

EXPLORANDO TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS EN DIFERENTES REANÁLISIS. PARTE 2: VARIABILIDAD EN DIFERENTES ESCALAS TEMPORALESPablo Gabriel Zaninelli^{1,3}, Claudio Guillermo Menéndez^{1,2,3} y Andrea Fabiana Carril^{1,3}¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), FCEN, Universidad de Buenos Aires, Argentina³UMI IFAECI/CNRS, Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 28 de agosto de 2013, en su versión final el 1 de julio de 2014)

RESUMEN

Se analiza la variabilidad de la temperatura máxima en verano (TX) y de la mínima en invierno (TN) en el sudeste de Sudamérica (SESA) en el período 1961-2000 empleando una climatología observacional y tres reanálisis multidecádicos (NCEP, ERA40, 20CR). Se describen también los cambios entre los períodos 1981-2000 y 1961-1980 en la variabilidad diaria, en la interanual y en los extremos (percentiles 75 y 25) de TX y TN. El patrón geográfico de los cambios entre los dos períodos de la variabilidad diaria de TX y TN es similar al patrón geográfico de los cambios en los extremos de estas variables. Sobre la Argentina en general se encuentra una disminución en la frecuencia de días calurosos en verano y de noches frías en invierno consistente con una disminución en la variabilidad diaria. La máxima variabilidad interanual de TX se da en una zona de transición que incluye gran parte del centro y norte argentino, donde la humedad del suelo regula la variabilidad de la evapotranspiración dando lugar a feedbacks con la atmósfera. Los cambios entre los dos períodos sugieren un corrimiento hacia el sudoeste en la zona de máxima variabilidad interanual de TX en la climatología observacional posiblemente asociado con cambios en la variabilidad de la precipitación. En general los reanálisis tienen dificultades para capturar los principales patrones geográficos de los cambios de la variabilidad diaria e interanual de TX y TN entre los dos períodos.

Palabras clave: intercomparación de reanálisis, temperatura máxima, temperatura mínima, variabilidad climática

EXPLORING MAXIMUM AND MINIMUM TEMPERATURES IN DIFFERENT REANALYSIS. PART 2: VARIABILITY IN DIFFERENT TIME SCALES**ABSTRACT**

In this work it is analyzed the maximum temperature (TX) and minimum temperature (TN) variability for summer and winter, respectively, in southeastern South America (SESA) in the period 1961-2000 using an observational climatology and three multidecadal reanalysis (NCEP, ERA40, 20CR). It is also described the changes between the 20-year periods 1981-2000 and 1961-1980 in daily and

interannual variability and in extremes (percentiles 75 and 25) of TX and TN. The geographical patterns of change between both periods of the daily variability of TX and TN are similar to the geographical patterns of changes in extremes of these variables. In Argentina, in general, there is a decrease in the frequency of hot summer days and cold winter nights in agreement with a decrease of daily variability. The maximum interannual variability of TX happens in a transitional zone which includes much of central and northern Argentina, where soil moisture constrains evapotranspiration variability and thus resulting feedbacks with the atmosphere. The changes between both periods in the observational climatology suggest a shift to the southwest in the zone of maximum interannual variability of TX possibly associated with changes in the variability of precipitation. Overall, reanalysis have difficulty reproducing the main geographical patterns of changes in daily and interannual variability of TX and TN between the two periods.

Keywords: reanalysis intercomparison, maximum temperature, minimum temperature, climate variability

1. INTRODUCCIÓN

El volumen y disponibilidad de datos climáticos de diferentes tipos y provenientes de diferentes fuentes se está incrementando rápidamente (Overpeck y otros 2011). En particular existen diversos reanálisis multidecádicos tales como el reciente 20CR (Compo y otros 2011), y nuevas bases de datos observacionales en retículos regulares (e.g. Tencer y otros (2011) para temperaturas mínima y máxima en el Sudeste de Sudamérica (SESA)).

La posibilidad de emplear diferentes bases de datos -ya sea observacionales o provenientes de modelos numéricos- para el estudio de la variabilidad de la temperatura y sus extremos, introduce la incógnita acerca de qué información conviene emplear para estudios climatológicos (incluyendo análisis de procesos físicos) y de impactos. Esta incertidumbre podría ser alta en el caso de Sudamérica, continente en que la densidad y calidad de las series de observaciones es baja y en donde los errores de los modelos numéricos pueden ser significativos (Menéndez y otros 2010).

Las anomalías de temperatura en diferentes escalas temporales (e.g. diaria, interanual) pueden ocasionar impactos a nivel social,

económico y ecológico (e.g. Fischer y Schär, 2009). Con esta motivación, este artículo busca elucidar la capacidad de diferentes reanálisis para capturar la variabilidad de la temperatura en nuestra región así como los cambios en los extremos de temperatura máxima y mínima durante las últimas décadas del siglo 20. También se busca contribuir a una mayor comprensión de los procesos físicos relacionados con esta variabilidad. Diferentes procesos y en diferentes escalas temporales pueden afectar la varianza de la temperatura, tales como variabilidad sinóptica (Vargas; Naumann 2008), variabilidad intraestacional (Cerne; Vera (2011); Naumann; Vargas (2012) y variabilidad interanual (Vidale y otros, 2007; Lenderink y otros, 2007). Algunos estudios enfatizan el rol de la circulación atmosférica (Meehl; Tebaldi 2004), mientras que otros análisis se concentran en el rol de las interacciones suelo-atmósfera (Seneviratne y otros 2006a; Seneviratne y otros 2006b). La variabilidad de la temperatura está afectada por los siguientes tres principales factores (Fischer; Schär 2009): (i) cambios en la circulación general de gran escala, (ii) procesos relacionados con la interacción suelo-atmósfera que determinan la partición de los flujos de calor sensible y latente, y (iii) procesos que afectan el balance de radiación en superficie (principalmente relacionados con la nubosidad). Variaciones en las características de estos mecanismos o procesos en un contexto de

cambio climático pueden afectar la temperatura, su variabilidad y sus tendencias de largo plazo. A su vez, los impactos de la variabilidad climática y en particular de los extremos de temperatura pueden ocurrir en diferentes escalas temporales (e.g. diaria, interanual; Seneviratne y otros, 2012).

Existen varios antecedentes en la literatura que discuten diferentes aspectos relativos a la temperatura en Sudamérica y en SESA principalmente a partir de datos observacionales y con énfasis en la descripción estadística de las tendencias de las medias y los extremos de las temperaturas máxima y mínima (e.g. Rosenblüth y otros, 1997; Barrucand y Rusticucci, 2001; Barros y otros, 2002; Rusticucci y Vargas, 2002; Rusticucci y otros 2003, Rusticucci y Barrucand 2004; Vincent y otros 2005; Marengo y Camargo 2008; Barrucand y otros, 2008; Rusticucci y Renom, 2008; Renom y otros, 2011).

En la primera parte de este trabajo (Zaninelli y otros, 2014) se comparan las medias estacionales de la temperatura mínima para invierno (TN) y temperatura máxima para verano (TX) en SESA obtenidas de tres reanálisis entre sí y también respecto a los datos de Tencer y otros (2011) y al ensamble de modelos climáticos regionales descrito en Carril y otros (2012). El presente artículo analiza los patrones geográficos de la variabilidad de TX y de TN a partir de tres reanálisis multidecádicos y de los datos de Tencer y otros (2011) en dos escalas temporales (diaria e interanual). Asimismo se evalúan los cambios en la variabilidad entre dos períodos de 20 años cada uno incluyendo los cambios en los extremos de TX y TN.

2. METODOLOGÍA

La región de estudio está comprendida entre 70°O-45°O y 40°S-20°S (SESA) y el período a estudiar es 1961-2000. La climatología observacional de referencia de TN y TX es la obtenida por Tencer y otros (2011) (de aquí en más TNCR). Se analizan tres reanálisis: NCEP,

20CR y ERA40. Las características principales de cada conjunto de reanálisis están resumidas en Zaninelli y otros (2014). Todos los conjuntos de datos fueron interpolados a un reticulado común con resolución de 2 grados mediante el método de interpolación bilineal espacial. El dominio SESA es relativamente plano y bajo, no obstante, aquellos puntos de retículo con topografía que excede los 1200 m fueron enmascarados en las figuras y tampoco se tuvieron en cuenta a los fines de ningún cálculo estadístico.

Los análisis de este trabajo se realizan para cada estación por separado: verano (diciembre a febrero, DEF) e invierno (junio a agosto, JJA). Se considera como métrica de la variabilidad (diaria e interanual) a la desviación estándar por punto de retículo (tal como se hizo en trabajos previos, e.g. Rowell (2005), Fischer y Schär (2009) y de Elía y otros (2013), previa remoción de la tendencia lineal con el fin de evitar una sobrestimación de la variabilidad generada por dicha tendencia. La variabilidad diaria de TX (DEF) y de TN (JJA) es calculada como la desviación estándar de todos los valores diarios en la correspondiente estación durante el período completo (1961-2000). La variabilidad interanual de TX (DEF) y de TN (JJA) es calculada como la desviación estándar de las 40 medias estacionales para verano o invierno del período 1961-2000. Los extremos de temperatura son calculados en base a los percentiles 75 (para días calurosos en verano) y 25 (para noches frías en invierno) de forma similar a Carril y otros (2012). Los cambios en la frecuencia de ocurrencia de días calurosos en DEF son calculados como el porcentaje de días en el período 1981-2000 (segundo periodo) en los que TX supera el percentil 75 (P75) de los datos diarios de TX del período 1961-1980 (primer periodo). Similarmente, los cambios en la frecuencia de noches frías en JJA se obtienen calculando el porcentaje de días en el segundo período con TN que no supere el percentil 25 (P25) de los datos diarios de TN correspondientes al segundo período. Por lo tanto, un aumento en el número de días cálidos en verano (noches frías en invierno) para el segundo periodo tendrá lugar si el porcentaje de cambio es superior al 25 %

con respecto al primer periodo para TX (TN), en cambio el número de días cálidos en verano (noches frías en invierno) disminuirá si el cambio es inferior al 25 % para TX (TN). No se considera que hubo cambios si el porcentaje es igual (o cercano) al 25 %.

3. RESULTADOS

3.1. Variabilidad diaria

La variabilidad de la temperatura está afectada por mecanismos directos (alternancia de advección fría y caliente) e indirectos (feedbacks relacionados con precipitación y nubosidad). La figura 1 muestra la variabilidad diaria de TX (DEF) para el período 1961-2000. El campo observacional (panel a) presenta un gradiente en la dirección NE-SO, con máxima variabilidad en las regiones relativamente más secas (al sur y al oeste del dominio). Los reanálisis (paneles inferiores) capturan la dirección y sentido de este gradiente pero el mismo tiende a ser algo más marcado especialmente para 20CR. También se muestra el promedio de los tres reanálisis (panel b, de aquí en más en todas las figuras el panel b corresponde al promedio del ensamble de los tres reanálisis.). Si bien el gradiente en la variabilidad diaria es ligeramente más intenso en el ensamble que en el campo observacional, el ensamble representa aceptablemente la desviación estándar.

La figura 2 muestra los cambios en la variabilidad diaria de TX (representados mediante la diferencia de la desviación estándar 1981-2000 menos 1961-1980). En general los datos observacionales (panel a) evidencian una disminución de esta variabilidad en gran parte de la región SESA, con máxima disminución en el norte argentino. El ensamble de los tres reanálisis (panel b) no logra representar este patrón. ERA40 (panel d) captura la disminución de variabilidad en el norte del dominio alrededor de 60°O, pero muestra un incremento de variabilidad en los extremos sur y noreste. Los reanálisis NCEP (panel c) y 20CR (panel d) fallan completamente en capturar este patrón de cambio en la

variabilidad diaria. En ambos reanálisis existe una tendencia hacia un incremento de la variabilidad (en particular sobre la zona en la que se encuentra la máxima disminución de variabilidad en los datos observacionales). Los patrones de cambios en la variabilidad de NCEP y 20CR son similares, posiblemente debido a que los modelos que emplean estos reanálisis no son independientes.

Las irrupciones de aire frío se ven favorecidas en invierno (Naumann; Vargas 2012), lo cual es consistente con que la cantidad media de frentes es máxima en esa estación y mínima en verano (Lupo y otros 2001). En particular los frentes fríos, asociados con sistemas sinópticos migratorios, son más intensos y más rápidos en invierno afectando las temperaturas mínimas aún en el sudeste de Brasil (Seluchi; Marengo 2000). En consecuencia la variabilidad sinóptica afecta la variabilidad de TN. Por otra parte, la variabilidad asociada en la nubosidad y en la precipitación afecta el balance de energía en superficie y la humedad del suelo (y su capacidad calórica) y por ende la temperatura. La figura 3 muestra la variabilidad diaria de TN (JJA) para el período 1961-2000. La distribución de la desviación estándar calculada a partir de los datos observacionales (panel a) presenta un máximo en el norte argentino. La variabilidad diaria de TN tiende a superar a la de TX sobre gran parte del dominio (comparar el primer panel de las figuras 1 y 3). Los reanálisis (paneles inferiores) también presentan un máximo en el norte argentino aunque posicionado más al oeste o noroeste. En el caso de NCEP la variabilidad diaria de TN está sobreestimada mientras que para ERA40 está subestimada respecto a la observacional. En general las diferencias inter-reanálisis en la variabilidad diaria son mayores para TN que para TX (como surge de comparar los paneles inferiores de las figuras 1 y 3). A pesar de las marcadas diferencias entre los tres reanálisis, el ensamble representa aceptablemente la variabilidad diaria debido en parte a la cancelación de errores principalmente entre NCEP (panel c) y ERA40 (panel d). No obstante, el ensamble tiende a subestimar esta variabilidad.

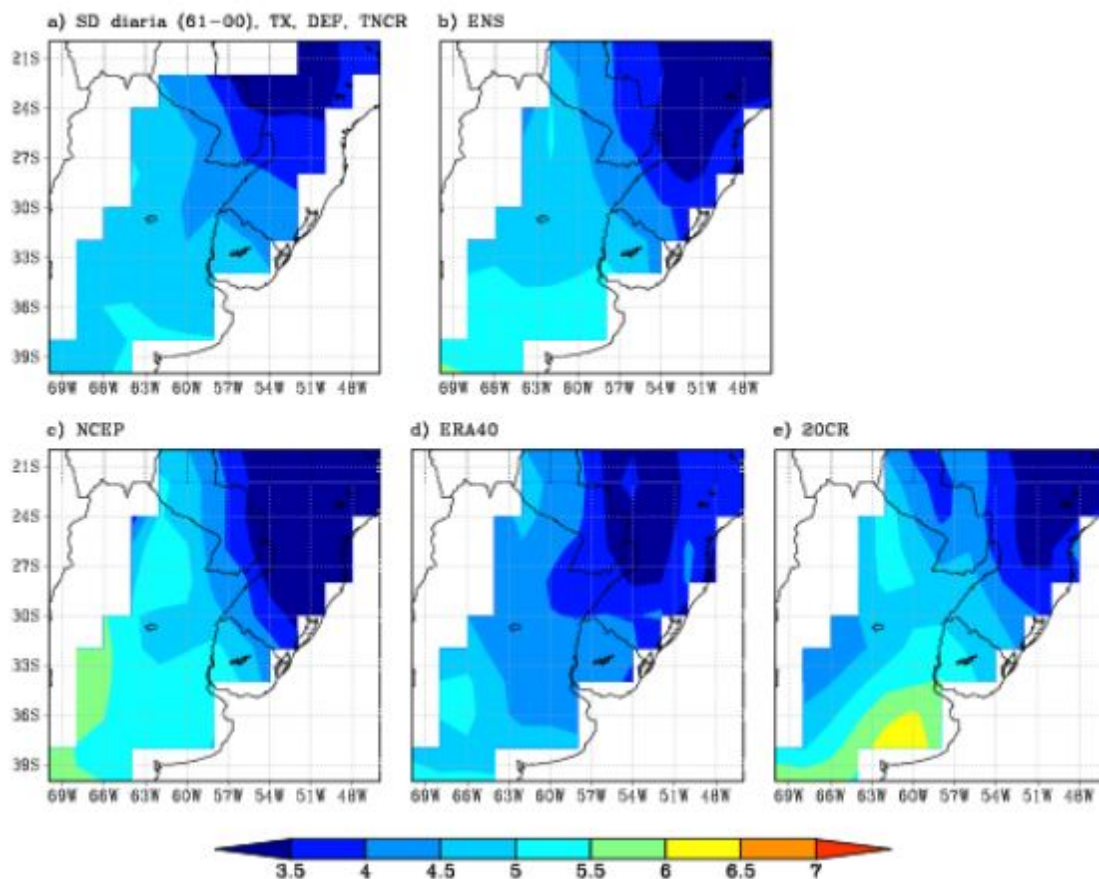


Figura 1: Variabilidad diaria de la TX (DEF) durante el período 1961-2000. Panel a) TNCR, b) ensamble de reanálisis, c) NCEP, d) ERA40 y e) 20CR. La unidad es °C.

La figura 4 muestra los cambios en la variabilidad diaria de TN (JJA) entre los dos subperíodos. De acuerdo a los datos observacionales (panel a), la variabilidad disminuyó en el centro de la Argentina, y se incrementó en el sur de Brasil. El ensamble de los reanálisis (panel b) exhibe poco cambio en la variabilidad sobre la provincia de Buenos Aires y un notorio incremento de la misma sobre el norte del dominio, el cual maximiza hacia el oeste de Paraguay. Todos los reanálisis individuales (paneles inferiores) capturan un incremento de variabilidad al norte del dominio (si bien posicionan el máximo cambio más al oeste respecto a TNCR), pero en general no logran capturar los cambios sobre la Argentina. ERA40 (panel d) al menos captura la disminución de variabilidad al sur de aproximadamente 30°S, pero en los datos observacionales el gradiente de los cambios es SO-NE mientras que en ERA40

es SE-NO.

Resulta interesante destacar que los reanálisis logran capturar aceptablemente la distribución de la desviación estándar diaria de TX en verano del período 1961-2000, pero presentan mucha dispersión inter-reanálisis en los mapas de cambios 1981-2000 menos 1961-1980. En cambio para TN en invierno el comportamiento tiende a ser el opuesto, con alta dispersión inter-reanálisis para la variabilidad media de todo el periodo y relativamente más acuerdo inter-reanálisis para simular los cambios entre 1961-1980 y 1981-2000.

3.2. Variabilidad interanual

En esta subsección se presenta la variabilidad interanual de TX (DEF) y de TN (JJA) del período 1961-2000, así como los cambios entre los

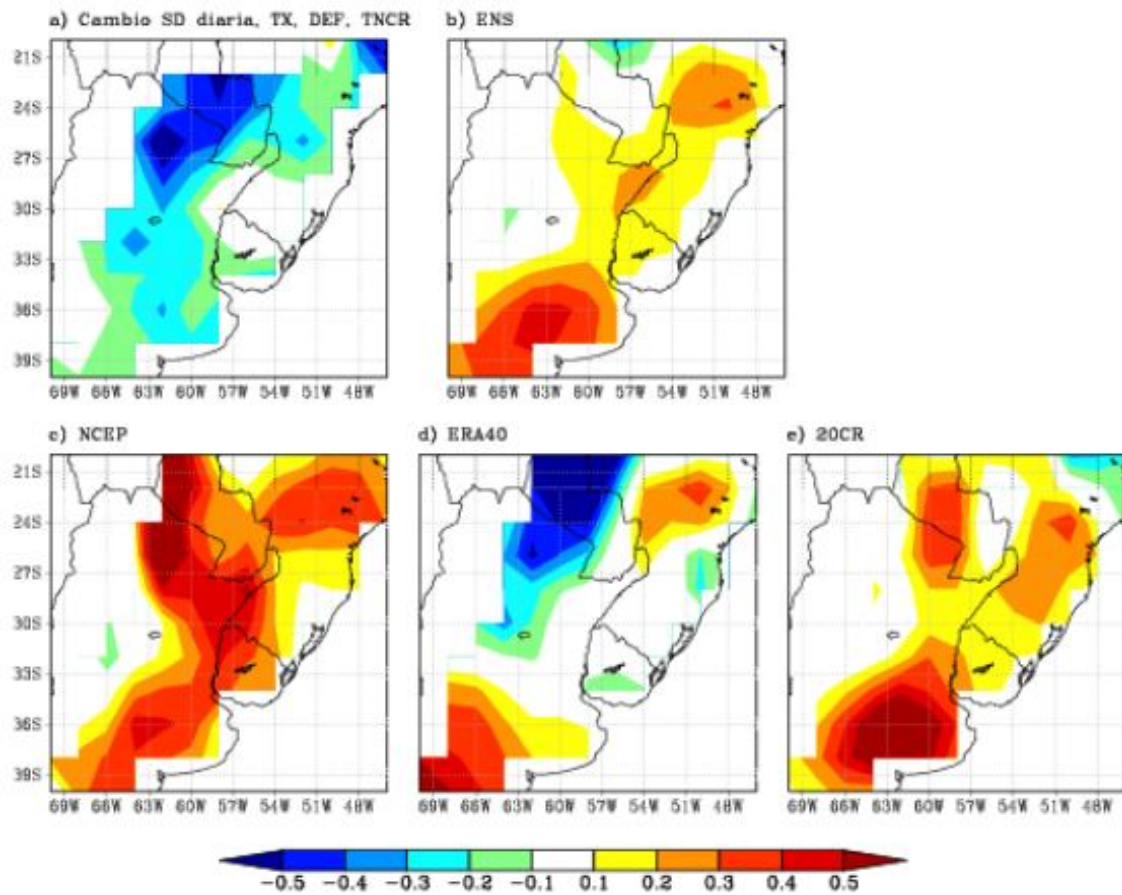


Figura 2: Cambios en la variabilidad diaria de TX (DEF), representados mediante la diferencia de la desviación estándar entre dos períodos de 20 años cada uno (1981-2000 menos 1961-1980). Panel a) TNCR, b) ensamble de reanálisis, c) NCEP, d) ERA40 y e) 20CR. La unidad es °C.

períodos 1981-2000 y 1961-1980. La variabilidad interanual de TX calculada a partir de los datos observacionales TNCR (figura 5, panel a) es máxima sobre el centro de Argentina y Uruguay y mínima en el sudeste de Brasil. El ensamble de reanálisis (panel b) captura esa diferencia entre las dos regiones (Argentina-Brasil) pero sobrestima la variabilidad. Todos los reanálisis individuales (paneles inferiores) cualitativamente representan bien la distribución geográfica de la variabilidad interanual de TX, pero difieren en la magnitud de la desviación estándar correspondiente a los máximos y mínimos. En los tres casos, la variabilidad interanual está sobrestimada (especialmente 20CR).

La variabilidad interanual de TN calculada con los datos observacionales (figura 6, panel

a) es máxima en el norte de Argentina y oeste de Paraguay. El ensamble de reanálisis (panel b) representa correctamente las principales características de este campo. Los reanálisis individuales (paneles inferiores) tienden a capturar el máximo de variabilidad del norte argentino y Paraguay pero NCEP lo sobrestima (panel c), ERA40 lo subestima (panel d) y 20CR (panel e) presenta un gradiente zonal de variabilidad demasiado marcado en el norte del dominio. Más allá de la distribución geográfica del patrón de variabilidad, es interesante notar que es más realista el ensamble de reanálisis para representar TN que TX, sugiriendo que los procesos físicos involucrados son más difíciles de ser representados en el segundo caso. Las zonas con máxima variabilidad de TX (que incluyen gran parte del centro y norte argentino

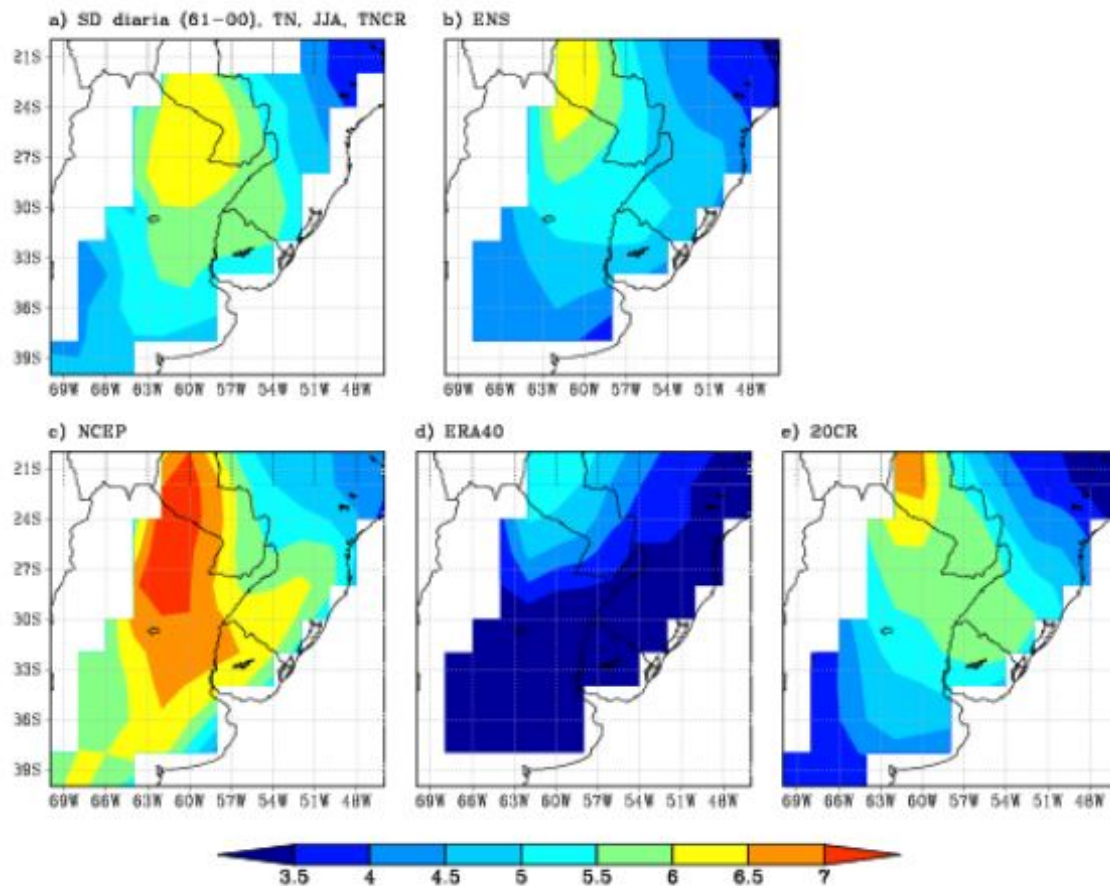


Figura 3: Como la fig. 1, pero para la TN (JJA).

y Uruguay; figura 5, paneles superiores) coincide con una zona de fuerte acople entre el suelo y la evapotranspiración (figura 5 de Sörensson y Menéndez, 2011) y de alta variabilidad interanual de la evapotranspiración (no mostrado aquí).

La figura 7 muestra los cambios en la desviación estándar interanual de TX (DEF) entre los dos subperíodos. La variabilidad decrece en parte del sur de Brasil y noreste de Argentina y aumenta al sudoeste del dominio (panel a). El ensamble de reanálisis (panel b) captura este aumento de variabilidad interanual en el sur del dominio pero sobrestima el cambio. Sin embargo, el ensamble no logra simular la disminución de variabilidad alrededor de la provincia de Misiones. Los tres reanálisis (paneles inferiores) tienden a incrementar la variabilidad interanual al sur del dominio, pero las diferencias entre los reanálisis individuales aumentan en el centro y norte del

dominio.

La figura 8 muestra los cambios en la variabilidad interanual de TN (JJA). La estimación observacional (panel a) sugiere una disminución de variabilidad en el norte y un aumento en el sudoeste del dominio. El ensamble de reanálisis (panel b) no captura este patrón, presentando cambios poco significativos en la mayor parte del dominio. Sin embargo, existen grandes diferencias entre los correspondientes patrones de los tres reanálisis (paneles inferiores), siendo NCEP el único que, sin demasiada exigencia en cuanto a los detalles de la distribución geográfica, se asemeja al patrón de cambio observado (predominio de disminución de variabilidad en el norte y de aumento en el sur).

Otro aspecto que merece ser destacado es que,

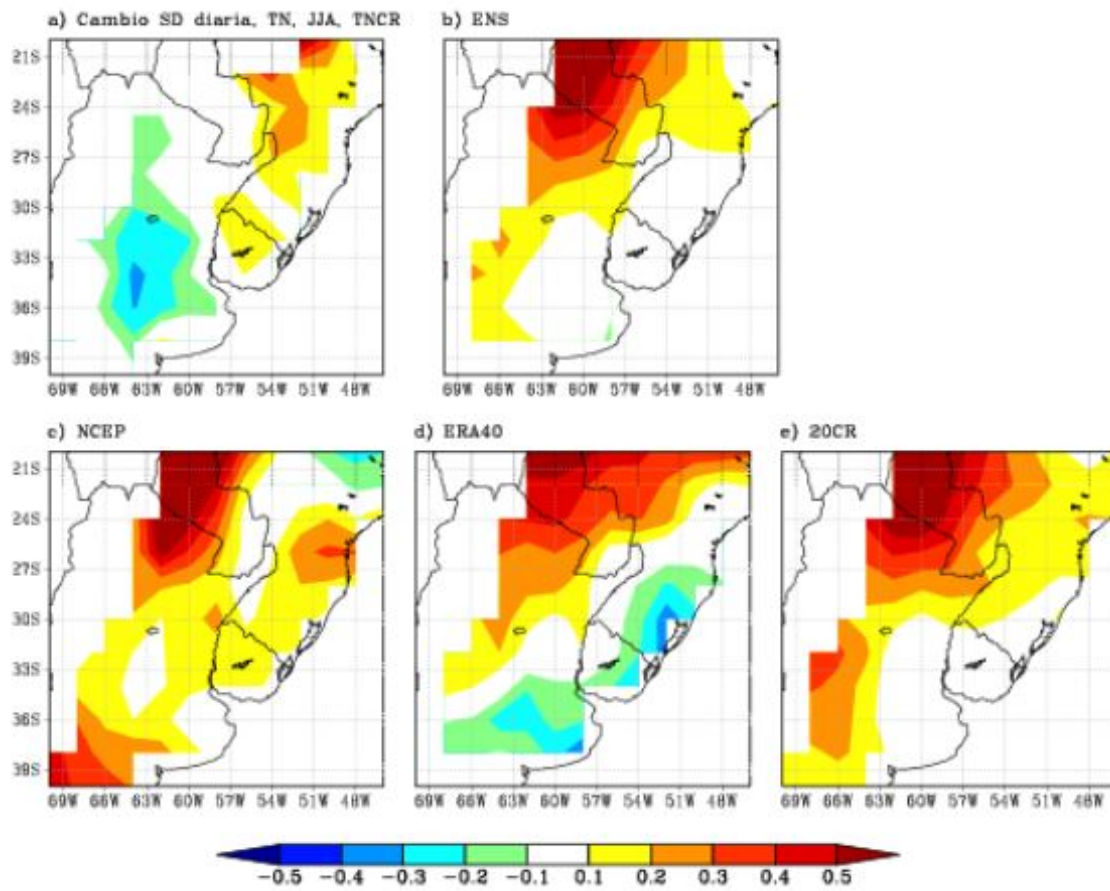


Figura 4: Como la fig. 2, pero para la TN (JJA).

en los datos observacionales, los cambios entre ambos períodos (1981-2000 menos 1961-1980) en la variabilidad interanual y en la variabilidad diaria presentan patrones geográficos muy distintos tanto para TX (DEF) (comparar paneles a de figuras 2 y 7) como para TN (JJA) (comparar paneles a de figuras 4 y 8), sugiriendo diferencias en los procesos relevantes para la variabilidad en ambas escalas temporales. Estas diferencias entre variabilidad diaria e interanual en la distribución geográfica de los cambios entre ambos períodos también es evidente para el reanálisis NCEP (paneles c de figuras 2 y 7 para TX y paneles c de figuras 4 y 8 para TN). Sin embargo, los reanálisis ERA40 (paneles d de las figuras 2-7 y 4-8) y 20CR (paneles e) tienen patrones de cambio de variabilidad diaria e interanual semejantes entre sí para TX y TN. No es claro el por qué de este comportamiento diferenciado entre los reanálisis. En particular,

esta diferencia entre los reanálisis NCEP y 20CR puede resultar anti intuitiva teniendo en cuenta que los modelos empleados en los mismos comparten varias características.

3.3. Cambios en extremos de temperatura

Los cambios en la variabilidad pueden estar asociados con cambios en la ocurrencia de eventos extremos. A continuación se documentan los cambios en la frecuencia de ocurrencia de días calurosos en DEF (definidos como aquellos días en los que TX supera el P75 de los datos diarios del período 1961-1980) y de noches frías en JJA (TN inferior al P25 de los datos diarios del período 1961-1980) para la base de datos observacional (Tencer y otros 2011) y para los tres reanálisis considerados.

La figura 9 muestra la fracción de días en

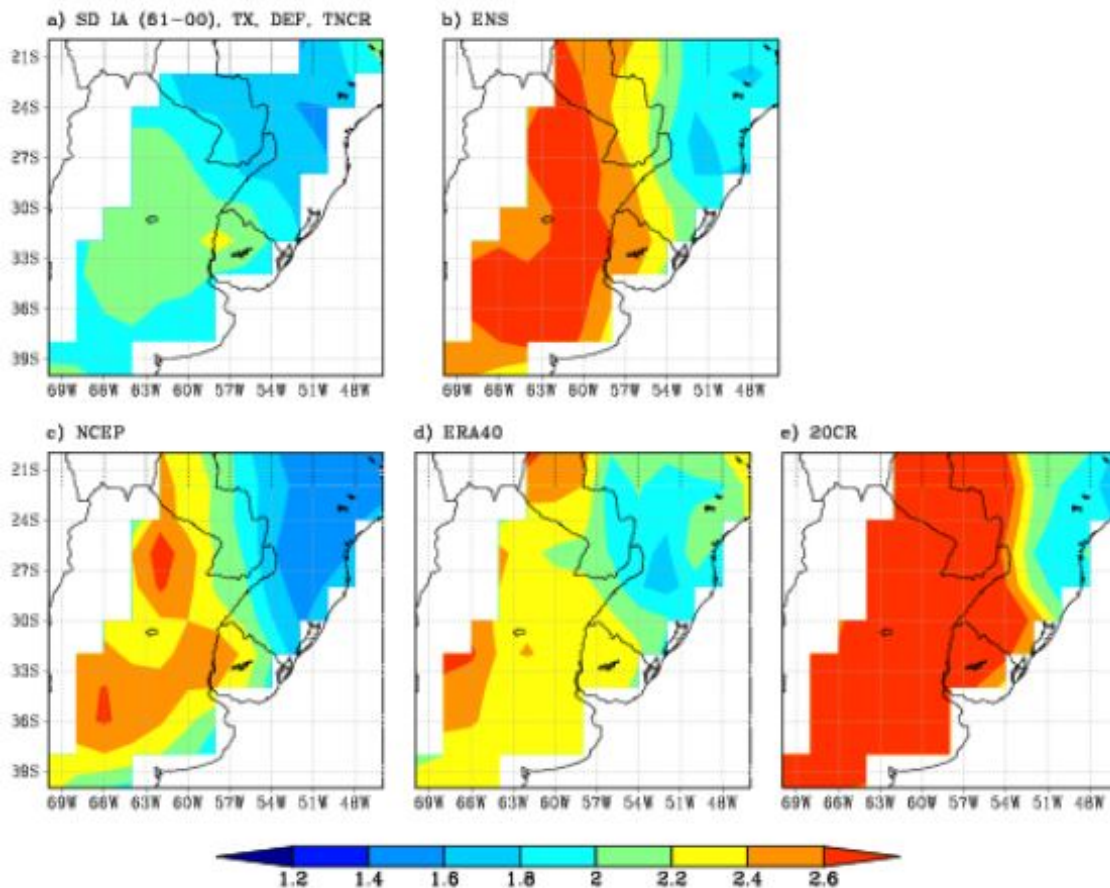


Figura 5: Variabilidad interanual de la TX (DEF) durante el período 1961-2000. Panel a) TNCR, b) ensamble de reanálisis, c) NCEP, d) ERA40 y e) 20CR. La unidad es °C.

DEF en el período 1981-2000 que exceden el P75 de TX del período 1961-1980. Los valores mayores a 25 % (colores cálidos en los mapas) indican un incremento en la frecuencia de días calurosos de verano, mientras que los valores inferiores a 25 % (colores fríos) están asociados a una disminución de su frecuencia. Los datos observacionales (panel a) predominantemente presentan una disminución de la frecuencia de días calurosos en gran parte del dominio.

El patrón geográfico de estos cambios es muy similar a los cambios en la variabilidad diaria de TX entre los dos períodos (1981-2000 menos 1961-1980, figura 2a). El máximo cambio se registra en el norte argentino alrededor de 26°S-62°O (figura 9a), área en la que es máxima la disminución de la variabilidad diaria (figura 2a). El ensamble de reanálisis (figura 9b) no

captura estos cambios en la frecuencia de días calurosos, exhibiendo una tendencia opuesta (aumento de la frecuencia de días calurosos). Los reanálisis individuales (paneles inferiores de la figura 9) tienen grandes diferencias entre sí y respecto a los datos observacionales. El único reanálisis que es capaz de reproducir la disminución de la frecuencia de días calurosos en el norte argentino es ERA40 (figura 9d).

La figura 10 muestra la fracción de días en JJA en el período 1981-2000 que no exceden el percentil 25 de TN del período 1961-1980. Los valores menores a 25 % (colores fríos en los mapas) indican una disminución en la frecuencia de noches frías en invierno, mientras que los valores que superan 25 % (colores cálidos) señalan una mayor frecuencia para el segundo período. Los datos observacionales (panel a) presentan

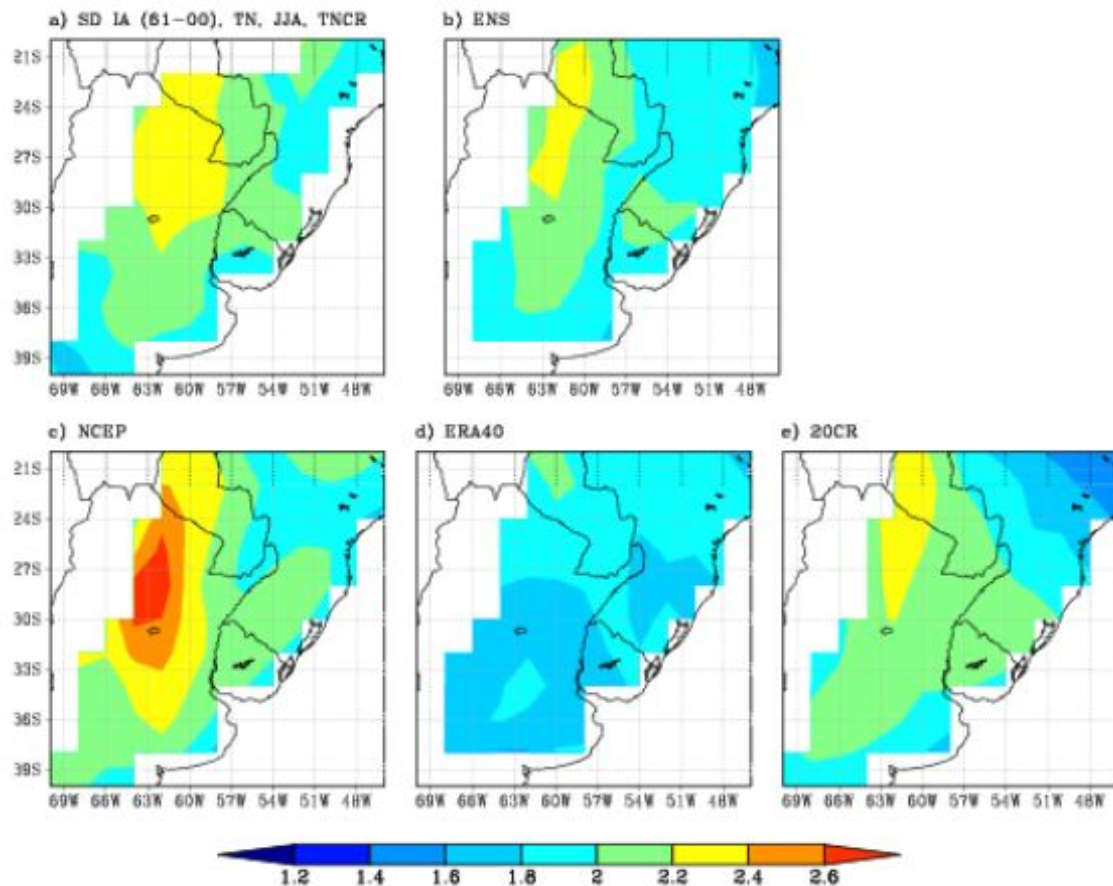


Figura 6: Como la fig. 5, pero para la TN (JJA).

mayormente una disminución en la frecuencia de noches frías, particularmente sobre parte de la Argentina y al noreste del dominio sobre Brasil. A partir de la comparación de la distribución geográfica de estos cambios con los mapas de cambios en la variabilidad en invierno, se encuentra que el menor número de noches frías sobre Argentina coincide aproximadamente con la zona de decrecimiento de la variabilidad diaria de TN (figura 4a), mientras que los cambios en el noreste del dominio coinciden en parte con una zona de menor variabilidad interanual (figura 8a). Las distribuciones geográficas de las tendencias de noches frías en JJA tanto en el ensamble de reanálisis (figura 10b) como en los diferentes reanálisis individuales (paneles inferiores de figura 10) son inconsistentes con los patrones observados. Los reanálisis predominantemente muestran aumentos en el número de noches frías siendo ERA40 (panel d) el reanálisis que exhibe

el mayor incremento en el número de noches frías.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se analizó la variabilidad de la temperatura en la región SESA en el período 1961-2000 en base a una climatología observacional (TNCR) y a datos provenientes de tres reanálisis multidecádicos. Asimismo se analizaron los cambios entre los períodos 1981-2000 y 1961-1980 en la variabilidad diaria, la variabilidad interanual y los extremos de TX (verano) y de TN (invierno). La frecuencia de días calurosos en verano y de noches frías en invierno disminuye sobre gran parte del dominio. El patrón geográfico de estos cambios es similar a los cambios en la variabilidad diaria entre las dos últimas décadas y las dos primeras.

Diferentes mecanismos relacionan la temperatura con la circulación atmosférica, los procesos

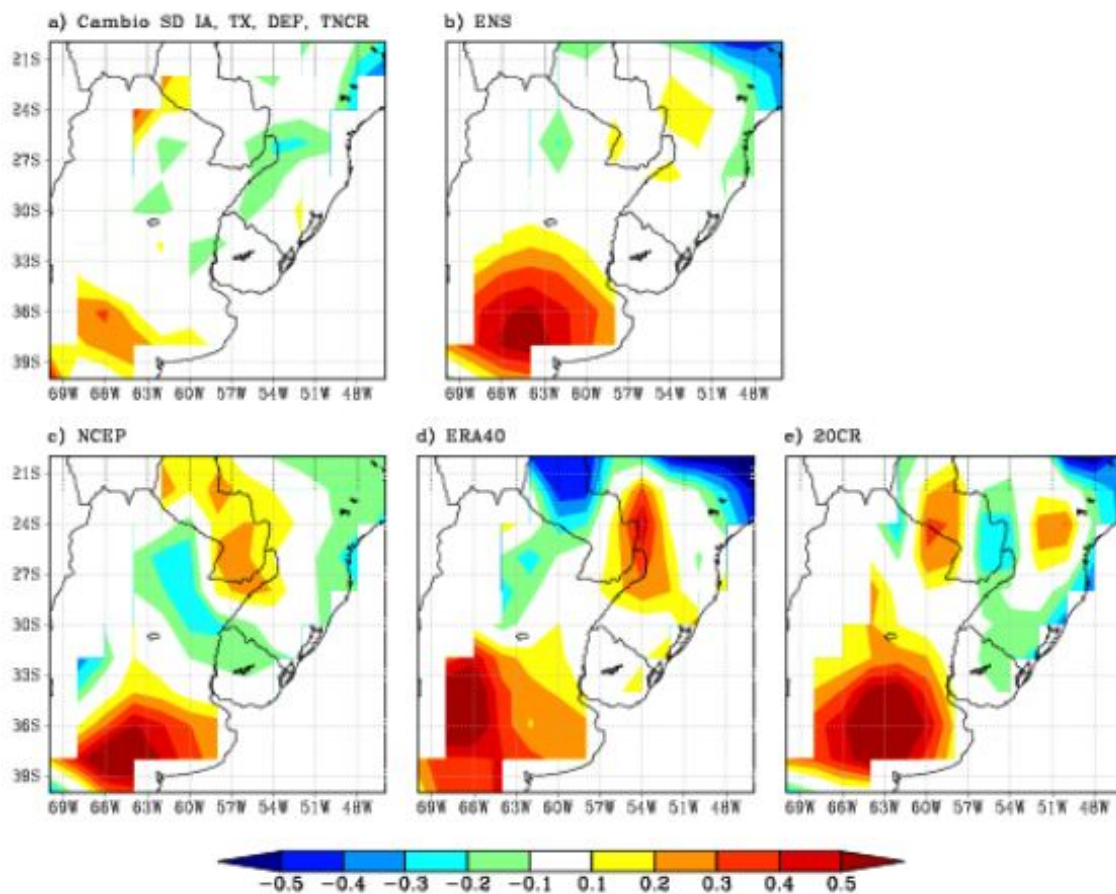


Figura 7: Cambios en la variabilidad interanual de la TX (DEF), representados mediante la diferencia de la desviación estándar entre dos períodos de 20 años cada uno (1981-2000 menos 1961-1980). Panel a) TNCR, b) ensamble de reanálisis, c) NCEP, d) ERA40 y e) 20CR. La unidad es °C.

radiativos, el balance de energía en la superficie y las características del suelo. Estas interacciones tienen una importancia relativa que depende de la región, de la época del año, y de las escalas temporales y espaciales involucradas. Un análisis detallado de los diferentes mecanismos que afectan a la temperatura y su variabilidad está más allá del propósito de este artículo. Sin embargo, como una contribución parcial hacia un mayor entendimiento de estos mecanismos en nuestra región, en base a nuestros resultados y teniendo en cuenta resultados recientes publicados por otros autores, es posible discutir aquí el rol de la interacción entre precipitación, evapotranspiración y temperatura máxima en verano. Estas conclusiones parciales por supuesto necesitan ser ratificadas por análisis más

detallados y empleando otras bases de datos.

Es necesario tener en cuenta que durante el período estudiado la región SESA tuvo cambios significativos en la precipitación media (Barros y otros 2008), además de que la evidencia observacional sugiere una posible relación entre precipitación y temperatura: los veranos calientes están asociados con condiciones de baja precipitación (Rusticucci; Penalba, 2000). Investigaciones sobre cambios en la variabilidad interanual de la temperatura estival por el cambio climático en Europa señalan que los mayores cambios se dan en zonas de transición climática (Fischer; Schär 2009). El concepto de zonas de transición está relacionado con los regímenes

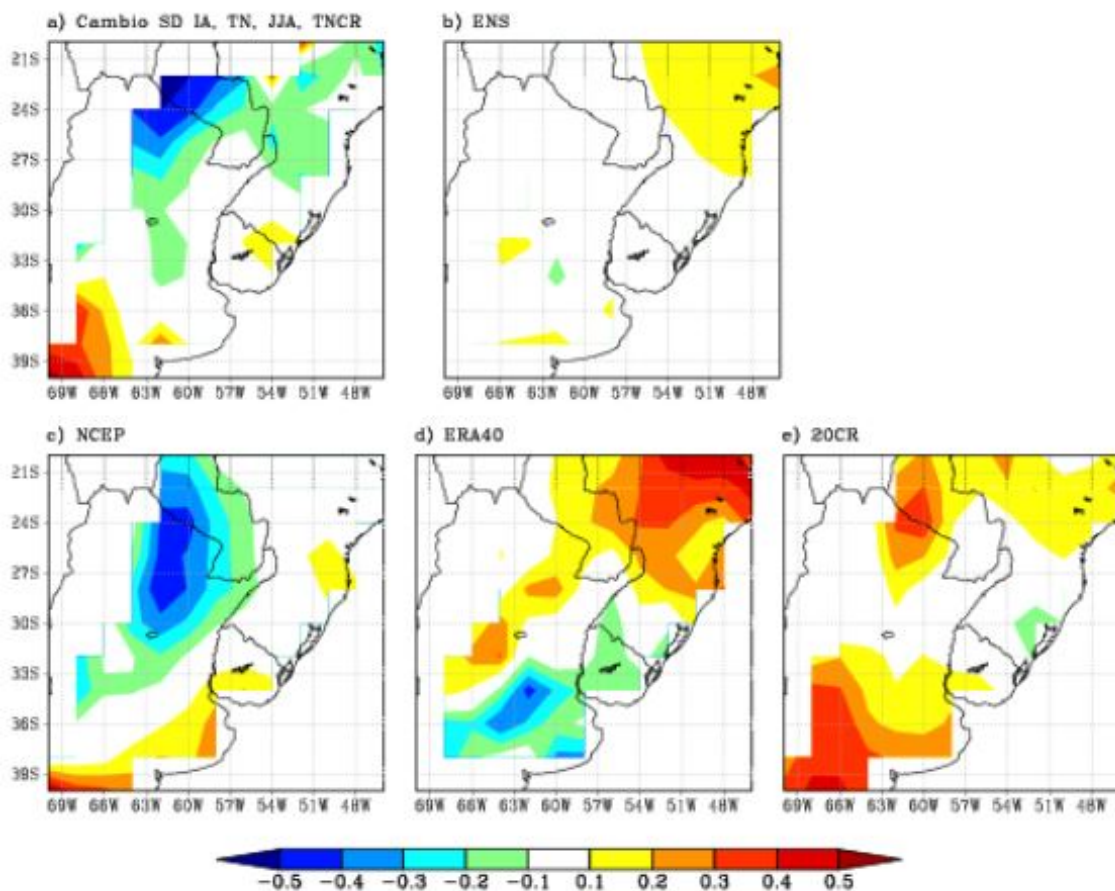


Figura 8: Como la fig. 7, pero para la TN (JJA).

de evaporación (Seneviratne y otros 2006a). En zonas húmedas la evaporación no está limitada por la humedad del suelo, mientras que en zonas áridas la evaporación está limitada por la disponibilidad de humedad en el suelo. En las zonas de transición la evaporación está limitada por la humedad del suelo en algunos veranos, pero en otros el agua en el suelo no es un limitante. A su vez, en las zonas de transición la evaporación afecta a TX a través del proceso llamado enfriamiento evaporativo .

La zona de Sudamérica que se encuentra entre la diagonal árida (región alargada que se extiende aproximadamente en dirección NO-SE desde las costas de Perú y norte de Chile hasta el este de la Patagonia) y la región húmeda del sur de Brasil, noreste de la Argentina y Uruguay es de transición entre zonas con regímenes áridos

o semiáridos y zonas húmedas con régimen hídrico (i.e. sin meses secos, Verbist y otros, 2011). Esta región se caracteriza por la fuerte variabilidad interanual de TX en verano (figura 5a). Estudios previos la señalan como la región de mayor acople entre el suelo y la atmósfera en Sudamérica para esta estación (Sörensson; Menéndez 2011). Análisis de salidas de modelos climáticos presentan una fuerte variabilidad interanual de evapotranspiración en esta zona (no mostrado aquí).

Sin embargo, y a diferencia de lo encontrado en Europa por Fischer y Schär (2009) (ver discusión más arriba), los mayores cambios en la variabilidad interanual de TX entre 1961-1980 y 1981-2000 no se encuentran sobre esta zona de transición, sino que están ubicados en los límites de la misma: aumento de variabilidad

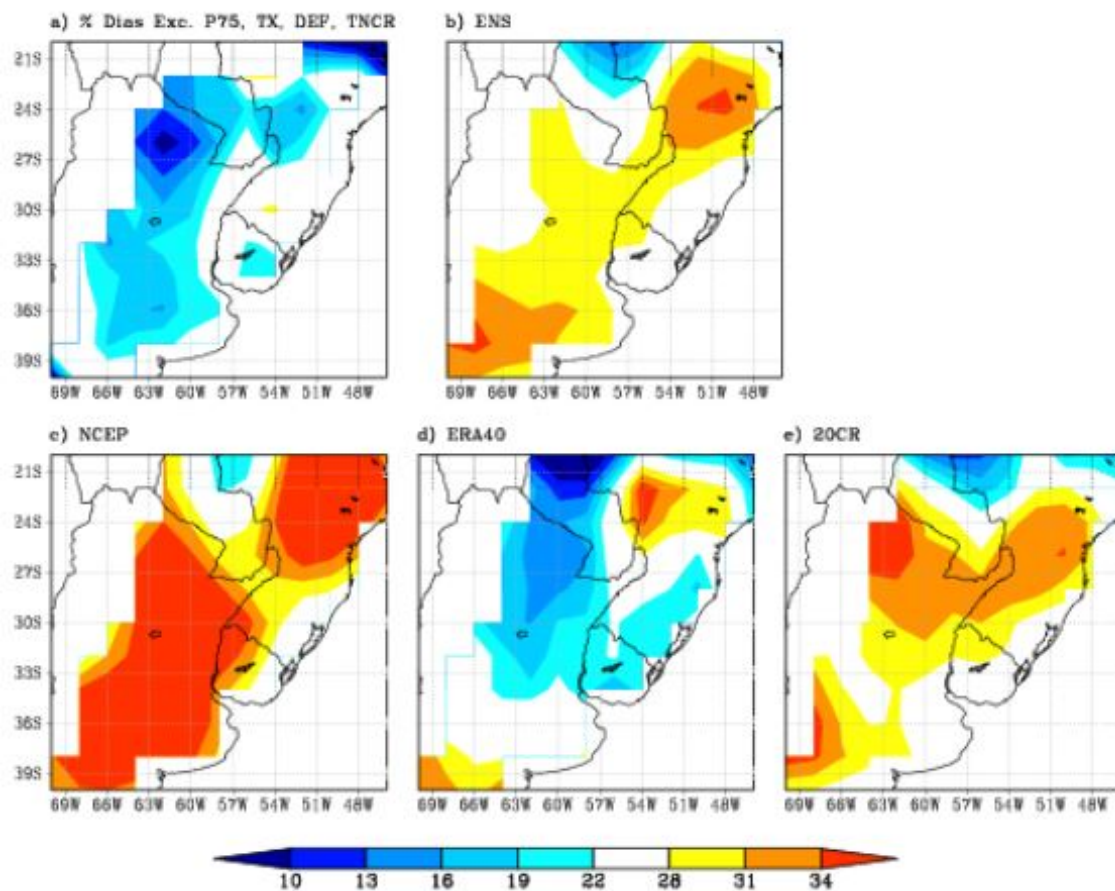


Figura 9: Fracción de días estivales en el período 1981-2000 que exceden el percentil 75 de TX del período 1961-1980. Panel a) TNCR, b) ensamble de reanálisis, c) NCEP, d) ERA40 y e) 20CR. Unidad: %.

en sur de Brasil y Misiones, disminución de variabilidad al norte de la Patagonia (sudoeste del dominio) (figura 7). Estos cambios sugieren un corrimiento hacia el sudoeste en la zona de máxima variabilidad interanual de TX en la climatología observacional aquí analizada (TNCR). La variabilidad de la temperatura puede estar relacionada con la existencia de una tendencia positiva de la precipitación en SESA (Barros y otros 2008). Si la precipitación media tiende a aumentar en zonas húmedas (e.g. Misiones y sur de Brasil), la evapotranspiración dependerá menos del contenido de humedad en el suelo (porque aumenta la disponibilidad de agua) y su variabilidad tenderá a disminuir. Por ende la variabilidad de TX tendrá un comportamiento similar.

Se debe tener en cuenta además que el efecto de una variación en la disponibilidad de agua en el suelo (producida por la variabilidad de la precipitación) sobre la evapotranspiración no es lineal y es dependiente del régimen climático (seco, de transición o húmedo) (Ruscica y otros 2014). Si una zona húmeda se torna aún más húmeda, la variabilidad interanual de la evapotranspiración disminuye dado que el agua en el suelo pierde importancia como factor limitante. En cambio, en zonas con poca disponibilidad de humedad en el suelo (e.g. el norte de la Patagonia) los cambios en la variabilidad de la precipitación tienen como respuesta fuertes cambios en la variabilidad de la evapotranspiración (ver Ruscica y otros (2014), su figura 5). Los cambios positivos de variabilidad de TX en el sur del dominio (figura 7) sugieren en

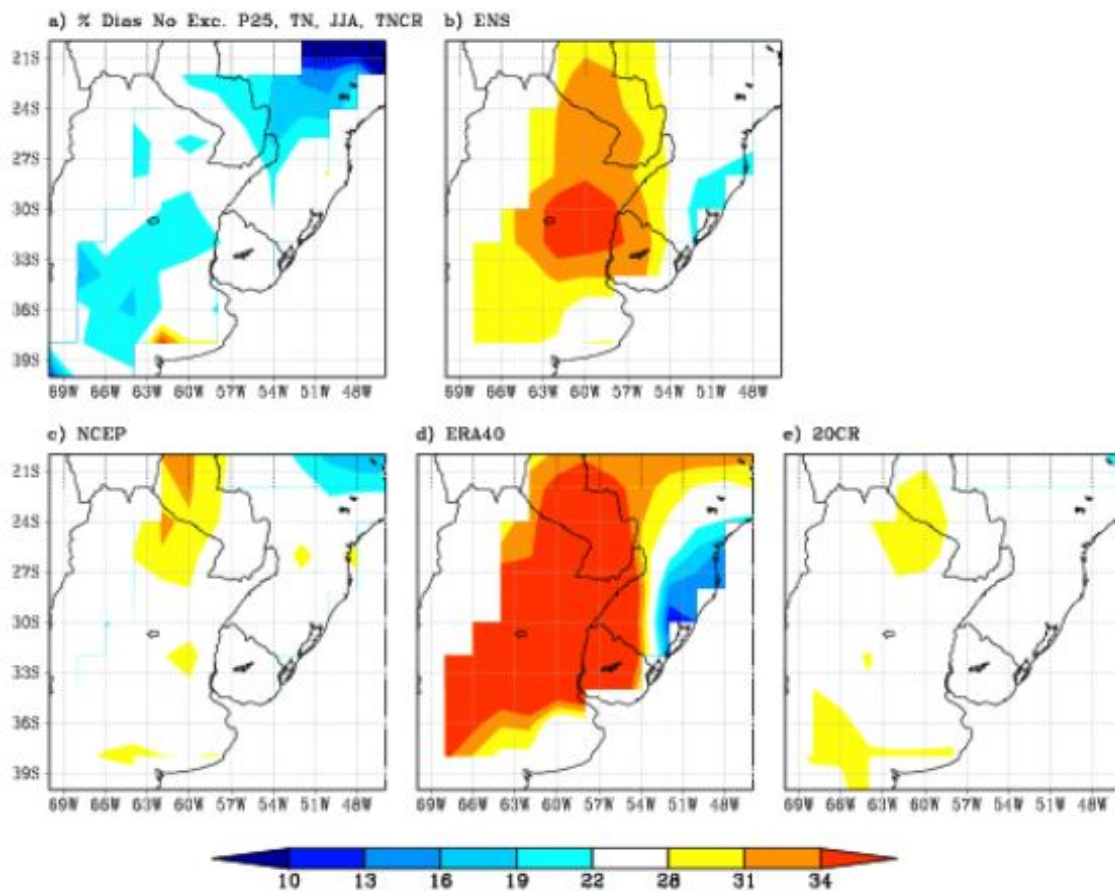


Figura 10: Como la fig. 9, pero para los días de invierno en el período 1981-2000 que no exceden el percentil 25 de TN del período 1961-1980.

consecuencia un aumento en la variabilidad de la precipitación en el período 1981-2000 respecto a 1961-1980. En resumen, las oscilaciones entre veranos secos y veranos húmedos motivarán una variabilidad de la evapotranspiración y en consecuencia de TX que es dependiente del régimen climático.

Cambios en la precipitación y en el contenido de humedad en el suelo también pueden afectar a TN dado que un aumento en la capacidad calórica del suelo (por contener más humedad) contribuye a aumentar la temperatura mínima (e.g., Nuñez y otros (2008a) encuentran correlaciones positivas entre TN y precipitación en Australia). Otro efecto que se debe tener en cuenta es el efecto radiativo sobre la temperatura (Dai y otros 1997). La nubosidad asociada con la precipitación

puede afectar el rango diario de la temperatura al reflejar la radiación solar (contribuyendo a reducir TX) y atrapar la radiación terrestre en la base de las nubes durante la noche (contribuyendo a aumentar TN). Los efectos radiativo y de la humedad del suelo a su vez se pueden combinar para ayudar a entender los cambios en la variabilidad de la temperatura: un suelo más húmedo tiene mayor capacidad calórica y, en consecuencia, es menos susceptible a la variabilidad en la radiación neta en superficie.

Los cambios en la circulación atmosférica también pueden explicar parte de los cambios en la variabilidad interanual en un contexto de cambio climático (e.g. Meehl y Tebaldi, 2004). En particular, el incremento en la precipitación en SESA durante el período

analizado está probablemente asociado con un incremento en el flujo de humedad desde el norte a través de la corriente en chorro de capas bajas de Sudamérica (Nuñez y otros 2008b). Además, la variabilidad interanual de la circulación en gran escala puede contribuir a modular variaciones en la temperatura en SESA. Esta variabilidad responde en parte a forzantes relacionados con anomalías en la temperatura de la superficie del mar (SST, de acuerdo a sus siglas en inglés). Algunas posibles influencias en escalas interanuales o mayores incluyen las siguientes. La primera mitad del período estudiado (1961-1980) estuvo dominada principalmente por la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) mientras que la segunda mitad (1981-2000) estuvo dominada por la fase opuesta (Mantua; Hare 2002). El modo de variabilidad El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) afecta las trayectorias preferenciales seguidas por los sistemas ciclónicos especialmente durante invierno (Sinclair y otros, 1997; Solman y Menéndez, 2002). La influencia del ENSO sobre la variabilidad interanual en la región SESA es menor en verano (i.e. la variabilidad interanual en SESA está menos correlacionada con ENSO en verano que en otras estaciones (Robertson y Mechoso, 2003); Cazes-Boezio y otros, 2003). Anomalías de la SST en el Océano Índico también pueden inducir anomalías de precipitación, afectando por lo tanto la temperatura en SESA (Chan y otros, 2008), Cherchi y otros (2014).

Nuestros resultados muestran que los reanálisis tienen dificultades para capturar la variabilidad diaria e interanual de la temperatura máxima (verano) y la temperatura mínima (invierno) y sus variaciones de largo plazo durante las últimas cuatro décadas del siglo 20. Los modelos numéricos empleados en los reanálisis representan los procesos atmosféricos y la interacción con la superficie de manera simplificada y no debe sorprender que existan diferencias a veces significativas entre los reanálisis teniendo en cuenta la variedad y complejidad de las interacciones que afectan a la temperatura y su variabilidad. Además,

se debe considerar como un factor adicional que podría contribuir a la dispersión entre los reanálisis, las diferentes características de la asimilación de observaciones empleadas en los mismos (como fue discutido en Zaninelli y otros 2014, parte 1). Estos resultados son coherentes con Lenderink y otros (2007) quienes sugieren que los procesos dominantes sobre la variabilidad de la temperatura son muy dependientes de los modelos. Así, en algunos modelos la variabilidad estará relacionada principalmente con la interacción suelo-atmósfera, mientras que en otros será más importante el efecto asociado a los procesos radiativos (feedbacks relacionados con la nubosidad).

Agradecimientos: Este trabajo fue parcialmente financiado con fondos de los proyectos CLARIS-LPB (7° Programa Comunidad Europea, Contrato N° 212492), PIP 112-201101-00932 (CONICET, Argentina) y PICT 2008-00237 (FONCYT, Argentina).

REFERENCIAS

- Barros, V. R., A. M. Grimm, y M. E. Doyle, 2002. Relationship between temperature and circulation in Southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 21-32.
- Barros, V. R., M. E. Doyle, y I. A. Camilloni, 2008. Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 19-33.
- Barrucand, M., y M. Rusticucci, 2001. Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. *Variabilidad temporal y regional. Meteorológica*, 26, 85-102.
- Barrucand, M., M. Rusticucci, y W. Vargas, 2008. Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 113.

- Carril, A. F., y co-autores, 2012. Performance of a multi-RCM ensemble for South Eastern South America. *Climate Dynamics*, 39, 2747-2768.
- Cazes-Boezio, G., A. W. Robertson, y C. R. Mechoso, 2003. Seasonal dependence of ENSO teleconnections over South America and relationships with precipitation in Uruguay. *Journal of Climate*, 16, 1159-1176.
- Cerne, S. B., y C. S. Vera, 2011. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. *Climate Dynamics*, 36, 2265-2277.
- Compo, G. P., y co-autores, 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 1-28.
- Chan, S. C., S. K. Behera, y T. Yamagata, 2008. Indian Ocean Dipole influence on South American rainfall. *Geophysical Research Letters*, 35, L14S12.
- Cherchi, A., A. F. Carril, C. G. Menéndez, y L. Zamboni, 2014. La Plata basin precipitation variability in spring: role of remote SST forcing as simulated by GCM experiments. *Climate Dynamics*, 42, 219-236.
- Dai, A., A. D. Del Genio y I. Y. Fung, 1997. Clouds, precipitation and temperature range [9]. *Nature*, 386, 665-666.
- de Elía, R., S. Biner y A. Frigon, 2013. Interannual variability and expected regional climate change over North America. *Climate Dynamics*, 41, 1245-1267.
- Fischer, E. M., y C. Schär, 2009. Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. *Climate Dynamics*, 33, 917-935.
- Lenderink, G., A. Van Ulden, B. Van Den Hurk, y E. Van Meijgaard, 2007. Summertime inter-annual temperature variability in an ensemble of regional model simulations: Analysis of the surface energy budget. *Climatic Change*, 81, 233-247.
- Lupo, A. R., J. J. Nocera, L. F. Bosart, E. G. Hoffman y D. J. Knight, 2001. South American cold surges: Types, composites, and case studies. *Monthly Weather Review*, 129, 1021-1041.
- Mantua, N. J y S. R. Hare, 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35-44.
- Marengo, J. A. y C. C. Camargo, 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of Climatology*, 28, 893-904.
- Meehl, G. A. y C. Tebaldi, 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994-997.
- Menéndez, C. G., M. De Castro, A. Sörensson y J. P. Boulanger, 2010. CLARIS project: Towards climate downscaling in South America. *Meteorologische Zeitschrift*, 19, 357-362.
- Naumann, G. y W. M. Vargas, 2012. A study of intraseasonal temperature variability in southeastern South America. *Journal of Climate*, 25, 5892-5903.
- Núñez, M. N., H. H. Ciapessoni, A. Rolla, E. Kalnay y M. Cai, 2008a. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 113.
- Núñez, N. M., Solman S. y Cabré M.F. 2008b. Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century *Climate Dynamics*.
- Overpeck, J. T., G. A. Meehl, S. Bony y D.F. Easterling, 2011. Climate data challenges in the 21st century. *Science*, 331, 700-702.
- Renom, M., M. Rusticucci y Barreiro M, 2011. Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, 37, 2471-2480.
- Robertson, A. W., and C. R. Mechoso, 2003. Circulation regimes and low-frequency oscillations in the South Pacific sector. *Monthly Weather Review*, 131, 1566-1576.
- Rosenblüth, B., H. Fuenzalida y P. Aceituno, 1997. Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, 67-S65.
- Rowell, D. P., 2005. A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics*, 25, 837-849.

- Ruscica, R., A. Sörensson y C. Menéndez, 2014. Hydrological links in Southeastern South America: soil moisture memory and coupling within a hot spot. *International Journal of Climatology*.
- Rusticucci, M., and O. Penalba, 2000. Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature. *Climate Research*, 16, 1-15.
- Rusticucci, M., y W. Vargas, 2002. Cold and warm events over Argentina and their relationship with the ENSO phases: Risk evaluation analysis. *International Journal of Climatology*, 22, 467-483.
- Rusticucci, M., y M. Barrucand, 2004. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *Journal of Climate*, 17, 4099-4107.
- Rusticucci, M. Renom M., 2008. Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*, 28, 1083-1095.
- Rusticucci, M. M., S. A. Venegas, y W. M. Vargas, 2003. Warm and cold events in Argentina and their relationship with South Atlantic and South Pacific Sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 108, 20-21.
- Seluchi, M. E., y J. A. Marengo, 2000. Tropical-midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and examples of intense events. *International Journal of Climatology*, 20, 1167-1190.
- Seneviratne, S. I., D. Lüthi, M. Litschi, y C. Schär, 2006a. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209.
- Seneviratne, S. I. y Coautores, 2006b. Soil moisture memory in AGCM simulations: Analysis of global land-atmosphere coupling experiment (GLACE) data. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 1090-1112.
- Seneviratne, S. I. y Coautores, 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, y P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Sinclair, M. R., J. A. Renwick, y J. W. Kidson, 1997. Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. *Monthly Weather Review*, 125, 2531-2543.
- Solman, S. A., y C. G. Menéndez, 2002. ENSO-related variability of the Southern Hemisphere winter storm track over the Eastern Pacific-Atlantic sector. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59, 2128-2140.
- Sörensson, A. A., y C. G. Menéndez, 2011. Summer soil-precipitation coupling in South America. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63, 56-68.
- Tencer, B., M. Rusticucci, P. Jones, y D. Lister, 2011. A southeastern south american daily gridded dataset of observed surface minimum and maximum temperature for 1961-2000. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 1339-1346.
- Vargas, W. M., y G. Naumann, 2008. Impacts of climatic change and low frequency variability in reference series on daily maximum and minimum temperature in southern South America. *Regional Environmental Change*, 8, 45-57.
- Verbist, K., F. Santibañez, D. Gabriels, y G. Soto, 2011. *Atlas of Arid Zones in Latin America and the Caribbean*. 26.
- Vidale, P. L., D. Lüthi, R. Wegmann, y C. Schär, 2007. European summer climate variability in a heterogeneous multi-model ensemble. *Climatic Change*, 81, 209-232.
- Vincent, L. A. y Coautores, 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *Journal of Climate*, 18, 5011-5023.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.