

O armazenamento atmosférico de vapor d'água sobre a região Amazônica

José Marques (*)

Jesus Marden dos Santos (**)

Eneas Salati (***)

Resumo

Foram estimados, a partir dos dados de radiossondagens, os valores da umidade específica bem como são apresentadas as variações em altitude e espacial da água precipitável sobre a região Amazônica, utilizados como parâmetros representativos do vapor d'água armazenado na atmosfera. De um modo genérico a maior concentração de vapor d'água atmosférico ocorre entre Manaus e Iquitos. Estimou-se em 35mm o valor médio da água precipitável sobre a bacia Amazônica bem como ser de 18,2% o valor da "eficiência da precipitação" para a região e um tempo de reciclagem do vapor d'água de, aproximadamente, 5,5 dias. São apresentados os valores mensais da umidade específica em Belém e Manaus comparados com os obtidos para Brasília. São de 44,2, 41,9 e 25,1mm os valores médios da água precipitável em Manaus, Belém e Brasília, respectivamente.

INTRODUÇÃO

Para auxiliar a previsão de formação de nuvens, principalmente as de natureza convectiva, e estabelecer satisfatoriamente de modo quantitativo uma precipitação, necessário se faz que o campo tridimensional do vapor d'água esteja definido com detalhe e isto é possível com o auxílio da rede meteorológica de ar superior (radiossondas). Esta possibilidade é explorada usando a água precipitável (W_p) e a umidade específica (q) como parâmetros representativos do vapor d'água armazenado na atmosfera. A água precipitável pode também ser utilizada em estudos de atenuação da radiação solar pelo vapor d'água atmosférico.

Água precipitável existente em uma coluna vertical da atmosfera é, por definição, a massa total de água que seria obtida se todo o vapor d'água da coluna de área unitária se condensasse em um plano horizontal. De um

modo mais genérico, a água precipitável representa o armazenamento atmosférico de água sobre uma dada região.

A quantificação e o conhecimento da variabilidade da água precipitável e da umidade específica, q , tem grande importância meteorológica em modelos numéricos de precisão bem como para o estudo do ciclo hidrológico sobre a região Amazônica bem como sobre a energética envolvida.

No presente trabalho, segundo de uma série (Marques *et al.*, 1979), são apresentadas as variações dos parâmetros água precipitável e umidade específica bem como sua estrutura vertical sobre várias localidades da bacia Amazônica, cobrindo o período 1972/1975.

REVISÃO DA LITERATURA

Holzman (1937) sugeriu o aproveitamento das informações de ar superior para a determinação do conteúdo total de água sobre um determinado local. Estabeleceu uma fórmula para o cálculo do conteúdo de água em uma camada da atmosfera, em função da pressão de vapor, da temperatura T e da altura Z , a partir da equação de estado para o ar úmido. Estas informações seriam utilizadas na caracterização das regiões de maior pluviosidade.

O método para a estimativa da água precipitável foi inicialmente proposto por Solot (1939) e consiste em se integrar a umidade específica (q) com relação a altura, tomando-se a pressão atmosférica como coordenada vertical. A partir de então muitos tem sido os trabalhos publicados relativos à água precipitável, tais como Reitan (1960), Showalter (1954) e Spar (1953).

(*) — UFRJ — I. Geociências, Departamento de Meteorologia

(**) — ESALQ/USP — Departamento de Física e Meteorologia

(***) — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

O termo "água precipitável" não pode ser considerado como a quantidade de água que pode ser precipitada mediante um processo físico qualquer. Para fins práticos, entretanto, a água precipitável contida na troposfera pode ser considerada como suficientemente representativa do vapor d'água disponível para o processo da precipitação (Benwell, 1965).

Ananthkrishnan *et al.* (1965) analisaram a variação estacional da água precipitável sobre a Índia, estudando dados oriundos de 12 estações de radiossondagens, comparando-a com os valores da chuva. De uma maneira geral conclui que os picos nos valores da água precipitável mensal praticamente coincidem com as de precipitação média mensal e que a umidade total contida na atmosfera foi uma condição necessária mas não suficiente para a ocorrência de precipitação. Marques *et al.* (1977) estudaram as variações da água precipitável no trecho Belém-Manaus, com dados obtidos em 1972, cujos resultados, de um modo genérico, não diferem muito da média apresentada no presente trabalho.

Torrance (1975), na África do Sul, afirmou existir uma relação linear entre os totais diários de chuva e da água precipitável mas que os dias sem chuva podem ocorrer com qualquer valor da água precipitável.

Admite-se como sendo de 28mm o valor médio global para a água precipitável e que os máximos valores absolutos ocorrem no hemisfério sul mais precisamente na América do Sul e África equatorial nas proximidades das bacias dos rios Amazonas e Congo, sendo muito pequena a variabilidade estacional nestas regiões Peixoto *et al.* (1976).

Uma de suas aplicações é o estudo do seu papel na atenuação da radiação solar em todos os comprimentos de onda, constituindo-se a água precipitável uma camada ótica que seria penetrada pela radiação infravermelha. London (1952) fez um extenso estudo sobre o papel desempenhado pelo vapor d'água no aquecimento atmosférico e Yamamoto (1962) utiliza os dados de London para a estimativa da absorção da radiação solar direta pelo vapor d'água atmosférico. Hutcherson (1964) apresentou tabelas e gráficos do coeficiente de transmissão para o vapor d'água atmosférico

em função do comprimento de onda e do valor da água precipitável. Segundo Peixoto (1968) o balanço de energia no sistema globo-atmosfera é altamente influenciado pela absorção seletiva da radiação solar pelo vapor d'água existente na atmosfera: a quantidade de energia solar absorvida e difundida pela atmosfera pode ser em cada ponto, representada por uma função do produto do número de massas óticas (m) pela água precipitável por umidade de massa ótica (W_p); a absorvidade da atmosfera pode ser expressa por $a = 0,09 (W_p \cdot m)^{0,39}$ e que a energia absorvida pela atmosfera para um ângulo zenital z do sol é: $A(z) = 0,180 (W_p \cdot \sec z)^{0,39} \cdot \cos z$. O próprio diagrama de Elsasser (1960) para a estimativa da absorção da radiação terrestre pelo vapor d'água tem por ordenada a água precipitável.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente estudo foram obtidos a partir da rede de estações de radiossondagens na região, para o período 1972/1975 através da análise de 9348 radiossondagens (Marques *et al.*, 1979). A partir dos dados básicos informados (pressão, temperatura e umidade relativa) foram computados os valores da umidade específica q e água precipitável W_p , aplicando-se as metodologias de cálculo descritas em Marques (1976 e 1978).

Para o cálculo dos parâmetros \bar{W}_p e \bar{q} na camada limitada pelos níveis isobáricos padrões de 1000 e 500 milibares, foram determinadas as sub-camadas 1000/950, 950/900, 900/850, 850/800, 800/700, 700/600 e 600/500. Com isto procurou-se minimizar a diferença introduzida quando utilizam-se somente níveis padrões 1000, 850, 700 e 500mb Palmén (1967).

RESULTADOS OBTIDOS

Na tabela 1 estão sumarizados os resultados médios obtidos para as várias localidades estudadas e sua representação acha-se na figura 1. Na figura 2 são apresentadas as variações mensais durante o período estudado (1972/1975) para algumas localidades. Infe-

TABELA 1 — Valores médios mensais obtidos para a água precipitável (Wp), em mm, no período 1972/1975

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Amplitude Obs. anual
Pelém	43,4	45,6	46,1	47,5	45,0	41,7	41,0	38,9	37,2	36,5	37,9	41,5	41,9	11,0
Bogotá	13,3	13,3	14,7	14,9	15,9	15,7	14,3	14,6	14,9	14,5	15,2	12,8	14,5	3,1
Brasília	28,8	29,1	33,0	27,4	21,4	18,8	16,3	16,1	19,3	29,0	32,0	30,8	25,2	16,9
Carolina	42,8	38,5	43,7	45,6	44,1	40,9	35,3	39,4	39,8	42,5	40,2	43,9	41,4	10,3
Iquitos									47,8	47,9	52,2	49,3		(3)
Lima	38,5	39,2	42,6	38,3	29,5	24,3	20,4	21,0	22,3	24,4	27,0	31,9	30,0	8,2
Manaus	44,7	47,2	46,7	47,9	44,9	43,8	42,8	41,1	39,4	40,2	45,2	46,5	44,2	8,5
Maracay	26,3	23,5	27,0	27,4	36,4	35,8	35,0	34,5	36,0	34,4	35,2	28,4	31,3	12,9
S. Antonio									34,9	40,1	38,3	31,1		(1)
S. Elena									30,2					(2)
Vilhena	32,5	33,2	31,3	26,3	27,2	24,3	20,4	23,3	24,8	29,7	32,1	31,8	28,1	12,8

- (1) — Somente 1973 e 1974
- (2) — Somente 1974
- (3) — Somente 1975
- (4) — Somente 1972
- (5) — Somente 1972, 1973 e 1974

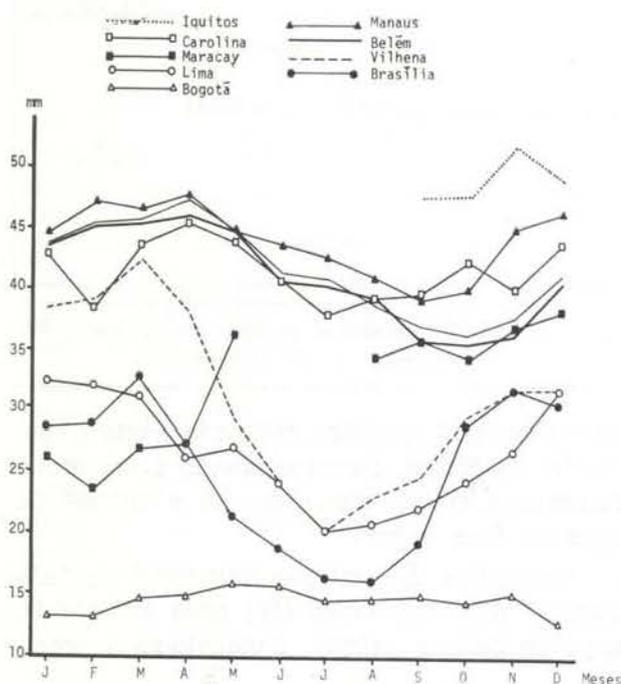


Fig. 1 — Valores mensais da água precipitável Wp, em mm. Média do período 1972/1975.

lizmente Vilhena e Carolina estão com suas séries de dados incompletas sendo que Carolina apresenta uma variação muito acentuada nos seus valores. Verificamos que os maiores valores para água precipitável acham-se em Belém, Manaus e possivelmente, Iquitos.

O armazenamento...

Nas figuras 3 a 6 acham-se representados os campos da água precipitável em março, junho, setembro e dezembro. De um modo geral a área de máximos valores estendem-se ao longo da bacia Amazônica, concordando com as áreas de maiores valores da precipitação. Há evidência de uma maior concentração do vapor d'água atmosférico sobre a área entre Manaus e Iquitos.

Na figura 7 apresenta-se a análise espacial da diferença observada entre os valores médios no verão e inverno, $\Delta Wp = Wp(\text{verão}) - Wp(\text{inverno})$. Nota-se que os valores máximos de ΔWp situa-se no alto Amazonas. Mesmo assim, esta diferença é bem pequena quando comparada com os valores da precipitação e divergência do campo do fluxo de vapor, cujos resultados serão apresentados em artigo posterior (Marques *et al.*, s/d).

Sellers (1965) apresenta o valor $Wp = 40,9\text{mm}$ como o valor médio global para a faixa compreendida entre os paralelos $0 - 10^{\circ}\text{S}$, estimada em uma coluna que se estende desde o solo até o topo da atmosfera. Os dados apresentados no presente trabalho estão de acordo com aqueles de Sellers, se bem que aquele autor não identifica o período de estudo. Segundo os dados pesquisados, o valor médio da água precipitável para todo o globo é de aproximadamente 28mm ; o valor médio

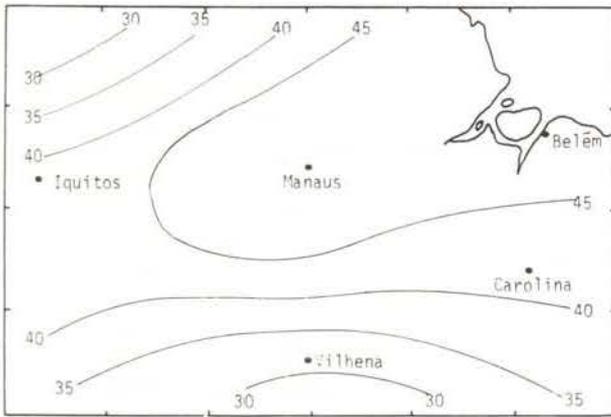


Fig. 3 — Distribuição espacial da água precipitável W_p no mês de março. Média do período 1972/1975. Isolinhas em mm.

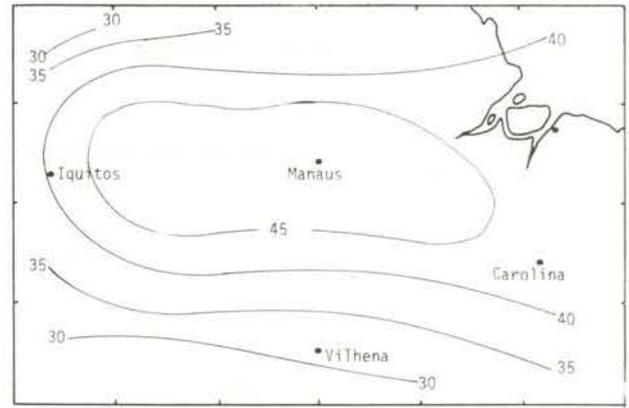


Fig. 6 — Distribuição espacial da água precipitável W_p no mês de dezembro. Média do período 1972/1975. Isolinhas em mm.

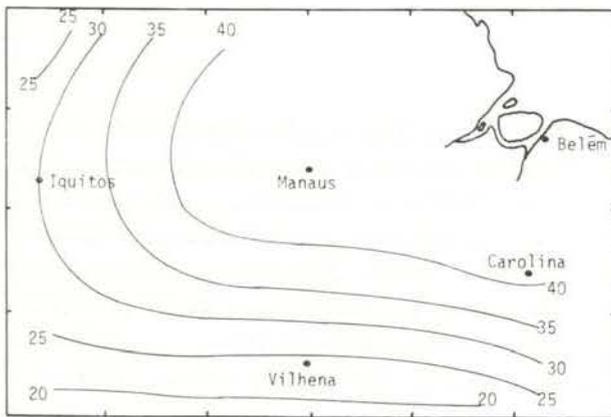


Fig. 4 — Distribuição espacial da água precipitável W_p no mês de junho. Média do período 1972/1975. Isolinhas em mm.

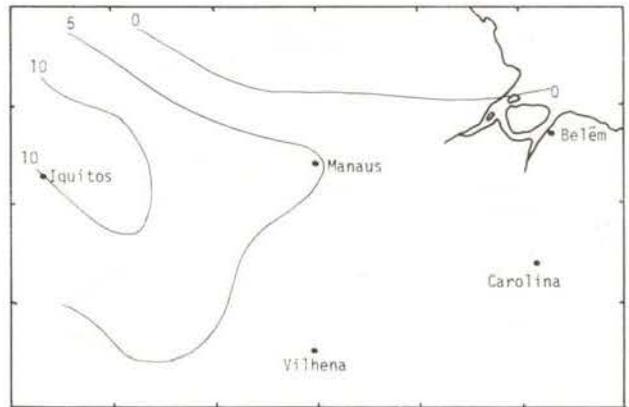


Fig. 7 — Variação estacional da água precipitável $\Delta W_p = (\text{verão}) - W_p (\text{inverno})$.

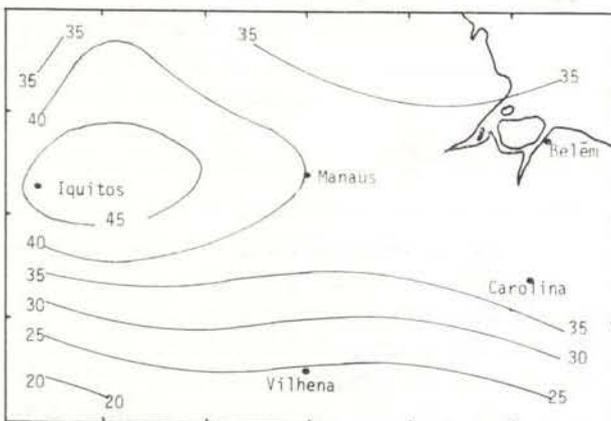


Fig. 5 — Distribuição espacial da água precipitável W_p no mês de setembro. Média do período 1972/1975. Isolinhas em mm.

para a bacia Amazônica estimado neste trabalho foi de 35mm, correspondendo a um armazenamento médio diário de $1,8 \times 10^{11} \text{m}^3$ de água na fase vapor.

Uma idéia da variação latitudinal da "eficiência" da precipitação (E_f) pode ser obtida, segundo Sellers (1965), dividindo-se a precipitação média diária ($r = \frac{R}{365}$) pela água

precipitável média; sendo R a precipitação total anual esta relação pode ser considerada como, na média, a fração da umidade global que cai como precipitação em um dia. Segundo o mesmo autor, os valores desta "eficiência" são maiores nas altas latitudes em ambos os hemisférios onde ciclones tropicais são mais ativos e entre o equador e 10°N , na zona de convergência intertropical. Para o

globo como um todo, cerca de 12% da umidade precipita em um dia médio, dando um tempo de reciclagem de 8 dias para o vapor d'água atmosférico. Para a bacia Amazônica encontrou-se o valor $E_f = 18,2\%$ com um tem-

po de reciclagem de, aproximadamente, 5,5 dias.

Nas tabelas 2, 3 e 4 e figura 8 estão apresentadas as variações médias mensais em altitude, do índice umidade específica q em

TABELA 2 — Umidade específica (\bar{q}) em g/kg em Belém. Média do período 1972/1975.

Níveis (mb)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1000	17,7	17,3	17,5	17,6	17,5	17,0	16,7	17,3	16,9	17,5	17,7	17,9	17,4
950	15,8	15,0	15,4	15,3	14,8	14,3	14,0	14,7	14,3	14,8	15,0	15,2	14,9
900	12,9	12,9	13,2	13,3	12,6	12,4	12,1	12,8	11,8	11,5	11,7	12,6	12,5
850	10,9	11,1	11,5	11,7	11,3	10,5	10,6	10,9	10,7	9,8	9,8	10,3	10,7
800	9,3	9,6	9,9	10,3	9,8	9,0	9,2	8,5	8,4	8,3	8,4	8,9	9,1
700	5,8	6,8	6,8	7,3	6,9	6,4	6,3	4,7	4,4	4,3	4,3	5,4	5,8
600	4,1	5,2	5,0	5,2	4,8	3,9	3,6	2,8	2,6	2,2	3,0	3,8	3,8
500	2,7	3,1	2,9	3,2	2,6	2,0	1,7	1,2	1,0	1,0	1,6	2,2	2,2

TABELA 3 — Umidade específica (\bar{q}) em g/Kg em Manaus. Média do período 1972/1975

Níveis (mb)	Jan	Fev,	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1000	17,3	17,2	17,3	17,7	17,8	17,7	17,0	17,2	17,0	17,4	18,1	17,6	17,4
950	14,8	15,0	15,0	15,4	15,2	15,,1	14,6	15,0	14,1	14,4	15,5	15,2	14,9
900	13,0	13,2	13,0	13,4	13,0	13,2	12,8	13,1	12,4	12,4	13,6	13,3	13,0
850	11,4	11,8	11,6	11,8	11,3	11,4	11,3	11,6	10,9	11,1	12,1	11,8	11,5
800	10,0	10,4	10,0	10,5	9,8	9,8	9,5	9,3	8,5	9,1	10,2	10,2	9,8
700	6,6	7,4	7,5	7,6	6,8	6,7	6,5	5,7	5,2	5,3	6,2	6,9	6,5
600	4,6	5,3	5,1	5,3	4,4	3,6	3,8	2,8	3,2	3,2	4,1	5,1	4,2
500	2,5	3,0	3,0	2,9	2,4	2,0	1,8	1,4	1,7	1,6	2,4	2,8	2,3

TABELA 4 — Umidade específica (\bar{q}) em g/ Kg em Brasília. Média no período 1972/1975

Níveis (mb)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
900	12,8	13,3	14,0	12,7	10,7	9,2	8,4	7,6	8,3	12,3	13,6	13,2	11,3
850	11,3	11,5	12,4	11,3	9,7	8,4	7,5	6,8	7,5	10,6	12,1	11,8	10,1
800	9,9	9,9	10,9	9,9	8,4	7,4	6,7	6,1	6,7	9,5	10,5	10,3	8,8
700	6,9	6,9	7,8	6,2	4,7	4,2	3,2	4,2	5,0	7,2	7,8	7,4	6,0
600	4,0	4,1	5,2	3,5	2,0	1,7	1,5	1,4	2,5	4,6	4,9	4,6	3,3
500	2,0	1,9	2,9	1,8	1,0	0,9	0,8	0,7	1,2	2,2	2,7	2,5	1,8

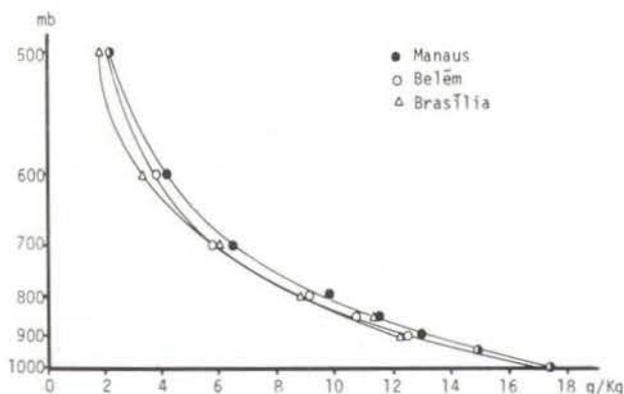


Fig. 8 — Distribuição vertical da umidade específica q (g/Kg). Média do período 1972/1975.

gramas de vapor por quilograma de ar úmido para Belém, Manaus e Brasília. Da análise desta figura verificamos que os maiores valores de q acham-se nos níveis mais baixos e decrescem exponencialmente e acima dos 500 milibares seus valores são menores que 1g/Kg.

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 DCA/CTA) e a Força Aérea Venezuelana pela cessão dos dados meteorológicos de altitude necessárias a esta pesquisa.

SUMMARY

Precipitable water vapor (Wp) and specific humidity, using 1972/1975 radiosonde data over the Amazon basin are presented — High values of Wp are located between Manaus and Iquitos. Mean Wp estimative over the basin is 35mm and the "precipitation efficiency" is 18.2% with a water vapor recycle time of 5.5 days. The mean Wp over Manaus, Belém and Brasília were 44.2, 41.9 and 25.1, respectively, in a 1000/500mb layer.

BIBLIOGRAFIA

- ANANTHAKRISHNAN, R.; SELVAM, M. & CHELLAPPA, R.
1965 — Seasonal variations of precipitable water vapour in the atmosphere over India. *Indian J. Meteor. Geophys.* 16(13) :
- BENWELL,
1965 — The estimation and variability of precipitable water. *The Meteor. Mag.*, London, 94(1120) : 319-327.
- ELSASSER, W.M.
1960 — Atmospheric radiation tables. *Met. Monogr.* Boston, 23(4) : 1-43.
- HOLZMAN, B.
1937 — Use of aerological sounding in determining the sources of moisture for precipitation. *Transpl. Am. Geoph. Un.*, 18 : 489-490.
- HUTCHERSON, D.C.
1964 — Water vapor in the atmosphere. In: **Humidity and moisture**, N.Y., Renhold Pub. Co., Vol. 2, p. 486-494.
- LONDON, J.
1952 — The distribution of radiational temperature change in the northern hemisphere during March. *J. Meteor.*, 9 : 145-151.
- MARQUES, J.
1976 — **Contribuição ao estudo hidrológico da bacia Amazônica**. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, 116 p.
1978 — **A transferência horizontal de vapor d'água na troposfera e a hidrologia da bacia Amazônica**. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, Piracicaba, 112 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.
- MARQUES, J.; SANTOS, J.M. DOS & SALATI, E.
1979 — O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a região Amazônica. *Acta Amazonica*, Manaus, 9(4) :
- MARQUES, J.; SALATI, E. & SANTOS, J.M. DOS
s/d — A divergência do campo do fluxo de vapor d'água e as chuvas na região Amazônica. A ser publicado em *Acta Amazonica*.
- PALMÉN, E.
1967 — The computation of the atmospheric moisture transport for hidrological purposes. *WHO/IHD Report n.º 1*. Geneve.
- PEIXOTO, J.P.
1968 — Sobre a energética do ciclo hidrológico. *Memórias Acad. Ci. Lisboa, Classe de Ciências*, Separata, Tomo 12.
- PEIXOTO, J.P.; ROSEN, R.D. & MAO-FU, W.U.
1976 — Seasonal variability in the Pole-to-Pole water vapor balance during the IGY. *Nordic Hydrology*, Denamark, 7(2) : 95-114.
- REITAN, C.H.
1960 — Distribution of precipitable water vapor over the continental United States. *Bull. Am. Met. Soc.*, Boston, 41(2) : 79-87.

- SELLERS, W.D.
1965 — The climatology of the hemispheres. In: **Physical Climatology**, pg. 4-10, the Un. Chicago Press, 272 p.
- SHOWALTER, A.K.
1954 — Precipitation water template. **Bull. Am. Meteor. Soc.**, Boston, 35(3) : 129-131.
- SOLOT, S.B.
1939 — Computation of depth of precipitable water in a column of air. **Month Weather Rev.**, London, 100 : 103, April.
- SPAR, J.A.
1953 — A suggested technique for quantitative precipitation forecasting. **Month Weather Rev.**, 81(8) : 217-221.
- TORRANCE, J.D.
1975 — Availability of atmospheric water. **Trans. Rhodesian Sci. Ass.**, Salisbury, 56(2) : 31-45.
- YAMAMOTO, G.
1962 — Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen. **J. Atmosph. Sci.**, 19 : 182-188.

(Aceito para publicação em 28/09/79)