

VARIABILIDAD INTERANUAL A INTERDECÁDICA DE LA PRECIPITACIÓN EN PATAGONIA NORTE

Germán F. Russián⁽¹⁾, Eduardo A. Agosta⁽²⁾⁽³⁾, y Rosa H. Compagnucci^{(1) (2)}

⁽¹⁾Universidad de Buenos Aires, Facultad de ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. ⁽²⁾CONICET.

⁽³⁾PEPACG - UCACyT, Pontificia Universidad Católica Argentina.
german_russian@hotmail.com

RESUMEN

Se estudia la variabilidad interanual e interdecádica de la precipitación de verano y de invierno en la región norte de la Patagonia argentina, denominada Pampa Amarilla (RPA), para el período 1969-2006. El régimen anual muestra un marcado cambio del ciclo anual sobre una transecta noreste-sudoeste que atraviesa RPA. Hacia el noreste el ciclo anual de precipitación presenta los mayores registros, y muestra marcado mínimo invernal junto con máximo estival equinoccial (marzo). Hacia el sudoeste, los registros son menores, con uniforme distribución a lo largo del ciclo anual, presentando mínimos invernales ligeros. La distribución de frecuencia observada de las anomalías de precipitación, para verano e invierno, tienden a mostrar una mayor ocurrencia de frecuencias negativas en el intervalo (-100; 0)mm, con una ligera mayor probabilidad de ocurrencia de extremos positivos. Las tendencias de las series del semestre cálido son positivas y significativas hacia el norte, con excepción en la zona centro. Para el semestre frío, las tendencias son positivas y significativas en el norte y sudeste de la RPA. Es posible caracterizar toda la RPA mediante dos índices de precipitación para verano e invierno, respectivamente. Estos índices de precipitación regional no presentan tendencia significativa. El verano puede subdividirse en dos subregiones, norte y sur, con diverso comportamiento interanual. En el norte los ciclos dominantes son de 5 años a 8 años; y en el sur, en las bandas 2-4 años, ca. 11 años y ca. 15 años. El invierno presenta una variabilidad interanual espacialmente homogénea con cuasi-ciclos significativos en torno a 4-5 años y 11 años. En ambas estaciones, los procesos de baja frecuencia de entre 2 y 6 años podrían estar relacionados al Modo Anular del Sur (MAS). El cuasi-ciclo solar podría estar involucrado también. Para veranos, la circulación troposférica de capas bajas, asociada a precipitación, también es discriminante entre norte y sur. Los centros de acción asociados a la precipitación en la subregión norte se localizan hacia latitudes medias sobre el Mar Argentino. Los asociados a la precipitación en la subregión sur se localizan hacia más altas latitudes. En general, actividad anticiclónica sobre la sobre el Mar Argentino y Patagonia de latitudes medias está asociada al ingreso de humedad desde el este y mayor precipitación sobre RPA en verano. En cambio, la actividad ciclónica en dicha región inhibe la precipitación. Para el invierno, la precipitación está más asociada a oestes más intensificados sobre el sur del Pacífico. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) parece también afectar la precipitación de verano.

Palabras claves: precipitación Patagonia Norte, circulación atmosférica, variabilidad interanual, El Niño-Oscilación del Sur, temperatura superficial del mar

ABSTRACT

The objective is to analyze the interannual to interdecadal variability in summer and winter precipitation on the northern Argentine Patagonia region, called Pampa Amarilla (RPA), during 1969-2006. The annual regime shows a strong change on annual cycle along the northeast-southwest transect in the RPA. Towards the northeast the annual cycle of precipitation has the maximum records with winter minima and summer

equinoccial maxima (March). Towards the southwest the records are smaller, with uniform distribution throughout the anual cycle, presenting slight winter minimum. The observed frequency distribution of the precipitation anomalies tends to show greater occurrence of negative frequencies in the interval (- 100; 0)mm with a slight major probability of occurrence of positive anomalies interval (right tail). The interannual variations for the warm period show, over the north sub-region, a positive and significative trend. An exception is the central region which trend is negative and significative. In the cold season, positive and significative trends are observed, especially in the north and in the southeast areas of the RPA. The RPA can be characterized by devicing two precipitation indices, one for summer and the other for winter. The indices do not show significant trends. For the summer it is possible to split the región into two: one the northern RPA and the other the southern RPA, with diverse inter-annual behavior. In the northern the dominant cycles are 5 years and to 8 years, and in the southern, around 2-4 years, 11 years and 15 years. During the winter the whole RPA behaves as a uniform region with significant quasi-cycles around 4-5 years and 11 years. For both summer and winter the regional precipitation indices do not show significant trends. The low-frequency processes between 2 and 6 years could be related to the Southern Annular Mode (SAM). The solar quasi-cycle could be also involved. For the summer, the tropospheric circulation of lower levels is different in northern and southern RPA. The centers of precipitation at northern RPA are located towards mid-latitudes over the the Argentine Sea. Those associated with the precipitation in southern RPA, are located towards higher latitudes. Generally, anticyclonic activity on the Argentine Sea and Patagonia in high latitudes, can be associated with moisture advection from the east and more precipitation. However, the cyclonic activity at mid-latitudes around the Patagonia inhibits the precipitation. Over the Pacific side, the induced circulation centers seems to act by blocking the westerlies. For winter the precipitation is more associated to westerlies intensified in southern Pacific. The Niño- Southern Oscillation (ENSO) also seems to have influence on the summer precipitation.

Keywords: precipitation, northern Patagonia, atmospheric circulation, interannual variability, El Niño-Southern Oscillation, sea surface temperature

INTRODUCCIÓN

La región localizada al norte de la Patagonia argentina, llamada Pampa Amarilla (RPA) comprende el sur de Mendoza y las Provincias de La Pampa, Río Negro y Neuquén (34°S-42°S y 70°O- 61°O) y es la parte central de la transecta semiárida provocada por el efecto de la cordillera de los Andes. El clima característico es semidesértico debido a que las masas de aire húmedo provenientes desde el Pacífico hacia el continente, al cruzar los Andes patagónicos, de oeste a este, descienden secas (Kottek et al., 2006). La circulación atmosférica de capas bajas sobre el área está dominado por el límite sur de los anticiclones semipermanentes del Atlántico Sur y del Pacífico Sur, y el sector norte de los oestes (Schwerdtfeger, 1976). Esto hace que el área de estudio sea altamente sensible a cambios climáticos que afecten estas estructuras (Schwerdtfeger, 1951). Hacia el sector nor-noroeste linda con el sur de la región de Cuyo. La variabilidad interanual de la precipitación de verano en Cuyo, analizada por Agosta et al. (1999), muestra la existencia de un quasi-ciclo de 18 años hasta el verano 1976-77, cambiando de allí en adelante hacia un prolongado evento húmedo de la magnitud de los máximos previos, el cual llegaría hasta comienzos del 2000 (Agosta y Cavagnaro, 2010).

En Agosta y Compagnucci (2006) se muestra que la precipitación de la región de Cuyo se relaciona directamente con la precipitación de la Patagonia norte, previo al período 1976-77. Posteriormente, la relación entre ambas regiones se desvanece. Por otra parte, varios estudios muestran que el área subtropical del este de Argentina, al norte de 40°S, ha presentado tendencias positivas de la precipitación durante la segunda mitad del siglo XX que han corrido las isohietas hacia el sudoeste (Barros et al, 1996, 2000; Agosta et al, 1999; Minetti et al, 2003; Liebmann et al, 2004; Boulanger et al, 2005; Haylock et al., 2006).

Estas tendencias han sido atribuidas a diversos procesos, tales como el calentamiento global debido a gases de efecto invernadero, cambios en los procesos remotos de baja frecuencia de interacción

atmósfera-oceano, y/o desplazamientos hacia el sur del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, el cual advecta humedad hacia la región de estudio (Agosta y Compagnucci, 2008). En este sentido la RPA se halla hacia el límite sur de estas amplias áreas sensibles a cambios en la circulación atmosférica y, por tanto, puede verse afectada por ellos.

En un estudio de los totales anuales de precipitación para el cono sur de Sudamérica, Minetti y Vargas (1997) consideraron algunas pocas estaciones dentro del RPA. En el área noreste de la misma, sus resultados discriminan dos subregiones que presentan distintas variaciones temporales. Posteriormente, Minetti et al. (2003), analizando por componentes principales las precipitaciones anuales del período 1930-1999, discrimina subáreas de distinto comportamiento temporal. La RPA se corresponde aproximadamente a la subregión III de dicho trabajo, para la cual encontraron una tendencia positiva para todo el período.

A su vez, algunas sub-regiones de la RPA, como el sector noreste, límite entre la provincia de La Pampa y Buenos Aires, fueron analizados Krepper et al. (1989). Ellos mostraron que de norte a sur se debilita la intensidad de los máximos equinocciales que dominan el ciclo anual. Asimismo, la variabilidad de la precipitación en RPA, y su relación con la circulación atmosférica y la temperatura superficial del mar no ha sido objeto particular de estudio.

Por consiguiente, el objetivo del presente trabajo es caracterizar el régimen de precipitación a lo largo del ciclo anual en la RPA y analizar su variabilidad en las escalas interanual a interdecádica para el semestre cálido (octubre-marzo) y el frío (abril-septiembre), los cuales muestran regímenes diversos en subregiones. Se examina también exploratoriamente su relación con la circulación de tropósfera baja y la temperatura superficial del mar a fin de dilucidar los posibles procesos atmosférico-oceánicos de baja frecuencia asociados.

DATOS Y METODOLOGÍA

En la RPA hay escasa distribución de estaciones meteorológicas, de acuerdo con el banco de datos del Servicio Meteorológico Nacional. Luego de analizar el período de los registros y continuidad de la información para cada una de las estaciones disponibles, se seleccionaron 16 de ellas que cubren el período 1969-2006 (ver Tabla 1). En caso de tener datos faltantes en los registros, se utilizaron estaciones secundarias que puedan servir para completar las series. La distribución espacial de las mismas resulta bastante regular y permite hacer una evaluación aproximada de la variabilidad temporo-espacial de la precipitación mensual en el área.

El ciclo anual de cada estación fue dividido en semestre cálido (Octubre-Marzo) y frío (Abril-Septiembre) para poder analizar las variaciones interanuales en cada una de las series estacionales. Se utilizaron los datos mensuales equiespaciados en $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ de latitud x longitud, de altura geopotencial en 850hPa (H850) y de temperatura superficial del Mar (SST) provistas por el Reanalysis I del NCEP/NCAR (disponible en <http://www.cdc.noaa.gov>). Se estima la función de correlación convencional del primer momento de Pearson entre estos campos y las series índices estacionales de precipitación.

Asimismo, las series interanuales fueron filtradas mediante una función Gaussiana de 9 términos con ventana de Hamming (Canavos, 2006). La baja frecuencia permitió la subregionalización, caracterizada por dos índices calculados como el promedio entre las estaciones de las series estandarizadas para cada semestre. Sobre estas series de índices se realizaron análisis espectrales de Blackman-Tukey con ventana de Hamming (Wilks, 2003).

Tabla 1: Numeración, altura y ubicación de las estaciones seleccionadas

Nº	Estación	Altura (m)	Lat (°S)	Long (°O)
1	Bernardo Larroudé	123	35°1'	63°34'
2	Malargüe	1414	35°28'	69°34'
3	General Pico	108	35°40'	63°43'
4	Victorica	312	36°13'	65°27'
5	Algarrobo del Aguila	324	36°21'	67°6'
6	Quehué	261	37°7'	64°31'
7	Puelén	407	37°22'	67°37'
8	La Reforma	239	37°33'	66°13'
9	Guatraché	169	37°40'	63°31'
10	Bahía Blanca	21	38°43'	62°16'
11	Gobernador Duval	233	38°43'	66°24'
12	Neuquén	260	38°51'	68°12'
13	La Adela	150	38°57'	64°1'
14	Viedma Aero	30	40°53'	62°59'
15	San Antonio O. Aero	2	40°48'	65°6'
16	Maquinchao	828	41°9'	68°26'

RESULTADOS

Características del régimen anual de precipitación

La Figura 1 muestra el mapa de la región analizada y el ciclo anual de precipitación para cada una de las estaciones del área presenta un evidente cambio entre el sector noreste y el sector sur-suroeste de la RPA. Las mayores precipitaciones, que ocurren en la región noreste en el límite con la Pampa Húmeda, presentan un marcado ciclo anual con mínimos en el período invernal y máximos en la estación cálida, con valores preponderantes en el mes de Marzo. Hacia el sector noroeste, las precipitaciones disminuyen, y en Malargüe (2) los valores son similares para todos los meses. dándose la excepción de un relativo máximo invernal.

También en el sector centro, Gobernador Duval (11) Neuquén (12), y sur, Viedma (14), San Antonio Oeste (15) y Maquinchao (16), las precipitaciones son las menores y mantienen la característica de la región, en la que el semestre cálido prepondera sobre el frío. En la Figura 2, se muestran algunos valores estadísticos para las distintas estaciones de la región para el semestre cálido (Panel superior) y para el frío (Panel Inferior). Se observa que los valores máximos de precipitación promedio en ambos semestres corresponden a las estaciones del nor-noreste de la región y además poseen los valores máximos de desvío estándar. A medida que nos desplazamos hacia el sur, sin importar qué semestre estemos analizando, el desvío estándar va disminuyendo, hasta alcanzar un valor mínimo en San Antonio Oeste (estación 15) en el semestre cálido y en Maquinchao (estación 16) en el semestre frío.

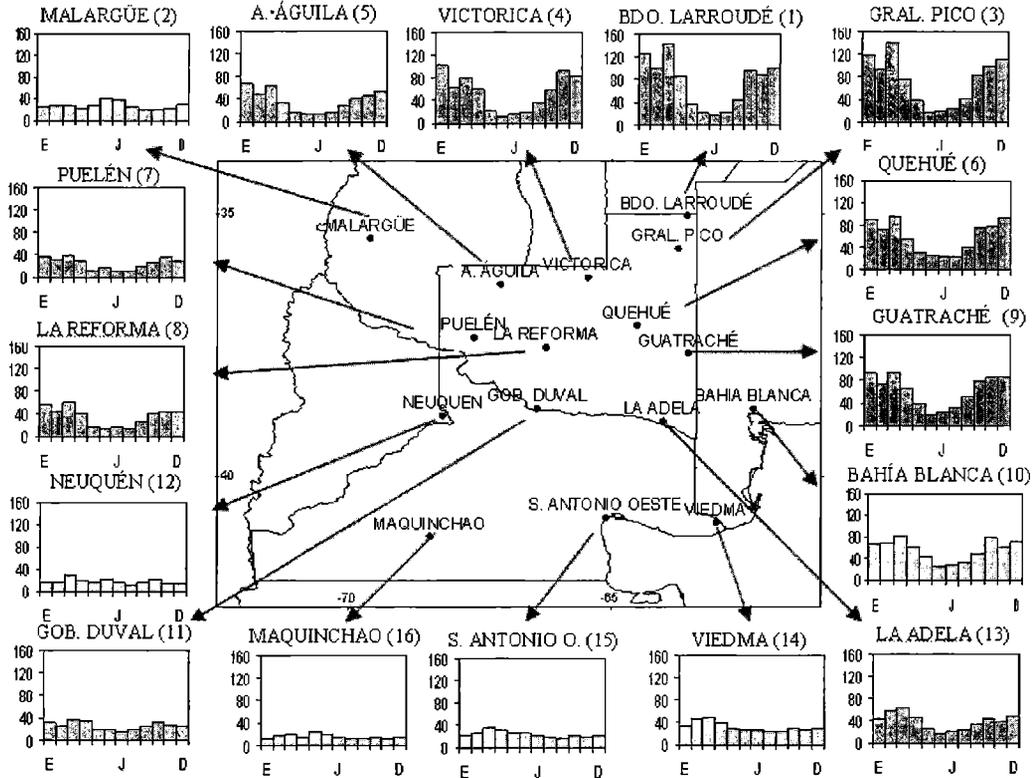


Figura 1. Ciclo anual de las estaciones analizadas. Entre paréntesis, el número asignado a cada una de ellas.

La Figura 3 muestra los histogramas de las estaciones meteorológicas localizadas en ella, para el verano (V) e invierno (I). Tanto para el invierno como para el verano, la mayor parte de las estaciones presentan máxima frecuencia de ocurrencia en el intervalo $(-1;0]$ (en la figura son las barras señaladas con -1), es decir, que la moda corresponde a anomalías negativas.

Esto significa que es más probable la ocurrencia de semestres por debajo de la media, y una ligera mayor probabilidad de ocurrencia distribuida en intervalos de anomalías positivas (cola hacia la derecha). Durante el invierno (paneles I), las estaciones hacia del sur (14, 15, 16) presentan la menor dispersión y todas muestran una asimetría negativa, a excepción de las estaciones 1, 3, 6 y 9. Para el verano (paneles V), la dispersión se incrementa, con excepción de Malargüe, donde los extremos desaparecen.

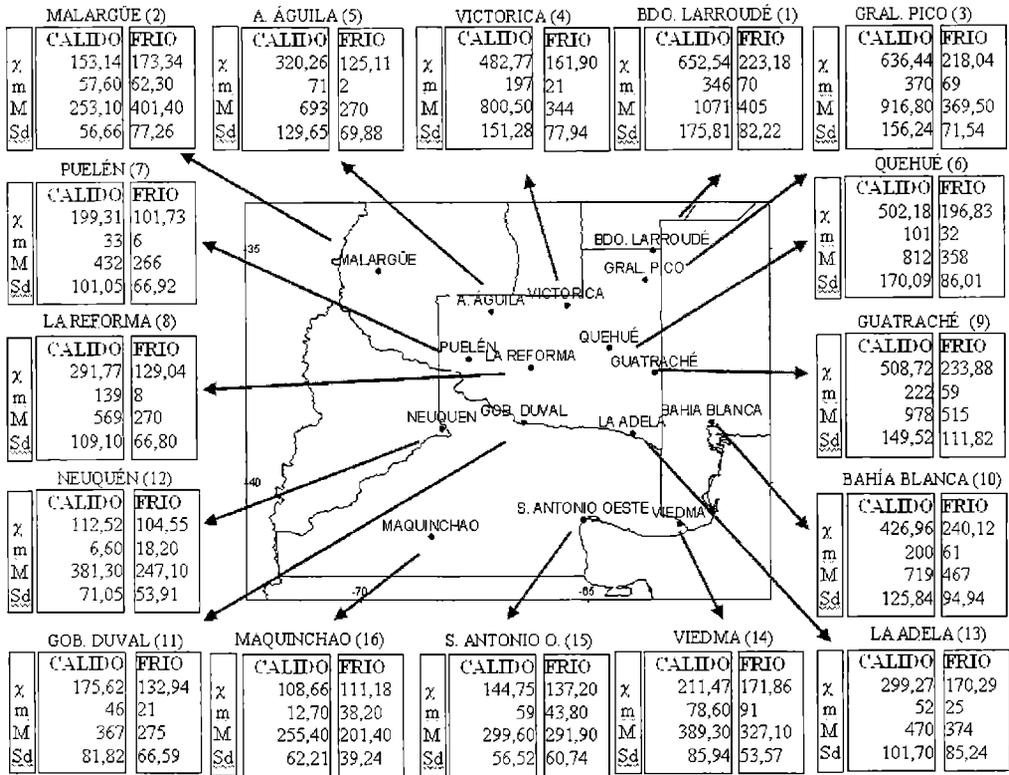


Figura 2. Promedio (χ), Valor mínimo (m), Valor máximo (M) y Desvío estándar (Sd) para cada uno de las estaciones para el semestre cálido (recuadro derecho) y el semestre frío (recuadro izquierdo). Unidad: mm

Las estaciones del norte (de 1 a 6) experimentan una mayor ocurrencia de extremos, tanto húmedos como secos. El hecho que ninguna de las estaciones presenta histograma que se ajuste a la función distribución de probabilidad de Gauss, o normal, significa que la variable anomalía de precipitación no es aleatoria. Entonces existen forzantes en la baja frecuencia que determinan y condicionan las anomalías en las series de precipitación dentro de la región.

En la Figura 4, se muestran las series interanuales para el semestre cálido de cada una de las estaciones, junto con la recta de tendencia y el suavizado Gaussiano con ventana de Hamming de 9 términos. Todas las estaciones que limitan al noroeste con la región de Cuyo (estaciones 4 y 5) y al nor-noreste con la Pampeana (estaciones 3 y 6), muestran tendencias positivas significativas. Esta última región ha experimentado un incremento de precipitaciones desde, al menos, la década del 1960s, generando un desplazamiento de la isohieta de 200 mm hacia el sector sudoeste próxima a la RPA.

Variabilidad interanual a interdecádica de la precipitación en patagonia norte.

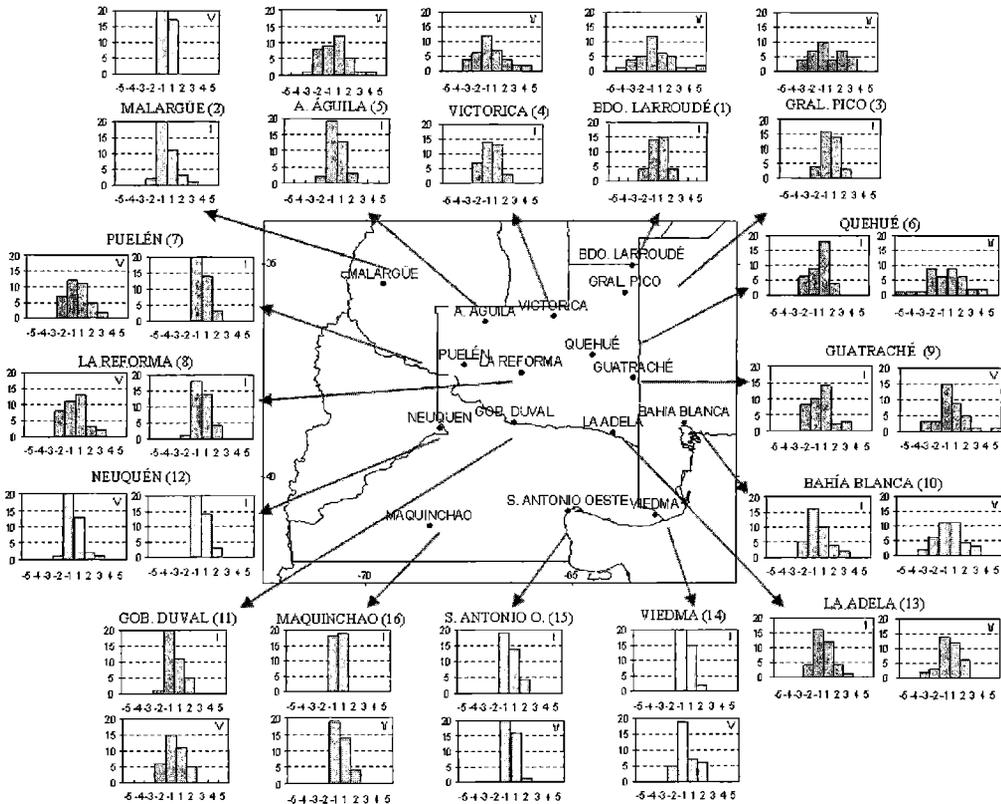


Figura 3. Histogramas de distribución de las anomalías de precipitación para cada una de las estaciones analizadas de la región. Gráficos internos corresponden al semestre frío (Paneles I) y externos al semestre cálido (Paneles V). Aclaración: los valores de abscisa representan el intervalos superior positivo e inferior negativo, x100mm: 1, (0;100]; 2, (100;200], -3, (-300,-200].

El resto de las estaciones no presenta tendencias significativas a excepción de La Reforma (8), ubicada en el centro del área analizada, que notoriamente tiene una tendencia negativa y significativa. Este cambio de tendencias entre positivo en Quehué (6) a negativo en La Reforma (8), sumado a las tendencias negativas pero no significativas del sector sur y sudoeste, son signo de que el área es de transición entre las características subtropicales propias de la Pampa Húmeda y la semiaridez del norte de la Patagonia.

La inspección visual de las series suavizadas permitió agrupar los cuasiciclos dominantes en las series interanuales del semestre cálido en 2 regiones coherentes: la centro-norte (estaciones 1 a 9, Fig. 5.a) y la sur (estaciones 10, 12 a 16, Fig.5.b). En el sector centro-norte, los cuasiciclos son aproximadamente de 8-10 años, marcado por la recurrencia de períodos secos de 3 a 5 años de duración. Este rasgo marca una notable diferencia con el comportamiento de la serie promedio regional del centro-oeste de Argentina (RCO) que presenta un período húmedo sostenido desde 1973 hasta comienzos de los 2000s (Agosta y Compagnucci, 2008).

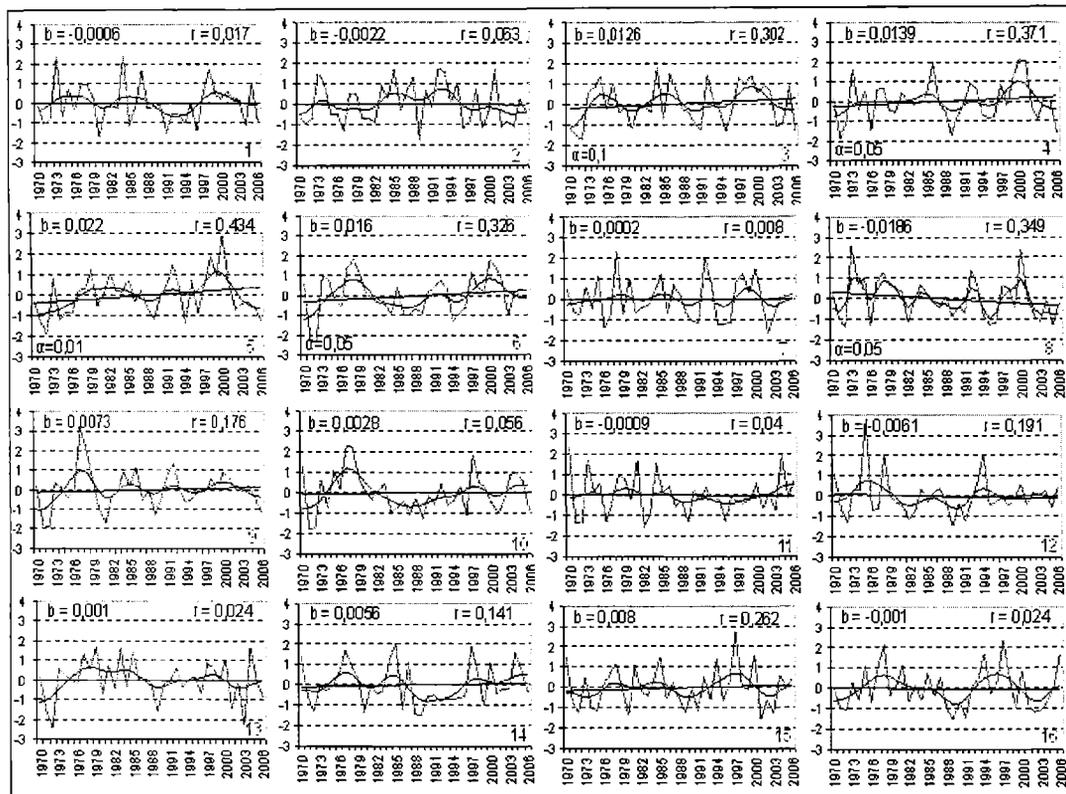


Figura 4. Totales de precipitación del semestre cálido. Tendencia lineal: pendiente (b), coeficiente de correlación (r) y nivel para el cual resulta significativamente no nulo (α)

A partir de mediados de la década de los 1980s, las series de esta región están todas en fase, a excepción de Bernardo Larroude (1). Desde fines de los 1990s, en toda la sub-región se inicia un período seco que perdura hasta el presente. Existe menor coherencia entre las fases y la intensidad de los máximos para los ciclos durante la década de los 1970s, siendo la estación más dispar Algarrobo del águila (5).

La otra subregión correspondiente al área sur presenta cuasiciclos de mayor período, entre aproximadamente de 15 a 20 años. El período húmedo comienza a principios de los 1970s extendiéndose hasta mediados de los 1980s, seguido por un corto y pronunciado mínimo de aproximadamente 5 años de duración, comenzando a fines de los 1980s otro período húmedo de aproximadamente 10 años, seguido de una tendencia neutra en los últimos años. Las estaciones de La Adela (13), Viedma (14) y San Antonio Oeste (15) tienen oscilaciones cortas comunes a finales de la década del 1970s que la asemejan a las estaciones del sector norte

Variabilidad interanual a interdecádica de la precipitación en patagonia norte.

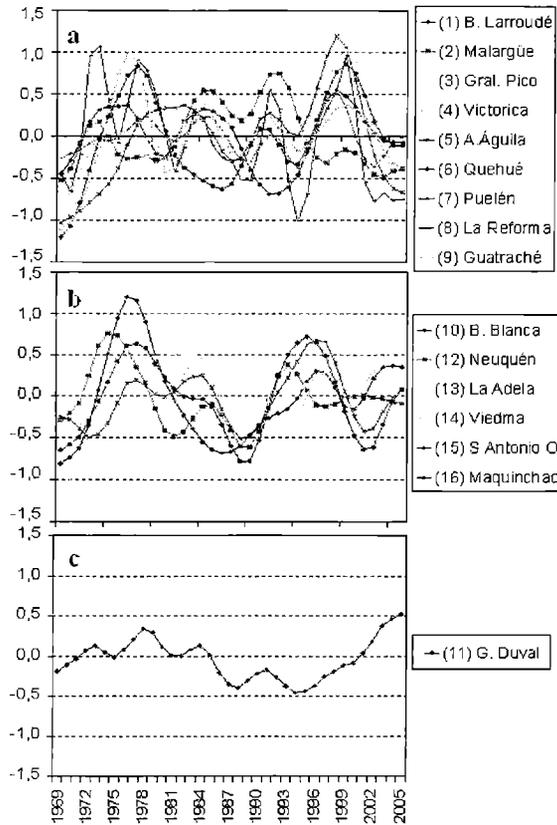


Figura 5. Series suavizadas de la RPA para el semestre cálido: a) estaciones del sector centro-norte, b) estaciones de la región sur, c) estación Duval

La estación Duval (estación 11, Fig. 5.c) ubicada en el centro del límite entre las subregiones norte y sur, tiene un comportamiento ajeno a ambas, mostrando un aparente ciclo de muy baja frecuencia (de 30 a 40 años) que estaría alcanzando un valor máximo en el final de la serie, a la que se le suma una señal de mayor frecuencia de aproximadamente 5 años

Agosta y Compagnucci (2008a) muestran que la circulación atmosférica de verano en latitudes medias (oestes) de Patagonia y el sudoeste del Atlántico presenta también un cuasiciclo dominante, de aproximadamente 18 años, observada desde principios del siglo XX hasta el presente. Por lo tanto, la subregión sur podría estar respondiendo al comportamiento del flujo de los oestes, y en la medida en que algunos años afectara a menores latitudes, llegaría a influir sobre las precipitaciones en Duval. En años en que el flujo de los oestes se encontrase corrido hacia mayores latitudes, la precipitación en esta región estaría regida por el flujo de aire proveniente del noroeste.

Para el semestre frío (Fig.6), la mayoría de las estaciones del sector norte (estaciones 1, 2, 4 y 6) y del sudeste (13, 14 y 15) tiene tendencia positiva y significativa. Las series suavizadas permiten distinguir, a grandes rasgos, 2 subregiones: norte (estaciones 2, 4, 5, 6, 7, 8, Fig. 7.a) y sur (estaciones 3, 9, 10, 11, 12, 13,

14, 15, 16, Fig. 7.b) de comportamiento coherente. Con todo, en la región sur se incluye Gral Pico (3) que está más hacia al noreste, cerca de la estación extremo norte Bernardo Larroudié (1).

Esta última no clasifica en ninguna subregión, dado que su comportamiento en baja frecuencia durante las primeras 2 décadas sigue a las estaciones del norte, mientras que en las últimas 2 décadas sigue a las estaciones del sur (Fig 6.c). Tanto las estaciones del norte como las del sur presentan cuasiciclos en torno a los 7-10 años.

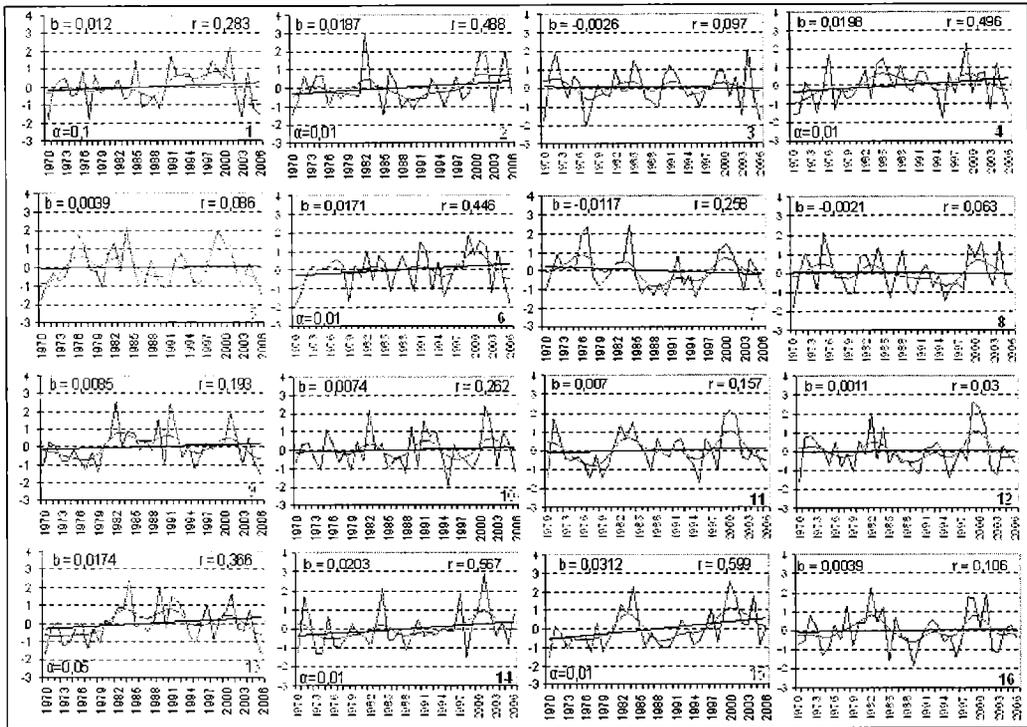


Figura 6. Totales de precipitación del semestre frío. Tendencia lineal: pendiente (b), coeficiente de correlación (r) y nivel para el cual resulta significativamente no nulo (α)

Sin embargo, las del norte tienen menores frecuencias y están desfasadas con las del sur durante la década del 1970s. En la década de los 1980s, la relación se invierte, haciendo que desde mediados de los 1990s, ambas subregiones entren en fase hasta el final del periodo. Climáticamente, durante el semestre frío el flujo de los oestes está desplazado más hacia el norte debido a la mayor actividad sinóptica transiente dominante en el área. Varios autores encuentran que la actividad baroclínica en el Hemisferio Sur presenta un cuasiciclo dominante de cerca 8 años, especialmente en primavera, asociados a la variabilidad del Modo Anular del Sur (MAS. Barrucand y otros, 2008).

Variabilidad interanual a interdecádica de la precipitación en patagonia norte.

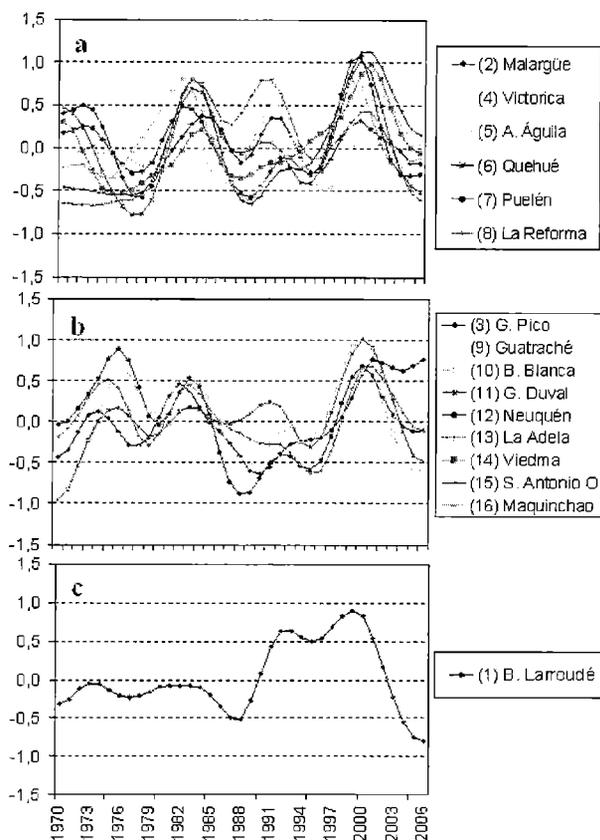


Figura 7. Series suavizadas de la RPA para el semestre frío: a) estaciones del sector norte, b) estaciones de la región sur, c) estación B.Larroudé

Variabilidad temporal de la precipitación regional de verano e invierno

El agrupamiento en baja frecuencia realizada en la sección anterior permite construir índices de precipitación subregionales tanto para el invierno, como para el verano. El índice se construye mediante el promedio espacial de cada una de las series tipificadas. En general, para cada uno de ellos, los coeficientes de correlación con las estaciones que los conforman son altos (mayores a 0.7) y significativamente distintos de cero al 99% de confianza.

La correlación entre los índices Verano Norte (VN) y Verano Sur (VS) es 0.37, significativamente distinto de cero al 95%. El bajo valor de esta correlación muestra que la subregionalización en escala interanual para la precipitación de verano tiene significado físico. En cambio la subregionalización no parece relevante en invierno, dado que el coeficiente de correlación entre los índices Invierno Norte e Invierno Sur es 0.74, significativamente distinto de cero al 99% de confianza. El resultado obtenido es razonable dado que durante el invierno toda la región está bajo la influencia de la circulación de los oeste. Por ello se decide analizar el comportamiento temporal y la circulación atmosférica asociada a los índices VS (verano subregión sur) y VN (verano subregión norte) y del invierno promediando todas las estaciones tipificadas de la región (IR).

La Figura 8 muestra las series interanuales y suavizadas (ondas mayores a 6 años) de los índice VN, VS e IR, panel superior, medio e inferior, respectivamente. Claramente se observa la ausencia de tendencia significativa en la precipitación para los últimos cuarenta años en la RPA tanto en verano como en invierno. Cada una de ellas en baja frecuencia muestra oscilaciones diversas, que en ciertas décadas están en fase.

Tanto en la subregión norte como la subregión sur de verano, como en toda la RPA en invierno, la última década presenta valores que tienen a decrecer. Asimismo las series de verano están en fase en la baja frecuencia en las dos primeras décadas, mientras que desde mediados de los 1980s las fases se oponen. Nótese que el índice VN e IR están en fase coherente desde comienzos 1980s hasta el final del registro.

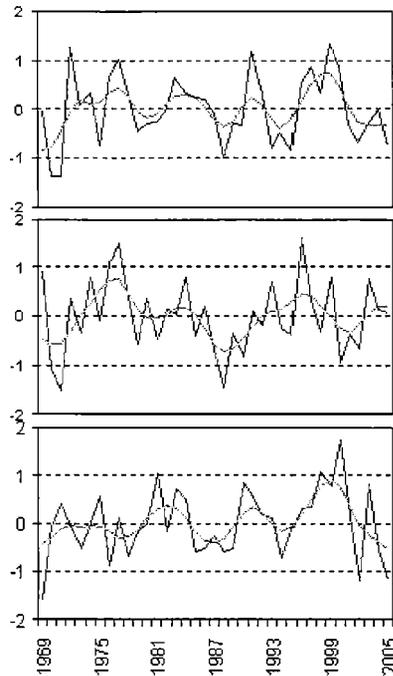


Figura 8. Panel superior corresponde al índice Verano Norte (VN); Panel medio, índice Verano Sur (VS) y Panel inferior, índice Invierno (IR). En todos los casos fue aplicado un suavizado utilizando la ventana de Hamming de 6 términos

Oscilaciones en baja frecuencia

A fin de evaluar objetivamente los cuasi-ciclos de baja frecuencia observados en las series de precipitación de cada estación, descritos someramente más arriba y que caracterizan a la región, se analizan las series de índices mediante descomposición en armónicos de Fourier. El análisis de espectros se realizó utilizando una ventana de Hamming con bandas de significancia al 90% de confianza.

En la Figura 9a se observa el espectro de ondas para el índice VN. En este caso, podemos observar dos máximos significativos a más del 90%: el primero ubicado hacia los 5-6 años, y otro ubicado alrededor de los 8 años. El espectro nulo asociado es de ruido blanco markoviano con $r_1=0.19$ no significativo al 95%. La

Figura 9b muestra el espectro de ondas del índice VS. En él puede observarse que aparece un pico alrededor de 2 años que se extiende hasta aproximadamente los 4 años. Luego la energía espectral presenta otros dos máximos secundarios: el primero hacia los 11 años y el segundo, levemente más intenso, hacia los 15 años. El coeficiente de autocorrelación de lag 1 es $r_1=0.05$ no significativo al 99% resultando ser el espectro teórico el de ruido blanco de Markov.

En la Figura 9c se muestra el espectro para el único índice regional de invierno (IR). Notamos un pico espectral, significativo al 90% de confianza alrededor de los 4-5 años. Otro pulso, aunque en este caso no significativo al 90%, aparece hacia los 11 años. Nuevamente el espectro teórico es de ruido blanco ya que el coeficiente de autocorrelación de lag 1 $r_1=0.11$ no es distinto de cero para una significancia de $\alpha=0.01$.

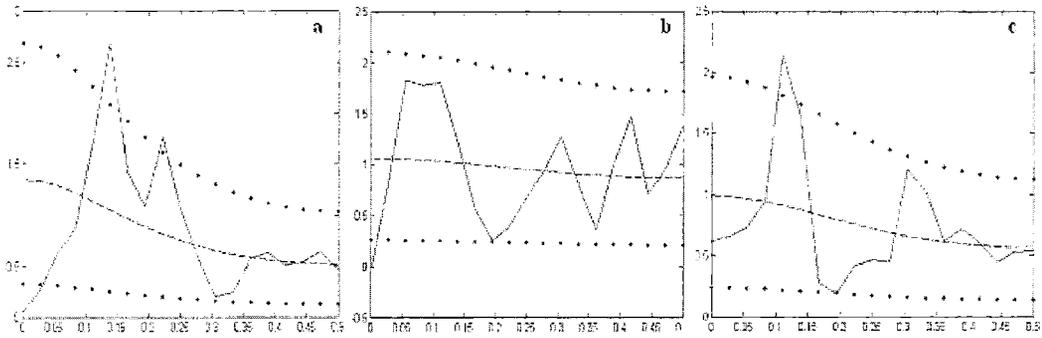


Figura 9. Espectro de Tukey con ventana de Hamming para los distintos índices, continuo nulo (línea a trazos) de ruido blanco de Markov y niveles de significancia (línea punteada) al 90%. a)VN b) VS c) IR. Ordenada al origen, densidad espectral. Abscisa, frecuencia en 1/37año

El análisis espectral muestra que tanto el verano como el invierno, la precipitación está modulada por ondas en escalas menores entre 3 y 6 años, cerca de 8 años, y 11 años. Las oscilaciones de menor frecuencia podrían estar asociadas a la variabilidad del MAS que también presenta ciclos similares y afecta la circulación de latitudes medias del cono sur de Sudamérica (Barrucand y otros, 2008). Posiblemente sean estas oscilaciones las responsables de la coherencia en fase entre VN e IR. Por otro lado el cuasi-ciclo de 11 años solar podría estar jugando un rol dominante (Agosta, 2004).

La precipitación en la RPA y la circulación troposférica de capas bajas

Para analizar exploratoriamente el comportamiento de la tropósfera baja en relación a la precipitación, se estimaron los mapas de correlación entre los índices VN, VS e IR con la altura de geopotencial en 850hPa (H850). Para la subregión norte (con índice VN), durante el verano húmedo (seco) se observan áreas de correlación positiva (negativa) en latitudes altas sobre el Pacífico sudeste, acompañada por correlación negativa (positiva) hacia el norte; y otra área de correlación positiva (negativa) en latitudes medias del Atlántico sudoeste (Fig. 10 a).

Para la situación húmeda, las condiciones del Pacífico favorecen un flujo de los oestes bloqueado y sobre la zona del Atlántico, el flujo de masa asociado a una actividad anticiclónica es desde el Atlántico hacia el continente, lo cual favorece el ingreso de húmeda hacia el norte de la región de estudio. La situación seca, se corresponde con un Anticiclón del Pacífico Sur intensificado y actividad ciclónica desplazada hacia altas latitudes que inhiben el ingreso de humedad desde el Atlántico hacia la parte norte de la RPA. Para la subregión sur (con índice VS), durante el verano húmedo (seco) se observan áreas de correlación positiva (negativa) hacia el sudeste del cono sur de Sudamérica, que se extienden hacia el Atlántico (Fig. 10 b). Esto

implicaría actividad anticiclónica incrementada hacia el sur de Argentina que favorece el ingreso de humedad, o el flujo de masa de aire húmedo, desde el sudoeste del Atlántico hacia el sur de la región estudiada.

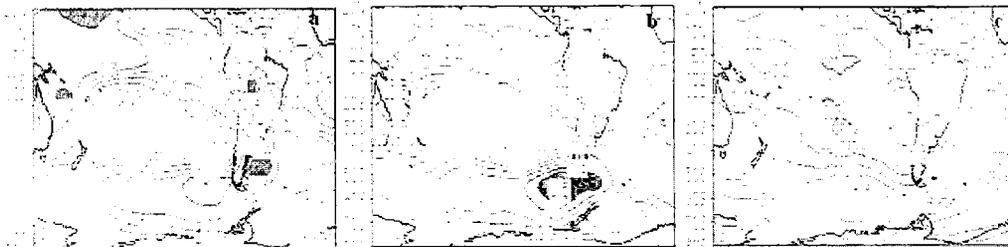


Figura 10. Mapa de correlación entre los distintos índices y H850. Fueron sombreados los valores significativos para $\alpha \leq 0,2$. a) VN b) VS c) IR

Las correlaciones con el índice IR, muestran valores altos en latitudes medias y altas de la cuenca del Pacífico con una estructura similar a la del VN, aunque ligeramente desplazado hacia el oeste (Fig. 10 c). Para un invierno húmedo (seco), se observan correlaciones positivas (negativas) sobre latitudes medias en la zona del Anticiclón del Pacífico Sur que se extienden hacia el Atlántico sobre la costa este de la Patagonia; y correlaciones negativas (positivas) en las latitudes subpolares. Esto implica que un invierno húmedo se correspondería a una situación de bloqueo en el Pacífico sur y circulación anticiclónica en latitudes medias-altas sobre el Mar Argentino que favorecen el flujo de humedad desde el Atlántico. Durante el invierno seco, el sector de latitudes medias entre el Pacífico y el Atlántico estaría afectado por actividad ciclónica incrementada que atraviesa la Patagonia central.

Relaciones con la temperatura superficial de los mares adyacentes

La Figura 11 muestra los mapas de correlación entre los índices de VN, VS e IR con las temperaturas superficiales del mar de la cuenca del Pacífico y del Atlántico, sombreados los valores cuya significancia es $\alpha \leq 0,2$. Un verano húmedo (seco) en la subregión norte, está asociado con valores positivos (negativos) de correlación en el Pacífico ecuatorial del este, extendiéndose entre 20°S y 15°N y valores negativos (positivos) hacia el sur en latitudes subtropicales del Pacífico (Fig. 11a). Los mayores valores (superiores a 0.4) se observan al norte del Mar Argentino en la zona de confluencia de la corriente del Brasil y de Malvinas.

El área del Pacífico ecuatorial oriental parece vincular las precipitaciones en la subregión norte con procesos atmosféricos-oceánicos relacionados con el El Niño-Oscilación del sur (ENOS). Un patrón similar se observa para la subregión sur durante el verano, solo que el área de máxima correlación en el Pacífico oriental se desplaza más hacia el centro de la cuenca, con valores ligeramente menores (Fig. 11b). Las áreas de correlación positiva del lado del Atlántico se desplazan hacia más bajas latitudes. Esto estaría indicando posible vinculación con una fase intermedia del ENOS y la subregión sur de la RPA.

Tanto para la subregión norte como para la subregión sur, las áreas de correlación positiva del Atlántico sudoeste, estarían asociadas a los distintos tipos de circulación atmosférica en esas latitudes que modulan la posición de la confluencia de las corrientes oceánicas cálida del Brasil y fría de Malvinas (White, 2004 y Wainer y Venegas, 2002). Para el invierno, en general, los valores de correlación son menores (Fig. 11c), los máximos valores se encuentran en latitudes medias y altas del Pacífico del sudeste y Atlántico del sudoeste cerca de la porción sur del continente. Estos valores estarían asociados a cambios de la circulación atmosférica de latitudes medias descriptos en la sección anterior.

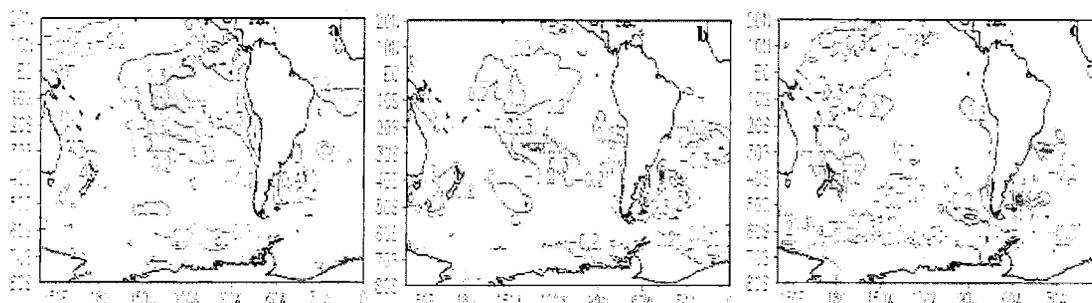


Figura 11. Mapa de correlación entre los distintos índices y la SST. Fueron sombreados los valores significativos al 80%. a)VN b) VS c) IR

CONCLUSIONES

El análisis del régimen de precipitación a lo largo del ciclo anual para las estaciones ubicadas sobre el centro-norte de la RPA muestra mayores registros durante el semestre cálido (Octubre-Marzo) en comparación con el semestre frío (Abril-Septiembre). En cambio, para las localizadas en el centro-sur, la precipitación es más uniforme a través del ciclo anual. El análisis estadístico básico muestra que, tanto para el invierno como para el verano, los valores medios disminuyen de noreste a sudoeste al igual que los desvíos estándares. La distribución de frecuencia observada de las anomalías de precipitación, tanto para el verano como para el invierno, tiene una moda en el intervalo (-100; 0)mm, es decir que las anomalías negativas de precipitación muestran la mayor ocurrencia de frecuencia. Sin embargo, el conjunto total de las anomalías positivas muestra siempre una ligera mayor probabilidad de ocurrencia.

El análisis de la tendencia lineal también indica falta de homogeneidad en la región. En el sector noreste, las tendencias del período cálido resultan positivas y significativas, en concordancia con la mayor frecuencia de ocurrencia de anomalías positivas que pueden asociarse al corrimiento hacia el sudoeste de las isohietas ocurrido durante el siglo XX debido a cambios en la advección de humedad proveniente del Anticiclón del Atlántico Sur (Barros, 2000; Agosta y Compagnucci, 2008). Sobre el centro y sur de la RPA, algunas estaciones muestran tendencia negativa aunque no significativa.

Teniendo en cuenta el comportamiento interanual de la precipitación durante el semestre cálido, es posible dividir la región en dos subregiones, una norte y otra sur. La subregión norte presenta oscilaciones en baja frecuencia en torno a 5 años y a 8 años, y la subregión sur, en torno a 2-4 años, 11 años y 15 años. Ambas subregiones estaban en fase coherente en baja frecuencia durante las primeras 2 décadas y desde mediados de los 1980s entran en contratase (Fig. 8). Durante el semestre frío, la RPA es más homogénea en cuanto al comportamiento interanual de la precipitación, presentando cuasi-ciclos significativos en torno a 4-5 años y 11 años. Tanto para el verano como para el invierno, estos procesos de baja frecuencia de la banda entre 3 y 6 años podrían estar relacionado al MAS y al cuasi-ciclo solar de 11 años. Sin embargo, es necesario un mayor análisis para confirmar estas hipótesis.

Como es de esperar, durante el verano, la circulación troposférica de capas bajas asociada a la precipitación muestra relaciones distintas para las subregiones norte y sur. La diferencia más importante es que los centros de acción asociados a la precipitación en la subregión norte se localizan hacia latitudes medias sobre el Mar Argentino en torno a 40°S, mientras que los asociados a la precipitación en la subregión sur se localizan hacia más altas latitudes. Para la precipitación de invierno, la circulación troposférica de capas bajas está más asociada a flujo de los oestes más intensificados sobre el Pacífico Sur, los cuales podrían vincularse a mayor actividad transiente de escala sinóptica en latitudes medias.

En general, la actividad anticiclónica sobre la cuenca sudoeste del Atlántico, próximo a Patagonia, está asociada a mayor precipitación debido al ingreso de humedad desde el océano Atlántico hacia la zona de estudio, mientras que actividad ciclónica sobre las latitudes medias en torno a la Patagonia inhibe la precipitación de verano. Asimismo, del lado del Pacífico, la circulación troposférica asociada parece inhibir el flujo de los oestes. Cabe destacar que la precipitación de verano para la subregión norte podría estar vinculada con la fase madura del ENOS, mientras que la subregión sur, con una fase intermedia de este proceso atmosférico-oceánico.

Estos cambios encontrados entre la circulación atmosférica de capas bajas y la precipitación en la RPA en escala mayor a la anual, son indicativos de la influencia de procesos atmosféricos de gran escala. Tanto el ENOS como la convección profunda en la región del Pacífico e Índico, modulan la atmósfera en baja frecuencia a través de la propagación meridional de ondas planetarias de Rossby que se propagan hacia latitudes medias y altas del Hemisferio Sur, y se dirigen hacia Sudamérica modificando la circulación atmosférica regional (Vera et al., 2004) y la misma variabilidad del MAS. En este sentido, los resultados encontrados son alentadores para profundizar el estudio del comportamiento y el cambio entre invierno y verano de las ondas cuasi-estacionarias de la troposfera asociadas a la precipitación en la RPA.

Agradecimientos: El trabajo fue realizado en el marco de los proyectos del CONICET PIP N°5006, AGENCIA-MINCYT PICT-2007-00438 PESTRAMO BID, A0811 Proyecto bilateral: República Argentina (MINCYT) y el NRF de Sudáfrica y UBACYT 2008-2010. X224. PICT 2007 ICES-IDAC 01888 y UCA (PEPACG). Se agradece al personal del Servicio Meteorológico Nacional la pronta respuesta ante la solicitud de la información. También se agradece en todo sentido a O. Carm.

REFERENCIAS

- Agosta, E. A., Compagnucci, R.H., Vargas, M.W., 1999. Cambios en el Régimen Interanual de la Precipitación Estival en la Región Centro-Oeste Argentina. *Meteorologica.* , v.24, n.1 y 2, p.63 - 84, ISSN/ISBN: 0325187X.
- Agosta, E.A. (2004): Variabilidad del clima terrestre y rayos cósmicos galácticos durante el ciclo solar de 11 años: revisión teórica. *Meteorologica.* , v.29, n.1 y 2, p.47 – 62.
- Agosta, E. A., Compagnucci, R.H., 2006 Atmospheric Conditions During wet and dry summer extremes in Central-West Argentina. 8th International Conference of the Southern Hemisphere Meteorology and Oceans, American Meteorological Society, Foz do Iguazu, Brasil. Ses. 12: Understanding long-term climate variations in the SH. p.1439 – 1452. 10 pág.
- Agosta, E. A., Compagnucci, R.H. 2008. The 1976/77 Austral Summer Climate Transition Effects on the Atmospheric Circulation and Climate in southern South America. *Journal of Climate.* DOI: 10.1175/2008JCLI2137.1
- Agosta, E. A., Compagnucci, R. H., 2008b. Procesos atmosféricos/oceánicos de baja frecuencia sobre la cuenca sudoeste del Atlántico Sur y la variabilidad de la precipitación en el centro-oeste de Argentina, *Geoacta*, 33, 21-31.
- Agosta, E. A. y Cavagnaro, M. 2010, en prensa. Variaciones interanuales de la precipitación de verano y el rendimiento del cultivo de la vid en Mendoza. *Revista Geoacta*
- Barros, V, M. Castañeda, and M. Doyle, 1996: Recent precipitation trends in southern South America to the east of the Andes: An indication of a mode of climatic variability. *Greenhouse Gas Emission under Developing Countries Point of View*, L. P. Rosa and M. A. Santos, Eds., COPPE, 41–67.
- Barros, V., Castañeda M. E., y Doyle, M., 2000. Recent precipitation trends in southern South America east of the Andes: An indication of climatic variability. *Southern Hemisphere paleo and neo-climates*, P. P. Smolka and W. Volkheimer, Eds., Springer-Verlag.
- Barrucand, M., Rusticucci, M., y Vargas, W. 2008. Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *J. Geophys. Res.*, 113, D20111, doi: 10.1029/2007JD009026.

- Boulanger, J. P., J. Leloup, O. Penalba, M. Rusticucci, F. Lafon, and M. Vargas, 2005: Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: Long term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dyn.*, 24, 393–413.
- Canavos G. C.: Probabilidad y estadística: Aplicaciones y métodos, primera edición. Ed McGraw Hill 1988, 651pp.
- Gu, D.F. y Philander S. G. H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, 275:805-807.
- Haylock, M. R., and Coauthors, 2006: Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *J. Climate*, 19, 1490–1512.
- Hoffmann, J.A.J., 1992. The continental atmospheric pressure and precipitation regime of South America. *Erdkunde* 46, 40-51. Alemania.
- Kottek, M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. y Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Krepper, C. M., Scian, B. V. y Pierini J. O. 1989. Time and space variability of rainfall in central-east Argentina. *J of Climate*, 2, 39-47
- Liebmann, B., and Coauthors, 2004: An observed trend in central South American precipitation. *J. Climate*, 17, 4357–4367.
- Mínetti, J.L. y Vargas, W.M. 1998. Trends and Jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S. *Atmósfera*, 11, pp.205- 221. México.
- Mínetti, J. L., Vargas, W. M., Poblete, A. G., Acuña, L. R. y Casagrande, G. 2003. Non linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera* 16 pp. 119-135
- Schwerdtfeger, W., 1951. Bases para el pronóstico a medio plazo de las condiciones de temperatura en el otoño de Buenos Aires. *Revista Meteoros*, Año I, n°1, pp 33-45.
- Schwerdtfeger, W. 1976. *Climates of Central and South America*. In *World Survey of Climatology* (Schwerdtfeger, W.; editor). Elsevier Scientific Publishing Company, p. 145. Amsterdam-Oxford-New York
- Vera, C, Silvestri, G., Barros V. y Carril A., 2004. Differences in El Niño Response over the Southern Hemisphere. *J of Climate* Vol 17 N°9 1741-1753
- Wainer I. y Venegas S.A. 2002: South Atlantic Multidecadal Variability in the Climate System Model, *Jou. Of Clim.* 15, 1408-1420.
- White W.B. 2004: Comments on “synchronous variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea, Ice and Ocean resulting from Annular Mode”. *Am. Met. Soc.* 17, 2249-2254.
- Wilks, D.S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Elsevier, 628pp

Recibido: 2 de junio de 2010 - Aceptado: 18 de octubre de 2010