



RESUMEN EJECUTIVO

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



RESUMEN EJECUTIVO

1. OBJETIVOS

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

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

2. REGIONALIZACIÓN

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

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

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

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

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



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



3. ORGANIZACIÓN DEL INFORME

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

4. DATOS

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

5. ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

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

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

6. CAMBIOS CLIMÁTICOS OBSERVADOS

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



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

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

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

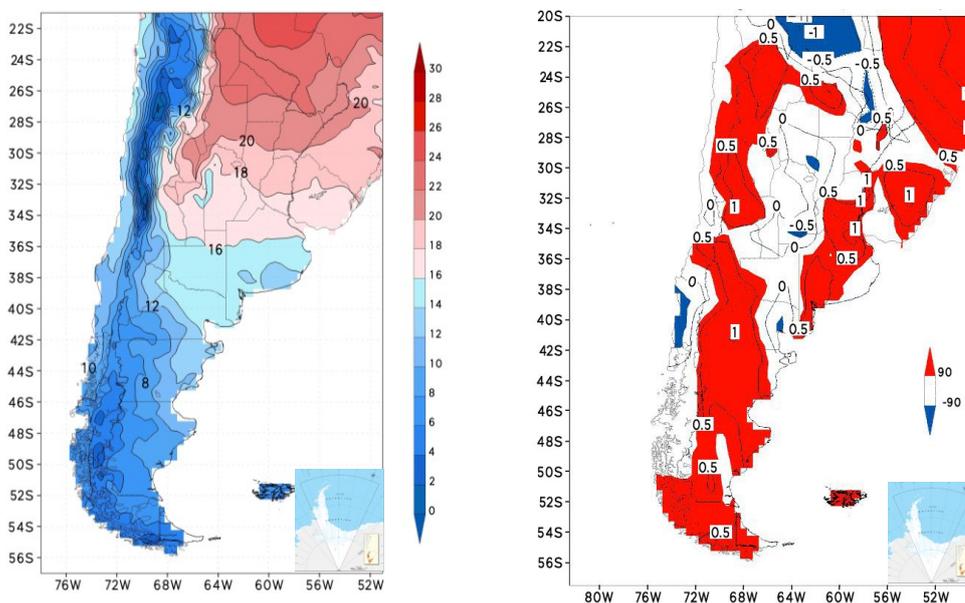


Figura RE.6.1: Izquierda, campo medio de la temperatura media anual (contornos cada 2°C) 1960-2010; derecha, cambio de la temperatura media anual en °C para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia (contornos cada 0,5°C sombreado en rojo (azul) valores significativos con signo positivo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

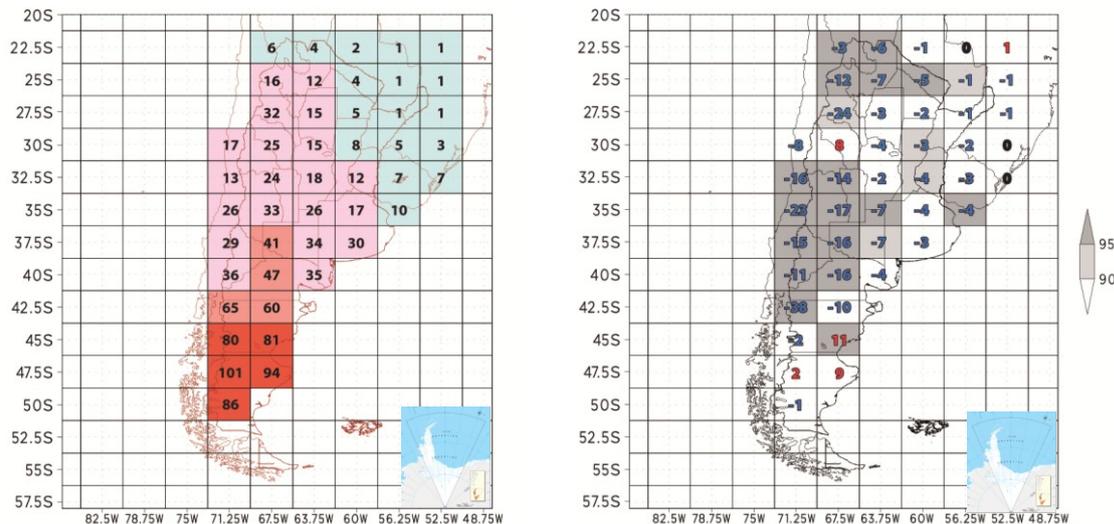
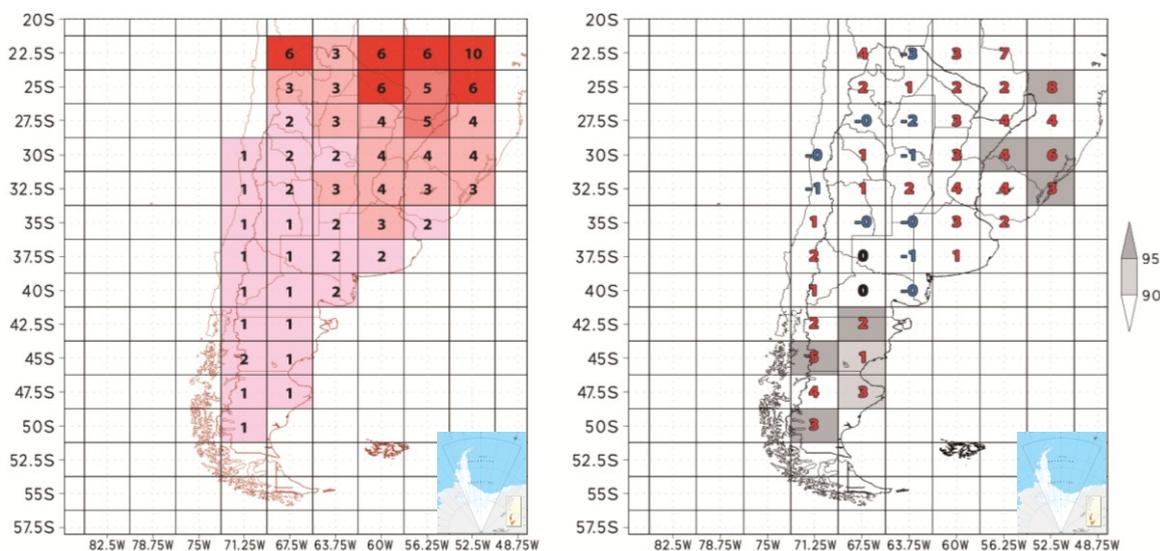


Figura RE.6.2: Panel izquierdo: número de días con heladas. Panel derecho: cambios en el número de días con heladas; valores negativos en azul y positivos en rojo. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha

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

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



de calor entre 1960 y 2010 se duplicaron.

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

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



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

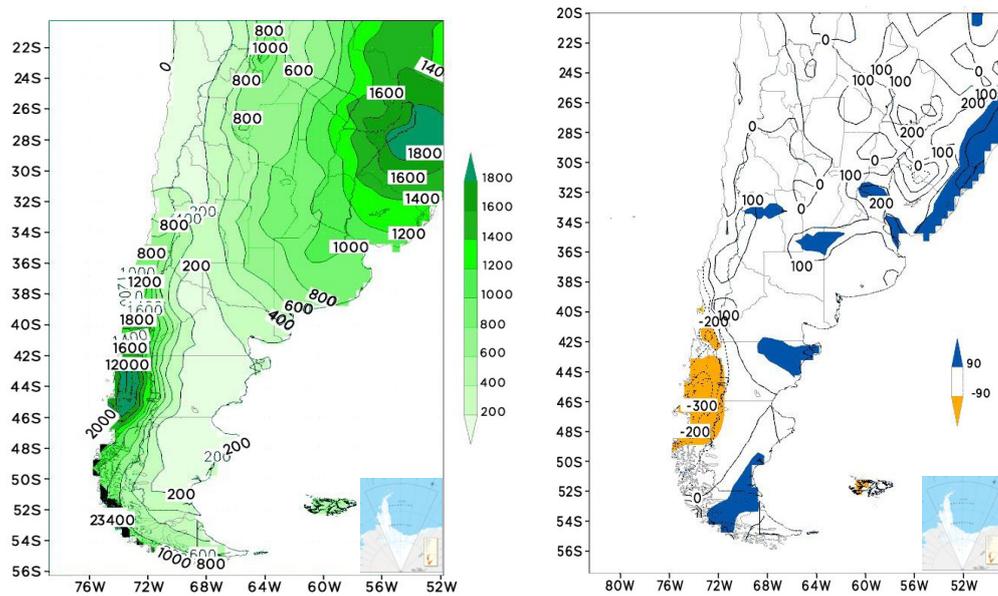


Figura RE.6.4: Izquierda, campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, derecha, cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010. Cambios estadísticamente significativos en colores según escala



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

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

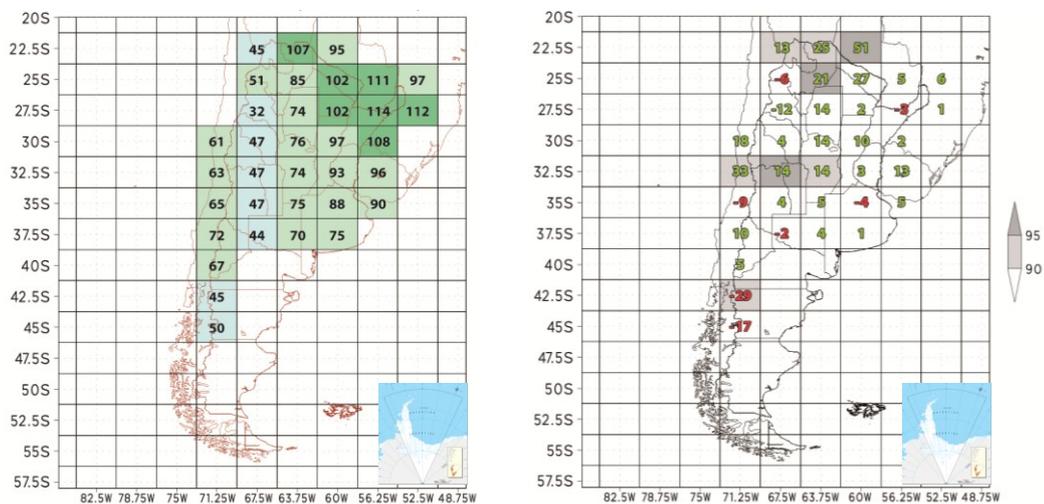


Figura RE.6.5: Panel izquierdo, precipitación diaria máxima del año en mm. Panel derecho, cambios en precipitación diaria máxima del año; valores negativos en rojo y positivos en verde. Los retículos grises indican cambios significativos al 90 o 95 % según el tono en la escala de la derecha

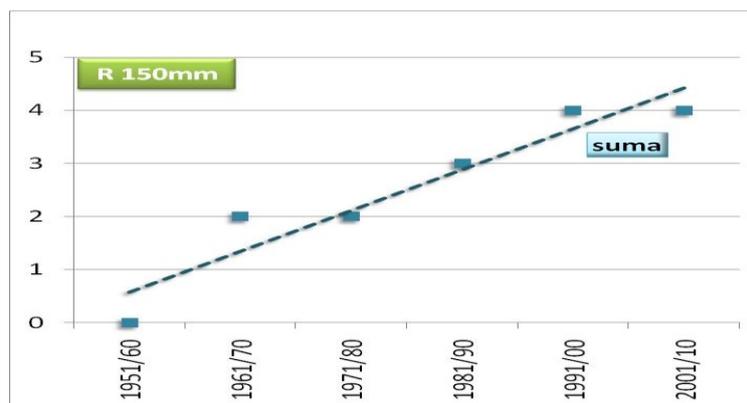


Figura RE.6.6: Número de casos de precipitaciones diarias por encima del umbral de 150mm en periodos de 10 años para 4 estaciones (Observatorio Buenos Aires, Paraná, Ceres y Monte Caseros)

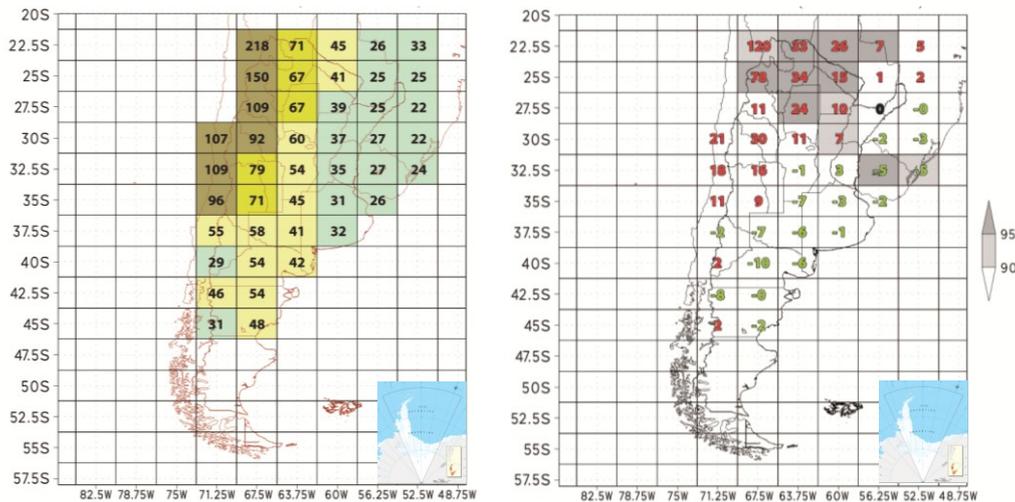


Figura RE.6.7: Ídem Figura RE.6.5, pero para la máxima longitud de días secos consecutivos

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

7. PROYECCIONES DEL CLIMA PARA EL SIGLO XXI

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

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



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

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

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

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

7.1 Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI

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

7.2 Disponibilidad de escenarios climáticos

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

7.3 Métricas para la validación de los modelos climáticos

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



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

7.4 Proceso de validación

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

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

7.5 Selección de modelos para el desarrollo de escenarios

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

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

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

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



7.6 Corrección de los errores sistemáticos de los modelos

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

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

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

7.7 Validación del método de corrección de errores sistemáticos

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

7.8 Escenarios del clima futuro (Siglo XXI)

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



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

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

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

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

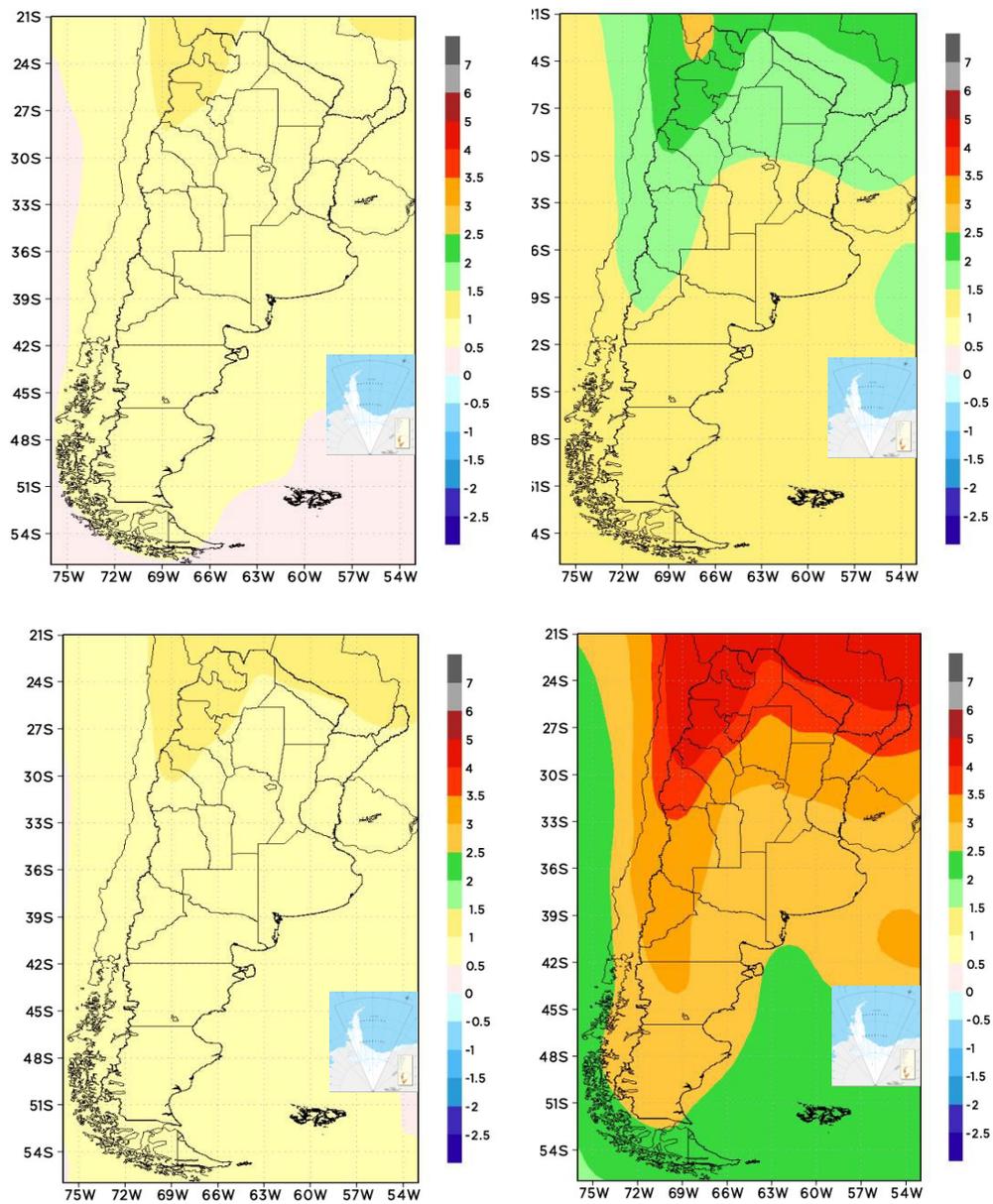


Figura RE.7.8.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

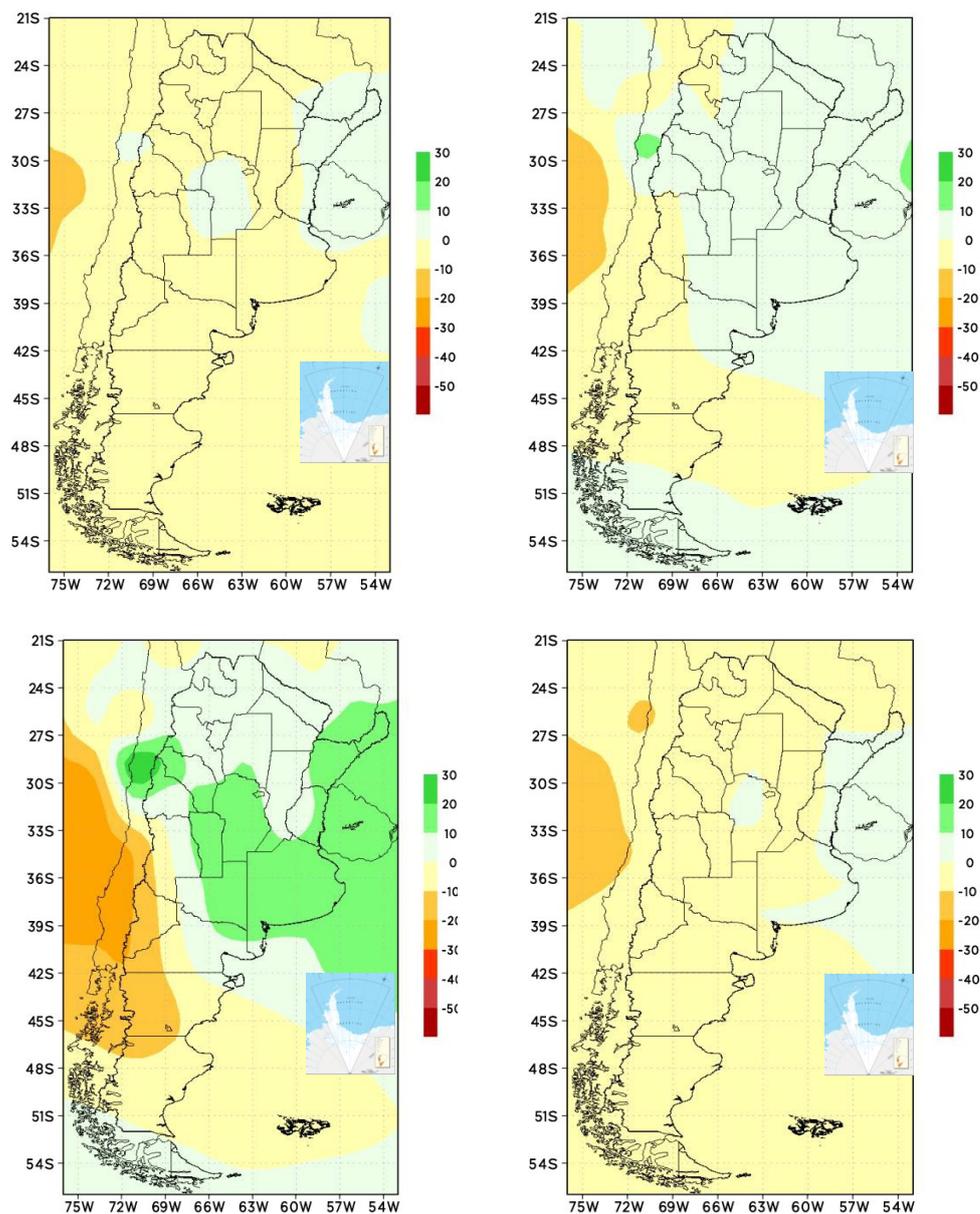


Figura RE.7.8.2: Cambio porcentual en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

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



8. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

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

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

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

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

9. CONCLUSIONES

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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



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

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

10. BASE DE DATOS

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

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

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

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

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



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

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

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

Referencias

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

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

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

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



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

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

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

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