

## **INTERAÇÃO ENTRE A EXTENSÃO DO GELO ANTÁRTICO E O CLIMA BRASILEIRO**

**RUTE M. BEVILAQUA**

Instituto de Pesquisas Espaciais  
C.P. 515, 12201 São José dos Campos, SP, Brasil

---

### **ABSTRACT**

The extension of the Antarctic ice is analyzed and possible implications, especially those that would affect weather and climate is discussed. Speculations are made about the viability of climatic anomaly forecasting.

### **RESUMO**

São analisadas a extensão do gelo Antártico e algumas de suas possíveis implicações. Algumas especulações são feitas sobre a viabilidade de previsão de anomalias climáticas.

### **INTRODUÇÃO**

O Continente Antártico, por suas características únicas, deve influenciar de forma significativa o tempo e o clima no Hemisfério Sul (HS). Ainda não se conhece bem como as latitudes mais baixas são afetadas. Por isto, os objetivos aqui são: apresentar algumas dessas características, as mais relevantes do ponto de vista da Meteorologia, mostrando as diferenças entre os pólos da Terra e con-

siderando a Antártica como formada pelo interior da zona continental, zona costeira e mar de gelo; citar alguns experimentos numéricos e estudos de correlação que fornecem indícios de como a Antártica afeta a circulação no resto do planeta; mostrar problemas que vêm impedindo que a modelagem numérica ajude substancialmente a compreensão da influência antártica; fazer algumas especulações com base nos estudos acima citados sobre previsão de longo prazo no Brasil e chamar a atenção para procedimentos que parecem ser necessários para que este tipo de previsão se torne viável.

#### DIFERENÇAS ENTRE OS PÓLOS DA TERRA

A Antártica, mesmo situada em latitudes correspondentes às do Ártico e sendo quase do mesmo tamanho, é um lugar bastante diferente. De fato a Antártica é um continente de 13.209.000 quilômetros quadrados e com altitude média de 1828 m e o Ártico, um oceano de 14.262.744 quilômetros quadrados com profundidade média de 1280 m. Diagonalmente opostas, estas duas regiões quase poderiam se superpor, pois, até mesmo a maior profundidade do Ártico, 5333 m, encontra seu antípoda no pico mais alto da Antártica, o maciço de Vinson nas montanhas Ellsworth, a 5138 m acima do nível do

mar. A luz funciona como um limite natural nas regiões polares, fazendo com que durante um dia de 24 h no verão o Sol nunca se ponha, em latitudes mais altas que  $66,5^{\circ}\text{N}$  e  $66,5^{\circ}\text{S}$ .

As duas regiões são desérticas, principalmente a Antártica. A diferença maior entre elas é que a Antártica tem muito mais gelo, aproximadamente oito vezes mais. As condições do tempo no Ártico são menos severas, pois, sendo um oceano, tem maior capacidade de armazenar calor no verão e moderar o frio no inverno. No inverno Ártico as temperaturas de 50 graus abaixo de zero ocorrem em vários lugares, mas existe sempre a presença moderadora da água logo abaixo da banquisa. Na Antártica a temperatura cai freqüentemente a 75 graus abaixo de zero em várias localidades e já chegou a atingir  $88,2$  graus abaixo de zero no platô Vostok. Somente na Península Antártica que se projeta 300 km para dentro do círculo Antártico, a temperatura média mensal no verão consegue se elevar acima de 0 grau. No continente, a temperatura média do mês mais quente (janeiro) é  $-32,5^{\circ}\text{C}$  e a do mês mais frio (agosto) é  $-69,8^{\circ}\text{C}$  (Ley, 1982).

Existem grandes diferenças entre áreas cobertas por gelo e neve no Ártico e na Antártica. A extensão da cobertura na Antártica é muito maior, assim como as variações sazonais e interanuais.

### INTERIOR, ZONA COSTEIRA E MAR DE GELO

Pode-se considerar que a Antártica é constituída por três partes: o interior da zona continental, a zona costeira e o mar de gelo.

No interior da zona continental os ventos são relativamente bem conhecidos (ventos de inversão). Os modelos de simulação aí aplicados reproduzem bem a realidade, desde que as encostas não sejam muito inclinadas. Lettau (1971) propôs que aí fossem testadas teorias meteorológicas aproveitando a superfície relativamente plana e uniforme. Segundo ele, esta seria uma região boa para testar modelos matemáticos-termodinâmicos e as conseqüências dinâmicas da incidência de energia solar. Nesta zona o albedo, por volta de 80%, é bastante uniforme durante o ano porque não ocorre derretimento de neve (Weller, 1980).

Nas zonas costeiras, que são varridas por fortes ventos catabáticos, o platô do interior do continente cai abruptamente. Estes ventos tornam os fluxos de calor latente e sensível, devido à forte turbulência nesta área acidentada, bem maiores que no interior. Ainda segundo Weller (1980) até mesmo polínias podem ocorrer próximo à costa devido aos ventos catabáticos, e o albedo se torna bem mais baixo que o do interior, podendo atingir até 40%.

O mar de gelo é o lugar onde a maior parte do gelo se funde no verão e reaparece no inverno. Ele apresenta grande variabilidade em extensão e natureza. É a parte que mais afeta as variações interanuais no equilíbrio de energia de toda a região coberta com gelo. De fato, as variações interanuais do equilíbrio de energia no interior do continente parecem ser pequenas (Weller, 1980).

O mar de gelo afeta o clima (The Polar Group, 1980): - modificando o ciclo sazonal de temperatura, retardando extremos de temperatura, despreendendo calor latente no outono e absorvendo-o na primavera para fundir o gelo; - impedindo o contato direto atmosfera-oceano, mudando o equilíbrio de energia e estabilizando a atmosfera mais baixa; - produzindo, com seu movimento, um transporte em direção ao equador de água fresca e energia termal negativa, aumentando a salinidade em áreas de produção de gelo, e as condições especiais de clima ao longo das margens de gelo. Estes efeitos estão ligados ao grande albedo que o gelo apresenta para ondas curtas e o albedo zero (alta emissividade) que o gelo apresenta para o infravermelho.

### MAR DE GELO - MODELAGEM NUMÉRICA E ESTUDOS DE CORRELAÇÃO

Herman e Johnson em 1978 investigaram os efeitos de anomalias de gelo do Ártico em variações atmosféricas globais usando um modelo geral de circulação (GCM) e verificaram mudanças nas intensidades das altas subtropicais do Hemisfério Norte (HN) (Ackley, 1979). Fletcher em 1969 mostrou que, com a expansão do gelo Antártico, aumenta a circulação zonal no HN (Ackley, 1979), o que foi também evidenciado por Peng (1987). Este observou ainda, através de estudos de correlação, que quando a área do mar de gelo da Antártica aumenta, a intensidade da alta subtropical do Pacífico Norte/Oeste e sua vizinhança oeste se move para leste e vice-versa.

Os modelos numéricos são ferramentas imprescindíveis para que se compreenda como as mudanças no mar de gelo afetam as mudanças na circulação. Mas, eles têm apresentado resultados contraditórios (Simmond, 1987). Nestes modelos as condições da superfície afetam a atmosfera e o efeito inverso nem sempre é considerado (Simmond, 1987). Este é um problema ligado ao da falta de conhecimento das próprias condições de superfície. De fato, Weller (1980) examinou os dados observacionais e o equilíbrio de energia na Antártica, os quais poderiam

ser usados como entradas para modelos numéricos de variabilidade climática de grande escala. Ele verificou que a escassez de dados, alguns deles observados inadequadamente, faz com que haja necessidade de extrapolações, especialmente nas áreas oceânicas cobertas de gelo. Juntando a isto o mal entendimento de alguns processos da física do gelo, Weller concluiu que a incerteza resultante não permite que se diga algo muito significativo sobre as variações interanuais no equilíbrio de energia superficial total da Antártica. Como se vê, os resultados contraditórios apresentados pelos modelos numéricos são explicáveis.

Os estudos mais recentes têm indicado que erros no cálculo da extensão do mar de gelo podem distorcer previsões da circulação atmosférica. Estes erros devem ocorrer com frequência uma vez que água e gelo fino são indistinguíveis em dados de microondas. Além disso, a simulação do mar de gelo é extremamente sensível ao albedo (Mitchell & Hills, 1986).

Segundo Peng (1987), correlações de gelo e índices atmosféricos mostram que o gelo antártico influencia o clima dos dois hemisférios. Os dados das Tabelas 1 e 2, de Peng (1987), mostram a grande variabilidade sazonal e interanual do mar de gelo da Antártica. A Tabela 1 apresenta as médias men-

sais da extensão deste mar para um período de 10 anos. Nela, chama atenção a grande diferença na extensão das áreas cobertas por gelo para setembro, mês de extensão máxima, e fevereiro, mês de extensão mínima. Em setembro esta área é 5 vezes maior que a de fevereiro, e 13% da área total do HS está coberta por gelo/neve; desta fração, 7,5% é mar de gelo que cobre uma área muito maior que a máxima cobertura de gelo do Ártico, que é de 5% do HN. Note-se que a média anual de área coberta por gelo/neve no HS é de 25.700.000 quilômetros quadrados (10% da área total do HS) (Peng, 1987). A Tabela 2 mostra, para uma média de 10 anos, as latitudes alcançadas pelas bordas do mar de gelo para diversas faixas de longitudes. Estão assinaladas nesta tabela as latitudes mais próximas do pólo (fevereiro) e as mais próximas do equador (setembro). Note-se que o gelo chega mais próximo ao equador na Antártica que no Ártico, o que faz, possivelmente, com que o gelo da Antártica influencie mais a atmosfera da terra do que o do Ártico. Nesta tabela observa-se que as maiores variações latitudinais ocorrem entre  $30^{\circ}\text{E}$  e  $30^{\circ}\text{W}$  e entre  $150^{\circ}\text{W}$  e  $180^{\circ}\text{W}$ . Estas longitudes correspondem mais ao norte ao Atlântico, no sul da África e ao sudeste da Austrália, respectivamente. Nestas regiões ocorrem grandes variações também do vento

zonal. De fato, Stretten em 1977 mostrou que o aumento de gelo implica no aumento da circulação zonal no HS e que as maiores variabilidades de vento zonal ocorriam no sudeste da Austrália e norte do Weddell (Ackley, 1979). Ou seja, as regiões de maior variabilidade de vento zonal correspondem às regiões de maior variabilidade de gelo.

#### MAR DE GELO E PREVISÃO DE LONGO PRAZO

Dada a localização do Brasil em relação à Antártica, possivelmente importantes agentes controladores do tempo e clima neste País são influenciados pela extensão do mar de gelo antártico. Um destes controles é o anticiclone do Atlântico Sul. Considerando os experimentos numéricos e os estudos acima mencionados, pode-se esperar que a posição do seu centro e sua intensidade sejam influenciadas pelo setor de maior variabilidade de gelo na Antártica, o mar de Weddell, que se encontra ao sul do anticiclone.

O anticiclone do Atlântico Sul localiza-se mais perto da costa da América e mais próximo do equador que o do Atlântico Norte, fazendo com que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se situe ao norte do equador durante a maior parte do ano. Este

TABELA 1

MÉDIAS MENSAIS DA EXTENSÃO DE GELO NO MAR  
ANTÁRTICO  $\times (10^3 \text{km}^2)$  para 1973-1982

---

MÊS	EXTENSÃO DO GELO
01	4874
02	3554
03	5077
04	7587
05	11233
06	14708
07	17223
08	18702
09	18950
10	18398
11	15179
12	9548

---

Peng-Domros, 1987.

TABELA 2

MÉDIAS MENSAIS DAS LATITUDES DAS BORDAS DO  
MAR DE GELO ANTÁRTICO EM 12 SETORES  
LONGITUDINAIS PARA 1973-1982

Mês	LATITUDE											
	0°-30°	30°-60°	60°-90°	90°-120°	120°-150°	150°-180°	180°-150°	150°-120°	120°-90°	90°-60°	60°-30°	30°-0°
1	68.0	61.9	64.7	68.5	68.6	68.7	65.1	64.7	63.7	65.1	63.8	67.5
2	69.9	62.6	65.2	69.2	69.7	71.3	65.1	64.7	64.0	65.1	65.3	68.2
3	68.1	62.4	65.5	68.4	69.6	69.0	64.6	64.2	63.4	64.6	64.9	67.8
4	67.3	60.8	64.1	68.1	66.7	66.8	63.2	63.7	62.3	62.6	64.2	66.5
5	59.9	59.3	63.2	65.9	65.0	64.6	62.4	63.0	61.6	60.2	62.9	64.1
6	57.9	58.6	62.5	64.9	62.6	63.6	61.4	62.2	60.7	59.9	60.6	59.6
7	56.0	57.0	60.2	64.9	61.8	61.1	60.9	61.7	59.6	57.8	59.4	57.4
8	55.3	56.6	59.4	64.5	60.8	61.1	61.1	61.7	58.7	56.9	57.9	55.6
9	55.1	56.2	59.9	64.6	60.3	62.6	62.3	61.5	59.0	57.4	58.0	54.5
10	55.8	57.8	62.2	64.6	62.3	62.9	61.8	61.3	58.8	57.1	57.7	54.9
11	56.8	58.2	63.0	64.2	62.3	63.8	62.6	62.7	60.4	59.7	58.9	56.2
12	60.4	59.3	63.7	66.4	65.3	66.2	63.7	64.1	62.8	63.1	63.2	61.6

Peng-Domros, 1987.

fato e a falta de desenvolvimento de furacões no Atlântico Tropical Sul, dão uma idéia da estabilidade atmosférica por ele provocada. No verão, quando o centro do anticiclone enfraquecido se desloca ligeiramente para leste e para o sul, diminui a ressurgência na costa africana e a entrada de águas frias para as latitudes mais baixas. No inverno, com ele mais intenso, deve ocorrer o contrário. Ressalta-se que o mar de Weddell, fonte de

água fria para a região, contém metade do gelo altamente concentrado presente na Antártica, o qual é advectado para o Atlântico Sul na razão de 3-5 milhões de quilômetros quadrados de gelo anualmente (Ackley, 1979).

Uma pergunta a ser respondida é: de que forma a extensão de gelo do mar de Weddell viria a afetar o deslocamento do centro e a intensidade da alta subtropical do Atlântico Sul? No momento que se conhece como este processo se dá, pode-se saber, por exemplo, se a atmosfera sobre o Atlântico vai se tornar mais ou menos instável dentro de alguns meses. De fato, água fria provocaria uma maior estabilidade no ar imediatamente acima dela, porque diminuiria a profundidade da camada úmida. Isto, conseqüentemente, faria com que o transporte de umidade do oceano para o continente viesse a ser menor, o que aumentaria a estabilidade no continente. Caso isto ocorresse, haveria menor atividade convectiva nas frentes. Assim, os anos mais chuvosos para o Brasil possivelmente estariam associados com anomalias quentes no oceano Atlântico, e anos mais secos com anomalias frias. De forma concordante, observou-se que o nordeste é mais seco quando ocorrem águas anormalmente frias em grande parte do Atlântico Sul e Equatorial (Hastenrath & Heller, 1977). É de se esperar que quando no setor

de Weddell ocorra uma anomalia de gelo, a circulação zonal seja modificada, a troca de massas de ar entre as latitudes mais altas e mais baixas varie, ou seja, a alta subtropical do Atlântico seja afetada, o que deve propiciar uma menor ou maior entrada de água fria em latitudes tropicais. O resultado disso poderá se traduzir em anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). As anomalias de TSM devem, pelo menos em parte, ser provocadas por anomalias persistentes de vento que, por sua vez, podem ser devidas a anomalias persistentes de cobertura de gelo. Uma vez que as anomalias na cobertura de gelo tendem a se manter por meses, pode-se esperar que anomalias associadas com o fluxo de calor na superfície influenciem a circulação atmosférica (Mitchel, 1986).

Um outro controle importante para o tempo e para o clima do Brasil é o das frentes frias. Tem-se então a pergunta: será que a extensão do gelo na Antártica afetaria o número de frentes que penetram no Brasil? Ainda não é possível responder a esta pergunta. Foi verificado por esta autora que, para um ano de grande extensão de gelo e outro de pequena extensão, houve um número maior de frentes que penetraram o Brasil no inverno de maior extensão de gelo, do que no de menor. Observou-se também que houve mais ciclogênese no Pacífico no período

correspondente a um maior número de frentes. Mas, nada pôde ser concluído ainda em relação ao maior número de frentes que correspondem ao período de maior extensão de gelo.

Para entender como o número de frentes e a posição da alta do Atlântico Sul, atuando na estabilidade da atmosfera, interagiriam, e ser capaz de fazer alguma previsão qualitativa desta atuação conjunta, dever-se-ia conhecer melhor o comportamento do mar de gelo na Antártica e como ele influencia esses controles. As altas subtropicais teriam de ser monitoradas para que se conhecesse como suas posições e intensidades se relacionariam com as extensões do gelo Antártico. Possivelmente haveria uma relação entre a extensão deste gelo e o Índice de Oscilação Sul (IOS) (veja indícios desta possibilidade na Fig. 1), que deveria ser investigada, desde que já existe algum entendimento de como o IOS afeta o regime de precipitação em certas áreas do Brasil. Os posicionamentos e as atividades das zonas de convergência do Pacífico e Atlântico e as anomalias de temperatura nestes oceanos deveriam também ser monitorados, já que atuam mais diretamente no tempo e no clima do Brasil. Somente a partir de um estudo conjunto, que relacione extensão de gelo, posicionamentos e atividades das zonas de convergências, anomalias de

temperatura e posições e intensidades dos centros das altas subtropicais dos oceanos Pacífico e Atlântico, poder-se-ia progredir no estudo que possibilitará previsão a longo prazo. O mar de gelo da Antártica, com sua grande variabilidade e suas respostas rápidas, possivelmente seria o primeiro destes sistemas a indicar as mudanças climáticas.

#### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um melhor entendimento de como o gelo e a neve da Antártica afetam os climas do mundo só virá com muito mais conhecimento das condições de superfície do mar de gelo. Sem isto, o equilíbrio de energia na zona do mar de gelo continuará a ser a grande incógnita do problema. Para compreender os efeitos do mar de gelo, torna-se necessária uma tecnologia mais sofisticada para monitorá-lo com o uso de satélites. Sem o conhecimento da distribuição de espessuras deste mar, por exemplo, o equilíbrio de energia não pode ser determinado (Weller, 1980). Vários experimentos de campo, tais como observações das características do equilíbrio de energia do mar de gelo e de alguns processos da física do gelo que não são bem entendidos, serão necessários até que se obtenha o equilíbrio de energia do mar de gelo. Esses experimentos exigirão cooperação internacio-

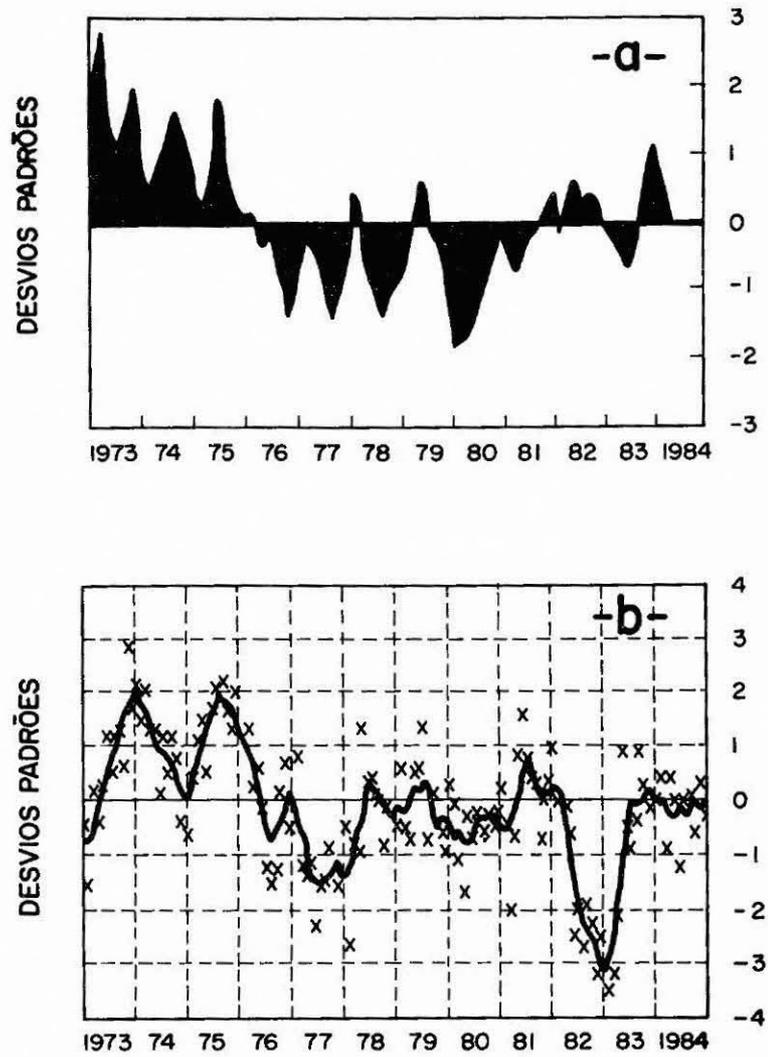


Fig. 1 Série de tempo das anomalias do mar de gelo Antártico, expressas como desvios padronizados da normal (a) e média móvel da diferença entre as anomalias padronizadas de pressão ao nível do mar em Tahiti e Darwin (IOS). Os valores são padronizados pelo desvio padrão da média mensal apropriada (b). (CAD/WMC - Washington).

nal, pois certamente os custos serão bastante elevados. A modelagem numérica será a primeira a se beneficiar de um melhor conhecimento das condições de superfície e responderá à questão de como o gelo na Antártica afeta, se realmente afeta, o clima de cada localidade.

Atualmente no Brasil, só existe previsão de longo prazo, previsão de anomalias climáticas, para o Nordeste e sob determinadas condições. Para torná-la viável é fundamental que haja uma participação brasileira no esforço de obtenção de modelos numéricos que tragam informações mais úteis a partir do equilíbrio de energia mais realísticos. É importante realizar estudos observacionais do comportamento dos mares de gelo de Bellingshausen e Weddell, bem como suas relações com os controles do tempo e clima do Brasil. O mar de Weddell é visto como uma área chave para o entendimento do clima e das variações do HS. Para muitos países é interessante a obtenção de mais dados sobre esta região. A instalação de estações automáticas, com custos compartilhados entre os interessados, poderia ser uma opção adequada para muitos países, inclusive o Brasil.

### AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido com auxílio da CIRM/PROANTAR, subprojeto no. 9618.

### REFERÊNCIAS

- Ackley S.F., A review of sea-ice weather relationships in the Southern Hemisphere, Sea Level, Ice and Climatic Change, *Proceedings of the Canberra Symposium*, December 1979. IAHS Publ.no. 131, 1979.
- Hastenrath S., L. Heller, Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil, *Quart. Met. Soc.*, 103, 435, 77-92, 1977.
- Lettau, H., Antarctic atmosphere as a test tube for meteorological theories, *Research in the Antarctic*, AAAS, Washington, DC., 443-475, 1971.
- Ley W., Os pólos, Life-José Olympio, 9-16, 1982.
- Mitchell J.F.B., and T.S. Hills, Sea-ice and the Antarctic winter circulation: A numerical experiment, *Quart. J.R. Met. Soc.*, 112, 953-969, 1986.
- Peng G., and M. Domros, Connections of the west Pacific Subtropical High and some Hydroclimatic Regimes in China with Antarctic Ice-Snow Indices, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 37, 61-71, 1987.
- Simmonds I., The effect of sea ice on a general circulation model of the Southern Hemisphere, Sea Level, Ice, and Climatic Change, *Proceedings of the Canberra Symposium*, December 1979, IAHS publ. no. 131, 1979.
- The Polar Group (edited by Baker D.J.), Polar Atmosphere-Ice-Ocean Processes: A review of Polar Problems in Climate Research, *Reviews of Geophysics and Space Physics* vol. 18, no. 2, 525-543, 1980.
- Weller G., Spatial and Temporal Variations in the South Polar Surface Energy Balance, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 2006-2014, 1980.