

1. Publicação nº <i>INPE-2461-PRE/153</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DME/DPM</i>	Programa <i>APLIMI</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA NORDESTE DO BRASIL</i>			
7. C.D.U.: <i>551.587(812/814)</i>			
8. Título <i>VARIABILIDADE DO FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL</i>		10. Páginas: <i>27</i>	
		11. Última página: <i>20</i>	
		12. Revisada por <i>Yoshihiro Yamazaki</i>	
9. Autoria <i>Valdo da S. Marques Vadlamudi Brahmananda Rao Luiz Carlos B. Molion</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
Assinatura responsável <i>V. B. Rao</i>			
14. Resumo/Notas <p><i>O presente trabalho é um estudo diagnóstico do fluxo de vapor d'água na atmosfera sobre a região Nordeste do Brasil. É apresentado um estudo da variação interanual do fluxo de vapor d'água sobre a região, com dados relativos a um ano seco (1976) e um ano chuvoso (1974) representados pelas suas estações chuvosas (março-abril-maio). A equação de balanço de vapor d'água é resolvida para um cilindro que engloba a região estendendo-se até o nível de 300 mb, usando-se dados de radiossondagem. Os resultados mostram que a variação interanual do vapor d'água é devida principalmente ao mecanismo dinâmico representado pela convergência e divergência que ocorrem na baixa e média troposfera. As principais trocas de vapor d'água entre a região e o exterior ocorrem principalmente nas fronteiras Norte/Noroeste e Sul/Sudoeste, mostrando a importância das interações inter-hemisféricas e com as latitudes mais altas.</i></p>			
15. Observações <i>A ser submetido na Ciência e Cultura.</i>			

## VARIABILIDADE DO FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Valdo da S. Marques (\*), V. Brahmananda Rao e L.C.B. Molion

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

12.200 - São José dos Campos, SP - Brasil

Abstract - *Variability of water vapor flux in the Northeast Brazil region:*

Interannual variations in the water vapor flux for dry (1976) and wet (1974) years are presented for the rainy season, March, April and May. Water vapor fluxes are estimated for a cylinder whose base covers most of the northeast Brazil extending in the vertical up to 300 mb. The results show that the interannual variations are caused essentially by the dynamics of motion systems which are represented by the convergence and divergence of water vapor flux in the lower troposphere. The principal exchanges of water vapor occur in the North/Northeast and South/Southeast borders showing the importance of interhemispherical exchanges and also the interactions with mid-latitudes.

Resumo. O presente trabalho é um estudo diagnóstico do fluxo de vapor d'água na atmosfera sobre a região Nordeste do Brasil. É apresentado um estudo da variação interanual do fluxo de vapor d'água sobre a região, com dados relativos a um ano seco (1976) e um ano chuvoso (1974) representados pelas suas estações chuvosas (março-abril-maio). A equação de balanço de vapor d'água é resolvida para um cilindro que engloba a região estendendo-se até o nível de 300 mb, usando-se dados de radiossondagem. Os resultados mostram que a variação interanual do vapor d'água é devida principalmente ao mecanismo dinâmico representado pela convergência e divergência que ocorrem na baixa e média troposfera. As principais trocas de vapor d'água em

---

(\*) Endereço Permanente: Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

tre a região e o exterior ocorrem principalmente nas fronteiras Norte/Noroeste e Sul/Sudoeste, mostrando a importância das interações inter-hemisféricas e com as latitudes mais altas.

## 1. INTRODUÇÃO

A Região Nordeste do Brasil, conhecida como região semi-árida, compreendendo uma área de aproximadamente  $10^6$  km<sup>2</sup>, apresenta uma alta variabilidade na distribuição espacial e temporal da precipitação. A costa este recebe cerca de 2000 mm anuais de precipitação, enquanto que a parte central recebe menos de 400 mm e a parte sul cerca de 800 mm (Strang, (9); Hastenrath e Heller, (3); Kousky, (4)). Além disso a estação chuvosa é concentrada em poucos dias do ano, em grande parte da região e, portanto, com longos períodos de seca. Isto foi comprovado, por exemplo, pelo trabalho de Ramos (6), o qual mostrou, com média de 30 anos, que cerca de 40% da precipitação de Petrolina (localizada na região central do Nordeste), ocorre em apenas dois meses (fevereiro e março). Essas variabilidades apresentam consequências sócio-econômicas que são muito conhecidas por afetar diretamente vários milhões de pessoas.

As causas da variabilidade climática e a previsibilidade do clima da região nordeste ainda não são bem conhecidas, existindo, no entanto, vários trabalhos sobre o tema envolvendo diferentes aspectos. Aldaz (1), por exemplo, levantou uma hipótese segundo a qual a explicação para a ocorrência das secas deve ser buscada nos processos dinâmicos da atmosfera envolvendo movimentos de grande escala.

Com o objetivo de encontrar algum mecanismo que envolva processos físicos da troposfera, para tentar explicar o fenômeno da seca, um dos

autores (Marques, (5)), estudou vários aspectos da circulação geral, da energética (energia estática e cinética) e fluxo de vapor d'água relativamente ao ar superior sobre a região, evidenciando as variações interanuais e sazonais. No presente trabalho destaca-se a variação interanual do fluxo de vapor d'água sobre a região, com dados relativos a um ano seco e outro chuvoso, os quais foram escolhidos mediante análise de dados de precipitação.

## 2. DADOS E ÁREA DE ESTUDO

Os dados de precipitação com bases mensais, foram colecionados dos arquivos da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) que possui um excelente arquivo em fitas magnéticas. Usou-se dados referentes a 58 estações pluviométricas espalhadas de modo aproximadamente uniforme sobre a área, relativos ao período 1971-1978.

Os dados de vento e ponto de orvalho, médias mensais, foram retirados da publicação "Monthly Climatic Data for World" (U.S. Department of Commerce, 1971 a 1978), sendo completado com dados diários originais do arquivo do Instituto de Pesquisas Espaciais, os quais foram depurados através de testes de consistência. Por exemplo, a altura geopotencial foi verificada com a aproximação hidrostática.

As estações de radiossondagem usadas, bem como a área de estudo podem ser vistas na Figura 1, onde se podem notar que há estações localizadas fora daquela área, as quais foram utilizadas para o traçado dos campos médios e interpolações na horizontal. Nota-se também o círculo que representa a base do cilindro usado para a resolução das equações do fluxo de vapor. A circunferência tem comprimento aproximado de 3700 km (raio = 600 km) e a altura do cilindro se estende até o nível correspondente a 300 mb.

### 3. ESCOLHA DE UM ANO SECO E DE UM ANO CHUVOSO

A precipitação pluviométrica é o principal elemento climático que evidencia as características dos climas das regiões tropicais. Por este motivo a escolha de um ano seco e de um ano chuvoso, foi feita através de uma análise dos dados de precipitação referentes a 58 estações ou postos pluviométricos distribuídos na região, cobrindo o período 1971/1978, com bases mensais:

Inicialmente foi determinado o desvio médio normalizado com totais anuais (desvio médio dividido pelo desvio padrão) e os resultados podem ser vistos na Figura 2. Esta Figura mostra claramente que o ano de 1974 foi o mais chuvoso do período com desvio de +1,25 e o ano de 1976 foi o mais seco com desvio de -0,75.

FIG. 2

Para evidenciar melhor a distribuição espacial das características pluviométricas dos anos citados, plotaram-se e se analisaram os desvios da precipitação trimestral chuvosa, normalizados em relação à média climatológica, ou seja:

$$D = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100 (\%)$$

onde  $P_i$  é a precipitação do trimestre março-abril-maio da  $i$ -ésima estação e  $\bar{P}$  é a precipitação normal do mesmo trimestre para o período 1958/1972, também para a  $i$ -ésima estação. A Figura 3 mostra desvios positivos em todas as partes da região nordeste, com núcleos acentuados na região do polígono

das secas, indicando que o ano de 1974 apresentou precipitação bem acima da normal. Ao contrário, na Figura 4 nota-se que a maior área do Nordeste está sob o domínio de desvios negativos, com um núcleo fortemente negativo na região central do polígono das secas. Esta análise indica que para efeito de estudo da variação interanual, é razoável tomar o ano de 1974 como chuvoso e o ano de 1976 como ano seco, dentro do período de 1971/1978.

---

FIG. 3 e 4

---

#### 4. FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA

A variação da umidade específica,  $q$ , com o tempo, em coordenadas  $(x, y, p, t)$  pode ser escrita:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (q \underline{v}) + \frac{\partial}{\partial p} (q\omega) = \sigma(q) \quad (1)$$

onde  $\omega = dp/dt$  é a velocidade vertical em coordenada  $p$ ,  $\underline{v}$  é o vetor velocidade do vento  $\sigma(q)$  é a taxa de produção ou destruição de vapor d'água por unidade de massa. Integrando na vertical, e impondo as condições de contorno

$$P \geq 300 \text{ mb}, \quad q_{300} = 0$$

$$p = P_0, \quad \omega_0 = \frac{dp_0}{dt} = 0$$

e que a variação local da umidade específica  $\partial q/\partial t$  para uma média de um mês ou mais, como é o caso presente, é desprezível diante dos demais termos, tem-se:

$$\int_{P_T}^{P_0} \nabla \cdot (q \underline{v}) \frac{dp}{g} = \int_{P_T}^{P_0} \sigma(q) \frac{dp}{g} \quad (2)$$

onde  $P_T = 300 \text{ mb.}$

Por outro lado, as principais fontes e sumidouros de vapor d'água na atmosfera são devidos principalmente, à evaporação,  $E$ , a partir da superfície da Terra, e à precipitação  $P$ . Deste modo, a taxa de geração do vapor d'água dentro da coluna unitária da atmosfera pode ser tomada como sendo o excesso da evaporação sobre a precipitação média no tempo  $\langle E - P \rangle$ , ou seja:

$$\int_{P_T}^{P_0} \nabla \cdot (q \underline{v}) \frac{dp}{g} = \langle E - P \rangle \quad (3)$$

Fazendo-se a média na área  $A$ , tem-se

$$\int_{P_T}^{P_0} [\nabla \cdot (q \underline{v})]_a \frac{dp}{g} = [\langle E - P \rangle]_a \quad (4)$$

onde a média em relação a área é dada por

$$\begin{aligned} [\nabla \cdot (q \underline{v})]_a &= \frac{1}{A} \iint \nabla \cdot (q \underline{v}) dA \\ [\langle E - P \rangle]_a &= \frac{1}{A} \iint \langle E - P \rangle dA \end{aligned} \quad (5)$$

e o termo da esquerda de (4) fica

$$\int_{P_T}^{P_o} \left[ \frac{1}{A} \right] \left[ \nabla \cdot (q \underline{v}) \frac{dp \, dA}{g} \right] \quad (6)$$

Aplicando o teorema de Gauss em (6) vem:

$$[<E - P>]_a = \frac{1}{gA} \int_{P_T}^{P_o} \left\{ \oint qV_n \, dS \right\} dp \quad (7)$$

onde  $dS$  é um elemento de linha da circunferência que envolve uma seção reta do cilindro e  $V_n$  é a componente normal da velocidade do vento em relação à superfície lateral do cilindro. Deste modo a divergência do fluxo de vapor d'água pode ser dado pela integral de linha calculada para cada nível e de pois integrada na vertical. O termo  $qV_n$ , em (7) deve ser visto como sendo a média do produto  $qV_n$  ao longo da superfície lateral do cilindro. Por isso, foi usada a média do produto  $qV_n$ , parcelada em dois termos:

$$\overline{qV_n} = \overline{q} \overline{V_n} + \overline{q'V_n'} \quad (8)$$

onde a barra representa a média ao longo da superfície lateral do cilindro e a "linha" representa o desvio da média. Assim a equação (7) pode ser rees crita, como:

$$[<E - P>]_a = \frac{1}{gA} \int_{P_T}^{P_o} \left\{ \oint (\overline{q} \overline{V_n} + \overline{q'V_n'}) \, dS \right\} dp \quad (9)$$

A resolução desta equação foi possível com o uso de uma malha disposta sobre a superfície lateral do cilindro, contendo 9 pontos na horizontal, com distância entre pontos de aproximadamente 400 km e 7 na vertical, com distâncias entre pontos correspondentes a 100 mb.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Usando a equação (9), determinou-se o fluxo horizontal de vapor d'água, para o cilindro de nordeste para as estações chuvosas (março-abril-maio) de um ano chuvoso (1974) e de um ano seco (1976), determinados conforme indicado no Ítem 3. Os resultados podem ser vistos na Tabela I e na Figura 5. Nota-se uma convergência de vapor na baixa troposfera durante o ano úmido e uma divergência na mesma camada durante o ano seco. A diminuição do fluxo com a altura é devida ao forte decréscimo da umidade específica com a altura. A Figura 6 mostra o perfil vertical de umidade específica para os mesmos períodos. Comparando-se as duas figuras, vê-se que a simples presença do vapor d'água na atmosfera não é tão importante para caracterizar períodos secos e chuvosos, quanto o fluxo de vapor que, por sua vez, é determinado pelas condições dinâmicas, ou seja, mais precisamente, pela estrutura da componente normal da velocidade do vento em relação ao cilindro do Nordeste.

---

TABELA I e FIG. 5 e 6

---

A Tabela I mostra separadamente os fluxos devidos ao movimento médio e aos desvios da média. Nota-se que o movimento médio no ano de 1974 contribuiu somente para a importação de vapor em todos os níveis, num total  $29,20 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Já no ano de 1976 houve exportação nos baixos níveis (sup -600 mb) e importação em altos níveis porém, com um saldo de exportação de  $22,12 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Os desvios contribuíram principalmente para a exportação em ambos os anos e em todos os níveis, com exceção do ní

vel mais baixo do ano de 1974 o qual revelou uma importação de  $3,57 \times 10^{-6}$  kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. A integração na vertical para o total, mostra claramente que houve um saldo de importação para o ano chuvoso (1974) de  $-21,20 \times 10^{-6}$  kg m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> e um saldo de exportação para o ano seco (1976) de  $+39,73 \times 10^{-6}$  kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>.

Os esquemas da Figura 7 (a) e (b), mostram a distribuição horizontal do fluxo de vapor nas camadas 900/800 mb e 600/500 mb que são representativas da baixa troposfera. As diferenças mais relevantes aparecem nos lados norte/noroeste e sul/sudoeste da área. Isto pode ser observado quando se comparam os fluxos nos pontos 4, 5, 6 e 7 em (a) e (b) 1 e 9 também de (a) e (b).

---

FIG. 7 (a) e (b)

---

Os resultados acima apresentados indicam que as condições dinâmicas da troposfera exercem um papel fundamental no diagnóstico das situações de seca do nordeste brasileiro. Por outro lado, os resultados apresentados na Figura 7 (a) e (b) dão uma indicação de que as chuvas no nordeste, nestes períodos, estão relacionadas às interações com as latitudes mais altas, provavelmente associadas com as penetrações de massas de ar provenientes do sul do continente em acordo com as hipóteses de Sampaio Ferraz (7) e com os resultados de Kousky (4). Além disso, as diferenças marcantes do fluxo de vapor d'água no setor norte/nordeste indicam a possibilidade de interações inter-hemisféricas em acordo com as hipóteses de Serra (8); Hastenrath e Heller (3) e os resultados de Buchmann (2).

#### CONCLUSÕES

Embora haja uma quantidade ligeiramente maior de unidade específica na troposfera sobre a região nordeste no ano chuvoso em relação ao ano seco, o mecanismo dinâmico representado pela convergência de vapor d'água exerce, pelo menos nos períodos estudados, um papel fundamental para explicar a varia

ção interanual da precipitação na região. Por exemplo, a Tabela I mostra que no ano chuvoso (1974) houve um saldo de importação de vapor  $21,20 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$  enquanto que no ano seco (1976) houve uma exportação de  $39,73 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Outra conclusão interessante é que as diferenças relevantes entre o ano seco e o ano chuvoso, em termos de fluxo de vapor d'água, aparecem nas fronteiras Norte/Noroeste e Sul/Sudoeste, sendo que no Leste e no Oeste as diferenças são quase imperceptíveis. Isto indica que as interações inter-hemisférica e com as latitudes mais altas devem contribuir para a ocorrência de períodos secos e chuvosos na região.

#### REFERÊNCIAS

1. ALDAZ, L. 1971. *Caracterização parcial do regime de chuvas do Brasil*. Convênio DEMET/SUDENE/OMM. Rio de Janeiro, DEMET, 109 p. (Publicação Técnica, 4).
2. BUCHMANN, J. 1981. *Um estudo sobre a influência de fenômenos meteorológicos extratropicais na variação do clima do Nordeste Brasileiro*. Tese de Doutorado em Meteorologia. Rio de Janeiro, COPPE UFRJ, 117 p.
3. HASTENRATH, S.L.; HELLER. 1977. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103(435):77-92.
4. KOUSKY, V.E. 1979. Frontal influence on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 107(9):1140-1153.
5. MARQUES, V.S. 1981. *Estudos da energética e do fluxo de vapor d'água na atmosfera sobre o Nordeste Brasileiro*. Tese de Doutorado em Meteorologia, São José dos Campos, INPE, 182 p. (INPE 2288 TDL/068).
6. RAMOS, R.P.L. 1975. Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. *Journal of Geophysical Research*, 80(12):1665-1678.

7. SAMPAIO FERRAZ, J. 1931. *Causas prováveis das secas do Nordeste Brasileiro*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Diretoria de Meteorologia, 30 p.
8. SERRA, A.B. 1946. *As secas do Nordeste*. Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura, Serviço de Meteorologia, 29 p.
9. STRANG, D.M.G.D. 1972. *Análise Climatológica das normais pluviométricas do Nordeste do Brasil*. São José dos Campos, CTA/IAE, 70 p. (Relatório IAE, M-02/72).
10. U.S. Department of Commerce. Monthly climatic data for the world. 1971-78.

#### AGRADECIMENTOS

Aos Drs. Nelson de Jesus Parada e A.D. Moura pelo apoio e ao Yoshihiro Yamazaki para sugestões. Este trabalho faz parte da tese do primeiro autor e foi parcialmente financiado por Convênio N<sup>o</sup> B/54/81/042/00/00 FINEP/CNPq-INPE.

#### LISTA DE FIGURAS

1. Localização das estações aerológicas, delimitação da área em estudo e circunferência que forma a base do cilindro do Nordeste.
2. Desvio médio normalizado da precipitação anual, referente a 58 estações localizadas no Nordeste do Brasil, para o período 1971-1978.
3. Desvio da precipitação trimestral chuvosa, em relação à normal, para o ano de 1974.
4. Desvio da precipitação trimestral chuvosa, em relação à normal, para o ano de 1976.
5. Perfil vertical do fluxo de vapor d'água, de MAM para 1974 e 1976.
6. Perfil vertical de unidade específica média de MAM para 1974 e 1976.
7. Fluxo de vapor nas camadas 900-800 mb e 600-500 mb para MAM: (a) 1974; (b) 1976.

#### LISTA DA TABELA

1. Fluxo horizontal de vapor d'água calculado para o cilindro do Nordeste; média de março-abril-maio, para 1974 e 1976.

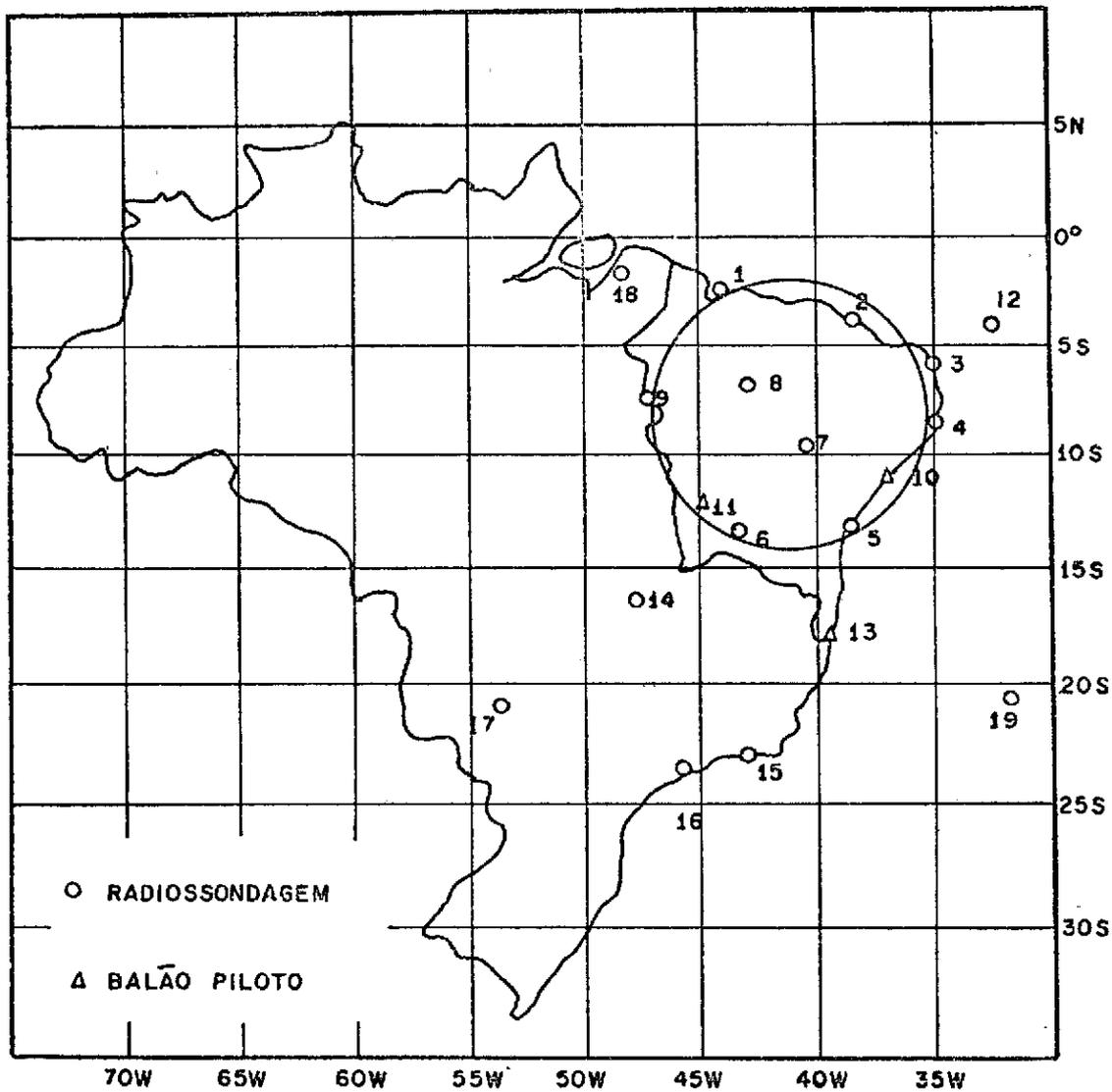


Fig. 1

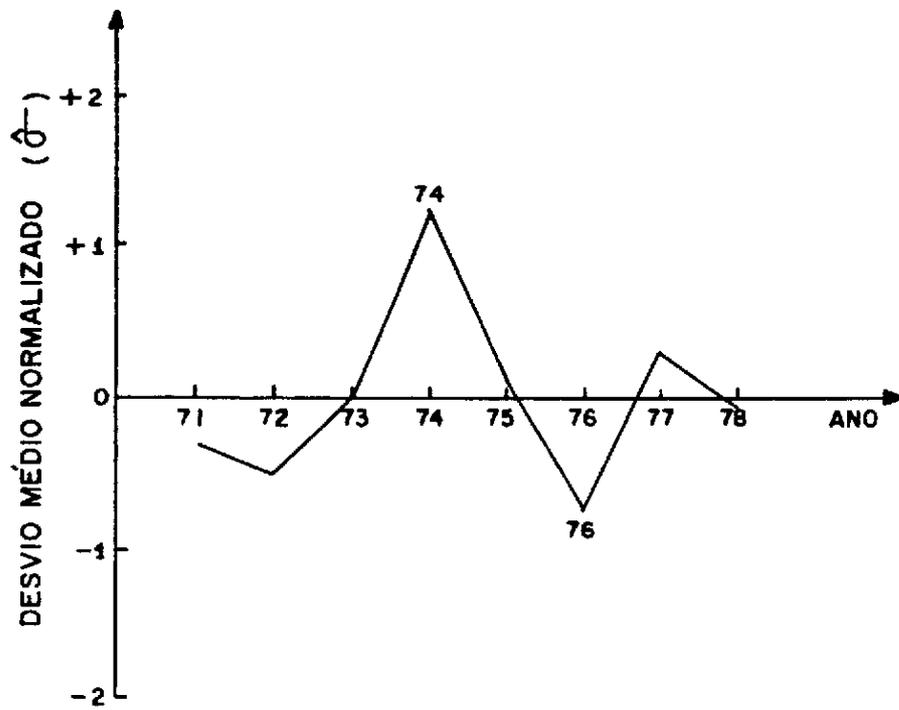


Fig. 2

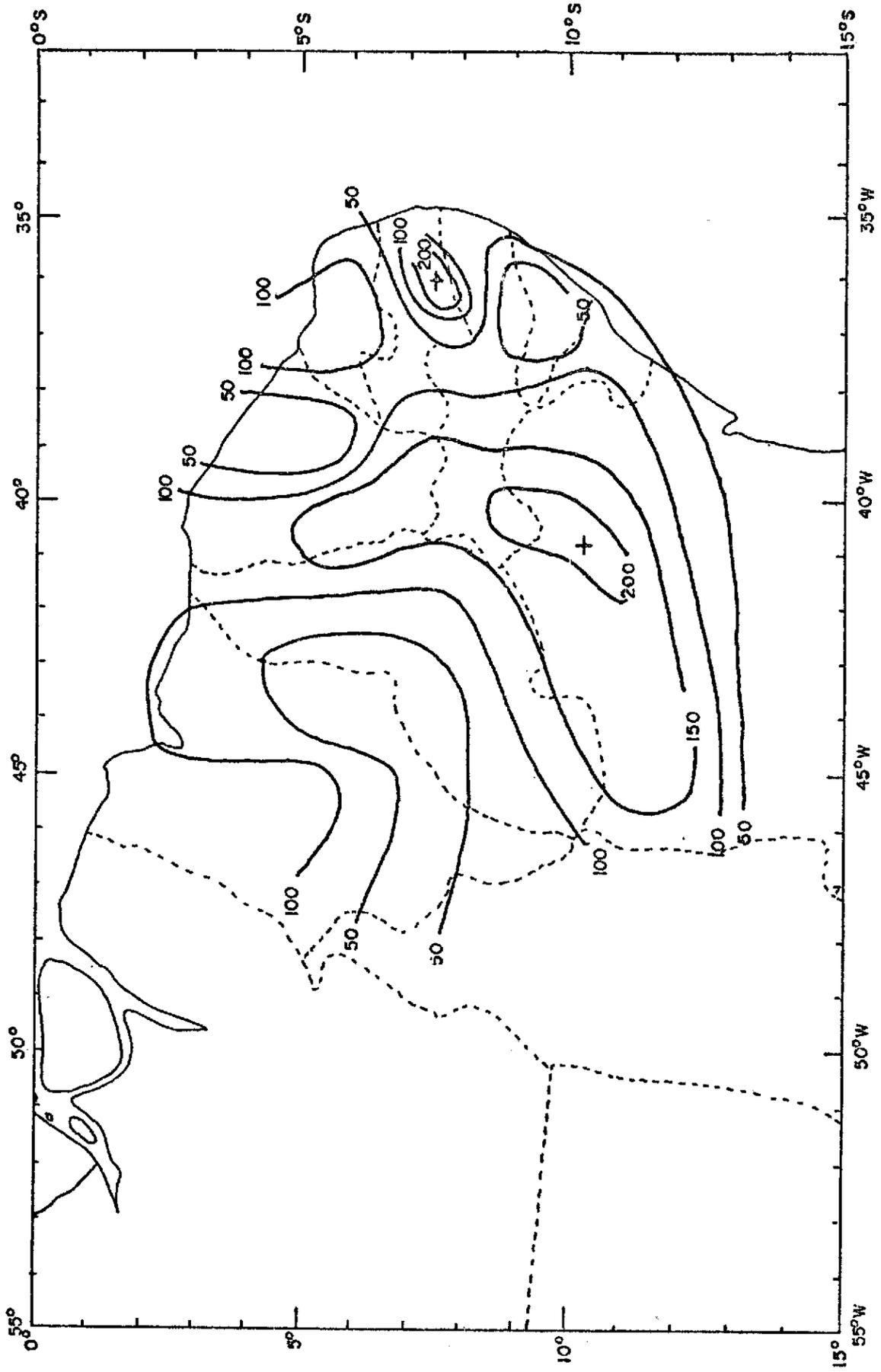


Fig. 3

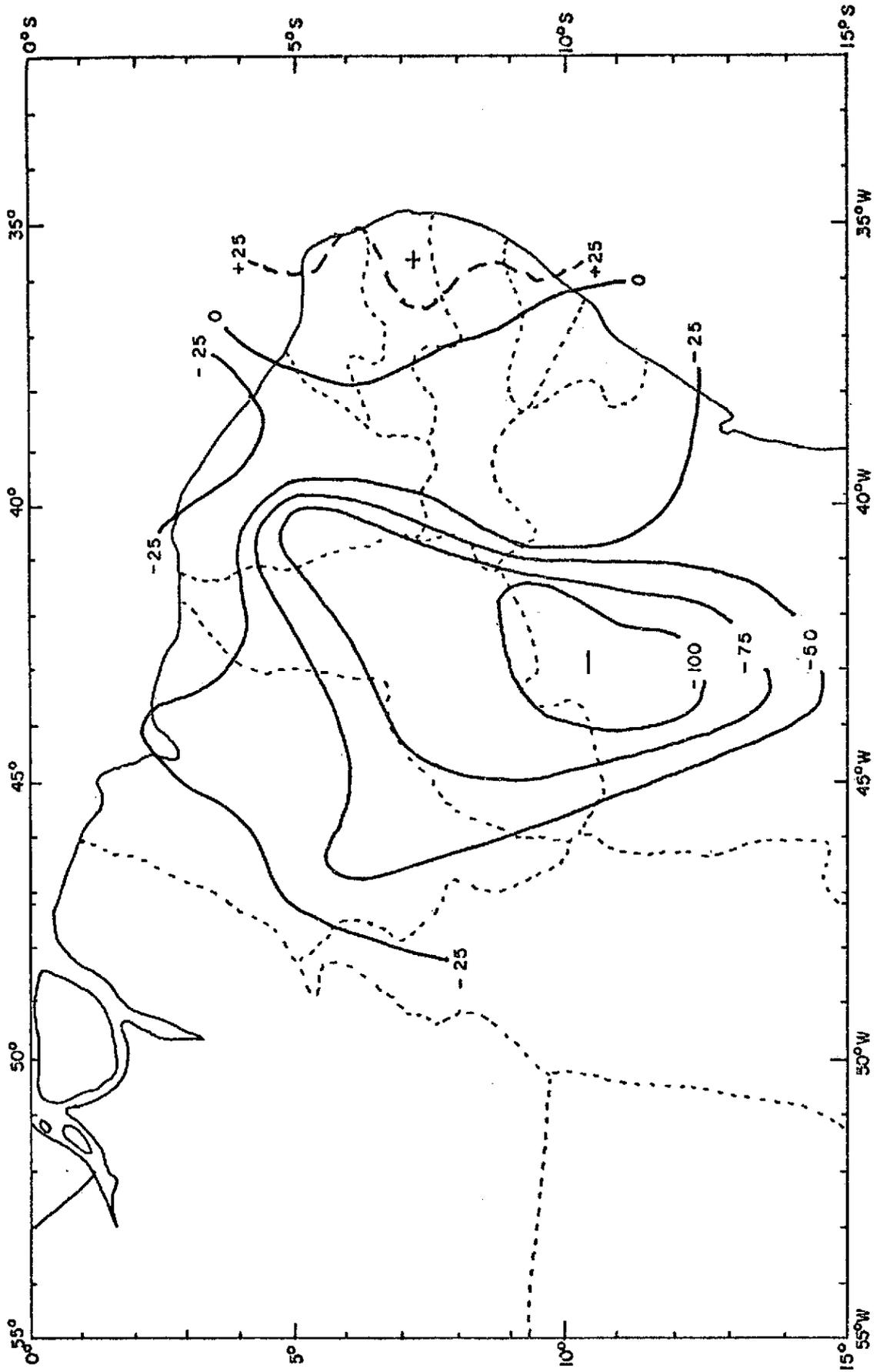


Fig. 4

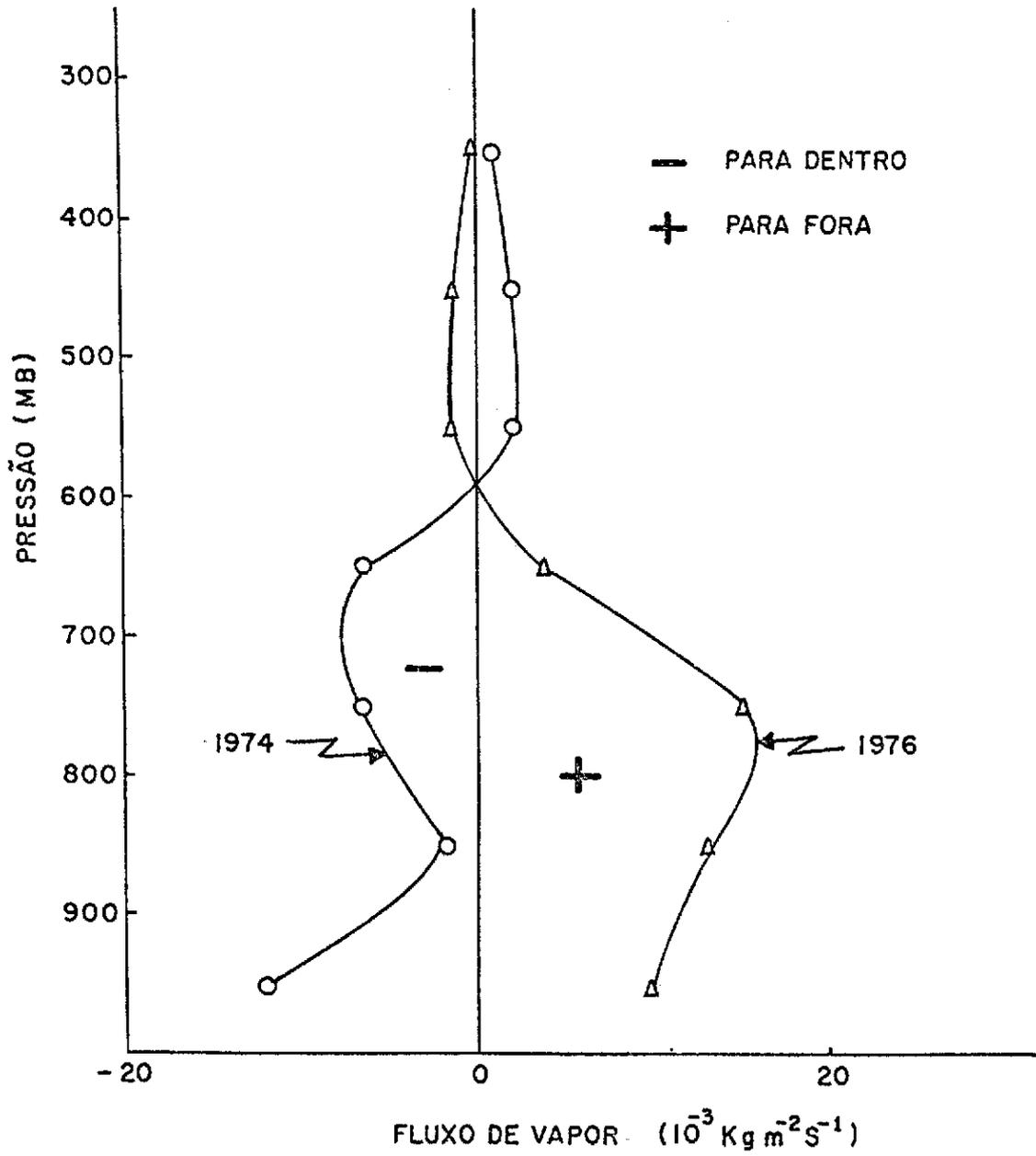


Fig. 5

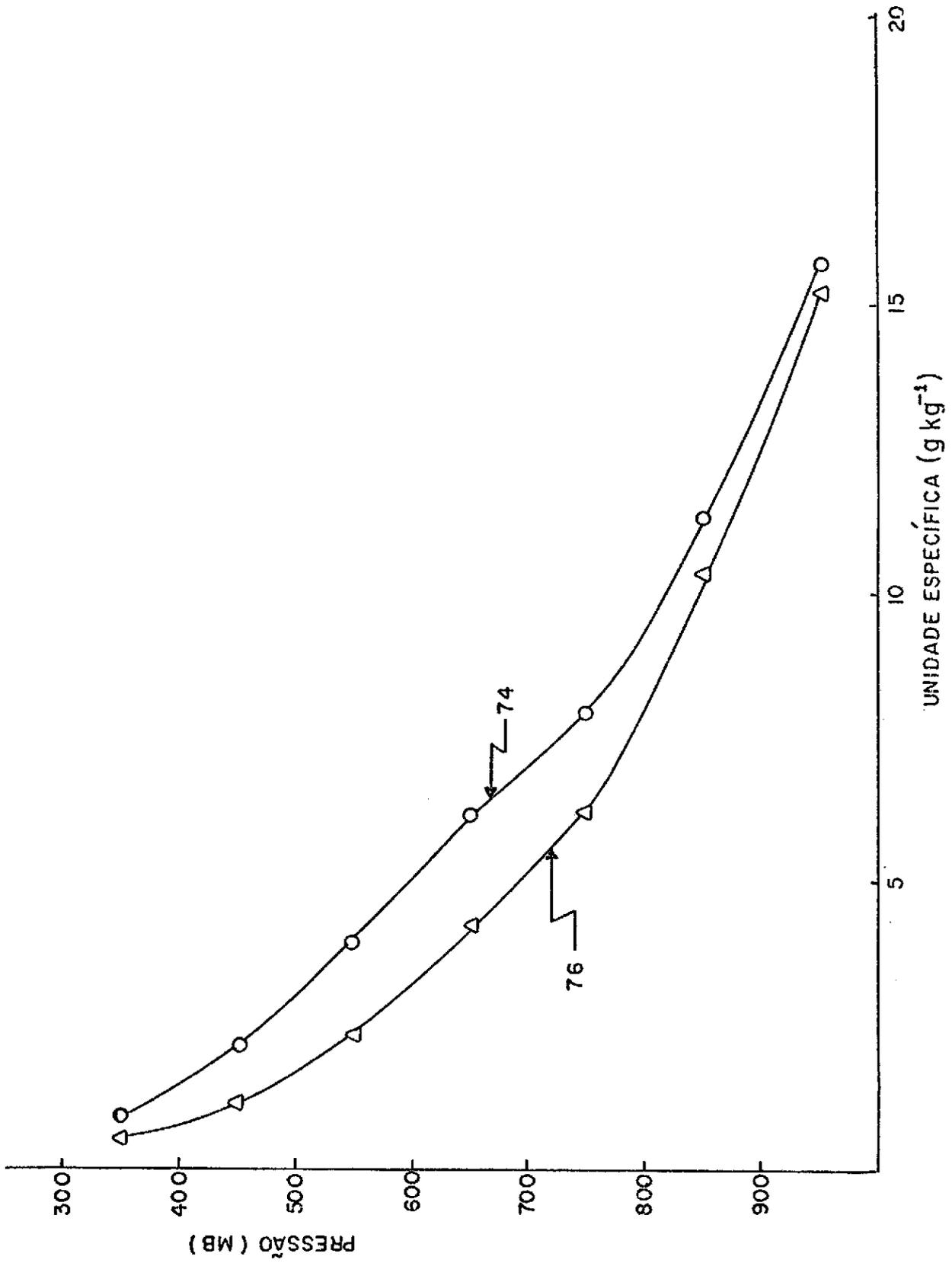


Fig. 6

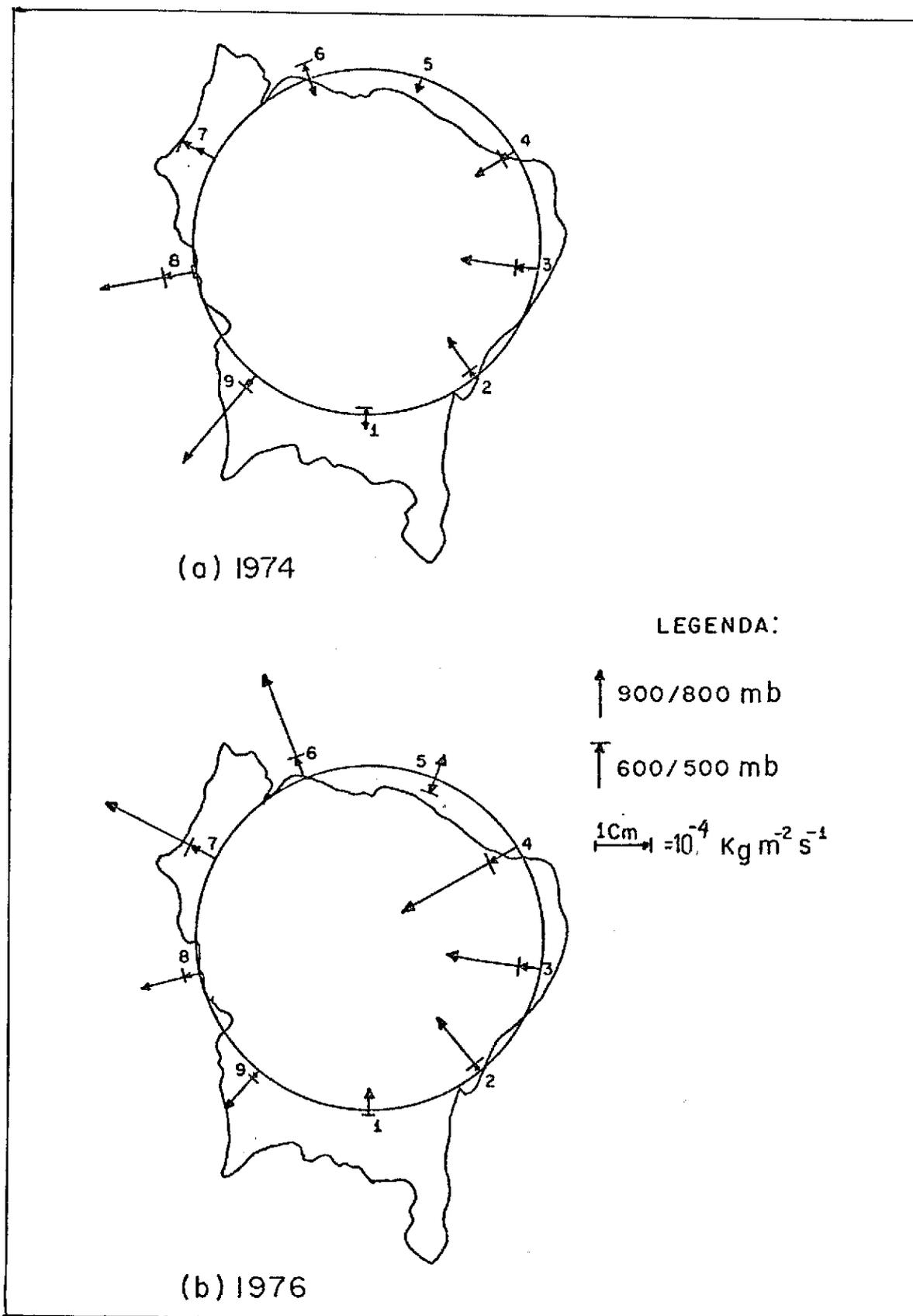


Fig. 7

TABELA 1

CAMADAS DE PRESSÃO	MÉDIA		DESVIOS		TOTAL	
	74	76	74	76	74	76
Sup-900	- 8,41	+ 6,76	- 3,57	+ 3,44	-11,98	+10,20
900-800	- 2,22	+10,81	+ 0,46	+ 2,18	- 1,76	+12,99
800-700	- 8,17	+11,41	+ 1,60	+ 4,28	- 6,57	+15,69
700-600	- 8,77	+ 0,43	+ 2,23	+ 3,51	- 6,54	+ 3,94
600-500	- 0,61	- 4,22	+ 2,93	+ 2,69	+ 2,32	- 1,53
500-400	- 0,74	- 2,35	+ 2,86	+ 1,09	+ 2,12	- 1,26
400-300	- 0,28	- 0,72	+ 1,49	0,42	+ 1,21	- 0,30
IMPORTAÇÃO	-29,20	- 7,29	- 3,57	0,00	-26,85	+42,82
EXPORTAÇÃO	0,00	+29,41	+11,57	+17,61	+ 5,65	- 3,09
SALDO	-29,20	+22,12	+ 8,00	+17,61	-21,20	+39,73

(Unidade:  $10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )

(Negativo significa fluxo para dentro)