

Interações Entre a Antártica e a Circulação da Atmosfera Próxima à América do Sul*

(Antártica|circulação no Hemisfério Sul|vórtice circumpolar)

IRACEMA FONSECA DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI

Instituto de Pesquisas Espaciais, 12200 São José dos Campos, SP

INTRODUÇÃO

A análise das variações na circulação atmosférica é de grande importância para o conhecimento dos fatores associados aos sistemas sinóticos que afetam a América do Sul e, em particular, o Brasil. A variação na circulação atmosférica próxima à América do Sul, que influi nos sistemas sinóticos responsáveis pela mudança de tempo no Brasil, deve ser investigada considerando as principais fontes e sumidouros de calor, ou seja, a região equatorial e a região antártica. A influência da região antártica no clima global e na circulação geral da atmosfera tem sido discutida por vários autores, entre eles Streten (1973, 1980), Goody (1980), Budd (1981), Schwerdtfeger (1979), Fletcher e Kelley (1978) e Carleton (1983). No Brasil, muitos estudos relacionam-se com as regiões tropicais, mas as investigações sobre as interações entre as latitudes médias e a região antártica estão apenas começando. O objetivo deste trabalho é destacar alguns aspectos da circulação atmosférica próxima à América do Sul e verificar a influência da Antártica nas variações da circulação.

Algumas características da Antártica devem ser avaliadas para melhor entendimento das interações entre esta região a as latitudes médias. O ciclo

anual de crescimento e diminuição do gelo da Antártica constitui uma significativa variável do tempo e clima na escala de tempo mensal e sazonal. A variação sazonal na extensão do gelo Antártico, entre $2,5 \cdot 10^6$ e $20 \cdot 10^6$ km², manifesta-se nos parâmetros meteorológicos, como temperatura, pressão e velocidade do vento e, também, na circulação da atmosfera (Carleton, 1983). A máxima extensão de gelo ocorre em setembro e a mínima em fevereiro (Zwally *et al.*, 1983). Com esta variação na quantidade de gelo ao redor do continente, há uma variação no albedo e também no fluxo de energia da superfície para a atmosfera. O gelo tem albedo de $\sim 0,8$, que contrasta com $\sim 0,06$ para o mar e $0,15$ para a terra. O gelo do mar também tem a função de isolar o calor e, assim, modificar a comunicação térmica do ar com o oceano (Goody, 1980).

Mapas mensais climatológicos de temperatura de superfície, pressão ao nível do mar e ventos geostróficos para a região entre 50°S e Pólo Sul encontram-se em Swally *et al.* (1983). Nos mapas de pressão ao nível do mar, há uma célula de alta pressão sobre a Antártica e um anel de ciclones localizados a 60°S, em janeiro, e deslocados para latitudes mais próximos do equador, nos meses de inverno. Variações interanuais na extensão de gelo provocam variações na configuração do escoamento do ar, influenciando na trajetória dos sistemas ciclônicos do Hemisfério Sul (Carleton, 1981). Streten (1973) afirma que as alterações na cobertura de gelo provocam uma grande variação no balanço de energia da terra, por sua vez podendo causar modificações na configuração da circulação atmosférica.

*Pesquisa parcialmente financiada pelo PROANTAR, Subprojeto "Estudos sobre a Circulação Atmosférica sobre a região Antártica (9503)", Convênio SECIRM/CNPq-INPE, nº 070/039/84.

NOTA: Parte deste estudo foi realizada no Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA.

Além da variação sazonal da extensão do gelo, a qual influi no clima global, há outras características que contribuem para a circulação observada próximo à Antártica. Na região do Mar de Weddell há um escoamento ciclônico em altitudes baixas, com ventos de sul inflitando para nordeste, junto à península Antártica. Esta circulação é responsável pela advecção de ar frio e gelo para as latitudes mais baixas (Schwerdtfeger, 1979). Na região do mar de Ross também ocorre advecção fria para latitudes mais baixas, mas a advecção fria da região do mar de Weddell alcança latitudes menores, devido ao fato de a península Antártica estar mais ao norte do que o continente antártico. Entre a península Antártica e o mar de Ross há uma área com cobertura persistente de gelo (Zwally *et al.*, 1983), o que deve influir também na circulação atmosférica próxima.

Outra característica da Antártica é a topografia. Cerca de 55% da superfície do continente tem altura acima de 2000m e 25%, mais de 3000m acima do nível do mar (Schwerdtfeger, 1970). O resfriamento radiativo do ar na superfície forma uma camada rasa de ar frio que escoia para baixo como ventos catabáticos, os quais existem em toda a costa (Rubin, 1962). Durante o inverno, há uma camada de inversão sobre a Antártica e, durante o verão, a superfície absorve suficiente energia para enfraquecer ou destruir a inversão de temperatura (Rubin, 1962).

Com a finalidade de realizar um estudo sobre a influência da região antártica nos sistemas sinóticos que afetam o Brasil, foi desenvolvido um esquema de análise da circulação geral da atmosfera e feita uma análise de dados de superfície de algumas estações na Antártica.

METODOLOGIA

A análise da circulação global foi feita através do método de funções ortogonais empíricas, com o cálculo de autovetores que representam configurações características do escoamento atmosférico, e séries temporais de seus coeficientes. Este método é eficiente, pois a partir de uma grande quantidade de dados é possível extrair as principais configurações que a atmosfera apresenta. Os parâmetros são calculados a partir da matriz R dada por $F \cdot F^t$, onde F é a matriz composta pelos valores que se deseja analisar, distribuídos em espaço e em tempo; ou seja, F é a matriz $n \times m$, sendo n o número de valores considerados em toda região para cada

período e m o número de períodos. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em Weickmann (1983) e Hardy e Walton (1978).

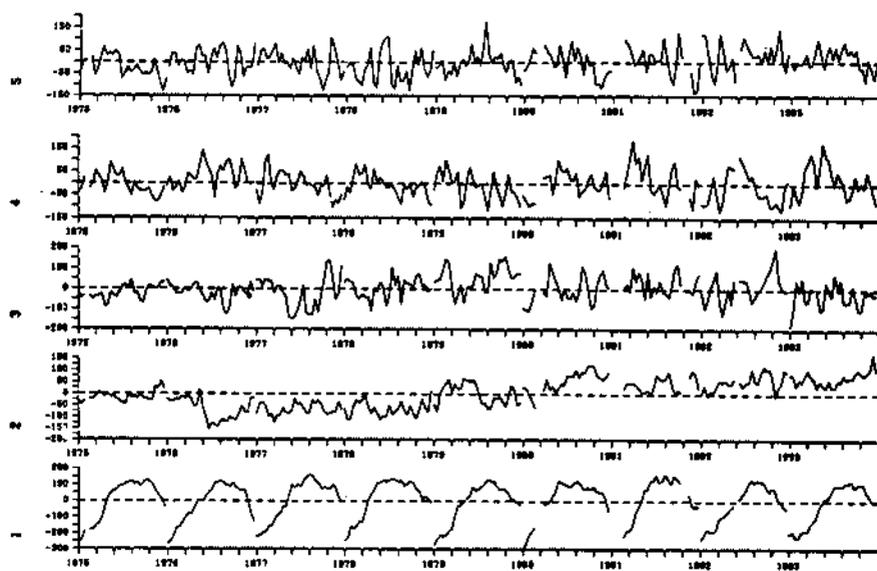
O cálculo dos autovetores para a circulação foi realizado com os dados em pontos de grade do *National Meteorological Center (NMC)*, que são as componentes u e v do vento em 850mb e 250mb. Trabalhou-se com médias de 5 em 5 dias, referentes ao período de maio a setembro dos anos de 1975 a 1983. Os dados foram normalizados para que a resolução de longitude em todas as latitudes tivesse igual peso de variância.

Os dados da Antártica foram de pressão, temperatura, velocidade e direção do vento, todos parâmetros de superfície. Foram analisadas séries temporais destes parâmetros (médias de 5 dias) para o período de maio a setembro, entre 1980 a 1983. As estações usadas foram Byrd, Siple e Dumont D'Urville.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alguns autovetores representam o ciclo anual e semi-anual, e outros representam variações em intervalos menores, que podem ser associados aos sistemas sinóticos. A análise foi realizada para os cinco primeiros autovetores, sendo destacados aqueles que mostraram algumas características relacionadas com a região antártica, isto é, o primeiro e quarto autovetores. A Figura 1 contém as séries temporais dos cinco autovetores estudados, dos quais serão focalizadas apenas as séries referentes aos primeiro e quarto autovetores. A porcentagem de variância do primeiro autovetor é 11,4 e do quarto, 2,8. No primeiro autovetor (Fig. 2), o qual representa o ciclo anual, as anomalias positivas em 850mb mostram ventos mais fortes da região antártica para a costa oeste da América do Sul. Na série relativa ao primeiro autovetor, há coeficientes negativos em maio-junho e coeficientes positivos em julho-agosto, com diminuição dos coeficientes em setembro, novamente. Estas características podem estar associadas à advecção de ar frio da região polar em direção a latitudes mais baixas, o que contribui para o desenvolvimento de zonas frontais no sul da América do Sul, durante o período de julho-agosto.

Na série temporal para o primeiro autovetor podem-se observar características relacionadas ao evento Oscilação do Sul — "El Niño". Em 1976, 1982 e 1983 os coeficientes positivos (advecção de



MAY THRU SEPT 1975-83 5-DAY MEAN CIRC. SEASONAL CYCLE IN.

Fig. 1 - Série temporal para os coeficientes dos autovetores da circulação. Os números à esquerda indicam os números dos autovetores.

ar frio da Antártica) começaram em julho, enquanto nos outros anos, estes começaram em meados de junho. Isto pode estar relacionado com o fato de haver invernos fracos nos anos de ocorrência do efeito "El Niño". Em 1982 e 1983, nota-se, também, que os coeficientes negativos começaram a diminuir em junho, e que nos outros anos, houve uma diminuição desde maio. A diminuição de advecção de ar frio da Antártica pode estar associada ao fenômeno "El Niño", devido ao enfraquecimento da alta subtropical do Pacífico.

A fim de verificar as interações da região antártica com as latitudes mais baixas, analisaram-se parâmetros meteorológicos de algumas estações do continente, relacionando-os com as configurações do escoamento. Fizeram-se análises de pressão, temperatura, direção e velocidade do vento para Byrd, Siple e Dumont D'Urville para o período de maio a setembro, entre os anos de 1980 e 1983. Byrd fica a 1530m de altura, a 80°S e 120°W; Siple, a 900m, a 75,9°S e 84,3°W; e Dumont D'Urville a 267m, a 66,7°S e 139,8°W. Na Figura 3 apresenta-se a série temporal da média de 5 dias de pressão para estas mesmas estações. Nota-se que as séries para as três estações apresentam variações muito semelhantes entre si, o que sugere a influência de um fator de grande escala nestas regiões. Byrd e Siple estão mais próximas uma da outra e

Dumont D'Urville está mais afastada delas, mas ainda assim apresenta um comportamento semelhante.

Comparando estas séries de pressão com as séries dos autovetores (Fig. 1), nota-se que a série relativa ao quarto autovetor apresenta variações semelhante às da série temporal de pressão na superfície para as estações da Antártica. Em alguns pontos há uma certa defasagem na diminuição ou aumento desta pressão, mas o aspecto geral sugere uma interação entre as duas séries. O coeficiente de correlação entre a pressão em Byrd e os coeficientes do quarto autovetor é de 0,12. Para o número de valores considerados (120), o nível de confiança fica entre 80 a 90%.

Fazendo a combinação da média do escoamento com o quarto autovetor multiplicado pelo coeficiente negativo ou positivo máximo, obtêm-se configurações do escoamento relativo a este autovetor. Nota-se, nestas configurações, uma diferença entre o coeficiente positivo e o negativo na posição do jato de oeste. Para o caso positivo, em 250mb (Fig. 4a), o jato sobre a Austrália e o Oceano Pacífico concentra-se mais ao norte (entre 20°S e 40°S), o que sugere uma trajetória para os ciclones também mais para o norte. Neste caso, estes tenderiam a entrar na América do Sul seguindo o jato, aproximadamente 30°S. Como observado em

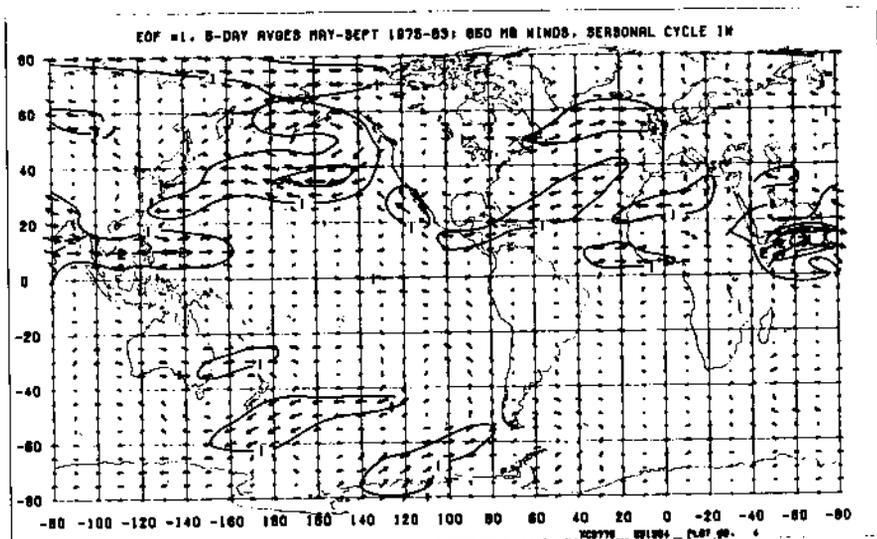


Fig. 2 — Configuração do primeiro autovetor, referente ao escoamento do vento em 850mb. Os valores das isolinhas foram multiplicados por 10^2 m/s. Para obter-se o valor da anomalia, deve-se multiplicar o valor do vetor por um dos coeficientes na série temporal correspondente.

imagens de satélite, estes ciclones desenvolvem-se bastante quando entram no continente, onde ocorre muitas vezes frontogênese a leste e nordeste deles. Notam-se também, no sul da América do Sul, ventos de sudoeste, até o jato no Sudeste do Brasil, situação esta propícia para sistemas sinóticos atuarem no Sul e Sudeste do Brasil. Esta configuração foi bem marcante no ano de 1983, associada ao fenômeno "El Niño", com o jato subtropical bem intenso nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Ao mesmo tempo, pode-se observar, na Figura 1, que os coeficientes para o quarto autovetor foram altos e positivos nesse ano. Quando o coeficiente é negativo (Fig. 4b), o jato estende-se de 20° S a 60° S no Pacífico Oeste, havendo uma bifurcação no centro do Pacífico. Neste caso, os ventos mais fortes na América do Sul encontram-se na região sul do continente, e a trajetória dos ciclones encontra-se mais para o sul. Os ventos no sul da América do Sul são de noroeste, o que impede a atuação de sistemas sinóticos no Sul e Sudeste do Brasil.

Nas Figuras 1 e 3, nota-se que, quando a pressão é mais baixa na Antártica, os coeficientes do

quarto autovetor tendem a ser negativos, ou seja, o jato está em latitudes mais altas e a passagem de sistemas sinóticos dá-se mais ao sul da América do Sul. Quando a pressão é mais alta, os coeficientes tendem a ser positivos, isto é, o jato está em latitudes mais baixas e os sistemas sinóticos têm uma trajetória que passa sobre o sudeste da América do Sul. Esta relação entre a pressão na Antártica e a circulação no Hemisfério Sul pode estar associada à expansão e contração do vórtice circumpolar, característica esta relacionada por van Loon (1967) com a variação latitudinal dos ventos de oeste. Este autor mostrou que há uma variação semi-anual na circulação, relacionada com o contraste de temperatura entre latitudes médias e altas. Pode-se notar que, na série temporal para o quarto autovetor, também há uma componente semi-anual, em alguns anos, além das variações em intervalos de tempo mais curtos. O contraste de temperatura entre as latitudes médias e altas alcança dois máximos na época dos equinócios. Isto faz com que o cavado circumpolar fique mais próximo dos pólos, durante as estações de transição, e de desloque para latitudes mais baixas, durante o inverno (van

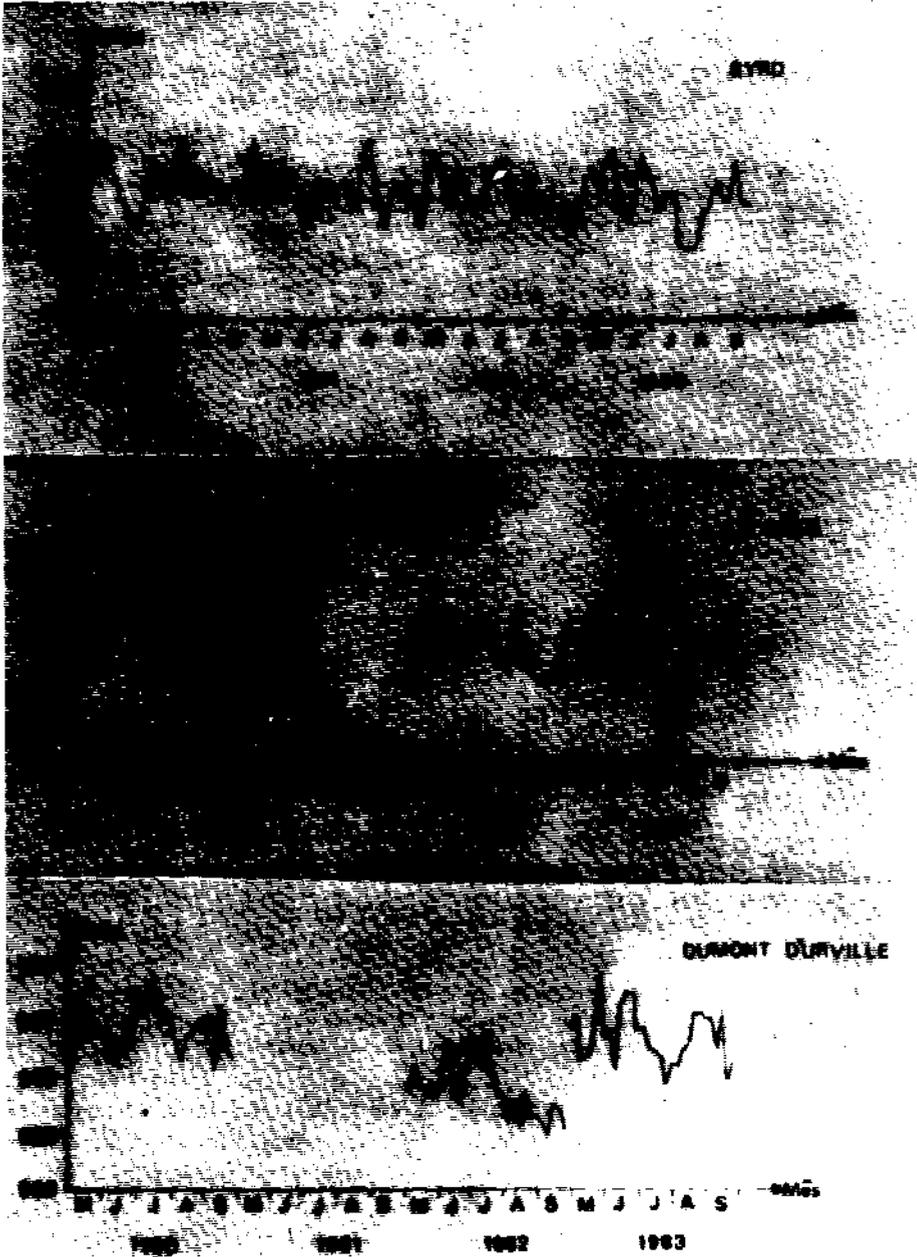


Fig. 3 - Séries temporais de pressão (média de 5 dias) para: a) Byrd; b) Siple e c) Dumont D'Urville.

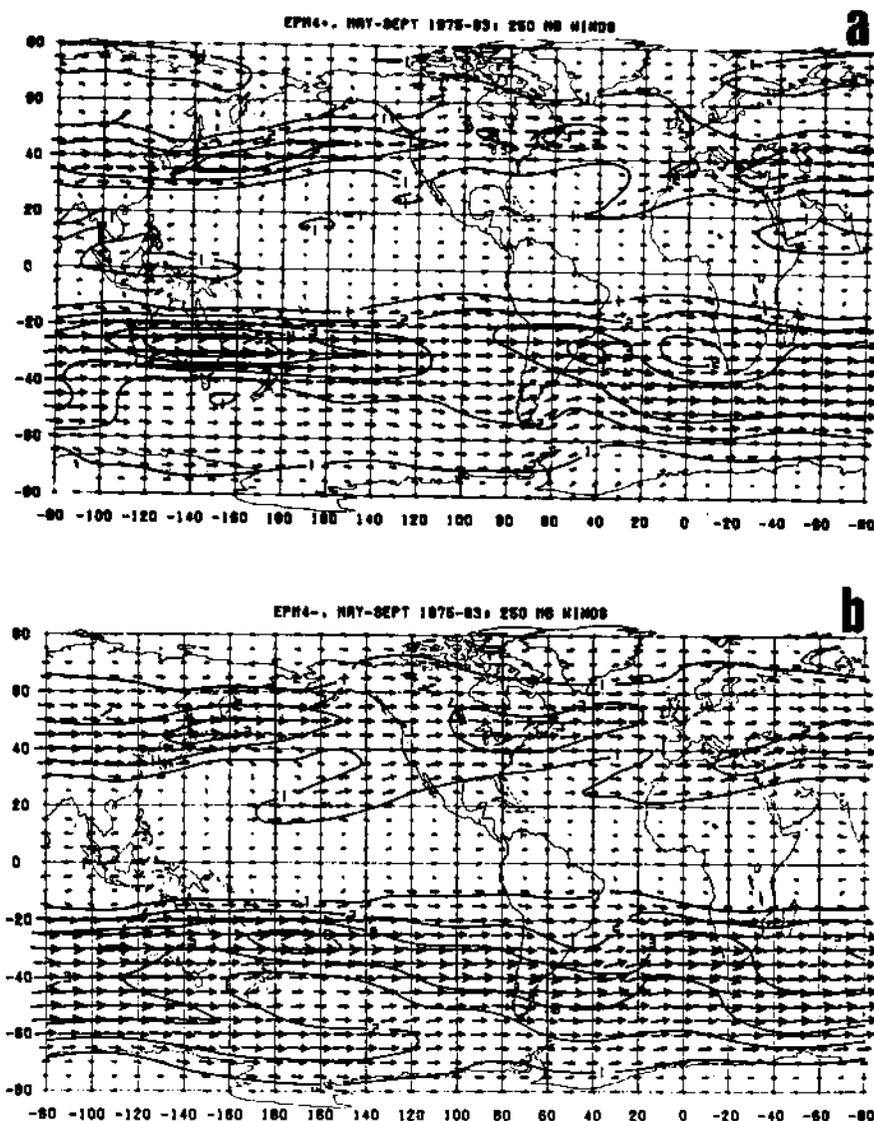


Fig. 4 - Configuração da combinação do escoamento médio com o quarto autovetor em 250mb. As linhas cheias indicam as isotacas, e os valores devem ser multiplicados por 10.
a) coeficiente positivo e b) coeficiente negativo.

Loon, 1967). Estas características são coerentes com as configurações obtidas para o quarto autovetor. Carleton (1981), investigando a frequência dos ciclones no Hemisfério Sul em função da latitude, concluiu que, em setembro, há um máximo em latitudes mais próximas do pólo (60 a 75°S), e, em julho, o máximo ocorre em latitudes mais baixas (40 a 49°S). Também Yassunari (1981) notou a influência da oscilação do vórtice circumpolar na circulação e na nebulosidade observada na região do Oceano Índico. A variação na pressão ao nível do mar, de março a junho, foi mostrada por van

Loon (1983). A diminuição de massa nos Oceanos Pacífico e Índico foi associada com o movimento do cavado circumpolar para o equador. Segundo van Loon, o cavado de oeste no Pacífico amplifica-se e atinge sua posição setentrional extrema, em junho, enfraquecendo a crista subtropical. Como a crista subtropical influi na Oscilação do Sul, van Loon (1983) estudou o comportamento do cavado relacionado com esta oscilação.

Como já mencionado, em 1983, as características da atmosfera relacionadas à Oscilação do Sul foram bem marcantes, e os coeficientes do quarto

autovetor, neste mesmo ano, foram altos e positivos. Nota-se, na configuração em 850mb (não mostrada aqui), que os ventos de leste no Pacífico equatorial são mais fracos para coeficientes positivos, o que indica o enfraquecimento da alta subtropical do Pacífico. Nota-se, também, que, para coeficientes negativos, há ventos fortes de oeste no Pacífico bem próximos à Antártica, os quais se dirigem para a costa oeste da América do Sul, enquanto, para coeficientes positivos, os ventos que se dirigem para a costa são de noroeste, e próximo à Antártica os ventos são bem fracos. Isto pode su-

gerir a influência da advecção de ar frio na Antártica na alta subtropical do Pacífico e, conseqüentemente, na Oscilação do Sul. No ano de 1981 também há valores altos que podem indicar o enfraquecimento da alta subtropical.

Para ilustrar a variação na circulação atmosférica, apresentam-se dois exemplos, um para coeficientes positivos e outro para coeficientes negativos do quarto autovetor. Para tanto, escolheu-se o ano de 1981 pela disponibilidade de dados do NMC. A Figura 5 mostra o escoamento em 250mb para o dia 7 de junho de 1981, que representa o

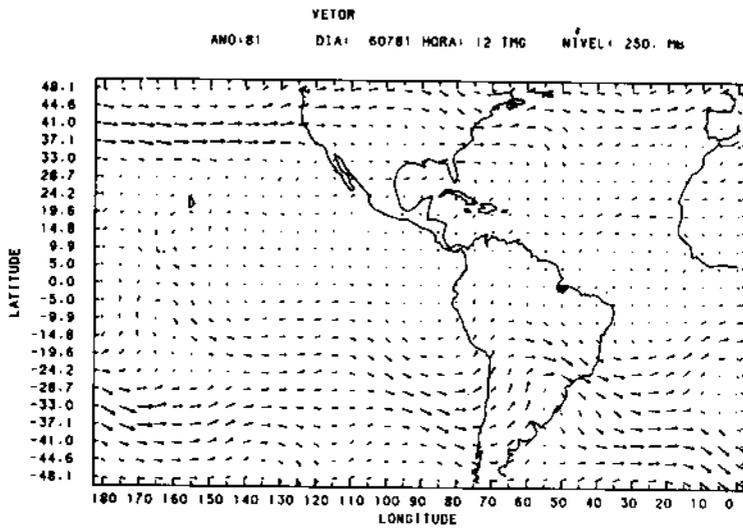


Fig. 5 - Escoamento em 250mb para o dia 7 de junho de 1981. O vetor máximo é de 79,4m/s.

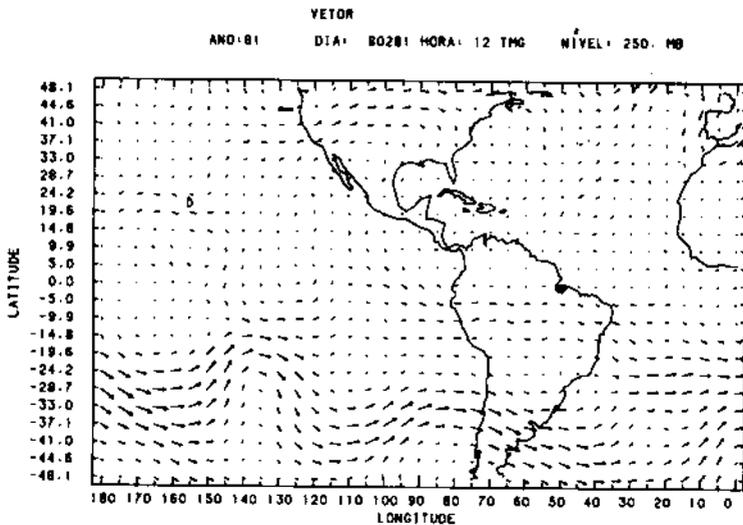


Fig. 6 - Escoamento em 250mb para o dia 2 de agosto de 1981. O vetor máximo é de 76,9m/s.

período positivo (5 a 9 de junho de 1981). Notam-se, na costa oeste da América do Sul, ventos de sudoeste, que fazem parte da crista posicionada a oeste da América do Sul. Comparando esta figura com a Figura 4a, nota-se que há uma coincidência na posição da crista e dos ventos de sudoeste, o que corrobora a validade do método. A Figura 6 apresenta o escoamento em 250mb para o dia 2 de agosto de 1981, que representa o período negativo de 30 de julho a 03 de agosto de 1981. Neste caso, observam-se ventos de noroeste na costa oeste da América do Sul e um cavado a oeste desta costa, coerente com a Figura 4b.

Para ilustrar a trajetória dos sistemas sinóticos, tomaram-se alguns períodos de junho de 1983, para exemplificar os casos com coeficientes positivos e negativos. Novamente, escolheram-se os casos em que havia disponibilidade de imagens transmitidas por satélite em visão estereopolar. Essas imagens podem ser encontradas nas revistas publicadas pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (1983). Fez-se uma composição da nebulosidade associada aos sistemas sinóticos para três períodos. No período de 5 a 9 de junho de 1983, em que o coeficiente estava alto e positivo, a trajetória dos sistemas foi de sudoeste para nordeste no Pacífico leste e os sistemas afetaram o Brasil. No período de 15 a 19 de junho de 1983, nota-se, na série temporal, que os coeficientes caíram abruptamente, chegando a valores negativos (Figura 1). Neste período, os sistemas tinham uma trajetória para sudeste, não penetrando na América do Sul. Os coeficientes voltaram a ficar altos e positivos, no período de 25 a 29 de junho de 1983. Neste caso, observa-se a seqüência dos sistemas que penetram de sudoeste para nordeste e afetam o Brasil. Na série temporal de pressão na Antártica, pode-se ver que, quando a pressão ficava mais baixa nesta região, os sistemas tendiam a passar sobre o sul da América do Sul, e quando a pressão ficava mais alta, tendiam a passar sobre o sul e sudeste do Brasil.

CONCLUSÃO

Através das análises realizadas, nota-se uma relação entre a região antártica e as variações da circulação as quais têm influência na trajetória dos sistemas sinóticos. A variação de pressão na Antártica relaciona-se com a mudança latitudinal na posição do jato em altos níveis da atmosfera, respon-

sável pela variação na trajetória dos sistemas sinóticos que passam pela América do Sul. Estas características são coerentes com a variação do vórtice circumpolar, que tem um ciclo semi-anual. Na série temporal do quarto autovetor, pode-se notar uma componente semi-anual, além das variações em intervalos de tempo menores. Estas variações em intervalos mais curtos demonstram que a trajetória dos sistemas sinóticos pela América do Sul pode variar em escala de tempo menor que a devida apenas ao ciclo sazonal. No primeiro autovetor, destaca-se a contribuição de ar frio da Antártica no inverno, no fortalecimento do gradiente de temperatura norte-sul e aumento da baroclinia da região.

Fez-se o presente estudo para o período de inverno, e análises para outros períodos deverão ser realizadas posteriormente. Variações interanuais dos parâmetros meteorológicos na Antártica e na trajetória dos ciclones também deverão ser pesquisadas e associadas a parâmetros meteorológicos no Sul e Sudeste do Brasil. Espera-se ampliar a área de estudo da Antártica analisando outras estações e incluindo análises de altitude.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Klaus Weickmann e ao Dr. Charles Stearns o fornecimento dos dados e as discussões.

RESUMO

Características da circulação atmosférica próxima à América do Sul são analisadas e relacionadas com variações dos parâmetros meteorológicos em algumas regiões da Antártica. Utiliza-se o método das funções ortogonais empíricas e as configurações dos autovetores são relacionadas com situações sinóticas que afetam a América do Sul. A pressão na Antártica apresenta variações semelhantes ao quarto autovetor da circulação. Quando a pressão é mais baixa na Antártica, a corrente de jato está localizada no sul da América do Sul, o que sugere que a trajetória dos sistemas sinóticos ocorra em latitudes altas. Quando a pressão é mais alta na Antártica, a corrente de jato se estabelece em latitudes mais baixas e os sistemas sinóticos tendem a passar sobre o Brasil.

SUMMARY

Features of atmospheric circulation near South America are analysed and related with variations of meteorological parameters in some regions of Antarctica.

The empirical orthogonal functions method is applied and the eigenvectors patterns are related to synoptic situations that affect South America. Pressure in Antarctica shows similar variations to the 4th circulation eigenvector. When pressure is lower in Antarctica, the jet stream is located on the south of South America, suggesting that the track of synoptic systems is in high latitudes. When pressure is higher in Antarctica, the jet stream is in lower latitudes, and the synoptic systems tend to pass over Brazil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUDD, W. F., (1981), The role of Antarctica in South Hemisphere. In: ROYAL METEOROLOGY SOCIETY AUSTRALIAN BRANCH (Ed.), *Weather and Climate*. University of Melbourne, Victoria, Australia.
- CARLETON, A. M., (1981), Ice-ocean-atmosphere interactions at high southern latitudes in winter from satellite observation. *Australian Meteorological Magazine*, 29 (4): 183-195.
- CARLETON, A. M., (1983), Variations in Antarctic sea-ice conditions and relationships with Southern Hemisphere cyclonic activity, winter 1973-77. *Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie*, Ser. B, 32: 1-22.
- FLETCHER, J. O. & KELLEY, J. J., (1978), The role of the polar regions in global climate change. *AAAS Selected Symposium Polar Research*.
- GOODY, R., (1980), Polar process and world climate. *Monthly Weather Review*, 108 (12): 1935-1942.
- HARDY, D. M. & WALTON, J. J., (1978), Principal components analysis of vector wind measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 17 (8): 1153-1162.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), (1983). Environmental Satellite Imagery, Washington, D.C., June, 1983.
- RUBIN, M., (1962), The Antarctic and the weather. *Scientific American*, 207 (3): 84-94.
- SCHWERDTFEGER, W., (1970), The climate of the Antarctic. In: ORVIG, S., (Ed.), *Climates of the Polar Regions*. Elsevier, Montreal, Canada. cap. 4; 253-355, World Survey of Climatology, 14.
- SCHWERDTFEGER, W., (1979), Meteorological aspects of the drift of ice from the Weddell Sea toward the mid-latitude westerlies. *Journal of Geophysical Research*, 84 (C10): 6321-6328.
- STRETEN, N. A., (1973), Satellite studies of the Atmospheric circulation of the Southern Hemisphere. In: WELLER, G. & BOWLING, S. A. (Eds.), *Climate of the Arctic*. Geophysical Institute, University of Alaska. Fairbanks, 181-189.
- STRETEN, N. A., (1980), Antarctic Meteorology: the Australian contribution. Past, present and future. *Australian Meteorological Magazine*, 28 (3): 105-140.
- VAN LOON, H., (1976), The half-yearly oscillations in middle and high southern latitudes and the coreless winter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24 (5): 472-486.
- VAN LOON, H., (1983), *The Southern Oscillation. Part III: Associations with the trades and with the trough in the westerlies of the South Pacific Ocean*. National Center for Atmosphere Research, Boulder.
- WEICKMANN, K., (1983), Intraseasonal circulation and outgoing long wave radiation modes during Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 111 (9): 1838-1858.
- ZWALLY, H. J.; COMISO, J. C.; PARKINSON, C. L.; CAMPBELL, W. J.; CARSEY, F. D. & GLOERSEN, P., (1983), Antarctic sea ice, 1973-1976: Satellite Passive-Microwave Observations. NASA, Washington.
- YASSUNARI, T., (1981), Influence of the Southern Hemisphere circulations on the active-break cycle of the Indian summer monsoon. In: *Symposium on Polar Meteorology and Glaciology*, 3, Tokio: 223-233.