

O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a região Amazônica

José Marques (*)
Jesus Marden dos Santos (**)
Eneas Salati (***)

Resumo

Utilizando dados de ar superior obtidos em 9348 radiossondagens na região Amazônica e adjacências, durante o período 1972/1975, foram estimadas as componentes zonal e meridional do fluxo de vapor \vec{Q} , integrado entre os níveis de 1000 (superfície) e 500 milibares (5560 metros de altitude, aproximadamente). Ficou evidenciado o comportamento predominantemente zonal do fluxo na região, estimando-se em 2895 e 2203g de vapor/cm.s os valores médios da componente zonal em Belém e Manaus, respectivamente.

INTRODUÇÃO

A precipitação média da região Amazônica é em torno dos 2400mm/ano, constituindo um dos mais altos índices pluviométricos do globo. A questão fundamental é saber qual a real contribuição da floresta para esta precipitação. A hidrologia clássica, utilizando métodos que permitem o estudo do balanço de água de uma bacia hidrológica, não fornece informações quanto à origem do vapor d'água atmosférico que realmente controla o ciclo hidrológico.

Os estudos da circulação geral da atmosfera conduziram a uma nova metodologia de pesquisas hidrológicas baseada na análise dos campos das diversas grandezas que caracterizam o estado da atmosfera e a dinâmica da água na fase de vapor.

Com o aumento do número de observações do ar superior verificado no mundo, tem sido possível solucionar muitos problemas associados ao transporte de vapor d'água atmosférico e suas conseqüências no balanço da água em uma região. Esta metodologia foi aplicada à bacia Amazônica e algumas informações básicas puderam ser obtidas quanto

à dinâmica do vapor d'água na região. Os dados obtidos de uma análise de 9348 radiossondagens em 4 anos, serão publicados em 4 artigos. Este é o primeiro, versando sobre o transporte de vapor d'água; o segundo sobre o armazenamento aéreo do vapor d'água; o terceiro sobre a divergência do fluxo de vapor d'água e as chuvas na região e, finalmente, no quarto far-se-á uma estimativa da evapotranspiração real na bacia.

REVISÃO DA LITERATURA

Estudos recentes mostram que o transporte aéreo de vapor constitui o mais importante suprimento de água para a seqüência do ciclo hidrológico. Vários estudos sobre o transporte aéreo de vapor d'água foram feitos, dentre outros, por Benton & Estoque (1954) e Rasmusson (1966, 1967) para os Estados Unidos; para o mar Báltico por Palmén & Söderman (1966); para a Austrália por Hutchings (1961) e para a bacia Amazônica por Molion (1975), Marques (1976) e Marques *et al.* (1977).

Benton *et al.* (1950) evidenciaram o papel do vapor d'água atmosférico no ciclo hidrológico e esclareceram as relações entre o ciclo e a massa de ar que se deslocam sobre a bacia do rio Mississipi. A partir de dados aerológicos os autores determinaram que não mais que 10% da precipitação total é oriunda de vapor d'água continental e que a maior parte da chuva caída originou-se da massa de ar oceânica. Segundo eles, não foi necessária uma alta correlação entre os valores mensais da transferência do vapor d'água e da precipitação; mas a precipitação foi mais associada com a convergência do campo do vapor d'água do que com a sua transferência, idéia esta con-

(*) — UFRJ — I. Geociências, Departamento de Meteorologia
(**) — ESALQ/USP — Departamento de Física e Meteorologia
(***) — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus

firmada em trabalhos de Spar (1953), Benton & Estoque (1954), Peixoto (1959), Bettencourt & Faria (1970) e Barnes (1964).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados básicos de altitude utilizados neste estudo foram obtidos a partir de informações aerológicas das seguintes estações, cuja localização acha-se na figura 1:

Estação	País	Altitude m	Latitude	Logitude
Belém	Brasil	40	1°28'S	48°27'W
Brasília	Brasil	1061	15°50'S	48°00'W
Carolina	Brasil	193	7°20'S	47°28'W
Manaus	Brasil	13	3°09'S	59°59'W
Vilhena	Brasil	582	12°44'S	60°08'W
Bogotá	Colômbia	2541	4°42'N	74°09'W
Lima	Peru	13	12°01'S	77°08'W
Iquitos	Peru	126	3°45'S	73°15'W
Maracay	Venezuela	442	10°20'N	66°45'W
S. Antonio	Venezuela	404	8°00'N	72°30'W
S. Elena	Venezuela	907	4°35'N	61°00'W

O fluxo de vapor d'água \vec{Q} entre dois níveis isobáricos atmosféricos P_1 e P_2 é dado pela seguinte equação:

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{P_1}^{P_2} \bar{q} \vec{V} dP$$

onde:

\vec{V} = componente horizontal do vento em m/s;

g = aceleração da gravidade em m/s^2 ;

\bar{q} = umidade específica média entre os níveis P_1 e P_2 , em gramas de vapor por Kg de ar úmido;

P_1, P_2 = pressão nos níveis isobáricos padrões limitantes da camada, em mb.

Observações diárias do vento, da temperatura e da umidade relativa disponíveis para até 8 níveis isobáricos estendendo-se desde a superfície até os 500mb ($\approx 5.500m$), foram utilizados para computar a transferência horizontal de vapor d'água na área coberta pelas estações aerológicas acima relacionadas.

Computou-se os fluxos parciais \vec{Q}' , em cada subcamada de 50mb de espessura com os dados obtidos em cada estação aerológica isoladamente; os valores \vec{Q}' integrados na vertical, foram utilizados para estimar o fluxo total de vapor sobre cada estação.

Foram utilizados os dados referentes ao período 1972/1975, num total de 9348 radiossondagens.

O vento horizontal \vec{V} foi decomposto nas suas componentes zonal (u) e meridional (v) ou seja, $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$ obtendo-se assim, a partir da equação 1, as correspondentes componentes zonal Q_λ (positiva no sentido oeste-leste) e meridional Q_ϕ (positiva no sentido sul-norte) do fluxo:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int \bar{q} u dp \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int \bar{q} v dp \dots\dots\dots (3)$$

No presente trabalho, $P_1 = 1000mb$ e $P_2 = 500mb$. Como a variação vertical da umidade específica (q) não é linear entre esses dois níveis, utilizou-se os valores obtidos para as subcamadas 1000/950, 950/900, 900/850, 850/800, 800/700, 700/600 e 600/500mb.

Os valores das componentes do fluxo foram lançados em mapas e traçados os respectivos campos dos fluxos zonal e meridional. Por leitura direta em cada vértice de uma malha de 5° de lado foram obtidos os valores das componentes do fluxo e obteve-se o valor do fluxo

total de vapor $Q = \sqrt{Q_\lambda^2 + Q_\phi^2}$ em cada ponto.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Acima do nível dos 500mb as curvas mostraram uma tendência para serem nulos os valores da umidade específica q , razão pela qual os estudos se restringiram somente até este nível.

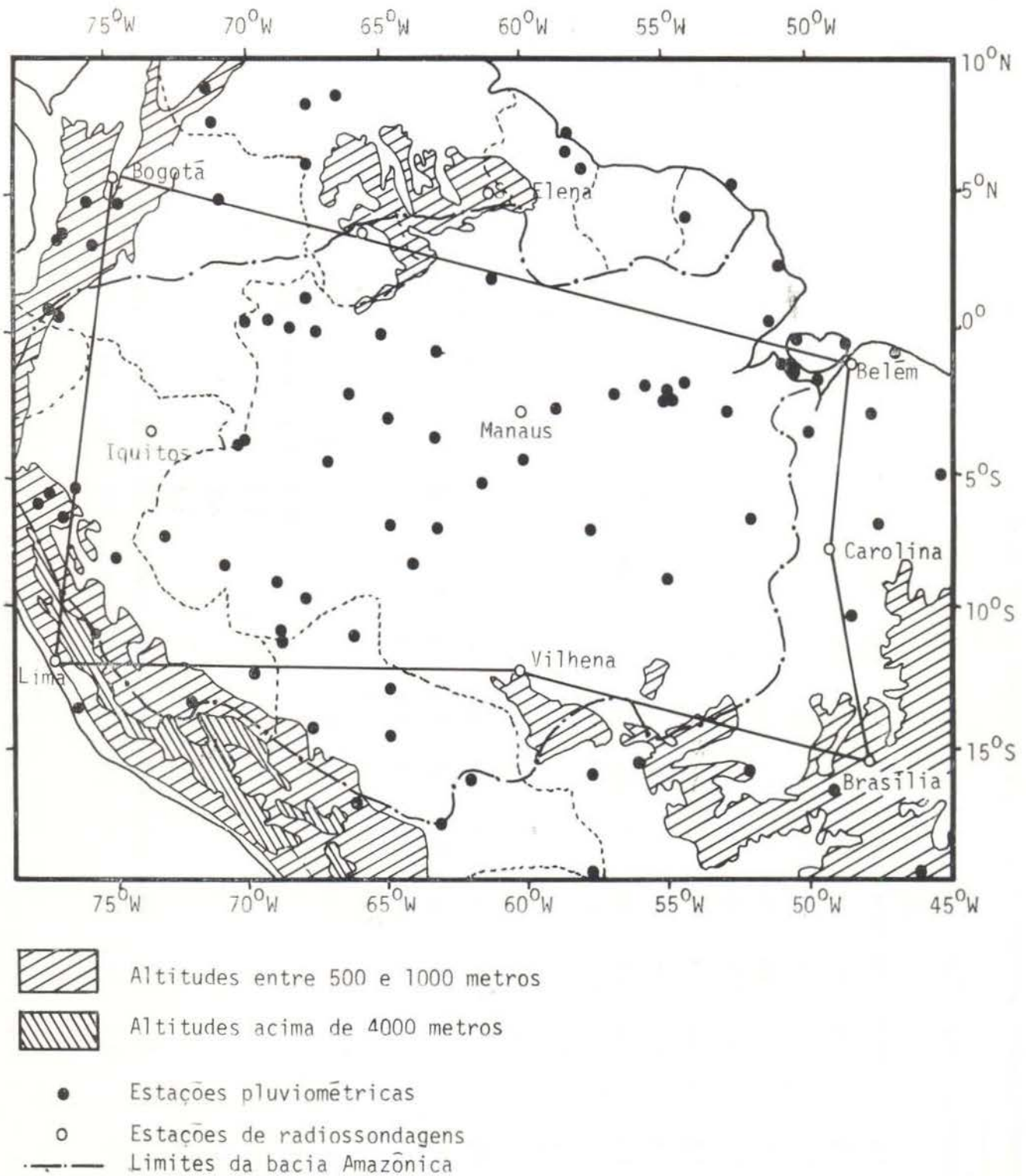


Fig. 1 — Rede de estações pluviométricas e de radiosondagens utilizadas.

TABELA 1 — Valores mensais e médios das componentes zonal Q_{λ} e meridional Q_{ϕ} , em gramas de vapor/cm.s, do fluxo de vapor no período 1972/1975.

Estação	Componente	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	N.º de sondagens	OBS.
Belém	Q_{λ}	-3024	-2914	-2744	-2655	-2847	-3185	-2977	-2979	-3019	-2731	-2835	-2725	-2895	1201	
	Q_{ϕ}	283	321	48	390	844	1126	1447	886	662	19	123	123	523		
Bogotá	Q_{λ}	-358	-265	-302	-351	-647	-896	-859	-789	-553	-379	-409	-267	-506	1337	
	Q_{ϕ}	97	103	65	125	191	234	255	219	205	72	44	48	138		
Brasília	Q_{λ}	-560	-841	-141	-474	-505	-443	-468	-405	-719	29	256	-254	-371	2314	
	Q_{ϕ}	-585	-444	655	-200	-76	-87	-127	23	19	-330	-549	-696	-309		
Carolina	Q_{λ}	-1105	-531	-825	-1310	-1825	-1627	856	-344	-1190	-905	-1107	-413	-1003	977	
	Q_{ϕ}	-308	-104	-326	64	696	646	165	52	-44	-197	-228	-231	15		
Iquitos	Q_{λ}									-1411	-826	-979	-818	-1008	54	(3)
	Q_{ϕ}									-235	-1265	-1243	-1058	-950		(3)
Lima	Q_{λ}	-174	-99	-44	-118	-163	-124	-201	-148	-142	-163	-204	-226	-150	1333	
	Q_{ϕ}	183	166	31	70	103	139	175	170	89	203	216	326	156		
Manaus	Q_{λ}	-2229	-2330	-1869	-1852	-2354	-2743	-2670	-2346	-2345	-1879	-1791	-2029	-2203	1081	
	Q_{ϕ}	-505	-504	-460	-101	114	499	717	-304	274	-209	68	-353	-64		
Maracay	Q_{λ}	-561	-310	-245	-220	-1019	-1937		-1495	-1272	-958	-874	-712	-873	487	(5)
	Q_{ϕ}	91	19	73	194	774	1105		640	879	490	181	101	413		(5)
S. Antonio	Q_{λ}									-1238	-1517	-747	-34	-884	74	(1)
	Q_{ϕ}									887	710	473	-215	464		(1)
S. Elena	Q_{λ}									-743					7	(2)
	Q_{ϕ}									234						(2)
Vilhena	Q_{λ}	108	449	31	116	-535	-750	-356	-573	-643	-278	250	633	-129	483	(4)
	Q_{ϕ}	-824	-771	-570	-37	385	-703	-523	-635	-716	-625	-848	-182	-568		(4)
														Total	9348	

(1) somente 1973 e 1974; (2) somente 1974; (3) somente 1975; (4) somente 1972 e 1973; (5) somente 1972, 1973 e 1974.

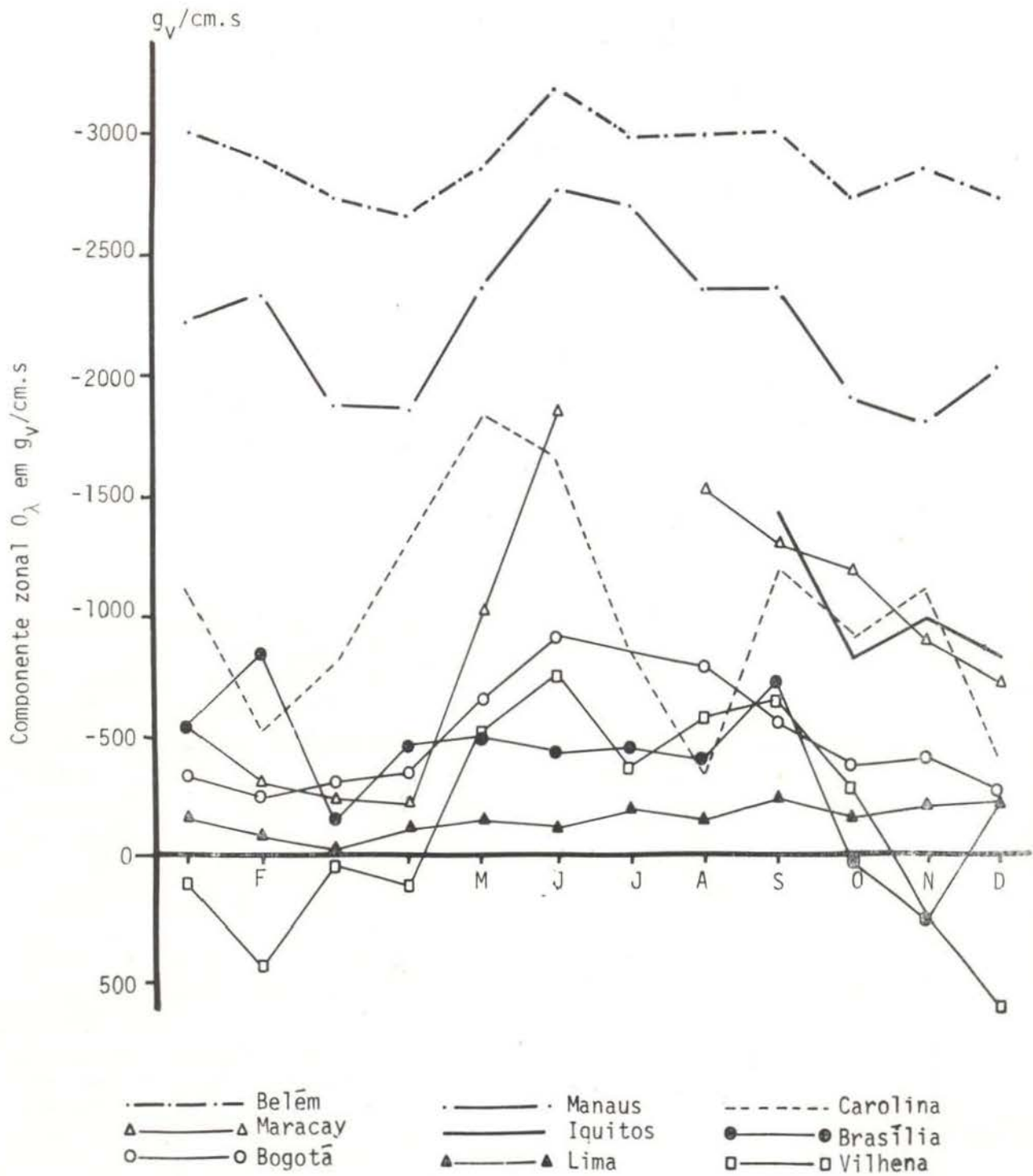


Fig. 2 — Distribuição mensal da componente zonal O_{λ} do fluxo de vapor, em g_v/cm.s. Valores positivos indicam sentido de Oeste para Leste.

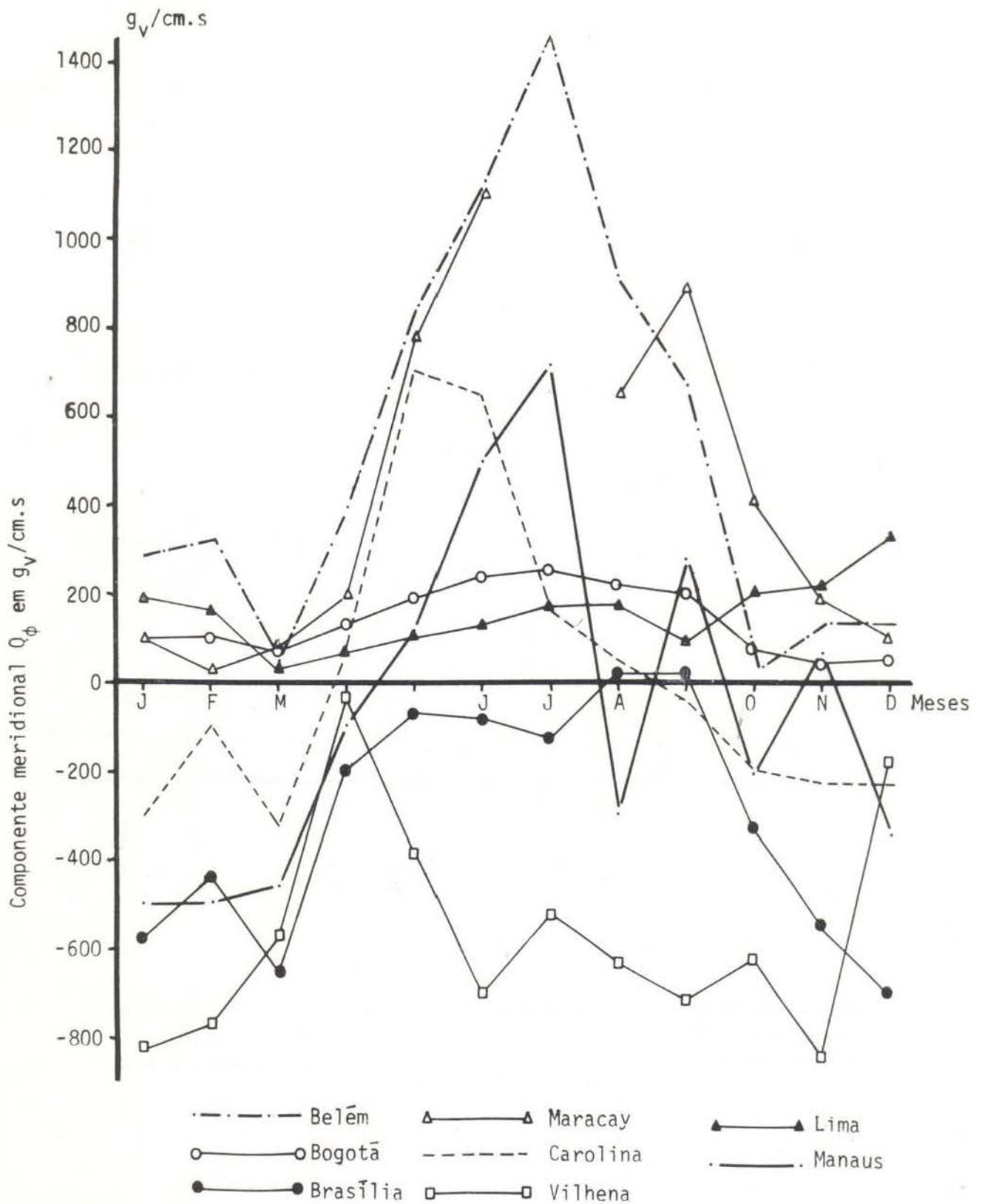


Fig. 3 — Distribuição mensal da componente meridional Q_ϕ do fluxo de vapor, em $g_v/cm.s$. Valores positivos indicam sentido de Sul para Norte.

Os valores mensais das componentes zonal Q_λ e meridional Q_ϕ do fluxo de vapor d'água atmosférico acham-se sumarizados na tabela 1.

DISTRIBUIÇÃO MENSAL DA COMPONENTE ZONAL DO FLUXO DE VAPOR, Q_λ

A figura 2 construída com os valores médios de Q_λ mostra a distribuição mensal da componente zonal do fluxo de vapor para algumas das localidades estudadas. Nota-se a predominância dos valores mais elevados em Belém e Manaus, constância do sentido leste-oeste bem como o fato de estar a maioria das curvas em fase. Isto implica na caracterização de um comportamento uniforme do transporte de vapor no sentido leste-oeste na região.

DISTRIBUIÇÃO MENSAL DA COMPONENTE MERIDIONAL DO FLUXO DE VAPOR Q_ϕ

Esta distribuição acha-se representada na figura 3. Com exceção de Vilhena, Brasília, Carolina e Manaus as demais apresentaram Q_ϕ com sentido de sul para norte durante todo o ano, com valores maiores no inverno do hemisfério sul.

DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO TOTAL Q SOBRE A BACIA AMAZÔNICA

A análise das figuras 4 a 7 evidencia que praticamente todo o ano é caracterizado por uma entrada maciça de vapor d'água na bacia oriundo do Oceano Atlântico. Para o interior da bacia o fluxo vai diminuindo gradativamente, devido a diminuição da velocidade do vento pois há um aumento dos valores da umidade específica à medida que maior penetração se verifica. Além disso o obstáculo natural que é a cordilheira dos Andes funciona como um verdadeiro paredão no fim de um hipotético corredor de quase 4.000km de extensão. Nas mesmas figuras encontram-se também os campos do armazenamento aéreo do vapor d'água, estimado pela água precipitável W_p .

Da análise das figuras os seguintes fatos são evidenciados:

- o papel do oceano Atlântico com fonte constante de vapor d'água para a região;
- a região Amazônica, por sua vez, exportando parte do vapor para a região do Chaco paraguaio e Brasil Central, prin-

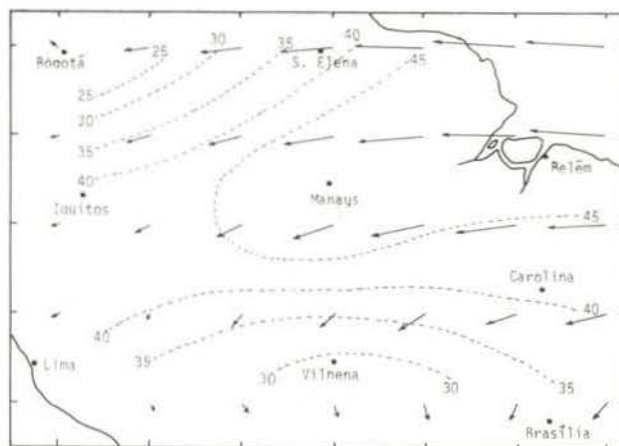


Fig. 4 — Valores do campo vetorial $\vec{Q} = \vec{Q}_\lambda + \vec{Q}_\phi$. Média do período 1972/1975, obtida para as quadrículas de 5° de latitude por 5° de longitude. Valores para março. Linhas tracejadas: água precipitável, em mm. 1 cm = 2000gv/cm.s

cipalmente nos meses de março e dezembro, sendo pequena esta contribuição em junho e setembro;

- apesar dos valores elevados do fluxo \vec{Q} próximo a Belém, a existência de um período de seca bem definido na metade da ilha de Marajó sugere a realização de estudos mais profundos e detalhados das características do armazenamento de água e circulação local.

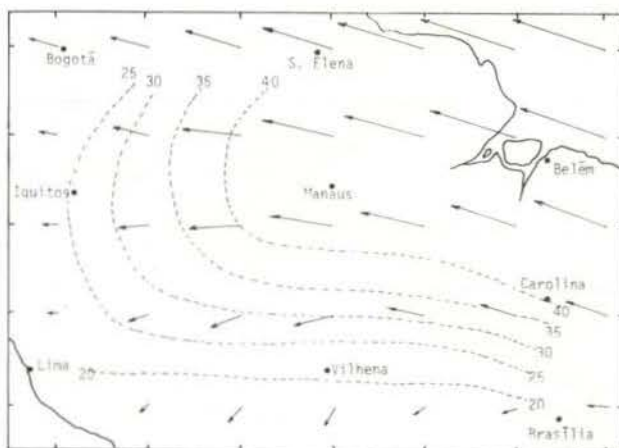


Fig. 5 — Valores do campo vetorial $\vec{Q} = \vec{Q}_\lambda + \vec{Q}_\phi$. Média do período 1972/1975, obtida para as quadrículas de 5° de latitude por 5° de longitude. Valores para junho. Linhas tracejadas: água precipitável, em mm. 1 cm = 2000gv/cm.s

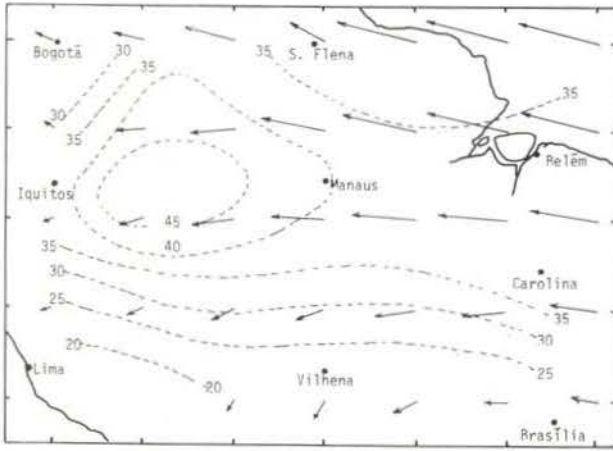


Fig. 6 — Valores do campo vetorial $\vec{Q} = \vec{Q}_\lambda + \vec{Q}_\phi$. Média do período 1972/1975, obtida para as quadriculas de 5° de latitude por 5° de longitude. Valores para setembro. Linhas tracejadas : água precipitável, em mm. 1 cm = 2000gv/cm.s

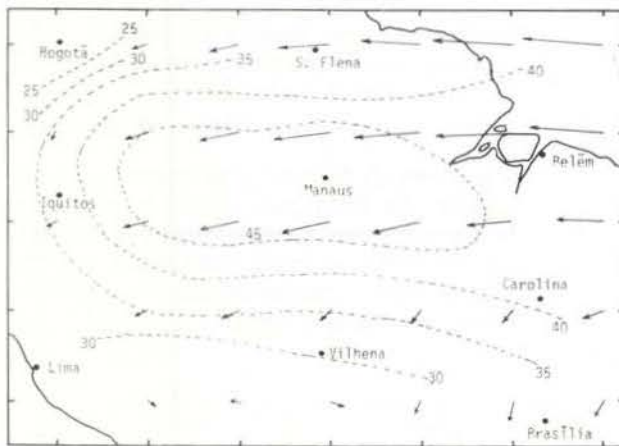


Fig. 7 — Valores do campo vetorial $\vec{Q} = \vec{Q}_\lambda + \vec{Q}_\phi$. Média do período 1972/1975, obtida para as quadriculas de 5° de latitude por 5° de longitude. Valores para dezembro. Linhas tracejadas : água precipitável, em mm. 1 cm = 2000gv/cm.s

VARIAÇÃO MENSAL DA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA COMPONENTE ZONAL DE VAPOR DÁGUA, Q_λ

Nas figuras 8 a 11 acham-se representadas as variações mensais e por altitude da componente zonal Q_λ para as principais estações utilizadas neste estudo.

As figuras 8 e 9 analisadas em conjunto mostram a predominância do sentido este-oes-

te, na faixa Belém-Manaus. Os maiores valores acham-se em torno do nível de 700mb o que corresponde a 2.400m de altitude, aproximadamente. Desde a superfície até este nível nota-se que o comportamento da variação da componente Q_λ é diferente daquele verificado entre os 750 e 500mb.

A análise do trecho Brasília-Vilhena, feita com auxílio das figuras 10 e 11 mostra uma concordância entre os perfis no período abril-setembro mas de outubro a março Vilhena apresenta uma inversão no sentido do fluxo em todos os níveis. Naquele período, quando o domínio da ação do anticiclone permanente do Atlântico sul começa a se manifestar sobre o continente, há um enfraquecimento do centro de baixas pressões do Brasil Central e Chaco paraguaio e, em conseqüência, impõe uma componente de Este. No período primavera-verão, o anticiclone desloca-se mais para o oceano dando lugar a migração, em direção a leste do sistema de baixas pressões do Brasil Central aparecendo, então, uma componente oeste do vento principalmente sobre Vilhena. Este fato também acha-se evidenciado nas cartas de representação espacial do fluxo total (Figuras 4 a 7).

VARIAÇÃO MENSAL DA DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA COMPONENTE MERIDIONAL DO FLUXO DE VAPOR DÁGUA, Q_ϕ

Em Belém, figura 12, o sentido norte-sul fez-se sentir somente na camada 1000/900mb exceto no período do inverno; a partir dos 900mb toda penetração longitudinal de vapor na bacia se processou do sul para norte. A costa nordeste da América do Sul teve uma adição constante de vapor água oceânico, sem alterar a característica quase latitudinal do fluxo total \vec{Q} , conforme pode ser verificado pelas figuras 4 a 7.

A análise do trecho Belém-Carolina, figuras 12 e 13, evidenciou que, no verão, o deslocamento para leste do centro de altas pressões do Atlântico sul altera notadamente o vento naquele trecho tanto em direção como em velocidade, permanecendo inalterado os valores da umidade específica.

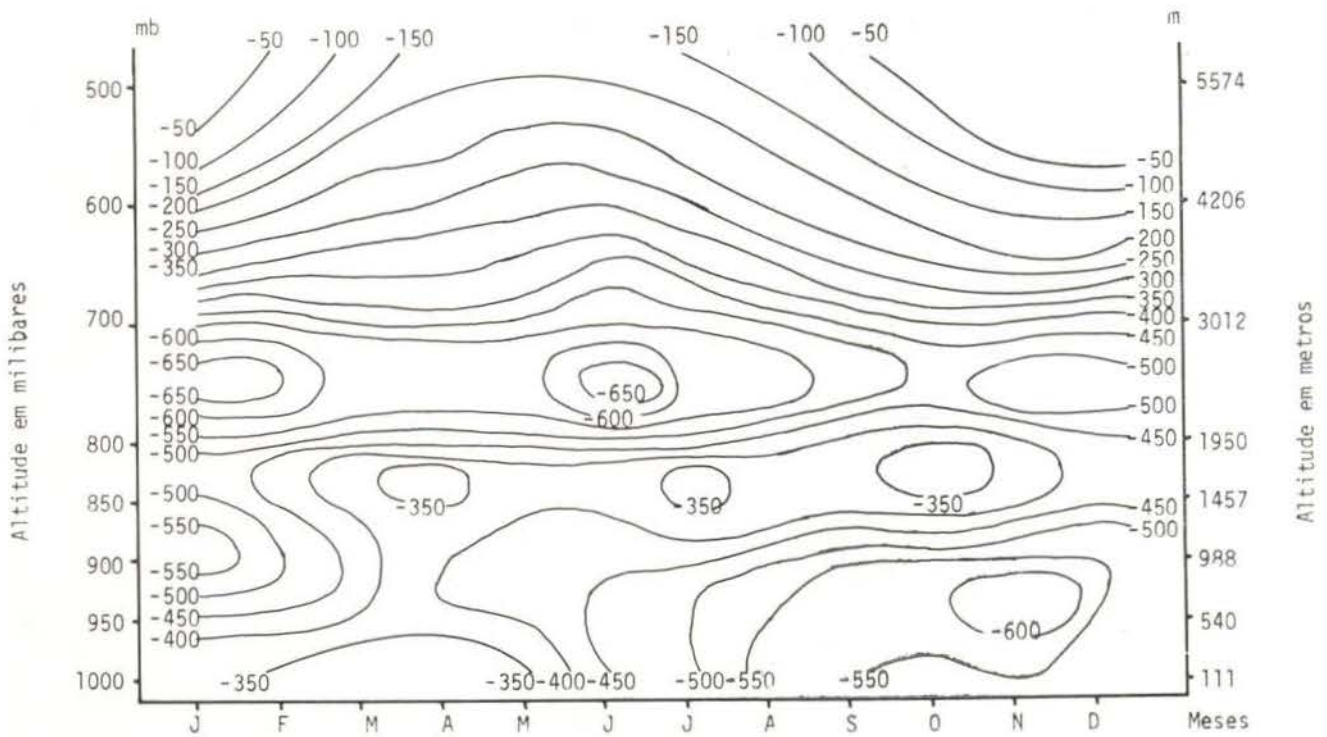


Fig. 8 — Variação mensal da distribuição vertical da componente zonal Q_z , em $gV/cm.s$, em Belém. Média do período 1972/1975. Os valores negativos indicam sentido de Leste para Oeste.

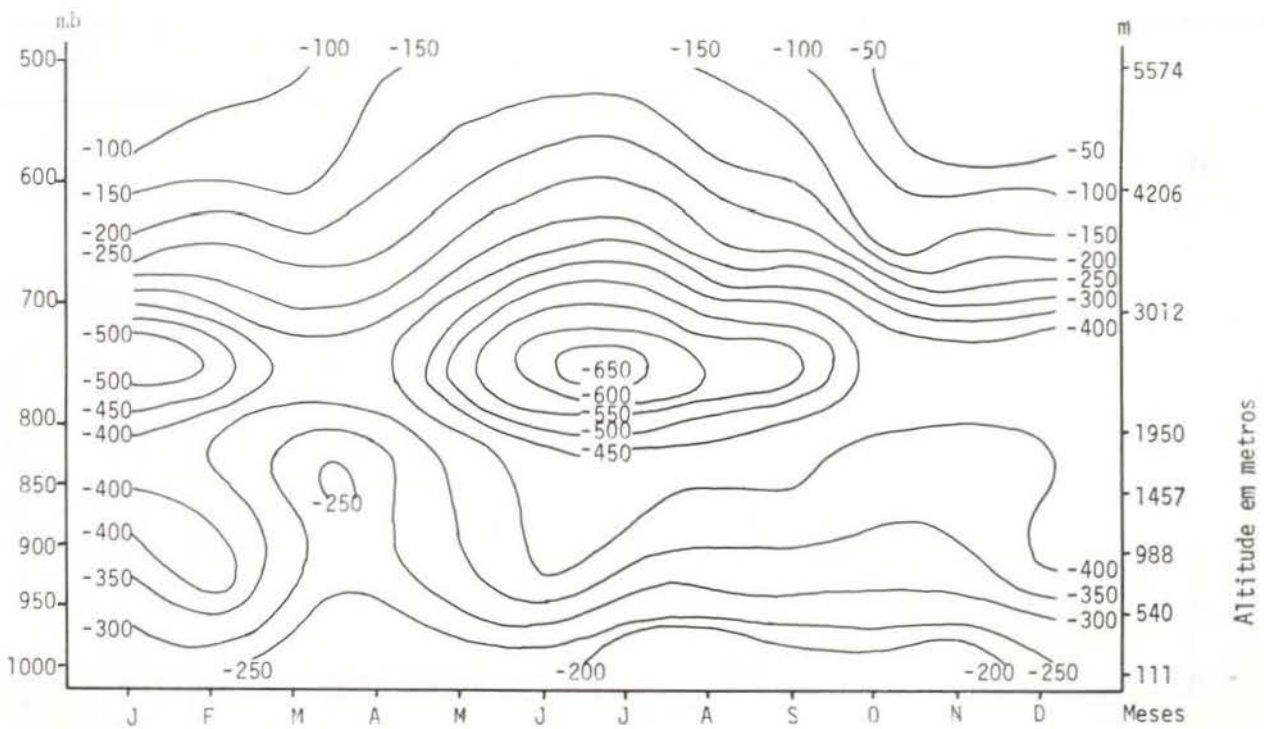


Fig. 9 — Variação mensal da distribuição vertical da componente zonal Q_z , em $gV/cm.s$, em Manaus. Média do período 1972/1975. Os valores negativos indicam sentido de Leste para Oeste.

OS PERFIS DAS COMPONENTES DO FLUXO DE VAPOR DÁGUA AO LONGO DA BACIA AMAZÔNICA

As operações de radiossondagem de Iquitos, Peru, iniciaram-se em setembro de 1975, aumentando o número de informações aerológicas disponíveis, principalmente na América

do Sul, cuja baixa densidade da rede não tem permitido um maior detalhamento da circulação geral da atmosfera nas regiões tropical e equatorial. Afortunadamente Iquitos, situada na bacia Amazônica constitui-se, juntamente com Manaus e Belém, importantes pontos que

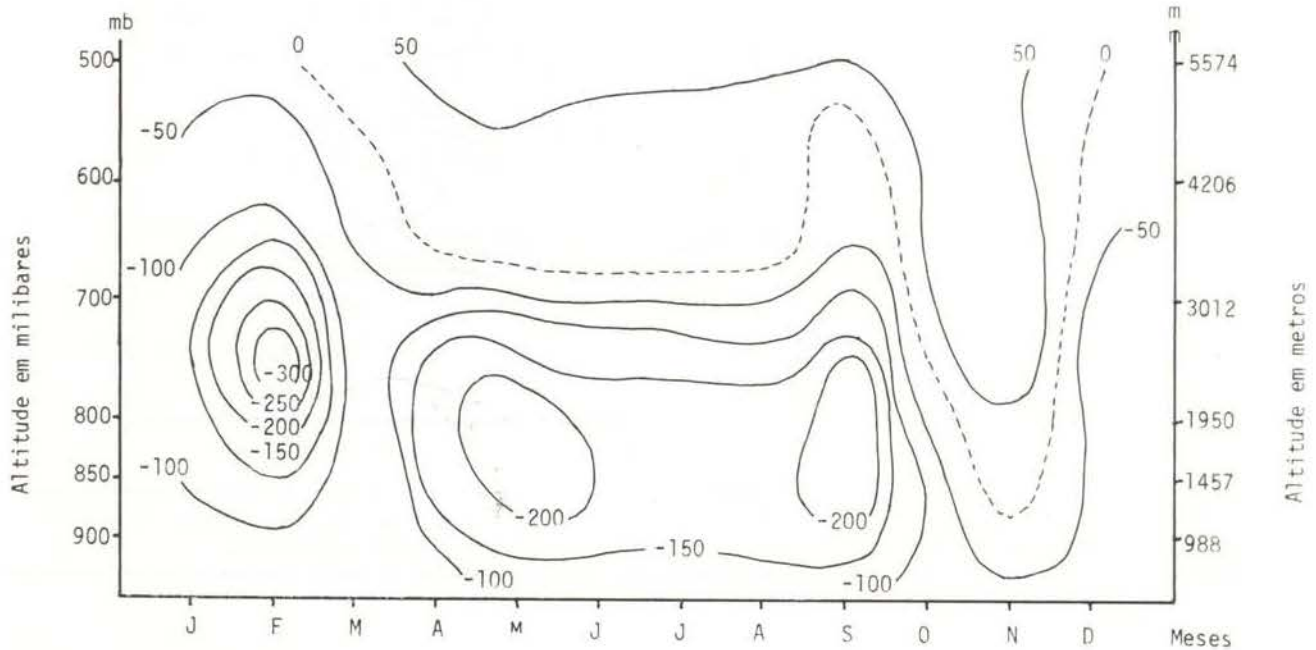


Fig. 10 — Variação mensal da distribuição vertical da componente zonal Q_{λ} , em $gV/cm.s$, em Brasília. Média do período 1972/1975. Os valores negativos indicam sentido de Leste para Oeste.

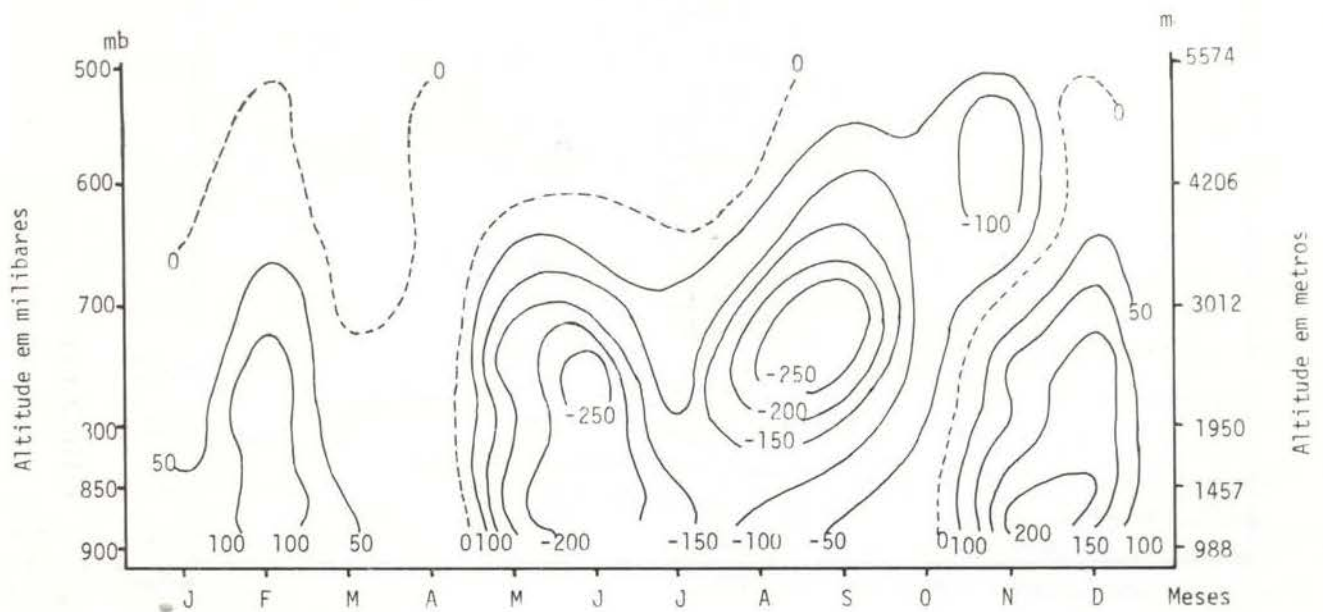


Fig. 11 — Variação mensal da distribuição vertical da componente zonal Q_{λ} , em $gV/cm.s$, em Vilhena. Média do período 1972/1973. Os valores negativos indicam sentido de Leste para Oeste.

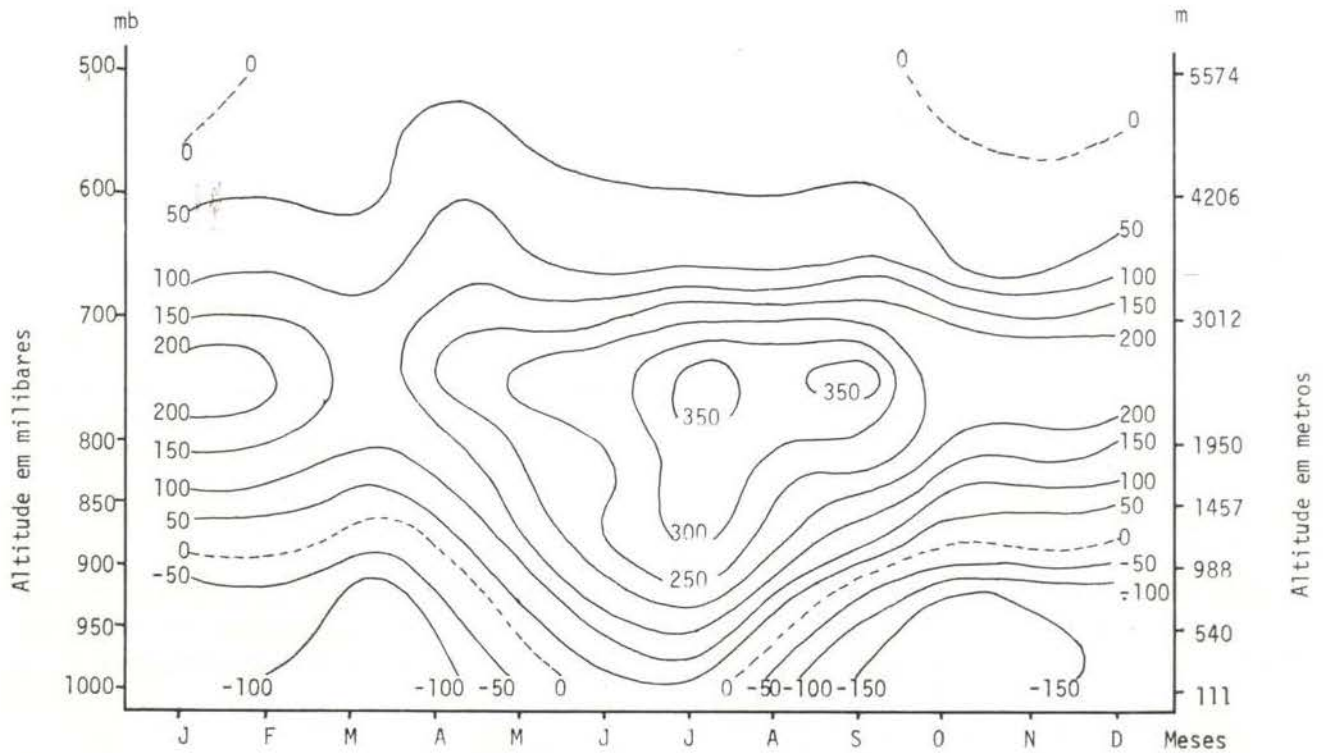


Fig. 12 — Variação mensal da distribuição vertical da componente meridional $Q\phi$, em $gv/cm.s$, em Belém. Média do período 1972/1975. Os valores negativos indicam sentido de Norte para Sul

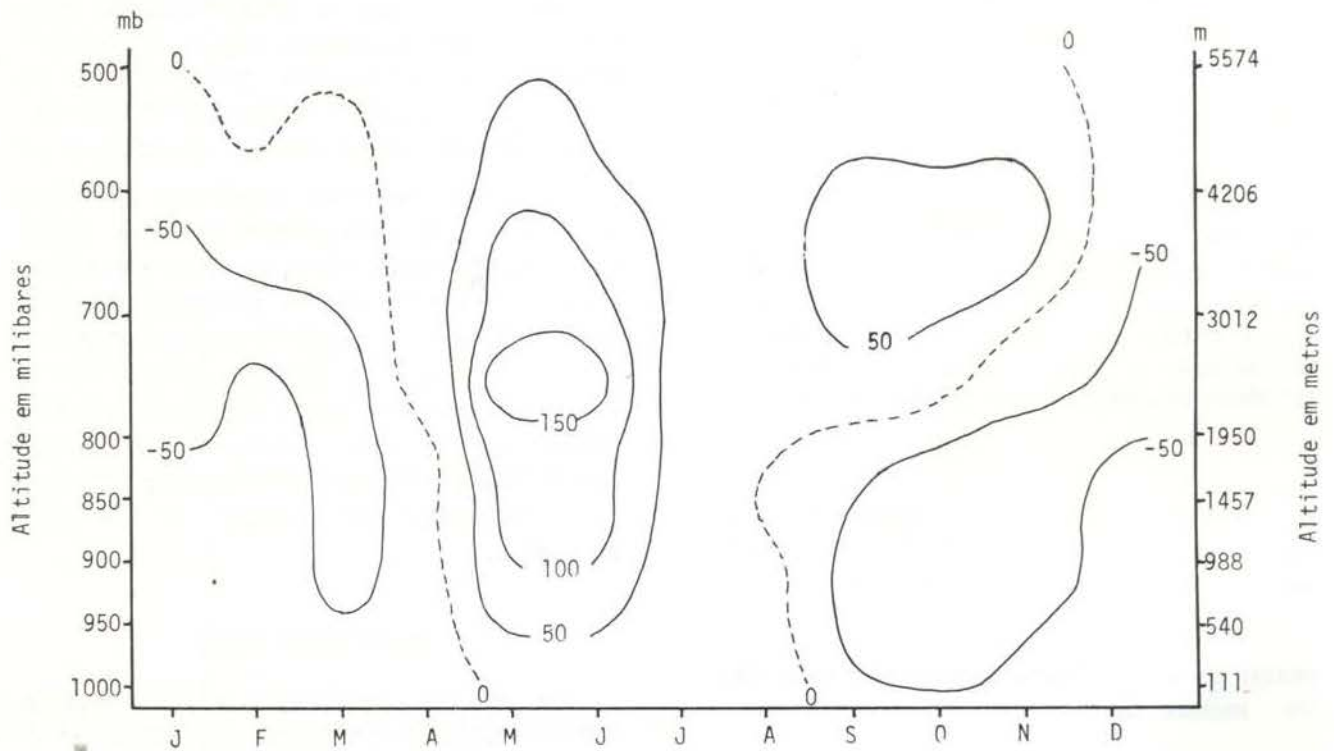


Fig. 13 — Variação mensal da distribuição vertical da componente meridional $Q\phi$, em $gv/cm.s$, em Carolina. Média do período 1972/1974. Os valores negativos indicam sentido de Norte para Sul.

permitirão uma melhor representação e entendimento da distribuição dos transportes de vapor d'água na região. As figuras 14 e 15 foram construídas somente com os dados do mês de setembro de 1975 não devendo ser consideradas como representativas de uma situação climatológica para a área.

Nas representações mensais, não apresentadas neste trabalho, verificou-se uma repetição anual do mesmo modelo de perfil, sugerindo que as figuras acima não se distanciaram muito do padrão.

PERFIL DA COMPONENTE ZONAL DO FLUXO, Q_z , FIGURA 14

Houve uma diminuição dos valores do fluxo zonal, com gradiente bem acentuado à medida que maior penetração para o interior é verificada. Acima dos 650mb ($\approx 3.500m$) a componente zonal do fluxo inverte o senti-

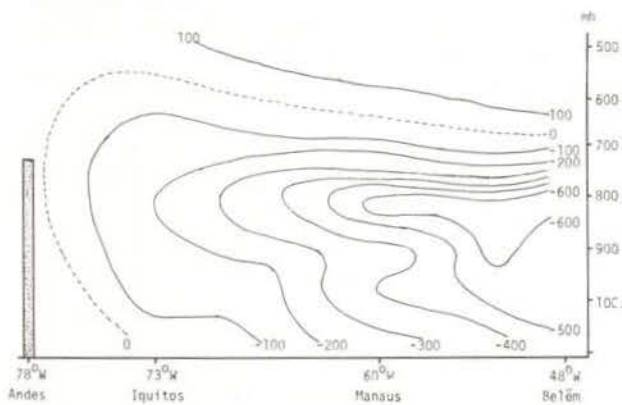


Fig. 14 — Perfil longitudinal da componente zonal do fluxo de vapor Q_z , para setembro/1975, em $g/cm.s.$ Valores negativos indicam sentido Leste-Oeste.

do, passando a ser de oeste para leste. Nos níveis mais baixos e entre Iquitos e a Cordilheira dos Andes o valor tende a se anular.

PERFIL DA COMPONENTE MERIDIONAL DO FLUXO, Q_y , FIGURA 15

Verificou-se a existência de uma componente, da magnitude relativamente grande, no sentido da Amazônia para o interior do con-

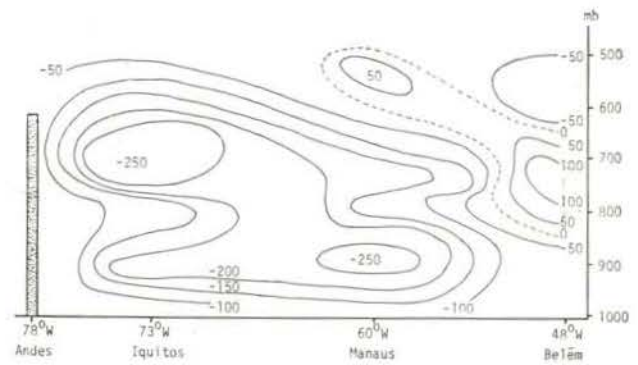


Fig. 15 — Perfil longitudinal da componente meridional do fluxo de vapor Q_y , para setembro/1975, em $g/cm.s.$ Valores negativos indicam sentido Norte-Sul.

tinente significando que, pelo menos no mês analisado há uma exportação de vapor da Amazônia para o interior do continente.

CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados resumem-se aos obtidos para um período relativamente curto (1972-1975), mas que, de um modo geral, dão uma idéia do comportamento dinâmico do vapor d'água na região Amazônica. Estudos mais detalhados, principalmente na parte mais oriental da bacia deverão ser feitos abrangendo maior número de anos.

As conclusões mais genéricas são aquelas relativas à constatação de uma adição constante de vapor d'água de origem oceânica e com uma componente predominantemente zonal. Entretanto, segundo pode-se depreender do trabalho de Peixoto (1972) não é descartada a possibilidade de alguma penetração de vapor d'água oriundo do oceano Pacífico, possibilidade esta que deverá ser estudada para um melhor entendimento da hidrologia da região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FINEP, CNPq, FAPESP, CNEN e Secretaria de Tecnologia do Estado de São Paulo pelos recursos concedidos; à SUDENE, Ministério da Aeronáutica (Divisão de Meteorologia/DEC e DEC/CTA) e

Força Aérea Venezuelana pela cessão dos dados meteorológicos de altitude necessários a esta pesquisa.

SUMMARY

The zonal Q_{λ} and meridional Q_{ϕ} water vapor flux components, from 1972 to 1975 period, using 9,348 radiosonde data are presented; there is a zonal water vapor flux evidence over the Amazonas basin. The mean Q_{λ} values over Belém and Manaus were 2,895 and 2,203g/cm.s, respectively, in a 1000/500mb layer.

BIBLIOGRAFIA

- BARNES, A.C. JR.
1964 — Atmospheric water vapor divergence: measurements and applications. In: **Humidity and moisture**, N.Y., Reinh. Publ. Co. 2, pag. 513-527.
- BENTON, G.S.; BLACKBURN, R.T. & SNEAD, V.O.
1950 — The role of the atmosphere in the hydrology cycle. **Trans. Am. Geophys. Un.** 31 : 61-73.
- BENTON, G.S. & ESTOQUE, M.A.
1954 — Water-vapor transfer over the North American Continent. **J. Met.** 11 : 462-477.
- BETTENCOURT, M.C. & FARIA, J.M.R.
1970 — The water vapor in the atmosphere and the hydrological cycle. **Időjárás** Budapest, (5-6) : 307-312.
- HUTCHINGS, J.W.
1961 — Water-vapor transfer over Australian Continent. **J. Met.**, 18 : 615-634.
- MARQUES, J.
1976 — Contribuição ao estudo hidrológico da bacia Amazônica. Dissertação MS, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 116 p.
- MARQUES, J.; SANTOS, J.M. DOS; VILLA NOVA, N.A. & SALATI, E.
1977 — Precipitable water and water vapor flux between Belém and Manaus. **Acta Amazonica**, Manaus, 7(3) : 355-362.
- MOLION, L.C.B.
1975 — A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects. Ph.D Thesis, Univ. Wisconsin, Madison, 133 p.
- PALMÉN, E. & SÖDERMAN, D.
1966 — Computations of the evaporation from Baltic Sea from the flux of water vapor in the atmosphere. **Geophysica**, 8:261-279.
- PEIXOTO, J.P.
1959 — O campo da divergência do transporte do vapor de água na atmosfera. In: **Rev. Fac. Ciências de Lisboa**, Separata 29, série B, Vol. 7, p. 25-56.
- PEIXOTO, J.P.
1972 — Pole — to pole water balance for the IGY from aerological data. **Nordic Hydrology**, Copenhagen, 3 : 22-43.
- RASMUSSEN, E.M.
1966 — Diurnal variation in the summer water vapor transport over North America. **Water Res. Research**, 2(3) : 469-477.
1967 — Atmospheric water-vapor transport and the water balance of North America. **Month Wea. Rev.**, 95 : 403-425.
- SPAR, J.A.
1953 — A suggested technique for quantitative precipitation forecasting. **Month Weather Rev.**, 81 : 217-221.

(Aceito para publicação em 28/09/79)