



CAPITULO 6

CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN CENTRO

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



CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN CENTRO

6.1 INTRODUCCIÓN

6.1.1 Dominio espacial

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

6.1.2 Datos

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

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

6.1.3 Presentación de mapas y gráficos

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

6.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

6.2.1 Temperatura

Temperaturas medias

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

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

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

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

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

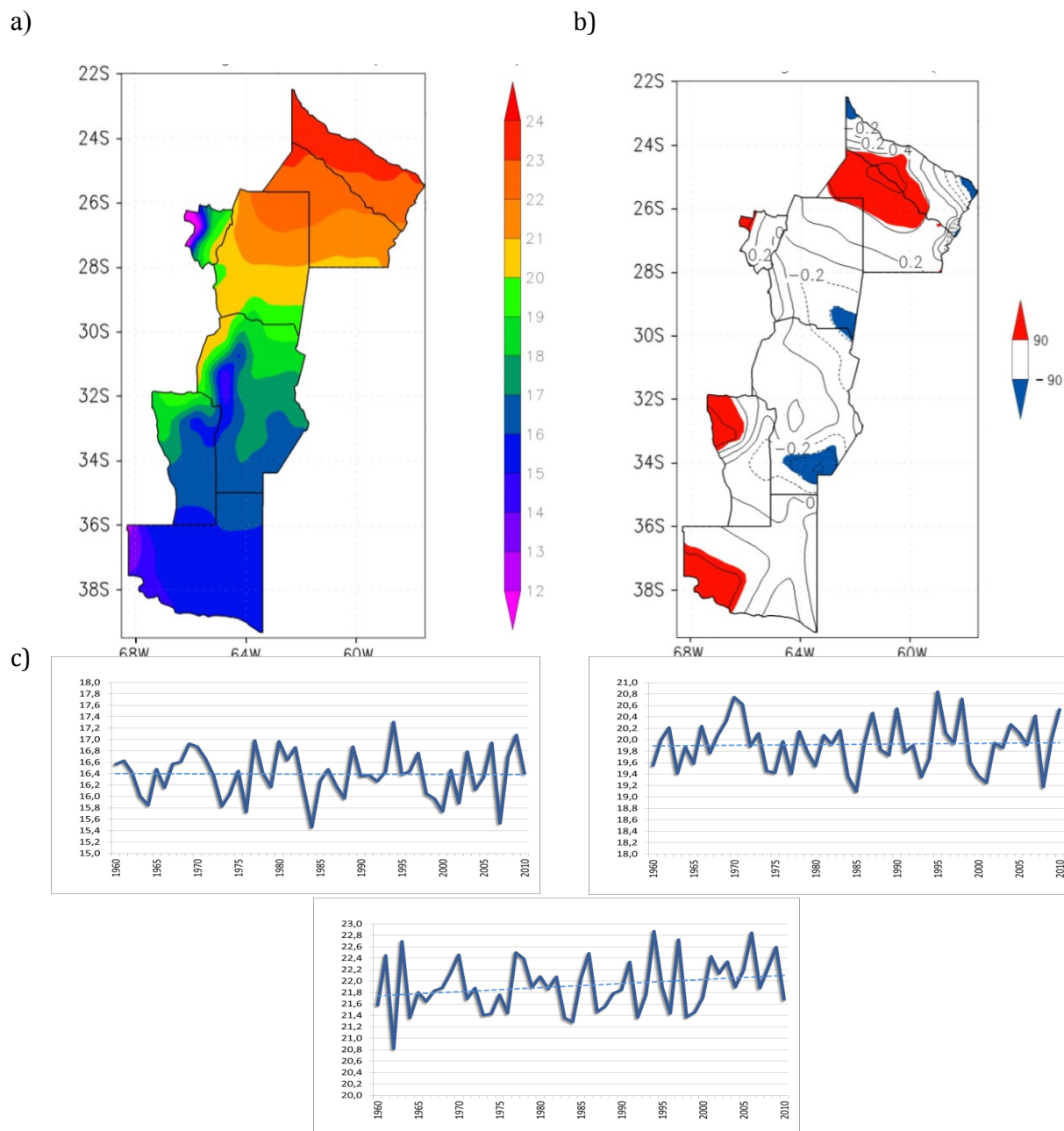


Figura 6.2.1.1: a) Campo medio de la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$ para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; c) serie anual de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

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

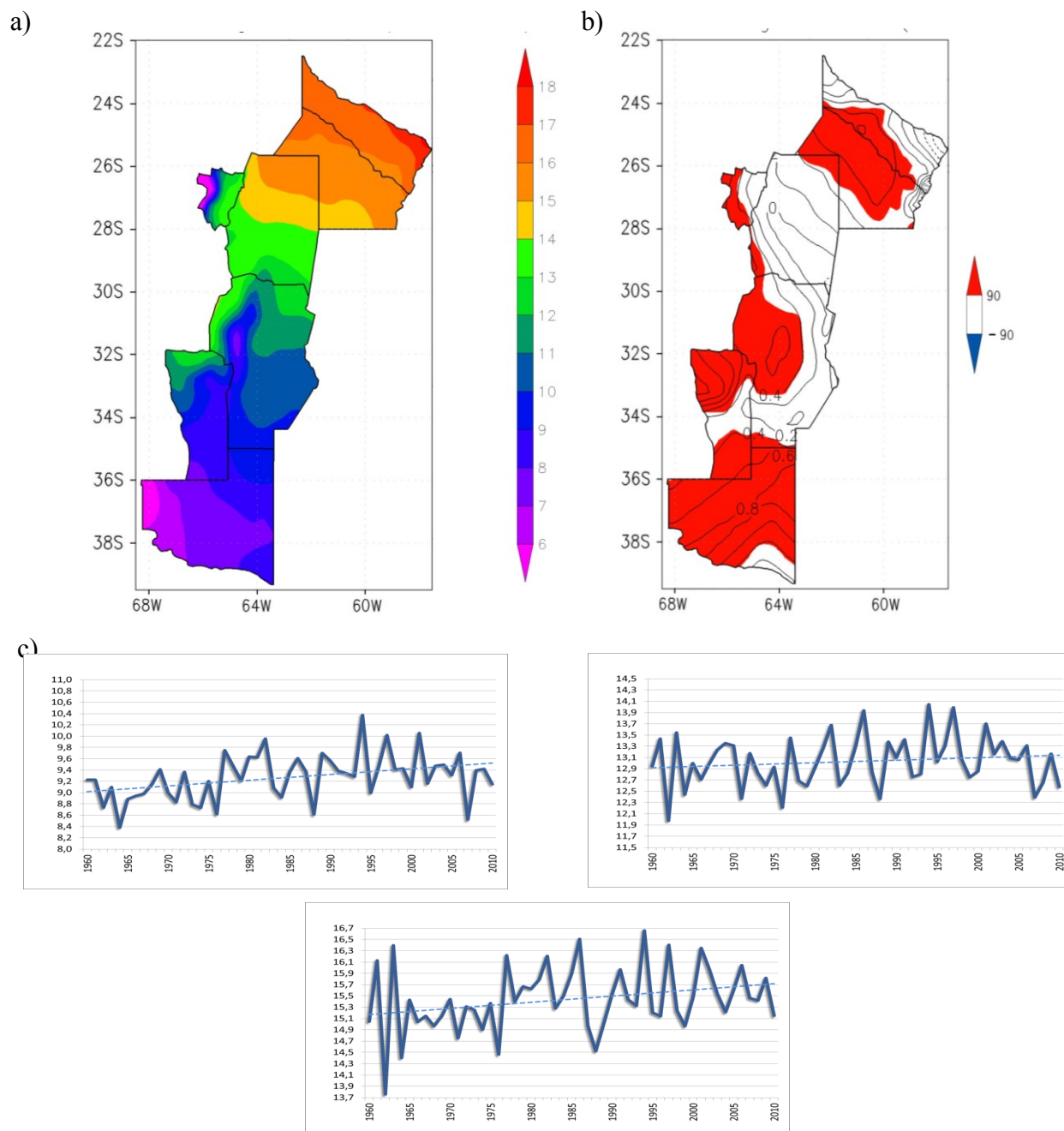


Figura 6.2.1.2: Ídem 6.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)

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

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

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

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

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

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

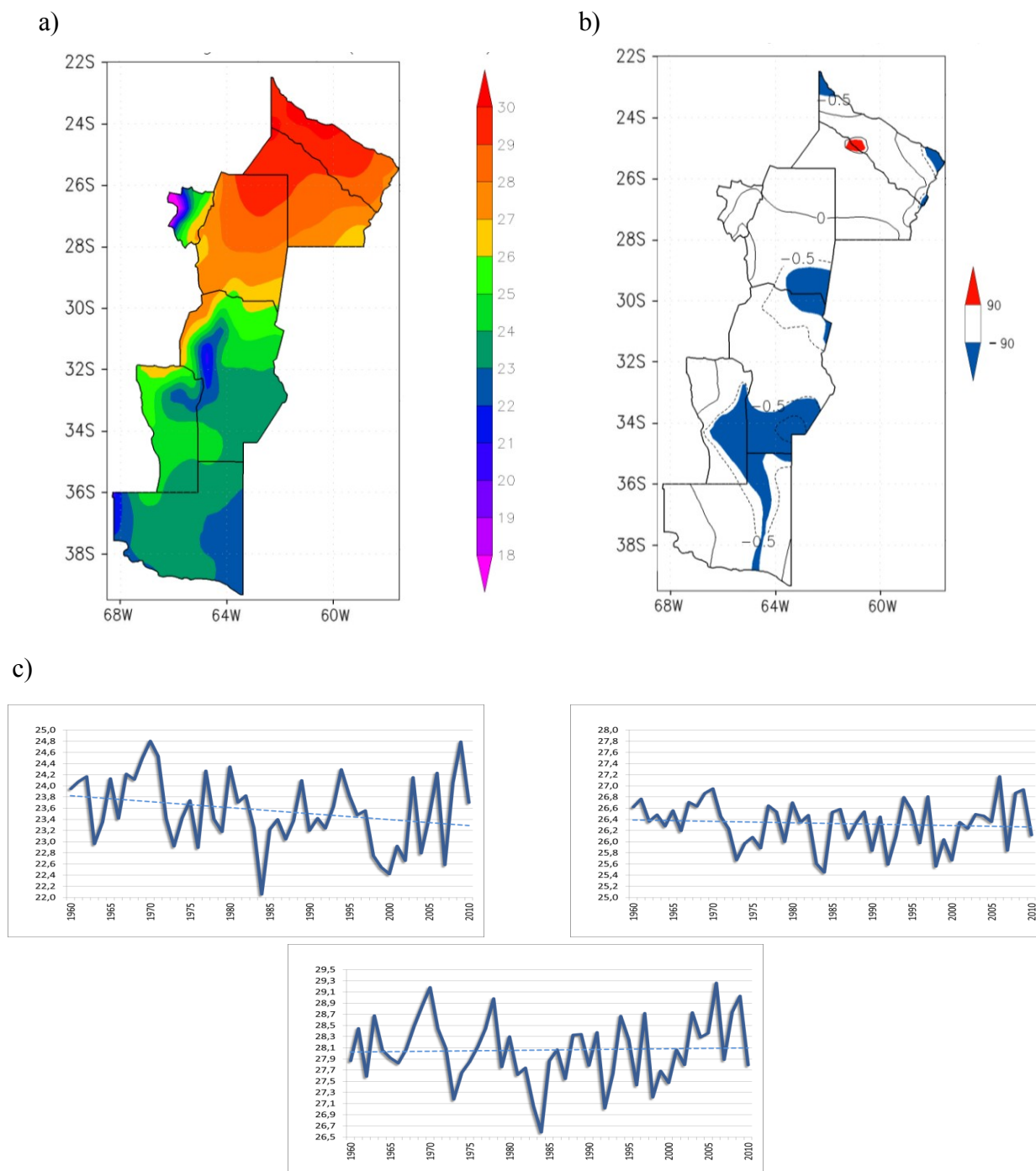


Figura 6.2.1.3: Ídem Figura 6.2.1.1, pero para la temperatura máxima media anual ($^{\circ}\text{C}$)

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

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

Extremos térmicos

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

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

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

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

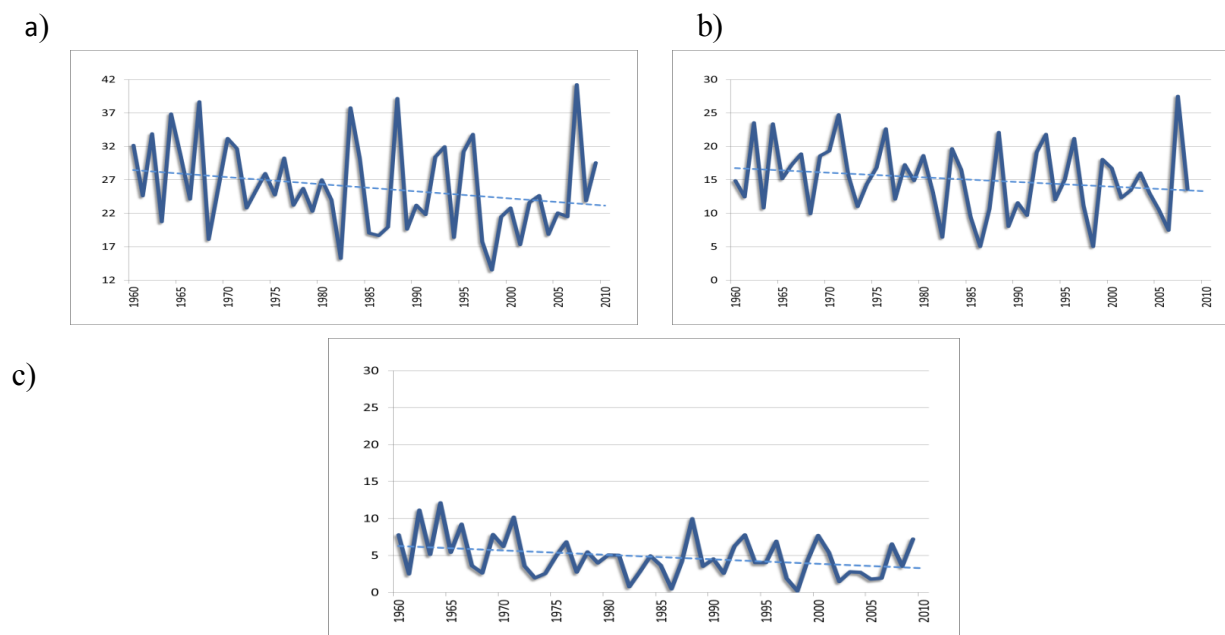


Figura 6.2.1.4: Promedio regional y su tendencia lineal del número de días con heladas en el año (FD), en tres subregiones: a) Centro sur; b) Centro medio; c) Centro norte

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	- 5 **	-4	- 3 **	-4 **

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

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

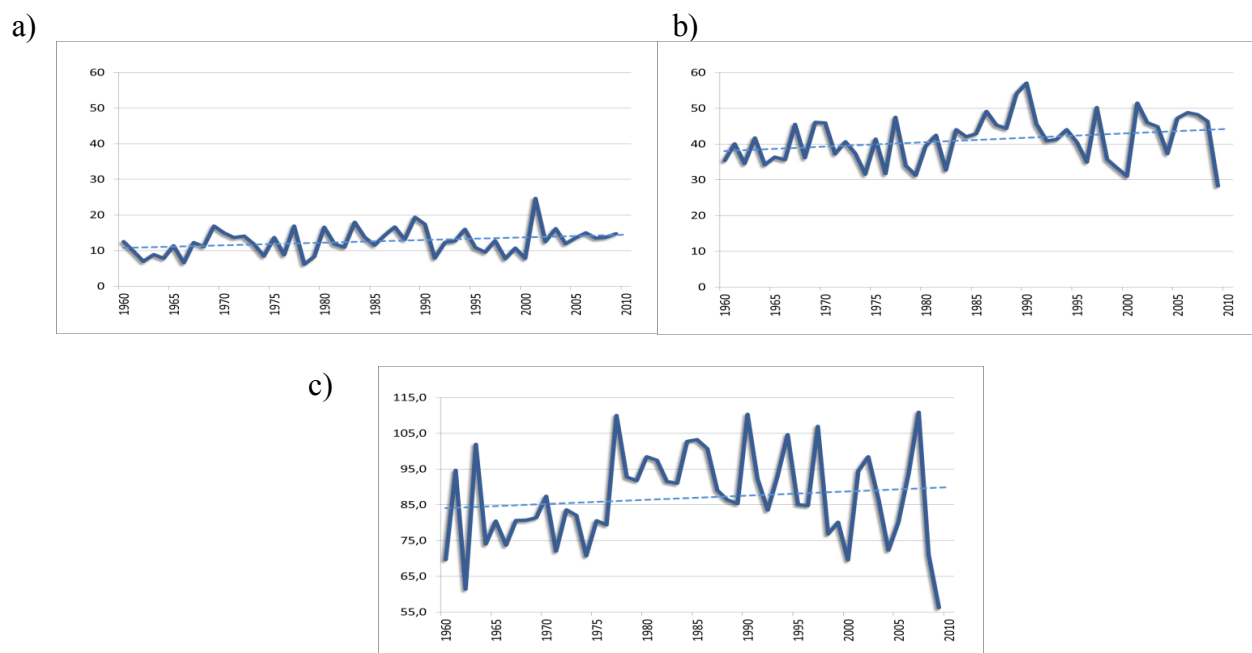


Figura 6.2.1.5: Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el número de noches tropicales, definida como el número anual de días en que la temperatura mínima diaria fue mayor a 20°C (TR)

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	4 **	6*	6	6

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

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

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	1,2**	0,9	1,1	1

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

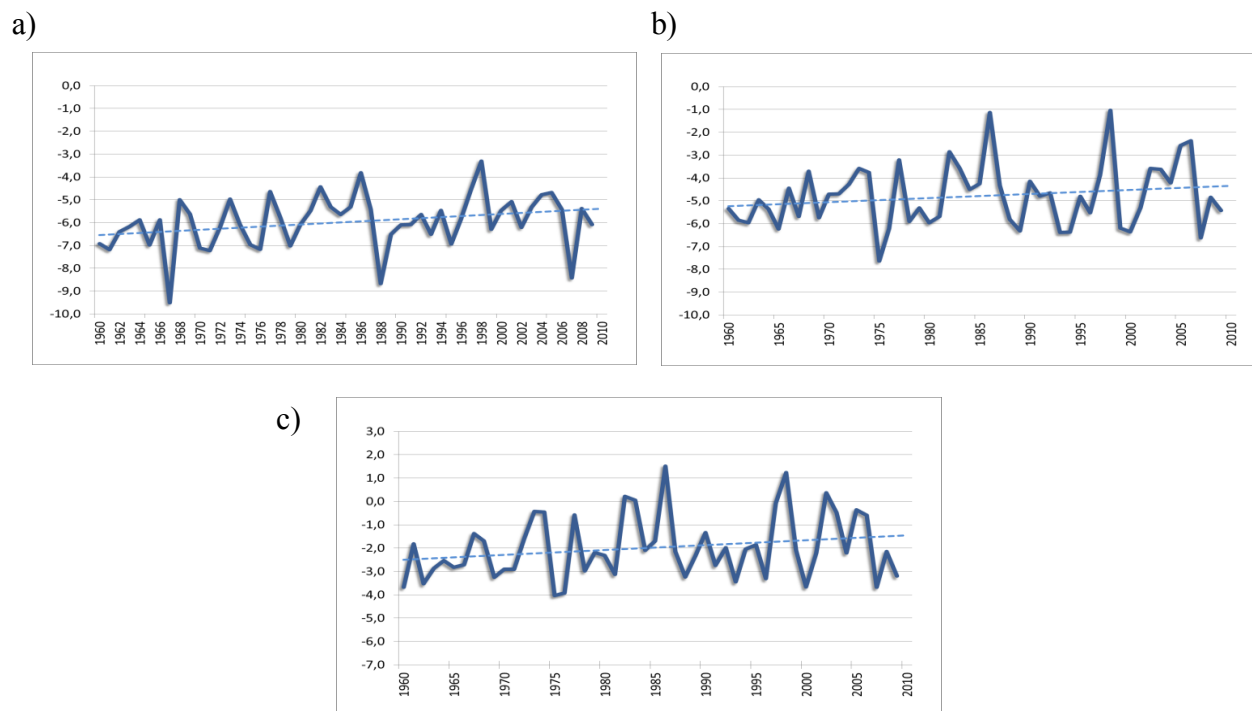


Figura 6.2.1.6: Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el valor mínimo de la temperatura diaria mínima en el año (TNn)

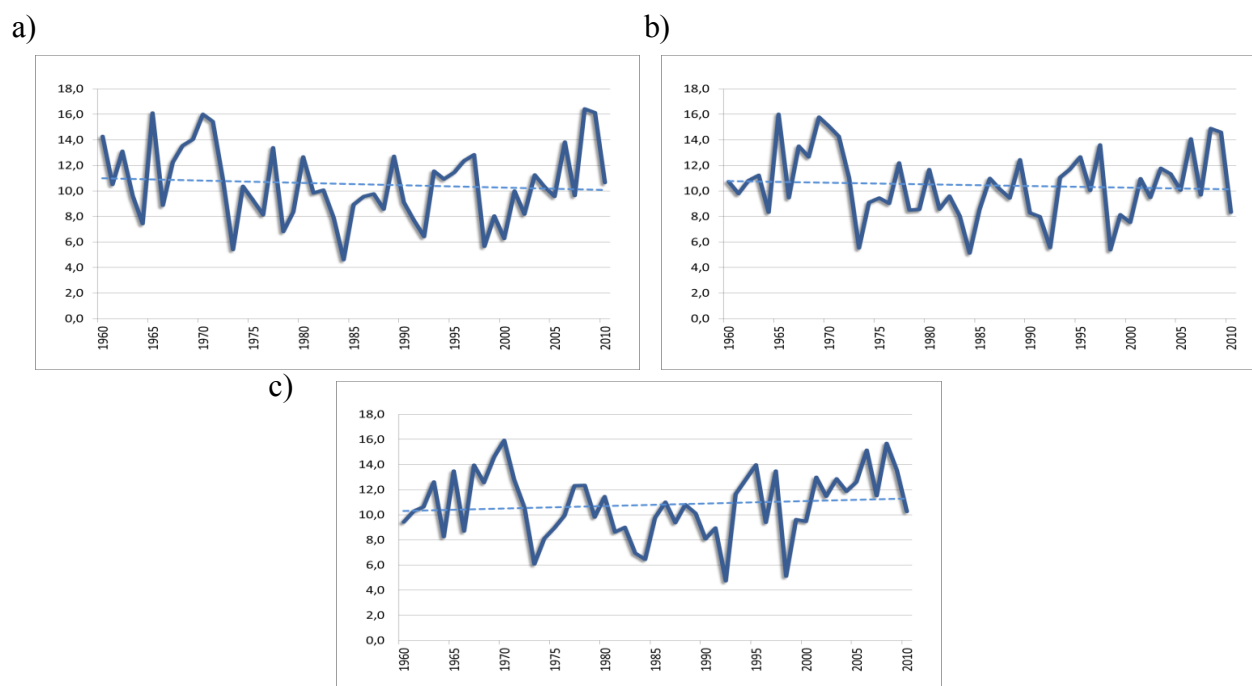


Figura 6.2.1.7: Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el valor máximo anual de la temperatura diaria máxima (TXx)

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

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	-0,9	-0,7	1	0,2

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

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

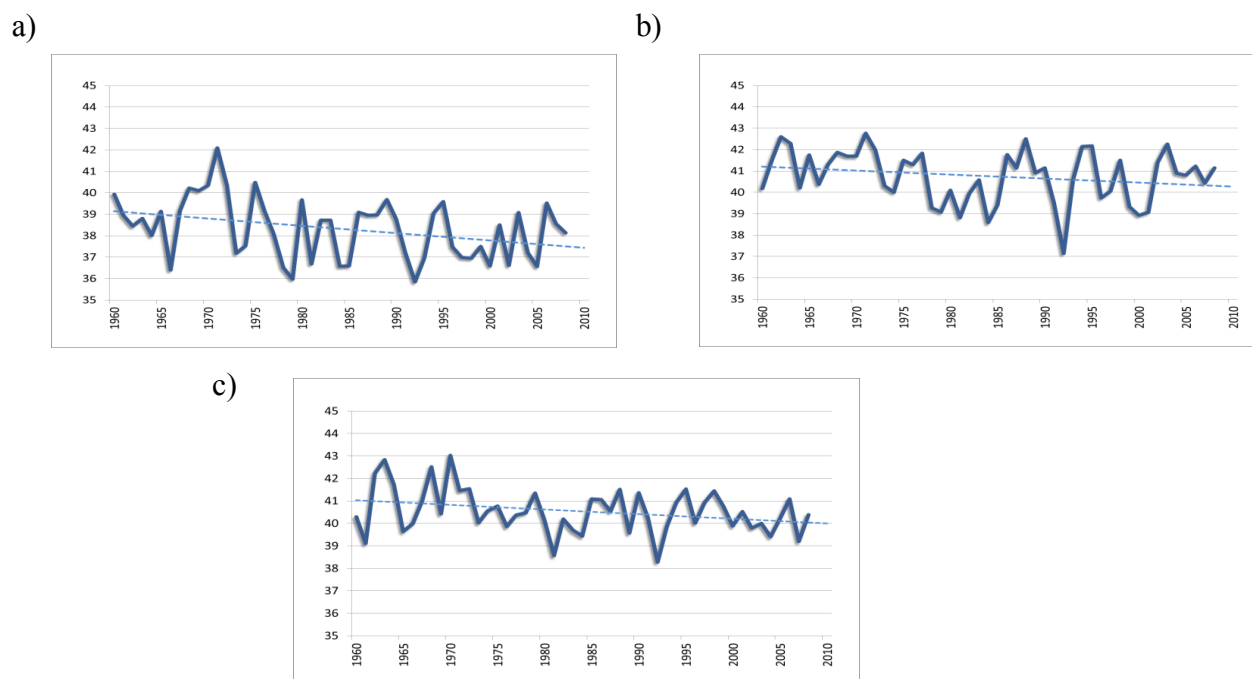


Figura 6.2.1.8: Ídem Figura 6.2.1.4, pero para el número de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1960-2010 (TX90p)

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	-2**	-1	-1**	-1**

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

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

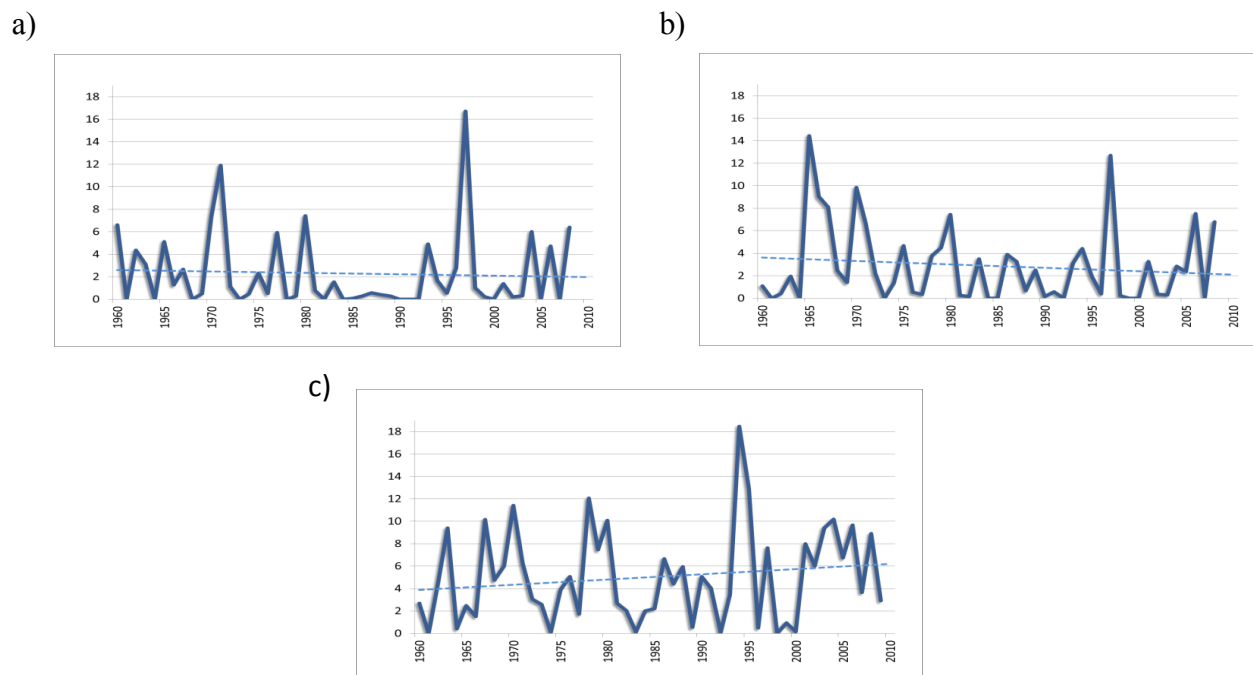


Figura 6.2.1.9: Ídem Figura 6.2.1.4, pero para la duración de olas de calor (WSDI).

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO-NORTE	CENTRO
Cambio 1960-2010	-0,6	-1,5	2,4	1

Tabla 6.2.1.9: Ídem Tabla 6.2.1.4, pero para la duración de olas de calor definido como el número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el respectivo valor del percentil 90 (WSDI).

6.2 Precipitación

Precipitaciones medias

Entre 1960 y 2010, en la región Centro ha habido aumentos significativos de la precipitación anual y en las estaciones de verano y otoño e invierno (confianza alta). La precipitación en esta región está intensamente afectada por variaciones en escalas de décadas (confianza media). Existe además gran heterogeneidad en las variaciones espaciales de estos cambios (confianza media).

Existen varios trabajos sobre los cambios y tendencias de la precipitación que abarcan la región Centro. Barros y otros (2000) describieron los cambios en la precipitación anual en la Argentina, identificando un desplazamiento de la isoyeta de 600mm hacia el oeste en 100 a 200 Km. en la mayor parte de la región Centro durante la segunda mitad del siglo XX, resultado del aumento de la lluvia hasta esa fecha (Haylock y otros 2006 y Alexander y otros 2006). Krepper y otros (1989) encontraron un incremento de la precipitación anual en la región sudoccidental pampeana, particularmente sobre la provincia de La Pampa entre 1947 y 1976.

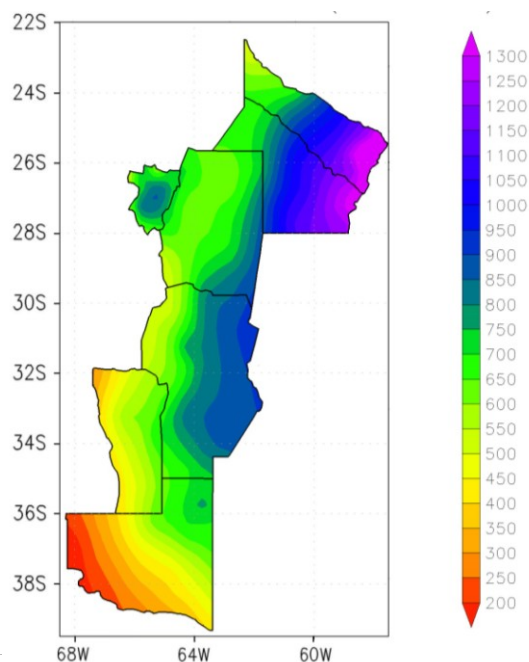
En cuanto a la estacionalidad, las tendencias positivas de las precipitaciones anuales en la segunda mitad del siglo XX, son resultado de las tendencias en el semestre cálido (de octubre a marzo) (Barros y otros 2008; Liebmann y otros 2004). En toda la región Centro hubo grandes variaciones en la escala de décadas, lo que concuerda con la literatura publicada. Entre esas variaciones se inscribe la reducción brusca hacia el final del periodo, Figura 6.2.2.1c y Tabla 6.2.2.1.

		PRECIPITACIÓN 1960-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
CENTRO SUR	Medio	242	1671	52	186	647
	Cambio	47	56**	0	10	114*-
CENTRO MEDIO	Medio	322	173	31	170	695
	Cambio	12	28	-21**	-25	-6
CENTRO NORTE	Medio	385	306	69	259	1016
	Cambio	49	31	-16	45	106
REGION CENTRO	Medio	332	232	53	215	830
	Cambio	37	36	-14	15	74

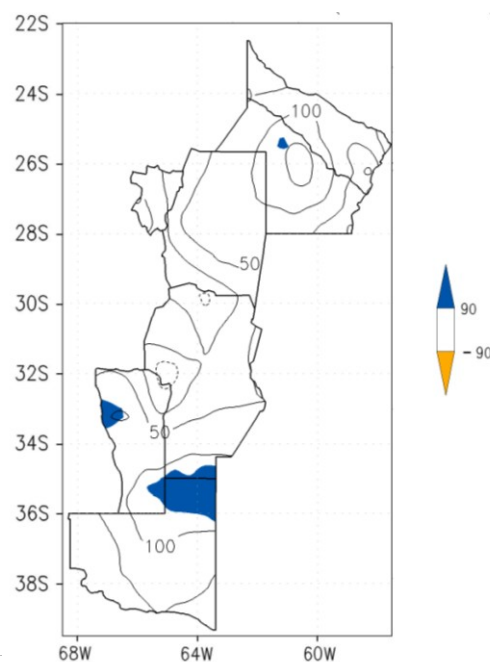
Tabla 6.2.2.1: Valores promedios regionales y cambio de la precipitación total anual (mm) en las subregiones Centro sur, Centro medio y Centro norte de la región Centro. Valores de cambio significativo: * al 90% de confianza, ** al 95% de confianza

El incremento anual de la precipitación en la región oeste de Argentina se produjo como un 'salto' o discontinuidad a partir de la década del 70 (Minetti y Vargas 1997; Agosta 2013; Agosta y Compagnucci 2012; Figuras. 6.2.2.c). En cambio, en el sudoeste de la región Centro (San Luis y el oeste de La Pampa) a partir de la década de 1970 se inició un aumento sostenido de precipitación estival con un significativo incremento de alrededor del 24% en la media regional, Agosta y otros (1999), Compagnucci y otros (2002). Por otra parte, Penalba y Vargas (2004, 2008) identificaron una variabilidad década en las precipitaciones anuales en la provincia de Córdoba y San Luis superpuesta a una tendencia lineal entre 1960 y 2000.

a)



b)



c)

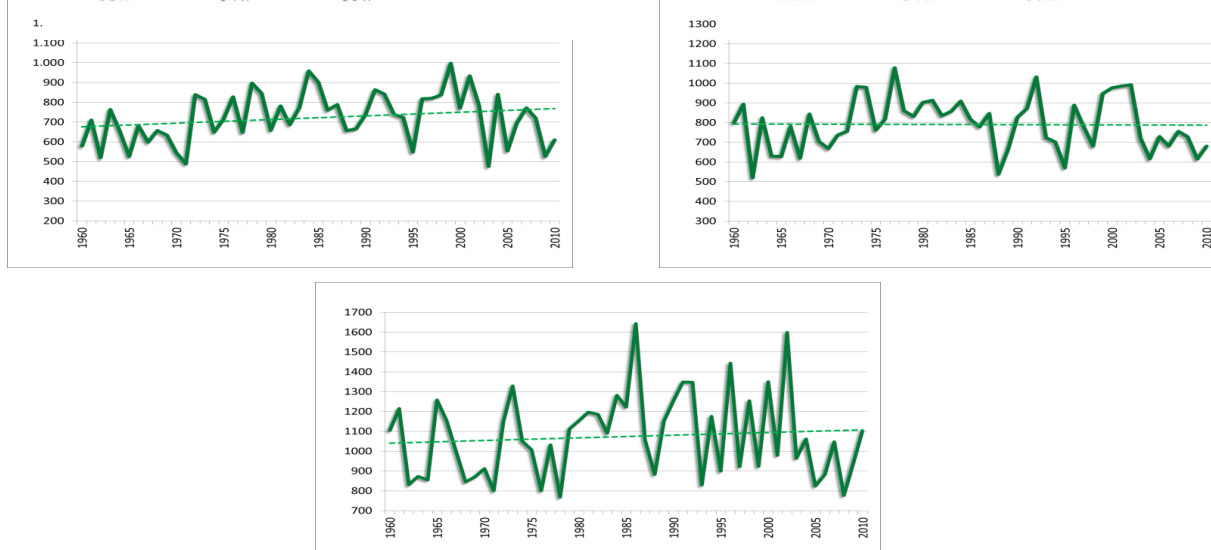


Figura 6.2.2.1: a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960/2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, c) promedios regionales de precipitación anual para las tres subregiones: panel superior izquierdo Centro sur, panel superior derecho, Centro medio y panel inferior, Centro norte

Entre 1960 y 2010, la precipitación total anual en la Región Centro aumentó en promedio alrededor de 70mm. Sin embargo, este aumento fue heterogéneo dependiendo de la zona: 100mm en el centro de la provincia del Chaco; 100mm y significativo en el norte de La Pampa y al centro

oeste de San Luis, pero con una reducción en la zona límite entre la provincia de Córdoba y Santiago del Estero, Figuras. 6.2.2.1b y 6.2.2.1c y Tabla 6.2.2.1.

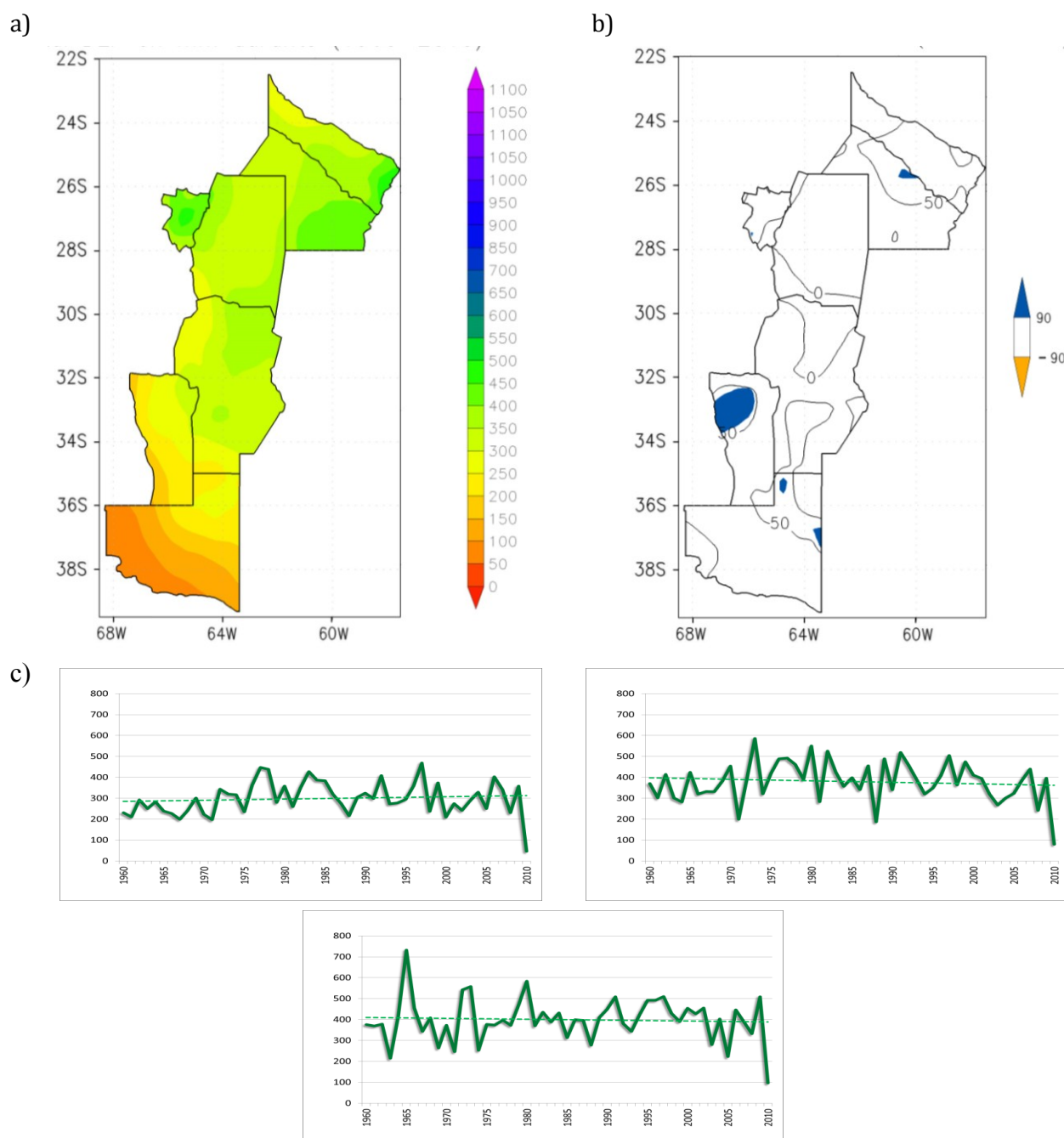


Figura 6.2.2.2: Ídem Figura 6.2.2.1, pero para el verano

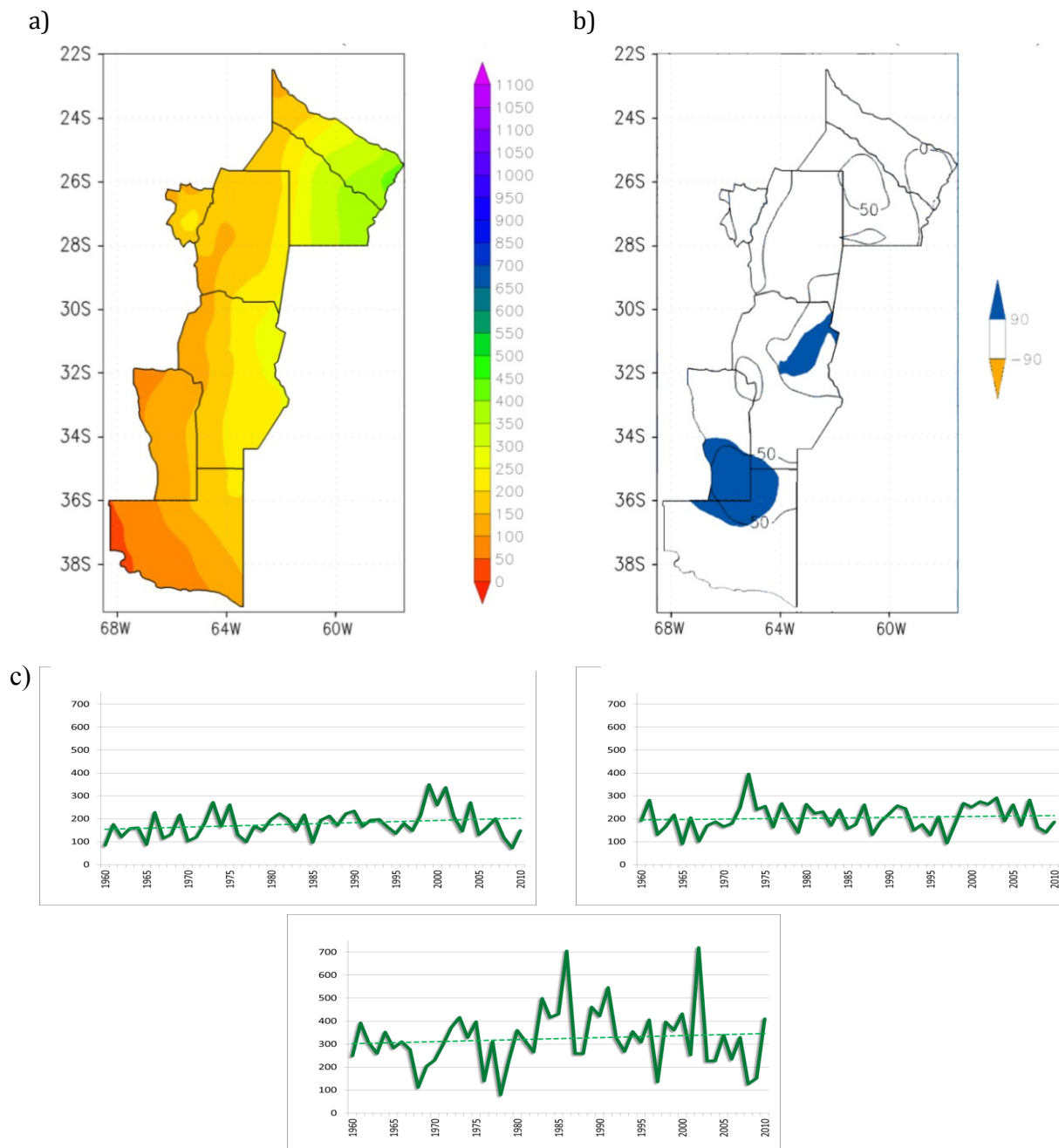


Figura 6.2.2.3: *Ídem Figura 6.2.2.1, pero para el otoño*

La precipitación estacional del verano, en el período 1960-2010, aumentó al sur del paralelo 32°S, Figura 6.2.2.2b y Tabla 6.2.2.1. La única zona en donde el cambio fue significativo es en el noroeste de San Luis, Figura 6.2.2.2b.

La precipitación en otoño aumentó significativamente más de 50 mm en la región centro sur, Tabla 6.2.2.1. En el resto de las subregiones la precipitación también aumentó dando como resultado un aumento generalizado de más de 30mm en promedio en toda la región Centro.

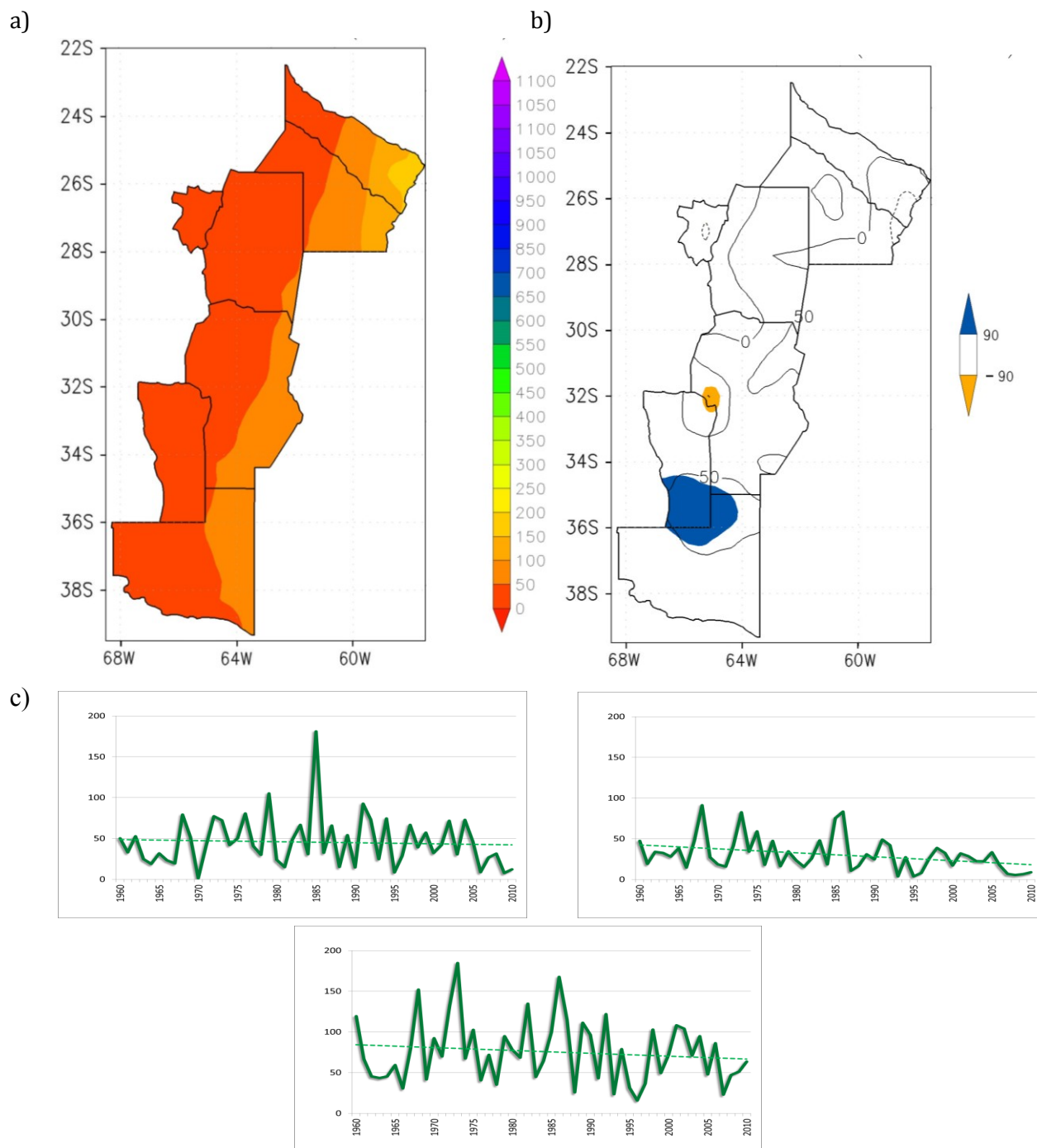


Figura 6.2.2.4: Ídem 6.2.2.1, pero para el invierno

Entre 1960 y 2010, la precipitación invernal tuvo un aumento significativo en el sur de San Luis y norte de La Pampa y una disminución en el resto de la región Centro Figura 6.2.2.4b, Tabla 6.2.2.1, 6.2.2.4c.

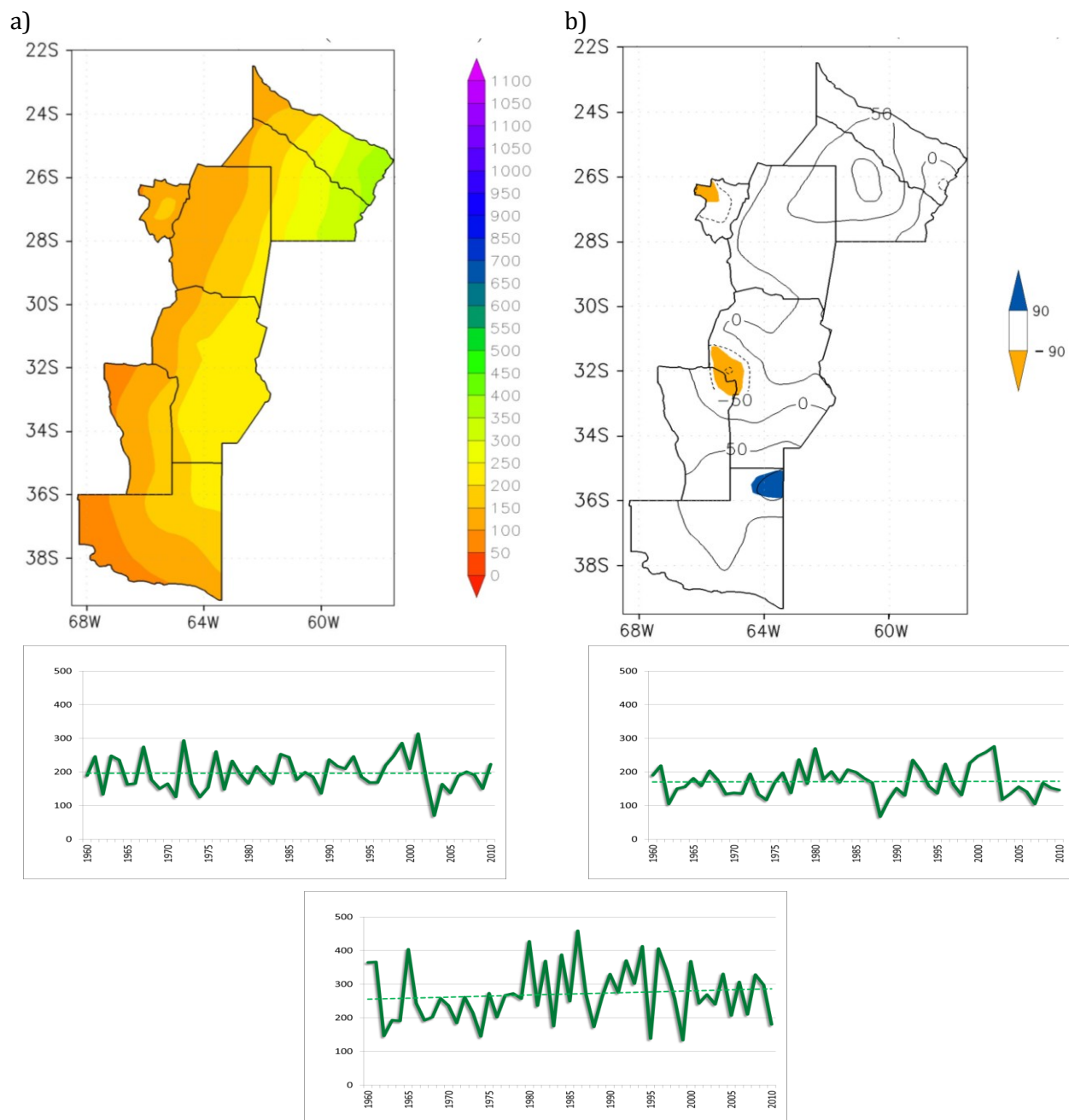


Figura 6.2.2.5: Ídem Figura 6.2.2.1, pero para la primavera

Precipitaciones extremas

Los extremos de precipitación diaria, su intensidad y la frecuencia de su ocurrencia presentan tendencias positivas, superpuestas a variabilidad decadal y están acompañados por una disminución en la cantidad de días sin lluvias al año (confianza alta).

Debido a su impacto en las regiones afectadas, el estudio de la variabilidad de los extremos de precipitación diaria, inundaciones y sequías, ha sido abordado por varios investigadores en la última década. Naumann y otros (2012) observaron aumentos significativos de precipitación extrema en la primavera, para La Pampa, San Luis, Chaco y Formosa. Este aumento también ocurrió en el total anual de precipitación con lluvias diarias superiores al percentil 95 y en la cantidad anual de días con lluvias mayores a 10 mm de precipitación diaria. (Penalba y Robledo 2010) y en los días con precipitación superior a 50 y 150mm (Re y Barros 2009). Para un período hasta una fecha más reciente, 1969-2006, la distribución estadística de la precipitación estacional en la provincia de La Pampa se modificó con menores frecuencias debajo de la media y una ligera mayor frecuencia en los extremos más altos (Russián y otros 2010).

Consistentemente, estos aumentos estuvieron acompañados por una tendencia negativa en la cantidad de meses secos en el periodo 1901-2010 (Minetti y otros 2010) y por el número anual de días secos hasta el 2000, año en el cual la tendencia se revertió por una posible variabilidad interdecadal (Rivera y otros 2013).

La precipitación diaria máxima del año ($Rx1day$) aumentó significativamente entre 1960 y 2010 en las tres subregiones Figura 2.3.1, Figura 6.2.2.6 y Tabla 6.2.2.6.

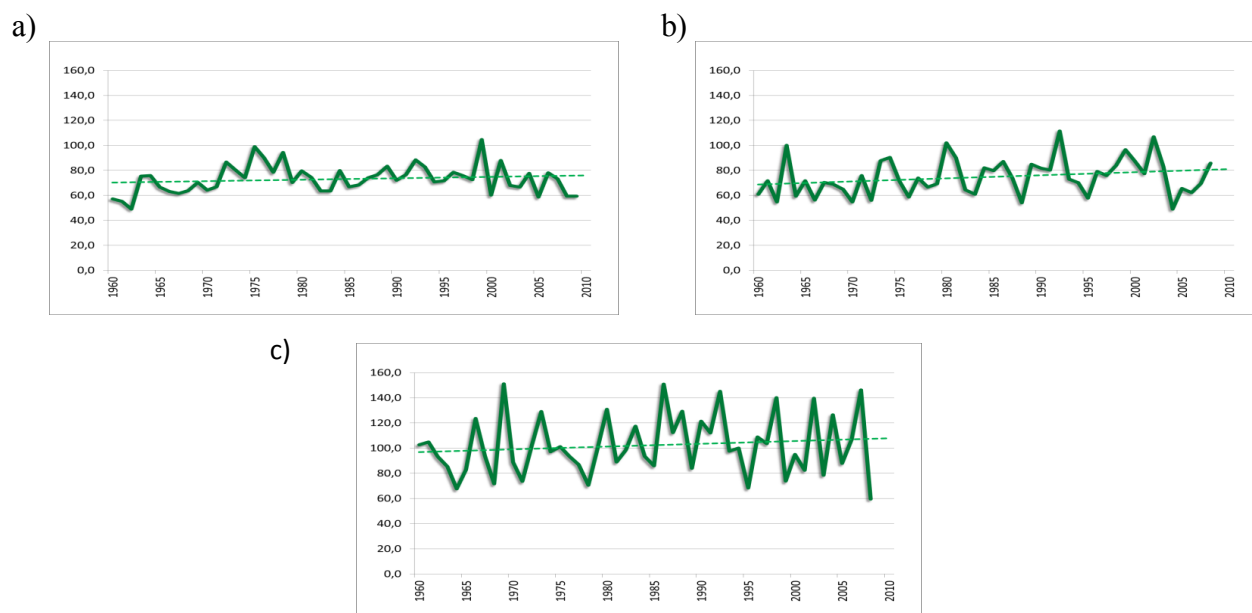


Figura 6.2.2.6: Promedio de la precipitación diaria máxima del año ($Rx1$) en tres subregiones: a) Centro sur; b) Centro medio; c) Centro norte

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO NORTE	CENTRO
PROMEDIO	73	75	102	88
CAMBIO	6	13*	11	12

Tabla 6.2.2.6: Valores promedios regionales y cambio de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) en las subregiones Centro sur, Centro medio y Centro norte de la región Centro. Valores de cambio significativo: * al 90% de confianza y ** al 95% de confianza

La precipitación máxima anual durante 5 días consecutivos (Rx5day) aumentó en las tres subregiones, Figura 6.2.2.7, y con significancia estadística en la subregión Centro sur. Tabla 6.2.2.7.

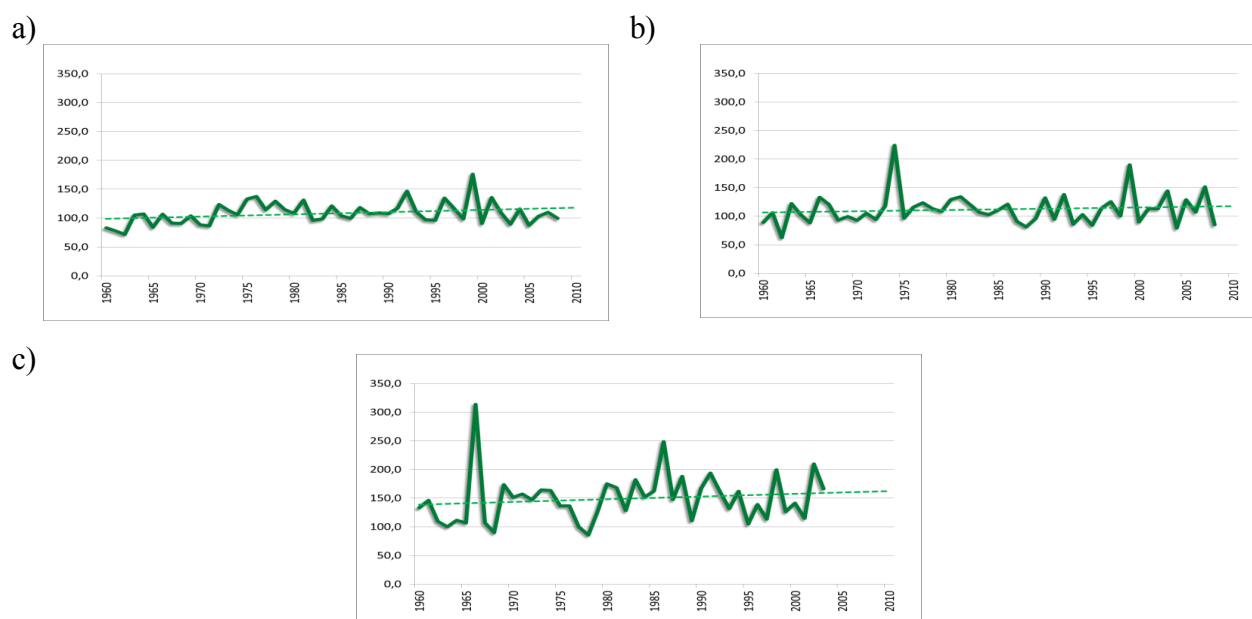


Figura 6.2.2.7: Ídem Figura 6.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5)

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO NORTE	CENTRO
PROMEDIO	108	112	149	131
CAMBIO	19**	11	24	20

Tabla 6.2.2.7: Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para la precipitación diaria máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) en el año

La región Centro tuvo un aumento de 44mm en la precipitación anual de los días en que la precipitación superó el percentil 95 (R95pTOT), siendo significativo el cambio en la región Centro sur, Tabla 6.2.2.8. Hubo aumentos significativos en la región del norte de La Pampa, noroeste de San Luis y el sur de Córdoba, Figura 2.3.4.

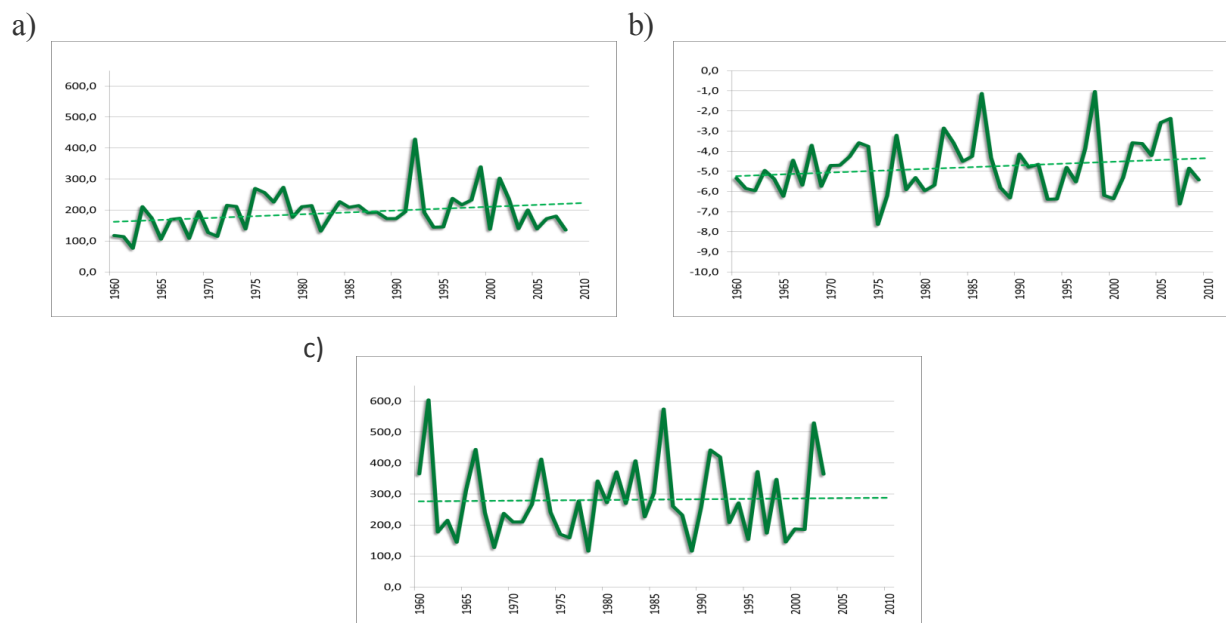


Figura 6.2.2.8: Ídem Figura 6.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT)

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRO NORTE	CENTRO
PROMEDIO	191	191	282	239
CAMBIO	63**	33	12	44

Tabla 6.2.2.8: Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT)

Entre 1960 y 2010, la longitud máxima de días consecutivos con precipitaciones menores a 1 mm (CDD) tuvo un aumento significativo generalizado en la región Centro (14 días), Tabla 6.2.2.9. Este comportamiento regional es el resultado de aumentos significativos en las subregiones Centro norte y Centro medio, pero en la región Centro sur hubo una disminución de las secuencias secas extremas, Figura 6.2.2.9 y Tabla 6.2.2.9.

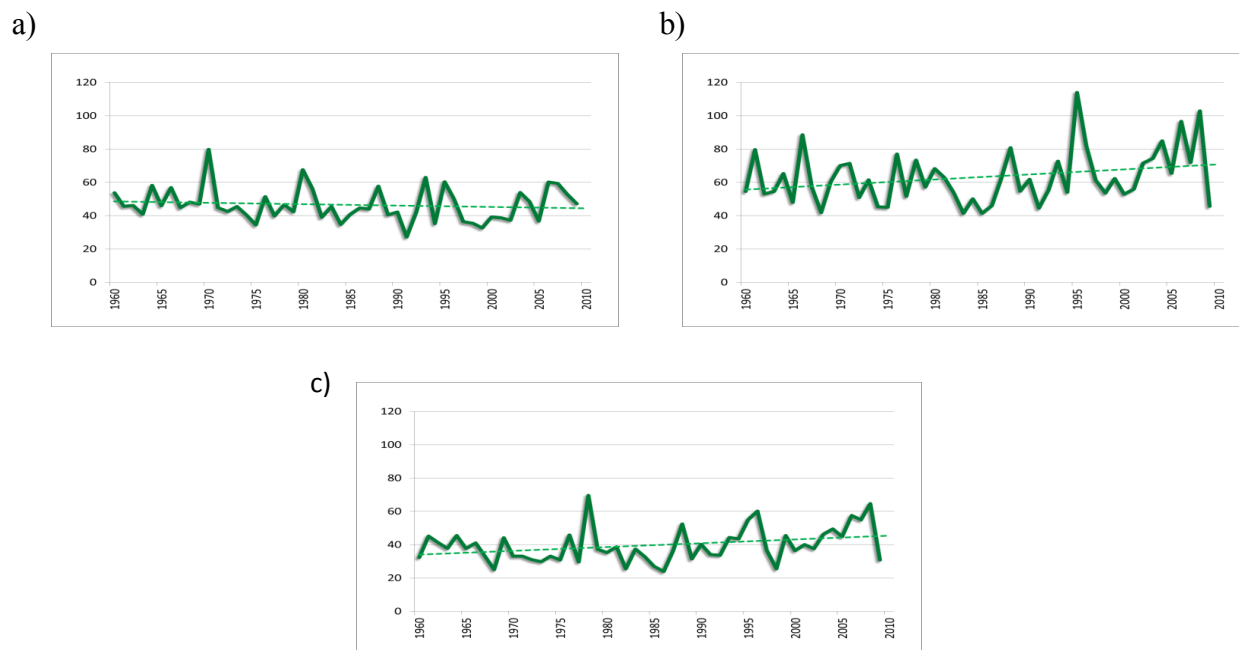


Figura 6.2.2.9: Ídem Figura 6.2.6, pero para el máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año, (CDD)

	CENTRO SUR	CENTRO MEDIO	CENTRONORTE	CENTRO
PROMEDIO	47	63	40	51
CAMBIO	-4	16*	12**	14**

Tabla 6.2.2.9: Ídem Tabla 6.2.2.6, pero para el máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD)

Dado que la región es semiárida, las precipitaciones extremas son muy poco frecuentes a menos que se consideren como tales a las que superan umbrales muy modestos. Por ello, se adoptaron dos umbrales, 25mm y 50mm. Para llevar a cabo este análisis se utilizaron dos estaciones del norte de la región Centro, que contaban con datos diarios: Las Lomitas (1960-2010) y Formosa (1963-2010). Para la estación Formosa, el análisis se llevó a cabo a partir de la década 1971. La Figura 6.2.2.10 y Tabla 6.2.2.10 muestran la evolución decadal del número de casos con precipitaciones diarias por encima de los umbrales fijos en períodos de 10 años y una serie que muestra el número de casos total de estas series que superan dichos umbrales. Aunque en forma heterogénea, esos datos limitados indican que hubo una tendencia hacia más frecuentes precipitaciones extremas dependiendo del umbral analizado, como fue encontrado también por Re y Barros (2009).

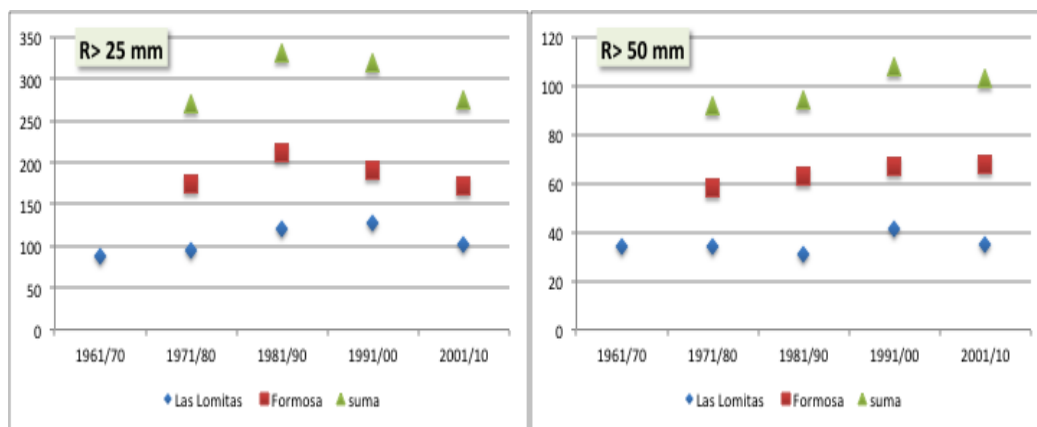


Figura 6.2.2.10: Cantidad de días con lluvias superiores a 3 umbrales distintos: 25 mm, 50 mm y 100mm, en dos estaciones: a) Las Lomitas; b) Formosa, para distintas décadas

	Las Lomitas	Las Lomitas		Formosa	Formosa
1961-2010	25 mm	50 mm	1971-2010	25 mm	50 mm
Promedio	106	35	Promedio	188	64
Cambio	30*	4.5	Cambio	-10	13*

Tabla 6.2.2.9: Valores promedios y cambio de la cantidad de días por décadas con precipitación superior a los umbrales 25mm y 50 mm en Las Lomitas y Formosa en la subregión Centro norte. Valores de cambio significativo: * al 90% de confianza, ** al 95% de confianza

Grado de incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados

Las series de precipitación de la región que cubren el periodo 1960-2010 o gran parte del mismo son escasas. Ello hace que las estimaciones regionales o subregionales puedan tener algún grado de error. Una forma de estimar el grado de error posible es comparando tendencias calculadas con dos bases distintas que tienen algunas diferencias en las estaciones que utilizan. Lo que sigue es la comparación del cambio de la precipitación anual según las bases GPCC y CRU (1960-2010).

Ambas bases son coherentes en el signo de los cambios. Las amplitudes aparecen más pronunciadas (mayores valores de las anomalías) en la base GPCC. El cambio positivo (aumento de precipitación) en la subregión Centro-sur es altamente consistente pues aparece con similar extensión espacial en ambas bases, aunque con intensidad distinta. El cambio negativo (disminución de la precipitación) en la subregión Centro-medio, que es manifiestamente significativo para la base GPCC no lo es para la base CRU en la cual incluso disminuye notoriamente su extensión espacial y su amplitud por lo que sobre este cambio en esa zona hay

baja confianza. Para el resto del campo de cambio, ambas bases coinciden bastante por lo que se tiene alta confianza sobre las conclusiones sobre estos cambios.

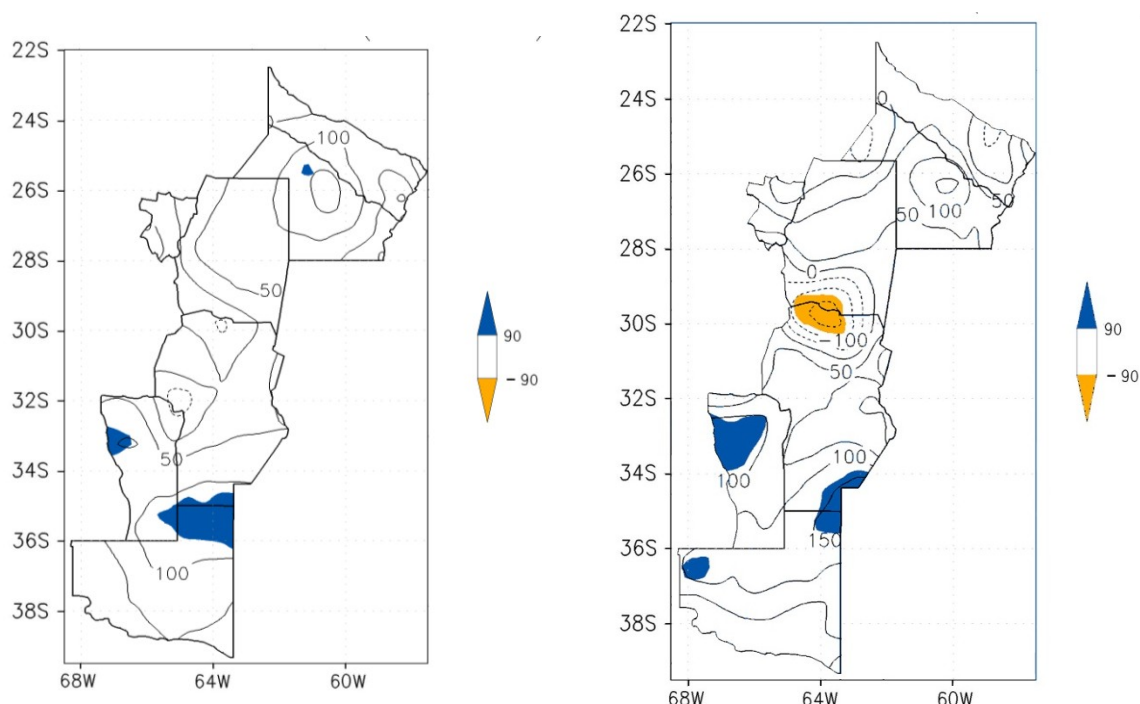


Figura 6.2.2.11: cambio en la precipitación media anual, entre 1960 y 2010 en mm. A la izquierda calculada con datos de la base CRU y a la derecha con datos de la base GPCC. Significancia en colores según lo indicado por la escala de la derecha

6.2.3 Otras variables

La región Centro, principalmente en las provincias de Córdoba y La Pampa, es una de las regiones con las frecuencias más altas de granizo de Argentina. La evolución del número anual de eventos de granizo en esta región tuvo una tendencia negativa entre 1960 y 2008 (Mezher y otros 2012).

Agosta y Compagnucci (2008 2012) mostraron que en las décadas posteriores a la del 70, el viento en capas bajas con componente norte sobre Argentina subtropical se ha incrementado debido a cambios en la actividad del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, aportando mayor transporte de humedad y calor desde latitudes tropicales hacia el centro del país.

6.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CORRECCIÓN DE ERRORES

Se presenta la validación de la corrección de los errores sistemáticos de los modelos seleccionados que se usaron para las proyecciones climáticas del siglo XXI. La explicación de la metodología se describe en el capítulo 3, secciones 3.3.7 y 3.3.8.

6.3.1 Temperatura

Como en el caso de la región Húmeda, el ajuste de los modelos al campo observado es bueno en esta región, aún para los datos sin corregir, pero mejora con la corrección, Figura 7.3.1.

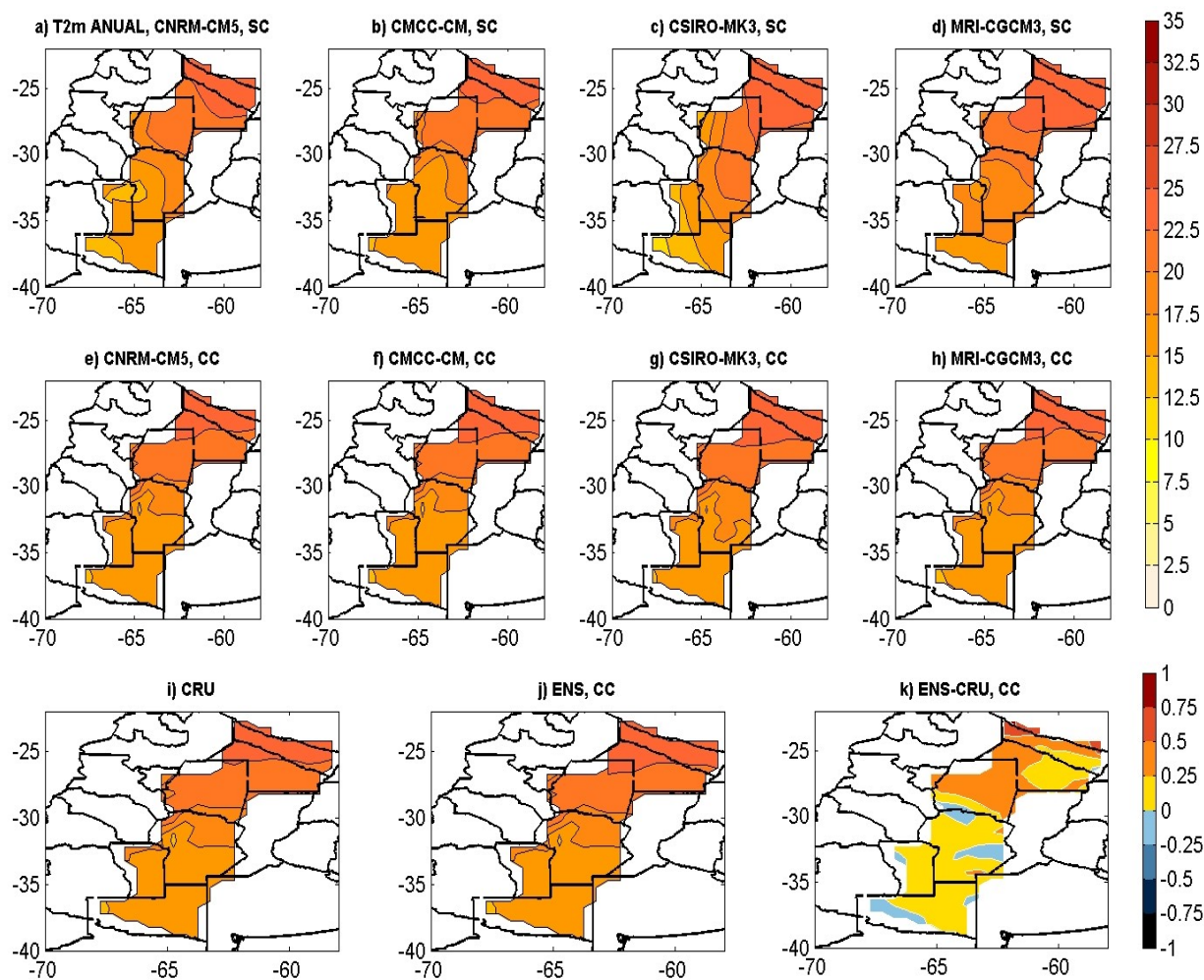


Figura 6.3.1: Validación de la temperatura media anual para la región Centro. 1976/1990. Panel superior: la temperatura de los modelos sin corregir. Panel del centro: ídem anterior, pero para los valores corregidos. Panel inferior, valores observados (CRU), ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU

El promedio de los modelos corregidos tiene en la mayor parte de la región un error de menos de 0,25 ° C y solo en el norte, esto es en el oeste de Santiago del Estero, Formosa y Chaco es mayor a ese valor en amplias zonas, pero aún así, no mayor a medio grado.

En el verano la situación es muy similar al caso anual, pero con mejoras importantes en el norte de la región en los modelos corregidos. Otra vez los errores son menores a 0,25 en el promedio de los modelos, siendo mayores, pero así por debajo de medio grado en el noroeste de la región,

Figura 7.3.2. En el invierno, Figura 7.3.3, los errores son algo mayores que en el verano en el norte, pero en general por debajo de medio grado.

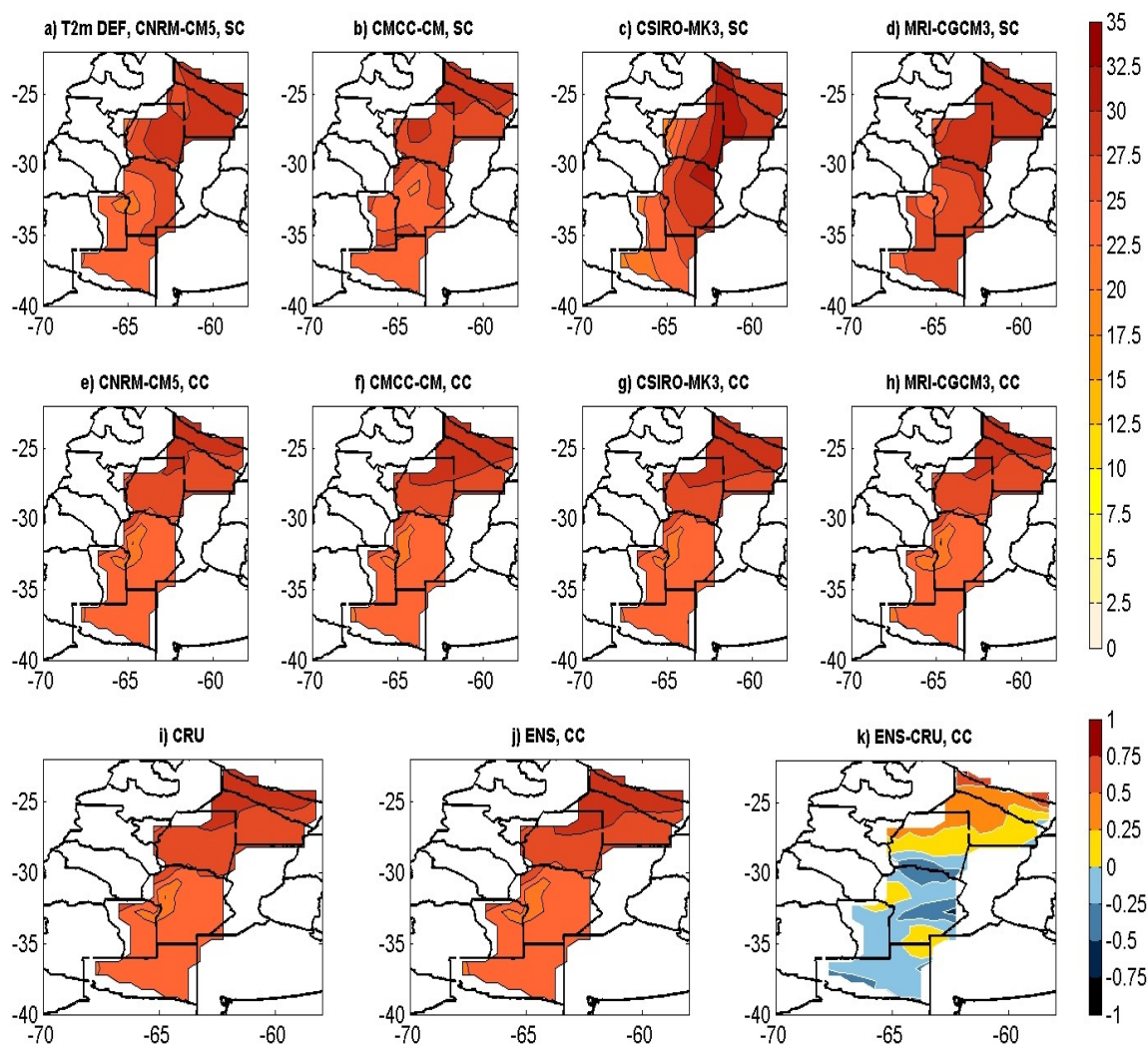


Figura 6.3.2: Ídem Figura 6.3.1, pero para la temperatura del verano (diciembre, enero y febrero)

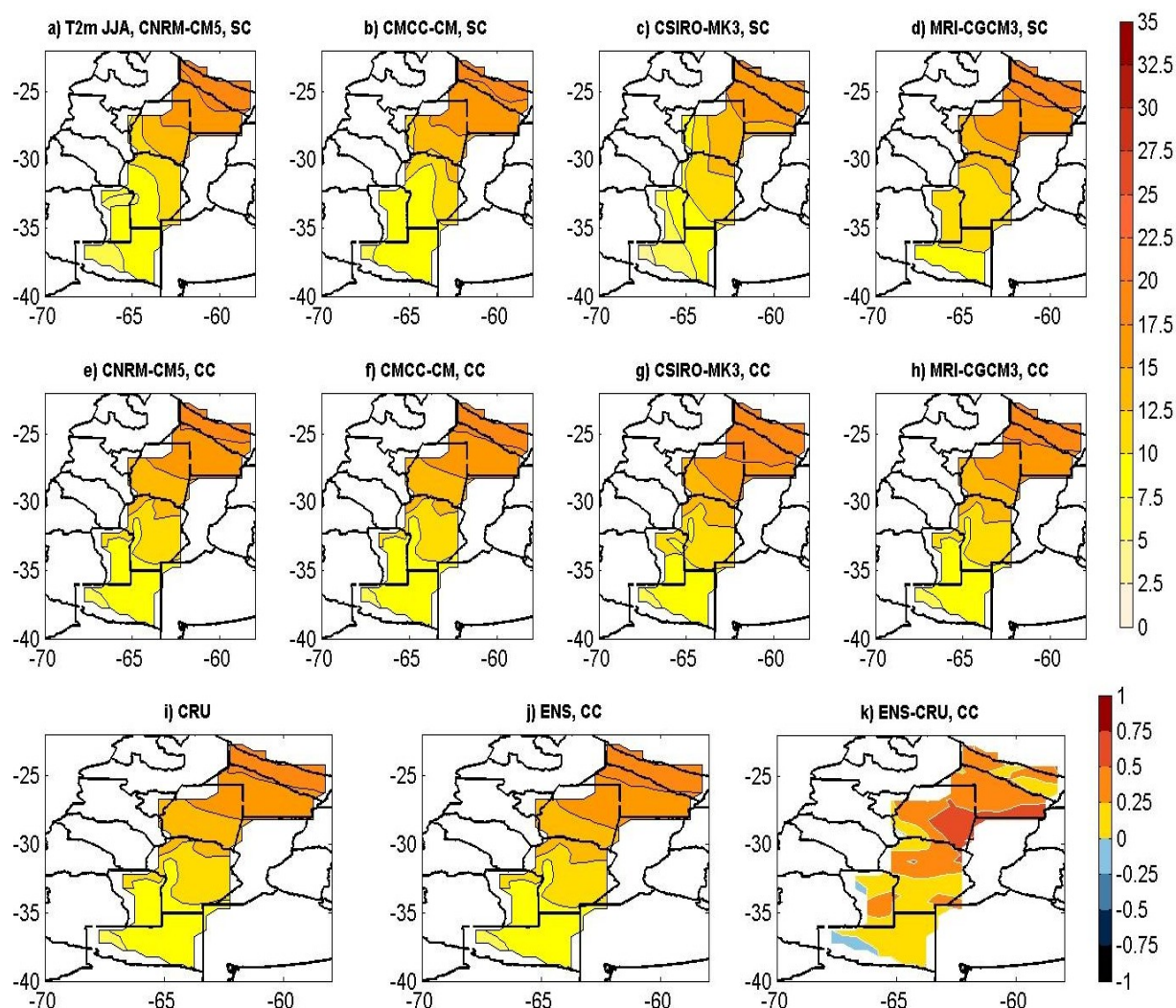


Figura 6.3.3: Ídem Figura 6.3.1, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

La Figura 6.3.4 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos representativos de la región. La distribución de temperatura mensual es también bimodal como en el caso de la región Húmeda. Los errores en la frecuencia de los modelos son, en general, bastante menores que las frecuencias observadas en los dos puntos y en casi todas las frecuencias. Muy interesante es el caso de las más altas temperaturas mensuales donde como en el caso de la región Este, estos resultados indican que las frecuencias de temperaturas extremas del futuro serían proyectadas con algún grado de certidumbre.

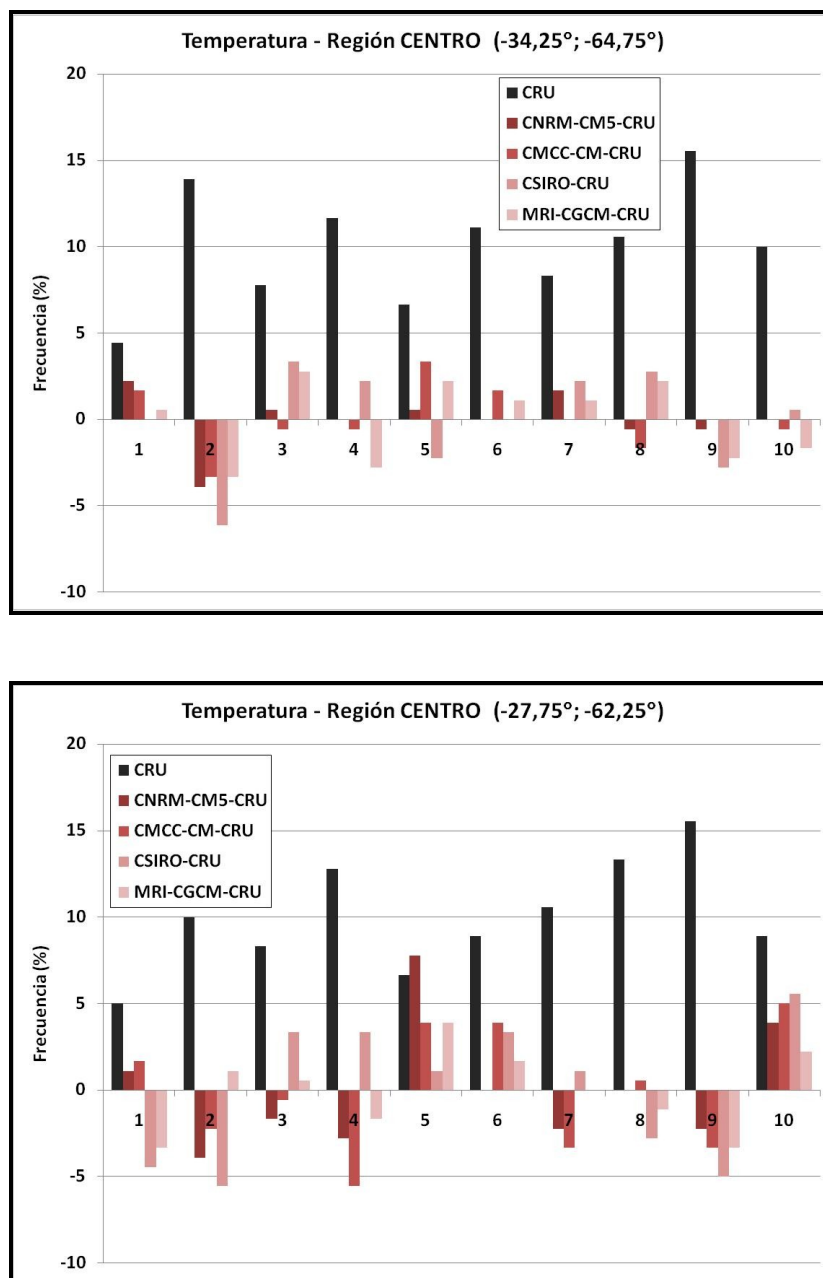


Figura 6 3.4: Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Centro. En negro las frecuencias observadas y en colores según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales

6.3.2 Precipitación

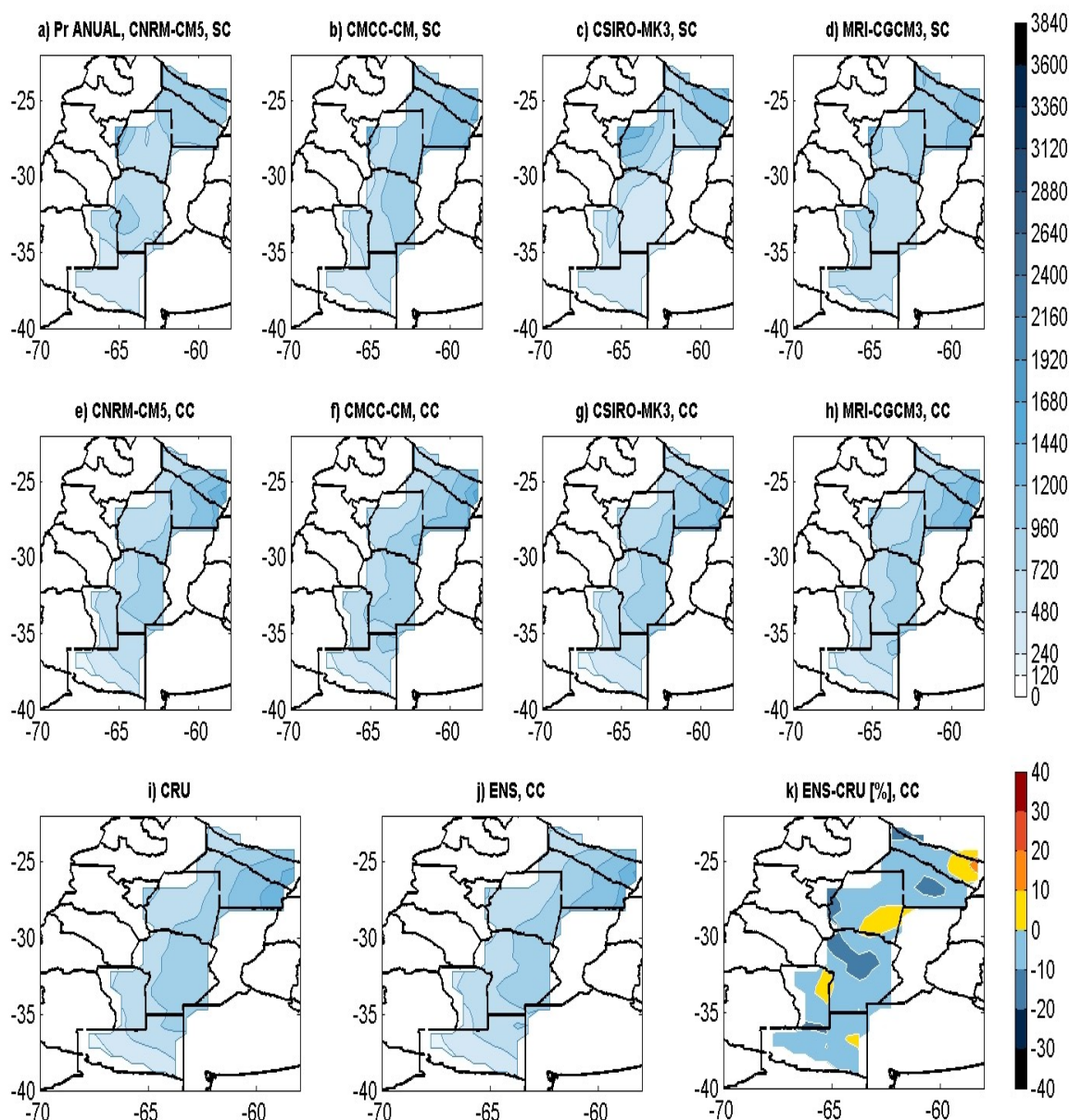


Figura 6.3.5: Ídem Figura 6.3.1, pero para la precipitación anual

La precipitación anual corregida es sustancialmente más representativa del campo anual observado que la no corregida, Figura 6.3.5. El promedio de los modelos presenta diferencias en general menores al 10% con el campo CRU. Como esta zona es predominantemente semiárida,

Sin embargo el ajuste estacional es menor. En el caso del verano, hay zonas aisladas donde el error está entre el 20 y 30%, pero en general está por debajo del 20%, Figura 6.3.6. En invierno en la zona central, mayormente en la provincia de Córdoba, los errores relativos son sustancialmente mayores, de forma que para el promedio de los modelos corregidos llegan a estar entre 30 y 40% por encima del campo observado, Figura 6.3.7. Esta región es de precipitaciones con características monzónicas, donde el invierno es pronunciadamente seco, y excepto en el este de Chaco y Formosa sus precipitaciones medias no son mayores a 120 mm. Por lo tanto, los errores relativos como los que aparecen en el panel k de la Figura 6.3.7 representan valores poco importantes en valor absoluto.

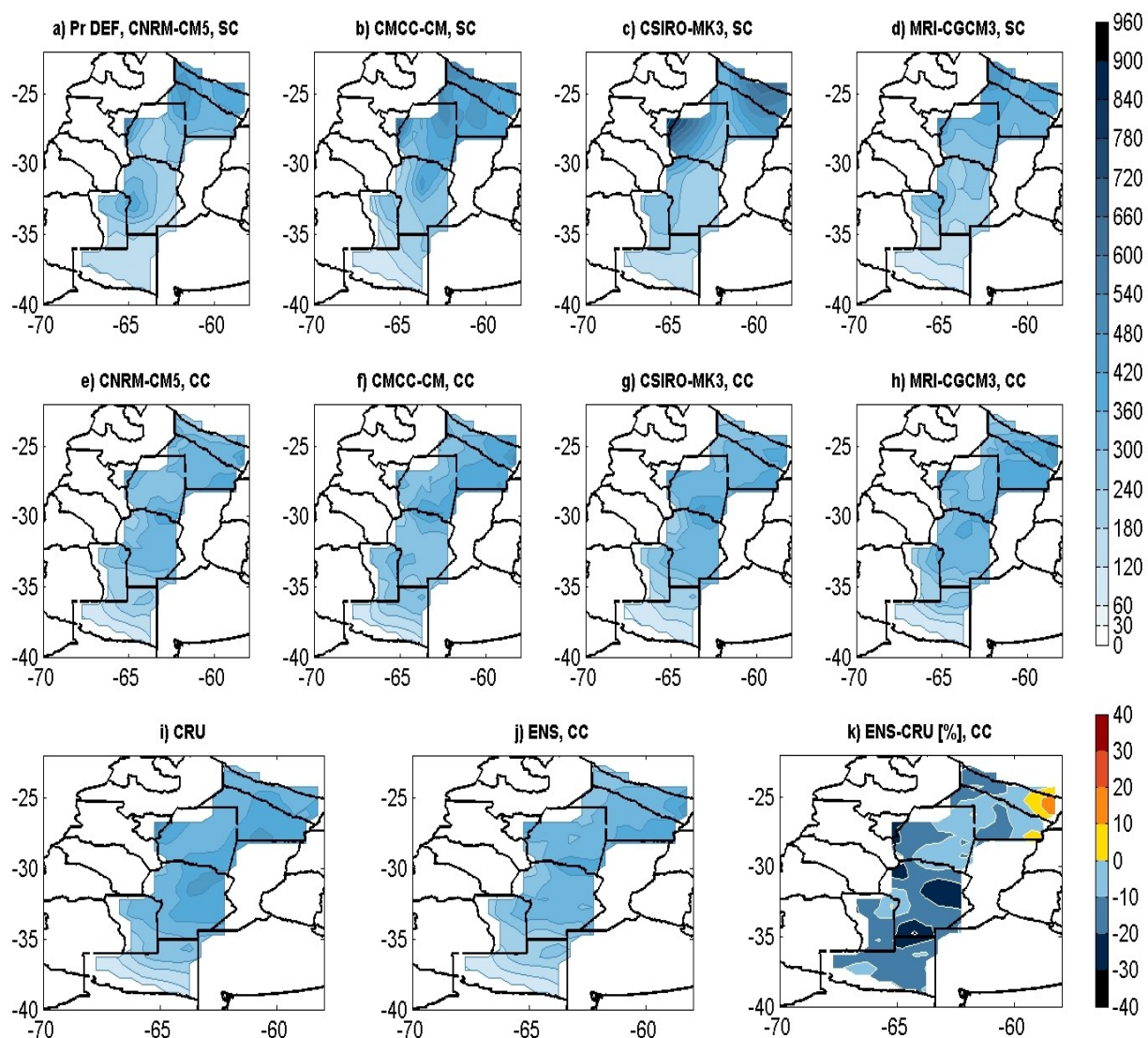


Figura 6.3.6: Ídem Figura 6.3.5, pero para la precipitación de verano (diciembre, enero y febrero)

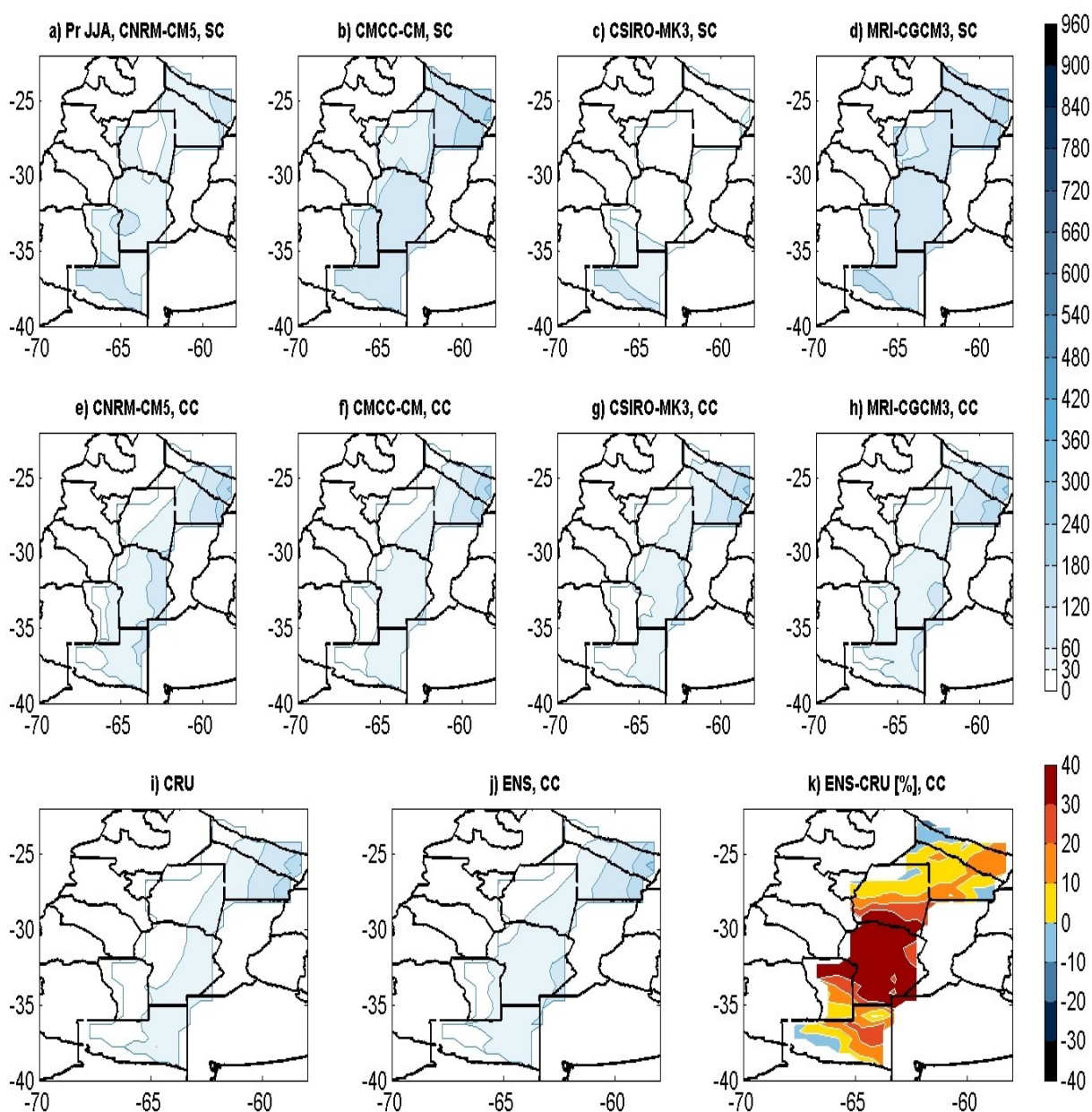


Figura 6.3.7: Ídem Figura 6.3.4, pero para la precipitación de invierno (junio, julio y agosto)

La Figura 6.3.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada según CRU en dos puntos representativos de la región Centro. La distribución de la precipitación mensual tiene la forma de una distribución Gama, típica de las regiones donde las lluvias muy escasas o nulas son muy frecuentes. Los errores en los valores extremos de la precipitación son iguales o mayores que la

frecuencia observada indicando la dificultad que existiría para captar la correcta frecuencia en las precipitaciones mensuales extremas en las proyecciones del clima futuro.

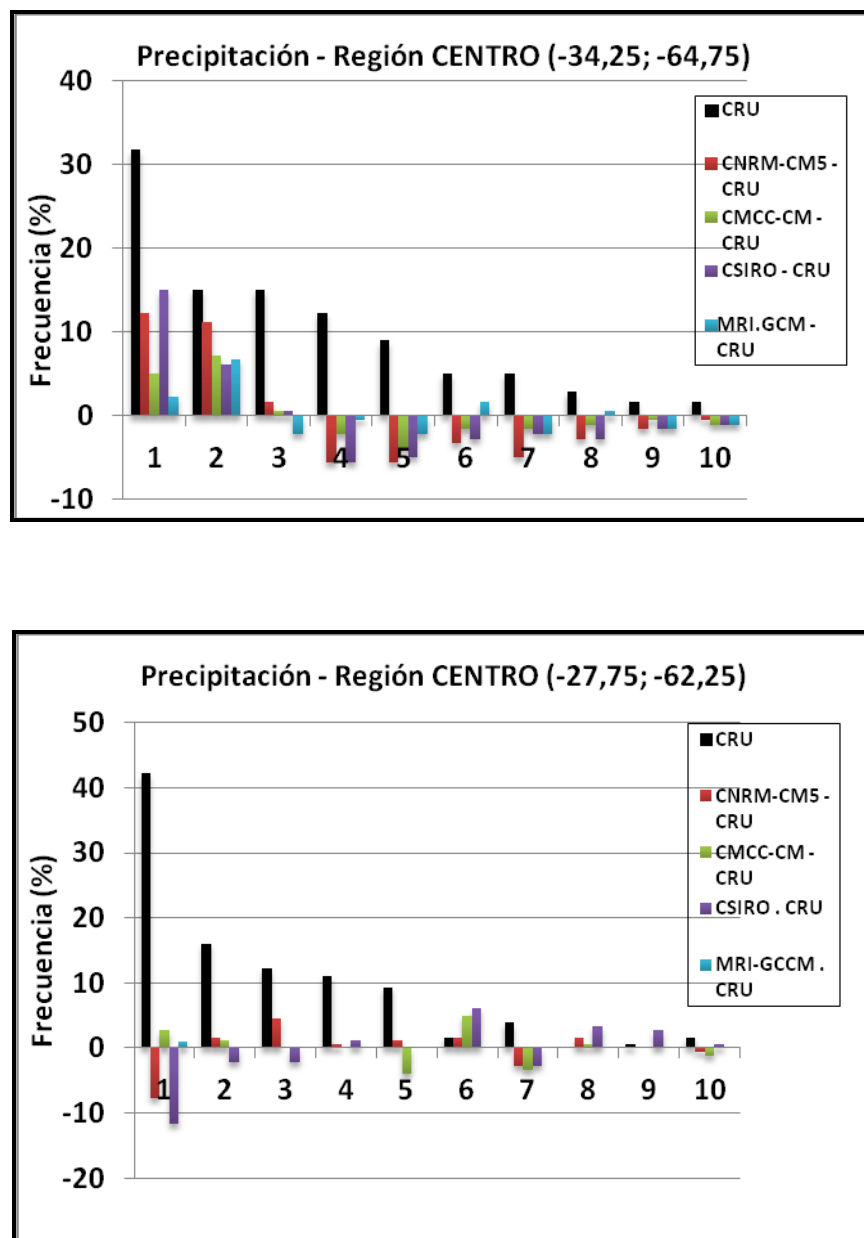


Figura 6.3.8: Ídem Figura 6.3.4, pero para la precipitación

6.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

6.4.1 Temperatura

Temperaturas medias

En los dos escenarios RCP, tanto para el futuro cercano como lejano, toda la región presenta calentamiento con respecto al periodo 1960-2010 que va de 0 y 1°C en el futuro cercano, sin mayores diferencias entre escenarios, hasta 2,5 a 3,5°C en el futuro lejano en el norte de la región en el RCP8.5.

En todos los casos el calentamiento es mayor en el norte que en el centro y sur de la región coincidiendo con los escenarios promedio de los 42 modelos del CMIP5, Figura 3.4.1. La temperatura mínima presenta mayor aumento que la máxima, siendo la diferencia más pronunciada en el futuro lejano, pero las diferencias entre estas dos variables no son muy grandes.

Las proyecciones de aumento de las temperaturas en esta región son menores que las de las regiones con las que limita al este y oeste (Húmeda y Andes). Este patrón geográfico continua lo observado en el periodo 1960-2010, Figura 2.2.1.

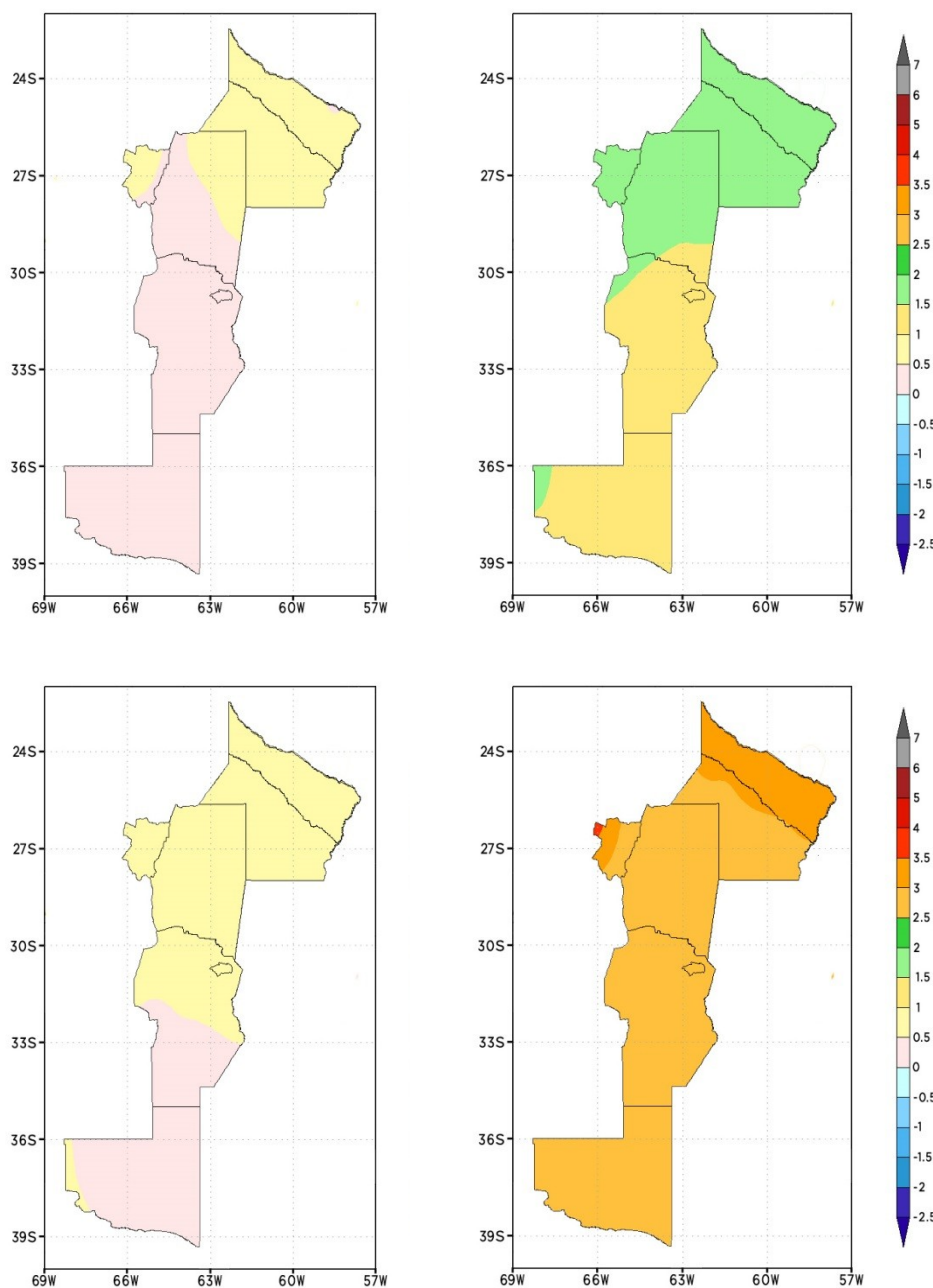


Figura 6.4.1.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

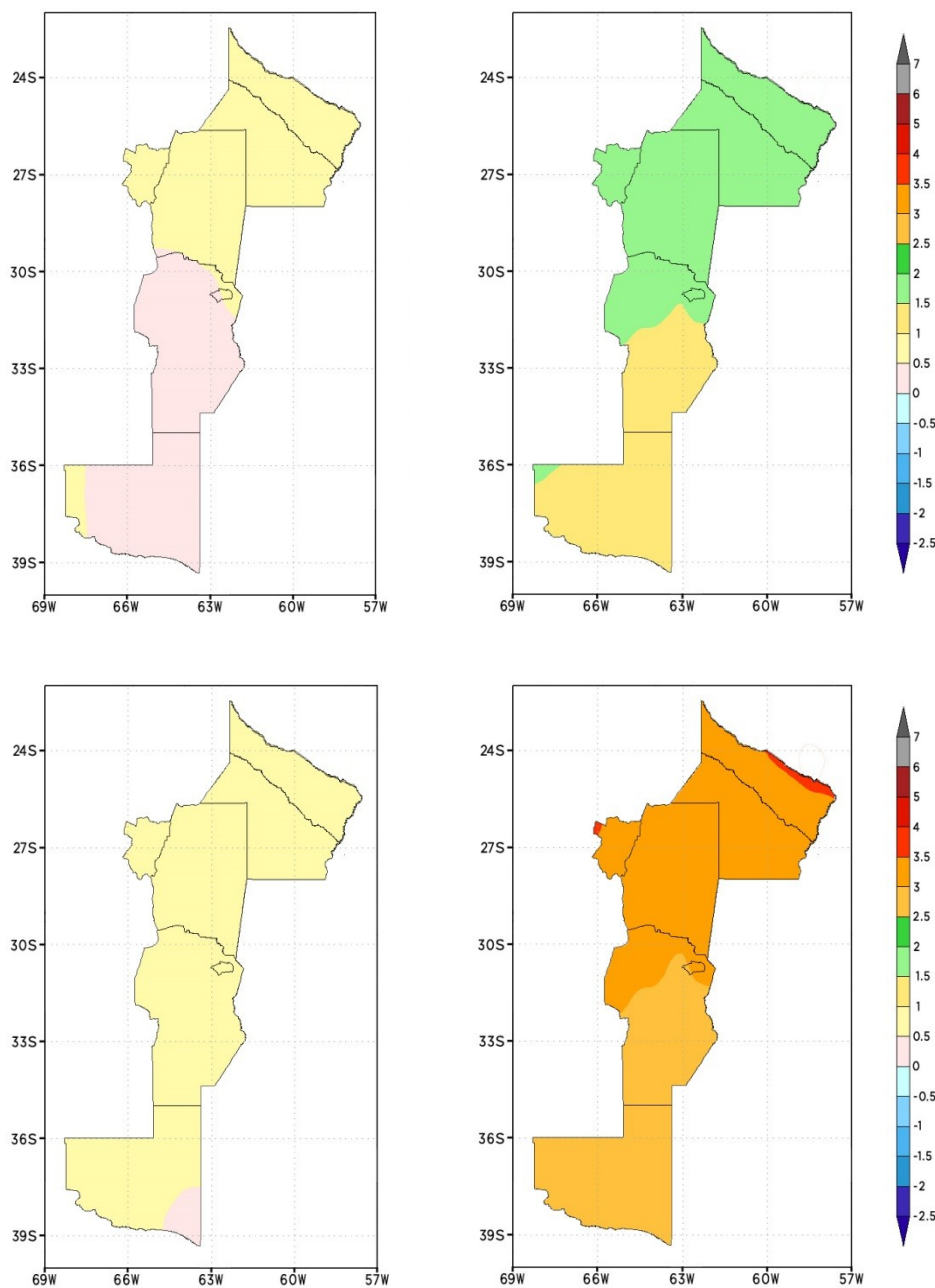


Figura 6.4.1.2: *Ídem figura 6.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual*

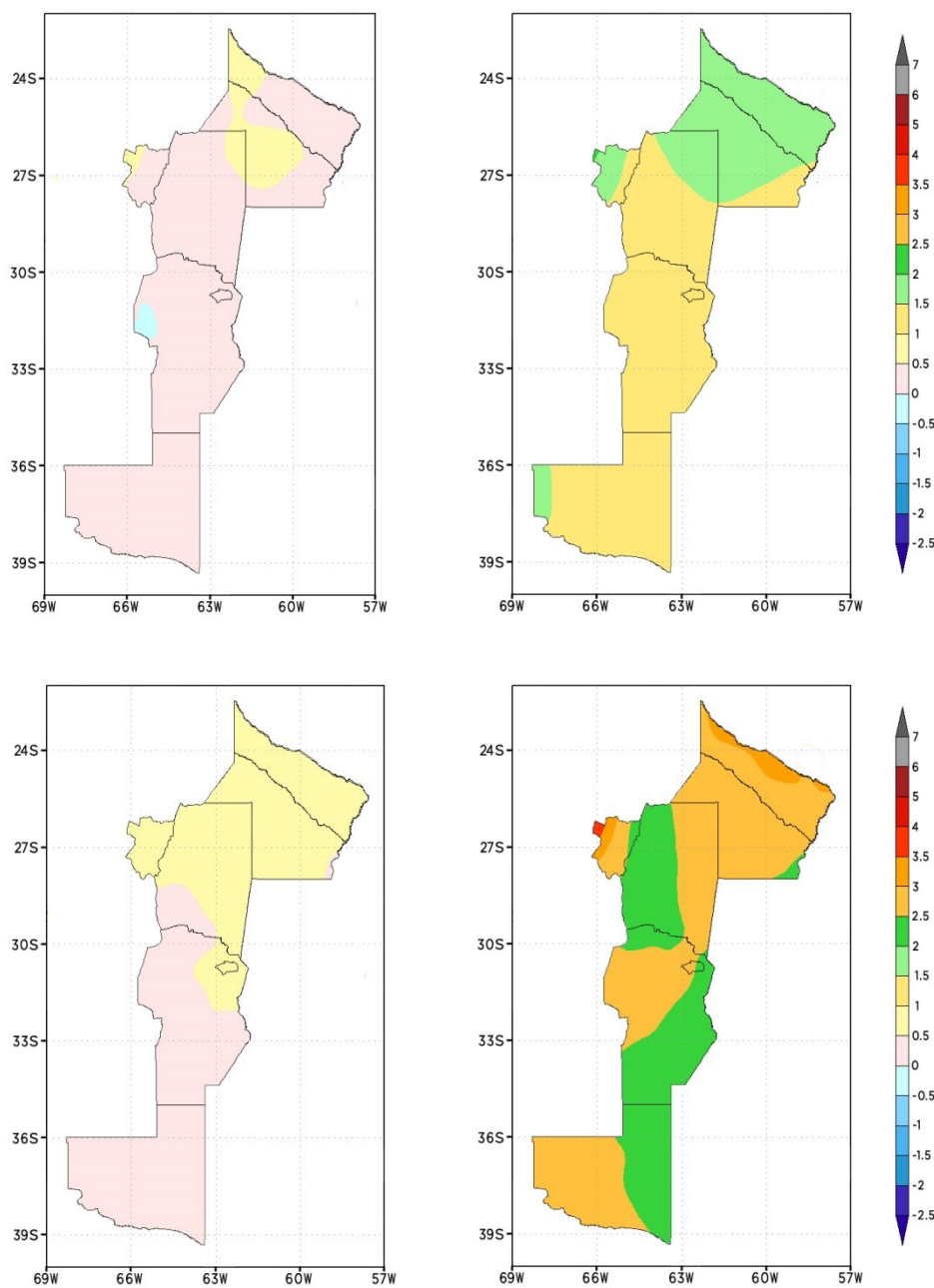


Figura 6.4.1.3: *Ídem figura 6.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual*

Extremos térmicos

Como en la región Húmeda, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento esperado, Figuras 6.4.1.4 a 6.4.1.9. Los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 solo tienen pequeñas diferencias entre ellos en el futuro cercano, pero sus escenarios difieren bastante en el futuro lejano con mayores cambios en el RCP8.5, como es de esperar por el proceso de calentamiento global. En los dos escenarios, los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

Las heladas se reducirían sustancialmente en el sur de la región y tenderían a ser muy infrecuentes en el norte, Figuras 2.2.4 y 6.4.1.4. Las noches con temperaturas en exceso de 20 °C (noches tropicales) y las temperaturas máximas y mínimas del año aumentarían mucho más en el norte de la región que en el sur, Figuras 6.4.1.5, 6.4.1.6 y 6.4.1.7.

Esta región, a diferencia de las otras tres, no presentó un muy claro calentamiento en el periodo 1960-2010 con enfriamientos en algunas zonas. Por el contrario, los escenarios proyectados muestran un calentamiento general, Figuras 6.4.1.1 a 6.4.1.3. A pesar de esta discrepancia, los cambios observados en varios índices extremos tienen el mismo patrón espacial que los proyectados con mayores aumentos en el norte que en el sur de la región. Es el caso del número de noches tropicales, Figuras 2.2.5 y 6.4.1.5, en menor medida del valor mínimo anual de la temperatura anual, Figuras 2.2.6 y 6.4.1.6, el porcentaje de días con la temperatura máxima extremas, Figuras 2.2.8 y 6.4.1.8 (valores observados negativos en el sur y positivos en el norte) y el número de días con olas de calor, Figuras 2.2.9 y 6.4.1.9.

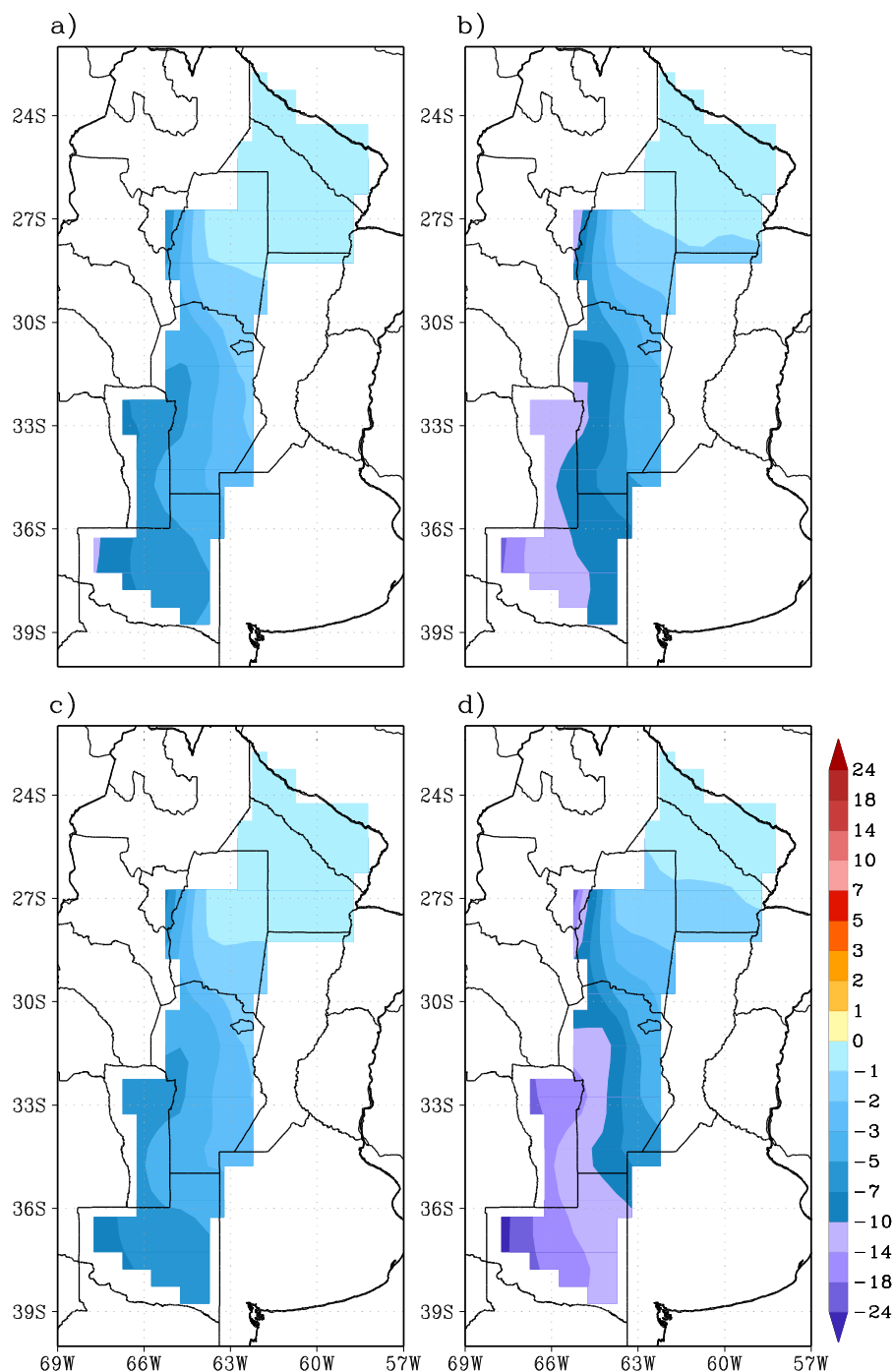


Figura 6.4.1.4: Cambios del número de días con heladas (FD) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

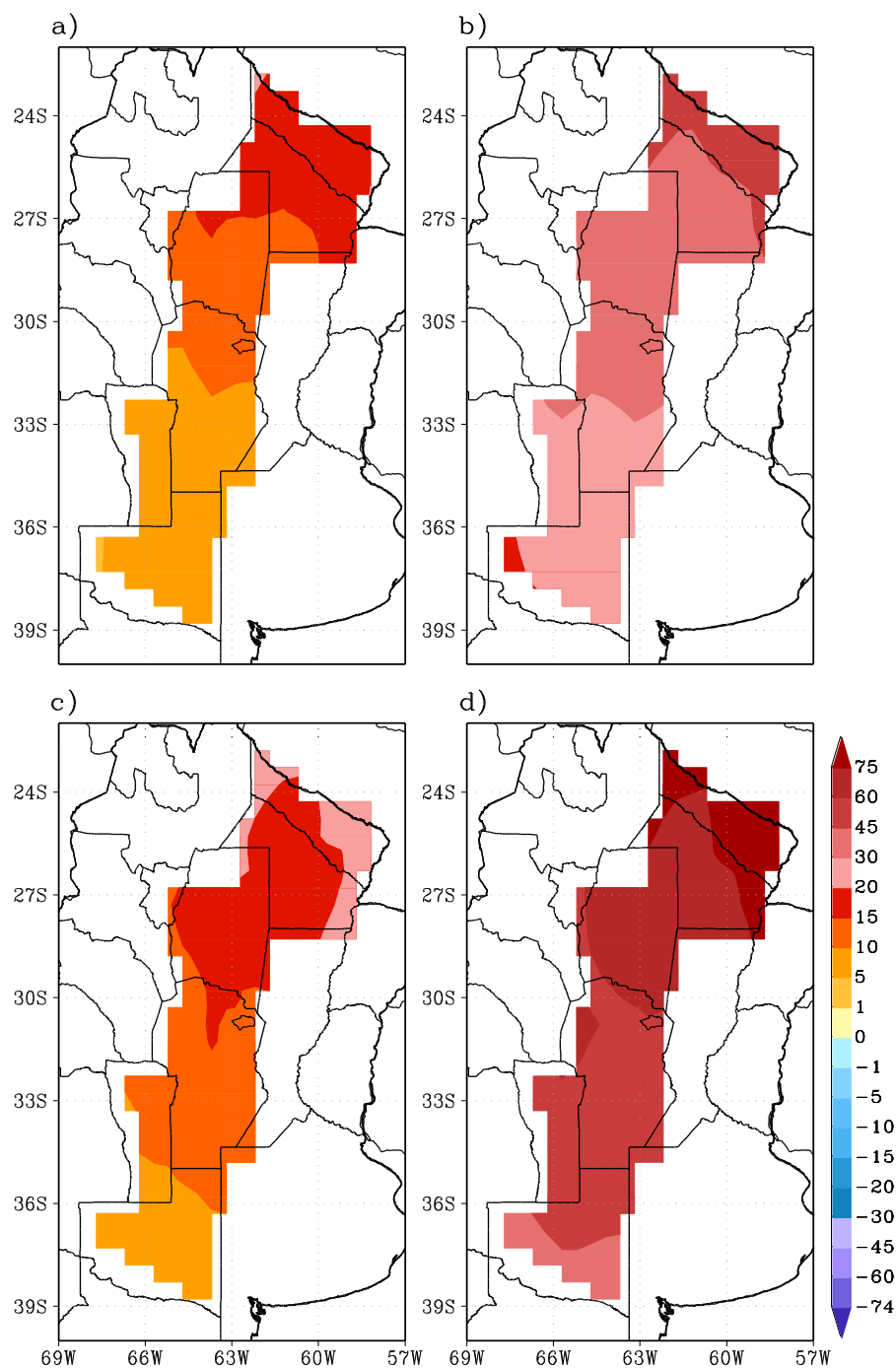


Figura 6.4.1.5: Ídem Figura 6.4.1.4, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

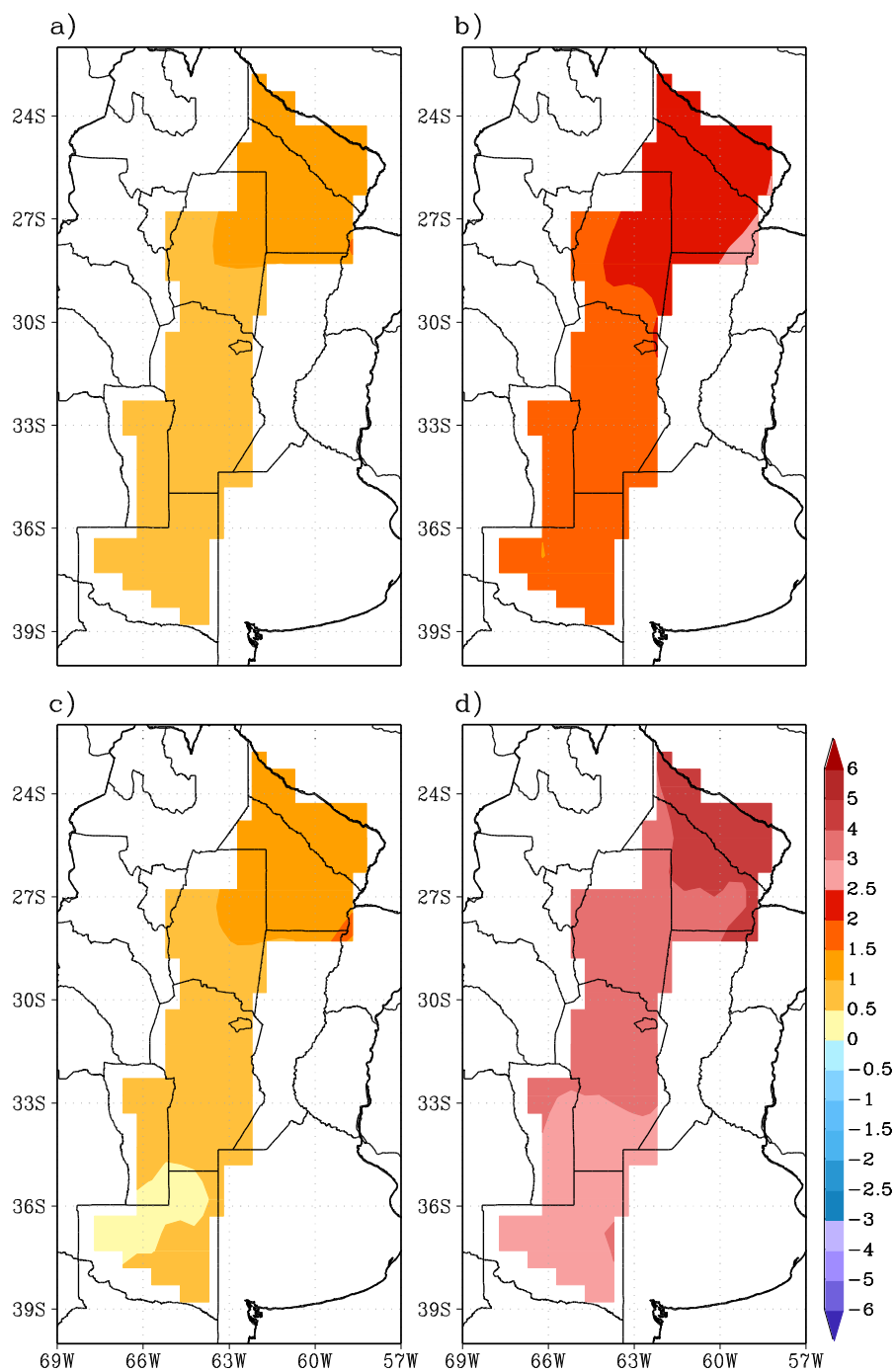


Figura 6.4.1.6: Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el valor anual mínimo de la temperatura anual (°C)

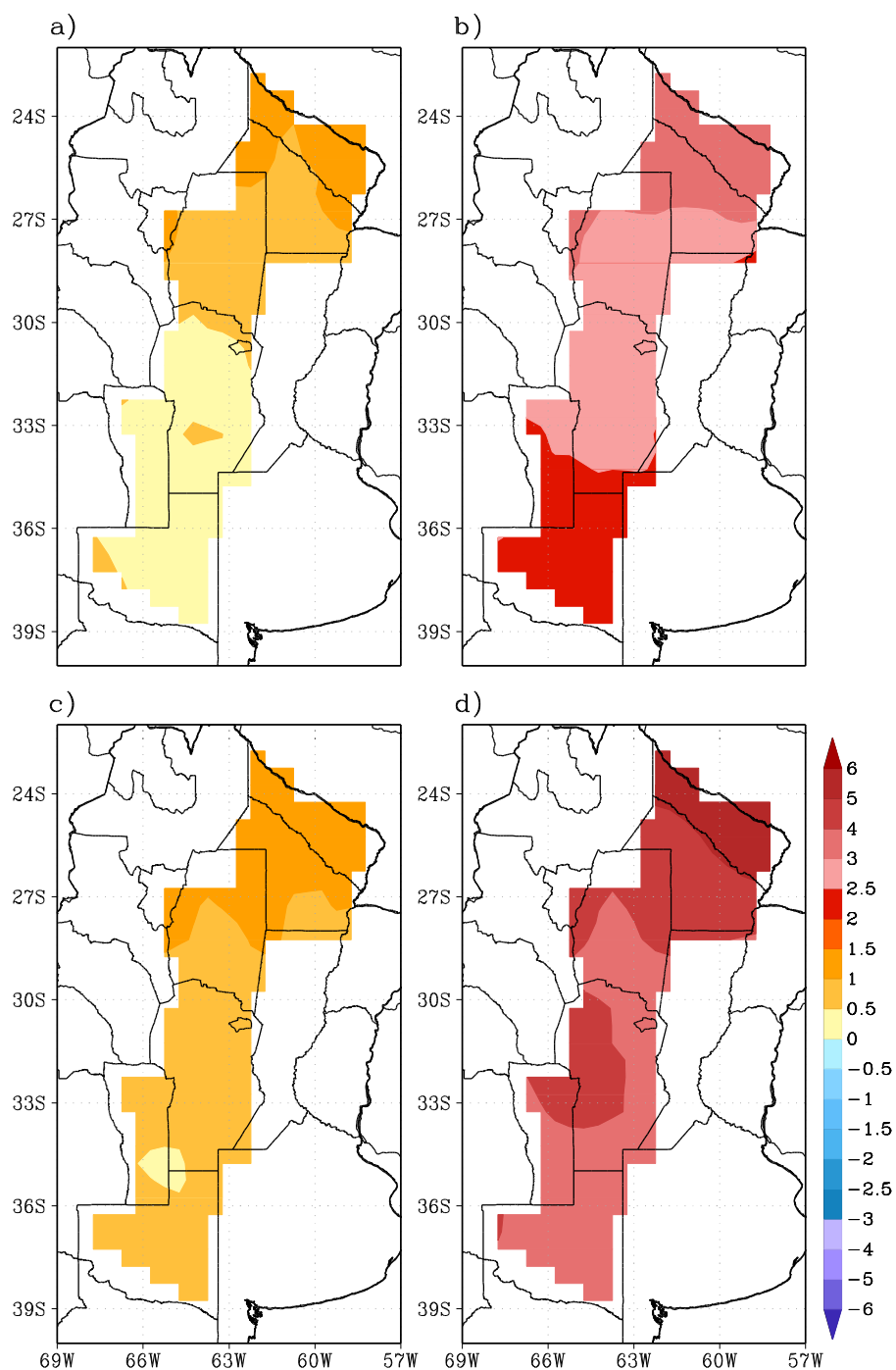


Figura 6.4.1.7: Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)

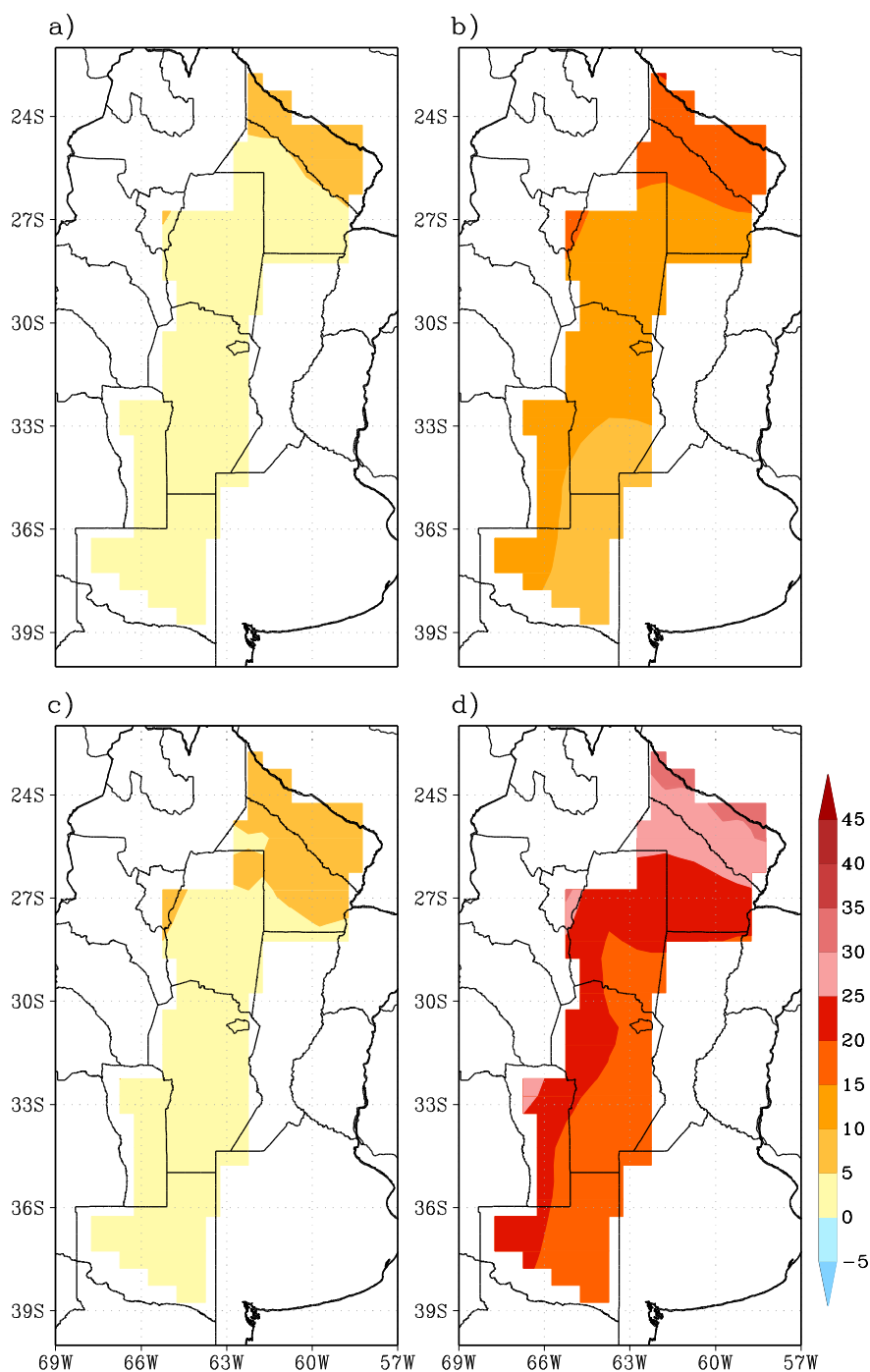


Figura 6.4.8: Ídem Figura 6.4.1.4, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

Para el futuro cercano el número de días con olas de calor aumentaría moderadamente en el sur y algo más en el norte, pero no más de 15 días en Formosa, Figura 6.4.1.9. Para el horizonte temporal del futuro lejano el aumento de días con olas de calor sería más grande en ambos escenarios y mayor en el norte que en el sur. Cabe destacar que, como en el caso de la región Húmeda, de acuerdo a la definición del índice utilizado, este es independiente de las temperaturas absolutas por lo que esta diferenciación regional refleja el calentamiento diferente con la latitud que se observa en las figuras 6.4.1.1 y 6.4.1.3.

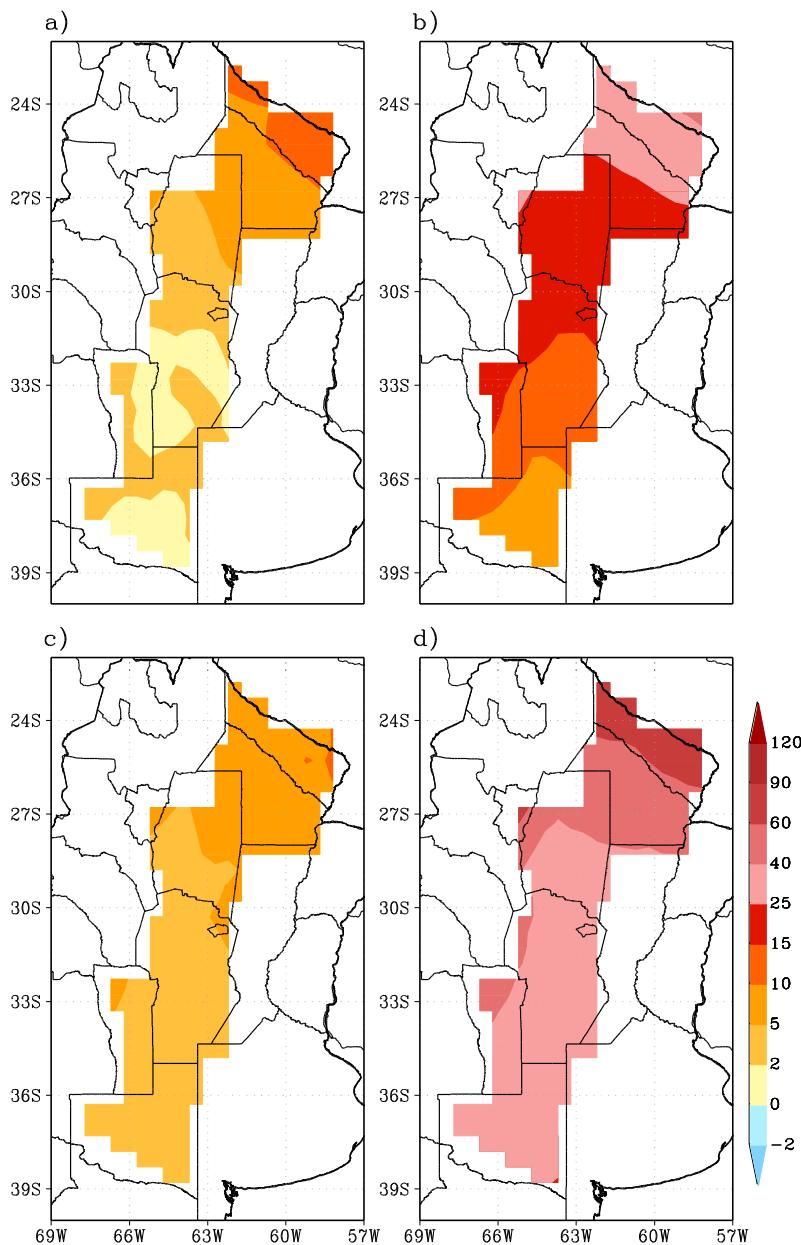


Figura 6.4.1.9: Ídem Figura 6.4.1.4, pero para los días en el año con ola de calor

6.4.2 Precipitación

Precipitación media

Las diferencias de las proyecciones de la precipitación con la del periodo observado (1960-2010) se muestran en la figura 6.4.2.1. No hay mayores diferencias ni entre los dos escenarios ni entre el futuro cercano y el lejano.

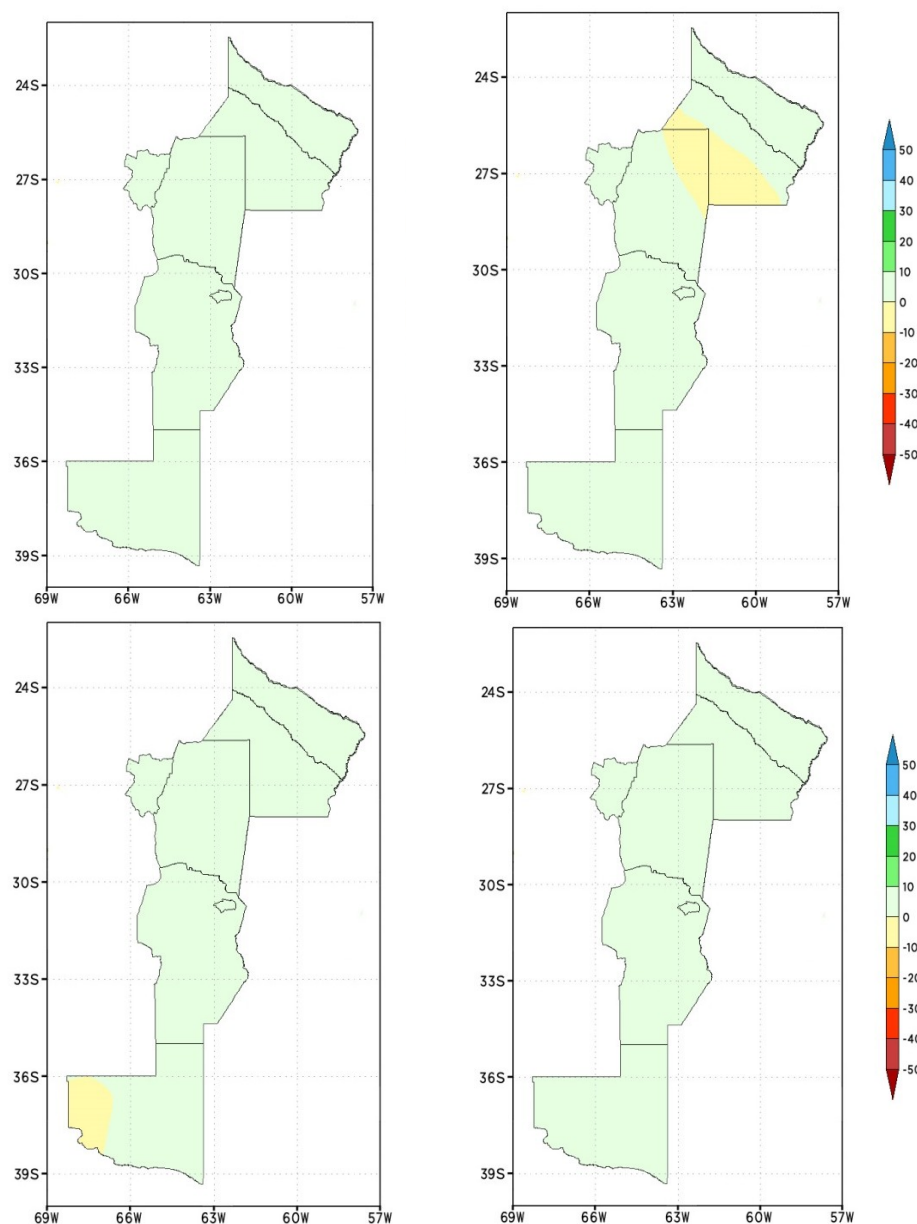


Figura 6.4.2.1: Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario 8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

Las proyecciones en toda la región son de aumentos poco relevantes, 0 a 10%, que estarían dentro del margen de error de esta evaluación. Incluso, en algún caso y en zonas aisladas se proyectan ligeras disminuciones. En principio, se puede suponer que no habrá mayores cambios en la precipitación, aunque de acuerdo con lo obtenido del promedio de 42 modelos CMIP5, no se podría descartar una tendencia a algunos aumentos moderados en Córdoba, San Luis y La Pampa, Figura 3.4.2.

Precipitaciones extremas

En casi toda la región, las precipitaciones extremas en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros tienden a aumentar, aunque con la excepción de algunas zonas aisladas, Figuras 6.4.2.2 a 6.4.2.4. Como en el caso de la temperatura, en general los escenarios RCP4.5 y

RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero sus escenarios en el futuro lejano son distintos con muchos mayores aumentos en el RCP8.5. En los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

Al igual que en la región Húmeda, como resultado del cambio climático habría en toda la región una tendencia creciente con el tiempo en los valores de la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa, Figura 6.4.2.4.

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

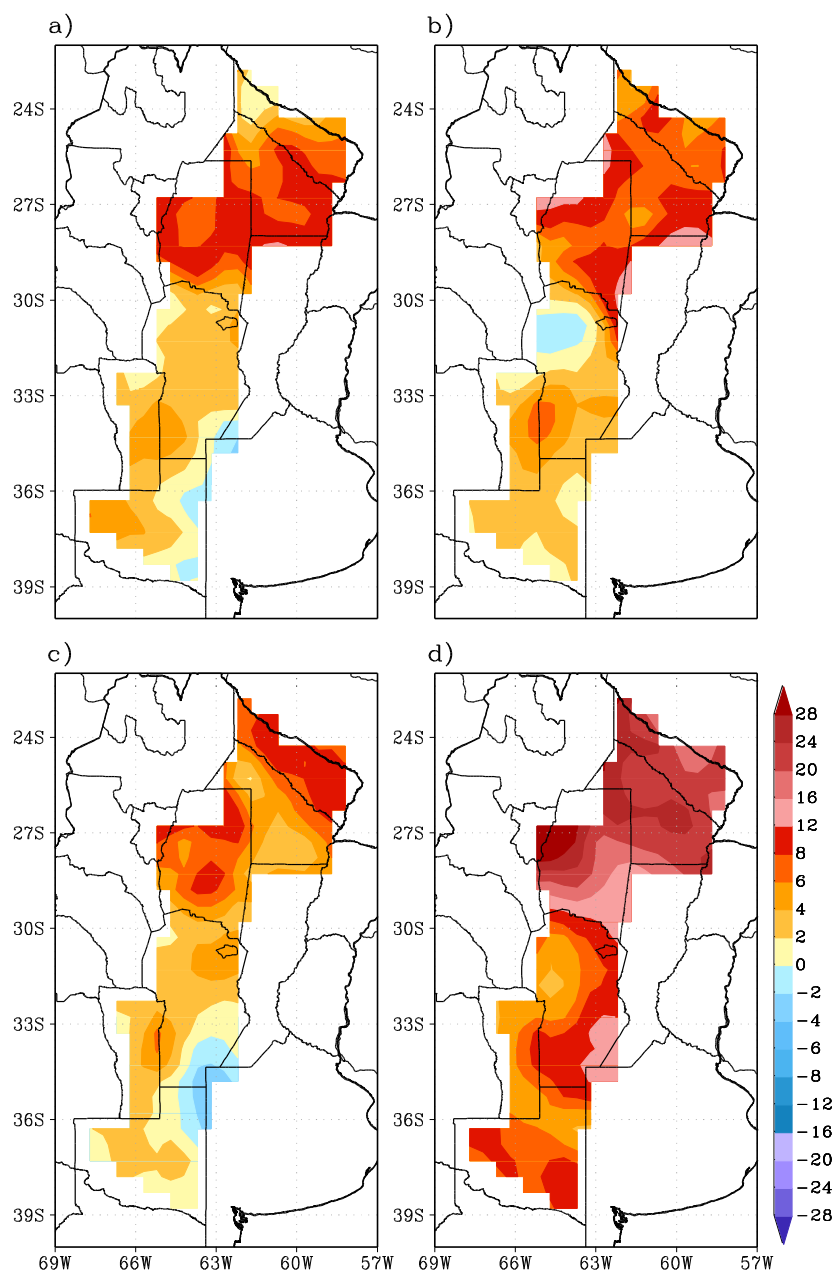


Figura 6.4.2.2: Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Promedio de los modelos CNRM-CM5, CMCC-CM, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI/CGM3. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

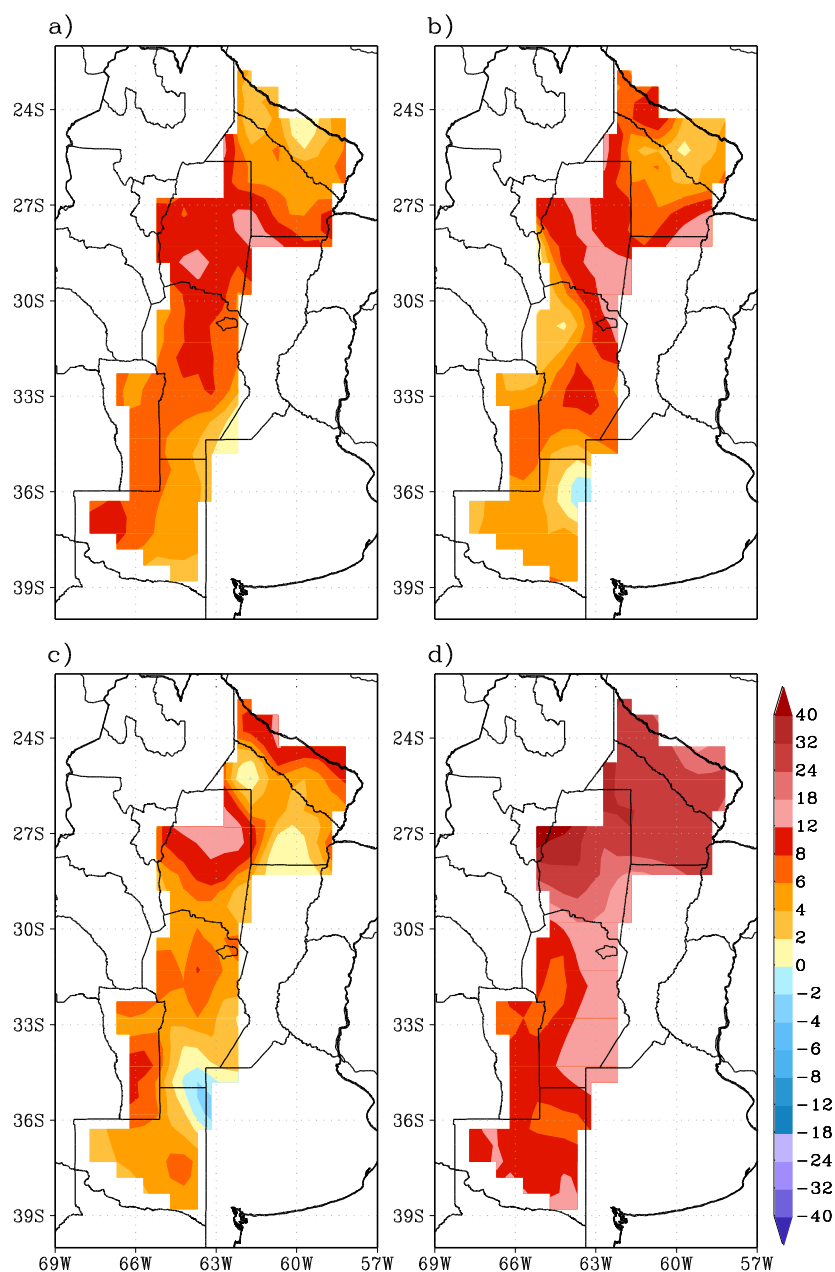


Figura 6.4.2.3: *Ídem Figura 6.4.2.2, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)*

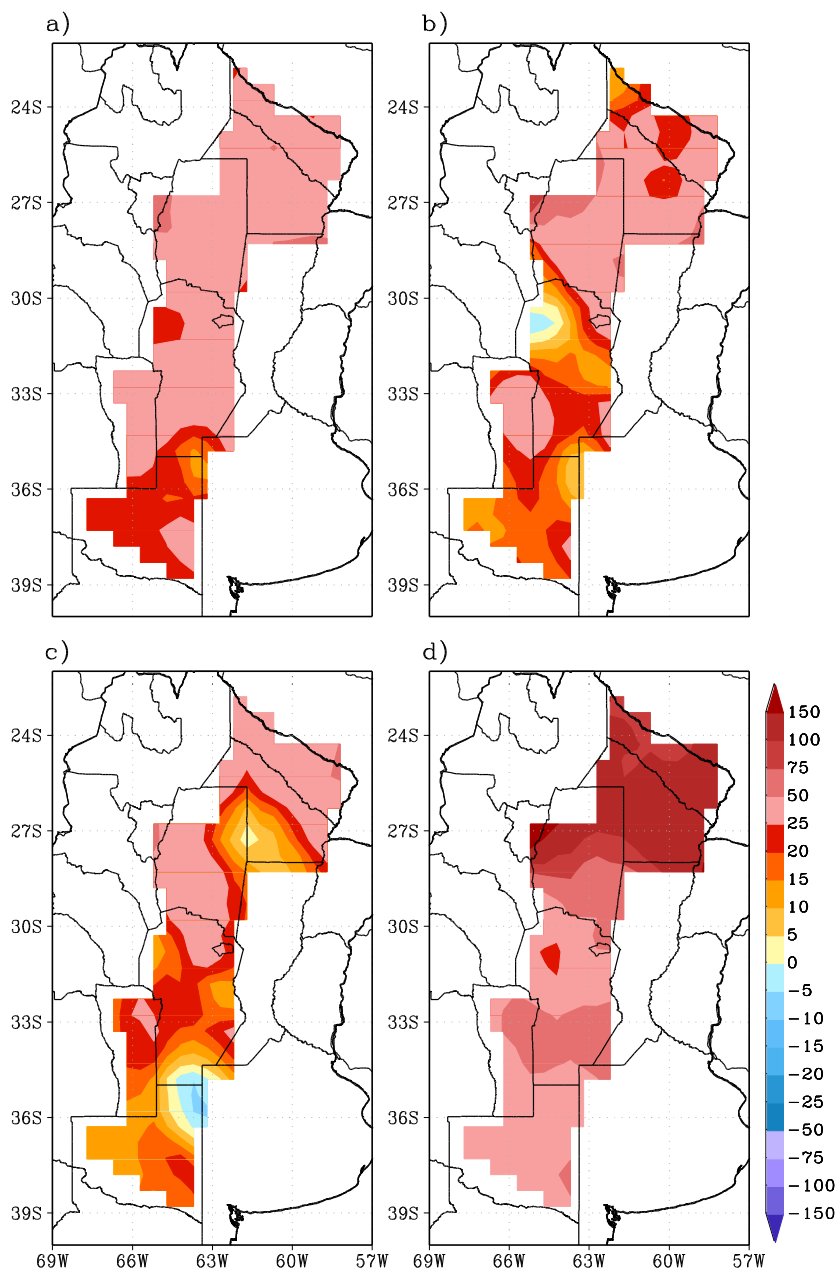


Figura 6.4.2.4: Ídem Figura 6.4.2.2, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

El cambio en el número máximo anual de días consecutivos secos (máxima racha seca) en el futuro cercano es hacia una reducción en el sur de la región y un aumento en el norte, pero en ambos casos los valores son moderados. Para el futuro lejano habría una mayor tendencia al aumento de las rachas secas, pero sin gran aumento e incluso no sería mayor en el escenario RCP8.5. Es notable la coincidencia de este patrón geográfico con los cambios observados de este índice entre 1960 y 2010. En esta región, que tiene un largo periodo seco en el invierno, este

índice refleja la prolongación de ese periodo seco. La concordancia en este aspecto entre las observaciones y las proyecciones sería indicativa de un proceso de cambio asociado al calentamiento global.

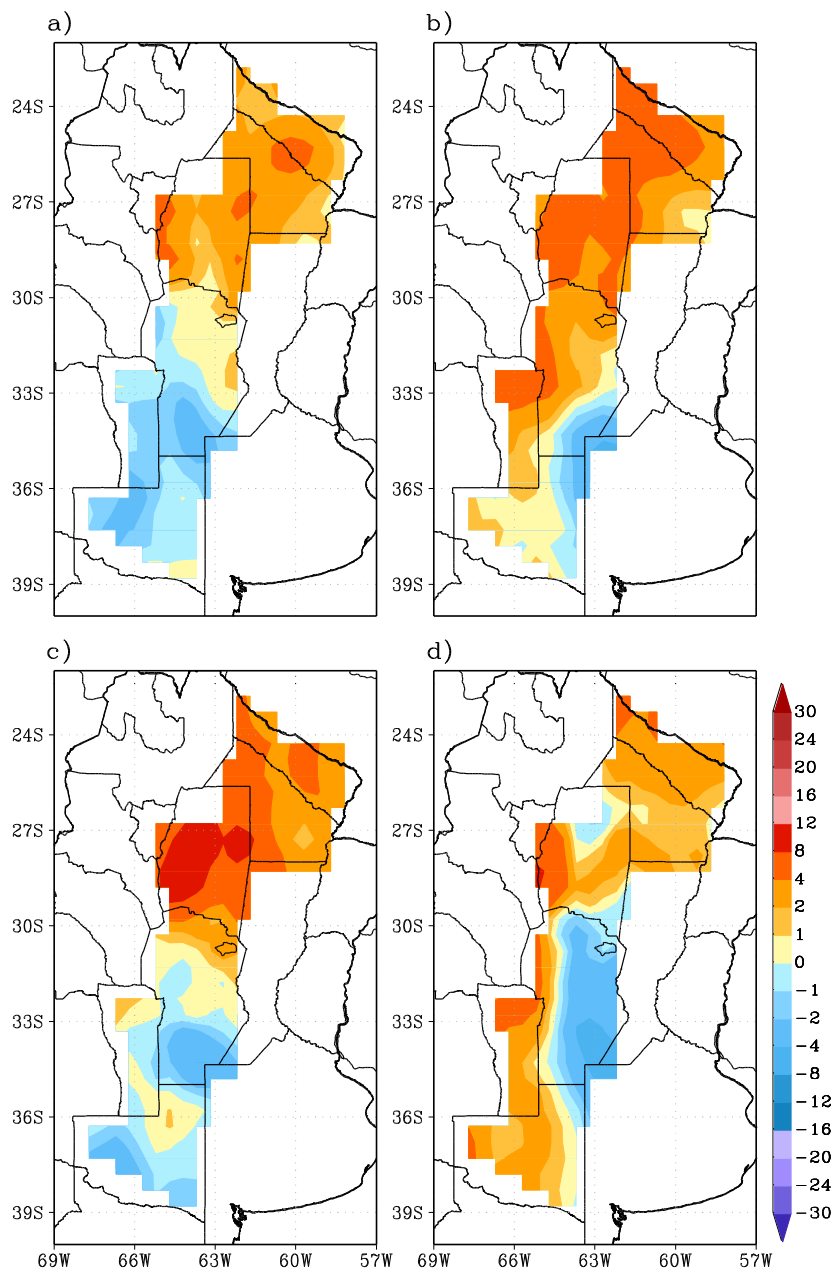


Figura 6.4.2.5: *Ídem Figura 6.6.2.2, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos*

6.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

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

En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será relativamente menor que aquella y por consiguiente para este periodo, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones. En este estudio, se comparan dos escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales y el RCP4.5 de emisiones moderadas. En cuanto a los modelos, se utilizan los 4 MCGs de mejor performance en la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5. Lo mismo se hace para el futuro cercano, pero en ese caso hay que sumar cierto nivel de incerteza por la influencia de la variabilidad interdecadal, sobre todo en el caso de la precipitación,

6.5.1 Temperatura

Temperaturas medias

En el futuro cercano, la diferencia de calentamiento de los distintos modelos en los dos escenarios es pequeña, variando alrededor de 0,5°C, Figura 6.5.1.1. No muy diferente es lo que resulta del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1.

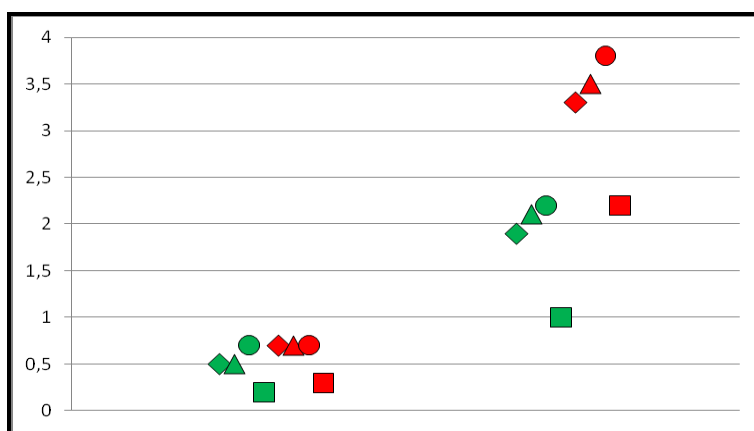


Figura 6.5.1.1: Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2057-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados)

Para el futuro lejano, la dispersión de aumento de la temperatura media regional es mayor, especialmente entre los 2 escenarios, aunque el modelo MRI/CGM3 proyecta considerablemente

menos calentamiento que los otros tres modelos. El promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.1, proyectan un promedio regional de cambio de 1,5°C en el escenario RCP4.5 y de 3°C en el RCP8.5, muy consistente con los resultados de los 4 modelos de mejor performance en la región, aquí utilizados.

En el caso de las temperaturas mínimas y máximas, las características de los cambios en los modelos y los dos escenarios son muy similares a las de las temperaturas medias, Figuras 6.5.1.2 y 6.5.1.2, por lo que valen los mismos comentarios.

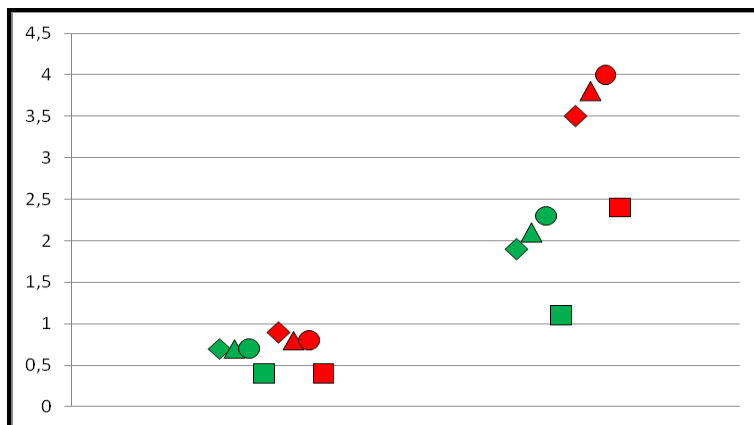


Figura 6.5.1.2: *Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional*

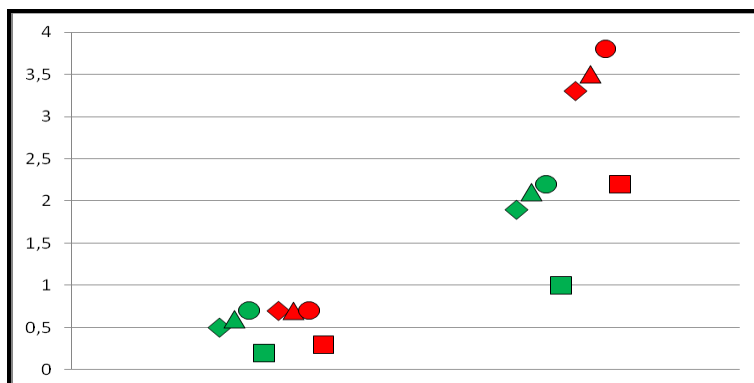


Figura 6.5.1.3: *Ídem 6.5.1.1 pero para la temperatura máxima media regional*

En el futuro cercano, los cambios en las temperatura media regional en el verano y en el invierno son similares entre si y no muy distintos con los de la temperatura media anual, por lo que para estas estaciones valen las mismas consideraciones que se han hecho respecto de la certeza de las proyecciones.

En el futuro lejano, los cambios en general son ligeramente mayores en el invierno que en el verano y los rangos de variación entre modelos y escenarios es similar al de la temperatura

media, por lo que otra vez las consideraciones sobre la certeza de las proyecciones son las mismas.

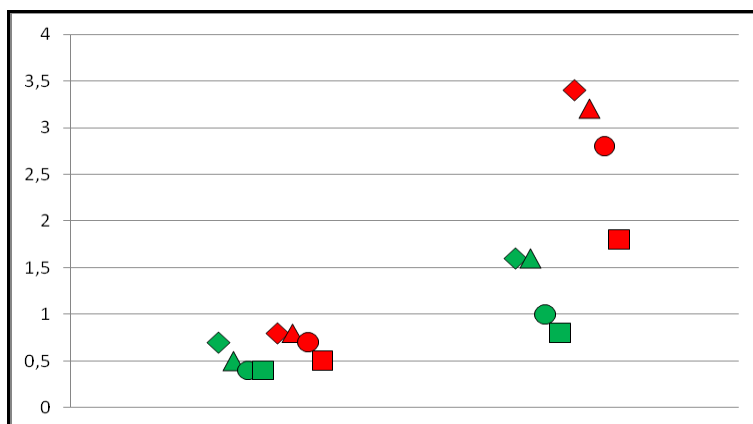


Figura 6.5.1.4: *Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

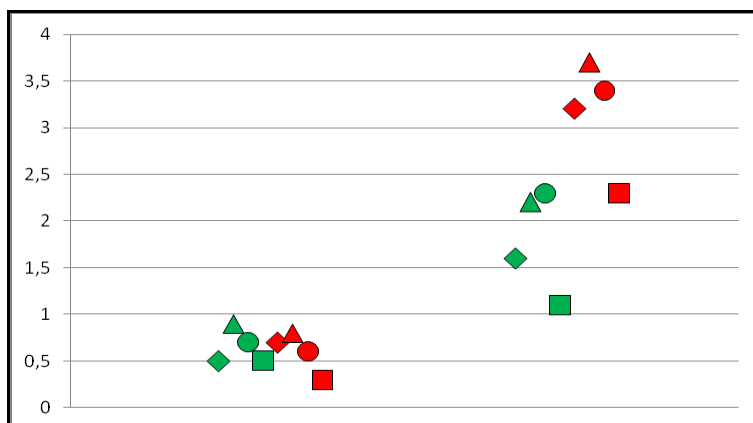


Figura 6.5.1.5: *Ídem 6.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

Extremos térmicos

Con pocas excepciones los promedios regionales de los 6 índices de extremos térmicos son consistentes con el calentamiento proyectado en todos los escenarios y modelos con los que en este estudio se construyeron los escenarios climáticos futuros, Figuras 6.4.1.1 y 6.5.1.6 a 6.5.1.11.

Las diferencias entre escenarios en el futuro cercano para cada modelo son ínfimas y mucho menores que las que existen entre los modelos, que ya de por sí son pequeñas. Se podría estimar que el rango probable de reducción de días con heladas estaría entre 0 y 4 días, el número de noches tropicales aumentarían entre algo menos de 10 a 20 y el valor anual mínimo de la temperatura entre 0,5 y de 1,5°C. No es tan seguro el signo en todo el rango probable en el caso

del valor anual máximo, el porcentaje de días con temperatura extrema y los días con olas de calor en los que los cambios serían en promedio consistentes con el calentamiento, pero pequeños.

En el futuro lejano, las diferencias entre modelos es mayor que en el futuro cercano, pero como era de esperar las diferencias entre escenarios son mayores, excepto para el caso del cambio de días con heladas. En conclusión, para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos térmicos en el futuro cercano es muy pequeña o nula respecto del signo de los cambios y en cuanto a la magnitud de estos, en algunos casos está bastante acotada. En el caso del futuro lejano, hay bastante certeza respecto del signo de los cambios, pero en las magnitudes hay mucha dispersión entre modelos y escenarios de emisiones.

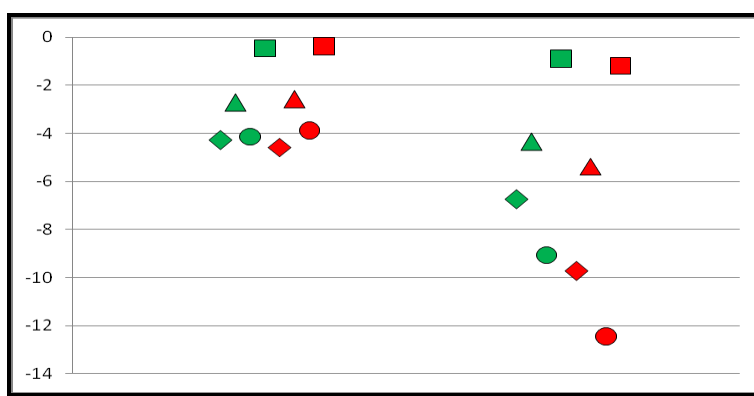


Figura 6.5.1.6: Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5

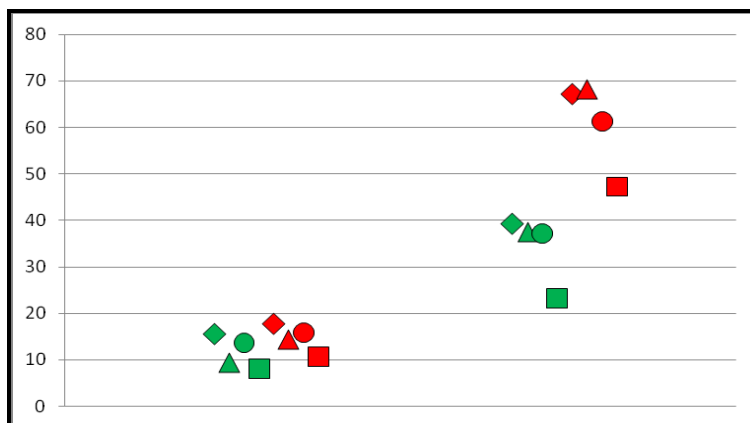


Figura 6.5.1.7: Ídem Figura 6.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

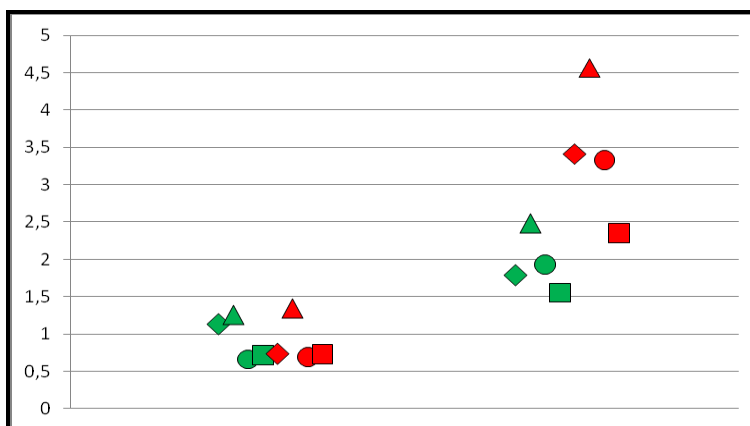


Figura 6.5.1.8: Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)

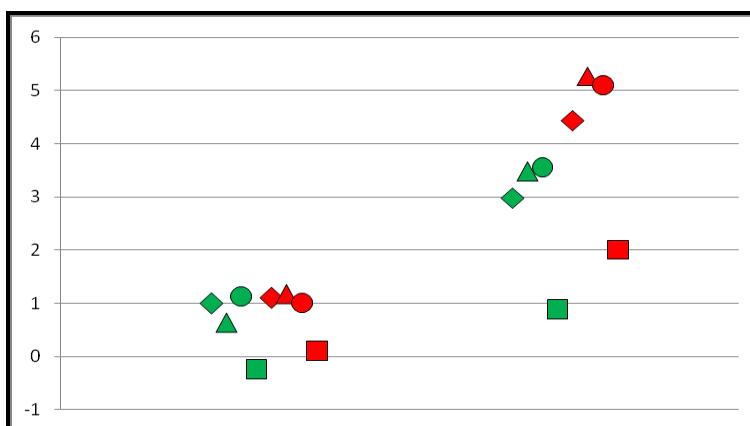


Figura 6.5.1.9: Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)

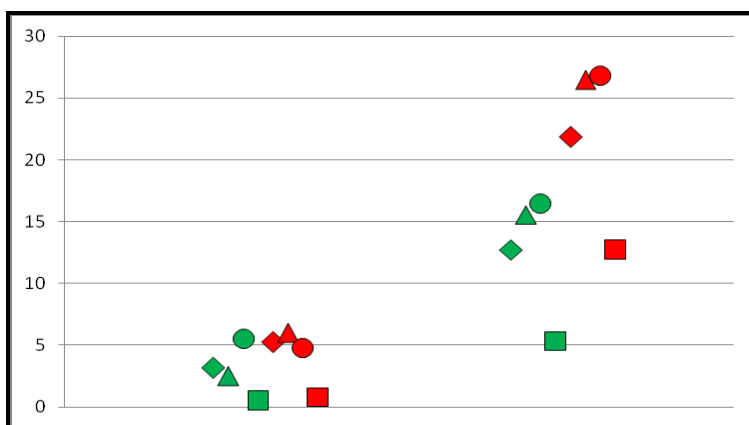


Figura 6.5.1.10: Ídem Figura 6.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

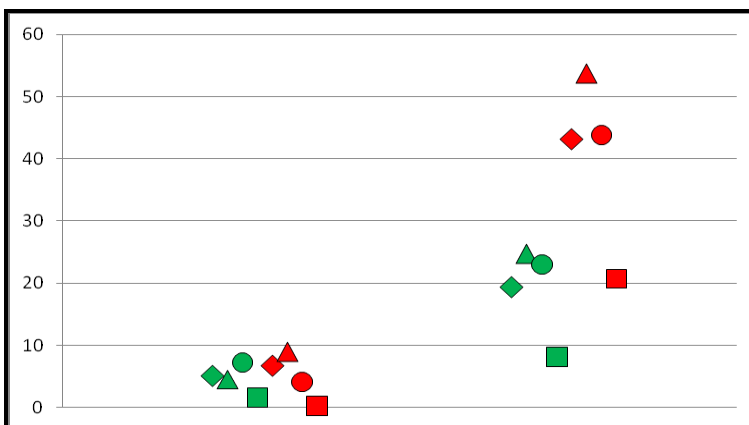


Figura 6.5.1.11: Ídem Figura 6.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

6.5.2 Precipitación

Precipitación media

En el futuro cercano, el aumento en la precipitación es de apenas 0 a 10% entre los diferentes modelos y escenarios, Figura 6.5.2.1. Por el contrario el promedio de los 42 MCGs del CMIP5 tendrían una disminución promedio regional ligeramente negativa, Figura 3.4.2. En consecuencia, no se debería esperar mayores cambios en la precipitación regional para ese periodo. Sin embargo, como la precipitación de esta región ha tenido bastante variabilidad interdecadal en su zona norte y central, la incerteza sobre el signo del cambio es considerable.

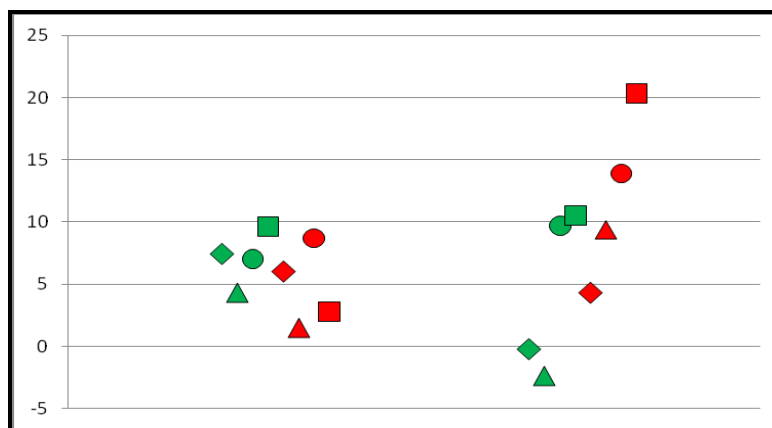


Figura 6.5.2.1: Diferencia proyectada de la precipitación anual media regional respecto de 1986-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5. Modelos: Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados)

Para el futuro lejano hay una gran dispersión entre escenarios y entre modelos, variando desde algunos casos con pequeñas reducciones porcentuales hasta un aumento del 20%; Los aumentos promedio de cada escenario son muy próximos a los del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, Figura 3.4.2. Se estima que para este periodo es probable que haya un moderado aumento de la precipitación media anual, aunque con mucha incerteza por las mismas razones que en el caso del futuro cercano.

En el verano, la dispersión de los cambios de la precipitación entre modelos es mayor que en el caso anual, aunque alrededor de los mismos valores, en general de aumento, Figura 6.5.2.2, por lo que la incerteza sobre estos aumentos es también alta.

En el invierno, la dispersión de los cambios regionales de la precipitación entre modelos es mayor que en el verano y en valor anual en el futuro cercano, pero mucho menor en el futuro lejano, Figura 6.5.2.2. El aumento proyectado está entre 10 y 20% por lo que no se puede asegurar que la fuerte tendencia observada ente 1960 y 2010 hacia menores precipitaciones, Tabla 6.2.2.1, se vaya a mantener.

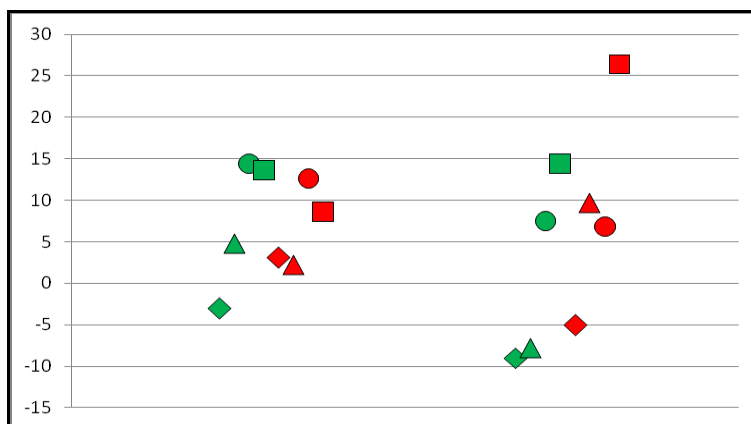


Figura 6.5.2.2: Ídem 6.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)

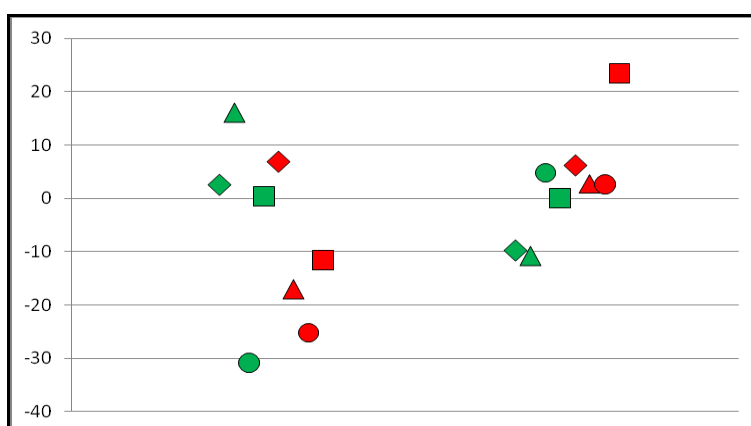


Figura 6.5.2.3: Ídem 6.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)

Precipitaciones extremas

Los índices de precipitaciones extremas calculados indican que habrá una tendencia a que estas aumenten con el tiempo, Figuras 6.5.2.4, 6.5.2.5 y 6.5.2.6. Para el futuro cercano, aunque en el promedio de todos los modelos y escenarios habría una tendencia hacia mayores extremos, algunos índices en el escenario RCP4.5 tienen diferencias nulas o incluso negativas. No obstante, se podría estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos de precipitación es moderada con respecto del signo de los cambios, y en cuanto a la magnitud de estos, que no es grande en el caso del futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Las precipitaciones máximas de un día aumentarían menos de 10 mm y las acumuladas de 5 días en menos de 12mm. Para el escenario lejano, la mayor fuente de incerteza proviene del escenario de emisiones, pero también de los modelos en el caso del RCP8.5.

Las proyecciones del cambio en la duración de los periodos secos máximos del año van de -4 a +9 días, Figura 6.5.2.7, pero con un mayor número de casos con aumentos que con disminuciones. Estos aumentos continuarían la tendencia de 1960 -2010 hacia periodos secos más prolongados en el centro y norte de la región.

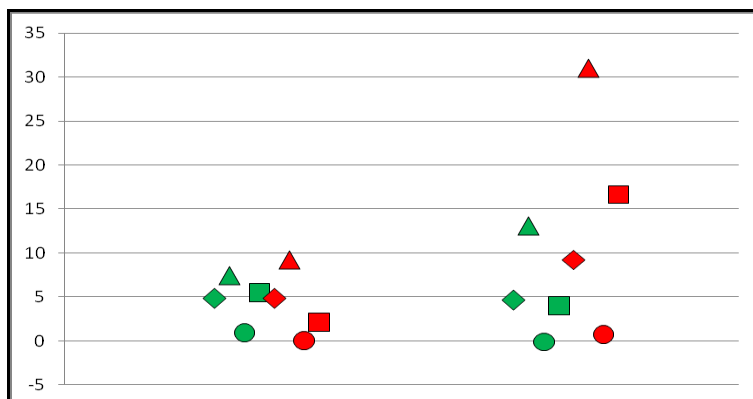


Figura 6.5.2.4: Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1986-2005. Modelos: CNRM-CM5 (rombos), CMCC-CM (triángulos), CSIRO-Mk3-6-0 (círculos) y MRI/CGM3 (cuadrados). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde, escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5

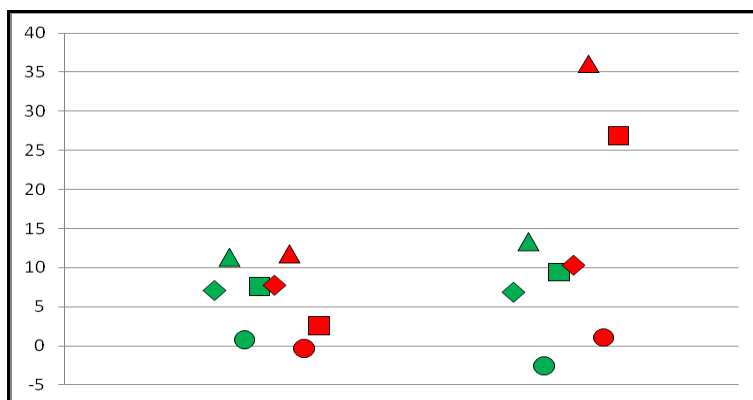


Figura 6.5.2.5: Ídem Figura 6.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

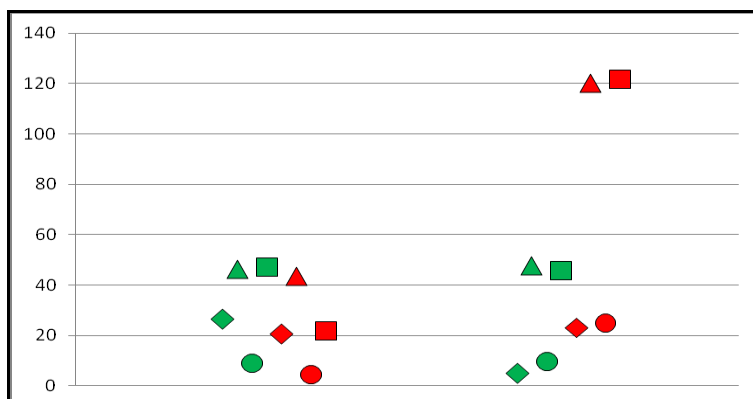


Figura 6.5.2.6: Ídem Figura 6.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

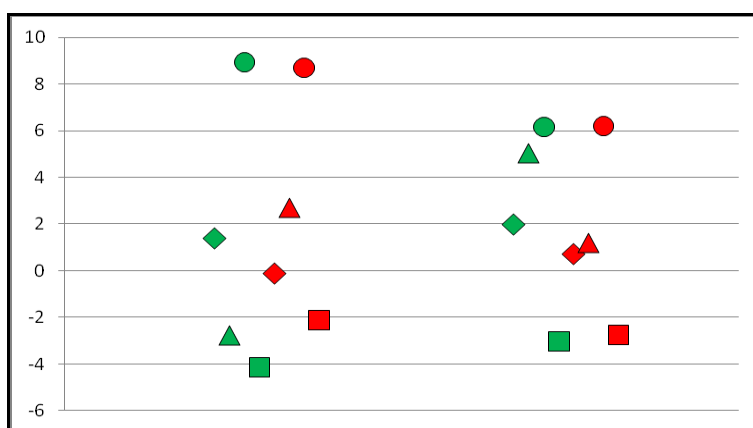


Figura 6.5.2.7: Ídem Figura 6.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos

6.6 CONCLUSIONES

La temperatura media anual ha aumentado muy modestamente en la región Centro entre 1960 y 2010, 0,2°C en el promedio regional, mucho menos que en las otras regiones del país y del promedio global. Incluso, en el centro de la región se ha producido algún descenso de la temperatura media. Este aumento se debió en parte al aumento de la temperatura mínima mientras que la temperatura tuvo leves descensos (*Confianza alta*).

A pesar del modesto calentamiento promedio, los índices de extremos térmicos muestran cambios importantes con una disminución de los días con heladas, aumento de la cantidad de noches tropicales y de la temperatura mínima del año. Por otra parte no hubo un patrón definido para toda la región sobre las tendencias de los días con ola de calor (*Confianza alta*).

La precipitación media anual aumentó en casi toda la región, pero en el contexto de gran variabilidad interanual e interdecadal por lo que la tendencia no fue significativa estadísticamente. El aumento se produjo en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación (**Confianza media**).

Los indicadores de extremos que se asocian con potenciales desastres por inundaciones cambiaron moderadamente en forma consistente con las mayores precipitaciones, pero por otra parte aumentó el máximo de días consecutivos sin precipitación de cada año, lo que en esta región con una marcada estación seca es indicador de la prolongación de la misma (**Confianza alta**).

En los dos escenarios RCP, tanto para el futuro cercano como lejano, la región presenta calentamientos que van de 0 y 1°C en el futuro cercano hasta 2,5 a 3,5°C en el norte de la región en el futuro lejano. En todos los casos el calentamiento sería mayor en el norte que en el centro y sur de la región. Por otra parte, los aumentos de las temperaturas en esta región son menores que las de las regiones con las que limita al este y oeste (Húmeda y Andes). Este patrón geográfico continua lo observado en el periodo 1960-2010 (**Confianza media**).

Las proyecciones de las precipitaciones indican que no habrá mayores cambios en la precipitación en el futuro cercano (**confianza alta**), aunque la magnitud de los cambios presenta gran dispersión en el futuro lejano y no se podría descartar una tendencia a algunos aumentos moderados en Córdoba, San Luis y La Pampa (**confianza baja**). Las proyecciones de los índices de precipitaciones extremas para el siglo XXI presentan un patrón regional medio de predominante aumento, aunque con variaciones regionales, así como con el horizonte temporal y con el escenario de emisiones (**Confianza media**).

Referencias

- Agosta, E. A., 2013: The 18.6-year nodal tidal cycle and the bi-decadal precipitation oscillation over the plains to the east of subtropical Andes, South America. *Int. J. Climatol.*, **34**, 1606–1614.
- Agosta, E. A., R. Compagnucci y W. Vargas, 1999: Cambios en el régimen interanual de la precipitación estival en la región Centro-Oeste Argentina. *Meteorológica*, **24**, 1–2, 63–84.
- Agosta, E. A. y R. H. Compagnucci, 2012: Central West Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections. *J. Climate*, **25**, 1657–1677.
- Agosta, E.A. y M.B. Barrucand, 2012: Condiciones medias de invierno y ondas cuasi-estacionarias de Rossby asociadas a la frecuencia invernal de noches frías y cálidas en Argentina subtropical. *Geoacta*, **37(2)**, 147–146.
- Alexander, L.V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L.



Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci y J. L. Vazquez-Aguirre, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, Vol, **111**.

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

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

Barrucand, M. y M. Rusticucci, 2001: Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Variabilidad temporal y regional. *Meteorológica*, **26**, 85–101.

Compagnucci, R. H., E. A. Agosta y W. M. Vargas, 2002: Climatic change and quasi-oscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern Africa region. *Clim. Dyn.*, **18**, 421–435.

Fernández-Long, M. E., G. Müller, A. Beltrán-Przekurat A. y O. Scarpati O. E. 2012: Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina, *Int. J. Climatol.*, **33**, 1673–1686.

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

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

Krepper, C. M., B. V. Scian, y J. O. Pierini, 1989: Time and space variability of rainfall in central-east Argentina. *J. Climate*, **2**, 39–47.

Liebmann, B. y C. Vera, 2004: An observed trend in central South American precipitation. *J. Climate*, 4357–4367.

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

Minetti, J. L. y W. M. Vargas, 1997: Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S, *Atmósfera*, **11**, 205–221.



Minetti, J. L., W.M. Vargas, G. Poblete, L. Zerda, yL. Acuña, 2010: Regional droughts in southern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, **102** (3-4), 403–415.

Naumann, G., M. Llano yW. M. Vargas, 2012: Climatology of the annual maximum daily precipitation in the La Plata Basin, *Int. J. Climatol.*, **32**, 247–260.

Penalba, O. yW. Vargas, 2004: Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. Changes in the extreme precipitation seasonal cycle. *Int. J. Climatol.*, **24**, 12, 1565–1580.

Penalba, O. yW. Vargas, 2008: Variability of low monthly rainfall in La Plata Basin. *Meteorological Applications*, **15**, 313–323.

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

Penalba, O., J. Rivera, yV. Pántano, 2013: The CLARIS LPB database: constructing a long-term daily hydro-meteorological dataset for La Plata Basin, Southern South America. *Geoscience Data Journal*. En prensa.

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

Rivera, J., O. Penalba, yM. Bettolli, 2013: Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *Int. J. Climatol.*, **33**, 834–842.

Russián, G.F., E. Agosta y R. Compagnucci, 2010: Variabilidad interanual a interdecádica de la precipitación en Patagonia Norte, *Geoacta*, **35**, 27–43.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2001: Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorológica*, **26**, 69–83.

Rusticucci, M., y W. Vargas, 2001: Interannual variability of temperatura spells over Argentina, *Atmósfera*, **14**, 75–86.

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

Vargas, W. M., G. Naumann y J. Minetti, 2006: Las Tendencias de la temperatura máxima y mínima en Series de Referencia del Sudeste de Sudamérica. Aspectos metodológicos. *Revista de Geografía. Año VIII, No 10*, 67–74.



Vincent, L.A., T. C. Peterson, V. Barros, M. B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L. M. Alves, T. Ambrizzi, M. A. Berlato, A. M. Grimm, J. A. Marengo, L. Molion, D. F. Moncunill, E. Rebello, Y. M. Anunciação, J. Quintana, J. L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M. R. Haylock y D. Karoly, 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000, *Climate*, **18**, 5011–5023.