

## LA PRECIPITACIÓN EN ARGENTINA SUBTROPICAL Y SU RELACIÓN CON EL MONZÓN SUDAMERICANO

Marcela H. GONZÁLEZ (\*) y Vicente R. BARROS (\*) (\*\*)

(\*) *Departamento de Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires*

(\*\*) *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*

### RESUMEN

El ciclo anual de precipitación en Argentina tiene características diferentes en distintas zonas. La región nordeste presenta lluvias intensas y poca variabilidad anual. La zona noroeste se caracteriza por lluvias en verano y la región sudeste está asociada a un ciclo semianual. La conexión entre la variabilidad interanual de la convección tropical sobre Sudamérica y la lluvia en Argentina subtropical en primavera y otoño es estudiada usando mediciones de radiación de onda larga saliente (OLR) obtenidas con radiómetro en los satélites NOAA para el período 1975-1997. Si el monzón comienza antes de lo esperado climatológicamente se observan lluvias superiores a lo normal en el centro-este de Argentina e inferiores a lo normal en el sur de Brasil en septiembre y el resultado contrario se observa si el monzón comienza después de lo esperado. Un monzón que termina antes de lo normal está asociado a lluvia intensa en el sur de Brasil, Uruguay y este de Argentina durante el mes de mayo. Estos patrones se deben a la acción combinada de la advección de humedad en capas bajas que produce la cercanía de la convección y tiende a aumentar la precipitación y a la subsidencia compensatoria que inhibe la lluvia.

**Palabras clave:** Precipitación, Convección, Monzón de verano, Radiación de onda larga saliente

### ABSTRACT

*The mean annual rainfall cycle in subtropical Argentina has distinctive characteristics in different areas. The northeastern region is related to great rainfall and little variability along the year. The northwestern region has summer rainfall and the southeastern part of subtropical Argentina is characterized by a semi-annual cycle. The connection between the interannual variability of tropical convection over South America and rainfall in subtropical Argentina in spring and autumn is studied using outgoing longwave radiation (OLR) measurements obtained from the scanning radiometer aboard the polar orbiting NOAA operational satellites during 1975-1997. If the monsoon begins before than normal, rainfall greater than normal are observed in central-east of Argentina and less than normal in southern Brazil in september and the opposite result is observed if the monsoon is delayed. A monsoon that ends before than it is expected is related to great rainfall in southern Brazil, Uruguay en eastern Argentina. These patterns are due to the vertical motions caused by compensatory subsidence that inhibit rainfall or because of the water vapor advection toward the south that tends to increase precipitation.*

**Key Words:** Rainfall, Convection, Summer Monsoon, Outgoing longwave radiation

## 1. INTRODUCCIÓN

El ciclo anual de precipitación en Argentina subtropical presenta un mínimo en invierno (PRO-HASKA, 1976) que es más pronunciado en la región oeste que en el nordeste del país. Este ciclo es característico de los regímenes monzónicos (ZHOU y LAU, 1998) aunque no presenta cambios en la dirección de los vientos como ocurre en general en las regiones monzónicas. El flujo de vapor en niveles bajos ingresa al continente sudamericano en bajas latitudes desde el este y es conducido hacia el sur advectando aire húmedo hacia la meseta Boliviana y el centro de Brasil (WANG y PAEGLE, 1996, KOUSKY, 1999, LENTERS y COOK, 1995, ZHOU y LAU, 1997). En el norte de Bolivia este flujo se dirige hacia el este o bien hacia la conocida Zona de Convergencia de Atlántico Sur o más hacia el sur. El aire advectado ingresa al norte de Argentina, Paraguay y sur de Brasil y es mucho más húmedo en verano (DOYLE y BARROS, 2000, LABRAGA *et al.*, 2000) debido a la gran actividad convectiva y lluvia asociada presente en la selva brasileña durante la estación estival.

Para poder entender este fenómeno es conveniente hacer una breve descripción de la circulación sobre Argentina. En niveles bajos, al este de Los Andes y al norte de 40°S, el flujo está principalmente influenciado por el anticiclón del Atlántico Sur. Su posición e intensidad determinan los vientos sobre Argentina subtropical, sur de Brasil y Uruguay y consecuentemente dominan los vientos del nordeste. Un sistema de baja presión intermitente, causado por la combinación de efectos dinámicos y térmicos, está localizado entre 20° y 30°S, en un área relativamente alta y seca al este de Los Andes. En verano, el efecto térmico de esta baja es importante y en invierno también se observa aunque de manera más intermitente y con menor intensidad. Este sistema de baja presión conocido como “Baja Térmica del Noroeste Argentino”, favorece el flujo desde el norte en niveles bajos sobre el centro y este de Argentina. Irrupciones intermitentes del frente polar modifican este esquema, con flujos del oeste y sudoeste luego del pasaje del frente. Los frentes alcanzan posiciones más norte en invierno que en verano. Al sur de 20°S el flujo entre 700 hPa y la tropopausa es del oeste durante todo el año. Los Andes no permiten el acceso de aire desde el océano Pacífico, sobre todo al norte de 35°S por su gran altura y por ser muy macizos. Las masas de aire que pueden acceder desde el Pacífico al sur de 35°S, donde la cordillera es más baja y menos espesa, tienen trayectoria sobre la seca meseta patagónica, son poco frecuentes y el aire tiene muy bajo contenido de humedad. Por lo tanto, el aire húmedo ingresa al continente o bien desde la selva brasileña o bien desde el océano Atlántico.

La convección tropical tiene un ciclo anual muy marcado. Ingresar al hemisferio sur durante el mes de septiembre y se desplaza sobre Sudamérica en dirección noroeste-sudeste. Luego inicia su retirada y aproximadamente en mayo la convección ya se ha desplazado al hemisferio norte y asociado a ello termina la estación húmeda en una amplia zona de Brasil, Paraguay y norte de Argentina. Este evento está estrechamente relacionado con el ciclo anual de precipitación observado en Argentina subtropical (GONZÁLEZ y BARROS, 1996, 1998) y es el que comúnmente se ha dado en llamar “monzón sudamericano”.

El comienzo y el fin del monzón presentan una variabilidad interanual importante y probablemente contribuye a regular la variabilidad interanual de precipitación en primavera y otoño en Argentina. La convección tropical afecta a la lluvia por dos motivos que actúan de forma opuesta. Por un

lado la cercanía de los centros de convección produce mayor advección de aire húmedo favoreciendo la producción de lluvia. Por otro lado el movimiento de subsidencia compensatorio, asociado a los centros convectivos inhiben la precipitación. La relativa importancia de ambos depende en general, de la distancia a los centros de convección.

En este trabajo se resume el ciclo anual de precipitación en Argentina y se estudia cómo los dos efectos antes mencionados afectan la variabilidad de la precipitación de septiembre y mayo en Argentina subtropical.

## 2. DATOS

La convección en Sudamérica fue estudiada utilizando datos de radiación de onda larga saliente (OLR) proveniente de satélites de órbita polar NOAA promediados cada 2.5° de latitud por 2.5° de longitud. Estos datos son muy útiles en delimitar áreas convectivas (ARKIN y ARDANUY, 1989, MORRISSEY y GRAHAM, 1996) y han sido utilizados por distintos autores para el estudio de la variabilidad interanual en regiones tropicales (HEDDINHAUSS y KRUEGER, 1981, LIEB-MANN y HARTMANN, 1982, ACEITUNO, 1988). Los datos diarios de OLR han sido promediados cada 5 días, período de tiempo al cual se llama péntada en este trabajo, para poder establecer las fechas de comienzo y fin del monzón sudamericano. Los datos correspondientes al año 1978 no se encuentran disponibles por fallos acontecidos en el satélite.

Las series de precipitación provenientes de 100 estaciones en el sur de Sudamérica al este de Los Andes entre 22° y 40°S han sido promediadas arealmente en un arreglo de 3° de latitud por 3° de longitud. Las fuentes de datos de lluvia son el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y los datos climáticos mensuales publicados por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos de América. Los datos de humedad específica en 925 hPa, viento en 200 hPa y omega en 500 hPa han sido obtenidos de los reanálisis de NOAA/NCEP (KALNAY *et al.*, 1996)

## 3. EL CICLO ANUAL DE LA LLUVIA EN ARGENTINA SUBTROPICAL

Un estudio detallado del ciclo anual de precipitación en Argentina subtropical fue realizado por GONZÁLEZ BARROS (1998), siguiendo la metodología estadística de componentes principales. La figura 1 muestra las tres zonas principales derivadas de este análisis. La región nordeste tiene altos valores de precipitación durante todo el año y muy poca variabilidad. El patrón predominante es un gradiente de lluvia que indica que aumenta hacia el nordeste. La región noroeste presenta un ciclo anual muy pronunciado consistente en lluvias intensas durante el verano y muy poca precipitación en invierno. Este rasgo se debilita hacia el este y hacia el sur. La región sudeste se distingue por la presencia de un ciclo semianual con máximos de precipitación en otoño y al final de la primavera.

Este ciclo anual de precipitación es en parte explicado por el flujo de humedad importante que Argentina recibe desde la selva tropical brasileña en verano. A esto se refiere específicamente la próxima sección.

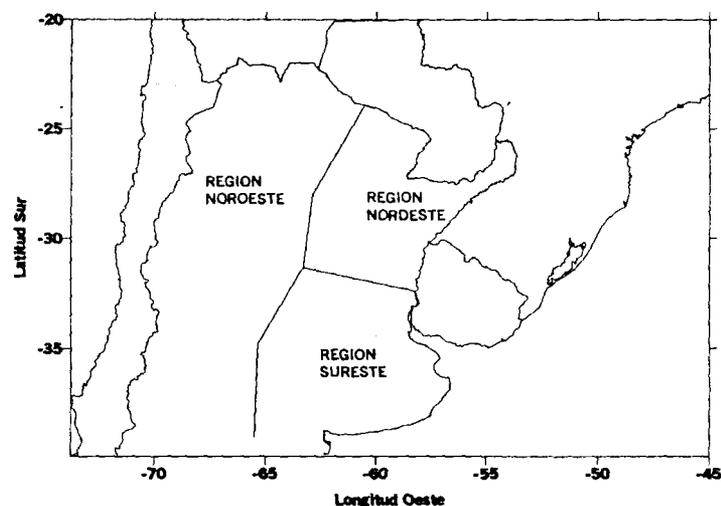


Fig. 1: Regiones con distintivos ciclos anuales de precipitación en Argentina subtropical.

#### 4. EL MONZÓN SUDAMERICANO

Al comienzo de la primavera la convergencia intertropical se desplaza hacia el hemisferio sur. La convección tiene una trayectoria sobre el continente de modo que ingresa por el noroeste de Sudamérica sobre Colombia, se desplaza en dirección noroeste-sudeste hasta abarcar toda la selva brasileña aproximadamente en marzo. A partir de ese momento inicia su retirada nuevamente hacia el hemisferio norte, desapareciendo al promediar el mes de mayo. Este desplazamiento presenta un máximo de convección en Brasil central al sur del ecuador durante el verano austral y en América Central durante el verano del hemisferio norte. La variable OLR es un buen indicador de las regiones con convección (KOUSKY, 1988). Valores de OLR inferiores a  $240 \text{ W/m}^2$  muestran sin lugar a dudas, la presencia de convección. A este desplazamiento convectivo que se encuentra estrechamente relacionado con la época de lluvia en toda su zona de desplazamiento se lo ha llamado monzón sudamericano. Con el fin de establecer un criterio objetivo para determinar el comienzo y fin del monzón, KOUSKY (1988) propuso una metodología para calcular dichas fechas. Definió la fecha de inicio del monzón como aquella péntada donde el valor medio de OLR fuera menor que  $240 \text{ w/m}^2$  y tal que, de las siguientes 12 péntadas, al menos 10 tuvieran valores de OLR también inferiores a  $240 \text{ w/m}^2$  y el fin del monzón es la péntada donde el valor de OLR es superior a  $240 \text{ w/m}^2$  y se mantiene por encima de ese valor en al menos 10 de las 12 péntadas posteriores. De esta forma las fechas de comienzo y fin del monzón pudieron calcularse para cada punto de retículo y para cada año del período 1975-1997. El valor climatológico, promedio en el período completo, indica que sólo a comienzos de octubre la convección alcanza el sudoeste de la región indicada en la figura 2. En Argentina subtropical septiembre es normalmente seco y ocasionalmente lluvioso y en general el comienzo de las lluvias se produce cuando la convección ha llegado a la mencionada zona. Esto tiene incidencias económicas muy importantes puesto que el centro y este de Argentina es una planicie donde la agricultura es la principal actividad y muchos

cultivos son afectados por un inicio tardío de la estación lluviosa. En marzo la convección comienza su desplazamiento hacia el hemisferio norte y aproximadamente en la péntada 30 (26 al 30 de mayo) se halla enteramente al norte de 5S°.

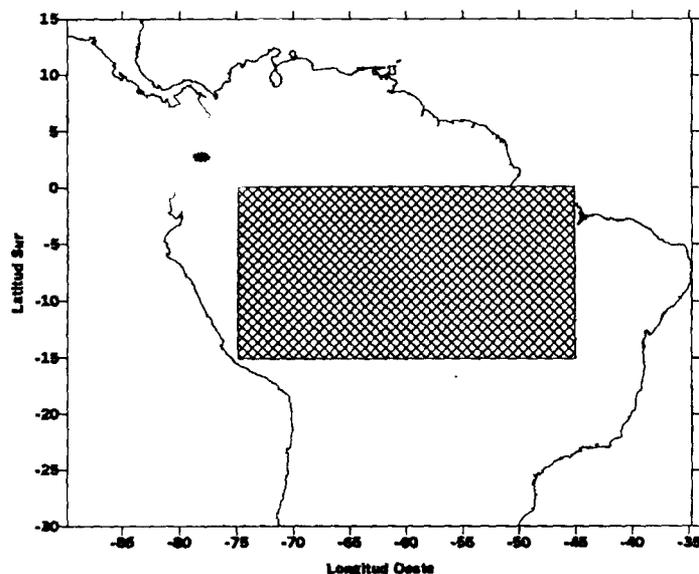


Fig. 2: Área de mayor variabilidad del desplazamiento de la Convección relacionada con el monzón sudamericano.

## 5. LA VARIABILIDAD INTERANUAL DEL MONZÓN Y DE LA LLUVIA EN ARGENTINA EN PRIMAVERA Y OTOÑO

La fecha de inicio y fin del monzón fue calculada para cada uno de los años del período 1975-1997 y para cada uno de los puntos de retículo. Se definió para cada año una fecha única de inicio y fin del monzón como el promedio sobre los puntos de retículo dentro del área entre 0° y 15°S y entre 45°W y 75°W (figura 2). Esta área fue seleccionada porque es donde el desplazamiento de la convección tiene su máxima variabilidad (GONZÁLEZ y BARROS, 1998). La fecha climatológica promedio en esa área para el inicio del monzón fue la péntada 54 (23 de septiembre) y para el fin la péntada 27 (14 de mayo). La anomalía entre la fecha promedio de inicio y fin del monzón para cada año se muestra en la Tabla 1. Un valor negativo indica que el monzón comenzó o terminó antes de lo climáticamente esperado y uno positivo por el contrario, es indicativo de que el monzón comenzó o terminó después de lo normal. Cuando las anomalías superaron una péntada, se consideraron significativamente importantes. El campo compuesto de anomalías de precipitación en septiembre para aquellos años en que el comienzo del monzón se produjo en forma significativamente adelantada (1979, 1982, 1984, 1986, 1992, 1996) (figura 3a) indica que la lluvia fue

Tabla 1: ANOMALÍA PROMEDIO EN EL ÁREA 0°-15°S, 45°O-75°O DE LA FECHA DE COMIENZO Y FIN DEL MONZÓN SUDAMERICANO PARA CADA AÑO DEL PERÍODO 1975-1997 RESPECTO DE LA MEDIA CLIMATOLÓGICA (EN PENTADAS)

AÑO	COMIENZO	FIN
1975	1.5	0.4
1976	1.7	-0.1
1977	-0.9	4.2
1978	No dato	No dato
1979	-3.7	1.5
1980	1.0	-2.6
1981	2.0	-2.1
1982	-3.4	0.2
1983	0.6	-2.0
1984	-3.7	-1.1
1985	0.6	0.8
1986	-1.6	1.1
1987	1.8	-2.5
1988	1.0	-0.5
1989	1.6	2.3
1990	0.8	-2.5
1991	0.3	1.7
1992	-3.2	-2.7
1993	0.3	-1.0
1994	1.3	1.1
1995	3.6	2.6
1996	-2.8	1.3
1997	2.5	0.0

superior a lo normal en el centro y este de Argentina y Uruguay e inferior a lo normal en el sur de Brasil. El esquema opuesto se observa en el campo promedio de anomalías de precipitación en septiembre para los años en que el comienzo del monzón estuvo atrasado en más de 5 días (1975, 1976, 1981, 1987, 1989, 1994, 1995, 1997) (figura 3b). La explicación física de la forma de estos campos es la siguiente: si el comienzo del monzón se produce antes de lo normal existe un flujo de humedad importante hacia el centro de Argentina, lo cual genera lluvias en el centro del país pero a su vez los movimientos de subsidencia compensatorios asociados a los centros convectivos inhiben la lluvia en el sur de Brasil. Para probar esta hipótesis la figura 4a muestra el campo de omega (signo opuesto a la velocidad vertical) en 500 hPa diferencia entre los años con comienzo significativamente adelantado menos aquellos años con comienzo atrasado del monzón. El principal rasgo es un dipolo entre el centro de Brasil y el sur de Brasil y Paraguay, coherente con los campos asociados de precipitación. El campo diferencia para el caso de la humedad específica en 925 hPa (figura 4b), representativa de capas bajas, muestra que en los años con inicio adelantado del monzón, la disponibilidad de humedad es mayor en el centro de Argentina y menor en Paraguay y sur de Brasil, lo cual es coincidente con los campos de precipitación de la figura 3. El mismo campo diferencia se construyó para el viento en 200 hPa que permite localizar la corrien-

te en chorro (gráfico no mostrado). A partir de éste se pudo deducir que la corriente en chorro tiende a ser menos intensa cuando el inicio del monzón se produce antes de lo esperado, obteniendo una correlación de 0.46 entre la fecha de inicio y la intensidad de la corriente en chorro.

El mismo análisis se realizó para la lluvia correspondiente al mes de mayo, cuando se produce al fin del monzón. La figura 5a muestra el promedio de las anomalías de precipitación en mayo para los años en que el fin del monzón se produjo más de 5 días antes de lo esperado climatológicamente (1980, 1981, 1983, 1984, 1987, 1990, 1992, 1993). En ella puede observarse una tendencia a que se produzcan lluvias superiores a lo normal a lo largo de la costa, con un núcleo principal al sur de Brasil. El patrón opuesto se observa para aquellos años en que el fin del monzón estuvo significativamente atrasado (1977, 1979, 1986, 1989, 1991, 1994, 1995, 1996) (figura 5b). Nuevamente los movimientos verticales juegan un rol importante dado que en la medida que la convección se demora en salir la subsidencia compensatoria a ella asociada, inhibe la lluvia. El campo de omega en 500 hPa diferencia para los años en que la salida estuvo significativamente adelantada menos los años con la salida atrasada se muestra en la figura 6a, donde se observa que los años con salida adelantada tienen asociado mayor ascenso que los años con fin del monzón atrasado sobre la región este de Sudamérica. Es importante notar la estructura ondulatoria que presenta este campo sobre el océano Pacífico, lo cual es indicativo de que los procesos de latitudes medias influyen sobre los movimientos verticales de la zona subtropical. El mismo campo diferencia se construyó para la humedad específica en 925 hPa (figura 6b). En él puede observarse una mayor disponibilidad de humedad en el nordeste de Argentina y a lo largo de la costa del sur de Brasil y Uruguay asociada a los años con fin adelantado del monzón. La correlación entre la fecha de fin del monzón y la intensidad de la corriente en chorro, localizada en los campos de viento en 200 hPa (gráfico no mostrado) fue de - 0.45, indicando que es tanto más intenso cuanto más adelantada sea la salida de la convección.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró la estructura del ciclo anual de la precipitación en Argentina subtropical y se intentó establecer una conexión entre la variabilidad interanual de la lluvia en septiembre y en mayo con la entrada y la salida de la convección sobre Sudamérica, conocida como monzón sudamericano respectivamente. Tanto la advección de humedad generada por el desplazamiento hacia el sur del área convectiva, aumentando el vapor disponible para generar lluvia, como el movimiento de descenso compensatorio que inhibe la precipitación, parecen ser elementos decisivos. Ambos factores afectan a la precipitación de septiembre y parecería que la humedad juega un rol fundamental. En el caso de la lluvia de mayo el movimiento vertical indica la existencia de una interacción marcada con los mecanismos de latitudes medias.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado mediante los subsidios: PIP-4493 CONICET y BID-1002/OC-AR-PICT 04465. Los autores agradecen a NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado por el permiso para incluir imágenes obtenidas del sitio en Internet <http://www.cdc.noaa.gov/>.

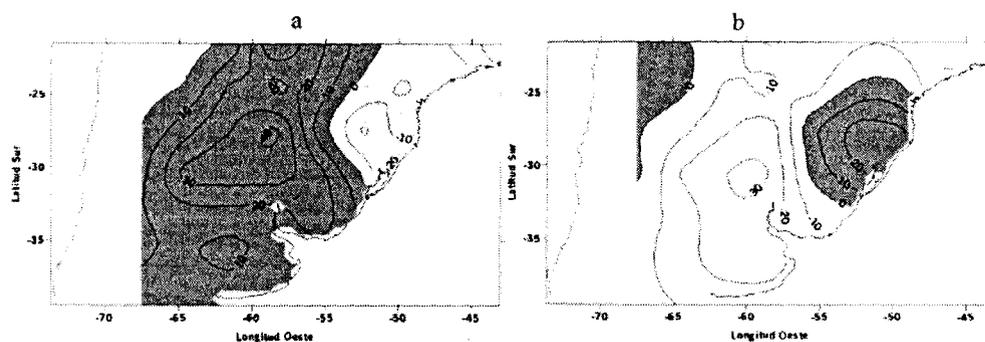


Fig. 3: Campo de precipitación media (en mm) en septiembre para años en que el comienzo del monzón se produjo al menos 5 días antes (a) y después (b) de la fecha climatológicamente esperada.

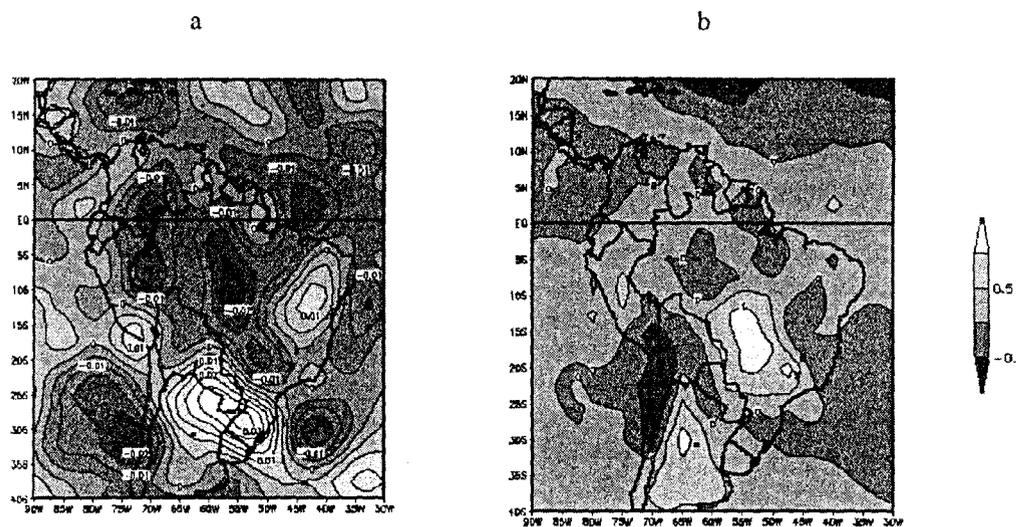


Fig. 4: Campo diferencia entre los años con comienzo significativamente adelantado menos los años con comienzo atrasado del monzón en setiembre para anomalías de omega en 500 Hpa (en Pa/s) (a) y de humedad específica en 925 Hpa (b) (en g/kg).

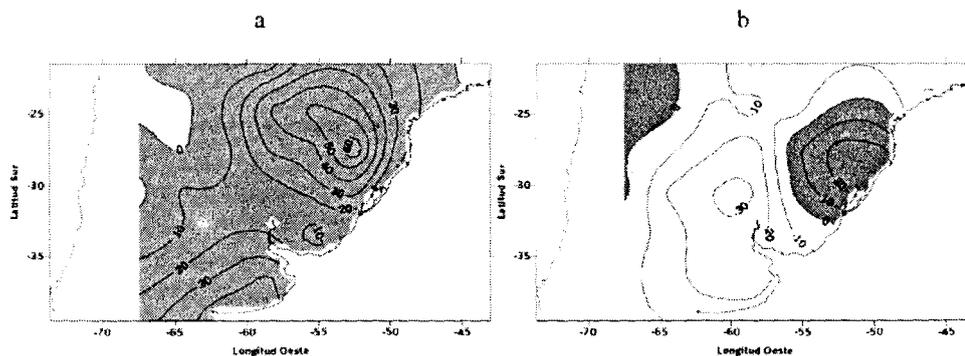


Fig. 5: Campo de precipitación media (en mm) en mayo para años en que el fin del monzón se produjo al menos 5 días antes (a) y después (b) de la fecha climatológicamente esperada.

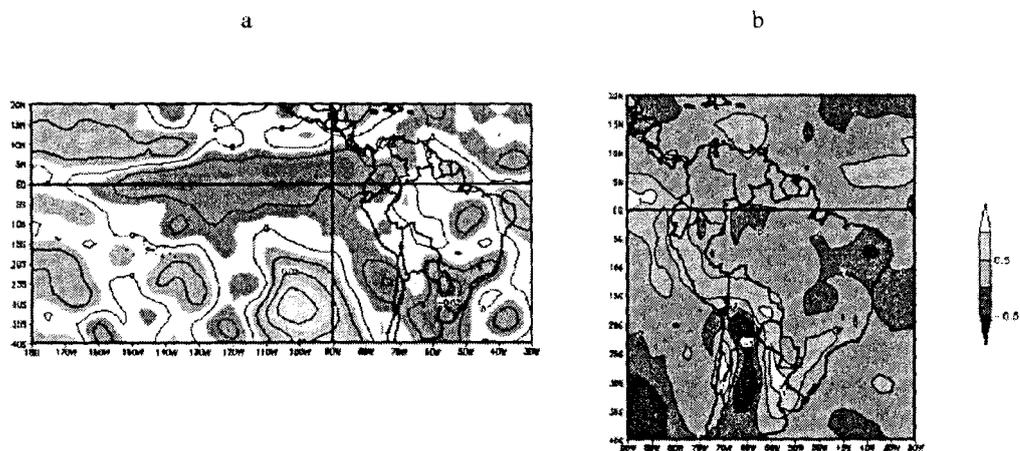


Fig. 6: Campo diferencia entre los años con comienzo significativamente adelantado menos los años con comienzo atrasado del monzón en mayo para anomalías de omega en 500 Hpa (en Pa/s) (a) y de humedad específica en 925 Hpa (b) (en g/kg).

## 8. REFERENCIAS

- ACEITUNO, P. (1988): "On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate". *Mon. Weather Rev.*, 116, 505-524.
- ARKIN, P.A. Y ARDANUY, P.E. (1989): "Estimating climatic scale precipitation from space: a review". *J. Clim.*, 2, 1229-1238.
- DOYLE, M. Y BARROS, V. (2000): "Relationship between water vapor sources and rainfall over Southern South America". *Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 260-261
- GONZALEZ, M. Y BARROS, V. (1996): "Statistical features of mean rainfall annual cycle and its anomalies in subtropical Argentina". *Meteorologica*, 21, 15-26.
- GONZALEZ, M. Y BARROS, V. (1998): "The relation between tropical convection in South America and the end of the dry period in subtropical Argentina". *Int. J. Climatol.*, 18, 1669-1685.
- HEDDINGHAUS, T. Y KRUEGER, A. (1981): "Annual and interannual variations in outgoing longwave radiation over the tropics". *Mon. Weather Rev.*, 109, 1208-1218.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, I., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINGS, W., JANOWIAK, J., MO, K.C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R. Y JOSEPH, D. (1996): "The NCEP/NCAR Reanalysis 40 years- project". *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- KOUSKY, V.E. (1988): "Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South America sector". *Revista Brasileira de Meteorología*, 3, 217-231.
- KOUSKY, V.E. (1999): "The South American monsoon system". 10<sup>th</sup> Global Change Studies, Dallas, USA, 215-217.
- LABRAGA, J., FRUMENTO, O. Y LOPEZ, M. (2000): "The atmospheric water vapor cycle in South America and the tropospheric circulation". *J. Clim. (in press)*.
- LENTERS, J. Y COOK, K. (1995): "Simulation and Diagnosis of the regional summertime precipitation climatology of South America". *J. Clim.*, 8, 2988-3005.
- LIEBMANN, B. Y HARTMANN, D. (1982): "Interannual variations of outgoing IR associated with tropical circulation changes during 1974-78". *J. Atmos. Sci.*, 39, 1153-1162.
- MORRISSEY, M.L. Y GRAHAM, N.E. (1996): "Recent trends in rain gauges precipitation measurements from the tropical Pacific: evidence for an enhanced hydrological cycle". *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1207-1219.
- PROHASKA, F.J., (1976): "The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay". En SCHWERDTFEGER, W. (Ed.): *Climates of Central and South America*, Elsevier, Amsterdam, pp 13-112. Colección: *World Survey of Climatology*, vol 12.
- WANG, M. Y PAEGLE, J. (1996): "Impact of analysis uncertainty upon regional atmospheric moisture flux". *J. Geophys. Res.*, 101, 7291-7303.
- ZHOU, J. Y LAU, K.M. (1997): "Climatology of the South American Monsoon". *5<sup>th</sup> International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Pretoria, South Africa, 160-161.
- ZHOU, J. y LAU, K.M. (1998): "Does a monsoon climate exist over South America?". *J. Clim.*, 11, 1020-1040.