

# Meteoro logica

**PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA  
EN TEMAS METEOROLÓGICOS**

**Versión en línea**

**ISSN 1850-468X**

**Volumen 37 Número 2 Año 2012**

## **CONTENIDO**

- Mario Bidegain, G. Coronel, N. Ríos y B. de los Santos:*  
**ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA PARAGUAY** 47
- Lia Martins Costa do Amaral, C. T. Homann, V. Pinho y Y. Yamasaki:*  
**MESOSCALE FORECASTING OF AN EVENT OF NOVEMBER 2008 IN  
SANTA CATHARINA** 57
- Antonio de la Casa y Olga Nasello:*  
**TENDENCIAS PARCIALES DE LOS DÍAS DE LLUVIA Y LA  
INTENSIDAD MEDIA ANUAL EN LA PROVINCIA DE CÓRDOB,  
ARGENTINA.** 67
- Juan A. Rivera, Natalia Herrera, Carla N. Gulizia, Natalia B. Montroull,  
Pablo C. Spennemann y Natalia Zazulie:*  
**APLICACIÓN DE UN ÍNDICE PARA EL ANÁLISIS DE LAS  
CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN LLUVIOSA EN LA REGIÓN  
SUBTROPICAL DE ARGENTINA** 79

# Meteorología

**PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS**

**DIRECTORA**

ANDREA FABIANA CARRIL

**EDITORES EJECUTIVOS**

YANINA GARCÍA SKABAR  
OLGA PENALBA

**CONSEJO EDITORIAL**

E. KALNAY - U. MARYLAND/USA  
V. R. BARROS - UBA/CONICET/ARGENTINA  
H. FUENZALIDA - U. CHILE/CHILE  
J. N. PAEGLE - U. UTAH/USA  
M. N. NUÑEZ - UBA/CONICET/ARGENTINA  
E. R. LICHTENSTEIN - UBA/ARGENTINA  
N. A. MAZZEO - UTM/CONICET/ARGENTINA  
W. M. VARGAS - UBA/CONICET/ARGENTINA  
D. KAROLY - U. MELBOURNE/AUSTRALIA  
E. H. BERBERY - U. MARYLAND/USA  
S. HASTENRATH - U. WISCONSIN/USA  
M. E. SELUCHI - CPTEC - INPE/BRASIL  
A. M. GRIMM - U. F. PARANA/BRASIL  
M. A. F. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL  
H. LE TREUT - LMD-CNRS/FRANCIA  
G. RAGA - UNAM/MEXICO  
T. AMBRIZZI - U. SAO PAULO/BRASIL

J. PAEGLE - U. UTAH/USA  
H. CIAPPESONI - SMN/CONICET/ARGENTINA  
I. VELASCO - UBA  
J. RUTLLANT - U. CHILE/CHILE  
G. NECCO - IMFIA/UR/URUGUAY  
P. ACEITUNO - U. CHILE/CHILE  
J. B. VALDES - U. ARIZONA/USA  
P. L. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL  
C. A. NOBRE - CPTEC - INPE/BRASIL  
J. L. MINETTI - U. TUCUMAN/CONICET/ARGENTINA  
V. E. KOUSKY - NCEP/USA  
M. L. ALTINGER - INDEPENDIENTE/ARGENTINA  
B. SCIAN - U. NAC. DEL SUR  
P. WAYLEN - U. FLORIDA/USA  
J. ZAWADZKI - MCGILL U./CANADA  
R. D. GARREAU U. CHILE/USA  
R. GARCIA - NCAR-ACD/USA

*Objetivo de la revista: Meteorologica publica y difunde trabajos y resultados de investigación teórica y aplicada en todas las áreas de las ciencias atmosféricas.*

*Sistema de arbitraje: Para que los trabajos sean incluidos en la revista deberán ser evaluados por, al menos, dos referís independientes. Todas las decisiones tomadas por la Dirección serán finales.*

Indizada en Meteorological & Geostrophysical Abstracts  
Incluida en el catálogo del sistema LATINDEX



Forma parte del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas

© 2012 Centro Argentino de Meteorólogos. Propietario  
Intendente Güiraldes 2160  
Ciudad Universitaria, Pabellón II, 2° Piso  
C1428EHA Buenos Aires, Argentina

Queda hecho el depósito legal que marca la ley 11723.  
Registro de la Propiedad Intelectual en trámite  
ISSN: Versión en línea 1850-468X

## ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA PARAGUAY

Mario Bidegain<sup>1</sup>, G. Coronel<sup>2</sup>, N. Ríos<sup>2</sup> y B. de los Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

<sup>2</sup> Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. Asunción, Paraguay

(Manuscrito recibido el 4 de marzo de 2010, aceptado el 26 de abril de 2011)

### RESUMEN

Se estimaron los escenarios climáticos futuros de temperatura, precipitación, humedad específica y radiación solar, para la región centrada sobre el Paraguay. Se utilizaron salidas de cuatro Modelos Climáticos Globales (HADCM3, ECHAM5, CSIRO-mk3 y GFDL 2.0), para 2020, 2050 y 2080, y escenarios socioeconómicos SRES A2 y B2. Se observa una dispersión en las estimaciones de la precipitación, las mayores reducciones (-6%) se ubicarían sobre la cuenca del río Paraguay y los mayores incrementos (+5%) en la región oriental. Los escenarios futuros de temperatura, estiman un aumento de +1° C para 2020, +2.5 °C para 2050 y +4.5 °C para 2080. Los mayores incrementos serían sobre la cuenca del Río Paraguay y los menores sobre el sureste. La humedad específica aumentaría sobre toda la región +0.2 gr/kg para 2050 y +0.3 gr/kg para 2080. Los mayores crecimientos serían sobre la cuenca del Río Paraná. Se observaría un incremento de la radiación solar sobre el altiplano Boliviano y ligeros decrecimientos en el suroeste. Con el sistema PRECIS V1.6 se obtuvieron escenarios climáticos de alta resolución para el periodo 2081-2090, estos muestran incrementos de la temperatura de +2° C sobre Paraguay.

*Palabras clave:* Escenarios climáticos, Paraguay, downscaling.

### FUTURE CLIMATE SCENARIOS OVER PARAGUAY

#### ABSTRACT

Were estimated future climate scenarios of temperature, precipitation, specific humidity and solar radiation for the region centered on Paraguay. Four global climate model outputs (HadCM3, ECHAM5, GFDL 2.0 and CSIRO-Mk3 ) were used, for 2020, 2050 and 2080, with socioeconomic scenarios SRES A2 and B2. There is a significant differences in the precipitation estimatives, the greatest reductions (-6%) would be located over Paraguay river basin and the largest increases (+5%) in the eastern region. The future temperature change scenarios show a warming of 1° C by 2020, 2.5 ° C by 2050 and +4.5 °C by 2080. The greatest warming could be verified over the Paraguay River basin and minors over the southeastern. The specific humidity could be increased over the entire region +0.2 gr/kg by 2050 and +0.3 gr/kg by 2080. The major increase could be occurring on Rio Paraná basin. An increase in solar radiation could be occurring over the Bolivian Altiplano and a decrease in the southwestern region. With the PRECIS system V1.6 we developed future climate scenarios in high resolution for the period 2081-2090, increase in annual average temperature +2° C would be expected over Paraguay.

*Keywords:* Climate Scenarios, Paraguay, downscaling.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las informaciones fundamentales requeridas en los estudios sectoriales de impacto del cambio climático, son los llamados escenarios climáticos futuros. Estas descripciones de los climas futuros, o escenarios, se obtienen de experimentos, forzados por distintos incrementos de gases de efecto invernadero, usando Modelos Climáticos Globales (GCMs por sus siglas en inglés). La historia del uso de GCMs para estudios de impacto se extiende al menos durante los últimos 20 años. Algunos trabajos como el de Hulme y Carter (1999) proveen pistas sobre cuáles son las fuentes de incertidumbre de estos tipos de estudios. Estas incertidumbres incluyen aquellas que provienen de los diferentes escenarios socioeconómicos futuros (Nakicenovic 1998), de las propias diferencias entre GCMs (Kittel et al 1998) y de las impredecibilidades del sistema climático (Mitchell et al 1999). De manera de cubrir algunas de estas incertidumbres hemos seleccionado dos de los posibles futuros escenarios socioeconómicos SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (Nakicenovic 2000), los llamados A2 y el B2. En relación a las diferencias entre modelos hemos seleccionado cuatro GCMs. Estos cuatro han mostrado tener la mejor performance en la región en relación a variables como precipitación, temperatura y presión atmosférica en superficie (Marengo, 2007, Bidegain 2006, Hoftadter 1997).

Las dos principales variables estudiadas han sido la temperatura del aire y en la precipitación. Estas dos variables permiten proyectar numerosos impactos sectoriales como: consumo y generación de energía eléctrica, recursos hídricos, etc. Para posibilitar estudios de otros sectores como por ejemplo en el área de salud y la posible extensión de algunos vectores transmisores de enfermedades se han incorporado a este trabajo las proyecciones futuras de otras dos variables como son humedad específica y radiación solar global en superficie. De manera de minimizar, al menos en parte, algunas de las diferencias entre GCMs se han tomado las últimas corridas disponibles para el Cuarto y último informe del IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) publicado en el año 2007.

## 2. DATOS Y ANÁLISIS

Para este estudio, a pesar de disponerse de las salidas de los GCMs sobre todo el planeta, hemos

seleccionado la región 10° – 30° S y 67° – 47° W, que incluye no sólo el territorio paraguayo sino también las dos principales cuencas hidrográficas de la región (cuencas del Río Paraná y Paraguay).

Los futuros cambios fueron estimados basados en un ensamble (promedio) de cuatro modelos climáticos globales, que han participado en el Cuarto Informe del IPCC (Contribution of Working Group I, 2007). Seleccionamos las salidas para los horizontes temporales de las décadas centradas en 2020 (2010-2039), 2050 (2040-2069) y 2080 (2070-2099), para dos escenarios socioeconómicos: SRES A2 (alto) que es un escenario que describe un mundo futuro muy heterogéneo donde la regionalización es dominante, habría un fortalecimiento de las identidades culturales regionales, un crecimiento poblacional alto, y menos preocupación en relación a un desarrollo económico rápido y el SRES B2 (bajo) que describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sustentabilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Los cuatro modelos climáticos (GCMs) seleccionados son: HADCM3. La versión 3 fue desarrollada en el Centro Hadley (UK). La componente atmosférica del HadCM3 tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2.5° de latitud por 3.75° de longitud, el modelo ECHAM5/OPYC3 fue desarrollado en cooperación entre el Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI) y el Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) en Hamburgo, Alemania. El modelo ECHAM ha sido desarrollado desde el modelo del ECMWF. La componente atmosférica (ECHAM5) tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2.8° de latitud por 2.8° de longitud, el modelo CSIRO-Mark 3.0/MOM2.2 ha sido desarrollado por el CSIRO de Australia y su componente atmosférica posee 18 niveles en la vertical y con 1.875° de latitud por 1.8.75° de longitud, el modelo GFDL-CM2.0 fue desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) de la NOAA (USA). El modelo atmosférico tiene 2.0° latitud por 2.5° de

longitud y 24 niveles en la vertical. Las salidas de estos Modelos Climáticos Globales fueron extraídas del Data Distribution Centre del IPCC (

[http://www.ipcc-data.org/ar4/gcm\\_data.html](http://www.ipcc-data.org/ar4/gcm_data.html)).

De manera de componer un ensemble de la salida de los cuatro GCMs se llevaron las salidas a una resolución espacial común de 2.5° latitud x 2.5° longitud. Las salidas gráficas obtenidas del IPCC DDC fueron analizadas y desplegadas gráficamente con el software Surfer Versión 8 (<http://www.goldensoftware.com/>).

Asimismo a fin de desarrollar una aproximación a los escenarios de alta resolución sobre la región fue utilizado la versión V1.6 del modelo climático regional PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies). Este fue desarrollado por el Hadley Centre de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, y forma parte de la versión del modelo de circulación regional HadRM3P (Jones et al. 2004). El PRECIS tiene 19 niveles verticales y dos posibles resoluciones horizontales, 0.5° por 0.5° ó 0.25° por 0.25° latitud por longitud. Para este experimento fueron elegidas las condiciones de borde del modelo climático global HADCM3 para el periodo 2081-2090.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Temperatura

Como resultado del ensemble multimodelo para el escenario futuro centrado en la década de 2020, se muestra un calentamiento sobre el territorio paraguayo entre +1.0° y +1.3 °C, para la región centrada sobre Paraguay entre +0.8° y +1.3°C para el escenario A2 (ver figura 1). Para la década del 2050 la región presenta un calentamiento entre +1.5° y 2.5°C y sobre territorio del Paraguay entre +1.8 y +2.5 °C (ver figura 2). El aumento de temperatura del aire previsto para la década de 2080 varía entre 2.5° y 4.8°C para la región y en particular sobre territorio paraguayo entre 3.8° y 4.8°C. En todos los casos, los mayores incrementos se verificarían sobre la cuenca del Río Paraguay y norte del Chaco paraguayo y los menores incrementos sobre el sur de la región oriental.

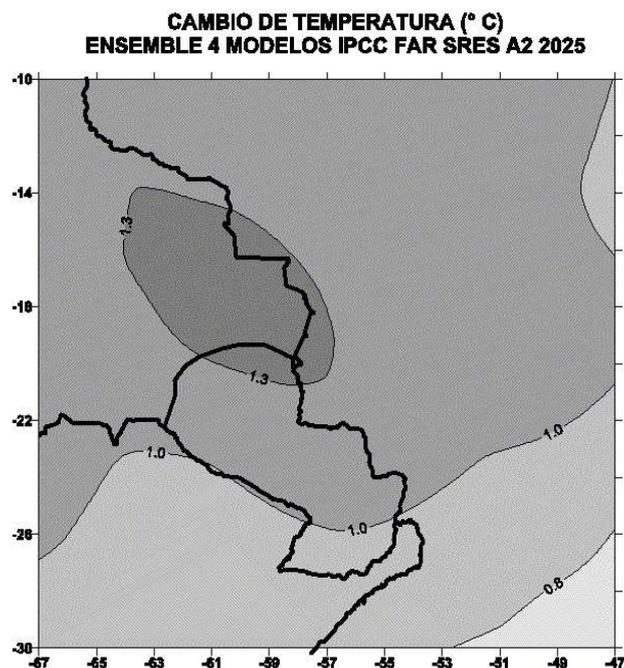


Figura 1: Cambio en la temperatura (°C) década de 2020 (SRES A2)

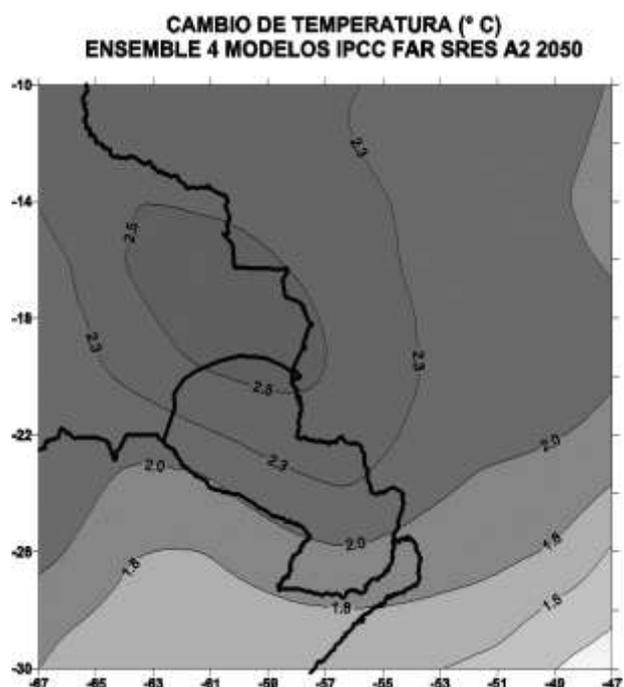


Figura 2: Cambio en la temperatura (°C) para la década de 2050 (SRES A2)

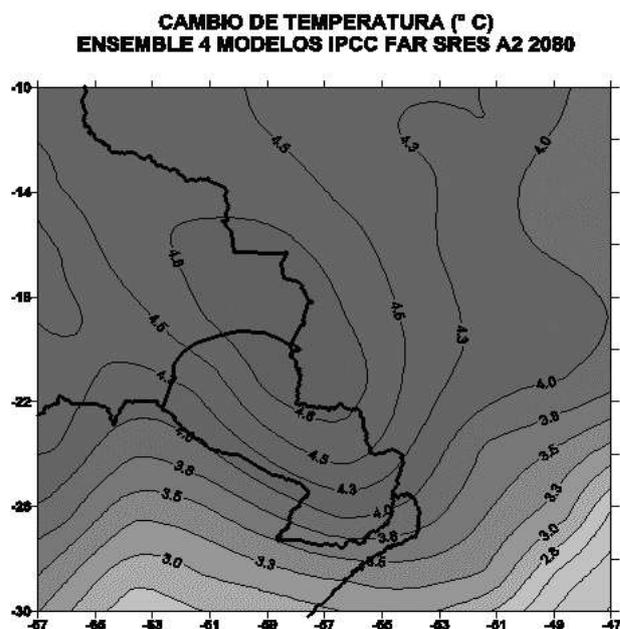


Figura 3: Cambio en la temperatura (°C) para la década de 2080 (SRES A2)

### 3.2. Precipitación

Las estimaciones de los cambios futuros en la precipitación varían en forma apreciable según los diferentes modelos climáticos. El cambio de precipitación previsto en la década del 2020 (figura 4) va desde incrementos de +3 % a reducciones de -3% sobre Paraguay, según el escenario A2. Dentro del mismo las mayores reducciones (-6%) se ubican sobre el norte del Chaco y sur de Bolivia y parte de la cuenca del río Paraguay. Por otro lado los mayores incrementos se darían hacia el sur de la región oriental en la cuenca sur del Río Paraguay cerca de su desembocadura con el Río Paraná. El cambio de precipitación previsto en la década del 2050 (figura 5) va desde incrementos de +6% a reducciones de -9% sobre Paraguay. El patrón de variación de la precipitación es el mismo que para la década del 2020, los mayores incrementos en el sur de la región oriental y las mayores reducciones al norte del Chaco paraguayo y sureste de Bolivia.

También se verifica que la variación del campo de precipitación previsto para la región en la década del 2020 bajo el escenario B1 es menos contrastante que en el escenario A2, las mayores diferencias van entre una reducción del -2% a un incremento del +3%. El cambio de precipitación previsto en la década del 2080 (figura 6) va desde incrementos de +15% a reducciones de -25% sobre la región en estudio, sobre el territorio Paraguayo las variaciones son entre +5 a -20%.

La zona de mayores reducciones de precipitación se ubican ligeramente más al este que para las décadas de 2030 y 2050, sobre la cuenca del Río Paraguay, sur del Pantanal, sureste de Bolivia y norte del Chaco paraguayo. Esta zona coincide con la región de mayores incrementos de temperaturas previstas.

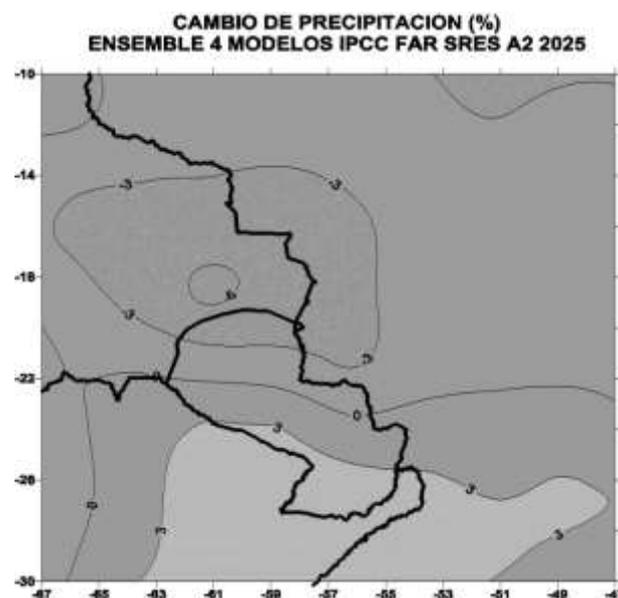


Figura 4: Cambios en la precipitación (%) década de 2020.

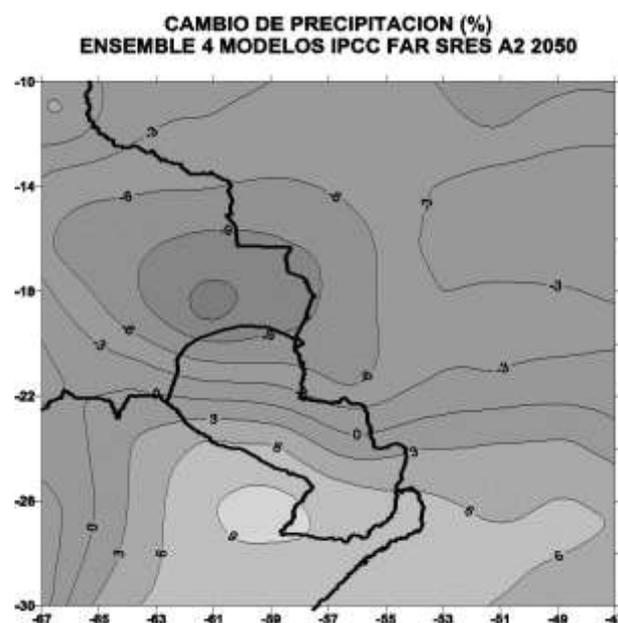


Figura 5: Cambios en la precipitación (%) década de 2050.

El cambio en la humedad específica para la región en la década del 2080, bajo el escenario B2, presenta incrementos menores que para el escenario A2.

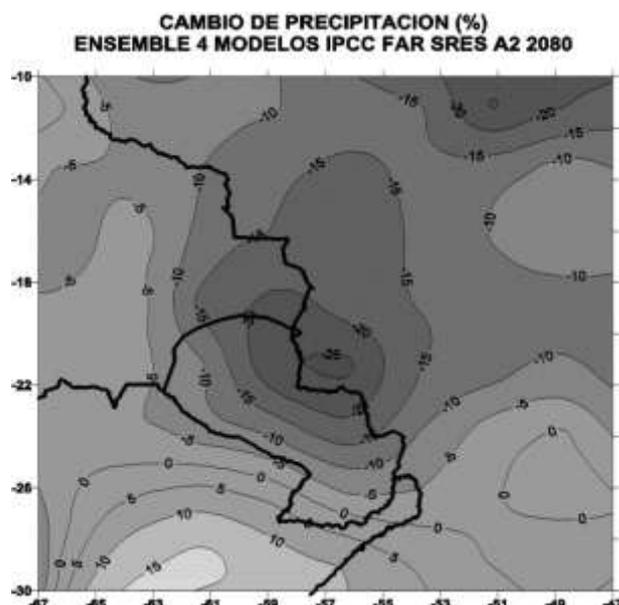


Figura 6: Cambios en la precipitación (%) década de 2080.

### 3.3. Humedad específica

De manera de estimar los futuros cambios en la humedad sobre Paraguay, se seleccionó la variable humedad específica, debido a que ella no es afectada por los cambios de la temperatura, como es el caso de la humedad relativa. Esta variable solo estaba disponible para dos de los modelos climáticos globales (ECHAM5 y CSIRO-Mk3), para los cuales se realizó un ensamble de manera de estudiar los cambios para 2050 y 2080.

Los cambios previstos de la humedad específica para la década del 2050 bajo el escenario A2 (figura 7) son positivos para toda la región, los aumentos más importantes se registrarían en la región oriental, sobre la cuenca del Río Paraná, con valores medios anuales de hasta +0.16 gr/kg. La región del Altiplano argentino-boliviano tendría escasos cambios en la humedad específica.

El cambio en la humedad específica previsto para la región en la década del 2050 bajo el escenario B2, presenta un menor incremento que para el escenario A2.

El cambio previsto de la humedad específica para la década del 2080 bajo el escenario A2 (figura 8) presenta incrementos de hasta +0.32 gr/kg, también sobre la región oriental del Paraguay, y los menores incrementos se darían al oeste de la región (Altiplano) donde los incrementos serían de +0.10 gr/kg en promedio anual.

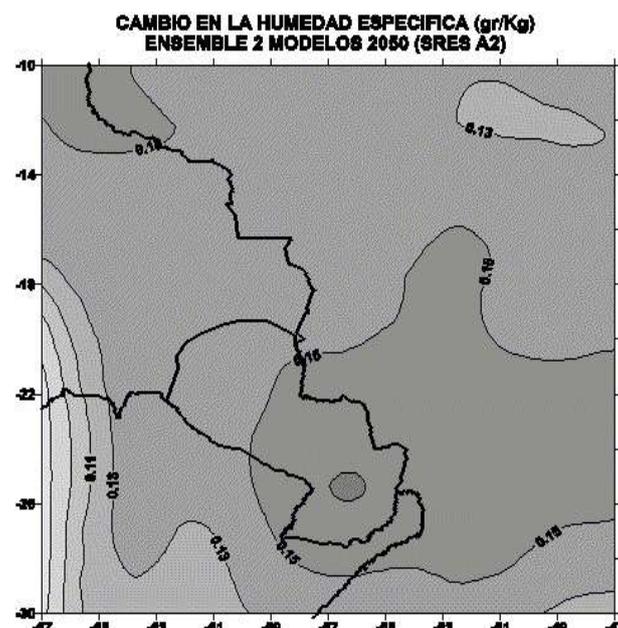


Figura 7: Cambio en la humedad específica (gr/kg) década de 2050

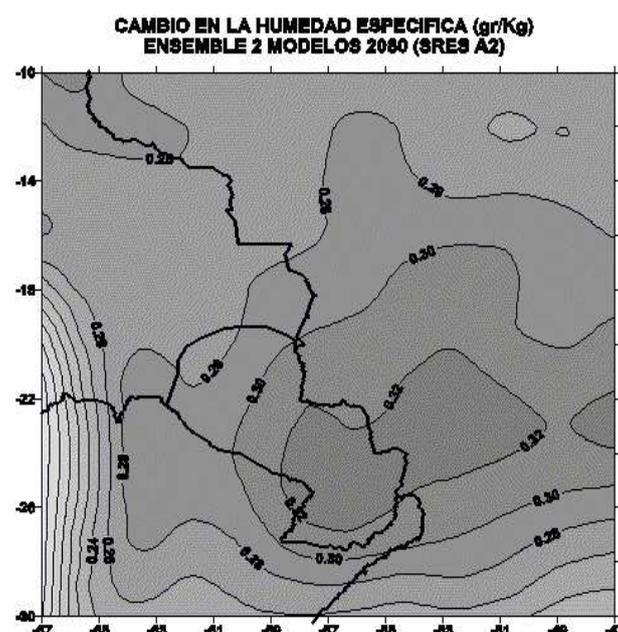


Figura 8: Cambio en la humedad específica (gr/kg) década de 2080

### 3.4. Radiación solar

Los futuros cambios en la radiación solar global, de onda corta, en superficie sobre la región centrada en Paraguay fueron estimados basados en los tres modelos climáticos globales (HADCM3, ECHAM5 y CSIRO-MK3) en los que esta variable estaba disponible. Nuevamente las corridas seleccionadas fueron aquellas forzados con los escenarios socioeconómicos A2 (alto) y B2 (bajo).

El escenario A2 determina incrementos de la radiación solar media diaria anual ligeramente superiores al escenario B2. Se esperan, según el escenario A2, tasas de cambio sobre la región que irían entre  $+5 \text{ W/m}^2$  y  $-3 \text{ W/m}^2$  para la década centrada en el 2020. Se observa en los dos modelos un mayor incremento de la radiación solar sobre la región noroeste (centro de Bolivia y altiplano) y los decrecimientos en la región sur y sureste. El territorio del Paraguay por su ubicación experimentaría incrementos de hasta  $+4 \text{ W/m}^2$  sobre el norte del Chaco a disminuciones de  $-6 \text{ W/m}^2$  en la región sureste de la región oriental según el escenario A2. El cambio de la radiación solar prevista bajo el escenario B2, muestra variaciones muy semejantes en magnitud y ubicación de las anomalías al escenario A2.

Para la década de 2050 se esperan, según el escenario A2 (figura 9), tasas de incremento sobre la región que van entre  $+0 \text{ W/m}^2$  y  $+6 \text{ W/m}^2$ . Se observa también el mismo patrón que para la década de 2020, un mayor incremento de la radiación solar sobre la región noroeste (centro de Bolivia y altiplano) y sin cambio en la región suroeste.

Los cambios de la radiación solar prevista para la región en la década del 2050 bajo el escenario B2, prevén variaciones que van desde  $+10 \text{ W/m}^2$  y  $-2 \text{ W/m}^2$ . Los valores promedios, para esta década sobre Paraguay estiman un decrecimiento de  $-2 \text{ W/m}^2$ . De la misma manera los mayores decrecimientos se ubican al sur de la región.

Para la década de 2080 se esperan, según el escenario A2 (figura 10), tasas de incremento sobre la región que van entre  $-1 \text{ W/m}^2$  y  $+9 \text{ W/m}^2$  y entre  $+2 \text{ W/m}^2$  y  $+5 \text{ W/m}^2$  sobre el territorio paraguayo. Se observa un mayor incremento de la radiación solar sobre la región noroeste centro-sur de Bolivia y pequeños decrecimientos al suroeste de la región en estudio

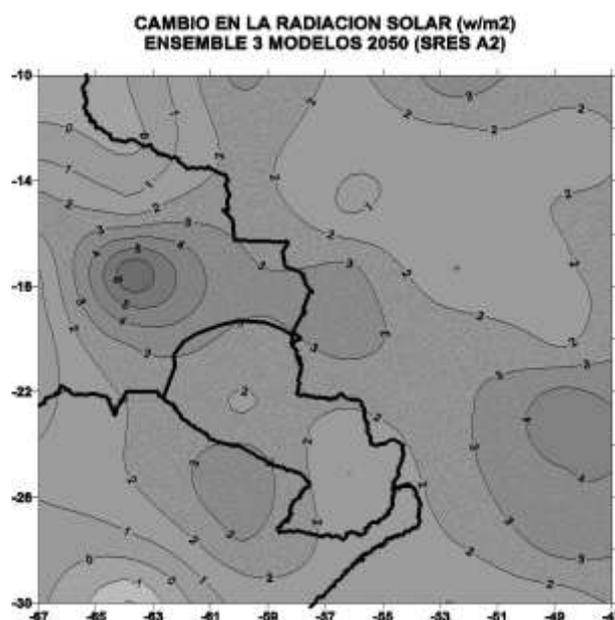


Figura 9: Cambios en la radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) década de 2050

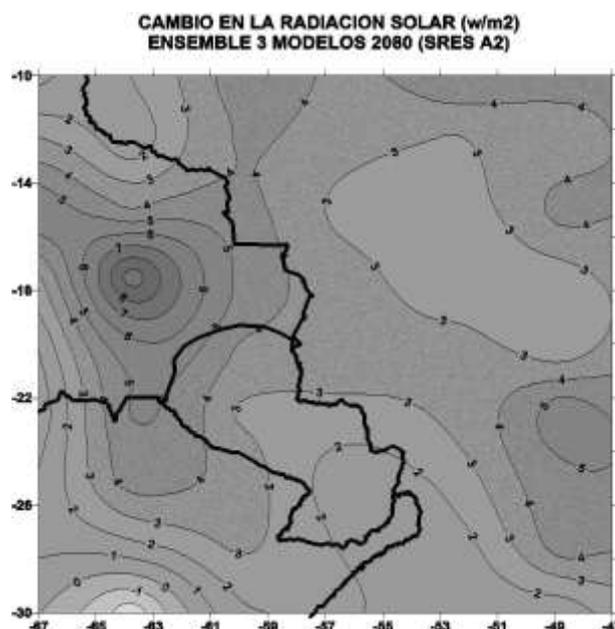


Figura 10: Cambios en la radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) década de 2080

## 4. ESCENARIOS DE ALTA RESOLUCIÓN

Para la obtención de escenarios de alta resolución espacial se ha utilizado el sistema PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies) que ha sido desarrollado por el Hadley Centre (U.K.). Con la versión 1.6 de este sistema, se realizó un “downscaling” dinámico o sea se desarrollaron escenarios climáticos en alta resolución espacial y temporal. El sistema PRECIS consta de un modelo regional denominado HadRAM3, que funciona anidado dentro del modelo global. El propósito ha sido incrementar significativamente la resolución espacial de los escenarios climáticos, sobre Paraguay y cuencas de interés, llevando la resolución espacial de los escenarios a  $0.44^\circ$  latitud por  $0.44^\circ$  longitud.

Se presentan aquí las simulaciones desarrolladas para los escenarios A2 y B2 (2081-2090). Para la temperatura media anual los incrementos estarían en  $+3^\circ\text{C}$  sobre el territorio paraguayo (figura 11), según el escenario A2. Para el escenario B2 habría un incremento ligeramente menor de  $+2^\circ\text{C}$  (figura 11). Los incrementos más importantes se darían sobre la alta cuenca del Río Paraguay en ambos escenarios.

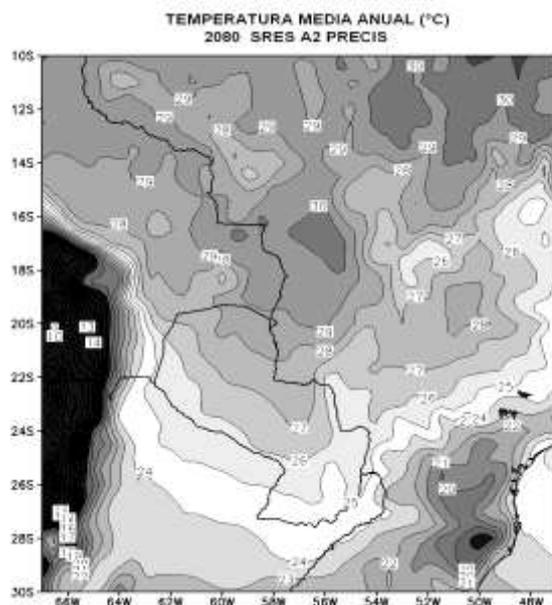


Figura 11: Temperatura media anual ( $^\circ\text{C}$ ) (SRES A2) para 2081-2090

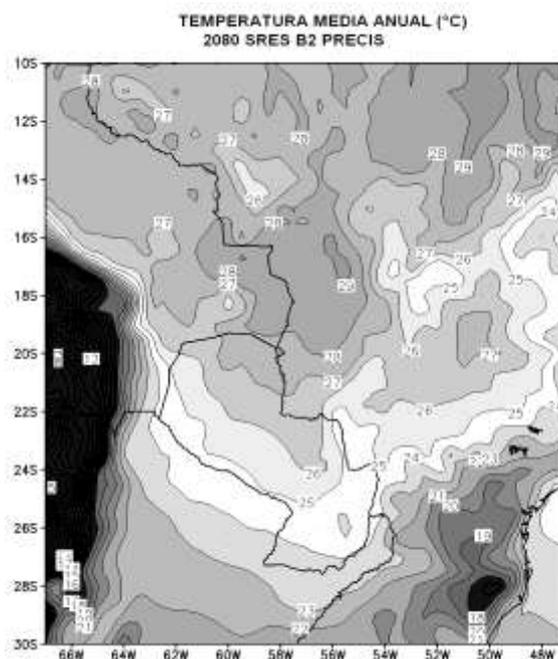


Figura 12: Temperatura media anual ( $^\circ\text{C}$ ) (SRES B2) para 2081-2090

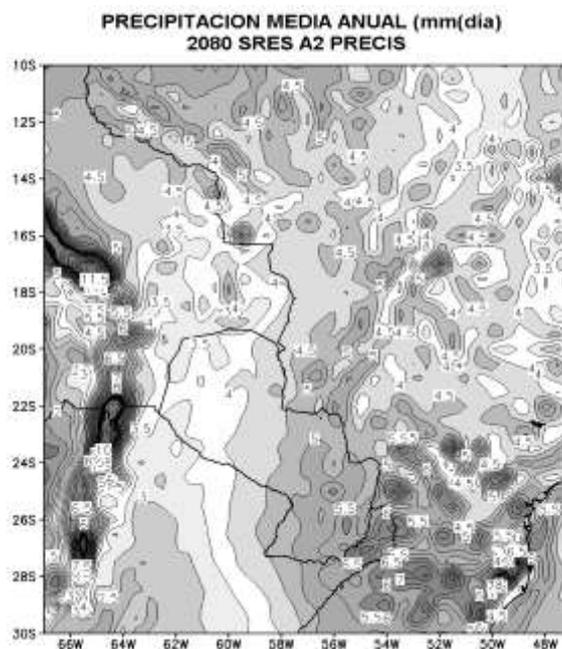


Figura 13: Precipitación media anual (mm/día) (SRES A2) para 2081-2090.

Para las simulaciones de la precipitación media anual desarrolladas para los escenarios A2 y B2 (2081-2090), se observan mayores precipitaciones sobre la región oriental del Paraguay, sur del Brasil y noreste de Argentina. En el caso del escenario A2 (figura 13) habría un incremento de las precipitaciones, respecto a la

climatología actual, en la región oriental y un decrecimiento en la región occidental (Chaco). Para el escenario B2 se repite el mismo patrón que para el escenario A2, variando el monto de los incrementos de la lluvia en la región oriental, que sería en este caso más moderado (figura 14).

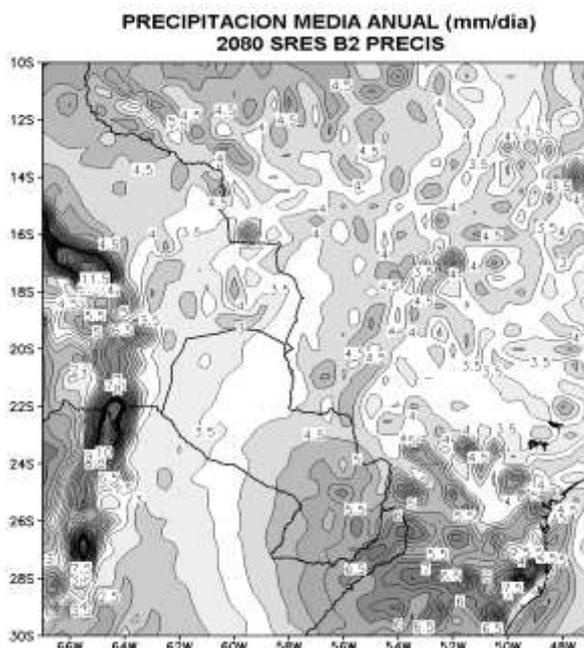


Figura 14: Precipitación media anual (mm/día) (SRES B2) para 2081-2090.

## 5. CONCLUSIONES

A pesar de las incertidumbres inherentes a este tipo de construcciones de escenarios futuros, se estima que para la región central de América del Sur donde se ubica Paraguay experimentaríamos para la década centrada en el 2020 un calentamiento que estaría en el entorno de  $+1^{\circ}\text{C}$  según el promedio de los cuatro modelos analizados, para el escenario A2 (alto), esto es si no se tomaran acciones internacionales para la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Para la década centrada en 2050 el calentamiento sería aún más importante con valores entre  $+2^{\circ}$  y  $+2.5^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo el modelo HADCM3 estima un calentamiento aún mayor, que los otros tres modelos analizados, con calentamientos del orden de los  $+3^{\circ}\text{C}$  en promedio anual y de  $+4^{\circ}\text{C}$  para la primavera (figura 15). Los mayores calentamientos se verificarían sobre el norte y noroeste del territorio (Chaco y cuenca del Río Paraguay) y los menores sobre el sureste de la

región oriental (cuenca del Río Paraná). Para la década centrada en 2080 el calentamiento sería aún más importante con valores entre  $+2.5^{\circ}$  y  $+4.8^{\circ}\text{C}$ .

Las estimaciones de cambio de la precipitación para las décadas de 2020, 2050 y 2080 varían entre los modelos climáticos analizados. En general se prevé un decrecimiento hacia el norte del Paraguay y los mayores incrementos se darían hacia el sureste de la región en estudio (cuenca del Río Paraná). La mayoría de los modelos prevé un aumento de la precipitación en la región sobre el final del año, en los meses de noviembre y diciembre, esta tendencia se observa ya en la década de 2020 pero es más notoria en la década del 2050 (figura 16), donde la media del conjunto muestra incrementos de hasta 1 mm/día en el mes de octubre, para la ciudad de Asunción, pero esto se evidencia sobre la mayoría de las localidades estudiadas sobre el territorio paraguayo.

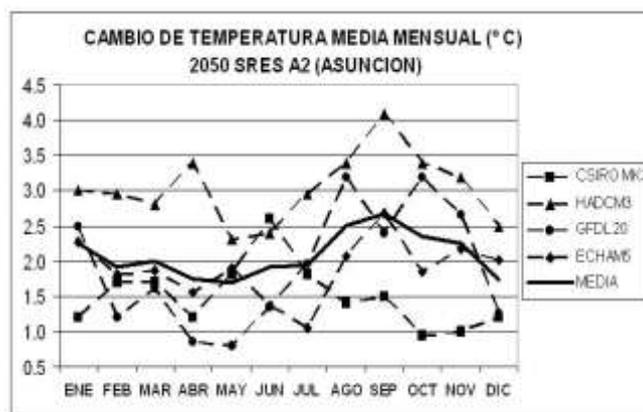


Figura 15: Cambios en la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (SRES A2) para década 2050.

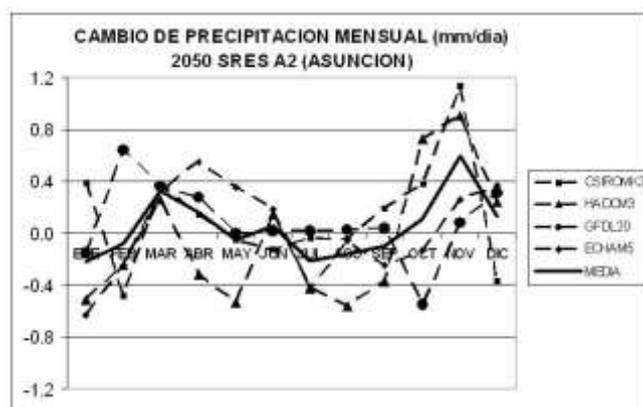


Figura 16: Cambios en la precipitación (mm/día) (SRES A2) para década 2050.

Agradecimientos: Se agradece el apoyo del Ingeniero Ángel Parra y demás personal de la SEAM (Secretaría de Medio Ambiente) e integrantes del Programa Nacional de Cambio Climático de Paraguay, así como de la Universidad Nacional de Asunción.

## REFERENCIAS

- Bidegain, M. y Camilloni, I. 2006. *Performance of GCMs and Climate Future Scenarios for Southeastern South America*. Annals of 8<sup>th</sup> International Conference of Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Foz de Iguazú. Brasil. 2006
- Bidegain, M y Deshayes, C. 2005. *Escenarios climáticos futuros de Precipitación para el Cono sur de Sudamérica*. Annals of Argentina and Latin American Meeting on Water Resources (CONAGUA) 2005. Mendoza, Argentina.
- Camilloni, I. y Bidegain, M. 2005. Capítulo 4 “*Escenarios Climáticos para el siglo XXI*”. Libro: “El Cambio Climático en el Río de la Plata”. AIACC LA32/26 Project. Ed. Barros, Menéndez, Nagy. Buenos Aires.
- Carril, A., Menéndez, C.G. y Nuñez, M. 1997. “*Climate Change Scenarios over South American region: An intercomparison of coupled general atmosphere-ocean circulation models*”. Int. J. of Climatology, **17**, 1613-1633.
- 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, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp
- Golden Software. 2003. Surfer Version 8. (<http://www.goldensoftware.com/>).
- Hofstadter, R. y Bidegain, M. 1997. Performance of General Circulation Models in southeastern South America. Climate Research. Climate Research, **9**, N°1-2.
- Hulme M. y Carter, T.R. 1999. Representing uncertainty in climate change scenarios and impacts studies. ECLAT-2 Workshop Report. CRU, Norwich.
- Jones, R. G., Noguer, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins. G. J. y Mitchell, J. F. B. 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met. Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp.
- Kittel, T.G.F., Giorgi, F. y Meehl, G.A. 1998. Intercomparison of regional biases and doubled CO<sub>2</sub>-sensitivity of coupled atmosphere ocean general circulation model experiments. Climat. Dyn., **14**, 1-15.
- Marengo, J.A. 2007. Relatório “Caracterização do clima de Século XX e Cenário no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos de Clima do IPCC. Cap.5. CPTEC/INPE. Brasil.
- Nakicenovic, N. 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.
- Nakicenovic, N., Gruber, A. y McDonald A. (Eds). 1998. Global Energy Perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, MA, 299 pp.
- New, M., Hulme, M. y Jones, P.D. 1999. “Representing twentieth century space-time climate variability”. Part 1: development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. J. Climate, **12**, 829-856.
- New, M., Hulme, M. y Jones, P.D. 2000. “Representing twentieth century space-time climate variability”. Part 2: development of a 1961-1990 monthly grids of terrestrial surface climate. J. Climate, **13**, 2217-2238.
- Mitchell, J.F.B., Johns T.C., Eagles, M., Ingram, W. J. y Davies, R.A. 1999. Towards the development of climate change scenarios. Climate Change. **41**. 547-581.



## MESOSCALE FORECASTING OF AN EVENT OF NOVEMBER 2008 IN SANTA CATHARINA

Lia Martins Costa do Amaral<sup>1</sup>, C. T. Homann<sup>1</sup>, V. Pinho<sup>2</sup> y Y. Yamasaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Pelotas, Pelotas, RS, Brazil

<sup>2</sup> Federal University of Alagoas, Maceió, AL, Brazil

(Manuscrito recibido el 17 de marzo de 2010, aceptado el 7 de junio de 2011)

### ABSTRACT

The large availability of water vapor at low levels of the atmosphere, advected into the coastal region of Santa Catharina State by the Atlantic Ocean semi-stationary anticyclone, provided the frequent and copious rainfall during the November, 2008. One of the most extreme event occurred in Santa Catharina coastal zone, when a quite strong blocking formed at high levels of the atmosphere is explored processing both, the MM5 and WRF mesoscale models. These models were processed with very high spatial resolution domains, covering the entire region affected by the severe event. The sea surface temperature field revealed that there was a large core on Atlantic waters with quite high temperatures along the coast of Santa Catharina, which enhanced the vertical integrated latent heat supply into the continental region by the winds. The models forecasting results showed consistent results with the observations, as well as an indication that coherences are directly related to the horizontal resolution of the models configurations.

*Keywords:* Mesoscale, MM5, WRF

### PRONÓSTICO DE MESOESCALA DE UN EVENTO DE NOVIEMBRE DE 2008 EN SANTA CATARINA

#### RESUMEN

La gran disponibilidad de vapor de agua en los niveles inferiores de la atmósfera, advectada sobre la costa de la provincia de Santa Catarina por el anticiclón semi-estacionario del Océano Atlántico, favoreció períodos frecuentes de lluvia durante el mes de noviembre de 2008. La exploración del evento extremo ocurrido en Santa Catarina, que se caracterizó por un intenso bloqueo en niveles altos, se realizó con pronósticos de los modelos del mesoescala MM5 y WRF. Estos modelos fueron procesados con muy alta resolución espacial, abarcando toda la región afectada por el evento severo. La temperatura de la superficie del mar presentaba anomalías positivas de temperatura a lo largo de la costa de Santa Catarina, favoreciendo la transferencia de calor latente hacia la atmósfera, con su posterior advección hacia la zona continental. Los resultados obtenidos con los modelos son consistentes con las observaciones, aunque fuertemente dependientes de la resolución horizontal de los mismos.

*Palabras clave:* Mesoescala, MM5, WRF.

## 1. INTRODUCTION

The topography plays a large influence on the rainfall distribution not only by forcing upward movements, but also by thermal and frictional effects (Browning, KA, 1980). The thermal effects manifest triggering the convective precipitation by the intense heat sources as well as by the organized mesoscale circulations. On the other hand, the frictional effects cause an increase in the precipitation by the local convergence, which occurs in the boundary layer, resulting from differences in the friction, such as those that occurs along the mountainous shorelines of the Santa Catharina State of Brazil. Although these types of precipitation may cause great damage, especially to economic and productive societies, many countries have a large dependence of these types of precipitation (India, China, and Japan). The difficulty of exploring this problem is mainly related to the topography of the complexes shaped mountainous region, besides the difficulties of taking the accurate measurements of rainfall over areas of these natures. Bergeron (1965) indicates a very close relationship between the maximum rainfall and the height of the mountains - implying that most of the topographic precipitation originates from very low levels of the atmosphere (about 500 m), otherwise, would be removed, far away, from higher altitudes regions. Even using mesoscale numerical models, to characterize, as accurately as possible, these topographic effects - it is necessary to process them with very high space resolution, in order to incorporate a part of the large topography variations of a mountainous region.

The heavy rains which occurred in Santa Catharina, during November 2008, were due to the combination of various meteorological factors. They were caused by the simultaneous occurrence of two main phenomena: an anticyclone, which remained semi-stationary over the South Atlantic Ocean near the coastal region of Santa Catharina - producing moderate winds toward the coast - and the presence of a cyclonic vortex that, in addition to topographic effects, caused a further ascent of air mass. On November 22, after a hot and sultry afternoon, with temperatures up to 29 °C, the clouds presented a strong vertical development during the day, and rapidly expanded, extending toward the West and Midwest of continental area and causing severe storms. According to the surface

observations registered in Itajaí city, the accumulated rainfall, during November, was 670 mm, well above the average normal. About 85% of this city was flooded and 41 thousand people were left homeless. The November month was also, the one with the highest amount of rain ever recorded in Florianopolis city since 1961 (Brazilian National Institute of Meteorology - INMET).

According with Civil Defense of the Santa Catharina State report, the rainfall has affected, during November, about 60 cities and more than 1.5 million people. Eight counties become isolated, 10 enacted/ into state of public calamity and several were completely flooded. According to reported surveys, the event caused 133 deaths, 22 missing and more than 78,000 people were forced to abandon their homes. The rain banned sections of major highways, closed the port of Itajaí city and disrupted gas supplies in Santa Catharina and Rio Grande do Sul States. Industries estimated losses of R\$ 358 million and the state government predicted the loss of 15% in annual incomes.

Data from the Information Center for Environmental Resources and Hydrometeorology (CIRAM) reported that the meteorological station of Blumenau registered a record high of 283 mm of precipitation in 24 hours, between days 22 and 23.

However, the accumulated precipitation in the month, until November 24, in Joinville city was even higher; with 911 mm, while in Blumenau city recorded 878 mm.

Severe rainfall events which have been occurring in Brazil, particularly as the 2008 in Santa Catharina, reveals the importance of the researches and the constant re-structuring and improvement, not only of the forms, as well as the techniques of numerical weather prediction. The diagnostic and prognostic assessment of severe event occurred in Santa Catharina, in 2008, is studied and explored using observational data and the MM5 and WRF mesoscale models.

## 2. MM5 MODEL: CONFIGURATION AND SIMULATION

The MM5 mesoscale model system (Dudhia et al. 2002) has been set up for three integration domains (D01, D02 and D03) covering the states of Santa Catharina and Rio Grande do Sul and neighboring areas, as shown in Fig.1. They were set, respectively, with 80, 160, 223 grid

points in the East-West direction and 60, 127 and 151 grid points in the North-South direction. The distance between the grid points was set at 18 km, 6 km and 2 km, resolutions respectively; with 24 sigma levels in the vertical and the top of the atmosphere has been set to 100hPa. The time step of integration has been set to 81 seconds for the domain D01.

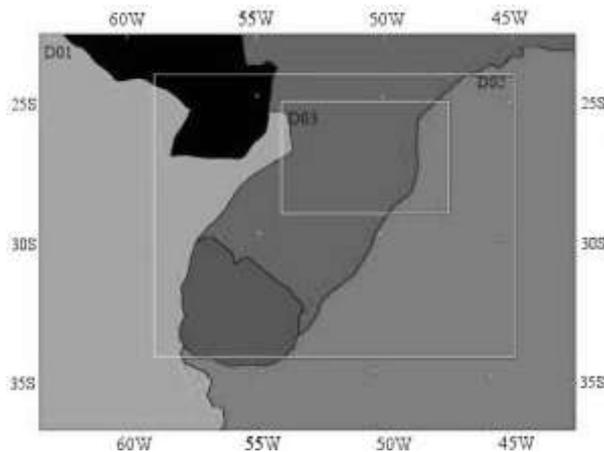


Fig. 1: D01, D02 e D03 integration domains of MM5.

The numerical simulations were processed using the Kain-Fritsch 2 (Kain, 2004) scheme cumulus parameterization for domain 1 (D01). As the model has the ability to address explicitly the convective processes for scales smaller than about 10 km, no cumulus parameterization was used for domains D02 and D03.

### 3. WRF MODEL: CONFIGURATION AND SIMULATION

The WRF (Weather Research and Forecast) is a numerical modeling system, developed for research of atmospheric phenomena as well as for mesoscale weather forecasting. Its continued development is a collaborative effort evolving several research centers and U.S. government agencies. Architected to be a top tool in simulating atmospheric, flexible, portable, and efficient in a variety of computing platforms, the WRF system, is of public domain and made available for free at <http://wrfmodel.org>.

The Fig.2 presents the configuration of the three domains of integration of WRF model, covering the state of Santa Catharina and surrounding areas. The first domain has been configured with 117 by 64 grid points; the second with 196 by 115 grid points and the third one with 349 by 205 grid points; respectively with 18 km, 6 km

and 2 km horizontal grid space resolution.

The model has been configured in Lambert projection, integrated with two way nesting and time step of 54 seconds for the largest domain. The processing has been made for the 00 UTC of November 21, 2008 to 00 UTC of November 23, 2008.

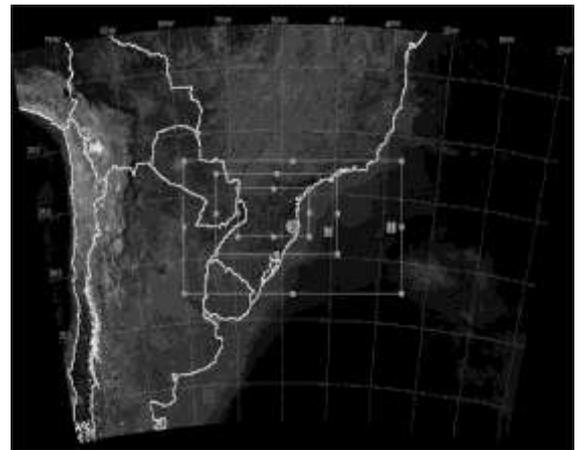


Fig. 2: Domains of WRF model integration.

### 4. CHARACTERISTICS OF MM5 AND WRF MODELS

The MM5 and WRF models have been processed with the global GFS/NCEP model forecasting, gathered in GRIB2 format, with 0.5 degrees space resolution, via the IDD / LDM system. These forecasts provided the analysis and global forecasts for every three hours, and provided both, the analysis and boundaries conditions to mesoscale models. The models have been processed and the forecasts stored for each hour, during the 48 hours of integration period.

The analysis of both models have been made generating plots, of meteorological fields, with GrADS (Grid Analysis and Display System) system including, among others, the rainfall, temperature and the sea surface (SST). The infrared channels GOES satellite images, for the southern hemisphere, have been also used in the analysis.

### 5. EVENT DESCRIPTION

The event under consideration, occurred in Santa Catharina State, has been caused by the simultaneous occurrence and combination of several meteorological factors. The one of them

was the high evaporation rate, of high temperature water, from the Atlantic Ocean, near the coastal region of the state. Between November 17 and 21, the coast region of Santa Catharina had a core with high temperature of the water (Fig. 3), lower than that between November 21 and 25 (Fig. 4), [http://www.fnmoc.navy.mil], i.e., a gradual increase in temperature of sea water, which allowed the fact that it becomes even higher than the air temperature.

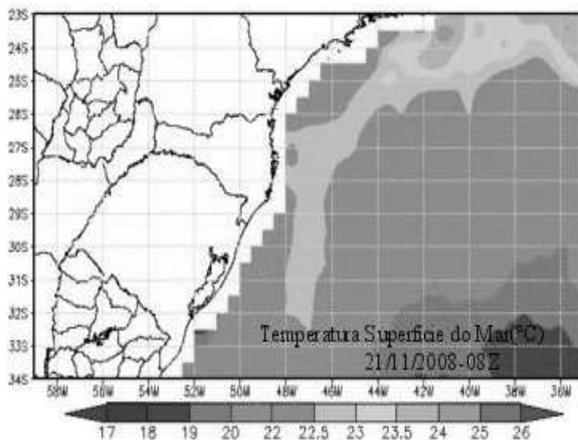


Fig. 3: Sea surface temperature – November 21 – 08:00UTC.

This fact revealed that there was an anomaly of about 1.5 °C on SST, near the coast of southern Brazil (Fig.5) as in <http://www.bom.gov.au>, which reflected the increased vertically integrated latent heat flow over the Atlantic Ocean, presented in Fig. 6.

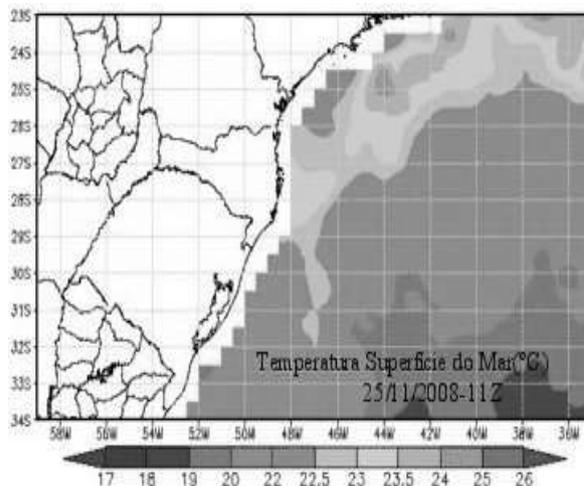


Fig. 4: Sea surface temperature – November 25, 11:00UTC.

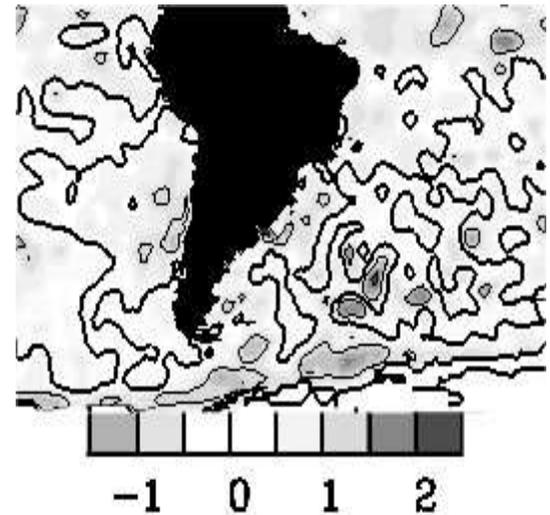


Fig. 5: Sea surface temperature anomaly - November 17 to 23

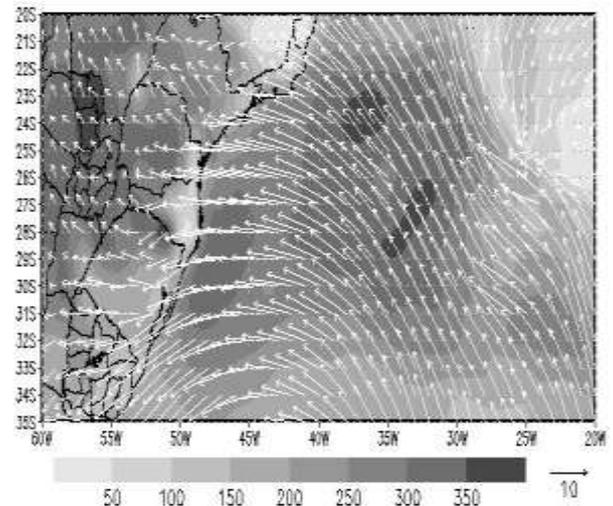


Fig. 6: Latent heat rate ( $W/m^2$ ) and wind (m/s) – November 21 – 21:00UTC.

A high pressure (anticyclone) center on 37 ° S and 40° W, which had already been presenting a steady characteristic, since few days ago (Fig. 7), was the main physical mechanism responsible for the transport of moisture, toward the coastal region of Santa Catharina, in the low levels of the atmosphere.

As a result of the high pressure center (anticyclones) there was a peculiar wind circulation behavior (in the vertical profile) in such system. The surface wind, under a high pressure center diverge in this level; rising and converging at high levels, where the atmospheric pressure is lower.

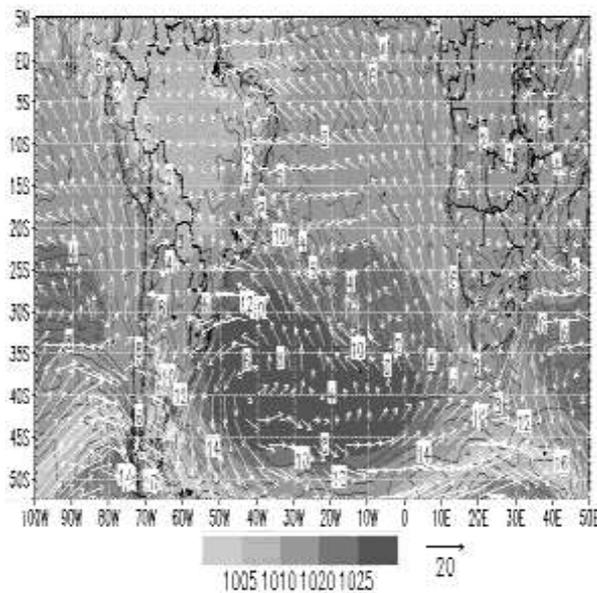


Fig. 7: Atmospheric pressure (hPa), direction and magnitude of wind (m/s) - November 21-21:00UTC.

15 m/s. At high levels, on the other hand, moves from eastward, reaching magnitudes of up to 50 m/s between 300 hPa and 200 hPa layer.

## 6. PROGNOSTIC ANALYSIS OF MESOSCALE NUMERICAL MODELS

According with Epagri-Ciram, between 09:00 UTC of November 21st and 09:00 UTC of November 23, the largest volumes of rain occurred in the São Francisco do Sul city (located at 26.1°S and 48.3°W) - with 466.6 mm and Itapoá city (26.1° S and 48.4°W) with 408.2 mm. The region close to these cities is analyzed in the light of the simulations made by two mesoscale models. At the beginning of day 21, until 03:00 UTC, the accumulated rainfall, in 3 hours, as provided by the MM5 and WRF already indicated a rainfall of about 25 mm on the coastal region of Santa Catharina, as indicated in Fig. 9a and Fig. 9b. The accumulated precipitation, provided by MM5 (Fig. 9a), has a little bit greater area coverage with higher total rainfall.

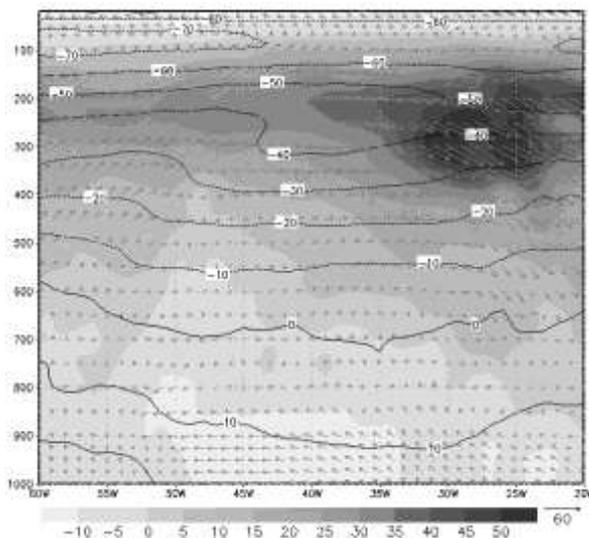


Fig.8: Cross section of atmosphere at 27°S with forecasting of horizontal wind component (u) at m/s and isothermal lines (°C) – November, 21- 21:00UTC.

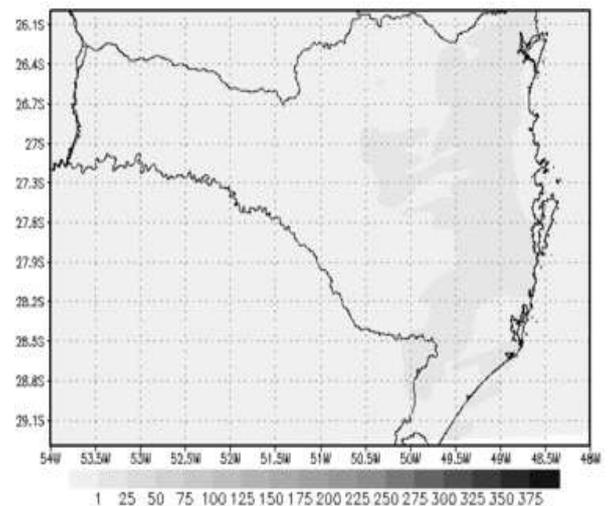


Fig. 9a: Accumulated precipitation from MM5 model – November 21- 03:00UTC.

In the Fig.8, presenting the vertical cross section of the atmosphere, along 27°S of latitude, covering the region between the 60°W and 20°W, illustrates this behavior; in which the horizontal surface wind component moves westward varying the magnitude between 5 and

Until 12:00 UTC, both models show areas with relatively higher precipitation than at 03:00 UTC, as shown in Fig.10a and Fig.10b. The MM5 predicted, in the southern coastal region, a rainfall greater than 75mm, while the WRF predicted rainfall lower than 75mm and also over other regions located in the south mainland region.

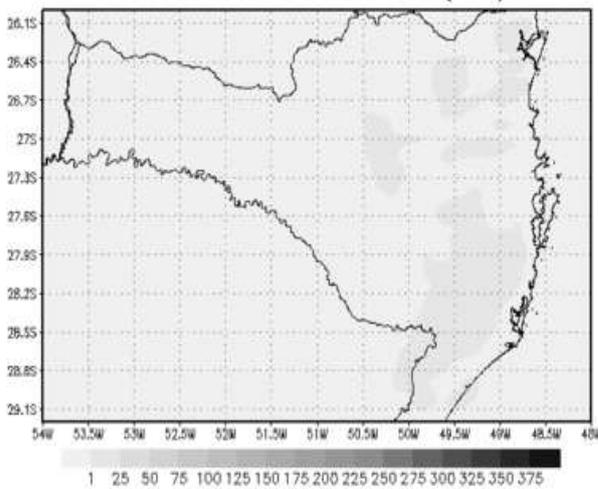


Fig. 9b: Accumulated precipitation from WRF model – November 21, 03:00UTC.

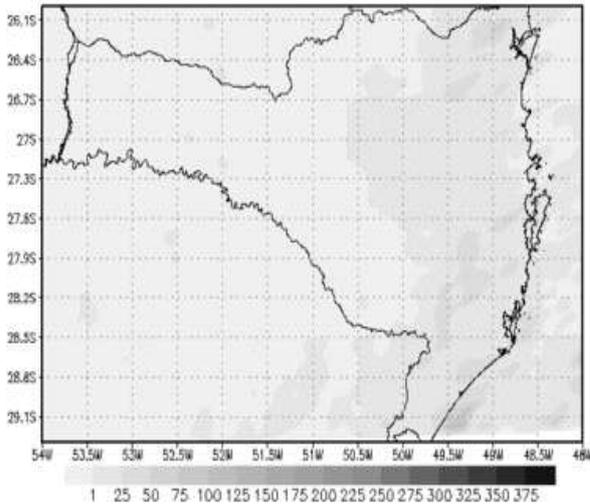


Fig.10a: Accumulated precipitation from MM5 model – November 21, 12:00UTC.

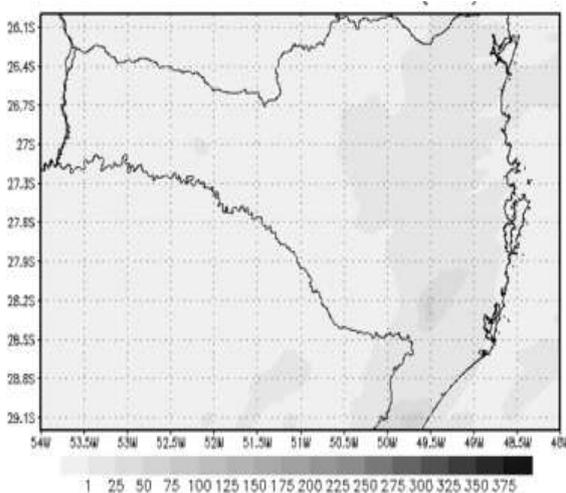


Fig. 10b: Accumulated precipitation from WRF model – November 21, 12:00UTC.

The total accumulated precipitation, up to 03:00 UTC of day 22, provided by the WRF is presented in regions with rates of up to 225 mm along both the north and the south coastal region of Santa Catharina. However, MM5 presents levels which do not exceed 200 mm, although over smaller and sparser regions. These forecasting are shown in figures Fig.11a and Fig.11b.

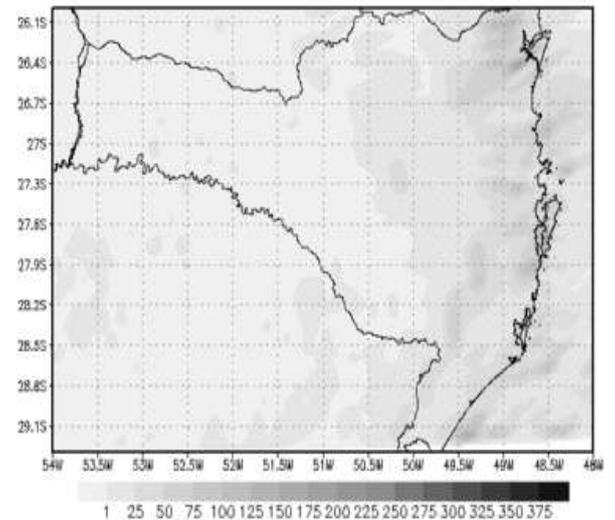


Fig.11a: Accumulated precipitation from MM5 model – November 22, 03:00UTC.

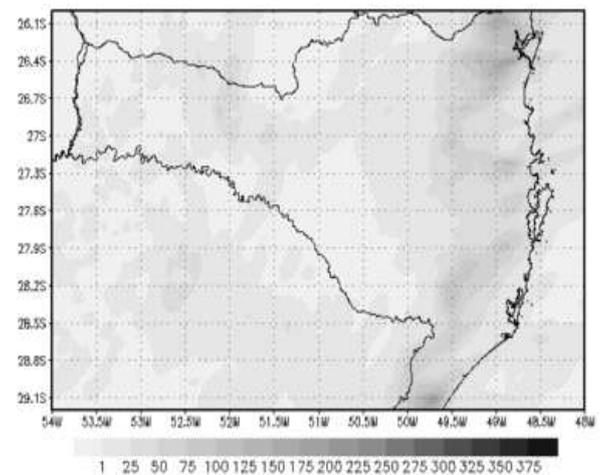


Fig.11b: Accumulated precipitation from WRF model – November 22, 03:00UTC.

The accumulated precipitation for 23:00UTC of day 22 (i.e. 48 hours integration), the rainfall of both models exceed 325 mm in the north coast of Santa Catharina. The WRF presented a relatively higher area (even though consisting largely with lower rates) than that presented by MM5, as shown in Fig.12a and Fig.12b.

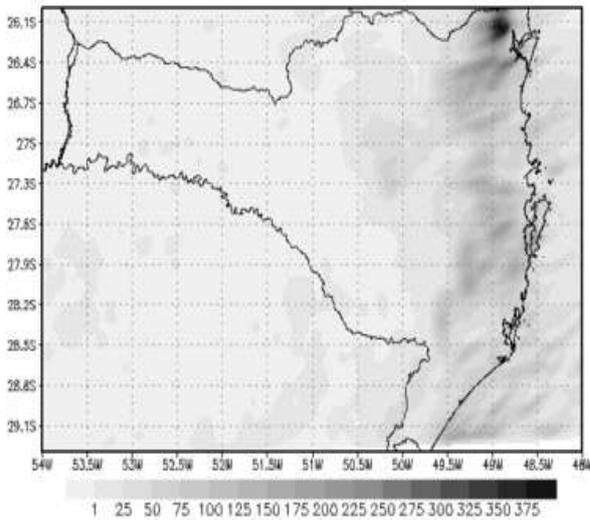


Fig.12a: Accumulated precipitation from MM5 model – November 22, 23:00UTC.

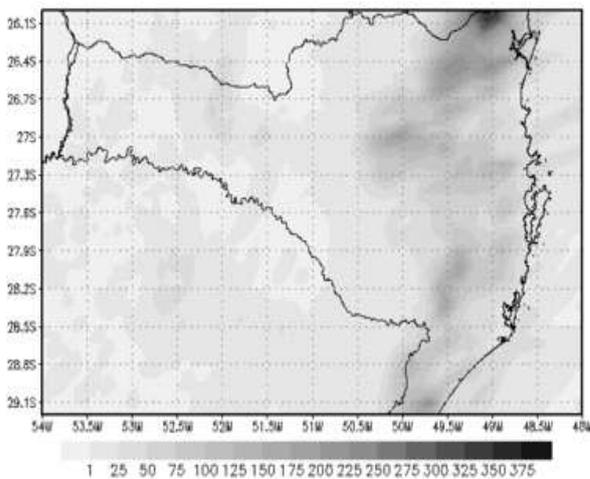


Fig.12b: Accumulated precipitation from WRF model – November 22, 03:00UTC.

The Fig. 13 and Fig. 14 show the accumulated rainfall between 00:00 UTC of 21 and 00:00 UTC on 23, on 26.1° S and 48.9° W, for the models MM5 and WRF, respectively. It is observed that, even with a small reduction of precipitation, during the afternoon of 21 and the morning of 22, there was a significant rainfall during 48 hours – with a total of more than 350 mm.

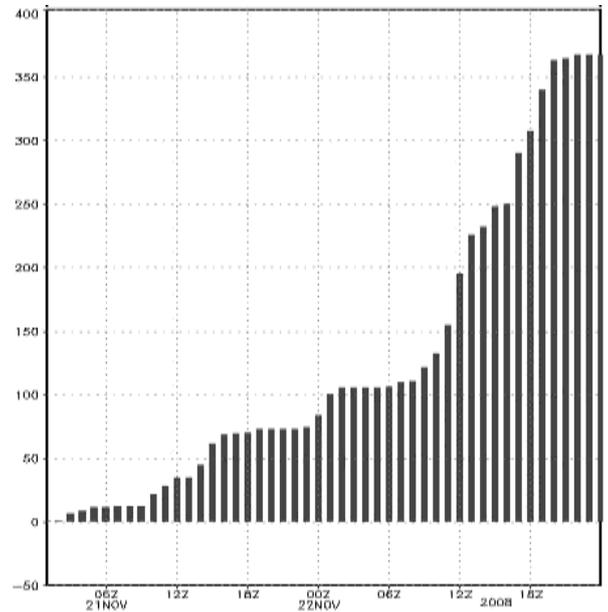


Fig.13: Accumulated precipitation between November 21st- 00:00UTC and November 23rd - 00:00UTC according to MM5 model.

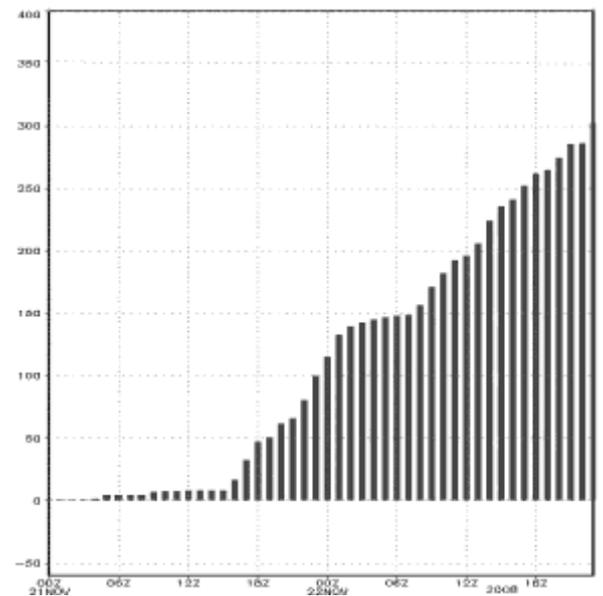


Fig.14: Accumulated precipitation between November 21, 00:00UTC and November 23, 00:00UTC according to WRF model.

There was an increase of precipitation, between 12:00 UTC and 18:00UTC of 21 and between 12:00 UTC and 00:00 UTC of 23, as it can be seen in Fig. 15 and Fig.16. These period coincide with those presented in the infrared channel image of the satellite GOES-10, which have a higher cloudiness on the coast of Santa Catharina (Fig. 15 and 16).



Fig.15: Satellite image of GOES10 (infrared channel) – November 21, 12:00UTC

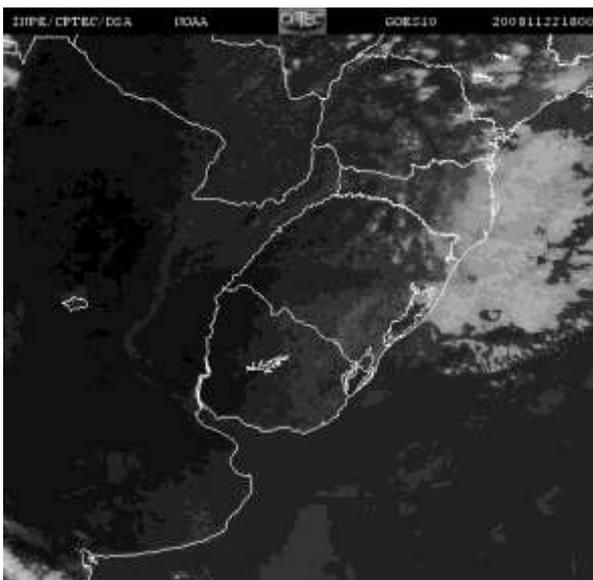


Fig.16: Satellite image of GOES10 (infrared channel) – November 22, 18:00UTC

The vertical cross sections of potential temperature, potential vorticity and the vector wind circulation, provided by MM5 for the domain D01, to be presented, refer to the one made along the horizontal line with a latitude of 20° S, which has an the order of 1500 km across the entire state of Santa Catharina, as illustrated in Fig. 17.

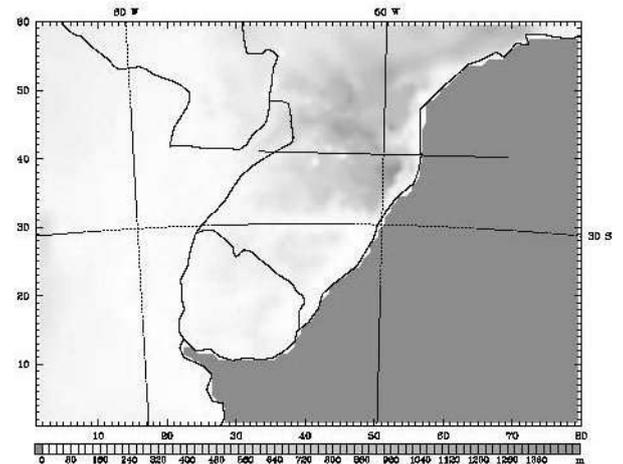


Fig.17: Cross section along the latitude of 27, 3°S

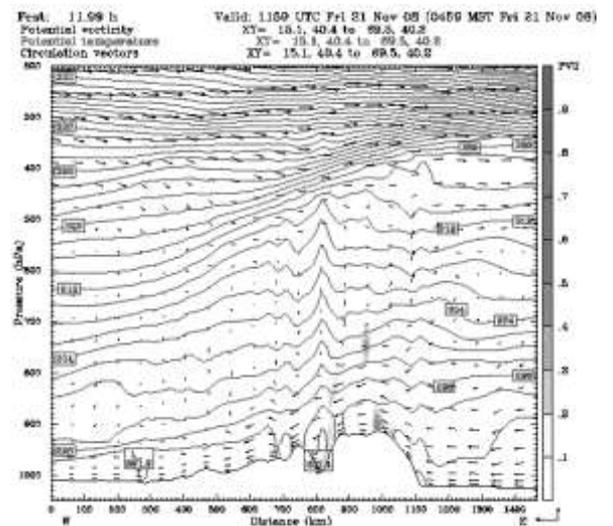
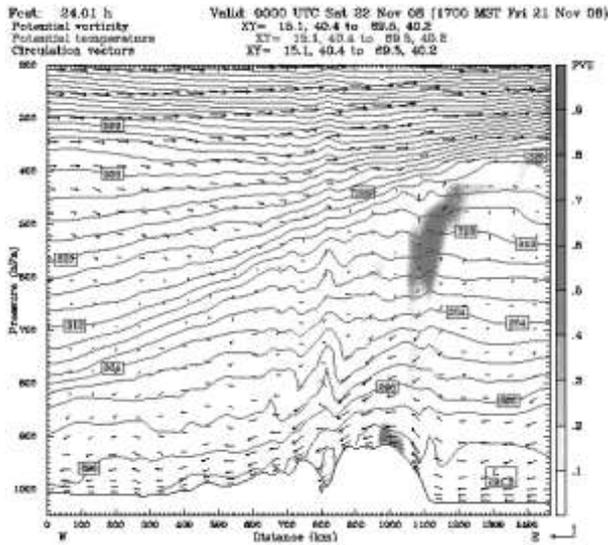


Fig. 18: Vertical cross section of potential temperature, vorticity and wind circulation vector for November 21, 12:00UTC.

The 00:00 UTC of November 22 (Fig. 19), presented an ascending wind movement up to 900hPa. However, on 00:00UTC of the next day, although the movement of wind has been the same it extended up to 700hPa.



*Fig. 19: Vertical cross section of potential temperature, vorticity and wind circulation vector for November 22, 00:00UTC.*

## 7. CONCLUSIONS

The catastrophic episode mainly caused by the intermittent rainfall in Santa Catharina, during the November 2008 led to the precipitation that occurred on 21 and 22, causing bulky damage to both economic and social sectors. These events have been mainly strengthened by the enhanced availability of water vapor at low levels of the atmosphere, advected into the coast of Santa Catharina, by anticyclones which remained semi-stationary over the Atlantic Ocean during the month under investigation, providing frequent periods of copious rainfall. Some anticyclones which have also been established - although during shorter periods of time during the month, also provided a positive feedback of moisture over the Santa Catharina state. It should be mentioned that phenomena of similar nature, which has lately been more frequently occurring on the southern Brazil, have been severe - not only by the amount of rainfall in one day, but also as a result of intense rainfall which occurs in a quite short period of time.

The extreme event, occurred during the day 21 and 22, when an intense blocking at higher levels has been acting, causing a huge disaster, is explored based on MM5 and WRF mesoscale forecasting models. These models have been processed with high spatial resolution integration domains, covering the entire region affected by the severe event.

The mesoscale models processing have been

made with the support of the global forecasting system (GFS) model of NCEP, to provide the necessary requirements on both initial and lateral boundaries conditions. Due to the dependencies of numerical models on the parameterizations, different parameterizations of clouds were used and the results of numerical integrations are presented and discussed for one of them.

The sea surface temperature before the occurrence of the event under investigation revealed that there was a core with higher temperatures on Atlantic Ocean along the coast of Santa Catharina - which was even above the temperature of atmospheric air and substantially facilitated the supply of water vapor into the continent of Santa Catharina.

Both models presented a reasonably consistent numerical results compared with the observed data of extreme rainfall - which reached a record of 466 mm, from November 21 - 09:00 UTC to November 23 - 09:00 UTC - against the numerical models, presenting 370 mm (from November 21 00:00UTC to November 22 00:00 UTC of day 22) in the proximity of the site of the recorded precipitation. Finally, it should also be noted that the results of models which have been processed with higher horizontal resolution (2 km) presented better results than the mothers of their domains.

**Acknowledgment:** To all institutions that provided the essential data and supports to carrying out the study: NCEP, UCAR, and using UFPEL.

## REFERENCES

- Bergeron, 1965. On the lower level redistribution of atmospheric water caused by orography. Supl. Proc. Intl. Conf. cloud Phys., págs. 96-100.
- Browning, K.A. 1980. Structure, mechanism and prediction of orographically enhanced rain in Britain. GARP Publ.Series 23, WMO, págs. 85-114.
- Dudhia, J., Dave, G., Young-Run, G., Kevin, M., Al B., Wei, W. and Cindy, B., 2002. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3.
- Kain, J. S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization scheme: An update. J. Appl. Meteor, 43, pp. 170 - 181.



## TENDENCIAS PARCIALES DE LOS DÍAS DE LLUVIA Y LA INTENSIDAD MEDIA ANUAL EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

Antonio de la Casa<sup>1</sup> y Olga Nasello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Cátedra de Agrometeorología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

<sup>2</sup>Grupo de Física de la Atmósfera -Facultad de Matemática Astronomía y Física  
Universidad Nacional de Córdoba  
Ciudad Universitaria – Córdoba, Argentina

(Manuscrito recibido el 22 de abril de 2010, aceptado el 19 de octubre de 2011)

### RESUMEN

Se analizan las tendencias parciales que han experimentado los días de lluvia (DD), la intensidad media (INT) y la precipitación total anual (PP) en la provincia de Córdoba, Argentina, durante la parte final del siglo XX y comienzos del actual. Las series analizadas corresponden a los registros pluviométricos diarios suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional de las estaciones Córdoba Observatorio (CO), Pilar (PI), Villa María de Río Seco (VMRS), Villa Dolores (VD), Marcos Juárez (MJ), Laboulaye (LB) y Río Cuarto (RC). El análisis se realizó utilizando el método de tendencias parciales o de puntos de quiebre desarrollado por Tomé y Miranda (2004). Además, se evaluó la significación estadística de las tendencias para los periodos delimitados por los puntos de quiebre a partir del test de Mann-Kendall. En una región en donde las tendencias totales de PP son crecientes las tendencias parciales de PP a través del tiempo en algunas localidades están más asociadas con DD y en otras con INT. Se concluye que en la provincia de Córdoba no se manifiesta una relación sistemática entre la evolución de las tendencias de la precipitación total con la intensidad media y/o la cantidad de días de lluvias al año.

*Palabras clave:* días de lluvia, intensidad media anual de lluvia, tendencias parciales, cambio climático.

## PARTIAL TRENDS OF RAINY DAYS AND ANNUAL MEAN INTENSITY IN THE PROVINCE OF CÓRDOBA, ARGENTINA

### ABSTRACT

The partial trends that have experienced rainy days (DD), average intensity (INT) and total annual precipitation (PP) in the province of Córdoba, Argentina, during the final part of the twentieth century and the beginning of the current are studied. The analyzed series are daily rainfall records provided by the National Weather Service for the stations: Córdoba Observatory (CO), Pilar (PI), Villa Maria de Rio Seco (VMRS), Villa Dolores (VD), Marcos Juárez (MJ), Laboulaye (LB) and Rio Cuarto (RC). The analysis was performed using the method of partial trends or break points developed by Tomé and Miranda (2004). In addition, the statistical significance of trends for the periods defined by each break point was assessed using the Mann-Kendall. In a region where total PP trends are increasing, the results show that changes in PP partial trends in some places are associated with DD and in others with INT. It is concluded that in the province of Córdoba there was not a systematic relationship between the trends of total precipitation to the average intensity and / or to the number of rainy days a year.

*Keywords:* rainy days, average annual rainfall intensity, partial trends, climate change

## 1. INTRODUCCIÓN

Para la República Argentina en general y la provincia de Córdoba en particular la precipitación ha mostrado grandes cambios durante el siglo XX. Estos cambios se han evidenciado con mayor magnitud a partir de la década del 70. El comportamiento global de la precipitación anual en la mayoría de las estaciones del centro y este de la Argentina presenta una tendencia positiva a lo largo de todo el siglo. Sin embargo, esta tendencia no se presenta en forma homogénea sino, por el contrario, en algunas regiones se observan cambios más repentinos y abruptos. Entre los estudios más recientes que muestran estas tendencias se pueden citar trabajos de Penalba y Robledo (2006), Minetti y Vargas (1997), Minetti et al. (2003), Lucero y Rozas (2002), Liebman et al. (2004), Penalba y Vargas (2004), Penalba y Vargas (2008), de la Casa y Nasello (2010), Castañeda y Barros (2001), Barros et al. (2008). Estas variaciones del régimen pluvial en la región central de la Argentina se enmarcan en un contexto de cambio o variabilidad climática, cuya envergadura y alcance está en plena etapa de análisis y discusión, tanto a escala internacional como local. De acuerdo con IPCC Technical Paper VI (2008), “en todo el mundo se ha observado un aumento de los episodios de precipitación intensa, incluso en lugares en que la cantidad total ha disminuido. Este incremento está asociado a un aumento de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y se corresponde con el calentamiento observado”.

Un aumento de los episodios de precipitación intensa no ha sido reportado como una condición regular en Córdoba Argentina. Por ejemplo, Lucero y Rozas (2002) y Ravelo et al. (2002), quienes determinaron la existencia de una fuerte tendencia positiva en la precipitación anual para localidades de Córdoba, Argentina, reportan que este incremento se manifestó como resultado principalmente de un aumento del número de días de lluvia y no en un aumento de la intensidad de la precipitación. Por su parte, Penalba y Robledo (2006) evaluaron las tendencias en la persistencia y la frecuencia de las precipitaciones en la cuenca del Río de la Plata entre 1908 y 2004. Sostienen que la tendencia anual, tanto de la frecuencia como de la persistencia de la lluvia, se ha incrementado en casi toda la región, y en todas las estaciones del año a excepción de los meses de invierno (JJA). Estos hechos estarían

indicando un comportamiento pluviométrico en la región de Córdoba diferente del general.

En los trabajos citados anteriormente (párrafo 1 introducción), en general se han analizado las tendencias globales de la precipitación en la región, pero no se ha realizado un estudio sistemático de las tendencias tanto en los días de lluvias como en la intensidad media de cada evento. Sin embargo, para el sector agropecuario resulta de sumo interés conocer si el cambio que acusa el régimen de la lluvia se debe al aumento de la frecuencia de eventos o al incremento de la intensidad de los mismos. Mientras la mayor continuidad de la lluvia se puede interpretar ligado a condiciones productivas más favorables, al asegurar la reposición de agua para los cultivos, el incremento de la intensidad representa, en cambio, un mayor peligro de erosión hídrica y la necesidad de implementar un manejo agrícola que limite y controle el escurrimiento superficial de agua (Monnen et al., 2002). Por su parte, Todisco y Vergni (2008) analizan la repercusión potencial del cambio climático sobre el consumo de agua del cultivo de maíz.

Tal como se mencionó anteriormente, la precipitación anual en la provincia de Córdoba no presenta una tendencia lineal y homogénea en toda la región. Una alternativa de análisis de este comportamiento, consiste en identificar los puntos de quiebre presentes en una serie de datos y que establecen la transición súbita desde un período con una tendencia cuasi-lineal a otro (Tomé y Miranda, 2004). Este método fue utilizado en un trabajo previo para analizar los puntos de quiebre en las series de lluvia anual registradas por las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en la Provincia de Córdoba (de la Casa y Nasello, 2010).

La identificación de estos puntos de quiebre es de utilidad para considerar cambios abruptos producidos por agentes externos, tales como una erupción volcánica, o simplemente internos debidos a la propia dinámica climática. Esta técnica, asimismo, contribuye a realizar un análisis de mayor detalle respecto de los cambios ocurridos para agrupar las regiones que manifiestan un comportamiento similar.

En el presente trabajo se propone estudiar, usando el método de Tomé-Miranda (2004), las series de tiempo correspondientes al número de días de lluvia por año, la intensidad media anual de lluvia y la cantidad de días de lluvias con precipitación mayor a 30 mm, correspondientes a

todas las estaciones que el Servicio Meteorológico Nacional opera en la provincia de Córdoba, a fin de analizar a nivel regional las características de los cambios ocurridos en la precipitación. Asimismo, se procura determinar algún patrón temporal y regional que haya experimentado el fenómeno pluviométrico en la Provincia de Córdoba, para contribuir a interpretar el estado actual del sistema climático en la región.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de lluvia analizados corresponden a las estaciones pluviométricas que opera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la provincia de Córdoba y que integran la red de estaciones sinópticas de superficie de la República Argentina. En la Figura 1 se presenta la localización geográfica de los sitios analizados en el territorio de la provincia. Los datos suministrados por el SMN fueron registros diarios de precipitación. Las series analizadas comprenden, en general, al periodo entre 1930 y 2006, con excepción de Marcos Juárez cuya serie recién comienza a partir de 1959 y de Córdoba

que se analizó a partir de 1960. El detalle de la información se presenta en la Tabla 1.

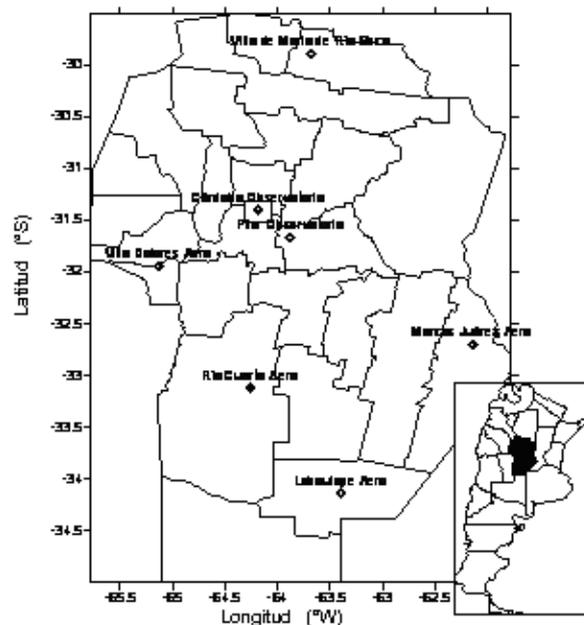


Figura 1: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de la provincia de Córdoba, Argentina, utilizadas en el estudio.

Estación meteorológica	Id	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Período
Villa de María de Río Seco	VMRS	29°54'S	63°41'W	341	1931-2006
Córdoba Observatorio	CO	31°24'S	64°11'W	425	1960-2006
Pilar Observatorio	PI	31°04'S	63°53'W	338	1925-2006
Villa Dolores Aero	VD	31°57'S	65°08'W	569	1930-2006
Marcos Juárez Aero	MJ	32°42'S	62°09'W	114	1959-2006
Río Cuarto Aero	RC	33°07'S	64°14'W	421	1934-2006
Laboulaye Aero	LB	34°08'S	63°22'W	137	1939-2006

Tabla 1: Ubicación geográfica y longitud temporal de los registros pluviométricos analizados.

En el presente estudio se analizó el total de la lluvia caída entre el 1° de enero y el 31 de diciembre de cada año (PP), y el comportamiento del número de días de lluvia por año (DD), tomando como tal los casos con lluvia > 0 mm. Ante la falta de registros generalizados y prolongados de intensidad de lluvia, a fin de representar esta condición pluviométrica se incluyeron al análisis dos variables complementarias. Una fue la intensidad media anual de la lluvia (INT), obtenida del cociente entre la lluvia total y el número de días de lluvia por año, o sea derivada de PP y DD; en tanto la

otra representación se obtuvo contabilizando los eventos diarios superiores a un umbral de lluvia alto (percentil 90), que en este caso se estableció en 30 mm (DD>30) (Nicholls y Murray, 1999; Cislighi et al., 2005)

El primer análisis consistió en la determinación de las contribuciones de DD, INT y DD>30 respecto a PP, estableciendo la correlación entre las series PP y DD, PP e INT y PP y DD>30. Asimismo, se analizó la relación entre INT y DD>30 a fin de evaluar los dos indicadores propuestos para representar la intensidad de la lluvia.

Posteriormente, se obtuvieron las tendencias parciales en las series de tiempo de las variables en estudio a partir del método de Tomé y Miranda (2004) (T-M). Este algoritmo determina la mejor combinación de segmentos continuos que minimizan la suma de los residuos al cuadrado, sujetos a la condición que el intervalo entre puntos de quiebre debe superar un cierto valor, e imponiéndole restricciones a la diferencia entre dos tendencias sucesivas. Estas tendencias parciales se obtienen, además, con la condición de que el intervalo entre los puntos de interrupción debe superar un cierto valor, llamado MINIX. A continuación, el algoritmo determina la mejor combinación de segmentos continuos, es decir, los que minimizan el error cuadrático medio. En el presente trabajo, al igual que en otro previo (de la Casa y Nasello, 2010), los valores MINIX se adoptaron iguales o superiores a 10 y el número máximo de segmentos estudiado fue 3. El algoritmo utilizado tiene en cuenta que dos tendencias consecutivas deben ser de distinto signo con el fin de analizar la serie de tiempo con un comportamiento cíclico. Usando diferentes valores de MINIX el algoritmo puede dar el mismo número de puntos de quiebre. En estos casos, se optó por los puntos de quiebres correspondientes al conjunto de rectas con el valor más bajo de la suma de los residuos al cuadrado (SS).

Finalmente, en las series totales y en cada uno de los tramos parciales que resultan de aplicar el procedimiento de Tomé-Miranda (2004), se utilizó el test de Mann-Kendall (M-K) para evaluar el nivel de significación de la tendencia observada en cada segmento de manera independiente (Helsel y Frans, 2006). Para ello se calcularon las variables estadísticas  $S$  y  $Z$  definidas como (Sneyers, 1990):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

donde  $x_j$  y  $x_k$  corresponden a la variable analizada en los años  $j$  y  $k$ ,  $j > k$ , respectivamente, y  $\text{sign}(x_j - x_k)$  es  $+1$ ,  $0$ , o  $-1$  de acuerdo al signo de  $(x_j - x_k)$ ; y:

$$Z = S - \text{sign}(S) / (\text{VAR}(S))^{0.5}$$

siendo  $\text{VAR}(S)$  la varianza de  $S$ .

Teniendo en cuenta que  $Z$  presenta una distribución normal, la presencia de una tendencia significativa es evaluada usando su valor. Valores negativos (positivos) de  $Z$  indican tendencias negativas (positivas) de la variable analizada, y los niveles de significación  $\alpha$  pueden ser fácilmente computados. Para expresar los niveles de significación encontrados se utilizó la siguiente convención: (\*\*\*) , (\*\*), (\*) y (+) según sea  $\alpha = 0.001, 0.01, 0.05$  y  $0.1$ , respectivamente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Relación de los días de lluvia, los días de lluvia con eventos mayores a 30 mm y la intensidad media con la precipitación total para valores anuales.

En la Tabla 2 se muestra los coeficientes de correlación entre las series de los días de lluvia (DD), los días de lluvia mayores a 30 mm (DD>30) y la intensidad media anual (INT) con la precipitación anual (PP), para cada una de las localidades analizadas. En esta tabla se observa que la variación de PP en la provincia de Córdoba está asociada de manera significativa a la variabilidad, tanto de la frecuencia de eventos (DD) como a la intensidad de los mismos, ya sea representada por INT como por DD>30.

Respecto a la manera de representar la intensidad del fenómeno, se observa que es indistinto el uso de uno u otro indicador, en la medida que los coeficientes de correlación de cada uno con PP resultan muy similares, y que los valores entre ellos mismos son elevados. De acuerdo a la semejanza observada, la condición de intensidad en el análisis posterior se realizó sólo a partir de INT.

Resulta particularmente más fuerte la dependencia de PP con INT en CO, LB y MJ, mientras en VD y VMRS, en cambio, la variable que presenta la correlación más alta es DD. Por su parte, tanto en PI como en RC, ambos atributos presentan valores de correlación moderados con respecto a la lluvia anual, aunque no son muy diferentes entre si, lo que se puede interpretar como un comportamiento intermedio.

(a)	n	PP vs DD	PP vs INT	PP vs DD>30	DD vs DD>30	INT vs DD>30
CO	47	0.49	0.86	0.81	0.30	0.72
LB	67	0.33	0.81	0.76	0.02	0.76
MJ	48	0.52	0.85	0.82	0.30	0.75
PI	82	0.60	0.74	0.80	0.30	0.78
RC	73	0.51	0.63	0.79	0.20	0.67
VD	77	0.67	0.41	0.59	0.10	0.58
VMRS	76	0.70	0.57	0.77	0.40	0.60

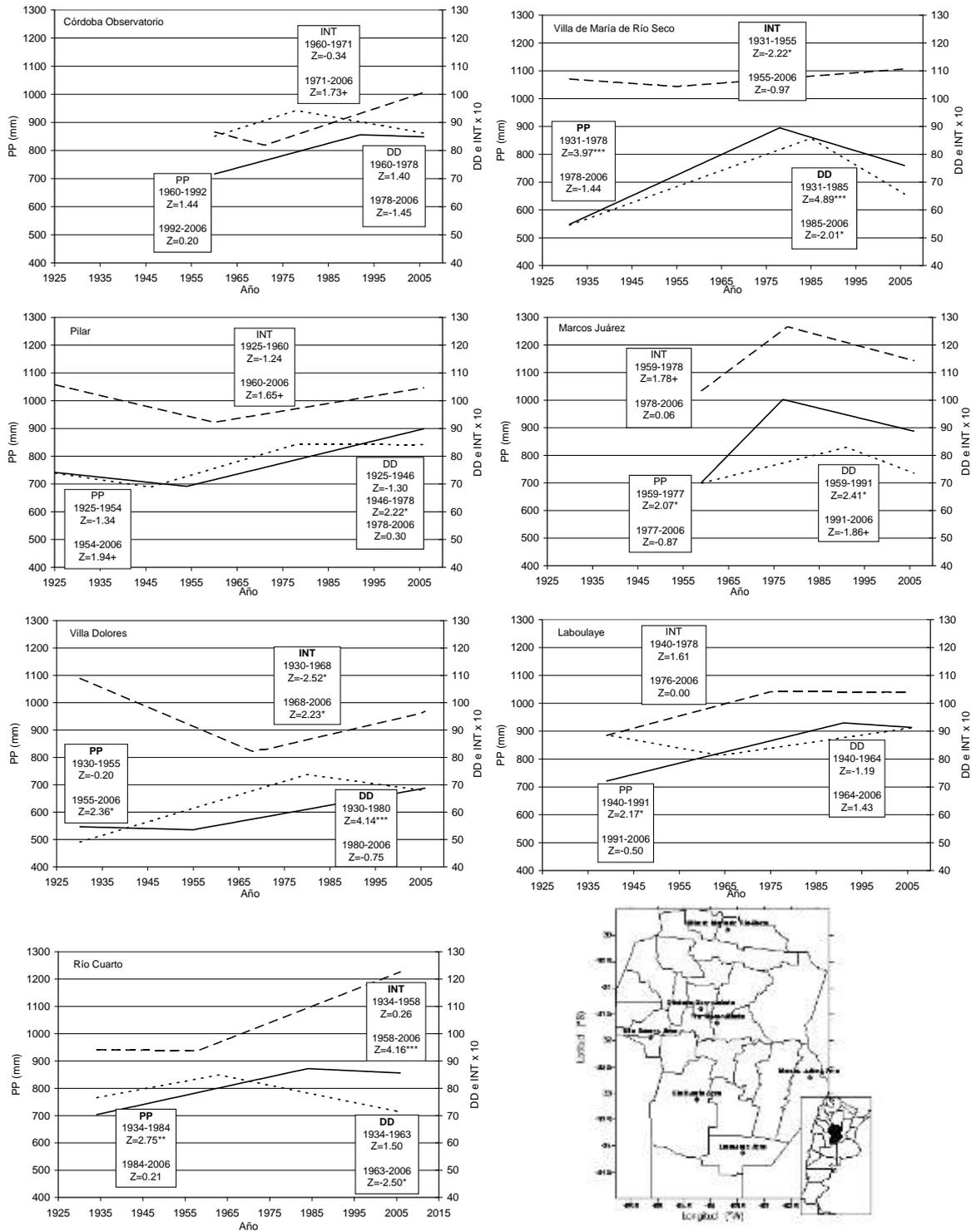
(b)	n	PP vs DD	PP vs INT	PP vs DD>30	DD vs DD>30	INT vs DD>30
CO	47	5,0E-04	4,0E-14	5,0E-12	2,0E-02	1,0E-08
LB	67	6,0E-03	1,0E-16	9,0E-14	9,0E-01	9,0E-14
MJ	48	1,0E-04	2,0E-14	1,0E-12	2,0E-02	8,0E-10
PI	82	2,0E-09	2,0E-15	2,0E-19	2,0E-02	6,0E-18
RC	73	4,0E-06	2,0E-09	1,0E-16	6,0E-02	9,0E-11
VD	77	3,0E-11	3,0E-04	2,0E-08	3,0E-01	3,0E-08
VMRS	76	5,0E-12	8,0E-08	4,0E-16	2,0E-04	1,0E-08

Tabla 2: Coeficientes de correlación (a) y significación estadística (b) de la precipitación anual (PP) con los días de lluvia (DD), la intensidad media de lluvia (INT) y la cantidad de días de lluvia superiores a 30 mm (DD>30) en distintas estaciones de la Provincia de Córdoba.

### 3.2 Tendencias totales obtenidas.

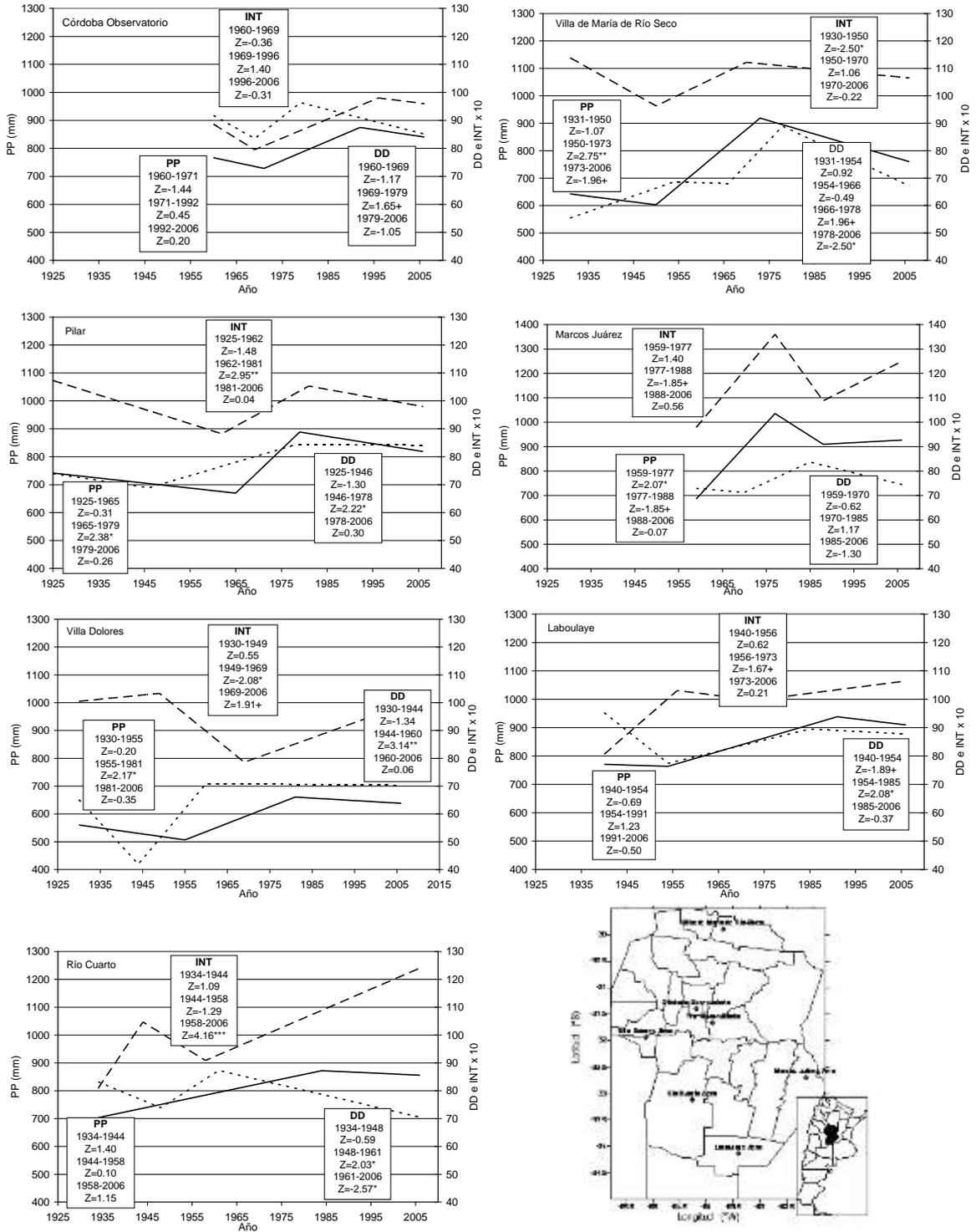
En la Tabla 3 se presentan para el conjunto de estaciones los resultados del test de Mann-Kendall de cada una de tres series de tiempo en estudio durante el período total analizado. En esta tabla se observa que, a excepción de MJ, el total anual de lluvia ha mostrado un incremento significativo ( $P < 0,10$ ).

En algunas estaciones como CO, LB y, en particular, RC, este incremento se asocia con el aumento también significativo de la intensidad de la precipitación, mientras que en otros sitios de la provincia como PI, VD, y VMRS el total de días de lluvia es la variable que presenta igualmente una tendencia positiva, de carácter muy significativo en los 3 casos ( $P < 0,001$ ).



Referencias:	PP	———	DD	-----	INT	-----
--------------	----	-----	----	-------	-----	-------

Figura 2: Tendencias parciales con un solo punto de quiebre de la precipitación anual (PP), el número de días de lluvia (DD) y la intensidad media anual (INT), junto con el nivel de significación alcanzado en ese periodo de acuerdo al test de Mann-Kendall para el conjunto de estaciones analizadas en Córdoba.



Referencias:	PP	—	DD	- - - - -	INT	- - - - -
--------------	----	---	----	-----------	-----	-----------

Figura 3: Ídem Figura 2 para 2 puntos de quiebre.

Estación	Serie		PP		INT		DD	
	Primer año	Último año	Z	Signific.	Z	Signific.	Z	Signific.
CO	1960	2006	1,89	+	2,31	*	-0,30	
LB	1939	2006	3,24	**	2,46	*	1,46	
MJ	1959	2006	1,43		0,81		1,51	
PI	1925	2006	2,74	**	0,14		4,03	***
RC	1934	2006	3,10	**	4,46	***	-1,32	
VD	1930	2006	3,39	***	-1,21		4,35	***
VMRS	1931	2006	3,66	***	0,25		3,91	***

Tabla 3: Valor de Z y nivel de significación del test de Mann–Kendall de las series completas de la Precipitación total (PP), la Intensidad media (INT) y los Días de precipitación por año (DD) en distintas estaciones de la Provincia de Córdoba.

### 3.3 Tendencias parciales obtenidas con un único punto de quiebre.

En la Figura 2 se presenta la evolución de las tendencias parciales que presentan la precipitación anual, el número de días de lluvia y la intensidad media anual, obtenidas por el método Tomé-Miranda (2004) programado para producir sólo un punto de quiebre en todas las estaciones analizadas. Es de hacer notar que en el caso de PI y para la serie correspondiente a los Días de lluvia, el método no permitió obtener menos de 2 puntos de quiebre.

En la Figura 2 se debe observar que los distintos puntos de quiebre generan subperíodos de diferente longitud y, por lo tanto, la comparación de las tendencias debe realizarse solo en términos generales, ya que los valores absolutos pueden verse afectados por el efecto de agregar o sacar años. Teniendo en cuenta solo el signo de la pendiente, en esta figura se observa que la precipitación anual de los últimos años en las estaciones CO, LB, RC, MJ, VMRS es decreciente o, al menos, abandonó la tendencia positiva que mostraba el análisis completo de la Tabla 3. Este comportamiento actual de la lluvia, si bien con tendencias no significativas de acuerdo al test de Mann-Kendall, insinúa la entrada a un periodo de menor disponibilidad de agua que constituye un estado de alerta para la región. Además, revela la aptitud del método de tendencias parciales a los efectos de ponerlo de manifiesto.

En la Figura 2 puede notarse, además, que los puntos de quiebre de las series DD y INT no concuerdan con los correspondientes a las series PP y que, a excepción de las estaciones de MJ y PI, las tendencias parciales de los días de lluvia y de la intensidad media, presentan un patrón

opuesto de variación. Esto significa, en general, que ambas variables contribuyen en la determinación de la precipitación anual.

En el caso de MJ se observa que la mayor parte del tiempo las dos variables han contribuido relativamente en fase para producir el cambio de la precipitación anual pero, de acuerdo a los resultados de la prueba de Mann-Kendall que se incluyen en la Figura 2, mientras la tasa de disminución de los días de lluvia alcanza un nivel significativo ( $P < 0,1$ ) no ocurre lo mismo con la intensidad de la precipitación. En cuanto a PI, el incremento significativo ( $P < 0,1$ ) de PP entre 1954-2006, está en consonancia con el incremento igualmente significativo de INT a partir de 1960.

Finalmente es importante de hacer notar, por su eventual repercusión negativa para la agricultura que, en todas las estaciones a excepción de VMRS, en el último período la intensidad media de la precipitación ha sufrido un incremento estadísticamente significativo o no ha disminuido, a pesar que la lluvia total en general presenta alguna tendencia a disminuir. En MJ ocurre alguna discrepancia porque, si bien la pendiente parcial que se obtiene de T-M es decreciente, el valor de Z es positivo.

### 3.4 Tendencias parciales obtenidas con dos puntos de quiebre.

En la Figura 3 se presentan las tendencias parciales de la precipitación anual, el número de días de lluvia y la intensidad media anual, obtenidas por el método de Tomé-Miranda (2004) programado para producir dos puntos de quiebre en todas las estaciones analizadas. Es de hacer notar que en el caso de RC el método no permitió obtener 2 puntos de quiebre para la serie

correspondiente a PP, y que en VMRS la serie DD produce 3 puntos de quiebre en lugar de 2. Analizando esta figura se observa que las estaciones de MJ, LB, VD y RC presentan un comportamiento similar en los días de lluvias: al principio se observa una disminución luego un aumento y actualmente una disminución. Las series de INT muestran también en estas estaciones un comportamiento similar, pero están en contra fase con los días de lluvias. El nivel de significación de cada una de las tendencias varía en cada localidad, dando como resultado diferentes comportamientos de la precipitación total. En efecto, en LB la tendencia correspondiente a los días de lluvia es más significativa que la correspondiente a la intensidad de la precipitación, lo que da como resultado que los aumentos de la precipitación anual se deban a aumentos en los días de lluvias y no a aumentos de la intensidad de la precipitación. En VD se presenta un comportamiento similar solo en los dos primeros periodos. En MJ los cambios de PP en general están vinculados con los cambios en INT y, en RC, son significativos los cambios que acusan tanto los días de lluvia como la intensidad media, dando como resultado que la lluvia total no sufra cambios significativos en el periodo analizado. En CO, PI y VMRS, las tendencias de las tres variables están aproximadamente en fase y, de esta forma, los cambios en PP se presentan asociados tanto a DD como a INT.

### 3.5 Comportamiento temporal y regional de los distintos puntos de quiebre

De acuerdo con Tome y Miranda (2004), los puntos de quiebre que se repiten o persisten al variar MINIX son los que resultan mas significativos y pueden ser indicativos de un cambio real o, al menos, consistente.

Este efecto se puede ver en la Figura 4, donde se representa en un mismo gráfico las tendencias parciales en la Intensidad de la precipitación obtenidas con uno y dos punto de quiebre (Fig. 4a y b, respectivamente).

En esta figura se observan puntos de quiebre que ocurren en años muy similares cuando se analizan dos o tres segmentos. Esto se puede ver claramente en la ventana temporal 1969-1981 en las localidades de CO, VD, LB y MJ. Esta consistencia es un indicativo de validez de los cambios ocurridos en esta época en la región.

Un análisis similar de las Figuras 2 y 3 para la variable DD, nos muestra que en esta ventana

temporal es cuando ocurre la mayor coincidencia al comparar los resultados obtenidos con uno o dos puntos de quiebre.

Al analizar las tendencias a partir de entonces vemos que la variable INT en general manifiesta tasas crecientes en la región, mientras que la variable DD presenta tasas decrecientes. Este último comportamiento es, evidentemente, el más relevante ya que la lluvia anual en la región en los últimos años ha tenido una tendencia negativa.

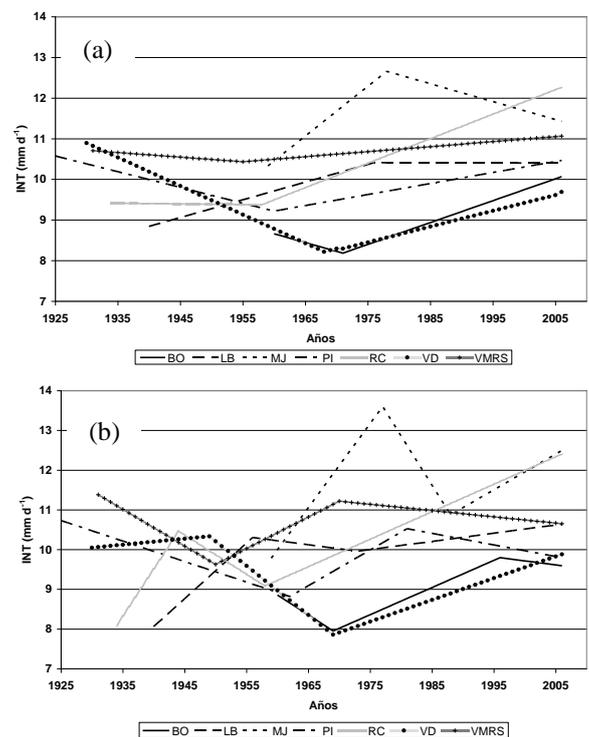


Figura 4: Tendencias parciales de la intensidad media anual de lluvia (INT) con uno (a) y dos puntos de quiebre (b) en distintas estaciones de Córdoba, Argentina, desde 1925.

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados han mostrado que el empleo de la variable INT, a pesar de su procedencia (PP/DD) es de gran utilidad para caracterizar los cambios acontecidos en el régimen de la lluvia a lo largo del tiempo. En efecto, como muestra la Figura 2 para el período más reciente en algunas localidades como CO, RC y VD se observa una relación inversa previsible entre DD e INT. En otros sitios el comportamiento no respeta esta lógica y, por ejemplo, en MJ tanto DD como INT presentan una tasa actual decreciente, y en LB PP

e INT muestran un patrón de variación similar mientras que en VMRS, los patrones similares son los de DD y PP.

Se puede concluir, además, en concordancia con diversos autores (Lucero y Rosas, 2002; Ravelo et al., 2002; Haylock et al., 2006; Leibmann et al., 2004; etc.), que la tendencia general del total anual de lluvia en la región es creciente cuando se considera el periodo completo. En cuanto a la variabilidad tanto de la intensidad media como de la frecuencia de eventos se observa tendencias diferentes, por lo cual la variación de la precipitación anual de lluvia en la provincia de Córdoba no está asociada a una sola de estas variables.

Estas conclusiones surgen tanto del análisis realizado sobre el coeficiente de correlación (Tabla 1), como aplicando el test de Mann-Kendall a las series completas (Tabla 2). El análisis detallado de los resultados obtenidos con ambos métodos muestra además que los mismos se complementan. En efecto, CO y LB presentan una correlación relativamente mayor entre INT y PP, y valores de significación de las tendencias elevados tanto en las series PP como INT. Por su parte, los mayores valores del coeficiente de correlación entre DD y PP en VD y VMRS se corresponden con altos valores de significación para la tendencia de las series DD. En PI, el último tramo de PP después del quiebre tiene una tendencia creciente y significativa (+), similar que para INT (Figura 2), en tanto el segundo tramo de DD también es creciente y con un alto nivel de significación (\*). En RC, la pendiente del segundo tramo tanto de INT como de DD tiene alto nivel de significación, pero el comportamiento es inverso.

El análisis realizado tanto con uno o dos puntos de quiebre muestra también que las variaciones de la lluvia caída en la región no pueden explicarse por un único fenómeno. Más aún, este análisis ha mostrado en CO y LB, donde existe una fuerte correlación entre PP e INT, que las dos variables han tenido cambios significativos en el periodo analizado. Por ejemplo, en LB en el período 1954-1985 el incremento de la precipitación se explica por la variación ocurrida en los días de lluvia y no en la intensidad de la precipitación, ya que la misma en ese período es decreciente.

Dejando el análisis climático sinóptico para mas adelante, de la Figura 4 se puede concluir que los cambios ocurridos en la ventana temporal que se extiende entre ~1970 y ~1980, son consistentes

en toda la región. La Figura 2 al igual que la Figura 3 muestran que, a partir de la década del 70 en todas la estaciones, a excepción de MJ, ha habido un aumento en la intensidad media, en concordancia con el informe del "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC Technical Paper VI - June 2008). Sin embargo, en la Figura 3 vemos que este comportamiento no se mantiene en todas las estaciones y es así que, por ejemplo, CO, PI, y VMRS presentan en el último tramo una disminución de la intensidad.

Es de destacar que los cambios ocurridos en la década del 70 son coincidentes con los cambios reportados en el Pacífico Sur por Gibson (1992) y Minetti y Vargas (1983), y con el incremento que se observa en la temperatura de la superficie del mar en el mismo período.

En general podemos concluir que el método de Tome-Miranda ha permitido, por un lado, detectar actualmente tendencias decrecientes de la precipitación total que se vienen convalidando en la región a partir de los registros de lluvia producidos desde entonces. Por otro lado, este método ha sido útil a fin de esclarecer que para cada sitio en particular la lluvia puede estar relacionada con los días de lluvia en alguna época y, en otras, con la cantidad de agua disponible, indicando el carácter de transición climática de la región analizada.

## 5. REFERENCIAS

- Barros, V.R., Doyle, M.E., y Camilloni, I.A., 2008: Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 19-33.
- Castañeda, M. E. y V. Barros, 2001: Tendencias de la precipitación en el oeste de Argentina. *Meteorológica* 26, 1, 5 -23.
- Cislaghi, M., De Michele, C., Ghezzi, A., Rosso, R., 2005. Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: Analysis of long daily Italian series. *Atmospheric Research* 77, 188-202.
- de la Casa A., Nasello O., 2010. Breakpoints in annual rainfall trends over Córdoba, Argentina. *Atmospheric Research* 95, 419-427
- Gibson T.T., 1992. An observed poleward shift of the Surthen Hemisphere subtropical wind maximum – a greenhouse symptom? *Int. J. Climatol.* 12, 637-640.
- Haylock, M.R., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J.,

- Barros, V.R., Berlato, M.A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V.J., Grimm, A.M., Karoly, D., Marengo, J.A., Marino, M.B., Moncunill, D. F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J.L., Trebejo, I., Vincent, L.A., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* 19, 1490-1512.
- Helsel, D., Frans, L., 2006. Regional Kendall test for trend. *Environmental Science & Technology* 40, 4066-4073
- IPCC Technical Paper VI - June 2008 Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. IPCC Secretariat, Geneva.
- Liebmann, B., Vera, C., Carvalho, L., Camilloni, I., Barros, V., Báez, J., Bidegain, M., Camilloni, I., Hoerling, M., Allured, D.A., 2004. An observed trend in central South American precipitation. *J. Climate* B. 17, 22, 4357-4367
- Lucero, O.A., Rozas, D., 2002. Characteristics of aggregation of daily rainfall in a middle-latitudes region during a climate variability in annual rainfall amount. *Atmospheric Research* 61, 35-48.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., 1983. Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamérica. I Parte. *Meteorológica* 14, 1-2, 645-656.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., 1997. Trends and jumps in the annual precipitation in South America, South of the 15° S. *Atmósfera* 11, 205-221
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R., Casagrande, G., 2003: Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera* 16, 119-135.
- Moonen, A.C., Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A., 2002. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agric. For. Meteorol.* 111, 13-27.
- Nicholls N., Murray W., 1999. Workshop on indices and indicators for climate extremes. Precipitation. Asheville NC USA 3-6 June 1997. *Climatic Change* 42, 23-29.
- Penalba O., Vargas W.M., 2004. Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *Int. J. Climatol.* 24, 1565- 1580
- Penalba, O., Robledo, F., 2006. Trends in extreme daily rainfall events in La Plata Basin. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. American Meteorological Society. Foz de Iguazu, Brasil.
- Penalba, O.C., Vargas W.M., 2008. Variability of low monthly rainfall in La Plata Basin. *Meteorological Applications* 15(3), 313-323.
- Ravelo, A.C., Irastorza, R.O., Luque, L.E., 2002. Variabilidad de la tendencia en series pluviométricas de la provincia de Córdoba (Argentina). *Revista Argentina de Agrometeorología* 2(1), 69-74.
- Sneyers, R., 1990. On the statistical analysis of series of observations. Tech. Note 143, WMO-No. 415. 192 pp.
- Todisco, F., Vergni, L., 2008. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1-11.
- Tomé, A.R., Miranda, P.M.A., 2004. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. *Geophys. Res. Lett.* 31, L02207, doi:10.1029/2003GL019100.



## APLICACIÓN DE UN ÍNDICE PARA EL ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN LLUVIOSA EN LA REGIÓN SUBTROPICAL DE ARGENTINA

Juan A. Rivera<sup>1,2,\*</sup>, Natalia Herrera<sup>4</sup>, Carla N. Gulizia<sup>1,2,3</sup>, Natalia B. Montroull<sup>2,3</sup>, Pablo C. Spennemann<sup>2,3</sup> y Natalia Zazulie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> CONICET, Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-UBA/CONICET), Buenos Aires, Argentina.

<sup>4</sup> Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Buenos Aires, Argentina.

(Manuscrito recibido el 16 de abril de 2010, aceptado el 22 de febrero de 2012)

### RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es identificar la época de inicio y fin de la estación lluviosa en la Argentina al norte de 30°S mediante un índice adecuado y analizar su variabilidad interanual en regiones homogéneas respecto a la variabilidad temporal de la precipitación. Se utilizaron datos de precipitación diaria en 19 estaciones pluviométricas de la República Argentina provistos por el Servicio Meteorológico Nacional, para el período 1974-2004, y datos de viento zonal en el nivel de 850 hPa de los reanálisis del ECMWF (ERA-40) para el período 1979-1999. Se establecieron las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa para cada estación pluviométrica mediante un criterio de acumulación de precipitación. Este criterio resulta ser adecuado para analizar regiones cuyo ciclo anual de precipitación es marcado. El análisis de la variabilidad interanual de las series de inicio y fin de la estación lluviosa muestra que ambas regiones poseen tendencias hacia una extensión en la longitud de la misma. Se encuentra que los cambios en la componente zonal del viento en niveles bajos, de valores positivos (de mediados de abril a principios de septiembre) a valores negativos (principios de septiembre a mediados de abril), representan el inicio y fin climatológico de la estación lluviosa.

*Palabras clave:* Índice, estación lluviosa, tendencias, Argentina subtropical.

### INDEX APPLICATION FOR THE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THE RAINY SEASON IN SUBTROPICAL REGION OF ARGENTINA

### ABSTRACT

The main objective of this study is to identify the dates of the onset and end of the rainy season in Argentina North of 30°S, through an appropriate index, and to analyze its interannual variability in homogeneous regions with respect to the temporal variability of precipitation. We used daily precipitation data from 19 pluviometric stations in Argentina provided by the National Weather Service for the period 1974-2004, and zonal wind data at the level of 850 hPa derived from ECMWF (ERA-40) for the period 1979-1999. The dates of the onset and end were established for each station through a rainfall accumulation criterion. This criterion is adequate to analyze regions which have an accentuated rainfall annual cycle. The analysis of the interannual variability of the rainy season's series showed that both regions have a trend towards an extension in length. We found that changes in the low level zonal wind, from positive values (from mid-April to

early September) to negative values (early September to mid-April), represent the climatological onset and end of the rainy season.

*Keywords:* Index, Rainy season, trends, Subtropical Argentina.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola en el norte de Argentina se vio beneficiada en las últimas décadas por los aumentos progresivos en la precipitación. Hasta la década de 1960 esta región era considerada semiárida. Hoffmann y otros (1987) observaron el corrimiento de la isoyeta de 800 mm hacia el oeste en más de 100 km, que en el norte del país delimita la posibilidad de la agricultura de secano. Como las isoyetas se posicionan en dirección norte-sur, los incrementos en las precipitaciones favorecieron la extensión de la frontera agropecuaria (Castañeda y Barros, 1994; Castañeda y Barros, 2001) y, en consecuencia, aumentó la capacidad productiva de las tierras en más de 100.000 km<sup>2</sup> (Barros y otros, 2008). Este aumento estuvo acompañado de una mayor variabilidad interanual en la precipitación (Barros y otros, 2000), lo cual incrementa el riesgo de sequías o inundaciones debido a que el inicio y el fin de la estación lluviosa pueden sufrir retrasos o adelantos considerables.

El comienzo y la duración de la estación lluviosa afectan varias actividades sociales y económicas, como la planificación agrícola y el manejo de recursos hídricos (Raia y Cavalcanti, 2008). Dado que las fechas de inicio y fin de estación lluviosa tienen influencia sobre las fechas de siembra y cosecha, los beneficios a la sociedad en la región subtropical argentina pueden ser aprovechados mediante la confección de calendarios para los tomadores de decisión en función de pronósticos de la estación lluviosa. Rivera y otros (2009) analizaron la distribución espacial y temporal de los valores climáticos de las fechas de inicio de la estación lluviosa en la región subtropical de Argentina, estimadas a partir de datos de precipitación. A nivel mundial, estudios de este tipo fueron realizados por Laux y otros (2008), Mugalavai y otros (2008); y otros autores.

El transporte de humedad es fundamental en la generación de precipitación, y uno de sus componentes es el viento en niveles bajos. Diversos estudios utilizan el viento como índice para determinar el inicio y fin de la estación lluviosa (Wang y otros, 2004; Zhang, 2009, entre otros). Gan y otros (2004) analizaron los aspectos

climatológicos de la circulación del monzón sudamericano, y encontraron una inversión en la dirección del viento zonal en 850 hPa entre 20°S y 30°S, promediado entre 50°O y 60°O. El viento zonal es del este durante la estación seca y del oeste durante la estación lluviosa, en cambio el viento meridional en 850 hPa no presenta una variación anual marcada.

Si se considera como objetivo futuro la predicción de la estación lluviosa y no el monitoreo de la misma, es conveniente examinar las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa como promedios regionales (Camberlin y Diop, 2003). Este análisis regional permite minimizar los efectos que poseen los eventos locales de convección en las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa. En este estudio se identifican las características de la estación lluviosa, a través de su duración, inicio y fin, en Argentina al norte de 30°S, mediante un índice adecuado y se analiza su variabilidad interanual a nivel regional. Además se intenta determinar si la rotación del viento zonal ocurre previa al inicio y al fin de la estación lluviosa en esta región. Esto último podría ser utilizado como indicador del inicio y fin de la época de lluvia.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Área de estudio

La región subtropical argentina comprende la porción del territorio ubicada al norte de 30°S, y totaliza una extensión de aproximadamente 1.000.000 km<sup>2</sup> (Figura 1). Se encuentra delimitada al oeste por la Cordillera de los Andes y está bajo la influencia de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (Kodama, 1992), un jet de capas bajas (Virji, 1981; Vera y otros, 2006) y el sistema de alta presión semipermanente del Océano Atlántico. La combinación de la orografía y los patrones de circulación existentes dan como resultado diversas variabilidades en los campos de precipitación. A fin de obtener conclusiones adecuadas a las distribuciones de precipitación presentes en el dominio de estudio, se evaluó el comportamiento de la estación lluviosa en las regiones obtenidas en Rivera y otros (2009),

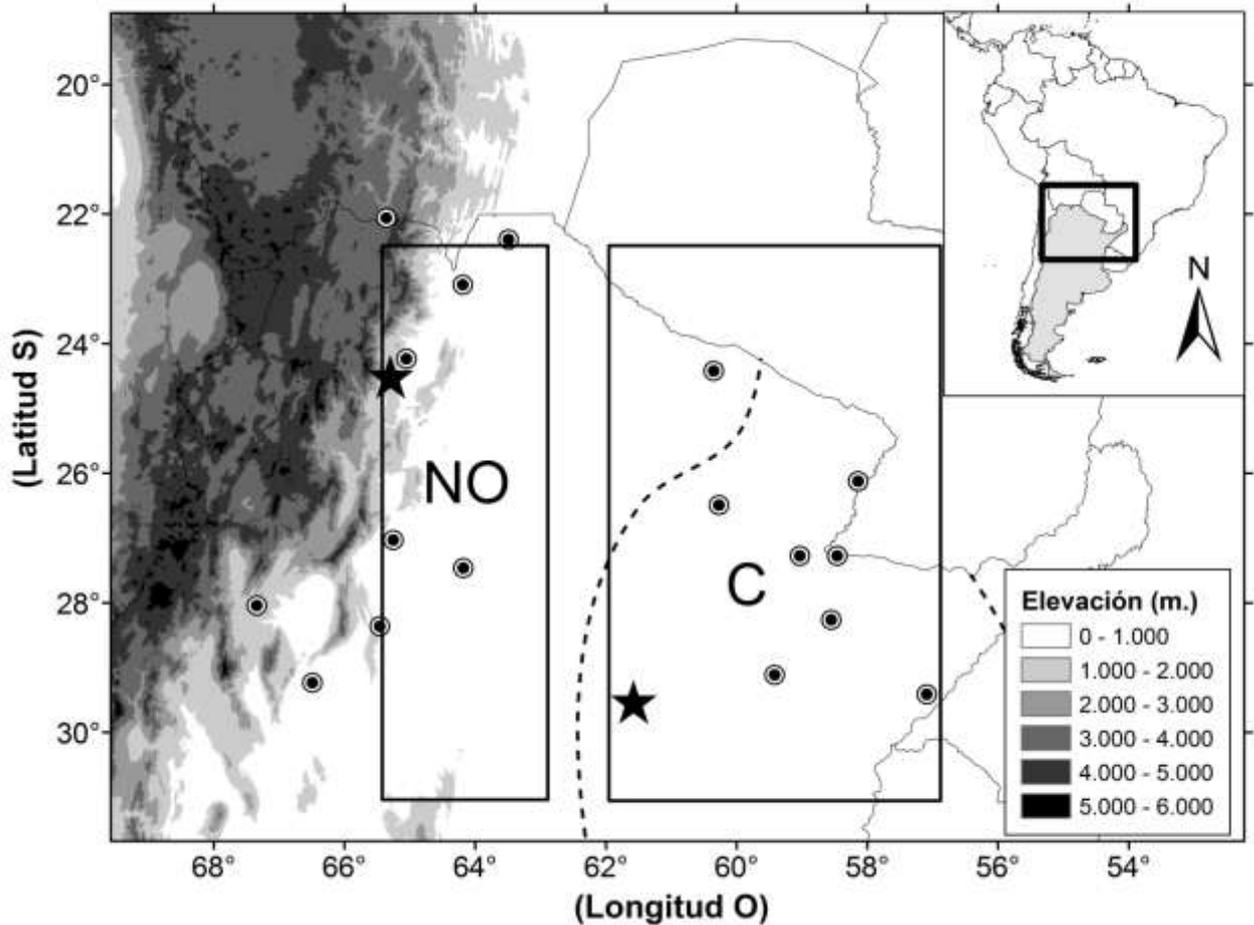


Figura 1: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas utilizadas. En línea de trazos se representa la separación de las regiones Noroeste y Central. Las cajas representan los dominios considerados para el análisis del viento en niveles bajos. Las estrellas indican la ubicación de las estaciones Salta y Ceres, las cuales representan la variabilidad de las regiones Noroeste y Central, respectivamente. En sombreado se detalla la orografía del área de estudio, la cual corresponde principalmente a la Cordillera de los Andes.

quienes aplicaron análisis de componentes principales a las series temporales de valores pentádicos de precipitación a fin de obtener regiones homogéneas respecto a la variabilidad temporal de las mismas. En dicho trabajo, se definieron dos regiones de análisis: Noroeste y Central. En la figura 1 se muestran estas regiones, las estaciones pluviométricas consideradas y las características topográficas de la región de estudio.

En la región Central, la estación lluviosa inicia hacia fines de septiembre y finaliza hacia fines de abril, con una duración aproximada de 7 meses. En la región Noroeste, la estación lluviosa se inicia hacia fines de octubre y finaliza durante los primeros días de abril, lo cual representa una

duración de poco más de 5 meses (Rivera y otros, 2009, Figura 2). A nivel climatológico, el ciclo de precipitación presenta un mínimo en los meses de invierno, el cual es más pronunciado hacia el oeste. La Figura 2 muestra el comportamiento del ciclo anual de precipitación en las estaciones Salta y Ceres, las cuales representan la variabilidad temporal de las regiones Noroeste y Central, respectivamente. Estas estaciones fueron elegidas dado que poseen la mayor correlación con las componentes principales obtenidas por Rivera y otros (2009). Rusticucci y Penalba (2000) encontraron que la varianza y la amplitud asociadas a la onda anual de precipitación son mayores en la región Noroeste respecto a la región Central, donde tiene más presencia la onda

semi-anual. Los acumulados de precipitación van desde los 1500 mm anuales en el extremo este de la región, a los 400 mm en la zona cordillerana (Tabla I). Este gradiente este-oeste en la precipitación media anual es la característica más importante de esta variable en la región (González y Barros, 1998).

En cuanto al tipo de precipitaciones en la región de estudio, Wölcken (1954) clasifica las lluvias del centro y norte del territorio argentino distinguiendo dos clases principales: frontales y no frontales, las cuales aportan el 79% y el 21% de la cantidad total de precipitación, respectivamente.

Dado que al este del continente los Andes actúan como una barrera para el ingreso en niveles bajos de humedad desde el Pacífico, las únicas fuentes de vapor de agua para la precipitación en el sudeste de Sudamérica son el océano Atlántico y la zona tropical continental (Barros y otros, 2002).

## 2.2. Datos utilizados

En el presente trabajo se utilizaron datos de precipitación diaria de 19 estaciones pluviométricas provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (Tabla I), para el período 1974-2004. Estas estaciones fueron seleccionadas en función de su completitud: se consideraron aquellas que poseen menos del 10% de sus datos diarios faltantes. En base a estos datos se construyeron las series de promedios de

precipitación cada cinco días. Las series fueron sometidas a un proceso de relleno dado que la metodología a utilizarse en este trabajo no admite datos faltantes. Este procedimiento consistió en reemplazar la péntada faltante por su promedio climatológico. El detalle de las fechas correspondientes a cada péntada puede encontrarse en el trabajo de Kousky (1988).

Para representar el comportamiento del viento en los niveles bajos se utilizaron datos diarios de la componente zonal del viento en el nivel de presión de 850 hPa ( $U_{850}$ ) obtenidos a partir de los reanálisis del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-40 (Uppala y otros, 2005). Se eligió este conjunto de datos por su alta resolución espacial ( $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ ). Se analizó la componente zonal del viento dado que presentó mayores variaciones estacionales en la región de estudio respecto a la componente meridional. Al igual que con los datos de precipitación, se construyeron promedios pentádicos, que fueron analizados a nivel regional. El período analizado para esta variable comprende de 1979 a 1999. Se consideraron los dominios comprendidos entre  $62^\circ\text{O}$  y  $57^\circ\text{O}$  para representar la región Central y entre  $65,5^\circ\text{O}$  y  $63^\circ\text{O}$  para representar la región Noroeste. Ambas regiones se encuentran entre  $22,5^\circ\text{S}$  y  $31^\circ\text{S}$  (Figura 1). Debido a la presencia de la Cordillera de los Andes, se redujo la dimensión longitudinal del dominio que comprende la región Noroeste.

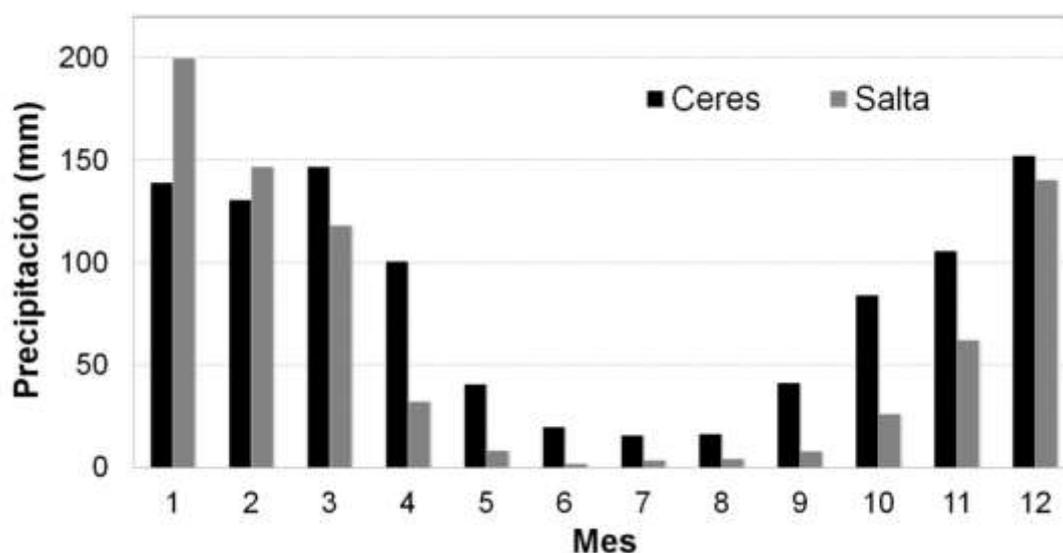


Figura 2: Precipitación climatológica mensual (mm) para las estaciones Salta y Ceres, representativas de las regiones Noroeste y Central, respectivamente.

Estación	Lat (°)	Lon (°)	Altura (m)	Precipitación anual (mm)
La Quiaca	-22,06	-65,36	3459	346
Orán	-23,09	-64,19	357	1021
Tartagal	-22,39	-63,49	450	949
Jujuy	-24,23	-65,05	905	746
Salta	-24,51	-65,29	1221	744
Las Lomitas	-24,42	-60,35	130	931
Famaillá	-27,03	-65,25	363	1364
Santiago Del Estero	-27,46	-64,18	199	658
Pcia. R. Saenz Peña	-26,49	-60,27	92	1151
Resistencia	-27,27	-59,03	52	1440
Formosa	-26,12	-58,14	60	1461
Corrientes	-27,27	-58,46	62	1479
Tinogasta	-28,04	-67,34	1201	214
La Rioja	-29,23	-66,49	429	424
Catamarca	-28,36	-65,46	454	461
Ceres	-29,53	-61,57	88	995
Reconquista	-29,11	-59,42	53	1275
Bella Vista	-28,26	-58,55	70	1358
Paso de los Libres	-29,41	-57,09	70	1612

Tabla I: Características de las 19 estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio.

### 2.3. Criterio para la identificación de la estación lluviosa.

Para determinar las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa en cada región, se evaluaron diversos criterios utilizados en Sudamérica basados en datos de precipitación. Numerosos trabajos definen diversos umbrales para los valores de precipitación pentádica. Franchito y otros (2008) definen el comienzo de la estación lluviosa para la péntada cuyo valor supera el valor de precipitación pentádica media, siendo además mayores a este valor 2 de las 4 péntadas siguientes. Marengo y otros (2001) proponen que el inicio del monzón sudamericano se da en la péntada cuyo promedio diario de precipitación supera los 4 mm/día, siendo 6 de las 8 péntadas anteriores (siguientes) menores (mayores) a 3,5 (4,5) mm/día. Mediante la aplicación de estos índices se obtuvo que la definición de la estación lluviosa en las regiones analizadas no fue posible dadas las características aleatorias de la

precipitación, sobre todo en la región del Noroeste argentino. En base a este resultado, se utilizó el criterio de acumulación de precipitación propuesto por Liebmann y Marengo (2001), que permitió representar de manera adecuada el comportamiento de la precipitación en el dominio de estudio. La acumulación se define como:

$$A(p) = \sum_{i=1}^p R(i) - \bar{R} \times p, \quad [1]$$

donde  $p$  es la péntada del año considerada,  $R(i)$  es la precipitación para la péntada  $i$  y  $\bar{R}$  es la precipitación pentádica media anual. Si se considera que en las regiones de interés la estación lluviosa corresponde al período en el cual la precipitación excede su promedio climatológico anual, entonces una pendiente positiva indica la estación lluviosa. Este criterio fue utilizado anteriormente en el trabajo de González y otros (2007), donde fue comparado con otros índices para la región tropical de

Sudamérica, y por Bombardi y Carvalho (2009), entre otros.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Precipitación

El criterio de acumulación no sólo brinda información sobre las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa (representadas por los puntos de inflexión de la serie temporal), sino que además la evaluación de su pendiente provee información sobre su intensidad. A modo de ejemplo, se muestran en la Figura 3 dos casos correspondientes a la región Central cuyo comportamiento es diferente –verificado para los años 1996 y 1997-. Durante los años 1996 y 1997, los acumulados de precipitación en la región fueron de 1585 y 1341 mm respectivamente, con un valor medio anual para

la región de 1346 mm. Según se aprecia en la Figura 3, este índice identifica que la longitud de la estación lluviosa durante el año 1996 posee una longitud similar al promedio climatológico de la región. Esto puede contabilizarse considerando las péntadas 1 a 23 y 52 a 73, lo que da un total de 44 péntadas de duración, frente a las 42 péntadas de duración que presenta el promedio climatológico –desde la péntada 1 a la 24 y desde la péntada 55 a la 73-. Sin embargo, analizando la pendiente positiva de la acumulación para 1996 durante la primera parte de la estación lluviosa –de la péntada 1 a la péntada 23- se puede verificar que la misma es mayor a la curva del promedio climatológico, lo cual estaría explicando el exceso de más de 200 mm de precipitación en la región durante ese año.

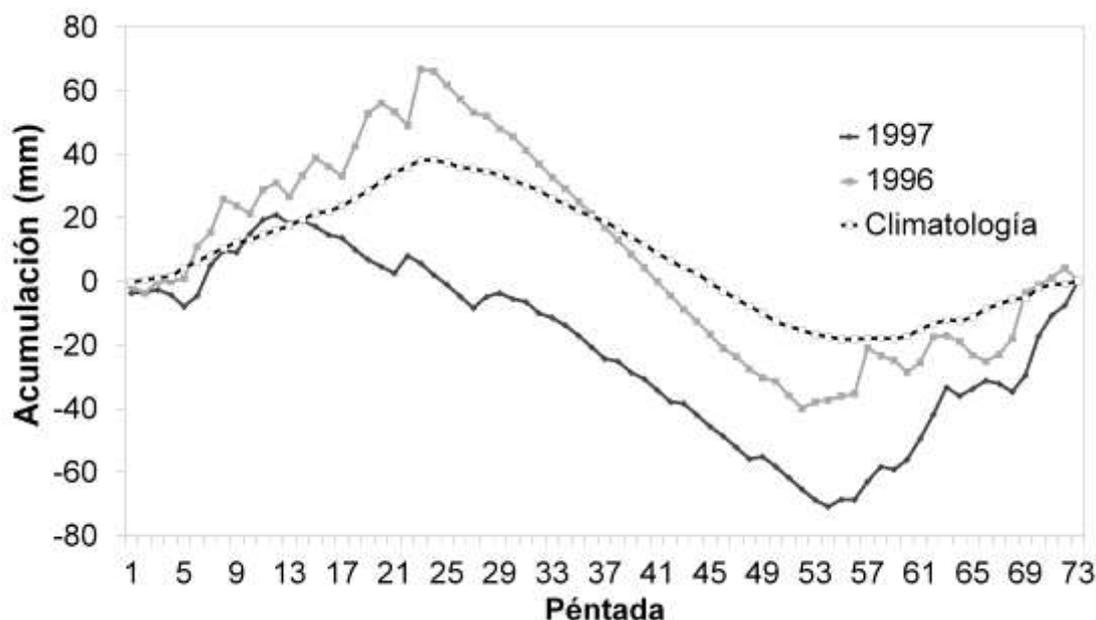


Figura 3: Comparación de la acumulación de precipitación (definida por la ecuación [1]) para la región Central en los años 1996 y 1997. Se incluye además el promedio climatológico.

Para el año 1997, que fue un año que tuvo valores de precipitación normales, se observa una longitud de la estación lluviosa más corta, la cual se manifiesta principalmente en una finalización más temprana de la misma –de la péntada 1 a la péntada 12-. Considerando la precipitación acumulada hasta la péntada 37 (30/6-04/07), la misma presenta un valor de 558 mm, en contraste con los 776,9 mm que presenta climatológicamente. Sin embargo, la marcada

pendiente positiva que se registra al comienzo de la estación lluviosa –de la péntada 54 en adelante- indica que durante el trimestre de octubre-noviembre-diciembre los valores de precipitación fueron superiores al promedio climatológico. Esto tuvo como consecuencia que el año terminara con acumulados normales de precipitación, a pesar de haber empezado con condiciones deficitarias. Ambos ejemplos muestran que la relación entre la duración de la

estación lluviosa y los acumulados de precipitación no es tan directa.

El análisis de la variabilidad interanual de las series temporales de inicio y fin de la estación lluviosa para el período 1974-2004 (Figuras 4 y 5) muestra que ambas regiones poseen tendencias hacia un comienzo más temprano de las precipitaciones y un fin más tardío. Esto implica que la longitud de la estación lluviosa se incrementó en el tiempo. La región Noroeste posee una tendencia leve significativa al 90% para las fechas de inicio de la estación lluviosa (Figura 4). Durante la primera parte del período (1974-1984), el inicio de la estación lluviosa ocurre a principios de noviembre y, durante los últimos años del análisis (1994-2004), hacia la segunda mitad de octubre. La región Central

presenta una tendencia positiva significativa al 95% (Figura 4), aunque hay que tener en cuenta que, para esta región, el inicio de la estación lluviosa no pudo ser determinado unívocamente por el criterio durante los años 1985, 1995, 1998 y 1999. Esto se debe principalmente a la distribución aleatoria de los eventos de convección locales durante esos años, que derivaron en un patrón regional pobremente definido. Las tendencias en las series de fechas de fin de la estación lluviosa presentan valores no significativos en ambas regiones. Esto implica que la estación lluviosa aumenta su longitud temporal, principalmente como consecuencia de un adelanto del inicio de la misma.

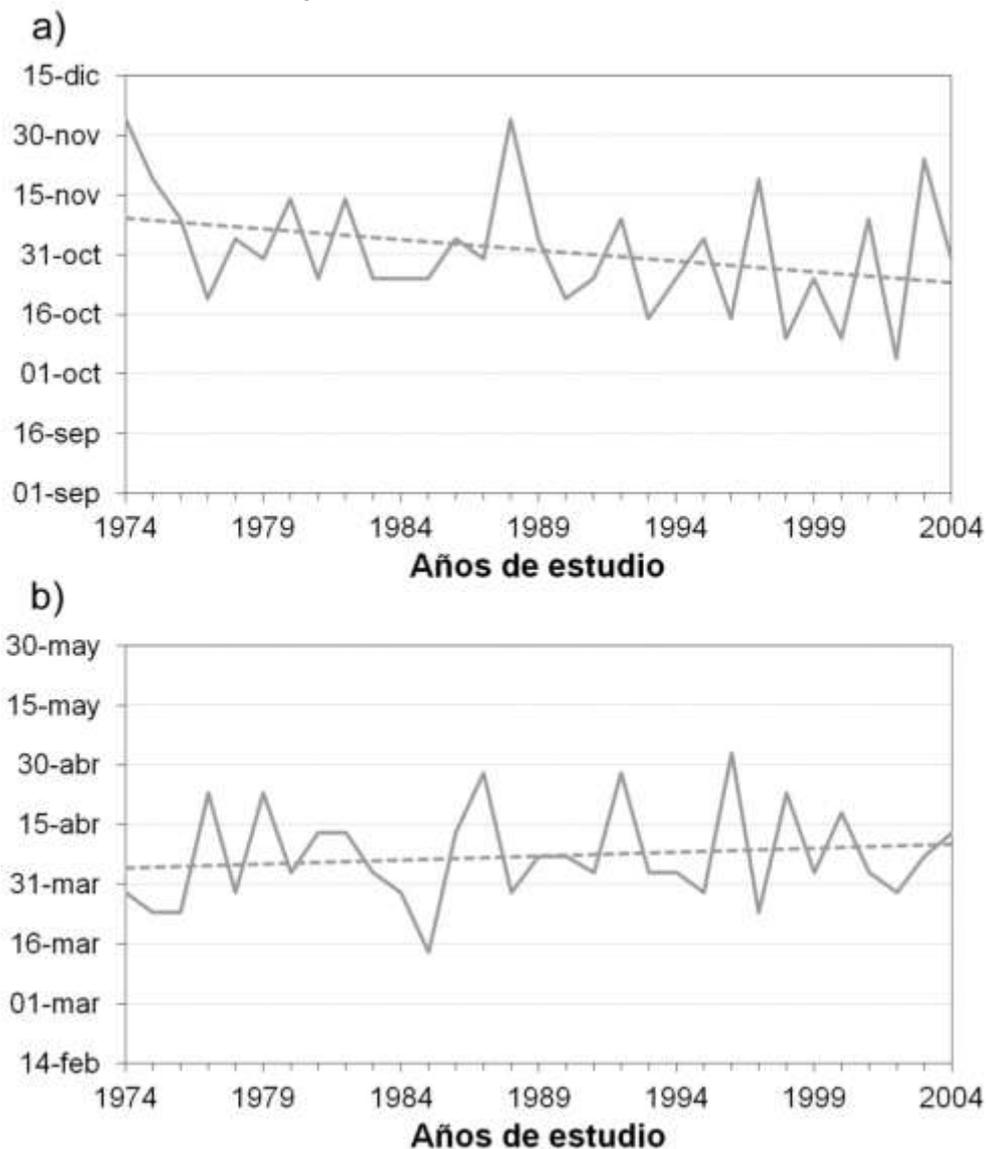


Figura 4: Series temporales de las fechas de inicio (a) y de fin (b) de la estación lluviosa para el período 1974-2004 para la región Noroeste. En línea de trazos se muestra la tendencia lineal.

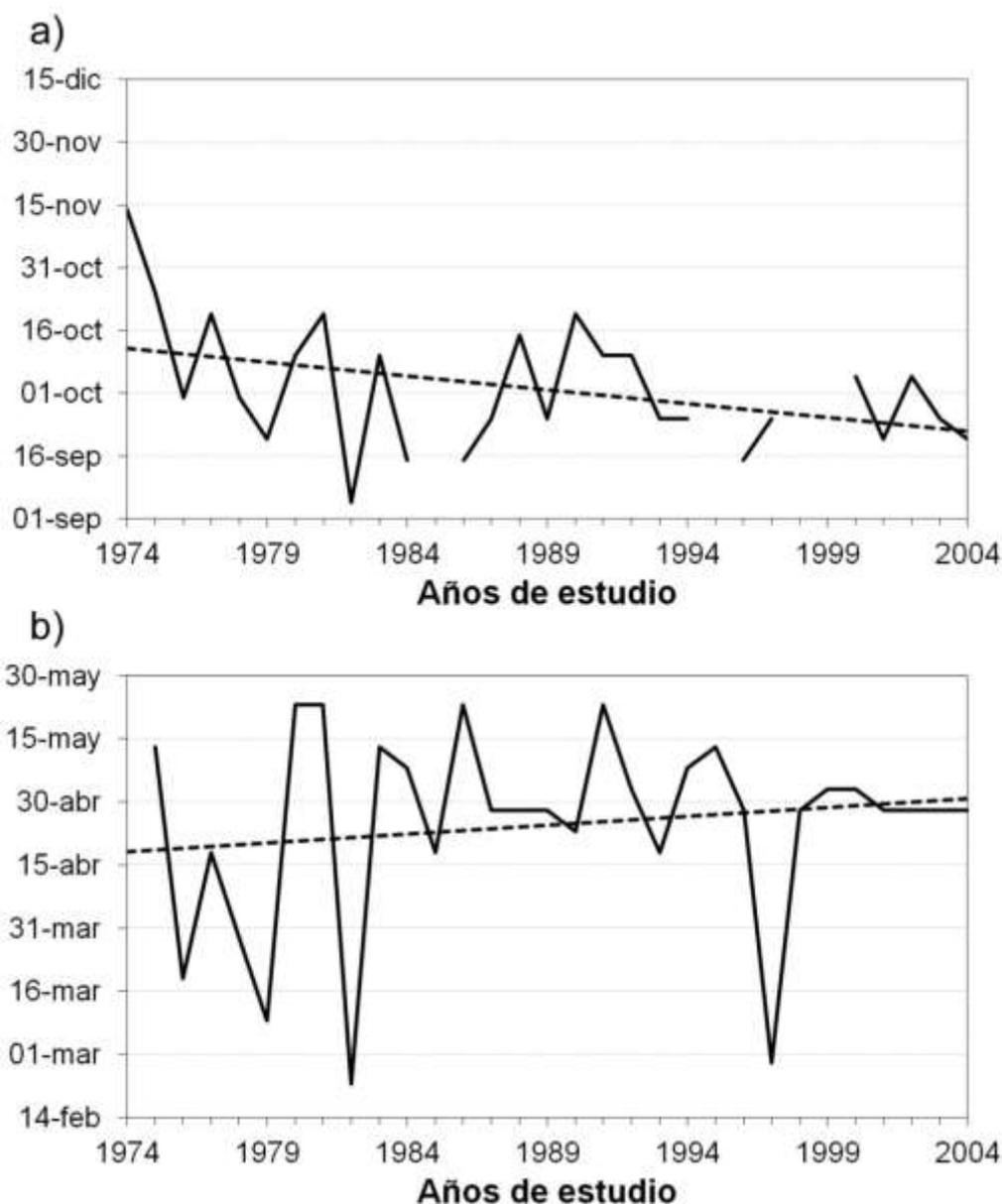


Figura 5: Ídem figura 4, para la región Central.

Dado que las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa poseen mayor interés y aplicabilidad que los totales estacionales de precipitación para fines agrícolas (Hachigonta y otros, 2008), estos resultados pueden ser útiles a fin de establecer una relación entre la variabilidad de las fechas de inicio y fin de la estación lluviosa y las fechas elegidas para la siembra y la cosecha de la producción agrícola.

### 3.2. Viento en niveles bajos

La disminución del transporte de humedad desde la región Amazónica hacia la Cuenca del Plata causa una reducción en las precipitaciones sobre

el Norte de Argentina, Paraguay, el Sur de Bolivia y el Norte de Chile (Drumond y Ambrizzi, 2008). Este resultado se obtiene también cuando disminuye el transporte de humedad desde el Océano Atlántico (Lenters y Cook, 1995). Una de las componentes de este transporte de humedad es el viento zonal en capas bajas.

A partir del análisis de la composición del vector viento en niveles bajos (Figura 6) durante la estación lluviosa, se encontró que, en la región Noroeste, los vientos son principalmente del noreste. La región Central, en cambio, muestra que la dirección del viento es predominantemente del norte, la cual rota hacia el noreste en la parte

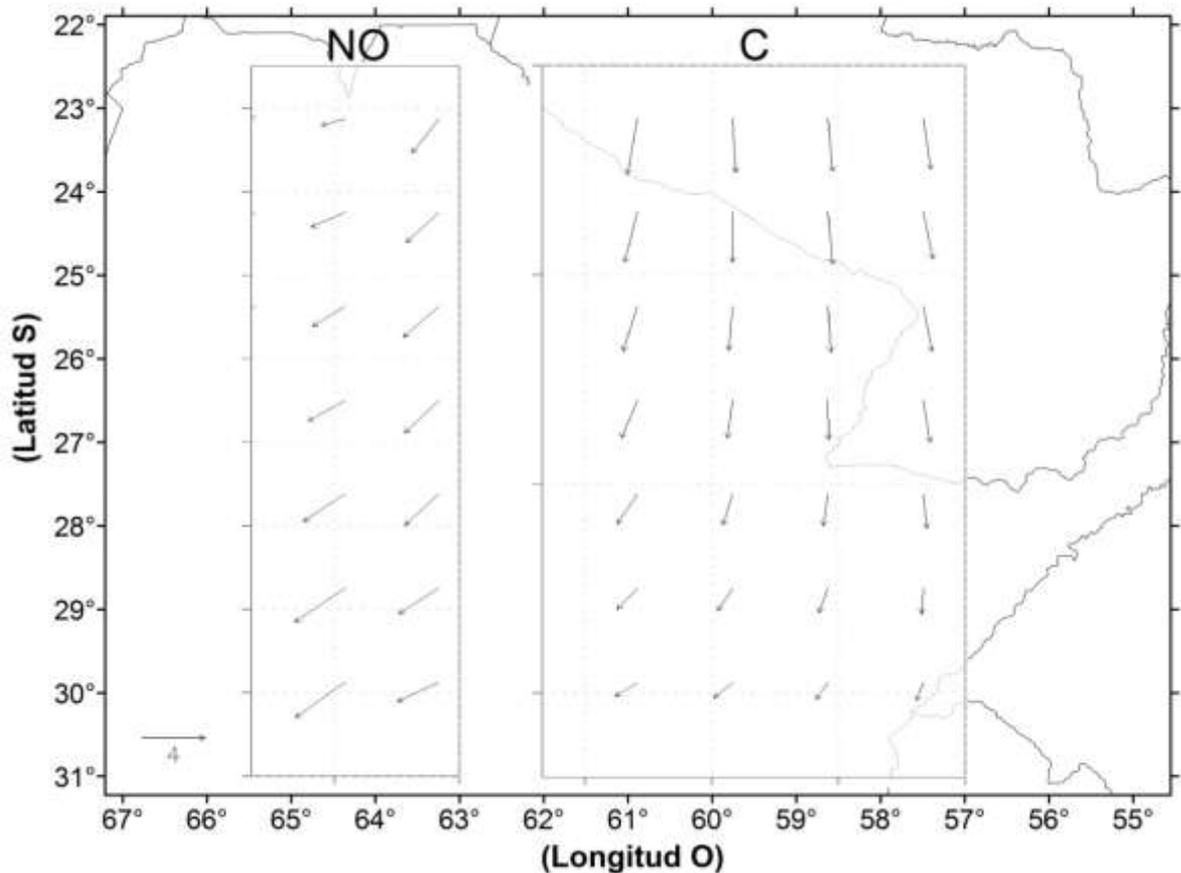


Figura 6: Climatología (1979-1999) del vector viento (m/s) en 850 hPa durante la estación lluviosa para las regiones Noroeste y Central.

sur del dominio de estudio a la vez que disminuye su intensidad.

En la Figura 7 se muestran las series de promedios pentádicos de  $U_{850}$  para las regiones Noroeste y Central. El ciclo anual de  $U_{850}$  para la región Central presenta una rotación del viento. A nivel climatológico, la evolución temporal de esta variable exhibe en la región Central vientos del este hasta mediados de abril, que rotan hacia el oeste 3 pñtadas antes de la finalización de la estación lluviosa. La rotación se da nuevamente en promedio 5 pñtadas antes del comienzo de la estación lluviosa, con un cambio de dirección de los vientos desde el oeste hacia el este. Este resultado se encuentra en concordancia con lo obtenido previamente por Gan y otros (2004),

quienes utilizaron datos de reanálisis de NCEP-NCAR. El cambio en la componente zonal del viento responde al desarrollo de la baja del Chaco durante los meses de verano. Este sistema de superficie interactúa con el sistema de alta presión del Atlántico Sur y favorece el transporte de humedad proveniente desde el Océano Atlántico (Lenters y Cook, 1995). Este aporte de humedad está ligado directamente al inicio de las precipitaciones en la región.

Mediante el análisis del ciclo anual de  $U_{850}$  sobre la región Noroeste, se observa un comportamiento similar del viento, pero en este caso no se produce una rotación sino una disminución en la intensidad, lo que indica el inicio la estación seca.

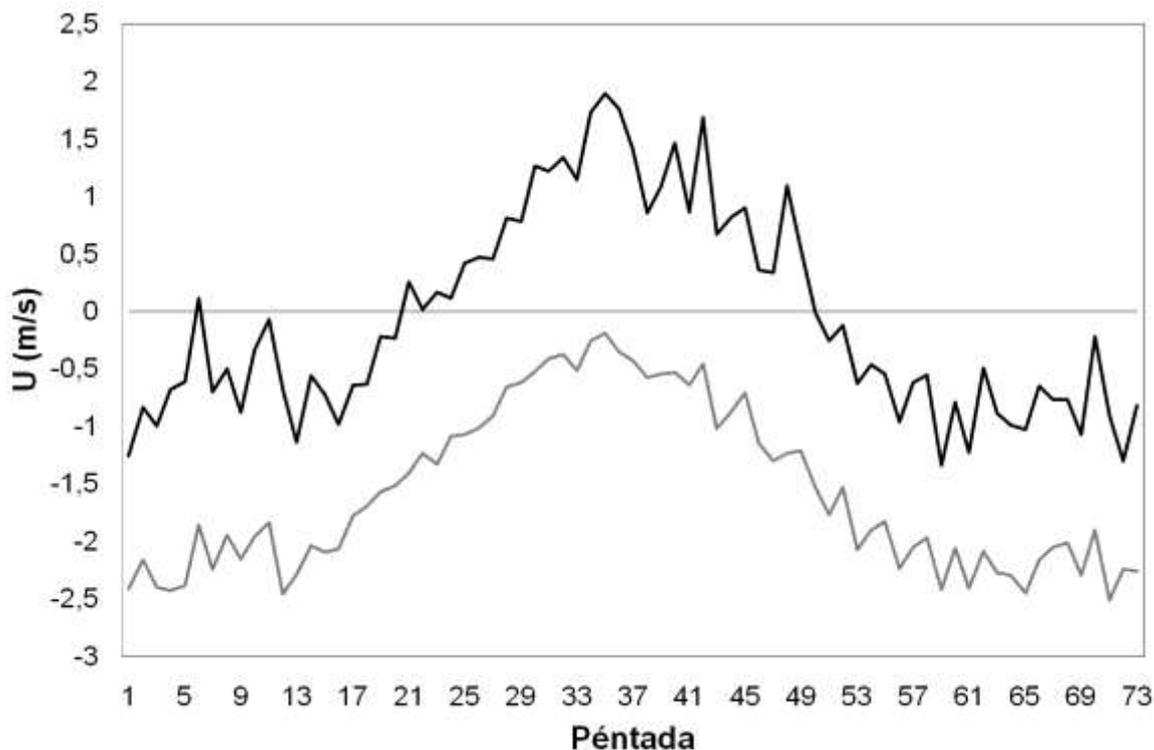


Figura 7: Serie temporal de la componente zonal del viento (m/s) en 850 hPa para las regiones Noroeste (línea gris) y Central (línea negra).

#### 4. CONCLUSIONES

Este estudio permitió identificar la evolución de la estación lluviosa en la región subtropical de Argentina al norte de 30°S a través de un criterio de acumulación de precipitación. Estos resultados complementan lo obtenido por Rivera y otros (2009) y pueden ser utilizados para la validación de resultados obtenidos a través de bases de datos de precipitación grilladas (como por ejemplo González y otros, 2007) y modelos climáticos globales (Bombardi y Carvalho, 2009).

Mediante el análisis de las series temporales de las fechas de inicio para el período 1974-2004, se identificaron tendencias hacia un incremento en la longitud de la estación lluviosa. Esto se debe principalmente a las tendencias del inicio de la misma. Teniendo en cuenta este resultado, a priori podría inferirse una relación entre el aumento en los totales anuales de precipitación, principalmente en la región Noroeste (documentado por Minetti y otros, 2003; Segunda Comunicación Nacional, 2007; entre otros), y la extensión del período de la estación lluviosa. Sin embargo, como se mostró anteriormente, la relación entre los acumulados totales de

precipitación y la extensión de la estación lluviosa no es directa y deben tenerse en cuenta otros factores tales como la variabilidad inter-anual e intra-estacional de la precipitación.

El análisis del ciclo estacional de la componente zonal del viento en el nivel de 850 hPa arroja resultados consistentes con lo encontrado para la precipitación. Puede verse que la evolución del ciclo estacional del viento presenta un cambio en su dirección que se relaciona con los cambios ocurridos en el inicio y fin de la estación lluviosa. Este vínculo es más evidente en la región Central, mientras que puede reconocerse también, pero en menor medida, en la región Noroeste.

A fin de establecer un modelo de pronóstico, los resultados obtenidos a partir del análisis del viento zonal en capas bajas son muy importantes, aunque resta investigar su variación interanual. Además, deberán incluirse dentro de este modelo los años con comienzos indefinidos, como se propone en Lo y otros (2008).

Agradecimientos: Al Servicio Meteorológico Nacional y al proyecto CLARIS LPB de la Comunidad Europea por la provisión de los datos para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Barros, V.R., González, M., Liebmann, B., Camilloni, I.A., 2000. Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. *Theor. Appl. Climatol.*, 67, 123-133.
- Barros, V.R., Doyle, M., González, M., Camilloni, I.A., Bejarán, R., Caffera, R.M., 2002. Climate Variability over Subtropical South America and the South American Monsoon: A Review. *Meteorológica*, 27, 33-57.
- Barros, V.R., Doyle, M.E., Camilloni, I.A., 2008. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, 93, 1-2, 19-33.
- Bombardi, R.J., Carvalho, L.M.V., 2009. IPCC global coupled model simulations of the South America monsoon system. *Clim. Dyn.*, 33, 893-916.
- Camberlin P., Diop, M., 2003. Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research*, 23, 159-169.
- Castañeda, M., Barros, V., 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono sur de América al este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Castañeda, M., Barros, V., 2001. Tendencias de la precipitación en oeste de la Argentina. *Meteorológica*, 26, 5-23.
- Drumond, A.R. de M., Ambrizzi, T., 2008. The role of the South Indian and Pacific oceans in South American monsoon variability. *Theor. Appl. Climatol.*, 94, 125-137.
- Franchito, S.H., Rao, V., Barbieri, P.R.B., Santo, C.M.E., 2008. Rainy-season duration estimated from OLR versus rain gauge data and the 2001 drought in Southeast Brazil. *J. Appl. Met. Clim.*, 47, 5, 1493-1499.
- Gan, M.A., Kousky, V.E., Ropelewski, C.F., 2004. The South America Monsoon Circulation and Its Relationship to Rainfall over West-Central Brasil. *J. Climate*, 17, 47-66.
- González, M., Barros, V., 1998. The relationship between tropical convection in South America and the end of the dry period in Subtropical Argentina. *Int. J. Climatol.*, 18, 1669-1685.
- González, M., Vera, C.S., Liebmann, B., Marengo, J.A., Kousky, V., Allured, D., 2007. The nature of the rainfall onset over central South America. *Atmósfera*, 20, 4, 379-396.
- Hachigonta, S., Reason, C.J.C., Tadross, M., 2008. An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theor. Appl. Climatol.*, 91, 229-243.
- Hoffmann, J.A., Núñez S., Gómez, A., 1987. Fluctuaciones de la precipitación en la Argentina, en lo que va del siglo. *Actas del II Congreso Interamericano de Meteorología. V Congreso Argentino de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina. Págs. 12.1.1-12.1.5.
- Kodama, Y.-M., 1992. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813-836.
- Kousky, V.E., 1988. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South America sector. *Revista Brasileira de Meteorología*, 3, 217-231.
- Laux, P., Kunstmann, H., Bárdossy, A., 2008. Predicting the regional onset of the rainy season in West Africa. *Int. J. Climatol.*, 28, 329-342.
- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1995. Simulation and diagnosis of the regional summertime precipitation climatology of South America. *J. Climate*, 8, 2988-3005.
- Liebmann B., Marengo, J., 2001. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *J. Climate*, 14, 4308-4318.
- Lo, F., Wheeler, M.C., Lennox, S., 2008. Improving predictions of the North Australian wet season: onset and duration. *CAWCR Technical Report No. 001*. Melbourne, Australia, 33 págs.
- Marengo J., Liebmann, B., Kousky, K., Filizola, N., Wainer, I., 2001. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. *J. Climate*, 14, 833-852.
- Minetti J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R., Casagrande, G., 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera*, 16, 119-135.
- Mugalavai, E.M., Kipkorir, E.C., Raes, D., Rao, M.S., 2008. Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1123-1135.
- Raia, A., Cavalcanti, I.F.A., 2008. The Life Cycle of the South American Monsoon System. *J. Climate*, 21, 6227-6246.
- Rivera, J., Herrera, N., Gulizia, C., Montroull, N., Spennemann, P., 2009. Identificación del inicio de la estación lluviosa en la región subtropical

- de Argentina. Actas XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Mendoza, Argentina. Págs. 61-67. ISBN 978-987-25291-1-6.
- Rusticucci, M.M., Penalba, O.C., 2000. Interdecadal changes in precipitation seasonal cycle over South America. Relationship with surface temperature. *Climate Research*, 16, 1-15.
- Segunda Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. República Argentina, 2007. 200 págs. [http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/Segunda Comunicación Nacional.pdf](http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/Segunda%20Comunicacion%20Nacional.pdf)
- Uppala, S., Kallberg, P., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D.C., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.F., Morcrette, J.J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961–3012.
- Vera, C., Baez, J., Douglas, M., Emmanuel, C.B., Marengo, J., Meitin, J., Nicolini, M., Nogues-Paegle, J., Paegle, J., Penalba, O., Salio, P., Saulo, C., Silva Dias, M.A., Silva Dias, P., Zipser, E., 2006: The South American Low-Level Jet Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 63–77.
- Virji, H., 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 599-610.
- Wölcken, K., 1954. Algunos aspectos sinópticos de la lluvia en la Argentina. *Meteoros*, Año IV, N°4, 327-366.
- Wang, B., LinHo, Y. Zhang, and M.M. Lu, 2004: Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. *J. Climate*, 17, 699–710.
- Zhang, H., 2009: Diagnosing Australia-Asian monsoon onset/retreat using large-scale wind and moisture indices. *Climate Dynamics*, 35, 4, 601-618.

## NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

Los trabajos enviados a Meteorologica no deberán haber sido publicados anteriormente ni enviados a otras revistas para su evaluación en forma simultánea.

La revista cuenta con las secciones, “Artículos” y “Notas y Correspondencia”.

- **Artículos:** son trabajos de investigación completos dentro de la temática general de Meteorologica.
- **Notas:** incluye descripciones breves de técnicas, métodos, datos o contribuciones cortas que merezcan su pronta difusión.
- **Correspondencia:** contiene comentarios y discusión de artículos publicados en volúmenes anteriores y estará acompañada por la respuesta del o los autores.

### En todos los casos los autores deberán respetar las siguientes normas:

Los trabajos deberán ser remitidos a la revista por correo electrónico a meteorologica@at.fcen.uba.ar acompañados de una carta de presentación incluyendo el nombre y dirección electrónica del/los autor/es y la sección de la Revista (Artículos, Notas y Correspondencia) a la cual el autor considera más apropiado enviarlas. Los autores podrán sugerir tres revisores potenciales.

Los artículos deberán estar escritos en idioma español o inglés, se recomienda una redacción concisa, simple y coherente a lo largo de todo su desarrollo.

El texto deberá ser transcripto con un procesador de texto, preferentemente Microsoft Office Word 2003 o superior. El trabajo deberá escribirse en una columna, interlineado 1.5, con el tipo de letra Times New Roman de tamaño de 11 caracteres por pulgada.

El trabajo deberá incluir el encabezamiento, los resúmenes y a continuación el cuerpo del trabajo que siempre que sea posible, deberá estar organizado con la siguiente estructura: Introducción, Datos y Métodos, Resultados, Conclusiones, Agradecimientos, Referencias Bibliográficas. Estas secciones deberán estar numeradas correlativamente.

El **encabezamiento** incluirá: a) título del trabajo en mayúscula, b) nombres y apellidos de los autores, c) organismo, institución o entidad a las que pertenecen cada uno de los autores y lugar (ciudad y país), d) dirección electrónica del autor al cuál se deberán dirigir los editores de la Revista.

El trabajo incluirá un **resumen** en español y otro en inglés, este último precedido por el título del trabajo en inglés. Los mismos deberán ser concisos y su extensión máxima será de 200 palabras cada uno. A continuación del resumen (abstract), agregar no más de cinco Palabras clave (Keywords), en español y en inglés, respectivamente.

Las **Figuras, Mapas, Ilustraciones y Tablas** deberán incluirse al final del texto en hojas separadas. Las mismas se mencionarán en el texto, asignándole un número arábigo, excepto las tablas que se numerarán con números romanos. Cada una de ellas deberá contener un texto explicativo (leyenda). Cuando sean reproducciones de otros trabajos publicados anteriormente deberá especificarse la referencia correspondiente y contar con la autorización para reproducir las figuras. La versión final de las figuras, imágenes y fotos deberá tener una resolución de al menos 600dpi.

Las **Fórmulas y Símbolos** se escribirán con claridad. Cuando el número de expresiones matemáticas lo requiera, se numerarán correlativamente, con números arábigos entre corchetes sobre el costado derecho. Se utilizará preferentemente el Sistema Internacional de Medidas. Se deberá emplear coma para indicar las fracciones decimales y punto para las unidades de mil. Ej.: 3,24; 3.900. Se recomienda la utilización de notación científica.

Las **siglas** pueden usarse para no repetir nombres extensos de instituciones, proyectos, etc., pero la primera mención será con el nombre completo y a continuación, entre paréntesis, la sigla correspondiente en mayúsculas y sin puntos entre letras.

Ante cualquier duda por la escritura de palabras o reglas de acentuación el autor deberá tener en cuenta las últimas disposiciones de la Real Academia Española de Letras.

Los **Agradecimientos** se incluirán a continuación de la última sección del texto al margen sin numerar, precedidos por el título "Agradecimientos".

Los **Anexos o Tablas de símbolos y constantes**, si los hubiese, se colocarán antes de las referencias, sin numerar y precedidos del título "ANEXOS".

Las **citas** en el texto señalarán entre paréntesis el apellido del autor o autores y el año correspondiente al trabajo. Si el apellido del autor forma parte de una frase, sólo se colocará entre paréntesis el año de publicación. La forma de cita en el texto dependerá del número de autores de acuerdo con los siguientes ejemplos: ...Matsuno (1970)..., o (Matsuno 1970); dos autores: ...(Hoskins y Karoly 1981); más de dos autores ...(Paegle y otros 1983a); varias citas simultáneas ordenadas cronológicamente: ...(Matsuno 1970, Paegle y otros 1983a).

Las **referencias** se presentarán al final del texto del artículo bajo el título "REFERENCIAS", sin numerar, ordenadas alfabéticamente por el apellido del primer autor. Cuando los trabajos incluyan más de un autor, siendo el primer autor el mismo, se ordenarán alfabéticamente de acuerdo con el apellido de los demás autores. Las referencias de un mismo autor se ordenarán cronológicamente y, si hay varias para un mismo año, se agregará a continuación del año letras minúsculas en orden alfabético (... 1991a,... 1991b,...).

**-Libros:** Se indicará el apellido e iniciales de los nombres de los autores, año de la publicación, título del libro, volumen, editor, edición, editorial y número de páginas. Para el caso de libros que reúnen trabajos de distintos autores, se indicará el título del artículo o capítulo antes de citar el título del libro.

Ejemplo:

Pasquill A.S y Smith F.B., 1983. Atmospheric diffusion. Third Ed., Ellis Horwood Ltd. 437 págs.

Thom A.S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. Vegetation and the atmosphere. Vol.I, J.L. Monteith Ed., Academic Press, 57-109.

**-Revistas y publicaciones:** Se indicará el apellido e iniciales de los nombres de los autores, año de publicación, título completo del trabajo, nombre de la revista, volumen, número y páginas.

Ejemplo:

Bohren C.F. y Battan L.J., 1982. Radar backscattering of microwaves by spongy ice spheres. J. Atmos. Sci., 39, 4, 2623-2628.

Thom A.S., 1975. Momentum, mass and heat Exchange of plant communities. Vegetation and the atmosphere. Vol.I, J.L. Monteith Ed., Academic Press, 57-109.

# Meteorología

## **CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS COMISIÓN DIRECTIVA**

PRESIDENTE:	Juan Manuel Hörler
VICEPRESIDENTE:	Alberto L. Flores
SECRETARIA:	Marcela González
PROSECRETARIA:	Mariana Barrucand
TESORERA:	Josefina Blázquez
PROTESORERA:	Marcela Torres Brizuela
VOCALES	
TITULARES:	Ramiro Saurral Matías Bertolotti Lorena Ferreira
SUPLENTE:	Luciano Vidal Vanina Ferrero

TRIBUNAL DE HONOR	
TITULARES:	María Luisa Atinger María Luz Duarte Inés Velasco Ernesto Crivelli
SUPLENTE:	Mónica Marino Beatriz Scian

COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS	
	Norma Possía Maria Isabel Gassmann

**CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS**  
CIUDAD UNIVERSITARIA  
PABELLÓN II - PISO 2  
C1428EHA BUENOS AIRES. ARGENTINA  
Tel/Fax: +54-11 4783-4224  
e-mail: meteorologica@at.fcen.uba.ar  
web: www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica

# Meteorología

Versión en línea ISSN 1850-468X



**ESTE NÚMERO HA SIDO PARCIALMENTE FINANCIADO POR EL  
CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS**