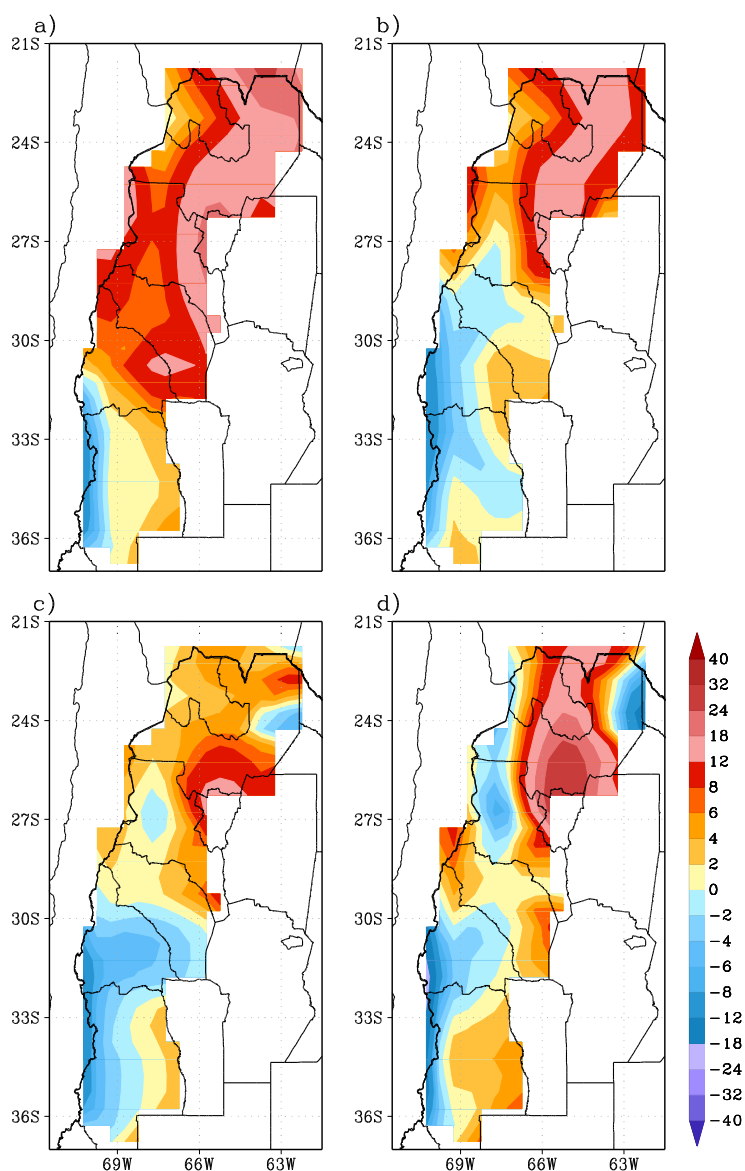


Figura 7.4.2.4: Ídem Figura 7.4.2.3, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

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.

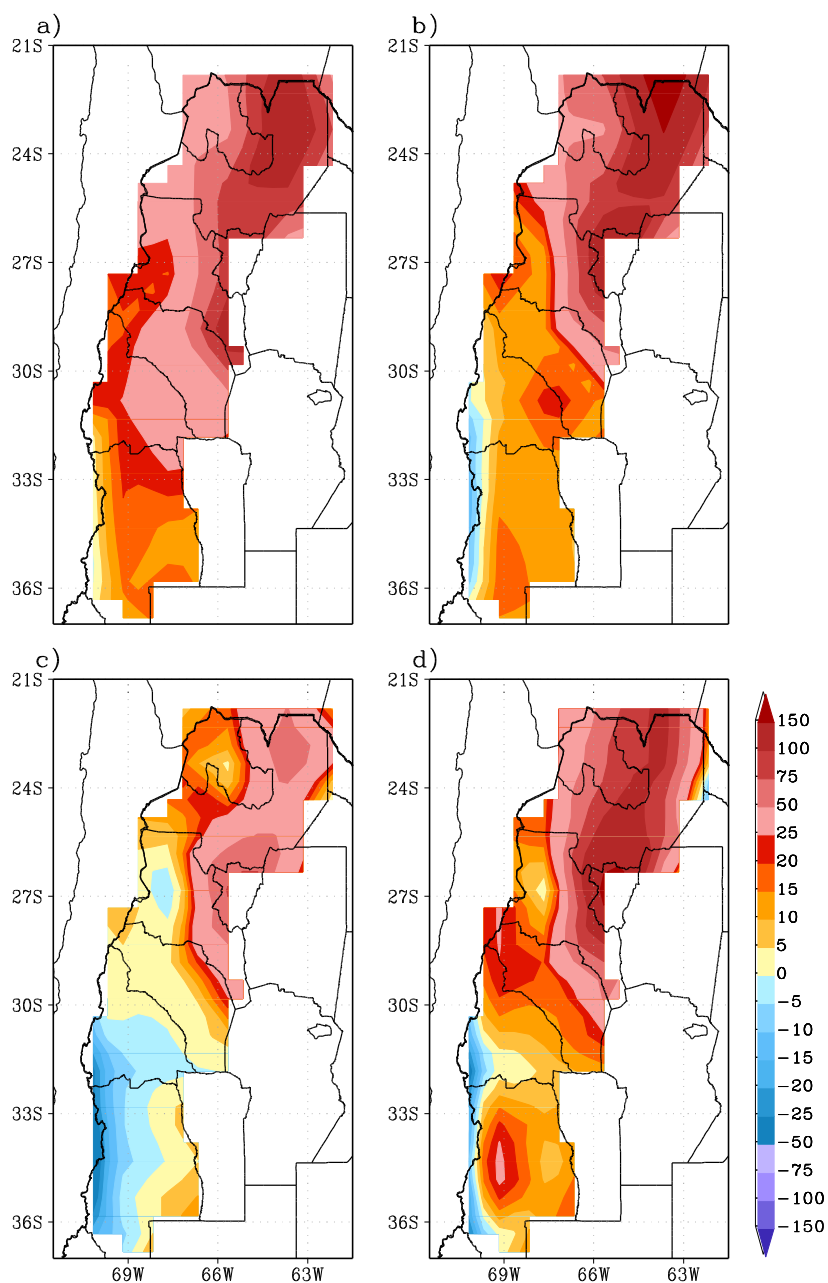


Figura 7.4.2.5: Ídem Figura 7.4.2.3, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

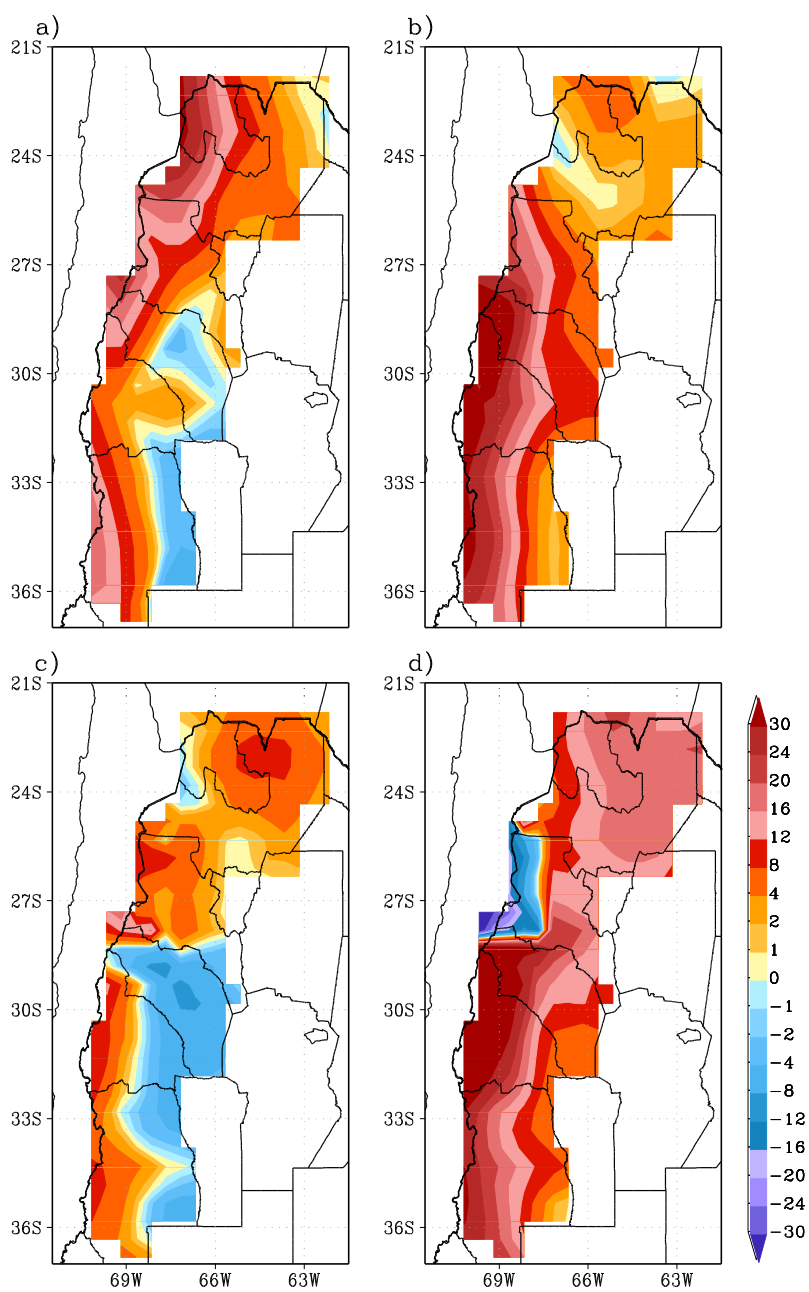


Figura 7.4.2.6: Ídem Figura 7.7.2.3, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

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.

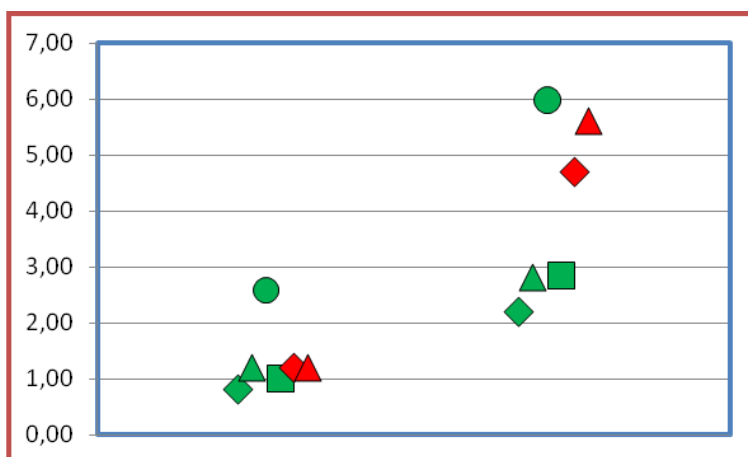


Figura 7.5.1.1: Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: IPSL_CM5A-MR (triángulos), MPI.ESM-LR (rombos) y ETA-HADCM3 (círculos) y MRI/JMA (cuadrados)

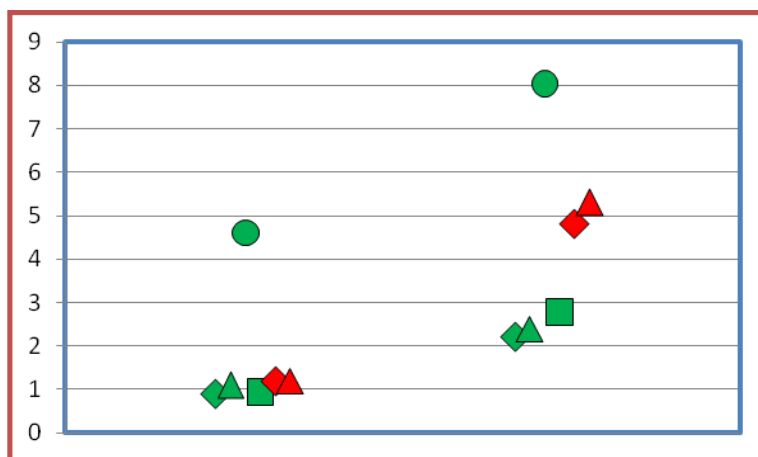


Figura 7.5.1.2: Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional

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.

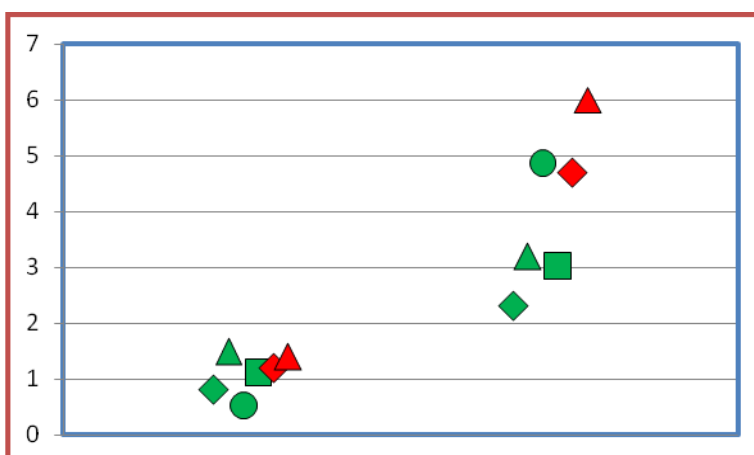


Figura 7.5.1.3: *Idem 7.5.1.1 pero para la temperatura máxima media regional*

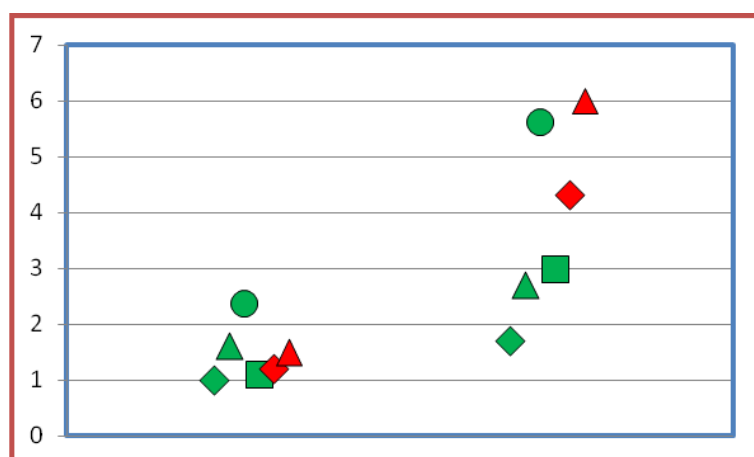


Figura 7.5.1.4: *Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

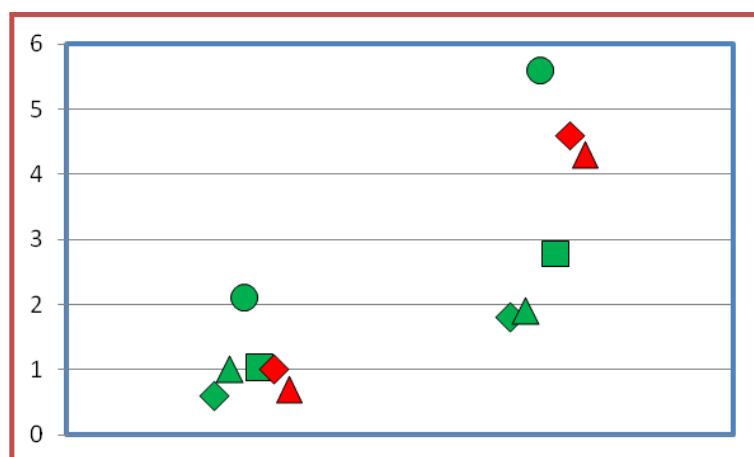


Figura 7.5.1.5: *Ídem 7.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

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.

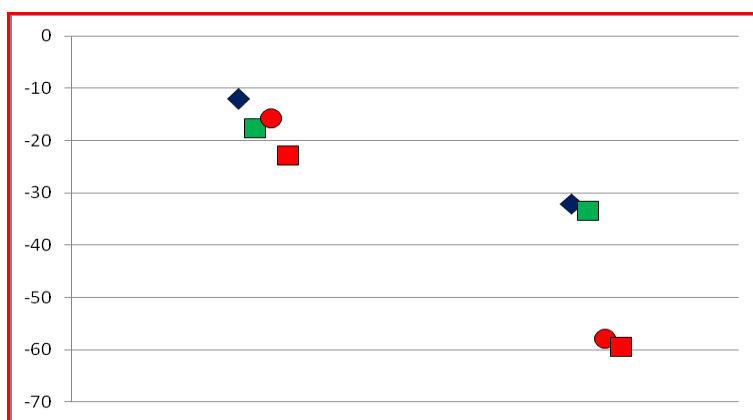


Figura 7.5.1.6: Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos IPSL_CM5A-MR (círculos), MPI_ESM-LR (cuadrados) y MRI_JMA (rombos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En azul escenario A1B en verde RCP4.5 y en rojo RCP8.5

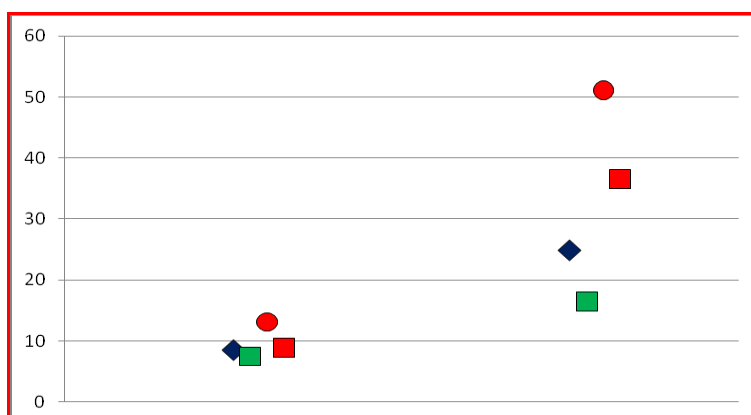


Figura 7.5.1.7: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

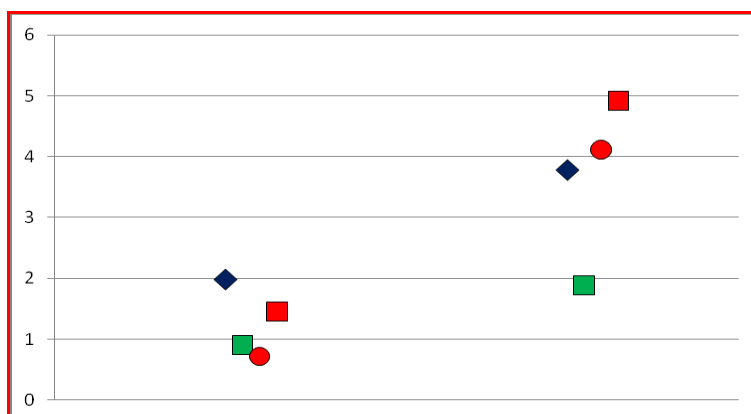


Figura 7.5.1.8: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el valor mínimo anual de la temperatura anual (°C)

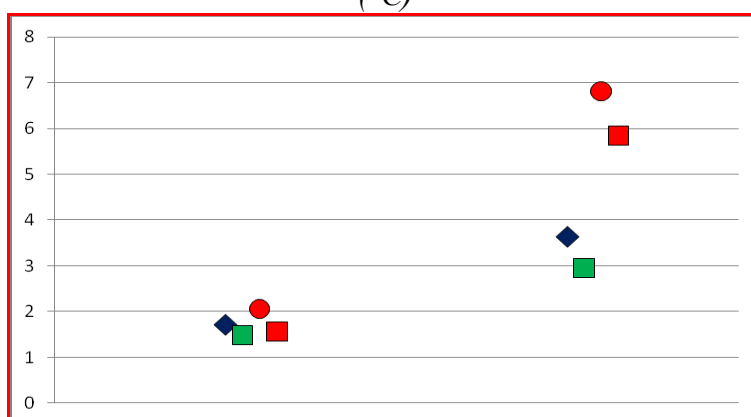


Figura 7.5.1.9: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el valor máximo de la temperatura anual (°C)

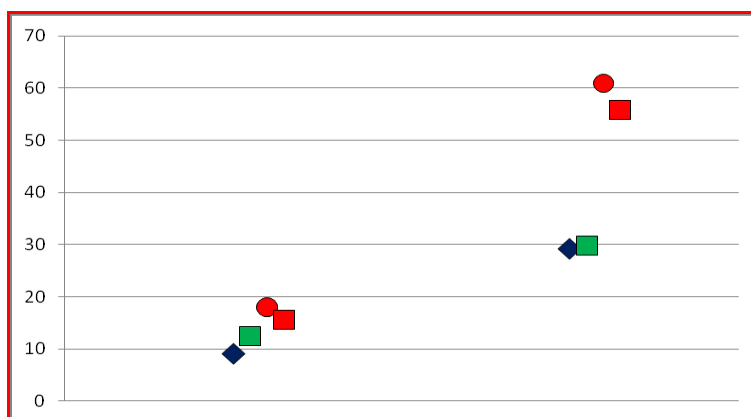


Figura 7.5.1.10: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

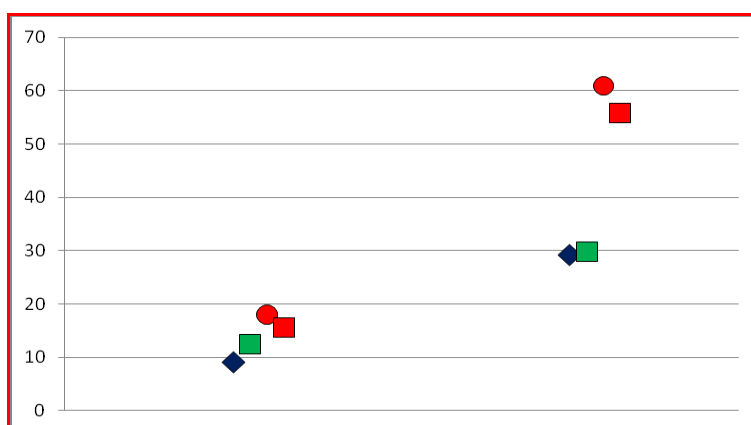


Figura 7.5.1.10: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

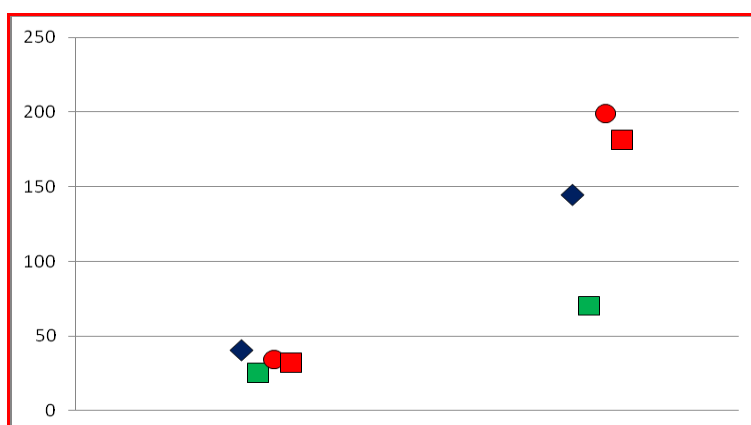


Figura 7.5.1.11: Ídem Figura 7.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

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.

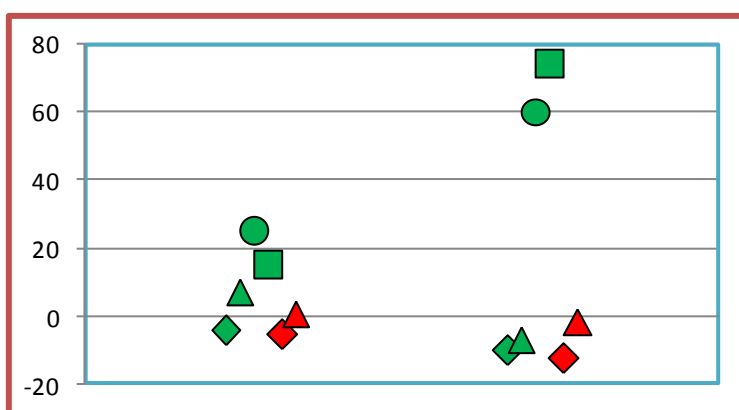


Figura 7.5.2.1: Diferencia porcentual proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B y en rojo RCP8.5. Modelos: IPSL_CM5A-MR (triángulos), MPI.ESM-LR (rombos) y ETA-HADCM3 (círculos) y MRI/JMA (cuadrados)

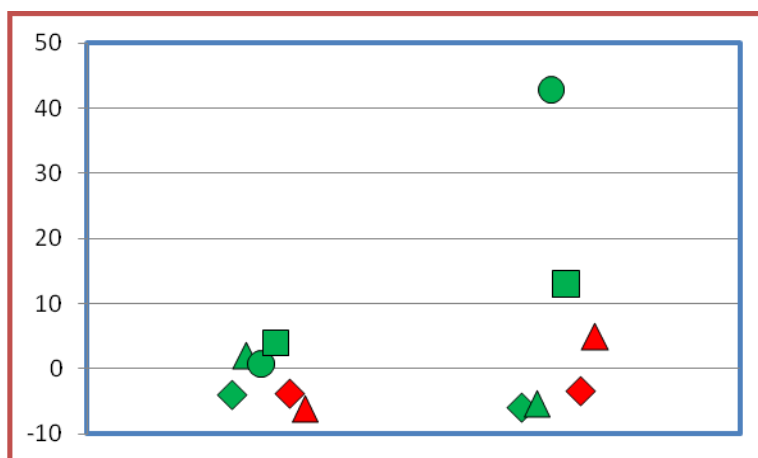


Figura 7.5.2.2: Ídem 7.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)

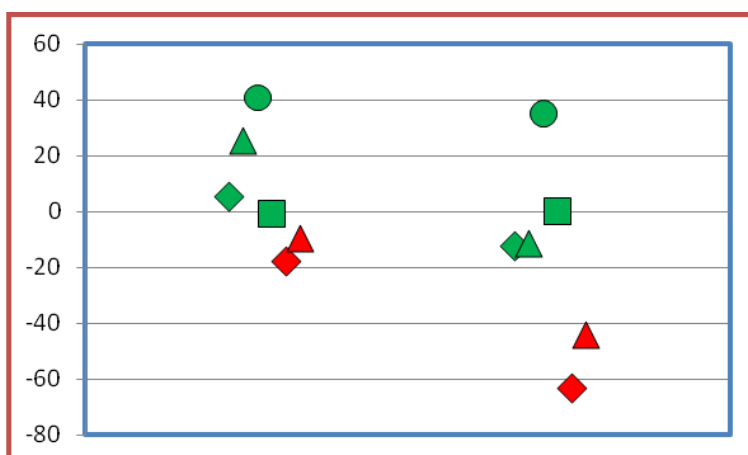


Figura 7.5.2.3: Ídem 7.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)

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.

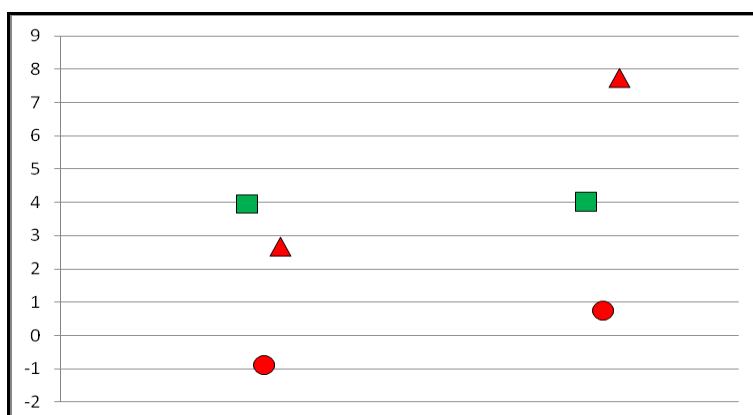


Figura 7.5.2.4: Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos IPSL_CM5A-MR (círculos) y MPI.ESM-LR (cuadrados) y MRI.CGCM3 (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde escenarios RCP4.5, y en rojo RCP8.5

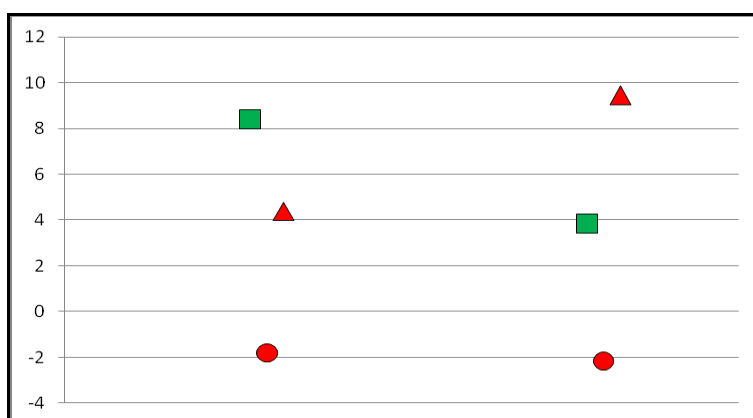


Figura 7.5.2.5: Ídem Figura 7.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

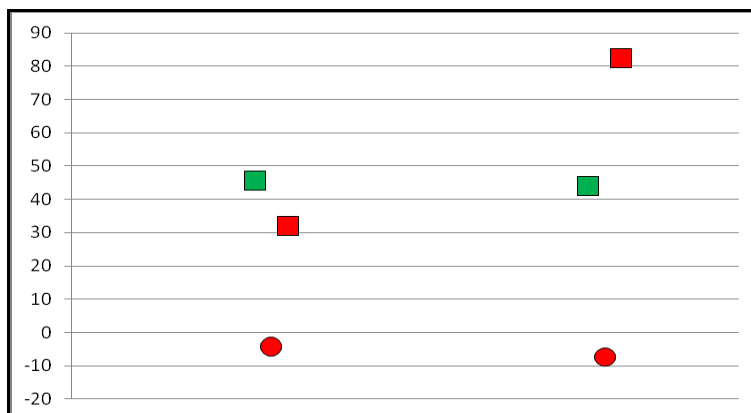


Figura 7.5.2.6: Ídem Figura 7.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

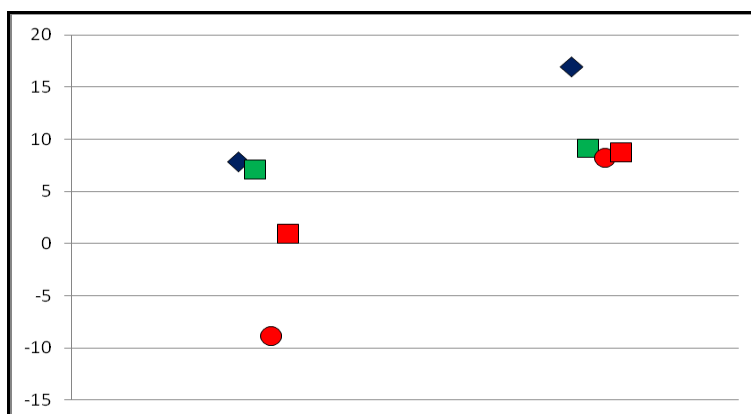


Figura 7.5.2.7: Ídem Figura 7.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos y con el agregado en rombo azul del modelo MRI/JMA, escenario A1B

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 e 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.