

COMPARACIÓN ENTRE PATRONES DE CIRCULACIÓN ASOCIADOS A EVENTOS DE HELADAS EN LA PAMPA HÚMEDA EN ESCENARIOS CLIMÁTICOS RELATIVOS A LOS EXPERIMENTOS CMIP3 Y CMIP5 DEL MODELO GFDL

COMPARISON BETWEEN CIRCULATION PATTERNS ASSOCIATED TO FROST EVENTS IN THE HUMID PAMPA IN CLIMATIC SETTINGS RELATED WITH THE EXPERIMENTS CMIP3 AND CMIP5 OF THE GFDL MODEL

G. V. Müller⁽¹⁾, C. R. R. Repinaldo⁽¹⁾, D. C. Araneo⁽²⁾ y K. M. Andrade⁽³⁾

- (1) Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción (CICYTTP-CONICET), Diamante, Argentina. E-mail: gabrielamuller@cicytpp.org.ar cintia.rabelo@cicytpp.org.ar
(2) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Cs. Ambientales (IANIGLA-CONICET), Mendoza, Argentina. E-mail: daraneo@mendoza-conicet.gob.ar
(3) Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE), Brasil. E-mail: kelen.andrade@cptec.inpe.br

RESUMEN

El propósito de este estudio es investigar los cambios en la circulación atmosférica asociados a eventos de heladas en la Pampa Húmeda (PH) en el clima futuro para los escenarios más críticos proyectados por el modelo acoplado oceano-atmósfera GFDL. Se emplea el modelo GFDL en sus dos versiones (GFDL-CM2 para el CMIP3 y GFDL-CM3 para el CMIP5). Se analiza la capacidad del modelo para simular los cinco eventos extremos más fríos en el clima presente (1961-1990), respecto de los obtenidos en el reanálisis del NCEP/NCAR. Luego se comparan las simulaciones del clima futuro (2081-2100) con las del presente.

En el experimento CMIP3 del clima presente el modelo muestra una mayor penetración de la isoterma de 0°C en 850 hPa, con anomalías de temperatura negativas más intensas que las del NCEP. El anticiclón pos frontal se observa más extendido meridionalmente sobre el continente, con valores de anomalías similares principalmente en la Pampa Húmeda. El gradiente de presión entre la alta y la baja corriente abajo, provoca un flujo de aire frío del sur más intenso en 850 hPa que en el reanálisis, propiciando heladas del tipo advectivas en la región de estudio. En el clima futuro el modelo proyecta una menor incursión de la isoterma de 0°C y con anomalías negativas de temperatura más pequeñas. El máximo del anticiclón en el futuro se localiza más al norte que en el presente, propiciando heladas del tipo radiativas. En el campo de altura, el jet subtropical se presenta más zonal y con intensidades ligeramente mayores que en las simulaciones del clima presente.

Para el experimento CMIP5 en el clima presente el modelo logra simular la incursión de la isoterma de 0°C, pero la anomalía de temperatura es mayor que en el reanálisis. El campo de presión presenta similares características que en el experimento de CMIP3, pero con anomalías más intensas al sur del continente. En el escenario futuro el modelo proyecta la incursión de la isoterma de 0°C, así como la anomalía negativa de temperatura, similares al presente. El anticiclón pos frontal se localiza más al norte, sobrestimando tanto su valor así como su anomalía en la PH. El campo de viento no muestra diferencias respecto del presente.

En suma, comparando los dos experimentos, el de CMIP3 en el futuro muestra importantes cambios respecto al presente, lo que no ocurre en el CMIP5. Esos cambios se ven principalmente en el campo de presión, donde para el CMIP3 (CMIP5) las heladas tipo radiativas (advectivas) serían las favorecidas en la Pampa Húmeda debido a la posición del anticiclón.

Palabras Claves: eventos extremos de temperatura, heladas, escenarios climáticos, modelo GFDL, Pampa Húmeda

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the change in the atmospheric circulation associated with frost events in the Wet Pampa (WP) in the future climate for the most critical scenarios projected by the GFDL ocean-atmosphere coupled model. Two versions of the GFDL model are used, the GFDL-CM2 for CMIP3 and GFDL-CM3 for CMIP5. We analyze the model capability to simulate the five most extreme cold events in the present climate (1961-1990), with respect to those obtained with the NCEP/NCAR Reanalysis. Then, we compare the future climate simulations (2081-2100) with the model simulation for the present climate.

For the present climate the CMIP3 experiment presents more penetration of the 0°C isotherm in 850 hPa, intensifying the negative temperature anomalies in comparison to the reanalysis. The postfrontal anticyclone is more meridionally extended over the continent, with similar anomalies to those of the reanalysis, mainly over WP. The gradient between the high pressure and the low pressure downwind creates a more intense southerly cold airflow at 850 hPa than the reanalysis, giving place to advective frosts in the studied region. For the future climate, the model projects less penetration of the 0°C isotherm and less intense negative temperature anomalies. The anticyclone maximum is located further north than in the present climate, propitiating radiative frosts. In the upper levels, the subtropical jet shows a more zonally layout and slightly higher intensity than in the present climate simulations.

For the present climate the CMIP5 experiment simulates well the incursion of the 0°C isotherm, although with a more intense temperature anomaly in comparison to the reanalysis. The pressure field presents similar characteristics to those shown in the CMIP3 experiment, but with larger anomalies in the southern part of the continent. For the future scenario, the model projects the 0°C isotherm incursion as well as the negative temperature anomalies similar to the present. The post frontal anticyclone is located further north, overestimating its value and the anomaly over WP. The wind field is similar to the present simulation.

Summarizing the results of both experiments, the future projections with CMIP3 show significant changes with respect to the present, which is not the case with the CMIP5 experiment. These changes are mainly reflected in the pressure field, in which the position of the anticyclone in CMIP3 (CMIP5) would favor radiative (advective) frosts over WP.

Keywords: temperature extreme events, frost, climate scenarios, GFDL model, Wet Pampa

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha sido ampliamente discutido el rol de la acción antropogénica sobre cambios sin precedentes en los patrones climáticos de varias regiones del globo, a través de la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007). De acuerdo al último informe del IPCC SREX (Special Report on Extreme Events, 2012), en varias partes del planeta se observa un decrecimiento en el número de días y noches frías, y un aumento en el número de días y noches cálidas. Utilizando datos observados en América del Sur, Skansi et al. (2013) analizaron extremos climáticos mostrando evidencias de un aumento de la temperatura a partir de la mitad del siglo XX en toda Sudamérica. Para ese mismo período en particular en la Pampa Húmeda, fue registrado un decrecimiento en la frecuencia de heladas y una disminución en el período anual con heladas (Fernández Long et al., 2013).

Los modelos numéricos, tanto globales como regionales, son una herramienta fundamental para el estudio del clima futuro. Varios trabajos recientes, asociados a eventos extremos de temperatura, muestran los resultados de proyecciones futuras a partir de modelos globales en la región del sudeste de Sudamérica. Andrade et al. (2012) analizan la frecuencia de la ocurrencia de sistemas frontales en Sudamérica, a partir de los modelos HadCM3 y GFDL-CM2.0, observando que ambos modelos sobrestiman la frecuencia de esos casos en el clima presente y proyectan, para fines de éste siglo, un aumento en la frecuencia de ocurrencia de los sistemas frontales. Cavalcanti et al. (2013) analizan la frecuencia de ocurrencia de las irrupciones de aire frío en áreas frecuentemente afectadas por heladas en el sur de América del Sur. Considerando el escenario A2 del modelo GFDL-CM2 para la proyección futura 2081-2100, los autores concluyen que el modelo sobreestima las incursiones de aire frío en el clima presente e indica una futura reducción del número de casos de dichos eventos, la cual podría ser aun mayor debido a la sobrestimación en el clima presente. Para esa misma región, Müller et al. (2014) estudian la circulación atmosférica en el sudeste de América del Sur asociada a eventos extremos fríos a partir del modelo HadCM3, concluyendo que, a pesar de la intensificación de los campos de viento que advectan aire frío en la región propiciando las heladas advectivas en el futuro, la penetración del aire frío será menor en latitud debido a la condición más cálida proyectada por el modelo para el escenario A2 para fines del siglo actual.

Investigando la capacidad del modelo GFDL en simular los campos atmosféricos asociados a los eventos extremos fríos en la Pampa Húmeda, este trabajo tiene por objetivo detectar futuros cambios simulados en los escenarios climáticos más críticos del modelo GFDL, con relación al clima presente. Para ello se utiliza el modelo GFDL en dos experimentos, con el fin de identificar diferencias y similitudes que permitan evaluar en forma más amplia las proyecciones obtenidas para los eventos extremos fríos. Para alcanzar este objetivo se valida en primer

término el modelo contrastando los campos simulados en el presente con el reanálisis del NCEP/NCAR a fin de evaluar la capacidad del modelo en representar la circulación atmosférica de los eventos extremos más fríos, para luego compararlos con las simulaciones futuras y así poder inferir los cambios proyectados hacia fines de este siglo.

DATOS Y METODOLOGÍA

El área de estudio de 5°lat x 5°lon, ocupa la conocida región de la Pampa Húmeda (33°S-38°S, 65°W-60°W). La temperatura media diaria en el nivel de 850 hPa se promedió arealmente, a partir de lo cual se identificaron todos los días en que la temperatura estuvo por debajo de 0°C durante mayo a septiembre (invierno) para los periodos 1961-1990 y 2081-2100, representando el clima presente y el clima futuro, respectivamente. De ellos, se eligieron los cinco eventos extremos más fríos, criterio que permite identificar las singularidades de los eventos extremos fríos, los que a su vez representan las características físicas de los eventos extremos que queremos estudiar. A partir de dicha selección se compusieron distintas variables meteorológicas, temperatura y su anomalía en 850 hPa, presión al nivel del mar y su anomalía, viento y su magnitud en 850 hPa y 250 hPa. Las anomalías fueron calculadas respecto a la media zonal correspondiente al clima presente y al clima futuro respectivamente entre 33°S-38°S, que corresponde a las latitudes del área de estudio, y estadísticamente testeadas bajo la suposición de que los valores compuestos de temperatura y presión para cada círculo de latitud se encuentran normalmente distribuidos.

Se utilizan las simulaciones del modelo acoplado océano-atmósfera GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) en los experimentos referentes al CMIP3 (versión GFDL-CM2) y CMIP5 (versión GFDL-CM3) (Coupled Model Intercomparison Project phase 3 and 5), según lo descrito por Delworth et al. (2006) y Dunne et al. (2012), respectivamente. Las salidas utilizadas son diarias, con una resolución espacial de 2° de latitud X 2,5° de longitud, disponibles en nomads.gfdl.noaa.gov (GFDL-CM2) y en cmip-pcmdi.llnl.gov (GFDL-CM3). Cabe señalar que el nivel 850 hPa es el más bajo para el cual se dispone de simulaciones de temperatura diaria en la versión GFDL-CM3, razón por la cual este nivel es la referencia para la selección de los eventos en estudio. Por otra parte, los datos derivados del reanálisis del NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), descrito por Kalnay et al. (1996), son considerados una buena aproximación a un conjunto de datos que representa las observaciones. El reanálisis se toma como referencia para validar el modelo en el clima presente, basados en los resultados de Cavalcanti et al. (2013), quienes demostraron que la temperatura de la versión GFDL-CM2 representa en forma satisfactoria la temperatura observada para la región de la Pampa Húmeda.

Con la finalidad de hacer una evaluación estadística del incremento/disminución de la temperatura para el presente, se calculó el "BIAS" del modelo respecto al reanálisis, así como la diferencia entre la temperatura del clima futuro y la del modelo en el clima presente. En estos cálculos se utiliza la temperatura media areal en el nivel de 850 hPa en el período del invierno.

Por lo tanto, los patrones simulados en el clima presente por el modelo para ambas versiones son contrastados con el reanálisis a fin de validar la capacidad del modelo en simular la circulación atmosférica asociada a los eventos extremos más fríos para cada uno de éstos experimentos. A su vez, dichas simulaciones del siglo XX son comparadas con los escenarios futuros más críticos: A2 y RCP 8.5 del CMIP3 y CMIP5, respectivamente.

RESULTADOS

Reanálisis NCEP/NCAR

Se describen los campos obtenidos a partir de la composición de los cinco eventos más extremos del reanálisis en la región de la Pampa Húmeda. La Figura 1 muestra los campos de temperatura, presión y viento para toda América del Sur. Las temperaturas iguales o menores a 0°C en 850 hPa (Fig. 1a) alcanzan latitudes en torno de los 30°S, es decir al norte de la Pampa Húmeda, donde se observan anomalías negativas de temperatura entre -4°C y -6°C. Esta región de temperaturas más bajas está asociada a un intenso anticiclón pos frontal que ingresa por el sudoeste del continente (Fig. 1b), con importantes anomalías positivas de presión. La Pampa Húmeda se encuentra afectada por un débil viento del sur en 850 hPa (Fig. 1c), por lo que este patrón propicia heladas del tipo advectivas, frecuentes durante el invierno en la región de estudio. Este patrón es el segundo de mayor varianza explicada de acuerdo a la clasificación sinóptica de los patrones asociados a heladas en la Pampa Húmeda, mostrada por Müller et al. (2003) para la región. Por otra parte, en altura se observa que el jet subtropical está posicionado al norte de la región de estudio (Fig. 2d) característico de las irrupciones de aire frío, presentando un núcleo de entre 60 y 70ms⁻¹. La localización del jet, su posición e intensidad, también juegan un importante rol en las heladas de la Pampa Húmeda (Müller et al. (2005), Müller and Ambrizzi (2007), y en particular condiciona la persistencia del fenómeno en dicha región (Müller and Berri, 2007, 2012).

Estos campos servirán de comparación con los respectivos en ambos experimentos del modelo GFDL, para lo cual en primer término se valida el modelo en el clima presente.

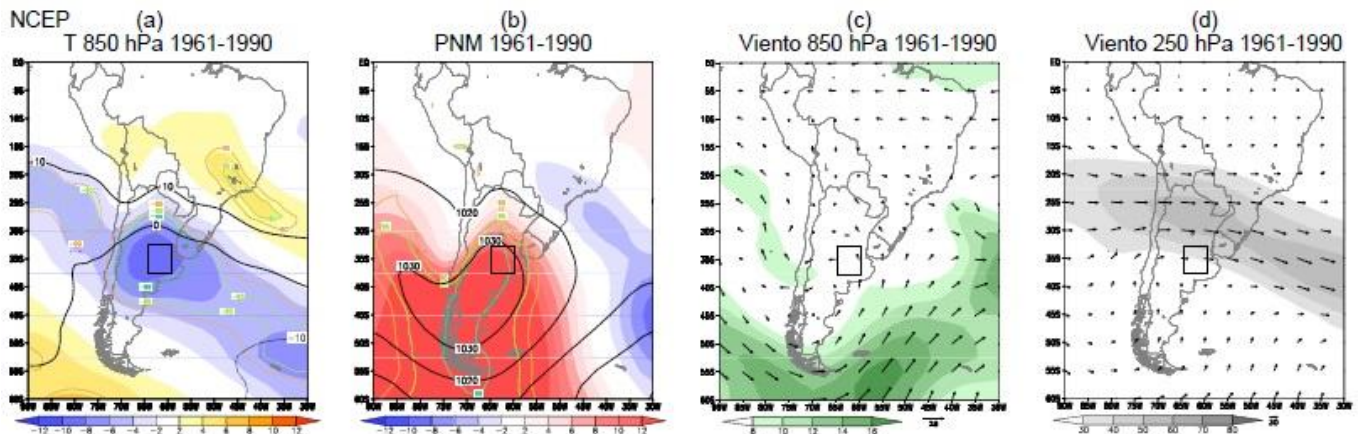


Figura 1: Composición de los eventos más extremos del NCEP/NCAR: Temperatura y su anomalía (°C) (sombreado) en 850 hPa (a), Presión al nivel del mar y su anomalía (hPa) (sombreado) (b), Viento y magnitud (m/s) (sombreado) en 850 hPa (c) y 250 hPa (d). En todos los casos, los valores de anomalías significativas al 90%, 95% y 99% de confianza se encuentran marcados con líneas de color.

Figure1: Composites of the NCEP/NCAR most extreme events: Temperature and anomaly (°C) (shaded) in 850 hPa (a), Sea Level Pressure and anomaly (hPa) (shaded) (b), wind and intensity (m/s) (shaded) in 850 hPa (c) and 250 hPa (d). In all cases, significant anomalies at 90%, 95% and 99% level are also indicated by color lines.

Simulación del modelo: clima presente vs. escenario futuro

Una medida del sesgo en la temperatura media del invierno del modelo está dada por el BIAS, el cual es de $-3,5^{\circ}\text{C}$ para el experimento referente al CMIP3 y de -2°C para el CMIP5, es decir el modelo se muestra “más frío” que el reanálisis, diferencia que disminuye para la versión más reciente del modelo. Por otra parte la diferencia de temperatura media del invierno del modelo en el clima futuro respecto de la del presente es de $2,5$ para el CM2 y de $1,8$ en el CM3. Es decir que en el futuro hay un aumento de la temperatura, siendo menor la proyectada por el experimento del CMIP5.

Las Figuras 2a y 3a para los experimentos CMIP3 y CMIP5 respectivamente, muestran los campos equivalentes a los de la Figura 1, para el clima presente (parte superior) y para el clima futuro (parte inferior). Iniciando el análisis con las simulaciones del CMIP3 se observan temperaturas bajo 0°C incursionando hasta el norte de Argentina (Fig. 2a), superando lo mostrado por la isoterma de 0°C del reanálisis (Fig. 1a). El modelo simula valores superiores de anomalías negativas de temperatura en comparación al reanálisis (Fig. 1a), donde gran parte de la Pampa Húmeda muestra valores anómalos entre -6°C y -10°C . Para el escenario futuro, temperaturas por debajo de 0°C también alcanzan latitudes próximas a los 30°S , pero con una menor penetración respecto al presente y con una considerable disminución en la intensidad de las anomalías negativas de temperatura sobre la Pampa Húmeda. El campo de presión (Fig. 2b) simulado por el modelo muestra un anticiclón más estrecho y por ende confinado al continente, con anomalías anticiclónicas más intensas, comparado con el reanálisis (Fig. 1b). Corriente abajo del anticiclón pos frontal, se observa una anomalía negativa de presión, determinando un gradiente a lo largo de la costa del sur del continente. Este patrón con anomalía anticiclónica sobre el continente y ciclónica en el Atlántico sur, es el típico asociado a eventos de heladas en el área de estudio, según mostrara Müller et al. (2003) en una clasificación sinóptica asociada a la ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda. Esta configuración es diferente para el escenario futuro, donde el anticiclón se presenta más al norte, con su centro de máxima presión afectando casi la totalidad de la Pampa Húmeda, pero con anomalías menos intensas respecto al clima presente. En las simulaciones de viento en 850 hPa (Fig. 2c) en el clima presente, el modelo se muestra distinto al reanálisis (Fig. 1c), con vientos del sur/sudoeste sobre la Pampa Húmeda, debido al gradiente anómalo entre el anticiclón pos frontal sobre el continente y la vaguada en el Atlántico sur, provocando un flujo meridional que propicia heladas del tipo advectivas sobre la región. Para el futuro, no se observa dicha configuración, por el contrario el viento en la región de estudio es prácticamente nulo, favoreciendo heladas tipo radiativas asociadas al anticiclón observado en la región de la Pampa Húmeda (Fig. 2b). También este patrón es típico en la región y de hecho es el que mayor varianza explica según demostrara Müller et al. (2003). El modelo simula bien la posición del jet en niveles altos (Fig. 2d), con la vaguada ligeramente más profunda en 250 hPa y

con un debilitamiento en el flujo con relación al reanálisis (Fig. 2d). En la proyección futura el jet aparece más zonal, y el flujo se proyecta con magnitudes más intensas que en las simulaciones del clima presente.

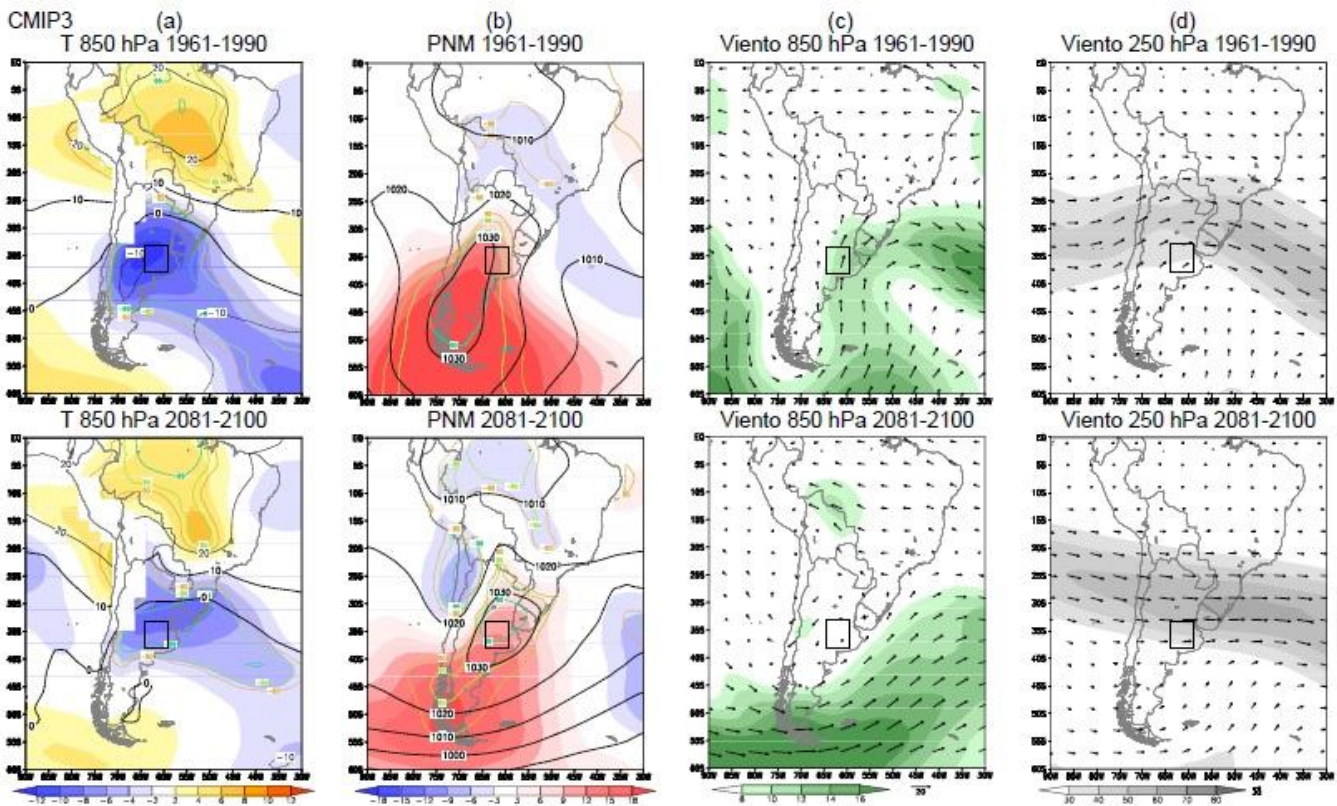


Figura 2: Idem Figura 1 pero para el clima presente (superior) y futuro (inferior) del proyecto CMIP3.
Figure 2: Idem Figure 1 but for present climate (superior) and future climate (inferior) of the CMIP3 experiment.

En el experimento del CMIP5 para el clima presente, el modelo muestra la incursión de la isoterma de 0°C similar al reanálisis (Fig. 1), pero con anomalías negativas de temperatura más intensas sobre la región de estudio (Fig. 3a). Para el futuro la isoterma de 0°C alcanza latitudes similares a lo observado en el presente, con anomalías negativas de temperatura del mismo orden. En la Figura 3b se puede ver el campo de presión simulado por el modelo que muestra la alta presión más estrecha y por ende confinada al continente, comparando con el reanálisis (Fig. 1b), similares características a lo mostrado en el experimento de CMIP3, pero con anomalías más intensas al sur del continente. Para el futuro se proyecta un avance del anticiclón pos frontal hacia latitudes más bajas, con anomalías más intensas que las simuladas en el presente en la Pampa Húmeda. Se observa un flujo atmosférico del sur sobre la región estudiada tanto en el presente como en el futuro (Fig. 3c) incluso mayor al mostrado por el reanálisis (Fig. 1c). El flujo del sur juega un importante rol en la ocurrencia de heladas en la región de la Pampa Húmeda propiciando heladas de tipo advectivas (Müller and Berri, 2007, 2012), producto del gradiente de presión que se establece entre la alta presión en el continente y la baja en el Atlántico sur como se aprecia en la Figura 3b. Tanto para el clima presente como para el futuro la extensión latitudinal del jet subtropical es mayor (Fig. 3d), pero con velocidades de flujo similares al respectivo del reanálisis (Fig. 3d).

Es interesante comparar los resultados aquí discutidos con los obtenidos a partir del modelo HadCM3 por Müller et al. (2014), en particular para la región de la Pampa Húmeda. Si bien ambos simulan condiciones similares, se destaca que pueden existir diferencias basado en que son herramientas distintas. El modelo HadCM3 logra capturar las características generales de los campos de circulación al sur de Sudamérica en el clima presente comparado con el reanálisis, tal como aquí se observa para el modelo GFDL. En el clima futuro correspondiente a la simulación del modelo HadCM3 para el escenario A2, las anomalías negativas de temperatura siguen siendo del mismo orden que las simuladas en el clima presente con una intensificación del viento del sur producto del mayor gradiente anómalo de presión en 850 hPa. Es decir que las proyecciones del HadCM3 guardan similitud con los aquí mostrados por las del experimento CMIP5.

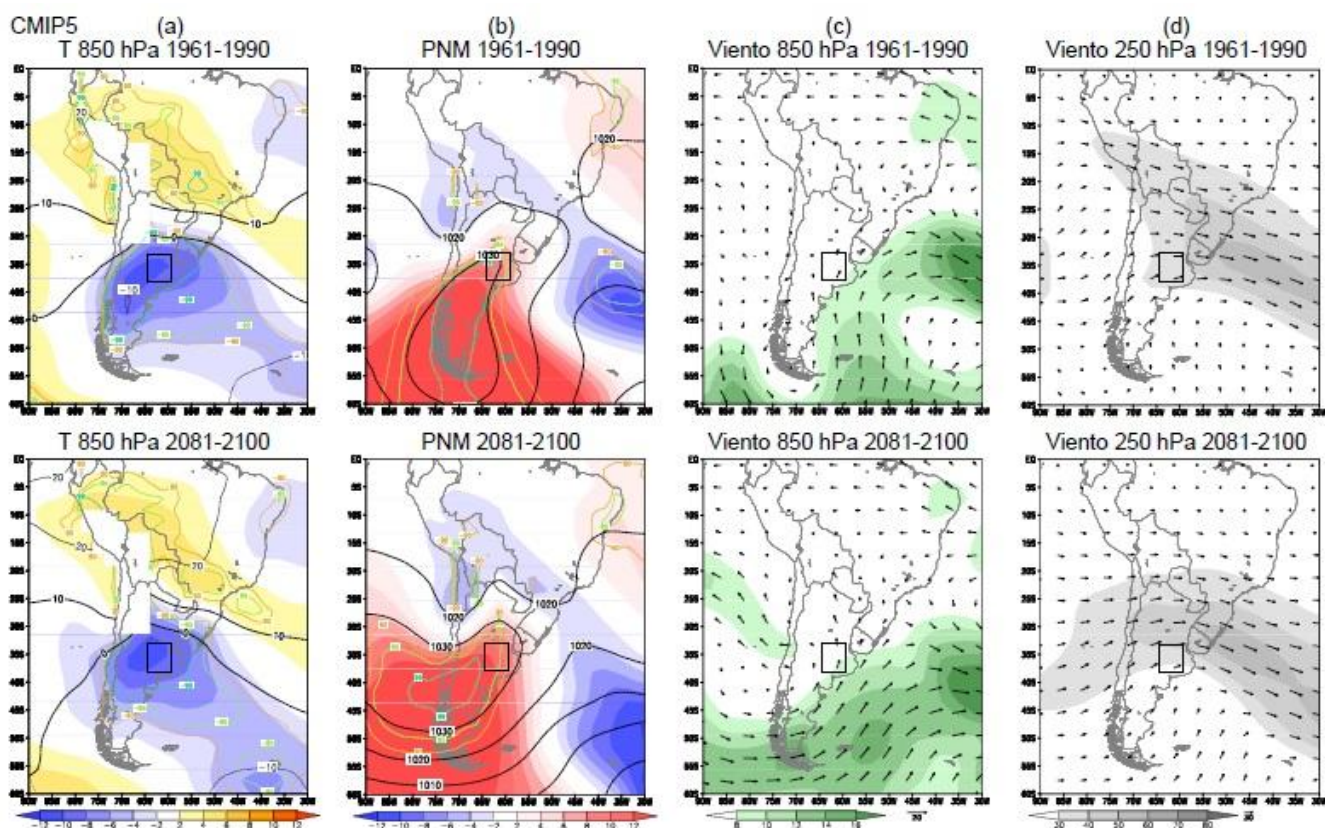


Figura 3: Idem Figura 1 pero para el clima presente (superior) y futuro (inferior) del proyecto CMIP5.
Figure 3: Idem Figure 1 but for present climate (superior) and future climate (inferior) of the CMIP5 experiment.

CONCLUSIONES

Con el objetivo de identificar cambios futuros en los campos de circulación atmosférica asociados a los eventos extremos fríos que afectan la Pampa Húmeda, se consideraron dos experimentos del modelo GFDL en los escenarios climáticos más críticos proyectados para fines de este siglo. En primer término se valida la capacidad del modelo en simular la circulación del clima presente asociada a los cinco eventos extremos más fríos en los experimentos CMIP3 y CMIP5 respecto a la circulación de los cinco eventos extremos más fríos del reanálisis NCEP/NCAR, para luego comparar los resultados del modelo del clima presente con el futuro. El modelo GFDL es un modelo frío respecto a los valores de referencia del reanálisis en ambas versiones, dado que su BIAS es negativo. Como es de esperar que el modelo mantenga su BIAS en el futuro (es decir mantenga su sesgo negativo respecto al clima de referencia futuro), la temperatura esperada será aún mayor, aunque menor para el escenario RCP8.5 en relación al escenario A2.

Al comparar el campo de temperatura del reanálisis con el modelo se observa claramente que GFDL es un modelo que sobrestima las temperaturas, lo que se corrobora al observar los valores de temperatura mínima tanto para el experimento referente al CMIP3 como para el CMIP5, aunque en el CMIP5 es aún más significativo. Esto también se observa para el campo de presión, pero no así en la región de la Pampa Húmeda donde las anomalías no difieren respecto al reanálisis. Sin embargo la configuración del campo de presión no cambia mucho entre el obtenido para el reanálisis y el modelo en ambos experimentos, aunque existen algunas diferencias que se reflejan claramente en el campo de viento de 850 hPa. La consecuencia de ello es que el modelo GFDL refleja un flujo de aire frío dominante del sur en la región de estudio que hace que las temperaturas sean menores respecto del reanálisis, como se mencionara antes. En cambio, el experimento referente al CMIP3 en el futuro muestra cambios respecto al presente, lo que no ocurre en el CMIP5. Ese cambio aparece en la configuración del campo de presión, donde por la localización del anticiclón, las heladas tipo radiativas serían las favorecidas en la Pampa Húmeda, a diferencia de las heladas advectivas que el aire frío del sur propiciaría en el escenario del CMIP5.

Los patrones reflejados en el clima futuro de cada experimento, son aquellos que representan a los campos con mayor varianza explicada, según demostrara Müller et al. (2003) en la clasificación sinóptica de las heladas en la Pampa Húmeda. Las heladas de tipo radiativas y advectivas son la respuesta a situaciones sinópticas características en la región, y por consiguiente, la dominancia de un patrón sobre el otro, como se muestra en

cada uno de los experimentos del GFDL, no representaría cambios en el futuro en lo que se refiere a patrones de circulación asociados a heladas en la Pampa Húmeda. Sin embargo este aspecto necesita un mayor análisis en futuros trabajos, enfocados al estudio sinóptico de las heladas en la Pampa Húmeda a partir de simulaciones numéricas.

Agradecimientos: Al proyecto PICT-PRH 0023 por el apoyo financiero.

REFERENCIAS

- Andrade, K.M., G.V. Müller, I. Cavalcanti, M.E. Fernandez-Long, M. Bidegain, e G.J. Berri, 2012. Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o Sul da América do Sul em projeções do clima futuro. *Meteorológica*, 37, 1, 15-26. <http://www.cenamet.org.ar/archivos/Vol37-Nro1-2012.pdf>.
- Cavalcanti I.F.A., G.V. Müller, K. Andrade, and M.E.F. Long, 2013. Cold air intrusions over southeastern South America - GFDL model behavior regarding climate simulations in the 20th century and future projections. *Global and Planetary Change*, 111, 31-42. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.08.006
- Delworth, T.L., et al. 2006. GFDL's CM2 global coupled climate models-Part 1: Formulation and simulation characteristics, *J. Clim.*, 19, 643–674.
- Dunne, John P., et al., 2012. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Climate*, 25, 6646–6665. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1>.
- Fernández-Long M.E., G.V. Müller, A. Beltrán-Przekurat, and O. Scarpati, 2013. Long- and short- term changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33, 7, 1673–1686.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Sasha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowlak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jeene, and D. Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 77, 437-471.
- Müller, G.V., R. Compagnucci, M.N. Nuñez, and A. Salles, 2003. Spatial analysis of surface circulation associated to frosts in the wet Pampas. *International Journal of Climatology*, United Kingdom, 23, 943-961.
- Müller, G.V., T. Ambrizzi, and M.N. Nuñez, 2005. Mean Atmospheric Circulation leading to Generalized Frosts in Central Southern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, Austria, 82, 95-112.
- Müller, G.V. and T. Ambrizzi, 2007. Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. *Climate Dynamics*, 29, 633-645. DOI 10.1007/s00382-007-0253-x.
- Müller, G.V. and G.J. Berri, 2007. Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. *Monthly Weather Review*, 135, 4, 1268–1289.
- Müller, G.V. and G.J. Berri, 2012. Atmospheric Circulation Associated with Extreme Generalized Frosts Persistence in Central-Southern South America. *Climate Dynamics*, 38 (5-6), 837-857. DOI: 10.1007/s00382-011-1113-2.
- Müller, G.V., C.R.R. Repinaldo, K.M. Andrade, Cavalcanti I.F.A., 2014. Proyecciones futuras asociada a los eventos extremos frios en el sudeste de Sudamérica sobre la perspectiva del modelo hadcm3. *Meteorológica* (en revisión).
- Skansi, M.L.; M. Brunet, J. Sigró, E. Aguilar, J.A.A. Groening, O.J. Bentancur, C.Y.R. Geier, R.L.C. Amaya, H. Jácome, A.M. Ramos, C.O. Rojas, A.M. Pastén, S.S. Mitro, C.V. Jiménez, R. Martínez, L.V. Alexander, and P.D. Jones, 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307.

Recibido: 29-05-2014

Aceptado: 01-11-2014