

Figura 5. Patrones espaciales de las 5 primeras CPs para el NCEP y los MCGs analizados para el invierno.

Para la base de datos de NCEP (primera fila en las Figuras 4 y 5) y en ambas estaciones del año, el patrón de la CP2 contribuye con una estructura dipolar. Esta estructura principal favorece la intensificación de la componente meridional de flujo del norte en el modo directo y del sur en el indirecto. La CP3 de verano muestra un patrón de anomalías con centro en el sur de Argentina y Atlántico Sur, indicando un debilitamiento o intensificación de las perturbaciones según el modo. Este patrón puede identificarse, aunque más extendido hacia latitudes bajas, en el patrón de la CP4 de invierno. La CP4 de verano muestra una franja de intensificación de la anomalía del campo de geopotencial en latitudes medias, especialmente sobre los océanos, mientras que la CP5 presenta un campo que contribuye con anomalías de signos opuestos latitudinal y longitudinalmente en escalas espaciales inferiores a las otras CP. En el invierno, el patrón de la CP 3 presenta un campo dipolar en las anomalías cuyos centros se ubican sobre los océanos alrededor de 35°S mientras que la CP5 presenta un patrón

de anomalías extendido zonalmente que favorece una intensificación (debilitamiento) de los oestes hacia el norte en el modo directo (indirecto).

Al comparar los patrones se observa que, en el verano, las estructuras espaciales correspondientes a las CPs de mayor orden en los MCGs representan en términos generales las estructuras observadas en el NCEP. En el invierno, en cambio, se presentan las mayores diferencias. La estructura espacial de la segunda CP de la altura geopotencial de 500 hPa de invierno se ve representada en forma adecuada por las respectivas estructuras de los MCGs (Figura 5). Las principales diferencias se observan a partir de la tercera CP. En particular, las CP3 y CP5 del modelo UKMO-HADCM3 y las CP4 y CP5 del modelo IPSL-CM4 no se corresponden con las estructuras espaciales del NCEP. Lo mismo ocurre con la CP5 del modelo MPI-ECHAM5. Estos resultados indicarían que estos modelos tienen más dificultades para capturar la ubicación y forma de las perturbaciones del flujo durante la época de mayor baroclinicidad. El modelo FUB-EGMAM, en cambio, presenta las estructuras de las CP4 y CP5 intercambiadas en el orden con respecto a las CP4 y CP5 del NCEP. Esto puede deberse a que los órdenes de varianza de estas CPs son muy similares, 1.9% y 1.8% para las CPs del modelo y 1.4% para ambas CPs del NCEP.

CONCLUSIONES

En este trabajo se exploró la capacidad de los modelos de circulación global (MCGs) en reproducir la circulación diaria en el sur de Sudamérica en el período 1979-1999. Los resultados muestran que las principales propiedades del análisis de componentes principales son reproducidas por los MCGs. Sin embargo, la representatividad de los mismos depende del modelo analizado y de la estación del año considerada. En general, los MCGs tienden a representar una menor presencia del campo medio de las variables dando lugar a una mayor presencia de las perturbaciones del flujo, principalmente durante el invierno. Los patrones espaciales son bien representados por los MCGs, especialmente durante el verano. Durante el invierno, en cambio, los modelos muestran una mayor dificultad para capturar la ubicación y forma de las perturbaciones del flujo.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos de la Universidad de Buenos Aires (UBACYT X170 y X605), de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (BID 1728-AR-PICT 38273) y al proyecto CLARIS LPB de la Comunidad Europea por financiar este trabajo. Las autoras agradecen a Pablo Andrés Krieger por su asistencia en los cálculos y confección de gráficos.

BIBLIOGRAFIA

- COMPAGNUCCI R.H. y VARGAS W.M., 1986. Patterns of surface pressure field during July 1972-1983 in southern South America and the Antarctic peninsula. Third Int Conference on Statistical Climatology, Vienna
- CRADDOCK, J.M. y FLOOD C.R., 1969. Eigenvectors for representing the 500 mb geopotential surface over the Northern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95: 576-593.
- DRANGE, 2006. ENSEMBLES BCCR-BCM2.0 SRESB1 run1, daily values. World Data Center for Climate. CERA-DB "ENSEMBLES_BCM2_SRB1_1_D" <http://cera->

- www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES_BCM2_SRB1_1_D
- DI LUCA, A.; CAMILLONI, I. y BARROS, V. 2006. Sea-level pressure patterns in South America and the adjacent oceans in the IPCC-AR4 models. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. 24 al 28 de abril 2006, Foz de Iguazú, Brasil. p. 235-243.
- DUFRESNE. 2007. ENSEMBLES IPSL-CM4 20C3M run1, daily values. World Data Center for Climate. CERA-DB "ENSEMBLES_IPCM4_20C3M_1_D" http://cera-ww.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES_IPCM4_20C3M_1_D
- GULIZIA, C., CAMILLONI, I. y DOYLE, M. 2009. Evaluation of the moisture transport and convergence in southern South America in the WCRP-CMIP3 multimodel dataset. MOCA-09, 19-29 de Julio, Montreal, Canada.
- HUTH, R. 1996. Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. *Meteorol Atmos Phys*, 59: 217-233.
- JOLLIFFE, I.T. 1986. Principal Component Analysis. Springer-Verlag, 271 pp.
- NIEHOERSTER. 2008. ENSEMBLES EGMAM 20C3M run1, daily values. World Data Center for Climate. CERA-DB "ENSEMBLES_FUBEMA_20C3M_1_D" http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES_FUBEMA_20C3M_1_D
- RICHMAN, M.B. 1986. Rotation of Principal Components. *Int. J. Climatol.*, 6: 293-335.
- ROECKNER, 2007. ENSEMBLES ECHAM5-MPI-OM 20C3M run1, daily values. World Data Center for Climate. CERA-DB "ENSEMBLES_MPEH5_20C3M_1_D" http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=ENSEMBLES_MPEH5_20C3M_1_D
- SILVESTRI, G. y VERA, C.S. 2008. Evaluation of the WCRP-CMIP3 model simulations in the La Plata Basin. *Meteorol. Appl.*, 15: 497–502.
- SOLMAN, S. y LE TREUT, H. 2006. Climate change in terms of modes of atmospheric variability and circulation regimes over southern South America. *Clim. Dyn.*, 26: 835–854.
- SOLMAN, S. y PESSACG, N. 2006. Analysis of low frequency variability patterns and circulation regimes over southern South America and their response to global warming as depicted by IPCC AR4 AOGCMs. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. 24 al 28 de abril 2006, Foz de Iguazú, Brasil. p. 441-449.
- VERA, C., SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B. y GONZALEZ, P. 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13707, doi:10.1029/2006GL02

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LAS PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN NOROESTE DE LA ARGENTINA

Some characteristics of precipitations in the Northwestern region of Argentina

Hurtado, Rafael, Serio, Leonardo^{*}, Faroni, Analía y Vich, Hernán

Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Facultad de Agronomía, UBA
Av. San Martín 4453 - C1417DSE - Buenos Aires, Argentina
serio@agro.uba.ar

RESUMEN

Uno de los elementos más sensibles a la variabilidad y el cambio del clima son las precipitaciones. En gran parte del centro y norte de Argentina, el aumento de las precipitaciones anuales durante las últimas cuatro décadas ha oscilado entre 10 y 40 %, mientras que al oeste de los Andes las tendencias han sido negativas.

En la región del Noroeste Argentino (NOA), el agua es el principal factor que condiciona las características y el uso de los recursos naturales, además de ser el principal agente de erosión del suelo. El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de las precipitaciones de la región del NOA, estudiando la posible existencia de cambios persistentes y calculando los periodos de retorno de eventos extremos. Para realizar el presente trabajo, se utilizaron series de precipitación diaria de 18 localidades, del periodo comprendido desde enero de 1960 hasta marzo de 2008. Se realizó un análisis de tendencia a escala mensual, anual y estacional. Además, se extrajo el máximo valor diario de cada año y se ajustó una función distribución de Gumbel para valores extremos.

No se observó homogeneidad en cuanto a las tendencias de las precipitaciones en la región. Las mayores tendencias positivas se registraron en Orán, Pozo Sarmiento y Cuatro Cedros (Salta) y Los Sosa (Tucumán). Los valores extremos de precipitación diaria para estas localidades varían entre 60 y 130 mm, para períodos de retorno de 2 años, y entre 150 y 290 mm para 100 años.

Palabras clave: precipitación, cambio climático, noroeste argentino

SUMMARY

One of the most sensitive elements to climate variability and change are the precipitations. During the last four decades, in a major part of Central and Northern Argentina there has been an increase between 10 and 40 percent in annual total rainfall. At the same time, to the west of the Andes the precipitation trends have become negatives.

In the Northwestern region of Argentina (NOA), water is the most important factor that condition the features and use of natural resources, and the principal agent of soil erosion also. The aim of this paper is to analyse the behavior of precipitations in the NOA region, looking for persistent changes and calculating return period of extreme values.

In order to do this work, there were used daily rainfall data from 18 stations, covering the period from January 1960 to March 2008. A trend analysis was applied in the

monthly, seasonal and annual scales. Moreover, the maximum daily rainfall value from each year was used to be adjusted to a Gumbel's extreme-values distribution function. No homogeneity was observed in precipitation trends in the whole region. The highest positive trends were recorded in Orán, Pozo Sarmiento and Cuatro Cedros (Salta), and Los Sosa (Tucumán). For the 2-years return period, the extreme values of daily rainfall in these locations are between 60 and 130 mm, and they climb to 150-290 mm for the 100-years return period.

Key words: precipitation, climate change, Northwestern of Argentina

INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos más sensibles a la variabilidad y el cambio del clima son las precipitaciones. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), el sur de Sudamérica es la región del planeta que muestra el mayor contraste en cuanto a las tendencias de la precipitación durante el último siglo, con tendencias negativas al oeste de los Andes y positivas al este. En gran parte del centro y norte de Argentina, el aumento de las precipitaciones anuales ha oscilado entre 10 y 40 % (Castañeda y Barros, 1994; Minetti, 2005; Berbery *et al.*, 2006).

Los cambios en la magnitud y estacionalidad de las precipitaciones pueden ser estudiados a partir de distintos indicadores: tendencia de largo plazo en series de precipitación anual o estacional, medidas de dispersión o variabilidad de dichas series y frecuencia de eventos extremos o mayores que un determinado umbral. Liebmann *et al.* (2004) estudiaron las tendencias de precipitación en Sudamérica en el período 1976-1999. Encontraron que el total de la precipitación en los meses de verano se ha incrementado, principalmente entre las latitudes 25°-50° S con un aumento del 40 %, posiblemente asociado al aumento de la temperatura superficial del océano Atlántico sur. Serio y Martin (2006) mostraron que ese incremento de las precipitaciones estivales de las últimas 3 décadas en el centro y este de Argentina estuvo acompañado por un aumento de la variabilidad. Camillioni y Doyle (2004) encontraron que, en ese mismo período, la frecuencia de episodios con precipitación mayor a 100 mm acumulados en intervalos de hasta 48 hs se ha triplicado.

En la región del Noroeste Argentino (NOA), caracterizada por la heterogeneidad de relieve, biomas y climas, la gran variación altitudinal provoca acusadas irregularidades espaciales y temporales en la distribución de las precipitaciones. Por ello, el agua es el principal factor que condiciona las características y el uso de los recursos naturales, además de ser el principal agente de erosión del suelo (Bianchi y Yáñez, 1992). Esta región no es ajena a los cambios que se están produciendo y profundizando a escala global y regional. Minetti *et al.* (2003) analizaron las tendencias de la precipitación en Argentina y Chile para el período 1931-1999. Encontraron regiones con tendencia no lineal decreciente, una en el centro de Chile y otras dos en Argentina; mientras que en el NOA encontraron algunas localidades con tendencias crecientes y otra no.

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de las precipitaciones de la región del NOA, estudiando la posible existencia de cambios persistentes y los períodos de retorno de eventos extremos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el presente trabajo, se utilizaron series de precipitación diaria de 18 estaciones y solo 1 serie con datos mensuales (Rivadavia). Las estaciones pertenecen al

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y a la Red Hidrológica Nacional (RHN), y su ubicación se presenta en la Figura 1. La información analizada correspondió al periodo 1960 hasta marzo de 2008.

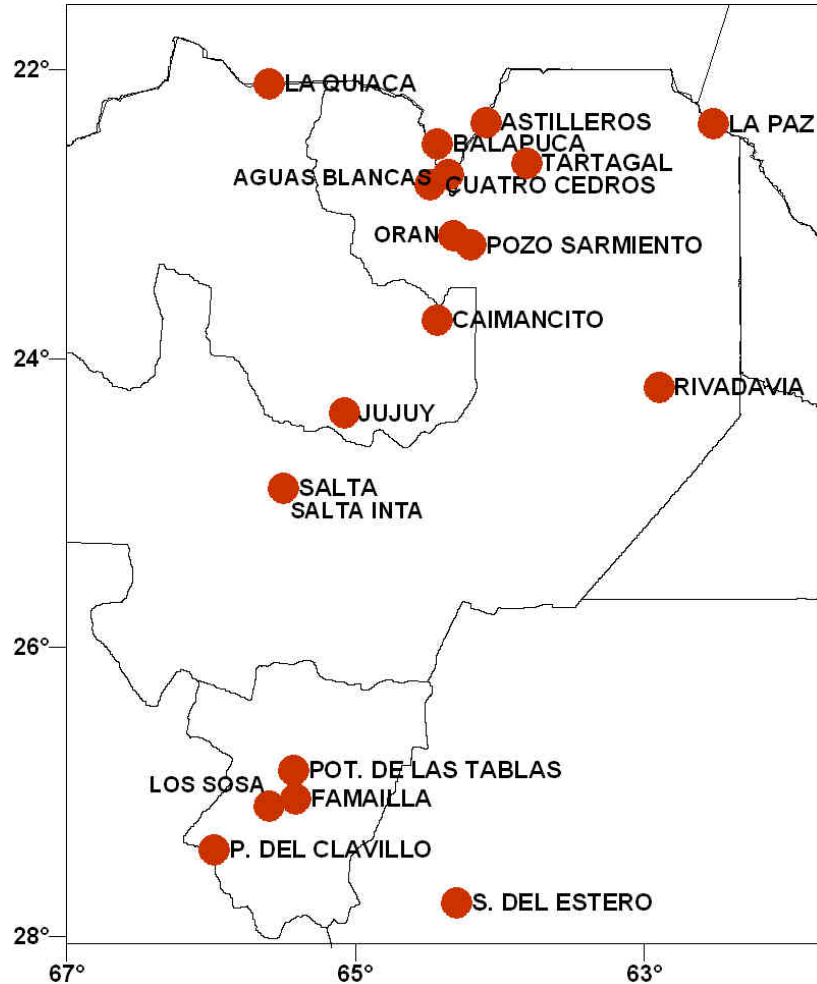


Figura 1: Ubicación de las localidades en estudio

Con las series diarias se calcularon los valores mensuales, con los cuales se efectuó un análisis de tendencia mediante el test de Mann-Kendall. Este estudio se hizo a escala mensual, anual y estacional, considerando como el verano a los meses de diciembre, enero y febrero; y los trimestres sucesivos para otoño, invierno y primavera, respectivamente.

De las series de datos diarios se extrajo el máximo valor registrado cada año en cada localidad y se les ajustó una distribución de probabilidad de máximos extremos (Gumbel, 1960) para determinar magnitudes de eventos máximos (precipitación en 24 hs) con diferentes periodos de retorno. Además, se contabilizó el número de veces en que la precipitación máxima diaria ocurrió en cada mes del periodo lluvioso de la región, esto es de octubre a abril.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de tendencia mensual, anual y estacional se observa la inexistencia de un comportamiento homogéneo para toda la región (Tabla 1). En algunos meses se observan tendencias significativas en más de una localidad, pero con signos opuestos. Esto ocurre, por ejemplo, en enero en Orán y Jujuy Aero, y también en febrero en Pozo Sarmiento y Potrero de las Tablas. En marzo hay cuatro localidades con tendencia positiva y significativa: Los Sosa, Caimancito, Rivadavia y Pozo Sarmiento.

Es notable el comportamiento en el mes de julio, donde la mayoría de las localidades presentan tendencias negativas, aunque sólo Tartagal, La Paz, Orán y Rivadavia con significancia estadística. Para los valores anuales las localidades con mayores tendencias significativas son Orán, Los Sosa y Cuatro Cedros (significancia del 95%) y Pozo Sarmiento (99%). Todas ellas tienen una precipitación media anual mayor a 950 mm.

En cuanto a los períodos de retorno, obtenidos a través de la función de Gumbel, dejaremos al margen del análisis a la estación La Quiaca, pues su régimen de precipitación difiere notablemente de las demás localidades, ya que se trata de una localidad donde la media anual es de sólo 328 mm. En las demás localidades, la precipitación diaria con períodos de retorno de 2 años varía desde 60 mm (Salta INTA) a 129 mm (Los Sosa, Tucumán). Al considerar mayores períodos de retorno, 1 vez cada 100 años se pueden producir eventos diarios de entre 156 mm (Salta Aero) y 287 mm (Balapuca, Salta) (Tabla 2).

En 13 de las 18 localidades analizadas la máxima precipitación diaria se registra con mayor frecuencia en enero (Tabla 3). Las excepciones son: Salta INTA y Pozo Sarmiento (en diciembre), Orán y La Paz (en febrero) y Potrero del Clavillo (en Marzo).

CONCLUSIONES

No se observa una homogeneidad en cuanto a las tendencias de las precipitaciones en esta región. Sólo el mes de Julio presenta una tendencia en disminución generalizada, pero no para todas las localidades es estadísticamente significativa. En cuanto a las precipitaciones anuales, los mayores incrementos fueron observados en algunas localidades del norte de Salta (Orán, Pozo Sarmiento y Cuatro Cedros) y en una localidad de Tucumán (Los Sosa).

Para el período de retorno de dos años, los valores extremos de precipitación diaria en las localidades analizadas varían entre 60 mm (Salta INTA) y 129 mm (Los Sosa, Tucumán). La precipitación correspondiente al período de retorno de 100 años oscila entre 156 mm (Salta Aero) y 287 mm (Balapuca, Salta).

Los máximos de precipitación diaria se producen con mayor frecuencia en el mes de enero, seguido por marzo, diciembre y febrero.

Tabla 1. Tendencias lineales (mm/100 años) de las series de precipitación. En gris, significativo al 90%, * al 95%, ** al 99%.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Famailla	219	-173	-33	120	57	29	-7	-32	3	43	105	61	489	48	2	47	96
P del Cavillo	143	-144	44	50	19	13	-5	20	-7	47	-37	*149	296	47	10	1	60
Pot de las Tablas	61	*-336	-76	-43	37	0	-18	-13	20	3	-126	-88	-606	-26	-8	-36	-146
Los Sosa	283	-4	*268	144	*111	**79	-3	-13	35	18	-18	194	*1171	**185	27	11	-146
S del Estero	18	-32	40	0	0	6	-5	-9	-2	*71	12	67	202	13	-3	27	33
Jujuy	*-196	-6	-56	6	2	0	0	-12	1	22	10	*174	-51	-17	-4	10	12
Caimancito	-81	-103	*177	-25	33	-16	-5	-5	19	86	14	78	378	57	-8	32	-32
Rivadavia	54	4	168	-43	20	-9	** -16	**15	20	47	42	9	201	54	-3	36	-12
Salta	67	-80	-32	-19	-5	*-6	-1	-1	5	-8	11	31	-33	-19	-3	3	27
Salta INTA	32	-118	101	-11	3	-5	4	0	7	50	-70	122	317	14	0	-2	34
Pozo Sarmiento	135	*195	*222	*115	40	3	-4	19	34	32	85	92	**981	**136	7	50	*134
Oran	*128	112	173	-21	-21	-2	*-10	3	38	14	42	62	*541	43	-4	36	106
Tartagal	50	27	144	-100	-22	-9	-10	2	11	-17	-37	147	190	7	-6	-14	90
Astilleros	-145	37	-15	101	39	-24	-17	-21	8	-18	31	53	44	65	-17	-4	-102
La Paz	16	-10	61	31	-17	-13	-15	-12	-7	24	51	-2	70	32	-13	22	11
Agua Blancas	2	36	68	135	33	2	-15	-3	22	47	28	77	461	42	-4	33	77
Cuatro Cedros	206	-46	203	*228	25	14	2	7	14	71	84	63	*823	*170	10	56	88
Balapuca	-115	-172	12	67	*98	-10	-3	-14	38	110	112	-42	-249	59	-8	87	-110

Tabla 2: Periodo de retorno de valores diarios de acuerdo a la distribución de probabilidad de máximos extremos de Gumbel.

T (años)	2	5	10	25	50	100
Famailla Inta	103	138	162	192	214	236
Pot. del Clavillo	77	119	146	181	207	233
Pot. de las Tablas	110	151	178	212	238	263
Los Sosa	129	168	194	227	251	276
Sgo del Estero	68	93	110	131	147	162
La Quiaca	26	36	42	50	56	62
Jujuy aero	69	95	112	134	150	167
Caimancito	95	123	141	164	182	199
Salta	69	92	108	127	142	156
Salta Inta	60	90	110	135	153	172
Pozo Sarmiento	92	123	143	169	188	207
Oran	99	130	150	176	196	215
Tartagal	100	134	156	184	206	226
Astilleros	114	146	167	194	214	234
La Paz	90	128	153	185	209	232
Agua Blancas	106	144	168	200	223	246
Cuatro Cedros	114	151	176	206	229	252
Balapuca	120	164	194	231	259	287

Tabla 3: Frecuencia absoluta de valores máximos de precipitación diaria en los meses de mayor precipitación.

	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>Marzo</i>	<i>Abril</i>	<i>Octubre</i>	<i>Noviembre</i>	<i>Diciembre</i>
Famailla Inta	14	7	5	2	3	2	6
Pot. del Clavillo	13	9	14	3	3	4	6
Pot. de las Tablas	20	10	5	1	3	4	4
Los Sosa	22	8	7	1	2	5	7
Sgo del Estero	18	14	5	0	1	2	9
La Quiaca	14	11	9	0	3	3	7
Jujuy aero	18	12	3	1	0	2	5
Caimancito	20	12	5	2	1	3	8
Salta	21	9	2	0	0	2	14
Salta Inta	12	5	4	0	0	2	17
Pozo Sarmiento	11	11	12	0	6	2	14
Oran	11	13	10	3	2	0	9

Tartagal	15	11	7	1	0	3	10
Astilleros	9	6	8	1	2	2	6
La Paz	9	7	11	2	3	5	5
Agua Blancas	16	12	11	4	1	5	8
Cuatro Cedros	14	7	9	2	0	4	7
Balapuca	9	8	9	1	0	3	5

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto UBACyT G078. Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional y al Sistema Nacional de Información Hídrica por la información brindada para realizar el trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- BERBERY, E.H., DOYLE, M. y BARROS, V. 2006. Tendencias regionales de la precipitación. *En: El Cambio Climático en la Cuenca del Plata*. V. Barros, R. Clarke y P. Silva Dias (eds.). CONICET, Bs.As. pp 67-79.
- BIANCHI, A.R. y YÁÑEZ, C.E. 1992. Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. 2^{da} edición. INTA, EEA Salta. 384 p.
- CAMILLIONI, I. y DOYLE, M. 2004. Southern South America climate trends. 2nd AIACC Regional Workshop for Latin America and the Caribbean. <http://www.aiaccproject.org/meetings/BuenosAires.html>
- CASTAÑEDA, M.E. y BARROS, V. 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorologica* 19: 23-32.
- GUMBEL, E.J., 1960. Multivariate extremal distributions. *Bulletin Int. Statist. Inst.* 39 (2), pp. 471-475.
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (Eds). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- LIEBMANN, B., VERA, C. CARVALHO, L. CAMILLONI, I. BARROS, V. HOERLING, M. y ALLURED, D. 2004. An observed trend in Central South American precipitation. *J. Climate* 17, 4357-4367.
- MINETTI, J.L., 2005. El Clima del Noroeste Argentino. Ed. Magna, S.M. de Tucumán. 350 p.
- MINETTI, J., VARGAS, W., POBLETE, A. ACUÑA, L. y CASAGRANDE G., 2003. Non linear trends and Non linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera* 16: 119-135.
- SERIO, L. y MARTIN, P. 2006. Cambios en los valores centrales y extremos de las distribuciones mensuales de precipitación en el centro-este de Argentina. Actas XI Reunión Arg. Agromet., La Plata, Bs.As. pp 279-280.

TENDENCIAS DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS EN EL NOROESTE ARGENTINO

Trends of maximum and minimum temperatures in Northwestern Argentina

Rafael Hurtado, María Elena Fernández Long, y Leonardo Serio *

Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Facultad de Agronomía, UBA
Av. San Martín 4453 - C1417DSE - Buenos Aires, Argentina
serio@agro.uba.ar

RESUMEN

En el planeta se han observado cambios en los valores de temperatura media y extremas a lo largo del último siglo. En Argentina, según estudios previos, la temperatura media anual aumentó en casi todo el país aunque no de manera homogénea.

El objetivo del presente trabajo es determinar si existen tendencias en la temperatura del aire estadísticamente significativas en la región del noroeste argentino (NOA). Para ello se analizaron registros históricos de las variables temperatura máxima media mensual y temperatura mínima media mensual. Se trabajó con datos diarios de temperatura máxima y mínima de 8 localidades de las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán y Santiago del Estero, del periodo 1960-2007. El estudio se hizo a escala mensual, estacional y anual. Se calculó la tendencia lineal de cada serie y se determinó la significancia estadística mediante el test de Student. Se observó un aumento generalizado de la temperatura mínima media anual, que osciló entre 2 y 3,6 °C/100 años. Las mayores tendencias corresponden a los meses de octubre y marzo. Las temperaturas máximas medias no muestran un comportamiento tan homogéneo como las mínimas. En el mes de octubre se encontraron los mayores aumentos, y en mayo los mayores decrecimientos. Los incrementos térmicos del mes de octubre en toda la región implican un adelanto en el inicio del período cálido estival y un aumento en la longitud de los bioperíodos, esto conlleva a diagramar la producción de acuerdo a los requerimientos térmicos de cada cultivo.

Palabras clave: temperatura, cambio climático, noroeste argentino

SUMMARY

In the planet have observed changes in mean and extreme temperatures values during the last century. In Argentina, according to previous studies, the mean annual temperature has increased in almost all the country, but not homogeneously. The aim of this study is to determine whether thermal trends exist, and its statistical significance, in the Northwestern region of Argentina (NOA). We analyze historical records of monthly mean maximum and monthly mean minimum temperatures. Daily maximum and minimum temperature data were used. They were from 8 locations in Salta, Jujuy, Tucumán and Santiago del Estero provinces, and cover the 1960-2007 period. The study was made in the monthly, seasonal and annual scales. Linear trend was calculated for each series and its statistical significance was determined using the Student test. There was a general increase in the annual mean minimum temperature that varied between 2 and 3.6 °C/100 years. The highest positive trends were observed in October and March, and the negative one in May. The thermal increments in the whole region during

October involve an earliest onset of warm summer period and an increase in the length of the bioperiod. This leads to plan the production according to the thermal requirements of each crop.

Key words: temperature, climate change, Northwestern of Argentina

INTRODUCCIÓN

Los cambios observados a través del tiempo en los elementos meteorológicos pueden deberse a la variabilidad climática natural, que se percibe como apartamientos respecto a las condiciones climáticas medias o en la frecuencia de valores extremos. Asimismo, algunos cambios pueden manifestarse como incrementos o decrecimientos de las variables climáticas medias originados, en mayor o menor medida, en la alteración de la composición de la atmósfera debido a la actividad humana y en la variabilidad natural del clima (IPCC, 2007).

En el sur de Sudamérica se han observado cambios en los valores de temperatura media y extremas a lo largo del último siglo (Giorgi, 2002, Vincent *et.al*, 2005). En Argentina, la temperatura media anual aumentó en casi todo el país aunque no de manera homogénea (Pascale y Damario, 1994; Hoffmann *et al.*, 1997). Con respecto a las temperaturas extremas, Rusticucci y Barrucand (2004) señalaron que las máximas aumentaron en invierno y disminuyeron en verano, mientras que las mínimas aumentaron en ambas estaciones. Otros cambios observados en distintos elementos del clima en la Argentina fueron sintetizados por Serio (2006). Fernández Long, *et al* (2008) encontraron en la región Pampeana fuertes aumentos en las mínimas y disminución en las máximas, en coincidencia con lo reportado por Nuñez *et al.* (2008), a pesar de que estos últimos utilizaron otro período de tiempo y una región más amplia. Estos cambios han generado un leve aumento en la temperatura media; la cual muestra un comportamiento diferencial a lo largo de los meses, con aumentos en los meses de agosto a noviembre y disminución en enero y febrero (Fernández Long, *et al.* 2008).

El Noroeste argentino (NOA) no escapa de esta tendencia mundial y continental, ya que se han hecho proyecciones para el presente siglo que indican un aumento de las temperaturas y la evaporación y pocos cambios en las precipitaciones, volviéndose más vulnerable al estrés hídrico toda la región (República Argentina, 2007).

El objetivo del presente trabajo es determinar si existen tendencias en la temperatura del aire estadísticamente significativas en algunas localidades del noroeste argentino. Para ello se analizarán las variables temperatura máxima media mensual y temperatura mínima media mensual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con datos diarios de temperatura máxima y mínima de 8 localidades de las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán y Santiago del Estero (Tabla 1) del periodo 1960-2007.

Se analizó el comportamiento de cada una de las series a lo largo de los años calculando su tendencia lineal. Este estudio se hizo a escala mensual, estacional y anual. Para el caso estacional se consideró como el verano al trimestre diciembre-enero-febrero, y los sucesivos trimestres para otoño, invierno y primavera, respectivamente. Además se determinó la significancia estadística (α) de las tendencias, para los niveles de confianza del 90, 95 y 99%, mediante la distribución "t" de Student.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Referencias: SMN: Servicio Meteorológico Nacional; INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Provincia	Localidad	Fuente	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Jujuy	La Quiaca obs.	SMN	-22,10	-65,60	3459
Jujuy	Jujuy Aero	SMN	-24,38	-65,08	905
Salta	Oran Aero	SMN	-23,15	-64,32	357
Salta	Salta Aero	SMN	-24,90	-65,50	1221
Salta	Cerrillos	INTA	-24.90	-65.48	1250
Salta	Tartagal	SMN	-22,65	-63,82	450
Tucumán	Famailla	INTA	-27,05	-65,42	363
S. del Estero	Santiago del Estero	SMN	-27.77	-64.30	199

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura mínima media mensual:

Los meses que registraron mayor aumento en la temperatura mínima fueron octubre, marzo y enero (Tabla 2a).

Se observa que en todas las localidades, en los meses de octubre y marzo las pendientes positivas tienen significancia estadística para niveles entre el 90 y 99%. Lo mismo ocurre cuando se analizan los valores anuales (Tabla 2b), cuyas tendencias oscilan entre 2 y 3,6 °C/100 años.

En octubre, la localidad de Cerrillos (Salta INTA) fue donde se encontró un mayor aumento (5,5 °C/100 años), seguida por Famaillá y Jujuy Aero (5,2 y 4,6 °C/100 años, respectivamente). Se detectaron tendencias positivas significativas en 8 meses del año en las localidades de Tartagal y La Quiaca, y en 7 meses en Orán. En esas tres localidades las tendencias resultaron significativas en cada una de las estaciones del año. El incremento se manifestó en el mayor número de localidades en el verano, y el menor cambio se dio en otoño. Valores negativos de pendiente se registraron en el mes de mayo solamente, y significativa para Santiago del Estero.

Temperatura máxima media mensual:

Al igual que con las mínimas, el mes de octubre (Tabla 3a) presenta una tendencia en aumento en casi toda la región, a excepción de Orán y Tartagal, que si bien son positivas no llegan a ser significativas.

En contraposición, en mayo la mayoría de las localidades analizadas tienen tendencias negativas, siendo la más importante la de Tartagal (-6,7 °C/100 años). En La Quiaca se observa un aumento de la temperatura máxima media desde abril a diciembre (con la excepción de septiembre), presentando los máximos valores de las pendientes en diciembre y abril (4,1 y 3,5 °C/100 años). Los valores anuales (Tabla 3b) no muestran aumento o decrecimiento con significancia a excepción de La Quiaca, donde se encontró una tendencia positiva de 2,1 °C/100 años. Estacionalmente, lo más notorio ocurrió también en La Quiaca, donde se registraron aumentos significativos de las máximas en otoño, invierno y primavera. También es destacable que en otoño todas las demás localidades reportaron descensos de las máximas, que resultaron significativos en Tartagal y Orán (-3,8 y -1,7 °C/100 años). En verano, sólo se encontró un aumento de 4,7 °C/100 años en Famaillá.

Tabla 2a. Valores de la pendiente de la tendencia lineal (°C/100 años) de la temperatura mínima media mensual en 8 localidades del NOA. Valores significativos al 99 (***), 95(**) y 90(*) %.

Localidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Salta	2.2***	0.1	3.9***	1.5	-0.9	2.0	0.8	2.2	-0.7	2.5**	0.6	1.3
La Quiaca	1.7**	1.3	2.5***	3.3***	2.2**	1.8	3.1**	4.4***	1.8	4.4***	1.6	2.3***
S del Estero	1.3	-0.2	2.7***	0.0	-4.3*	1.9	-2.9	1.6	0.1	3.4***	0.5	1.7
Oran	2.1***	0.7	3.3***	2.6**	0.2	3.6*	2.2	3.7*	1.6	3.9***	1.2	2.2***
Famailla	1.8*	1.2	2.1*	1.5	1.0	7.0***	1.7	5.6***	-0.1	5.2***	3.1**	2.6**
Jujuy Aero	2.2**	0.7	3.2***	2.8	-1.4	4.1**	-0.5	2.6	0.4	4.6***	0.9	0.9
Salta INTA	1.9*	0.2	5.1***	1.2	3.3	-1.0	1.2	7.9***	0.9	5.5***	1.6	1.8
Tartagal	2.7***	0.7	3.4***	3.5***	-1.2	5.1**	4.6**	4.6**	1.1	4.3***	1.6	2.5***

Tabla 2b. Valores de la pendiente de la tendencia lineal (°C/100 años) de la temperatura mínima media mensual en 8 localidades del NOA. para la temperatura mínima anual y estacional.

Localidades	Anual	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
Salta	2.6***	1.5	1.6	0.8	1.3**
La Quiaca	3.6***	2.7***	3.1***	2.3***	1.6***
S del Estero	2.0*	-0.5	0.2	1.4	1.0
Oran	3.3***	2.1**	3.4**	2.2**	1.6***
Famailla	2.3***	0.1	4.8***	2.6**	4.2***
Jujuy Aero	2.1***	2.1*	2.1	1.3	1.2*
Salta INTA	3.3***	1.8	2.4	1.6	1.7
Tartagal	3.1	6.9	5.4	7.3	5.2

Tabla 3a. Valores de la pendiente de la tendencia lineal (°C/100 años) de la temperatura máxima media mensual en 8 localidades del NOA. Valores significativos al 99 (***) , 95(**) y 90(*) %.

Localidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Salta	0.2	0.6	1.5	-0.4	-4.4**	2.7	0.5	-0.4	1.5	3.6***	-0.4	0.9
La Quiaca	0.5	1.4	1.7	3.5***	1.5*	2.1**	1.7*	2.6**	1.5	2.2**	2.2*	4.1***
S del Estero	0.1	-0.6	0.7	-2.5	-3.1**	0.2	1.3	1.2	1.6	3.4***	-0.9	-1.1
Oran	-0.1	-0.9	0.4	-1.5	-4.3**	0.1	-0.5	-1.6	0.2	0.8	-1.9	-1.6
Famailla	2.0	1.6	2.3	-0.6	-3.0	0.4	-0.4	2.6	1.5	3.5*	-0.2	-1.2
Jujuy Aero	-0.2	1.1	1.4	0.4	-6.2**	4.0*	-1.7	1.3	1.0	2.6*	-0.2	-2.0
Salta INTA	-1.7	0.0	1.4	-1.1	-4.6	-3.6	-3.5	5.3***	1.9	3.3*	-0.8	2.3
Tartagal	-0.4	-1.1	-1.7	-3.8**	-6.7**	2.1	-2.4	-1.6	-0.9	0.5	-2.4	-2.0

Tabla 3b. Valores de la pendiente de la tendencia lineal (°C/100 años) de la temperatura máxima media mensual en 8 localidades del NOA. para la temperatura máxima anual y estacional.

Localidades	Anual	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
Salta	0.4	-1.0	1.3	1.5*	0.5
La Quiaca	2.1***	2.3***	2.1***	1.7**	1.5
S del Estero	1.3	-1.6	0.9	1.3	-0.2
Oran	0.1	-1.7*	-0.4	-0.4	-1.0
Famailla	0.2	-3.1	0.9	1.5	4.7*
Jujuy Aero	0.4	-0.9	1.2	0.6	-0.4
Salta INTA	-0.9	-1.9	2.2	-0.6	1.1
Tartagal	-0.9	-3.8**	2.2	-0.7	-1.4

CONCLUSIONES

Hay un aumento generalizado de la temperatura mínima media anual, que oscila entre 2 y 3,6 °C/100 años. Las mayores tendencias corresponden a los meses de octubre y marzo. Las temperaturas máximas medias no muestran un comportamiento tan homogéneo como las mínimas. El mes de octubre tiene tendencia en aumento mientras que en mayo es en decrecimiento.

Dado que durante el mes de octubre las temperaturas mínimas y máximas registraron un aumento generalizado en la región, se puede inferir que durante este mes se produjo el máximo incremento en las temperaturas medias, lo que implica un adelanto en el inicio del período cálido estival.

El comportamiento de la temperatura en la región conlleva a diagramar las producciones fundamentalmente de acuerdo a los requerimientos térmicos de los cultivos, debido a que estos resultados podrían estar indicando un aumento en la longitud de los bioperíodos, como se ha visto en otros países.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto UBACyT G078. Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por la información brindada para realizar el trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- FERNÁNDEZ LONG M.E., BARNATÁN, I.; SERIO, L y MURPHY. G. M. 2008. Cambios en la disponibilidad térmica para los cultivos de la región pampeana argentina. *Rev. Facultad de Agronomía UBA*, 28 (2-3): 111-120.
- GIORGI F. 2002. Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. I. observations. *Climate Dynamics* 18: 675–691.
- HOFFMANN, J.; NÚÑEZ, S. y VARGAS. W. 1997. Temperature, humidity and precipitation variations in Argentina and the adjacent Sub-Antarctic region during the present century. *Meteorol. Z. N. F.* 6: 3-11.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (Eds). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- MINETTI, J.L., VARGAS, W.M.; POBLETE, A.G.; ACUÑA, L.R. y CASAGRANDE, G. 2003. Non linear trends and non linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera* 16: 119-135.
- NÚÑEZ, M.N.; CIAPESSONI, H.H.; ROLLA, A.; KALNAY, E. y CAI, M. 2008. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. *Journal of Geophysical Research*, 113: 1-11.
- PASCALE, A.J. y DAMARIO, E.A. 1994. Tendencia de la amplitud térmica diaria en la Argentina desde 1901 hasta 1990. *Rev. Facultad de Agronomía UBA* 14 (2): 127-138.
- REPÚBLICA ARGENTINA. 2007. 2^{da} Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Informe Final. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 200 p.
- RUSTICUCCI, M. and BARRUCAND, M. 2004. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J.Climate* 17: 4099-4107.
- Serio, L. 2006. El cambio climático global. *Rev. Facultad de Agronomía UBA* 26 (3): 275-289.

VINCENT, L.A. 2005. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. *J. Climate* 18: 5011-5023.

SIMULACIONES DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA ASOCIADA A LOS EVENTOS FRÍOS EXTREMOS EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA EN UN ESCENARIO DE CLIMA FUTURO

Simulations of the atmospheric circulation associated with the extreme cold events in southeastern South America in a future climate scenario

Gabriela V. Müller¹, Kelen M. Andrade², Iracema F.A. Cavalcanti³ y María Elena Fernandez Long⁴

¹Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción (CICYTTP-CONICET), Diamante, Argentina

^{2,3}Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE), Brasil

⁴Facultad de Agronomía Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, UBA
gabrielamuller@cicyttp.org.ar

RESUMEN

Se identifica la ocurrencia de los casos extremos de incursiones de aire frío sobre el sudeste de Sudamérica en simulaciones climáticas del clima presente y futuro. Son consideradas tres áreas del sudeste de Sudamérica de 5° de latitud x 5° de longitud en regiones vulnerables a eventos fríos con un fuerte impacto en la producción agrícola. La selección considera los días con temperatura inferior a 0°C en 850 hPa, eligiendo los 5 eventos más extremos los cuales se componen para un análisis de la circulación atmosférica. Se consideran los datos diarios de reanálisis del NCEP en el período 1961-1990 (clima presente) y el modelo GFDL en la versión acoplada océano-atmósfera, tomando las salidas diarias del periodo presente y el futuro 2081-2100, para el escenario de concentraciones de gases A2.

Los resultados muestran que la configuración de los campos de presión a nivel del mar, de temperatura y viento en 850 hPa y 250 hPa, está bien simulada en el clima presente tanto para las medias como para las anomalías. En la comparación de los valores simulados para el clima presente y futuro los valores de presión simulados son del mismo orden de magnitud que las observaciones y las anomalías están bien representadas en las áreas de estudio. No obstante, las mayores anomalías se extienden hacia menores latitudes, siendo más intensas en particular para las áreas de estudio en el clima futuro. La temperatura del modelo GFDL es subestimada en relación a las del NCEP. Cuando se comparan con los valores esperados en el futuro, el GFDL del presente muestra anomalías ligeramente más intensas. En bajos niveles se observó que el viento sur es más intenso en las simulaciones del presente y aparece con una trayectoria más oceánica que en el futuro. En niveles superiores se encontró para las tres regiones que las simulaciones en el futuro presentan viento más zonal en relación al presente.

Palabras Claves: Extremos fríos, Modelos Globales, Clima futuro

SUMMARY

It is identified the occurrence of extreme cold air into the south-eastern South America in climate simulations of present climate and future. It is considered three areas of southeastern South America (5°lat x 5°lon) in regions vulnerable to cold events, with a considerable impact on agricultural production. The selection of the areas take into account the days with temperatures below 0°C in the atmosphere pressure level of 850 hPa, it is selected the 5 most extreme events, which were composed for the analysis of atmospheric circulation. It is considered the daily data of the NCEP reanalysis for the period 1961-1990 (present climate) and the coupled model ocean-atmosphere GFDL, taking the daily results of present and future 2081-2100, to the sceneries of gas concentration A2.

The results show that the configuration of the fields of pressure at sea level, temperature and wind at 850 hPa and 250 hPa is well simulated in the present climate for both average and for anomalies. Comparing the values simulated of the present climate and future, the values of pressure simulated are of the same magnitude of the observations and the anomalies are well represented in the studied areas. Nevertheless, the main anomalies extend to lower latitudes, being more intense mainly in the area of study of future climate. The temperatures of the GFDL model are underestimated in relation to the NCEP. When they are compared to the values expected in the future, the GFDL shows more intense anomalies. In low level of the atmosphere, it was observed that the south wind is stronger in the simulations of the present and it comes up with a trajectory more oceanic in the future. In high level of the atmosphere it was found in the three regions that in the simulation of the future the wind is more zonal than in the present.

Key words: Extremes of cold, Global Models, Future Climate

INTRODUCCIÓN

El aumento de las temperaturas en el planeta y los cambios en los patrones de lluvia asociados pueden perjudicar o favorecer especialmente el desarrollo económico y social de las naciones, siendo mas vulnerables aquellas en vías de desarrollo.

Muchos trabajos han documentado las tendencias observadas en la temperatura y la precipitación extremas. Sin embargo, la gran diversidad en las metodologías empleadas en los estudios de inter-comparación y también las oscilaciones en las respuestas de los modelos inherentes a escala regional/global, tornan los resultados y análisis de las proyecciones en una difícil tarea. En un intento de minimizar esos efectos se utiliza el análisis de los índices de extremos como una posible solución, dado que permiten integrar escalas regional y global (Rusticucci et al. (2009), Marengo et al. (2009), Artaxo (2008), Nicholls y Alexander (2007), Govindasamy et al. (2003)). Estos autores también concuerdan en que las estimaciones de estos parámetros todavía son difíciles debido al alto nivel de incertidumbre de los pronósticos, principalmente por la falta de conocimiento científico sobre los procesos que regulan el sistema climático global. Además de esto, se debe tener en cuenta la dificultad en representar con fidelidad la variabilidad en los patrones futuros de las emisiones de gases de efecto invernadero, para que sea posible realizar una simulación mas próxima a la real de cómo serán los cambios de clima futuro (Artaxo, 2008).

Las proyecciones de los cambios para los extremos del clima son esenciales para evaluar los potenciales impactos de las alteraciones climáticas. En este sentido Tebaldi et al. (2007) analizan simulaciones históricas y futuras a partir de diez índices con un

ensamble con 9 Modelos de Circulación Global (MCG) para varios escenarios de emisiones del IPCC-AR4. Los extremos del clima descritos para el intervalo de diez índices de frecuencia para las ondas de calor y días de heladas, duración de sequías a grandes cantidades de precipitación, muestran que las proyecciones del modelo individual para el siglo XXI en tres escenarios analizados, están de acuerdo para extremos de temperatura y consistente con un clima más caliente.

Rusticucci et al. (2009) observaron una disminución en el número de días de heladas en la escala inter-anual para los eventos de temperaturas extremas en Sudamérica. En particular, para la región de la Pampa Húmeda Fernández Long y Müller (2006) encuentran tendencias negativas en la frecuencia anual del número de días con heladas observadas para el período 1964-2003, excepto al sur de la provincia de Buenos Aires. En concordancia con este resultado, se encontraron tendencias positivas (negativas) en la temperatura mínima anual media en aquellos lugares donde las tendencias de frecuencias de heladas fueron negativas (positivas) (Fernández Long y Müller, 2009).

Müller et al. (2009) investigan si los cambios climáticos proyectados para las décadas de fines de siglo podrían alterar la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos fríos, definidos según la temperatura media diaria en diferentes regiones del sudeste de Sudamérica y en particular la Pampa Húmeda. Se utilizaron simulaciones de los modelos HadCM3 (Hadley Center) y una versión acoplada océano-atmósfera del GFDL (World Climate Research Programme's), para el análisis de datos diarios obtenidos de las integraciones siglo XX y SRES A2 (escenario futuro). Se realizó la validación de estos modelos aplicando los mismos criterios de identificación de los eventos en los datos de reanálisis de NCEP (1961-1990). Los resultados muestran que ambos modelos sobreestiman el número de ocurrencias de extremos fríos respecto de los reanálisis de NCEP. Si esta característica fuera proyectada a los resultados obtenidos en el futuro, que muestran una frecuencia mucho mas baja en el número de eventos extremos respecto a los simulados en el período presente, se puede inferir que los eventos extremos fríos serán prácticamente inexistentes de acuerdo a estos modelos para el escenario de emisiones A2.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se consideran los datos de Reanálisis NCEP/NCAR y el modelo GFDL en la versión acoplada océano-atmósfera del World Climate Research Programme's (WCRP's) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset. Los datos son diarios y comprenden los meses de mayo a septiembre para el período de referencia 1961-1990 (clima presente), y 2081-2100 para el escenario futuro SRES A2 (clima futuro). Se asume que los datos de Reanálisis representan las observaciones respecto a las que el modelo es contrastado y así validado en el período de referencia.

Las regiones de interés elegidas son las frecuentemente afectadas por heladas, y comprenden la Pampa Húmeda (33°S-38°S, 65°W-60°W), centro-norte de Uruguay y sur de Brasil (28°S-33°S, 52°W-57°W), y la región oriental de Paraguay y sur de Brasil (23°S-28°S, 52°W-57°W). Cada una de ellas ocupa un área de 5° de latitud x 5° de longitud, denominadas por simplicidad como Argentina, Uruguay y Brasil, respectivamente.

El criterio para clasificar los extremos fríos considera los días en que la temperatura media diaria en cada región fue inferior a 0°C en el nivel de 850 hPa. Este valor por ende estará suavizado y el hecho de considerar en el nivel de 850 hPa al criterio de la temperatura crítica que define las heladas en superficie, garantiza ser representativa de

un evento extremo. De este conjunto de días se seleccionan los 5 eventos más extremos en cada una de las tres regiones para el análisis de las composiciones de las distintas variables atmosféricas en cada una de dichas regiones. Una ventaja adicional al usar un nivel superior es que el efecto de la cordillera puede quedar minimizado, ya que para los modelos globales en general tienen dificultades en representarla.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra la composición del campo de temperatura de los 5 eventos más extremos en 850 hPa para las regiones definidas como Argentina, Uruguay y Brasil.

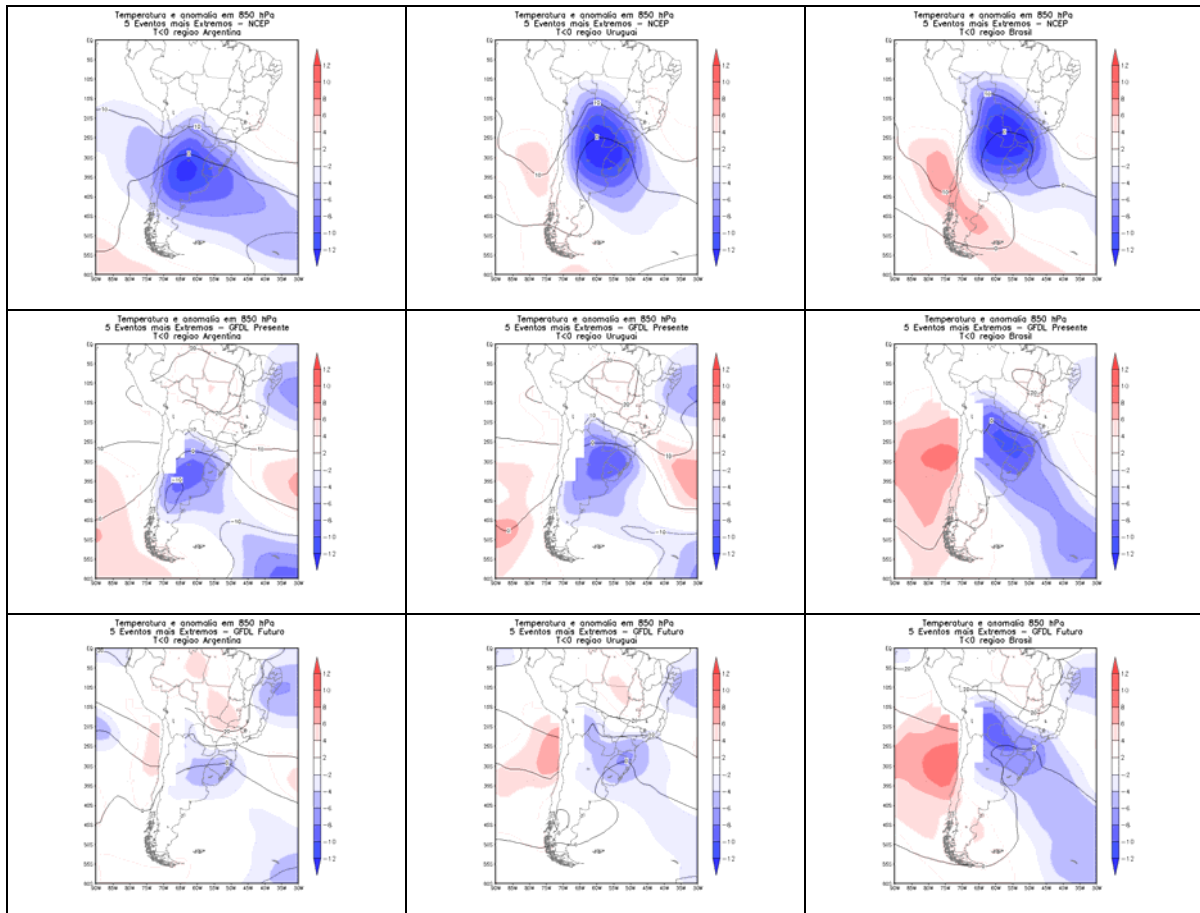


Figura 1: Temperatura y anomalía en 850 hPa para los 5 eventos más extremos con temperatura inferior a 0°C para las regiones Argentina, Uruguay y Brasil.

En relación al clima presente se observa que para todas las áreas de estudio, el GFDL subestima los valores de anomalías de temperatura con respecto al NCEP. Cuando se compara con el comportamiento esperado en el clima futuro según este escenario, el GFDL muestra en el presente anomalías ligeramente más intensas que en el futuro y la isoterma de 0°C queda confinada a mayores latitudes en este último período.

Teniendo en cuenta estos resultados para las regiones de análisis, si el modelo subestima en el presente, lo hará también para el período futuro, el que muestra valores suavizados relativos al presente, es decir que cabe esperar en las condiciones del escenario A2 que las anomalías de temperatura sean aun menores en el clima futuro.

En la Figura 2 se observa que los valores de presión simulados son del mismo orden que las observaciones y las anomalías de presión a nivel del mar (PNM) aparecen en general bien representadas en el continente.

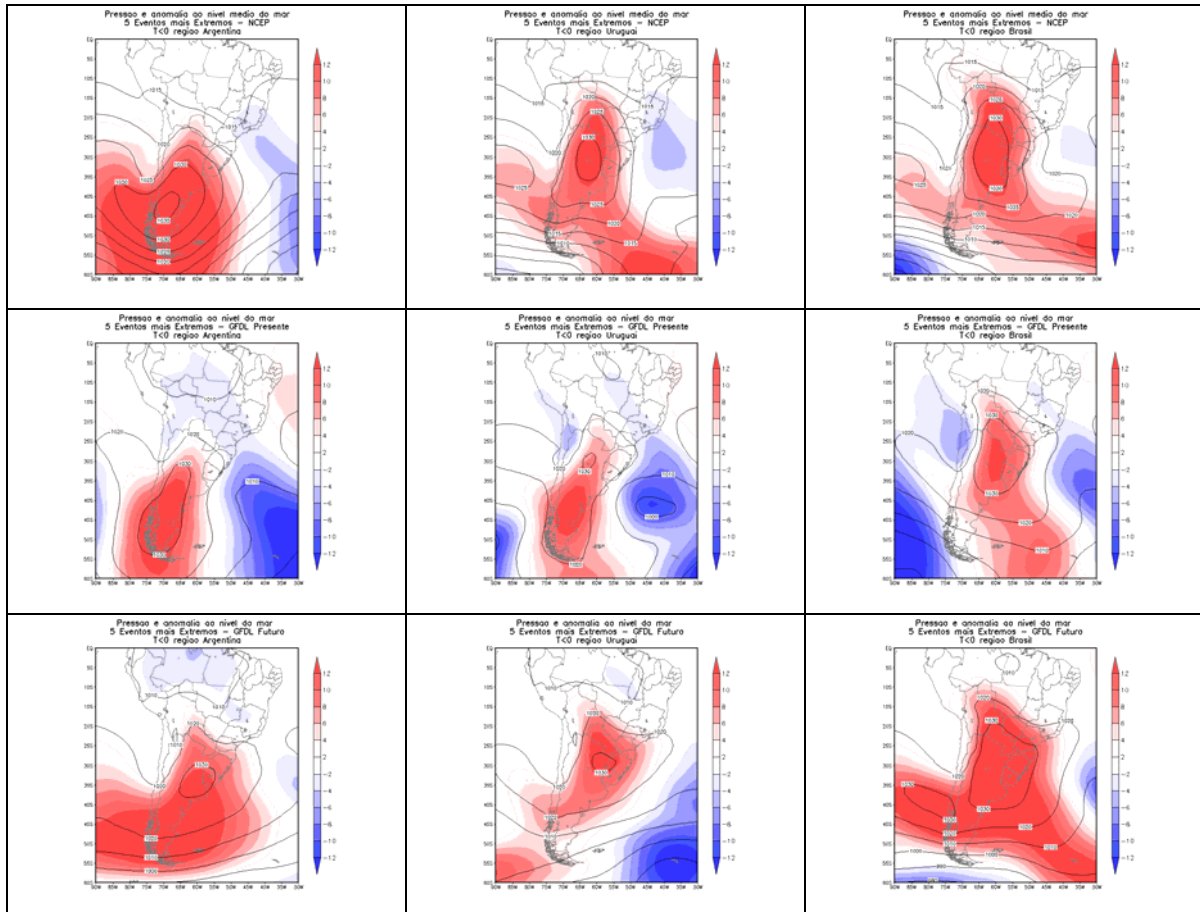


Figura 2: Presión a nivel del mar para los 5 eventos más extremos con temperatura inferior a 0°C para las regiones Argentina, Uruguay y Brasil.

La comparación de los compuestos de PNM obtenida de la simulación del GFDL entre el clima presente y futuro muestra que los valores de presión son del mismo orden para ambos períodos. En tanto, las anomalías mayores ocupan las menores latitudes en el clima futuro, siendo más intensas en particular para las áreas de estudio. Se observa que en Argentina el GFDL en el presente muestra un centro de alta presión con el núcleo de 1030 hPa que se extiende desde 55°S hasta 30°S aproximadamente, mientras en el futuro este centro se presenta restringido al centro-norte del país y parte de Uruguay. Además, la configuración meridional del anticiclón del clima presente no es observada para la composición de casos en el clima futuro. Mientras que la región de presión relativamente más baja sobre el océano Atlántico es más intensa y bien configurada en el presente, la cual hace que la alta quede más restringida al continente.

La región de Brasil es la que presenta mayor disparidad entre ambos períodos. La simulación del GFDL en el futuro presenta anomalías positivas más intensas y el centro de alta presión más extendido respecto al presente. El área de baja presión anómala sobre el océano Atlántico se encuentra desplazada hacia el este en el clima futuro y más débil en los tres casos estudiados.

El análisis en los campos de viento en 850 y 250 hPa se presenta en las Figuras 3 y 4, respectivamente.

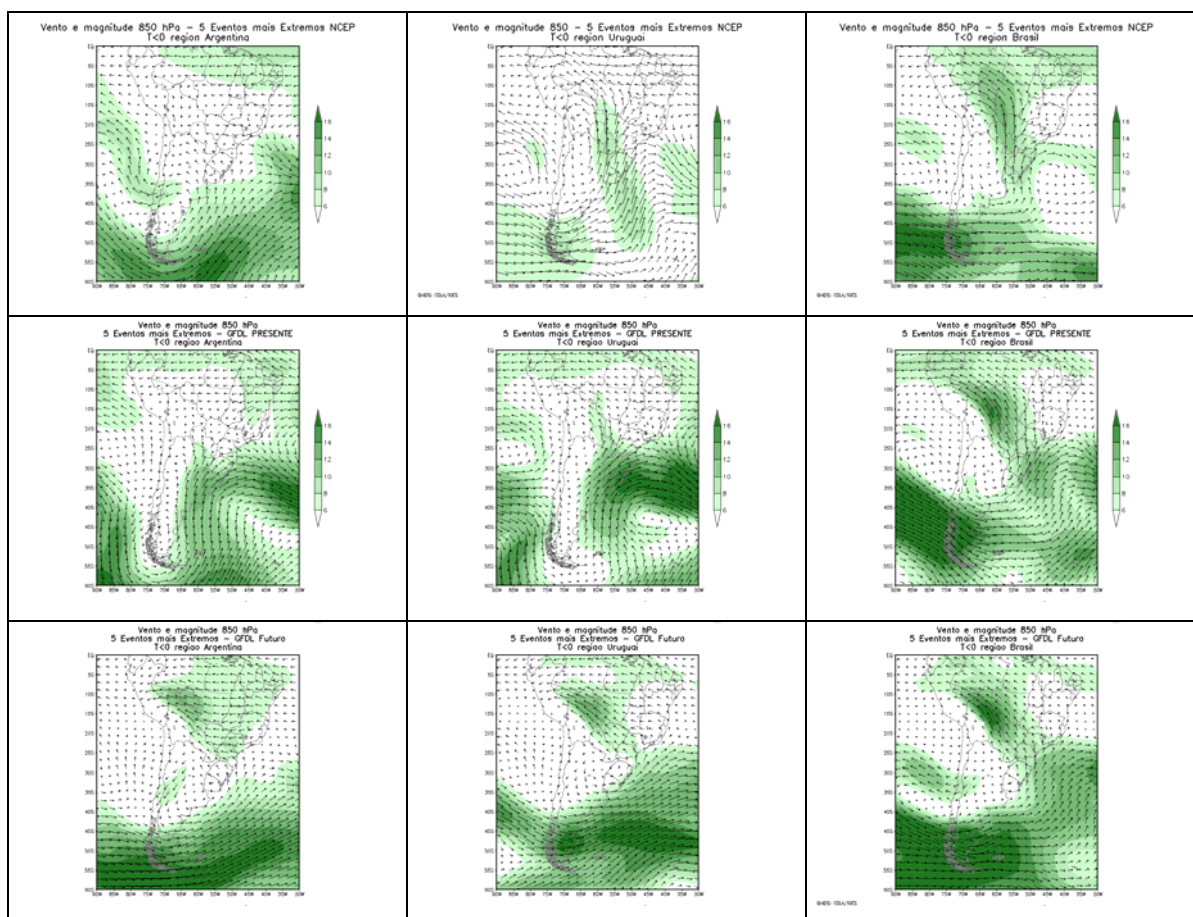


Figura 3: Viento e magnitud en 850 hPa para los 5 eventos más extremos con temperatura inferior a 0°C para las regiones Argentina, Uruguay y Brasil.

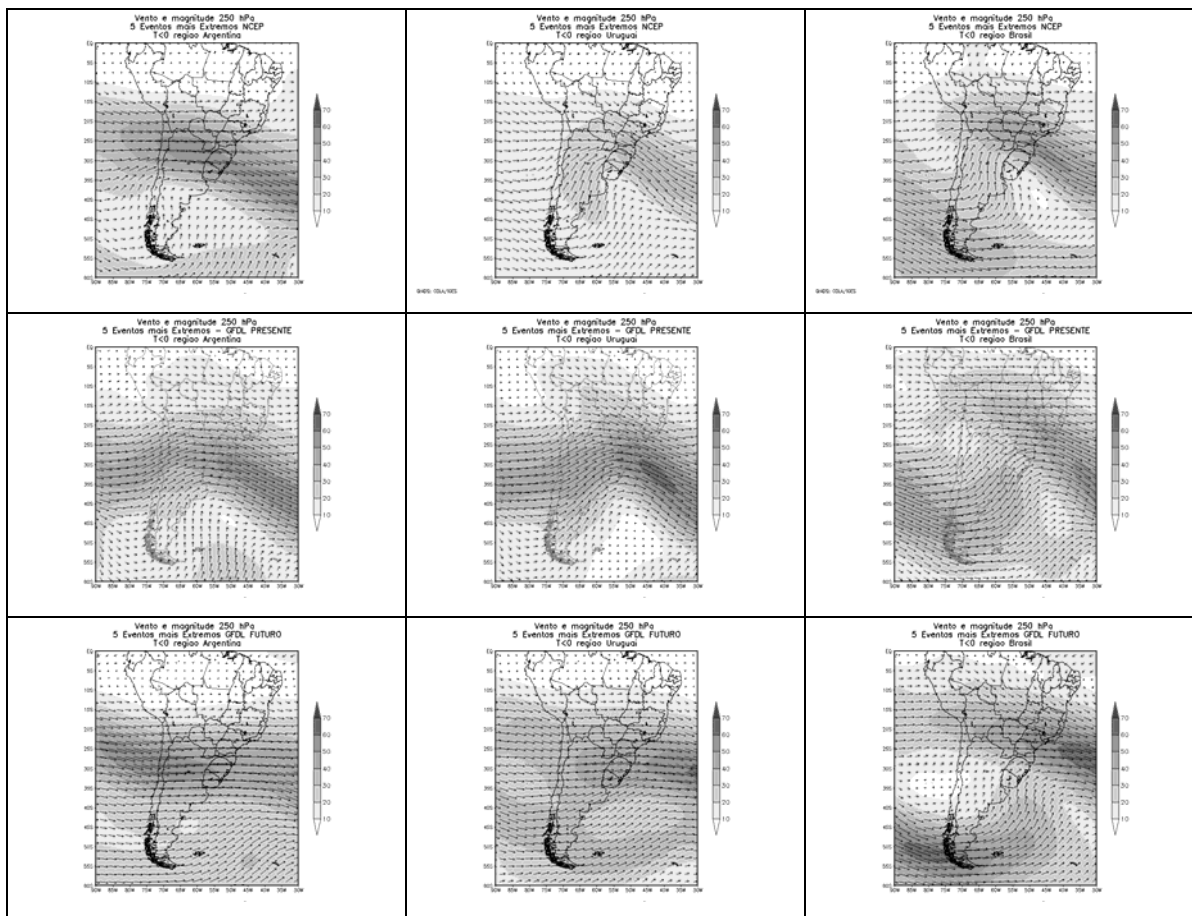


Figura 4: Viento y magnitud en 250 hPa para los 5 eventos más extremos con temperatura inferior a 0°C para las áreas de Argentina, Uruguay y Brasil.

En niveles bajos (Figura 3) y para las respectivas regiones de estudio, el modelo simula razonablemente la advección de viento con componente dominante del sur en el clima presente, aunque tiene un recorrido más oceánico. Esto podría explicar el hecho de que las temperaturas simuladas subestiman las observadas (Figura 1). En cambio la magnitud de las anomalías está sobrestimada por el modelo en el clima presente. A su vez, la magnitud del flujo del sur simulado para el clima futuro es menos intensa respecto del presente en todas las regiones de análisis.

En altos niveles la Figura 4 muestra en el clima presente el jet de altura junto a la típica vaguada a sotavento de los Andes asociados a las irrupciones de aire frío. En cambio las simulaciones en el futuro presentan un flujo más zonal en relación al presente.

CONCLUSIONES

Se realizan composiciones a partir de los 5 eventos más extremos de temperatura inferior a 0°C en 850 hPa en tres regiones del sudeste de América del Sur, considerando datos diarios de Reanálisis del NCEP y las simulaciones del modelo GFDL en el período de referencia 1961-1990 y en el período 1981-2100 considerando el escenario A2. Inicialmente y a modo de validación fueron analizadas las características atmosféricas para el clima presente asociadas a los casos de incursiones de aire frío resultante del modelo GFDL, comparándolas con la circulación atmosférica obtenida de los Reanálisis. En general la configuración de los campos de presión a nivel del mar,

temperatura en 850 hPa y viento en 850 hPa y 250 hPa, está bien simulada por el modelo en el período presente tanto para los campos medios como para los de anomalías en cada una de las regiones de estudio.

Por su parte, las anomalías de temperatura asociada a los extremos fríos a fines de siglo simuladas por el modelo serán de menor amplitud respecto a las obtenidas para el clima presente. A juzgar por el campo de presión en superficie en el futuro las masas de aire frío asociadas a los eventos extremos tendrán una mayor penetración latitudinal con anomalías positivas extendidas sobre el continente y negativas alejadas del mismo, no presentando el típico patrón asociado a estos eventos con alta presión sobre el continente y baja presión corriente abajo sobre el océano Atlántico. Esta configuración caracteriza la advección de viento del sur en niveles bajos, observada en el clima presente y que no aparece tan definida en el clima futuro en las regiones de estudio. En niveles altos las simulaciones en el futuro presentan un flujo más zonal en relación al presente, donde aparece la típica configuración asociada a las irrupciones de aire frío con una vaguada a sotavento de la cordillera.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CONICET (PIP-114-200801-00591) y CNPq (490466/2006-0).

BIBLIOGRAFÍA

- ARTAXO, P. 2008. Mudanças climáticas globais: cenários para o planeta e a Amazônia. <http://www.mudancasclimaticas.andi.org.br/content/mudancas-climaticas-globais-cenarios-para-o-planeta-e-amazonia>.
- FERNÁNDEZ LONG, M.E. y MÜLLER, G.V. 2006. Annual And Monthly Trends In Frost Days in the Wet Pampa. *8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. 249-253.
- FERNÁNDEZ LONG M.E. y MÜLLER, G.V. 2009. Tendencias anuales y mensuales en el número de días con heladas en la Pampa Húmeda. *I Jornadas Interdisciplinarias de la Universidad de Buenos Aires sobre el Cambio Climático y Global*. Buenos Aires, agosto de 2007:237-238.
- GOVINDASAMY, B.; DUFFY, P.B. y COQUARD, J. 2003. High-resolution simulations of global climate, part 2: effects of increased greenhouse cases. *Climate Dynamics*, 21 (5-6): 391-404.
- MARENGO, J.A; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. y RENOM, M. 2009. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Clim. Change* DOI 10.1007/s10584-009-9743-7.
- MÜLLER, G.V.; MARTINS ANDRADE, K.; CAVALCANTE, I.F.A. y FERNÁNDEZ LONG, M.E. 2009. Posibles efectos del cambio climático en las incursiones de aire frío sobre el sudeste de América del Sur simuladas con modelos globales. *PIUBACC*, 317-318.
- NICHOLLS, N. y ALEXANDER, L. 2007. Has the climate become more variable or extreme? 1992-2006. *Progress in Physical Geography* 31(1): 77-87.
- RUSTICUCCI, M.; MARENGO, J.; PENALBA, O. y RENOM, M. 2009. An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the XX century: part 1: mean values and variability. *Clim. Change* DOI 10.1007/s10584-009-9742-8.

TEBALDI, C.; HAOHOW, K.; ARBLASTER, J. y MEEHL, G. 2007. Going to extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79: 185–121.

DETECCIÓN DE CAMBIOS ABRUPTOS EN LA PRECIPITACIÓN ANUAL DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Detection of abrupt changes in annual precipitation in the Northwestern Buenos Aires Province, Argentina

Silvia P. Pérez; Eduardo M. Sierra; Julieta Irigoín y Marcelo J. Massobrio

Facultad de Agronomía, UBA. Avda. San Martín 4453
(C1417DSE) Buenos Aires, Argentina.
perez@agro.uba.ar

RESUMEN

El noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina se encuentra en una zona de transición entre el clima templado húmedo que se extiende hacia el este y el clima de estepa que se extiende hacia el oeste, por lo cual resulta muy sensible a los cambios abruptos en el régimen de precipitaciones. Con el objeto de detectar la ocurrencia de este tipo de fenómenos se analizaron series de precipitación anual de larga duración de 10 localidades de la zona de estudio, utilizando las pruebas estadísticas de Pettitt, de Lee Heghinian y la Segmentación de Hubert. Los resultados indicaron un incremento abrupto de la precipitación entre 1960 y 1980, con un umbral de significación variable de una localidad a otra. El incremento de las precipitaciones puede considerarse una de las causas que explican la expansión del área sembrada con cultivos que tuvo lugar en los años posteriores al fenómeno. Si bien un aumento rápido puede verse como un hecho favorable, debe tenerse en cuenta que existen trabajos de investigación que consideran la posibilidad de que se produzca una disminución del régimen de lluvias que, en caso de producirse en forma abrupta, no daría el tiempo suficiente como para poner en marcha medidas adaptativas eficientes.

Palabras clave: serie climática; discontinuidad temporal; métodos estadísticos.

SUMMARY

Northwestern Buenos Aires Province, Argentina lays in a transition zone between the moderate humid climate that it spreads eastward and the steppe climate that spreads towards the west, for which turns out to be very sensitive to the abrupt changes in the rainfall regime. In order to detect the occurrence of this type of phenomena, series of annual rainfall of long duration of 10 localities in the zone of study, were analyzed using the statistical tests of Pettitt, of Lee Heghinian and Hubert's Segmentation. The results indicated an abrupt increase of the rainfall between 1960 and 1980, with statistical significance levels changing from one locality to another. The increase of the rainfalls can be considered to be one of the reasons that explain the expansion of the growing crop area that took place in the following years. Though a rapid increase can turn as a favorable fact, it must be born in mind that some papers consider the possibility of a decrease in the rainfalls regime that, in case of taking place in abrupt form, it would not have time as to take efficient adaptative measures.

Key words: climate series, temporary discontinuity; statistical methods

INTRODUCCIÓN

La existencia de cambios abruptos en las series históricas de precipitación ha sido detectada en diversas áreas geográficas. Narisma *et al.*, (2007) identificaron unas 30 regiones en el mundo con cambios abruptos en la precipitación durante el siglo XX, y señalaron que estas regiones están principalmente localizadas en regiones semiáridas y áridas.

En este sentido, en África, Paturel *et al.*, (1996), Paturel *et al.*, (1998), Servat *et al.*, (1999), L'Hôte *et al.*, (2002), Paturel *et al.*, (2004), Meddi y Meddi, (2007) han puesto en evidencia la presencia de cierto número de discontinuidades en las series correspondientes a incrementos (principio de los años 1920 y fines de los años 1940) o a disminuciones (fin de los años 1930 y fin de los años 1960) de las medias anuales.

Vivès y Jones (2005) en Australia, detectaron tres cambios climáticos producidos en el período 1890-1989. El más significativo fue el incremento de la precipitación, a finales de los años 1940 en el este australiano. Los otros dos cambios consistieron en dos disminuciones consecutivas de las precipitaciones en el oeste australiano, la primera producida a mediados de los años 1890, y la segunda a fines de los años 1960.

Asimismo, al sur del paralelo de 15°S, en Sudamérica, Minetti y Vargas (1997) analizaron cambios en series de precipitación anual de largo período encontrando un comportamiento en forma de salto o discontinuidad positiva o creciente, durante las décadas de 1950 y 1960, al este de la Cordillera de los Andes y tendencias negativas al oeste de la misma.

Si bien Minetti y Vargas (1997) abordaron el tema de los cambios abruptos a nivel continental, incluyendo Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay, se carece de información zonal a nivel de pradera pampeana, siendo ésta la región de mayor productividad agropecuaria de la Argentina.

El noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se encuentra en una zona de transición entre el clima templado húmedo, que se extiende hacia el este, clima C según la clasificación de Köppen modificada por Trewartha (Köppen, 1948; Trewartha, 1968) y el clima de estepa, que se extiende hacia el oeste, que se corresponde con un clima BS según la misma clasificación.

Debido al alto impacto que poseen los cambios de precipitación sobre la actividad agropecuaria de la zona (Viglizzo *et al.*, 1995), la detección de los mismos es un requisito imprescindible para adecuar los esquemas de uso de la tierra de manera que una excesiva presión productiva no exceda la capacidad de carga del ambiente causando un deterioro ambiental (Kessler, 1994).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objetivo de este trabajo es detectar la existencia de cambios abruptos en la precipitación. Para ello se estudiaron las series de precipitación anual del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizaron datos de precipitación anual de larga duración de 10 localidades del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Tabla 1), provenientes de los archivos del Servicio Meteorológico Nacional Argentino. La homogeneidad de los registros originales fue comprobada por medio de la prueba de rachas o de la alternancia (Thom, 1966) y fue considerada aceptable en todos los casos (para el nivel de significación $\alpha = 0,01$ ocho series resultaron homogéneas $|Z| \leq 2,58$ y para el nivel de significación $\alpha = 0,05$ dos series resultaron homogéneas $|Z| < 1,96$)

Tabla 1. Ubicación de las localidades. Prueba de homogeneidad de rachas (Z).

Localidad	Latitud (S)	Longitud (W)	Altura (msnm)	Z
Carlos Casares	35° 32´	61° 20´	82	-2,36
Carlos Tejedor	35° 25´	62° 25´	102	-1,93
Gral. Pinto	34° 45´	61° 50´	181	-2,44
Gral. Villegas	35° 01´	62° 59´	16	-2,30
Guamini	37° 02´	62° 25´	95	-2,58
Pehuajo	35° 48´	61° 54´	85	-1,29
Pellegrini	36° 16´	63° 07´	105	-2,43
Rivadavia	35° 29´	62° 59´	102	-2,57
Salliqueló	36° 45´	62° 55´	120	-2,38
Trenque Lauquen	35° 56´	62° 43´	81	-2,57

Para detectar cambios abruptos en las series de precipitación anual se utilizaron tres métodos estadísticos: la prueba de Pettitt (1979), el método bayesiano propuesto por Lee y Heghinian (1977) y el método de segmentación de series hidrometeorológicas de Hubert *et al.*, (1989).

Prueba de Pettitt

La prueba de Pettitt es una prueba no-paramétrica derivada de la prueba de Mann-Whitney. La ausencia de un punto de cambio en la serie (x_i) de tamaño N constituye la hipótesis nula. Se define la variable $U_{t,N}$

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sgn}(x_i - x_j)$$

$$\text{donde } \begin{aligned} \text{sgn}(x_i - x_j) &= 1 && \text{si } (x_i - x_j) > 0 \\ \text{sgn}(x_i - x_j) &= 0 && \text{si } (x_i - x_j) = 0 \\ \text{sgn}(x_i - x_j) &= -1 && \text{si } (x_i - x_j) < 0 \end{aligned}$$

La hipótesis nula fue testada utilizando el estadístico K_N definido por el máximo valor absoluto de $U_{t,N}$ para t variando de 1 a N-1.

A partir de la teoría de rangos, Pettitt demuestra que si k representa el valor de K_N de la serie de estudio, bajo la hipótesis nula, la probabilidad de superar el valor k esta dada aproximadamente por:

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp[-6k^2 / (N^3 - N^2)]$$

Para un nivel de significación α , si la probabilidad estimada es inferior a α , la hipótesis nula es rechazada. La serie entonces comporta un punto de cambio localizado en el momento τ donde es observado K_N .

Método Bayesiano de Lee y Heghinian

Partiendo de la hipótesis que un cambio en la media está presente en la serie, el método calcula la probabilidad que ese cambio tenga lugar en un momento dado, y determina la fecha t para la cual la probabilidad de realización del cambio es máxima.

Dada la serie de n valores de la variable X : X_1, X_2, \dots, X_n , la cual está compuesta de dos partes (X_1, X_2, \dots, X_τ) y ($X_{\tau+1}, \dots, X_n$) cuyas medias respectivas son μ y $\mu + \delta$.

El modelo representando la estructura de la secuencia X_1, X_2, \dots, X_n está dado por:

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, 2, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, n \end{cases}$$

Donde ε_i ($i = 1, \dots, n$), son independientes y normalmente distribuidos, de media nula y varianza σ^2 .

Las variables independientes τ, μ, δ , y σ del modelo (1), Lee y Heghinian, (1977) dan la función de densidad de probabilidad *a posteriori* de τ :

$$f(\tau | x_1, \dots, x_n) \propto [n / \tau (n - \tau)]^{1/2} [R(\tau)]^{-(n-2)/2}, \tau \in \{1, 2, \dots, n-1\}$$

Donde :

$$R(\tau) = \left[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2 \right]^{-1}$$

$\bar{y}, \bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}, \bar{x}_n$ representan respectivamente las medias de las primeras τ observaciones, de las últimas $n - \tau$ observaciones y de la serie entera.

El examen de la distribución discreta $f(\tau | x_1, \dots, x_n)$ permite identificar la fecha correspondiente de la máxima probabilidad de cambio en la media. La distribución *a posteriori* de δ puede ser utilizada para estimar el nivel de cambio en la media. Lee y Heghinian, (1977) han demostrado que la distribución condicional *a posteriori* $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ de δ , dado τ , es una distribución no central de Student con una media $\mu_\tau(\delta)$, una varianza $\sigma_\tau^2(\delta)$ y $(n - 2)$ grados de libertad.

La expresión práctica de $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ puede ser deducida de la distribución de Student no centrada como indica Epstein (1985):

$$f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n) = \left[(n-2)^{-1/2} / \sigma_\tau(\delta) B(1/2, n-2/2) \right] \left[1 + (\delta - \mu_\tau(\delta)) / (n-2) \sigma_\tau^2(\delta) \right]^{-(n-1)/2}$$

Donde $B(x, y)$ es la función beta definida por $B(x, y) = \Gamma(x) \Gamma(y) / \Gamma(x + y)$. Las estimaciones de la media y de la variancia de la distribución $f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n)$ están dadas por:

$$\hat{\mu}_\tau(\delta) = \bar{x}_{n-\tau} - \bar{x}_\tau \quad \text{y} \quad \hat{\sigma}_\tau^2(\delta) = \left[n R(\tau) / \tau (n-\tau) (n-2) \right] \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2$$

El nivel de significación de la amplitud puede ser estimado utilizando el intervalo de confianza bayesiano $C_{1-\alpha}(\delta) = [a, b]$ que representan los valores que puede tomar la amplitud del cambio a un nivel de confianza $100(1 - \alpha)\%$. Una expresión de este intervalo simétrico ha sido propuesta por Berger (1985).

$$\Pr | a \leq \delta \leq b | = \int_a^b f(\delta | \tau, x_1, \dots, x_n) d\delta = 1 - \alpha$$

o $\Pr \{ \delta \leq a \} = \Pr \{ \delta \geq b \} = \alpha / 2$

Y donde $f (\delta | x_1, \dots, x_n)$ es la distribución condicional a *posteriori* de δ obtenida como una media ponderada de distribución de Student (Lee y Heghinian, 1977).

$$f (\delta | x_1, \dots, x_n) = \sum_{\tau=1}^{n-1} f (\delta | \tau, x_1, \dots, x_n) * f (\tau | x_1, \dots, x_n)$$

Método de Segmentación de Series Hidrometeorológicas de Hubert

Este método divide la serie en m segmentos ($m > 1$) de forma tal que la media calculada sobre todo el segmento sea significativamente diferente de la media del o de los segmentos vecinos.

La segmentación es definida de la siguiente manera

Toda serie $x_i, i = i_1, i_2$ con $i_1 \geq 1$ e $i_2 \leq N$ donde ($i_1 < i_2$) constituye un segmento de la serie inicial de los $(x_i), I = 1, \dots, N$

Toda partición de la serie inicial en m segmentos es una segmentación de orden m de esta serie. A partir de una segmentación particular de orden m realizada sobre la serie inicial, se define:

$$i_k, k = 1, 2, \dots, m$$

$$n_k = i_k - i_{k-1}$$

$$\bar{x}_k = \left[\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i \right] / n_k$$

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \quad \text{con} \quad d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2$$

La segmentación obtenida debe ser tal que para un orden m de segmentos dados, la desviación estándar D_m sea mínima. Esta condición es necesaria pero no suficiente para la determinación de la segmentación óptima. Es necesario tener en cuenta que las medias de dos segmentos contiguos deben ser significativamente diferentes. Esta limitación se satisface por aplicación de la prueba de Scheffé. (Dagnélie, 1970).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que la prueba de Lee y Heghinian (1977) asume que los datos están normalmente distribuidos, la series empleadas en el estudio fueron sometidas a la prueba de Kolmogorov-Smirnov, pudiendo comprobarse que la totalidad de las mismas se ajustan a una distribución normal.

Los resultados obtenidos al aplicar las pruebas estadísticas de Pettitt (1979), Lee y Heghinian (1977) y Hubert *et al.*, (1989) sobre las 10 localidades estudiadas (Tabla 2) indicaron un incremento abrupto de la precipitación anual entre 1960 y 1980, con un umbral de significación variable de una localidad a otra. Estos resultados confirman el incremento pluviométrico a partir de los años 1960, y la continuación del mismo durante los años 1970-1980.

Para la serie de precipitación anual Zonal el punto de cambio se observó, según la prueba de Lee y Heghinian (1977) (Figura 1) y la segmentación de Hubert *et al.*, (1989), en el año 1968. Hasta ese año el promedio de la precipitación anual fue de 763.8 mm en tanto que para el período 1969-2007 el valor pasó a ser de 956.2 mm (Figura 2).

Tabla 2. Pruebas estadísticas de cambios abruptos en las series de precipitación anual del noroeste de la provincia de Buenos Aires.

Localidad	Período de observación	Prueba de Pettitt	Prueba de Lee Héghinia	Segmentación de Hubert	Promedio anterior al cambio	Promedio posterior al cambio	Diferencia en %
Carlos Casares	1918-2005	1965	1965	1965	786.8	963.8	18.4
Carlos Tejedor	1918-2005	1967	1967	1967	790.4	944.3	16.3
Gral. Pinto	1926-2007	1970	1970	1974	830.9	1107.3	25.0
Gral. Villegas	1898-2007	1968	1968	1968	758.4	934.6	18.9
Guamini	1910-2004	1962	1962	1962	715.0	935.1	23.5
Pehuajo	1918-2005	1965	1965	1965	820.3	977.5	16.1
Pellegrini	1948-2003	1971	1971	1971	620.9	881.6	29.6
Rivadavia	1918-2005	1971	1971	1967	694.7	991.9	30.0
Salliqueló	1939-2003	1979	1982	1982	689.1	971.1	29.0
Trenque Lauquen	1918-2005	1962	1962	1983	859.1	1059.1	18.9
Zonal	1898-2007	1962	1968	1968	763.8	956.2	20.1

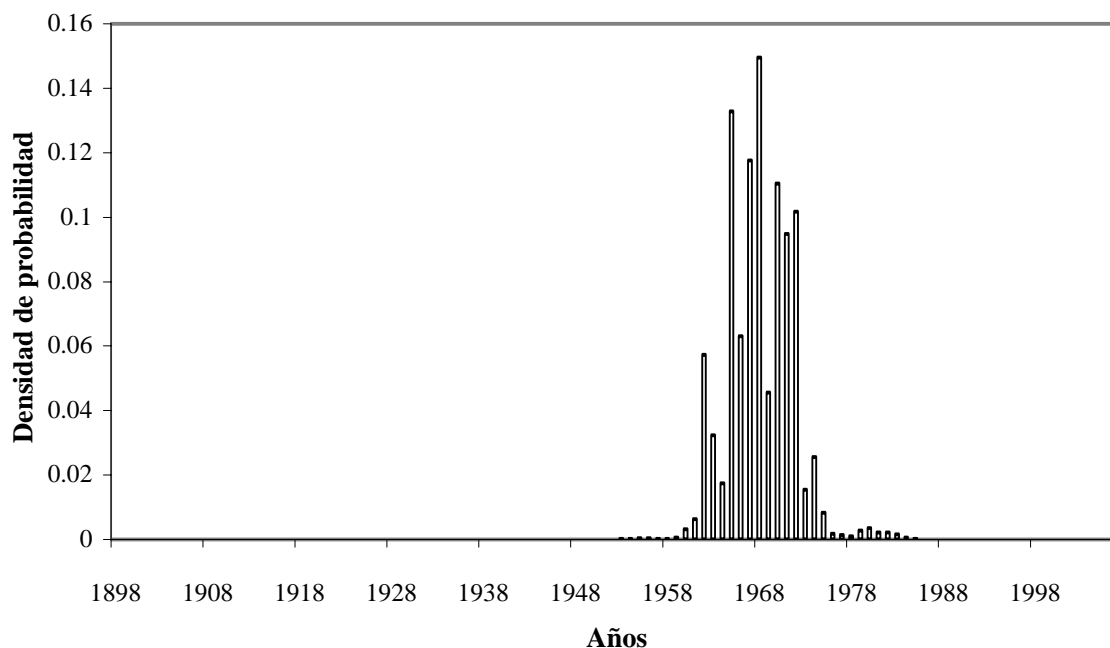


Figura 1. Densidad de probabilidad (Lee y Heghinian, 1977) para la precipitación anual Zonal.

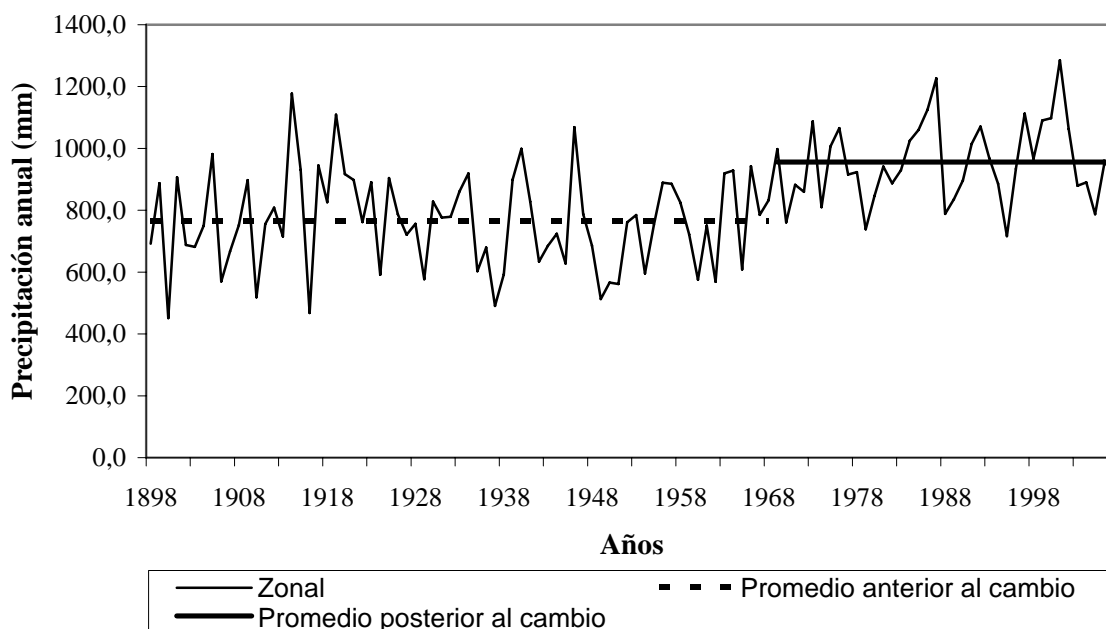


Figura 2. Precipitación anual Zonal, promedio anual anterior y posterior al cambio.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, se produjo un cambio abrupto en el régimen de precipitación anual, que tuvo lugar entre 1960 y 1980, con un umbral de significación variable de una localidad a otra. Para el análisis Zonal de la precipitación anual, el cambio tuvo lugar en el año 1968, llevando los valores desde 763.8 mm para el subperíodo 1898-1968, hasta 956.2 mm durante el subperíodo 1969-2007.

El incremento de las precipitaciones puede considerarse una de las causas que explican la expansión del área sembrada con cultivos que tuvo lugar, en el oeste de la provincia de Buenos Aires, en los años posteriores al fenómeno. Si bien un aumento rápido puede verse como un hecho favorable, debe tenerse en cuenta que existen trabajos de investigación que consideran la posibilidad de que se produzca una disminución del régimen de lluvias que, en caso de producirse en forma abrupta, no daría el tiempo suficiente como para poner en marcha medidas adaptativas eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

- BERGER, J.O. 1985. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. Berlin, Springer.
- DAGNÉLIE, P. 1970. *Théorie et Méthodes Statistiques*. Vol 2. *Les presses agronomiques de Gembloux*, 451 pp.
- EPSTEIN, E.S. 1985. *Statistical inference and prediction in climatology: A Bayesian approach*, Meteorological Monographs. American Meteorological Society.

- HUBERT, P.; CARBONNEL, J.P. y CHAOUCHÉ, A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques: application à des séries de précipitation et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J Hidrol.*110: 349-367.
- KÖPPEN, W. 1948. *Climatología*. Fondo de Cultura Económica. México, 478 pp.
- KESSLER, J.J. 1994. Usefulness of the human carrying capacity concept in assessing ecological sustainability of land-use in semi-arid regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 48 (3): 273-284.
- LEE, A.S.F. y HEGHINIAN, S.M. 1977. A shift of the Mean Level in a Sequence of Independent Normal Random Variables: A Bayesian Approach. *Technometrics* 19 (4): 503-506.
- L'HÔTE, Y.; MAHÉ, G. ; SOMÉ, B. y TRIBOULET, J.P. 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continue. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques* 47 (4): 563-572.
- MEDDI, H. y MEDDI M. 2007. Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du nord-ouest de l'Algérie. *Geographia Technica* 2: 49-55.
- MINETTI, J.L. y VARGAS, W. 1997. Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S. *Atmósfera* 11: 205-221.
- NARISMA, F.T.; FOLEY, J.A.; LICKER, R. y RAMANKUTTY, N. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century. *Geophysical Research Letters* 34: 1-5.
- PATUREL, J.E.; SERVAT, E.; KOUAME, B.; BOYER, J.F.; LUBES NIEL, H. y MASSON, J.M. 1996. Procédure d'identification de "ruptures" dans des séries chronologiques – modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *IAHS Publ.*N°238: 99-110.
- PATUREL, J.E.; SERVAT, E. y DELATTRE, M.O. 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques* 43 (6): 937-946.
- PATUREL, J.E.; BOUBACAR, I. y AOUR, A. 2004. Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale au XX siècle. *Sud Sciences & Technologies* 12: 40-46.
- PETTITT, A.N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *App. Statist* 28 (2): 126-135.
- SERVAT, E.; PATUREL, J.E.; LUBES-NIEL, H.; KOUAME, B.; MASSON, J.M.; TRAVAGLIO, M. y MARIEU, B. 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'eau* 12 (2): 363-387.
- THOM, H.C.S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. WMO Tech. Note N°81. Geneva: World Meteorological Organization, 53 pp.
- TREWARTHA, G.T. 1968. *An introduction to climate*, Fourth Edition. Mc Graw-Hill, New York, 408 pp.
- VIGLIZZO, E.F.; ROBERTO Z.E.; FILIPPIN, M.C. y PORDOMINGO, A.J. 1995. Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture Ecosystems and Environment* 55: 7-16.
- VIVÈS, B. y JONES. R.N. 2005. Detection of abrupt changes in Australian decadal rainfall (1890-1989). Atmospheric Research CSIRO Atmospheric Research Technical Paper N°73, 58 pp.

VARIABILIDAD INTERDECÁDICA DE EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA EN ARGENTINA

Interdecadal Variability of Temperature Extreme Events in Argentina

Bárbara Tencer*^{1,2} y **Matilde Rusticucci**^{1,2}

¹Laboratorio de Extremos Climáticos en Sudamérica, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina / CONICET, Argentina

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA
Ciudad Universitaria - Pabellón II - 2° piso
(1428) Buenos Aires, Argentina

*btencer@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

La frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos de temperatura ha sufrido cambios en todo el mundo durante el último siglo: se observan tendencias significativas positivas en el porcentaje de noches cálidas y negativas en el porcentaje de noches frías. En Argentina, la probabilidad de ocurrencia de los extremos cálidos anuales de la temperatura máxima disminuyó en las últimas décadas, mientras que aumentó en la temperatura mínima. El objetivo de este trabajo es evaluar los cambios observados en los eventos de temperatura que superan un umbral fijo en Argentina durante el período 1941-2000, utilizando la Teoría de Valores Extremos. La disponibilidad de datos diarios permite el ajuste de la distribución *Generalized Pareto (GP)* a los días con anomalías de temperatura por encima del percentil 95, y la estimación de los valores de retorno. Un valor de retorno se supera, en promedio, una vez cada p años. Sin embargo, esta afirmación sólo es válida bajo la suposición de un proceso estacionario, y no se cumple ante la presencia de saltos climáticos o tendencias de largo plazo. Es por ello que en este trabajo se dividen las series de anomalías diarias de temperatura en tres sub-períodos consecutivos de 20 años, se ajusta la distribución GP a los tres sub-períodos en forma independiente, y se comparan los valores de retorno estimados a partir de cada ajuste. Los resultados muestran que hay una disminución en la intensidad de los eventos extremos cálidos, acompañada por un aumento en la frecuencia de ocurrencia de los mismos.

Palabras clave: eventos extremos de temperatura, distribución generalizada pareto, valores de retorno.

SUMMARY

The frequency of occurrence of temperature extreme events has changed throughout the last century: significant positive trends in warm nights and negative trends in cold nights have been observed all over the world. In Argentina, the probability of occurrence of warm annual extremes of maximum temperature has decreased in the last decades, while there has been an increase of warm annual extremes of minimum temperature. The main objective of this report is to evaluate observed changes in temperature events that exceed a fixed threshold in Argentina over the period 1941-

2000, by applying the Extreme Value Theory. The availability of daily data allows to fit a Generalized Pareto Distribution (GPD) to daily temperature anomalies over the 95th percentile followed by the estimation of return values. A return value associated with a return period p is a value that is exceeded, on average, once every p years. However, this statement is only true under the assumption of a stationary process and is not valid in the presence of climatic shifts or long term trends. Therefore, in this paper daily temperature anomalies are divided in three consecutive and non-overlapping subperiods of 20 years. GPD is fitted to each subperiod independently and a comparison is made between return values estimated in each subperiod. Results show that there is a decrease in the intensity of warm extreme events, together with an increase in its frequency of occurrence.

Key words: temperature extreme events, generalized pareto distribution, return values

INTRODUCCIÓN

Los eventos extremos del tiempo y del clima influyen severamente sobre los ecosistemas y la sociedad. En particular, los extremos en la temperatura pueden afectar severamente la agricultura (muchos cultivos se ven afectados por la cantidad de días con heladas por año), la salud humana (la ola de calor que afectó Europa en 2003 causó entre 22000 y 35000 muertes según Schär y Jendritzky, 2004), la demanda de energía, los recursos hídricos y la disponibilidad de agua potable, entre otros. Ante un cambio climático, una pequeña variación en los valores medios de temperatura puede ocasionar grandes cambios en las temperaturas extremas diarias (Katz y Brown, 1992). Si estos extremos persisten durante un tiempo prolongado, pueden ser todavía más dañinos.

El estudio de valores históricos ha mostrado que la persistencia e intensidad de valores extremos de temperatura ha ido cambiando en los últimos años en todo el mundo (Trenberth et al., 2007). En Argentina, la temperatura mínima media de verano muestra un fuerte aumento en la segunda mitad del siglo XX, mientras que la temperatura máxima media de verano muestra una disminución en el norte del país y un aumento en el sur (Rusticucci y Barrucand, 2004), llevando así a una disminución en la amplitud térmica en el sector norte. En cuanto a los extremos, se encontraron tendencias negativas en la cantidad de noches frías y de días cálidos en verano, mientras que la cantidad de noches cálidas y días fríos aumentó en la segunda mitad del siglo XX en algunas regiones del país. En Rusticucci y Tencer (2008) se estudió el comportamiento de los extremos anuales absolutos de la temperatura mínima y máxima y se encontró que la probabilidad de ocurrencia de los extremos cálidos anuales de la temperatura máxima disminuyó en las últimas décadas, mientras que aumentó en la temperatura mínima. Los cambios en las temperaturas extremas que se pueden presentar ante un aumento de CO₂ pueden ocasionar impactos severos, especialmente si no se está preparado para ellos. Por lo tanto, es esencial el conocimiento del comportamiento de los extremos climáticos de la región, para estimar cómo pueden cambiar y cuál es la incertidumbre inherente a las proyecciones futuras.

Los eventos extremos pueden ser definidos de diversas formas. En general, se entiende por evento extremo un evento *raro*, desde el punto de vista de su frecuencia, en una determinada región. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, según sus siglas en inglés) en su informe de 2007 define como extremos todos aquellos eventos que sean *raros* para un determinado lugar y momento del año. Las definiciones de raro varían, pero en general se entiende por evento extremo un evento tan raro (o

más) como el percentil 10 o el percentil 90 de la función de densidad de probabilidad observada. Es decir, un evento extremo es aquél que ocurre menos del 10% de las veces (IPCC, 2007). Así, los eventos de temperatura que superen el percentil 90 serán considerados por el IPCC como eventos extremos cálidos y los eventos de temperatura que se encuentren por debajo del percentil 10 como eventos extremos fríos. Si se quiere estudiar eventos aún más extremos, basta con considerar percentiles más altos para los extremos cálidos y más bajos para los extremos fríos, como pueden ser los percentiles 95 y 5, respectivamente.

Los eventos extremos definidos de esta forma se basan en su frecuencia de ocurrencia. Sin embargo, podemos utilizar definiciones basadas en la magnitud, en la duración o en el impacto del evento. Por ejemplo, podemos considerar como evento extremo frío de temperatura mínima todos aquellos valores inferiores a 0°C ya que en general estos eventos dan lugar a heladas y por lo tanto son de interés para la agricultura. También podemos considerar como evento extremo de precipitación todos aquellos valores de precipitación diaria que superen una determinada cantidad de milímetros caídos en el día. O podemos definir que más de 30 días consecutivos sin precipitación representa un evento extremo llamado sequía. En todos estos casos, los umbrales definidos *a priori* dependerán de la región y el período del año que estemos estudiando.

En este trabajo nos proponemos estudiar la variabilidad interdecádica de los eventos extremos cálidos de temperatura en Argentina, entendiendo por extremo todos aquellos valores que superen el percentil 95. Para ello, utilizamos la Teoría de Valores Extremos para estimar los valores de retorno de los extremos y analizar los cambios en los mismos a lo largo del período 1941-2000. Un valor de retorno es un valor que se espera sea superado en promedio una vez cada p años, donde p es el período de retorno. Es decir, los períodos de retorno nos dan información sobre la frecuencia de ocurrencia de los valores de retorno: un aumento en los valores de retorno representa un aumento en la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos estudiados.

En particular, en este trabajo se utiliza la distribución Generalized Pareto (GP), perteneciente a la Teoría de Valores Extremos, que nos permite modelar estadísticamente los eventos que superan cierto umbral fijo (en este caso, el percentil 95) a partir de los datos diarios observados.

MATERIALES Y METODOS

En este trabajo se utilizaron datos diarios de temperatura mínima y máxima en cinco estaciones meteorológicas de Argentina, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, en el período 1941-2000: San Miguel de Tucumán, Tucumán (TUC, 26.80°S, 65.20°W); Observatorio Central Buenos Aires, Buenos Aires (OBA, 34.58°S, 58.48°W); Pergamino, Buenos Aires (PGM, 33.93°S, 60.55°W); Pilar, Córdoba (PIL, 31.66°S, 63.88°W); Santa Rosa, La Pampa (SRS, 36.56°S, 64.26°W). Ver Figura 1.

A cada serie de temperatura se le sustrajo la onda anual media calculada sobre el período 1961-1990 para obtener series diarias de anomalías. Además, dado que la temperatura diaria no puede considerarse una serie de datos independientes, se filtró la serie de anomalías diarias, tomando el mayor de cada 5 valores consecutivos (Jones *et al.*, 1999).

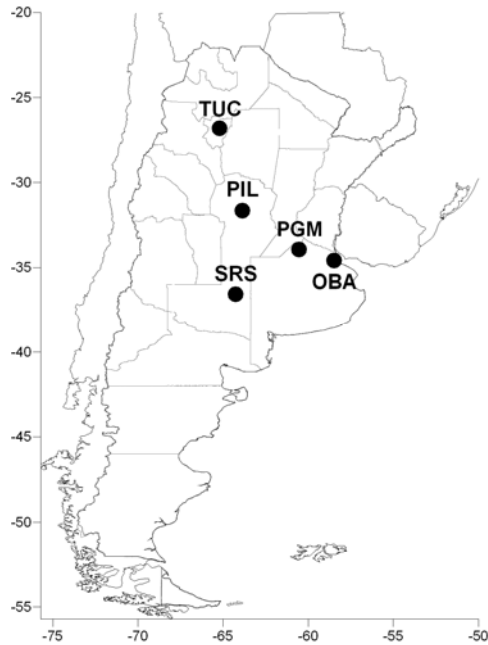


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el trabajo.

De esta forma se generaron las series HTn y HTx, correspondientes a series independientes de anomalías de temperatura mínima y máxima, respectivamente, que se utilizaron para el estudio de los extremos cálidos de ambas variables. Luego se dividió la serie completa del período 1941-2000 en tres sub-períodos no superpuestos y consecutivos de 20 años cada uno: 1941-1960, 1961-1980 y 1981-2000, y se eliminó la tendencia lineal en cada sub-período, en caso de que la misma fuera significativa con un 95% de confianza.

A cada uno de los sub-períodos se le ajustó la distribución GP utilizando el método de máxima verosimilitud y tomando como umbral (u) el percentil 95 de cada serie. La función de distribución GP para la variable aleatoria X tiene la siguiente forma (Coles, 2001):

$$H(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}} \right)^{-1/\xi}$$

con $y = X - u$. Esta función de distribución es condicional a $X > u$ y sólo está definida para el conjunto $\{y : y > 0 \wedge (1 + \xi y/\tilde{\sigma}) > 0\}$ con $\tilde{\sigma} = \sigma + \xi(u - \mu)$, donde μ es el parámetro de posición, σ el parámetro de escala y ξ el parámetro de forma.

Por último, se estimaron los valores de retorno y su intervalo de 95% de confianza, basados en la distribución GP ajustada en cada sub-período.

RESULTADOS

Con el objetivo de estudiar la variabilidad observada en la intensidad de los eventos extremos de temperatura se comparan los umbrales obtenidos en los distintos sub-períodos. En la Figura 2 se puede ver la evolución temporal de los umbrales de la variable HTn para las distintas estaciones meteorológicas estudiadas.

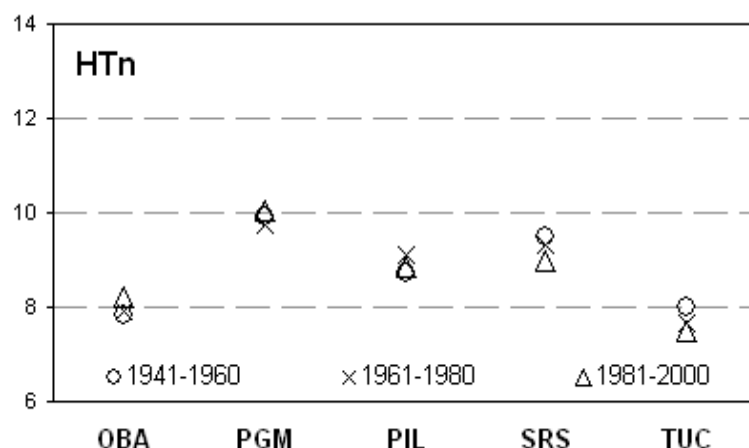


Figura 2. Umbrales de HTn (en °C) para los distintos sub-períodos y estaciones meteorológicas estudiados.

Como puede observarse, no hay cambios importantes en el valor del umbral, es decir, en el valor del percentil 95 de la serie de anomalías de temperatura mínima. Sin embargo, en el caso de la temperatura máxima (Figura 3) se observa que el umbral disminuye de un período a otro en forma sucesiva, encontrándose diferencias de hasta 4°C en el percentil 95 calculado en el primer y último período. Esto indica una disminución en la intensidad de los eventos extremos cálidos de la temperatura máxima en el período 1941-2000.

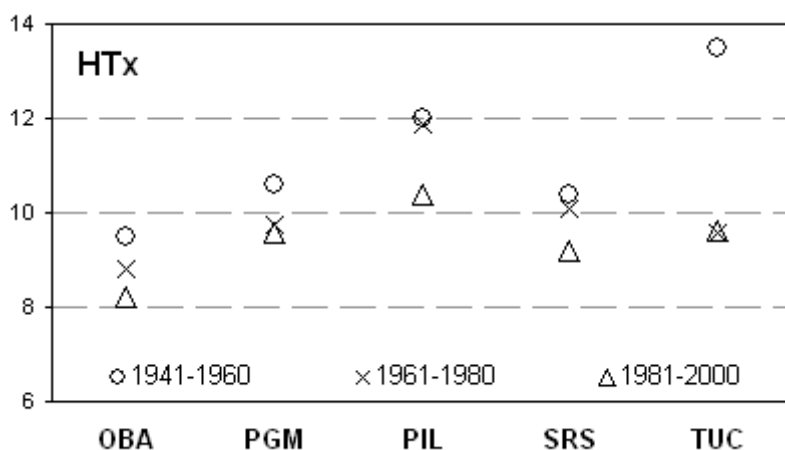


Figura 3. Umbrales de HTx (en °C) para los distintos sub-períodos y estaciones meteorológicas estudiadas.

Por otro lado, la comparación de los valores de retorno estimados a partir de la distribución GP ajustada a cada sub-período nos permite evaluar la variabilidad interdecádica en la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos. En las Figuras 4 y 5 se muestra la evolución del valor de retorno de 30 años a lo largo de los tres sub-períodos estudiados para cada estación meteorológica para las variables HTn y HTx, respectivamente.

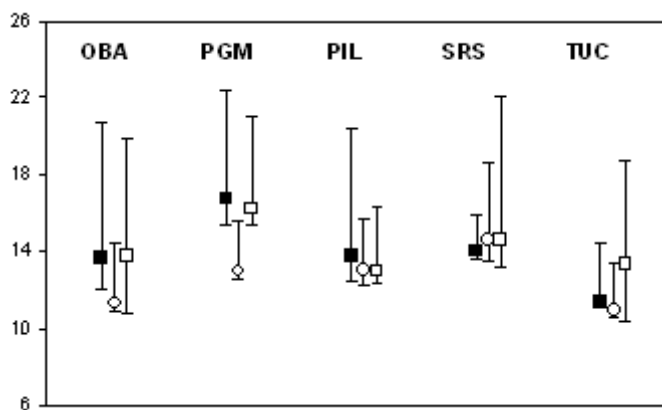


Figura 4. Valores de retorno (en °C) de 30 años para HTn para las distintas estaciones meteorológicas estudiadas y los distintos sub-períodos (1941-1960 en cuadrado lleno, 1961-1980 en círculo vacío, 1981-2000 en cuadrado vacío). Las barras indican el intervalo de 95% de confianza en la estimación del valor de retorno.

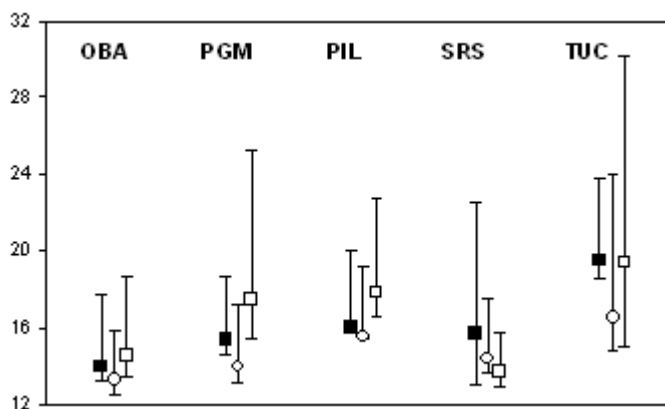


Figura 5. Valores de retorno (en °C) de 30 años para HTx para las distintas estaciones meteorológicas estudiadas y los distintos sub-períodos (1941-1960 en cuadrado lleno, 1961-1980 en círculo vacío, 1981-2000 en cuadrado vacío). Las barras indican el intervalo de 95% de confianza en la estimación del valor de retorno.

En ambas variables se puede observar una disminución del valor de retorno de 30 años entre el primer sub-período estudiado (1941-1960) y el segundo (1961-1980) en todas las estaciones, excepto en SRS en el caso de HTn. Esta disminución en el valor de retorno está asociada a una disminución de la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos cálidos de temperatura. Sin embargo, al analizar los cambios en el valor de retorno de 30 años entre el segundo y el tercer sub-período (1981-2000), se observa un aumento asociado a un aumento en la frecuencia de ocurrencia de los extremos. Este aumento es más notorio en la HTx, con excepción de SRS.

Al analizar el comportamiento de otros valores de retorno de entre 2 y 100 años se observó el mismo patrón de cambios entre los distintos subperíodos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ajustó la distribución GP a las anomalías diarias de temperatura mínima y máxima observadas en cinco estaciones de Argentina en el período 1941-2000. El ajuste se hizo por sub-períodos (1941-1960, 1961-1980, 1981-2000) con el objetivo de analizar la variabilidad interdecádica en la intensidad y la frecuencia de ocurrencia de los extremos cálidos de temperatura.

El análisis de la evolución temporal de los umbrales (percentil 95) utilizados para el ajuste de la distribución GP indica que la intensidad de los eventos extremos cálidos de la temperatura máxima disminuye, mientras que en la temperatura mínima esta disminución no se observa.

Los cambios en los valores de retorno estimados a partir de los distintos ajustes muestra que la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos cálidos de las temperaturas mínima y máxima disminuye del período 1941-1960 a 1961-1980, pero aumenta en los últimos 20 años.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos UBACYT X170, ANPCYT BID 1728/OC-AR PICT 38273, y el proyecto del Programa Marco 7 de la Comunidad Europea CLARIS LPB-A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin.

BIBLIOGRAFÍA

- COLES, S. 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. *Springer Series in Statistics*, 208 pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- JONES, P.D.; HORTON, E.B.; FOLLAND, C.K.; HULME, M.; PARKER, D.E. y BASNETT, T.A. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42(1):131-149.
- KATZ, R.W. y BROWN, B.G. 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21: 289-302.
- RUSTICUCCI, M. y BARRUCAND, M. 2004. Changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, 17: 4099-4107.
- RUSTICUCCI, M. y TENCER, B. 2008. Observed Changes in Return Values of Annual Temperature Extremes over Argentina. *J. Climate*, 21: 5455-5467.
- SCHÄR, C. y JENDRITZKY, G. 2004. Hot news from summer 2003. *Nature*, 432: 559-560.
- TRENBERTH, K.E. y JONES, P.D. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, S. Solomon et al., Eds., *Cambridge University Press*, 235-336.

CAMBIOS EN EL CLIMA DE ALTAS LATITUDES DURANTE EL ÚLTIMO SIGLO: ANÁLISIS DE LA SERIE DE TEMPERATURA DE ORCADAS

Changes in high latitude climate in the last century: analysis of the temperature series from Orcadas

Natalia Zazulie* y Matilde Rusticucci

Laboratorio de Extremos Climáticos, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, Universidad de Buenos Aires.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Dirección postal: Intendente Güiraldes 2160 - Ciudad Universitaria,

Pabellón II, 2do piso - C1428EGA.

*nzazulie@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

La estación meteorológica de las Islas Orcadas del Sur es la más antigua ubicada en la región antártica, con un record superior a 100 años de datos diarios (1903-2008). La importancia de esta estación radica en que ninguna otra de latitudes tan altas del hemisferio sur cuenta con datos tan antiguos que nos permitan conocer la variabilidad del clima desde principios del siglo XX. Para este trabajo se digitalizaron los datos diarios de temperatura para el período 1903-1950. Se analizaron tanto los valores medios como los extremos para las distintas épocas del año.

Las tendencias halladas en esta estación se encuentran entre las más grandes encontradas en cualquier otro lugar del planeta durante el siglo XX. Se encontraron tendencias positivas significativas en las cuatro estaciones del año desde 1950. En particular, para el otoño e invierno, el calentamiento en los extremos fríos (los percentiles 10 y 5) excede a los aumentos en los valores medios o en los extremos cálidos, lo que indica cambios en la circulación distintos para la estación fría en la Antártida. Los aumentos en verano se intensifican a partir de 1970, lo cual sugiere una contribución de la influencia del mínimo de ozono en la circulación de altas latitudes. Sin embargo, se encontraron tendencias positivas significativas en primavera y verano, previo al desarrollo del agujero de ozono. Esto último implica que otros factores podrían estar influenciando el clima de estas latitudes como por ejemplo el aumento de los gases de efecto invernadero durante el último siglo.

Palabras clave: altas latitudes, temperatura, Orcadas.

SUMMARY

The meteorological station of Islas Orcadas del Sur is the first one in the Antarctic region with a record of daily data from more than 100 years (1903-2008). The importance of this station is that no other high latitude station has such a long record to study climate variability since the beginning of twentieth century. The data for the period 1903-1950 has been digitalized for this study. Mean values and extremes were analyzed for different seasons.

The observed warming trends are among the largest found anywhere on Earth during the twentieth century. Significant positive trends were found for all seasons since

1950. Particularly in fall and winter, the warming of the cold extremes (coldest 5% and coldest 10% of days) substantially exceeds the warming of the mean or of the warmest days, providing a key indicator for cold season Antarctic climate change studies. Trends in the summer season means and extremes since 1970 are approximately twice as large as those observed earlier, supporting suggestions of additional regional warming in that season due to the effects of ozone depletion on the circulation. Further, in the spring and summer seasons, significant mean warming also occurred prior to the development of the Antarctic ozone hole (i.e., 1950-1970), supporting an important role for climate changes due to processes other than ozone depletion, such as greenhouse gas increases.

Key words: high latitudes, temperature, Orcadas.

INTRODUCCIÓN

La estación meteorológica de las Islas Orcadas del Sur es la más antigua ubicada en la región antártica con un record superior a 100 años de datos diarios (1903-2008). La importancia de esta estación radica en que ninguna otra de latitudes tan altas del hemisferio sur cuenta con datos tan antiguos que nos permitan conocer la variabilidad del clima desde principios del siglo XX.

Por otro lado, la Antártida es una de las regiones más sensibles al cambio climático. El continente antártico ha sufrido un calentamiento al oeste de la región, y un enfriamiento en algunas estaciones del año en el este de la región (Comiso 2000; Turner *et al.* 2005; Marshall *et al.* 2006, Marshall 2007; Chapman y Walsh 2007). Las diferencias en las tendencias se deben al aumento observado, en las últimas décadas, en los vientos del oeste que rodean el polo sur, que a su vez está asociado con la disminución del ozono estratosférico y el aumento de los gases de efecto invernadero (Thompson y Solomon 2002; Gillett y Thompson 2003; Marshall *et al.* 2004; Arblaster y Meehl 2006; Cai y Cowan 2007).

El estudio de los extremos de temperatura resulta de importancia ya que éstos podrían tener impacto en un gran número de aspectos climáticos, como retroceso de glaciares, el hielo en el mar y la cobertura de nieve, así como los efectos ecológicos en la flora y la fauna polar (Vaughan *et al.* 2001). El hecho de tener más de un siglo de observaciones diarias permite explorar con detalle cambios en los extremos que no son posibles con series de datos mensuales.

El objetivo de este trabajo es analizar la serie de temperatura de las Islas Orcadas del Sur, que es el registro más largo de observaciones de temperatura diaria en la región Antártica.

MATERIALES Y METODOS

Las islas Orcadas del Sur se ubican en 60° 44' Sur y 44 °44' Oeste (Figura1). La estación comenzó a realizar mediciones meteorológicas y geomagnéticas cuando, en 1903, una expedición escocesa llegó a las islas. Un año después, tras un acuerdo con el gobierno nacional, las islas pasaron a ser argentinas. La estación cuenta con datos diarios de diversas variables meteorológicas. Este estudio se centra en el análisis de la temperatura diaria. Para ello se digitalizaron los datos correspondientes al período 1903-1950, ya que se encontraban únicamente en papel.

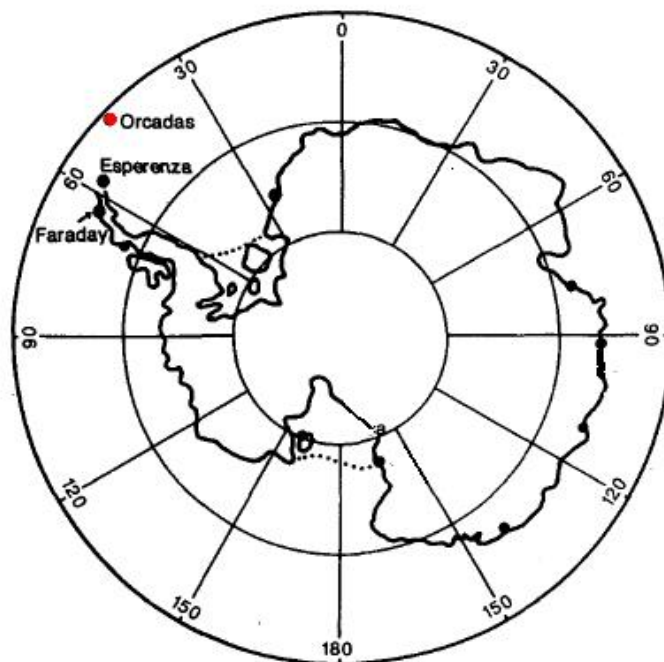


Figura 1: Ubicación de la estación Orcadas en rojo.

Los datos en papel y los datos en formato digital (de 1957 a 2008) fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional.

Desde 1903 a 1950, se reportaban observaciones horarias y las medias diarias fueron calculadas como promedio sobre las 24 observaciones, mientras que a partir de 1950 las medias diarias fueron construidas a través de las observaciones de temperatura máxima y temperatura mínima diaria $[(T_{max}+T_{min})/2]$. La compatibilidad de estas dos formas de calcular la media diaria en el análisis de tendencias fue mostrada en estudios previos (Karl *et al.* 1993). Además, como la temperatura cambia muy poco a lo largo del día típico en Antártida debido a la insolación solar constante y, en particular en Orcadas, debido como consecuencia de a la influencia oceánica, el cambio es despreciable en esta estación.

Para estudiar los extremos de temperatura se calcularon los percentiles 5, 10, 90 y 95 por estación y, para el verano, se calculó la frecuencia porcentual de días por encima o por debajo de un umbral.

RESULTADOS

Onda anual en distintos períodos

Los cambios en la temperatura de una estación pueden tener mayor importancia en algunas épocas del año que en otras. Esto se refleja en la onda anual de temperatura. Con el objetivo de estudiar los cambios en la onda anual y los cambios en la duración de las estaciones, se calculó la onda anual promedio cada 20 años (Figura 2). Se observa un

fuerte calentamiento desde fines de la primavera hasta principios del otoño (noviembre a marzo), particularmente desde la década de 1980.

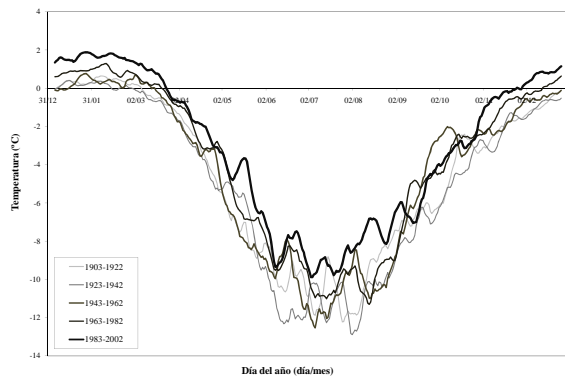


Figura 2. Onda anual de temperatura promediada cada 20 años desde 1903 a 2002. Se aplicó un filtro de 10 días.

Por otro lado, aumentó sustancialmente la duración de la época del año en la cual la temperatura supera los 0°C, y esto tiene especial importancia para la formación y derretimiento de los hielos en la región. El último período, entre 1983 y 2002, resultó ser el más cálido durante casi todo el año.

Tendencias en medias y extremos durante el siglo 20

En la tabla 1 se muestran las tendencias de los valores medios estaciones y los extremos (percentiles 95, 90, 10 y 5). Estas tendencias se encuentran entre las más grandes encontradas en cualquier otro lugar del planeta durante el siglo 20XX. Se observan tendencias significativas en todas las estaciones del año para el período completo, tanto para las temperaturas medias como para los extremos fríos y cálidos (excepto para los extremos fríos en primavera).

Cambios en extremos de temperatura en verano

En la Figura 3, se muestra la distribución de frecuencias de la temperatura diaria en verano en los mismos períodos de 20 años que en la Figura 2. Si bien la forma de la distribución se mantuvo constante en esta estación, las temperaturas medias se corrieron hacia valores más cálidos en las últimas décadas. También se observan importantes cambios en los extremos fríos y cálidos, consistente con las tendencias halladas en los percentiles 95, 90, 10 y 5.

Tabla 1. Tendencias (°C/10 años) de temperatura observada en Orcadas para las distintas estaciones del año y en distintos períodos. Los números en negrita representan tendencias significativas con 95% de confianza, y se indica el valor de la desviación estándar por dos. P95 y P90 corresponden al 5 y 10% de los días más cálidos, respectivamente, mientras que P5 y P10 representan a los extremos fríos.

		1903-2007	2	1957-2007	2	1903-1970	2
VERANO	media	0.18	0.04	0.20	0.11	0.10	0.08
	P95	0.21	0.05	0.25	0.13	0.11	0.09
	P90	0.19	0.04	0.23	0.11	0.11	0.08
	P10	0.19	0.05	0.21	0.15	0.12	0.10
	P5	0.21	0.06	0.23	0.18	0.13	0.12
OTOÑO	media	0.22	0.10	0.29	0.29	0.12	0.22
	P95	0.13	0.05	0.15	0.16	0.07	0.08
	P90	0.12	0.04	0.15	0.15	0.07	0.08
	P10	0.47	0.26	0.53	0.66	0.29	0.55
	P5	0.53	0.28	0.47	0.74	0.39	0.59
INVIERNO	media	0.23	0.15	0.35	0.39	0.14	0.32
	P95	0.09	0.05	0.19	0.16	0.05	0.11
	P90	0.09	0.07	0.22	0.17	0.03	0.14
	P10	0.36	0.19	0.15	0.55	0.41	0.38
	P5	0.33	0.20	0.14	0.61	0.41	0.36
PRIMAVERA	media	0.17	0.09	-0.01	0.26	0.24	0.18
	P95	0.20	0.04	0.05	0.13	0.21	0.08
	P90	0.18	0.04	0.07	0.13	0.17	0.07
	P10	0.22	0.22	-0.26	0.59	0.47	0.47
	P5	0.23	0.25	-0.35	0.67	0.49	0.52

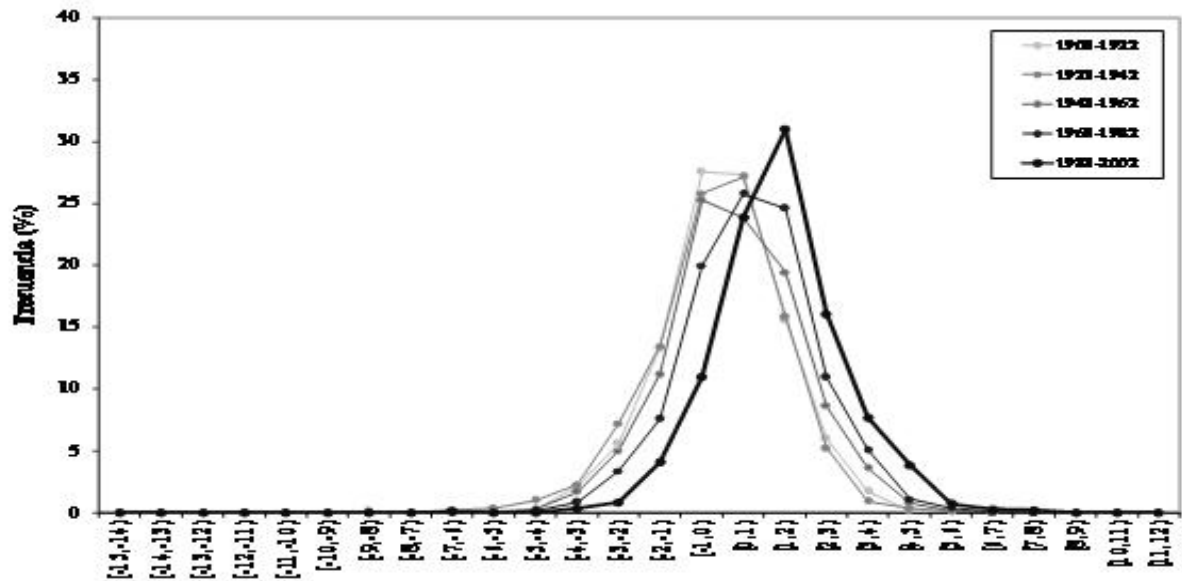


Figura 3. Distribución de frecuencias de datos diarios de temperatura observada en verano (diciembre, enero y febrero) para los períodos de 20 años. Se utilizaron intervalos de 1°C. También se muestra la circulación para los días más extremos (fríos y cálidos): altura geopotencial en 850 hPa para los días más fríos y más cálidos del período 1995-99.

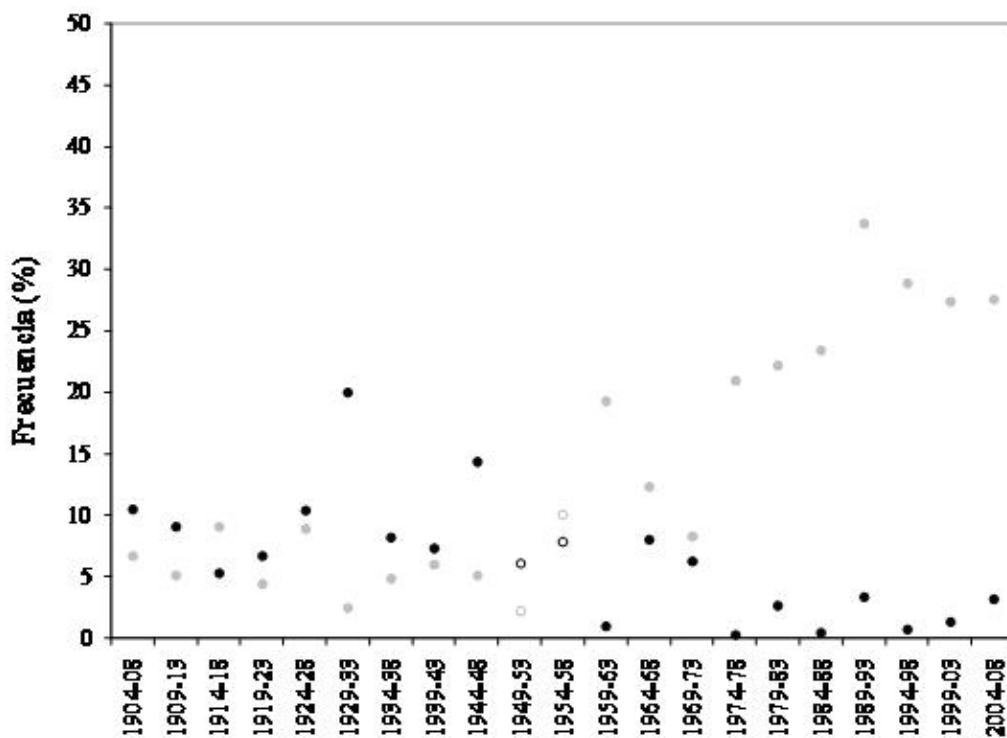


Figura 4. Porcentajes de días cálidos (temperatura > 2°C) en gris, y de días fríos (temperatura < -2°C) en negro agrupados cada 5 años para el verano.

Por otro lado, tal como se muestra en la Figura 4, se estudiaron los extremos en verano como frecuencia de temperaturas que excedieron valores fijos (-2 y 2°C) que se eligieron tras inspeccionar la distribución de temperaturas (ver Figura 3). Los valores se expresan en porcentajes para poder comparar períodos con distinta cantidad de observaciones producto de datos faltantes. Se agruparon los porcentajes de días con temperatura por encima de los umbrales mencionados, en diciembre, enero y febrero, en períodos de 5 años. Se observa un pronunciado aumento en la frecuencia de ocurrencia de temperaturas por encima de 2°C en las últimas décadas, mientras que los extremos fríos (temperaturas $< -2^{\circ}\text{C}$) han prácticamente desaparecido en el mismo período.

CONCLUSIONES

El calentamiento en los extremos fríos (los percentiles 10 y 5) excede a los aumentos en los valores medios o en los extremos cálidos, lo que indica cambios en la circulación distintos para la estación fría en Antártida.

Los aumentos en verano se intensifican a partir de 1970, lo cual sugiere una contribución de la influencia del mínimo de ozono en la circulación de altas latitudes. Sin embargo, se encontraron tendencias positivas significativas en primavera y verano, previo al desarrollo del agujero de ozono. Esto último implica que otros factores podrían estar influenciando el clima de estas latitudes como, por ejemplo, el aumento de los gases de efecto invernadero durante el último siglo, aunque también hay que considerar la variabilidad interna para explicar alguno de estos cambios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos UBA X170, PICT05 38273-ANPCYT y por Chemical Sciences Division (CSD) of the NOAA Earth System Research Laboratory (ERSL), a través de la estadía de Natalia Zazulie en sus laboratorios de Boulder, Colorado, Estados Unidos. Las autoras agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por los datos provistos.

BIBLIOGRAFÍA

- ARBLASTER, J.M. y MEEHL, G.A. 2006. Contributions of external forcings to the Southern Annular Mode trends. *J. Clim.* 19: 2896–2905.
- CAI, W. y COWAN, T. 2007. Trends in Southern Hemisphere circulation in IPCC AR4 models over 1950–99: Ozone depletion versus greenhouse forcing. *J. Clim.* 20: 681–693.
- CHAPMAN, W.L. y WALSH, J.E. 2007. A synthesis of Antarctic temperatures. *J. Clim.* 20: 4096–4117.
- COMISO, J. 2000. Variability and Trends in Antarctic Surface Temperatures from In Situ and Satellite Infrared Measurements. *J. Clim.* 13:1674–1696.
- GILLET, N. y THOMPSON, D.W.J. 2003. Simulation of recent southern hemisphere climate change. *Science* 302: 273–275.
- KALNAY, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R. y Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year. Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437–471.
- KARL, T.R.; JONES, P.D.; KNIGHT, R.W.; KUKLA, G.; PLUMMER, N.; RAZUVAYEV, V.; GALLO, K.P.; LINDSEAY, J.; CHARLSON R.J. y

- PETERSON, T.C. 1993. A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Am. Met. Soc.* 74: 1007-1023.
- MARSHALL, G.J.; STOTT, P.A.; TURNER, J.; CONNELLEY, W.M.; KING J.C. y LACHLAN-COPE, T.A. 2004. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the southern hemisphere. *Geophys. Res. Lett.* 31, L14205.
- MARSHALL, G.J.; ORR, A.; VAN LIPZIG N.P.M. y KING, J.C. 2006. The Impact of a Changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula Summer Temperatures. *J. Clim* 19: 5388–5404.
- MARSHALL, G.J. 2007. Half-century seasonal relationships between the Southern Annular Mode and Antarctic temperatures. *Int. J. Clim.* 27: 373–383.
- THOMPSON, D.W.J. y SOLOMON, S. 2002. Interpretation of recent southern hemisphere climate change. *Science* 296: 895-899.
- TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J.; LACHLAN-COPE, T.A.; CARLETON, A.M.; JONES, P.D.; LAGUN, V.; REID P.A. y IAGOVKINA, S.2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Clim.* 25: 279-294.
- VAUGHAN, D.G.; MARSHALL, G.J.; CONNOLLEY, W.M.; KING J.C. y MULVANEY, R. 2001: Devil in the detail, *Science* 293: 1777-1779.

APTITUD AGROCLIMÁTICA DEL CÁRTAMO Y PASTO VARILLA PARA LA ARGENTINA

Agroclimatic aptitude of safflower and switchgrass in Argentina

**Sofía Teresa Cañas Zalazar*, Stella Maris Fernanda, Rafael Horacio Hurtado
y Danilo Alejandro Carnelos**

Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Facultad de Agronomía.
U.B.A. Av. San Martín 4453. (C1417DSE) Ciudad de Buenos Aires,
*scanas@agro.uba.ar

RESUMEN

El desarrollo de nuevas energías alternativas a la fósil, se ha acelerado debido a la actual crisis energética y a la necesidad de adaptarse a las consecuencias del cambio climático global. Dentro de éstas, se plantea la elaboración de biocombustibles, una de las posibles formas de contribuir a mejorar la calidad ambiental. Por otro lado, también, la búsqueda de cultivos de menor o nula importancia en la alimentación humana que no compitan con los cultivos tradicionales y que respondan con una eficiente producción en aquellos suelos actualmente degradados, se hace impostergable. Entre estas opciones se encuentran el *Panicum virgatum* L. (pasto varilla) y el *Carthamus tinctorius* L. (cártamo), cultivos que responden a estas necesidades de producción, que no interfiere competitivamente con la de alimentos, representando una nueva alternativa socioeconómica. En consecuencia, el objetivo de este trabajo es zonificar desde el punto de vista agroclimático los cultivos de cártamo y los cultivares “lowland” de pasto varilla, con el fin de determinar las áreas aptas marginales e inaptas, para la difusión de estas producciones en la elaboración de biocombustibles. Para establecer los límites bioclimáticos de los cultivos se calculó una serie de índices bio y agroclimáticos que corresponden a las normales climáticas del periodo 1971–2000. Los índices bioclimáticos propuestos permitieron establecer varias zonas con distintas aptitudes para el crecimiento y desarrollo del pasto varilla y el cártamo, las cuales, es preciso, ajustar a nivel edáfico y socio económico para realizar un estudio completo de factibilidad.

Palabras clave. aptitud agroclimática, zonificación agroclimática, *Panicum virgatum* L., *Carthamus tinctorius* L., Límites bioclimáticos, biocombustibles.

SUMMARY

In order to adapt to the energy crisis and the consequences of global climatic change, the development of new energy sources, different from fossil, has accelerated. Within these, biofuels elaboration may improve environmental quality. In addition, the research on crops that have an efficient performance in degraded soils, and do not compete with those harvested for food, is necessary for the sustainability of these energy sources. *Panicum virgatum* L. (Switchgrass) and *Carthamus tinctorius* L. (Safflower) are two new socio economic alternatives for biofuels production. Consequently, the objective of this study is to determine the agroclimatic zoning of safflower, and “lowland” cultivars of switchgrass in Argentina, for the purpose of delimitate the apt, marginal and inapt regions where these two crops may be introduced in Argentina. To the extent of

establish the bioclimatic limits, bio and agroclimatic indexes were calculated from the average climatic data of 1971–2000. These indexes were used to locate boundaries of several zones with different aptitudes for the growth and or development of switchgrass and safflower. These zones have to be adjusted in the edafic, and socio economic fields, for the sake of perusing a complete study of suitable adaptation to argentine environment.

Key words: agroclimatic zoning, *Panicum virgatum L.*, *Carthamus tinctorius L.*, bioclimatic limits, biofuels

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de nuevas energías alternativas se ha acelerado debido a la crisis energética mundial. Dentro de éstas, se plantea la elaboración de biocombustibles: bioetanol, biodiesel y biogás. Éstos provienen de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos. Si bien no conseguirán reemplazar en su totalidad a la energía proveniente del combustible fósil, podrán ser utilizados en una etapa de transición hasta que sea posible la implementación a gran escala de otro tipo de energías renovables.

En Argentina, la sanción de la ley N° 26093 establece que a partir del 1 de enero de 2010, todo el gas-oil y la nafta que se comercialice en el país deben complementarse con un 5% de biodiesel y bioetanol, respectivamente. Por lo tanto, la búsqueda de cultivos para este objetivo, de menor o nula importancia en la alimentación humana, se hace impostergable.

El *Panicum virgatum L.* (pasto varilla) originario del este de los Estados Unidos, es un pasto perenne de verano, utilizado principalmente como forraje. Existen dos variedades potencialmente útiles para la producción de biocombustible: lowland y upland. En este sistema de producción se realiza una única cosecha de los tallos; la celulosa de las paredes es la fracción vegetal a partir de la cual es obtenido el bioetanol.

Otra alternativa, el *Carthamus tinctorius L.* (cártamo), oleaginosa invernada anual oriunda de Asia. A partir de esta especie se puede elaborar biodiesel, el cual procede de la transesterificación del aceite de su semilla; hoy su uso radica principalmente en la obtención de aceite comestible, harina de extracción y alimento para aves.

Numerosos autores trabajaron en la determinación de elementos bioclimáticos y agroclimáticos útiles para delimitar la difusión de estos cultivos. En el caso del pasto varilla, Van Esbroeck y Hussey (1997) trabajaron con tiempo térmico en la determinación de las etapas fenológicas y Petrucci *et al.*, (2005) determinaron la fecha óptima de cosecha en La Pampa. En cártamo, López Bellido, (2002) y Uslu *et al.*, (2002) estudiaron los efectos del estrés hídrico, entre otros factores; Oelke *et al.*, (2000) mencionan los días libres de helada necesarios para el desarrollo de este cultivo; Miller *et al.*, (2001) estudiaron la capacidad de adaptación del cártamo a partir de sus requerimientos de tiempo térmico en Manitoba, Canadá; Martínez *et al.*, (2008) estudiaron la evolución de la floración en Hilario Ascasubi, Buenos Aires; Esposito, (2006) en un estudio de mercado, plantea las posibles fechas de siembra para diferentes lugares del país. Asimismo, organizaciones como FAO y USDA presentan informes en sus respectivas páginas Web de los cultivos en los cuales se trabajó.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo es zonificar desde el punto de vista agroclimático los cultivos de cártamo y los cultivares “lowland” de pasto varilla, con el fin de determinar las áreas más relevantes, para la difusión de estas producciones en la