

TRANSPORTE E BALANÇO DE VAPOR D'ÁGUA ATMOSFÉRICO SOBRE O NORDESTE DO BRASIL⁽¹⁾

ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI, ADILSON WAGNER GANDU, PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO

¹Departamento de Ciências Atmosféricas – DCA, Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó.
C.E.P: 58.109-970 - Campina Grande – PB.
Fone/Fax: (0xx83)3101202 – E-mail: enilson@dca.ufpb.br

RESUMO

Na realização deste trabalho, foram analisados aspectos da distribuição espacial e da variação interanual da água precipitável, do transporte de vapor d'água atmosférico e do balanço d'água para a atmosfera da região Nordeste do Brasil (NEB). Escolheu-se o trimestre março-abril-maio, período de maior contribuição para o total anual de chuvas no norte e leste da região. Analisou-se a variação interanual dos parâmetros atmosféricos, comparando-se anos contrastantes como 1983 (seco) e 1986 (chuvoso). O modelo *Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)* foi utilizado para a simulação dos campos de água precipitável e do fluxo de vapor d'água. Para inicializar o modelo RAMS, foram usados dados de reanálises do *National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction (NCAR/NCEP)*. Os resultados revelaram variações da água precipitável associadas à orografia da região. O fluxo de vapor d'água integrado verticalmente evidenciou uma relação da componente meridional com as chuvas no norte da região. Em 1986 (chuvoso), observou-se a importação de vapor d'água de 1,7 mm/dia, enquanto, em 1983 (seco), foi observada uma exportação de 1,8 mm/dia. O modelo RAMS mostrou-se eficiente para o estudo do teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do NEB e credencia-se como importante ferramenta para estudos futuros.

Palavras-chave: água precipitável, fluxo de vapor d'água, balanço de massa, modelo RAMS

ABSTRACT: ATMOSPHERIC WATER VAPOUR TRANSPORT AND BUDGET OVER NORTHEAST BRAZIL

In this study the spatial distribution and inter-annual variation of precipitable water, atmospheric water vapour transport and water budget over northeast Brazil (NEB) are investigated. The study is confined to the months March, April and May which represent the rainiest period of the year for the northern and eastern parts of the region. The inter-annual variations of the atmospheric parameters is analysed by comparing conditions during 1983 (dry) and 1986 (wet) years. The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), was used for the simulation of fields of precipitable water and water vapour flux. To initialize the RAMS, data from the National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction (NCAR/NCEP) reanalysis is used. The results reveal fluctuations in precipitable water content due to orographic effects. The vertically integrated water vapour flux indicates a relation between the meridional component and rains in northern part of region. In 1986 (wet year) the water vapour influx was 1.7 mm/day while during 1983 (dry year) the out-flux was 1.8 mm/day. Results of the study suggest that the RAMS model can provide a reliable tool for the study of atmospheric water vapour content and transport over NEB.

Key-words: precipitable water, water vapour flux, mass balance, RAMS model

1. INTRODUÇÃO

A tentativa de estudar-se o conteúdo e o transporte de água na atmosfera sobre a região Nordeste do Brasil - NEB, utilizando-se somente de informações convencionais de ar superior, obtidas através de radiossondagens, depara-se com os seguintes problemas: único horário de observações (12:00 UTC); séries

temporais com muitas falhas (dias sem sondagens) e distribuição espacial irregular (RAO e MARQUES, 1984; RATHOR, et al. 1987).

Uma alternativa é a utilização de dados oriundos de modelos numéricos globais, as denominadas "reanálises" (RAO, et al. 1996 e 1998). Esses dados, além de apresentarem consistências física e dinâmica impostas pelos próprios modelos, contêm informações

⁽¹⁾ Submetido em outubro/2001; aceito em maio/2002

obtidas por outros meios não convencionais disponíveis, que tentam suprir a deficiência em áreas sem ou com pouca medição. Como exemplo, têm-se as sondagens remotas por satélite "TIROS Operational Vertical Sounder" (TOVS). A operação desse tipo de modelo, contudo, requer grande infra-estrutura computacional, de comunicação e humana, com propósitos bem definidos. Portanto, a sua utilização para propósitos específicos relacionados ao NEB fica restrita.

Apesar de quase sempre dependerem dos modelos globais para assimilar informações da grande escala, os modelos regionais oferecem facilidades, por necessitarem de modesta infra-estrutura para sua operação e por oferecerem, ao pesquisador, total autonomia na caracterização do problema a ser analisado. Os modelos numéricos regionais podem assimilar dados de "reanálises", visando à simulação de dados em escala menor que as dos modelos globais e, desta forma, possibilitar a compreensão de efeitos de mesoescala (CAVALCANTI, 2001).

Neste contexto, tomou-se como objetivo estudar as características do balanço hídrico e do conteúdo e transporte do vapor d'água na atmosfera sobre o NEB, através do modelo regional de mesoescala "Regional Atmospheric Modeling System" - RAMS (PIELKE, et al. 1992) para o trimestre março-abril-maio (período com maior concentração de chuvas no norte e leste do NEB) de anos considerados seco e chuvoso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A região Nordeste do Brasil - NEB, está situada logo abaixo do Equador, ocupando a posição norte-oriental do País, entre 1° e 18° 30' de latitude Sul e 34° 20' e 48° 30' de longitude Oeste. Ocupa uma área de 1.561.177,8 km², o que representa 18,3% do território brasileiro.

Quatro regiões do NEB são muito bem identificadas: Zona da Mata; Agreste; Sertão (3/4 do território nordestino) e Meio-Norte (ver Figura 1).

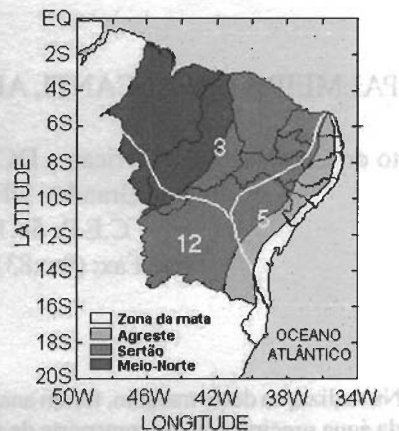


Figura 1 - NEB com suas regiões e os regimes de chuva com máximo em 3 - março, 5 - maio e 12 - dezembro. (Adaptado de Strang, 1972)

O NEB é conhecido pela predominância de características climática semi-áridas e por sua grande variabilidade temporal e espacial da precipitação, apresentando anos chuvosos e anos secos. Os sistemas atmosféricos de grande escala atuantes na região e que definem os regimes de precipitação, conforme Strang (1972) são: a) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), favorecendo a precipitação nos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, parte do Rio Grande do Norte e oeste da Paraíba e Pernambuco, nos meses de fevereiro, março e abril (Regime 3); b) penetração de resquícios de frentes frias na parte sul da Bahia e Maranhão em novembro, dezembro e janeiro (Regime 12); c) distúrbios de leste e frentes frias influenciando a precipitação em toda a costa leste do NEB, nos meses de abril, maio e junho (Regime 5); d) vórtices ciclônicos da alta troposfera com influência em todo o NEB, nos meses de dezembro e janeiro (NAMIAS, 1972; KOUSKY, 1979; KOUSKY & GAN, 1981). Sistemas de mesoescala do tipo complexos convectivos, linhas de instabilidade, etc., também oferecem contribuições com as precipitações do NEB.

A variabilidade interanual da estação chuvosa do NEB (mais precisamente no norte do NEB) é

relacionada a fenômenos externos à região. O “El Niño”/ Oscilação do Sul (ENOS) no Oceano Pacífico (RASMUSSEN e CARPENTER, 1982; TREMBERTH e SHEA, 1987; PHILANDER, 1990) e o “Dipolo” do Oceano Atlântico tropical (MOURA & SHUKLA, 1981) estão associados à qualidade da estação chuvosa do NEB. Em anos de “El Niño”, o Índice de Oscilação do Sul (IOS), dado pela diferença da pressão atmosférica entre Tahiti (18° S, 150° W) e Darwin (12° S, 130° L), é negativo, indicando alteração na circulação de Walker, acarretando movimento descendente sobre a região do NEB e inibindo a convecção e a conseqüente atuação dos sistemas que produzem chuvas na região; desta forma, está ligado a índices de precipitações pluviométricas abaixo da média. Já o “Dipolo” atua inibindo a precipitação do NEB quando o Atlântico Norte está mais aquecido que o Sul, provocando a intensificação da circulação da Célula de Hadley, não permitindo que a ZCIT atinja o norte do NEB. Efeitos contrários aos descritos favorecem uma estação chuvosa com índices pluviométricos acima da média.

2.2. Período de estudo

Nesse estudo, foram analisados períodos em que o NEB apresentou as seguintes condições: a) chuvoso, cuja precipitação sobre a maior parte da região se dá acima da média; b) seco, em que a maior parte da região apresenta precipitações abaixo da média climatológica.

Mediante esses critérios e com base em estudos realizados por Roucou et al. (1996), selecionaram-se para estudo os anos de 1983 (seco) e 1986 (chuvoso). Três meses referentes a cada ano foram analisados e correspondem aos meses de março, abril e maio, período de maior concentração de chuvas nas regiões norte e leste do NEB.

Nas Figuras 2 e 3, têm-se as distribuições espaciais dos desvios em relação à média climatológica, para os meses e anos mencionados ($P_i - \bar{P}$). Para a construção dessas figuras, utilizaram-se dados da rede pluviométrica do NEB, com cerca de 1.250 postos pluviométricos, sendo que, aproximadamente 92% dos postos apresentaram série temporal superior a 20 anos.

Para o ano de 1983, os desvios observados nas partes norte e leste do NEB (Figura 2) foram negativos e variam de -100 a -500mm, caracterizando o período de março a maio de 1983 como seco. Em 1986, foram observados, para os meses mencionados, desvios positivos entre 100 e 500mm em toda a parte norte do NEB (Figura 3). Desta forma, assumiu-se o ano de 1986 como chuvoso nesta parte da região.

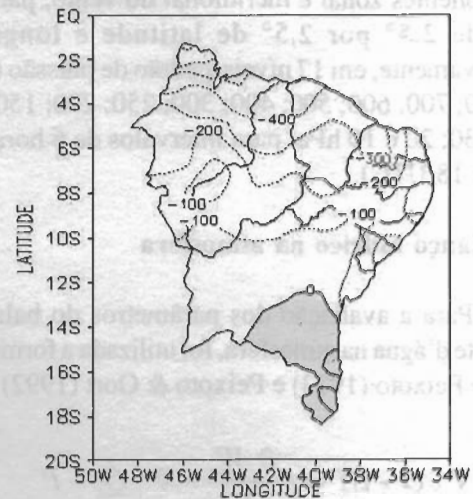


Figura 2 - Desvio do total da precipitação de março a maio de 1983, em relação à normal climatológica para o mesmo período ($P_{83} - \bar{P}$) em mm. Área sombreada indica precipitação acima da média

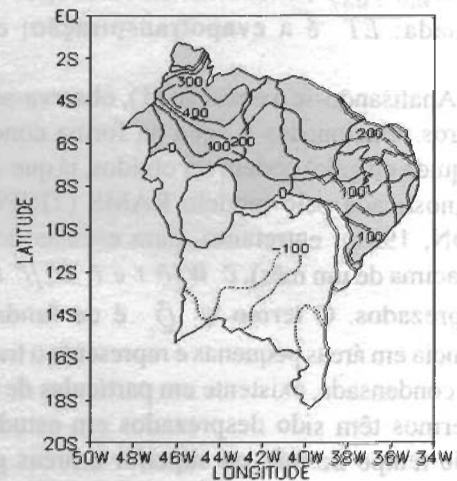


Figura 3 - Desvio do total da precipitação de março a maio de 1986, em relação à normal climatológica para o mesmo período ($P_{86} - \bar{P}$) em mm. Área sombreada indica precipitação acima da média.

2.3. Dados utilizados

Os dados de grande escala utilizados para inicializar e realimentar o modelo RAMS, para os meses e anos especificados, referem-se às “reanálises” do modelo global do “National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction” - NCAR/NCEP (KALNAY e JANNE, 1991; KALNAY, et al. 1996). As variáveis utilizadas são: altura geopotencial, temperatura do ar, umidade relativa do ar

e componentes zonal e meridional do vento, para uma grade de 2,5° por 2,5° de latitude e longitude, respectivamente, em 17 níveis-padrão de pressão (1000; 925; 850; 700; 600; 500; 400; 300; 250; 200; 150; 100; 70; 50; 30; 20 e 10 hPa) para intervalos de 6 horas (00; 06; 12 e 18 UTC).

2.4. Balanço hídrico na atmosfera

Para a avaliação dos parâmetros do balanço e transporte d'água na atmosfera, foi utilizada a formulação segundo Peixoto (1973) e Peixoto & Oort (1992)

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q} - ET = -\frac{\partial W_c}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{Q}_c - P \quad (1)$$

em que: W é o conteúdo de água na forma de vapor; W_c é o conteúdo de água na forma condensada; $\vec{Q} = Q_\lambda \hat{i} + Q_\phi \hat{j}$ é o fluxo horizontal de água na forma de vapor; $\vec{Q}_c = Q_{c\lambda} \hat{i} + Q_{c\phi} \hat{j}$ é o fluxo horizontal de água na forma condensada; ET é a evapotranspiração; e P é a precipitação.

Analisando-se a equação (1), observa-se que os parâmetros relacionados à água na forma condensada (água líquida ou gelo) podem ser obtidos, já que q_c pode ser diagnosticada pelo modelo RAMS (TRIPOLI & COTTON, 1981); entretanto, para escalas de tempo longas (acima de um mês), $\partial W/\partial t$ e $\partial W_c/\partial t$ podem ser desprezados. O termo $\nabla \cdot \vec{Q}_c$ é de fundamental importância em áreas pequenas e representa o transporte da água condensada, existente em partículas de nuvens. Esses termos têm sido desprezados em estudos para escala de tempo de mês ou superior e áreas grandes, ficando

$$\nabla \cdot \vec{Q} = ET - P \quad (2)$$

Os parâmetros de água precipitável (W) e fluxos zonal (Q_λ) e meridional (Q_ϕ) de vapor d'água foram avaliados segundo as fórmulas:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_{top}}^{p_s} q dp = \frac{1}{g} \sum_{n=1}^N \frac{[(q)_{n+1} + (q)_n]}{2} [(P)_n - (P)_{n+1}] \quad (3)$$

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{p_{top}}^{p_s} u q dp = \frac{1}{g} \sum_{n=1}^N \frac{[(u q)_{n+1} + (u q)_n]}{2} [(P)_n - (P)_{n+1}] \quad (4)$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int_{p_{top}}^{p_s} v q dp = \frac{1}{g} \sum_{n=1}^N \frac{[(v q)_{n+1} + (v q)_n]}{2} [(P)_n - (P)_{n+1}] \quad (5)$$

em que q é a umidade específica do ar; g é a aceleração gravitacional; P é a pressão; u e v são as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente, e N é o número de camadas do modelo.

Para o cálculo da divergência do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente sobre o norte do NEB, foi idealizado um "cubo" com base delimitada pelas coordenadas 3° - 10° S e 36° - 46° W e altura da superfície, até cerca de 20 hPa. Para garantir a continuidade de massa no "cubo", é feito um ajuste (RAO & MARQUES, 1984 e RAO et al. 1996) que se baseia no fato de o fluxo lateral de massa resultante no "cubo" ser zero.

2.5. Principais características da simulação

Utilizou-se a versão 3b do modelo RAMS. A grade foi definida com 62 por 62 pontos na horizontal, espaçamento de 40 km e centrada no ponto 10° S e 40° W, o que cobre toda a região do NEB. Na vertical, foram adotados 32 níveis, sendo 25 relativos à atmosfera (topo em cerca de 23.600 m ou 20 hPa) e 7 ao solo (profundidades: 00; 06; 12; 24; 48; 72 e 100 cm). As saídas das análises foram feitas a cada três horas de integração (00; 03; 06; 09; 12; 15; 18 e 21), constituindo-se em oito análises diárias.

O modelo foi inicializado na forma não homogênea, com as informações de grande escala do NCAR/NCEP, e realimentado pelas fronteiras a cada seis horas de integração. A formulação adotada é não hidrostática. Foram ativadas as parametrizações: Radiação de ondas curta e longa de Chen; Cumulus profundos; Solo e Vegetação; Difusão Turbulenta e Microfísica de nuvens.

Fez-se necessária definir uma cobertura vegetal compatível com a vegetação nativa da região e parâmetros associados a cada tipo de vegetação. Na definição da vegetação, utilizaram-se dados mensais de índice de vegetação por diferença normalizada ("Normalized Difference Vegetation Index" - NDVI), correspondente a um período de 10 anos, de 1981 a 1991, numa malha de pixel com resolução de 8 por 8 km (BRAGA, 2000). Para inferir o tipo de cobertura correspondente ao inerente ao modelo RAMS, calculou-se a média anual para os 10 anos e, após formatá-la de acordo com a grade do modelo (40 por 40 km), esta foi comparada com um mapa que fornece a vegetação nativa da região. A classificação é apresentada na Tabela 1. O resultado desta classificação pode ser observado através da Figura 4 para o NDVI, e o tipo de cobertura vegetal

usada pelo RAMS. Já para o tipo de solo, considerou-se uma distribuição homogênea para toda a região de domínio do modelo, como sendo o tipo 5 (franco). A umidade do solo foi considerada como sendo 50% para todas as camadas.

O modelo RAMS foi validado fazendo-se experimento numérico de forma a encontrar a melhor configuração do modelo para responder consistentemente aos fluxos de superfície, como: calor latente, calor sensível, radiação de ondas longas e de ondas curtas.

Tabela 1 - Classificação da vegetação para o NEB com base em informações do NDVI

Cobertura vegetal	Tipo no RAMS	Classes
Árvore com folhas longas e persistentes	06	NDVI > 0,45
Árvore com folhas longas e temporárias	05	0,45 ≥ NDVI > 0,40
Arbusto persistente	16	0,40 ≥ NDVI > 0,35
Arbusto temporário	17	0,35 ≥ NDVI > 0,00
Oceano	15	0,00 ≥ NDVI

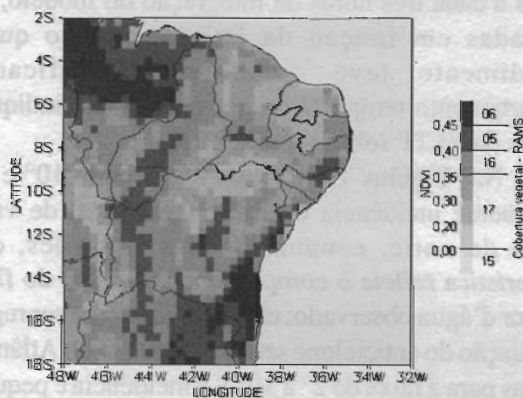


Figura 4 - Classificação do tipo de cobertura vegetal conforme o modelo RAMS

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Água precipitável

Na Tabela 2, encontram-se valores calculados da água precipitável, média espacial para o trimestre

março-abril-maio dos anos de 1983 e 1986, para cada um dos Estados do NEB, assim como para toda a região. Pode-se observar que a água precipitável para 1986 (chuvoso) foi superior a 1983 (seco) para todos os Estados. Comparado aos demais, o Maranhão foi o que apresentou os maiores valores de água precipitável, devido à localização próxima ao equador, à cobertura de floresta e à característica do relevo, em sua maior parte formado por planícies. Os menores valores foram observados para a Bahia, uma vez que sua extensa área com grandes elevações, como Diamantina e Espigão Mestre, além de sua localização ao sul do NEB, contribuem para isso.

A água precipitável média do período março-abril-maio, para o NEB, foi de 38,2 mm para o ano seco de 1983 e de 40,2 mm para o ano chuvoso de 1986. A diferença entre o ano chuvoso e o ano seco foi de 2 mm, o que representa uma diferença, em termos de volume, da ordem de $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ (três bilhões de metros cúbicos) de água na forma de vapor d'água. Sendo o armazenamento médio da atmosfera do NEB de $61,27 \times 10^9 \text{ m}^3$ e esta diferença representa 5 % do conteúdo médio, nesta época do ano.

Tabela 2 - Água precipitável (mm) e armazenamento médio (10^9 m^3) para os Estados do NEB no trimestre março-abril-maio de 1983 e 1986

Estados do NEB	Água Precipitável para março-abril-maio			Área e Armazenamento médio de água (vapor)	
	1983 (mm)	1986 (mm)	Média (mm)	Área (km^2)	Volume (10^9 m^3)
MA	42,8	44,0	43,4	333.365,6	14,47
PI	40,6	42,9	41,8	252.378,5	10,54
CE	40,1	41,9	41,0	149.325,7	6,12
RN	42,0	43,8	42,9	53.306,8	2,29
PB	37,4	39,8	38,6	56.584,6	2,18
PE	36,3	39,2	37,8	98.937,8	3,73
AL	39,9	42,9	41,4	27.933,1	1,16
SE	39,0	41,9	40,5	22.050,4	0,89
BA	34,0	36,1	35,1	567.295,3	19,88
NEB	38,2	40,2	39,2	1.561.177,8	61,27

3.2. Fluxo de vapor d'água

A variação interanual da componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente mostrou-se mais significativa para a caracterização dos contrastes, entre os anos estudados, que a componente zonal. Portanto, optou-se por analisar, com maior detalhamento, o comportamento da componente meridional média entre 48° e 32° W (média zonal) em função da latitude. Desta forma, nas Figuras 5 e 6, relativas aos anos de 1983 e 1986, respectivamente, as curvas representam os comportamentos quinzenais ao longo de cada trimestre (6 quinzenas). Nessas figuras, quanto mais afastada estiver a curva em relação ao eixo central, de valor nulo, mais intenso será o fluxo meridional (média zonal), podendo este assumir valores negativos, indicando transporte de norte para sul, ou positivos, indicando transporte no sentido contrário.

Durante o período seco de 1983, na parte norte do NEB, 66,7% das quinzenas apresentaram valores mais intensos do fluxo meridional (média zonal), convergindo para 80 kg/m.s, próximo de 2° S (Figura 5). Por outro lado, no período chuvoso de 1986, 50% das quinzenas apresentaram valores próximos de zero entre 2° e 10° S e uma outra curva com valores inferiores a 40 kg/m.s (Figura 6). As duas quinzenas de maio de 1986 foram as que mais se afastaram do padrão que indica a atuação da ZCIT na região, época em que esta migra para o Hemisfério Norte. É interessante observar que, além de serem conservadas as características da variação interanual, há indicação de variações dentro da própria estação chuvosa do norte do NEB.

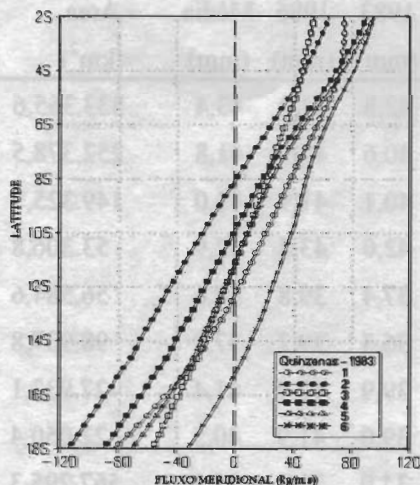


Figura 5 - Distribuição média zonal (48° - 32° W) da componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente - Q_y (Kg/m.s) para: médias quinzenais 1983 (seco)

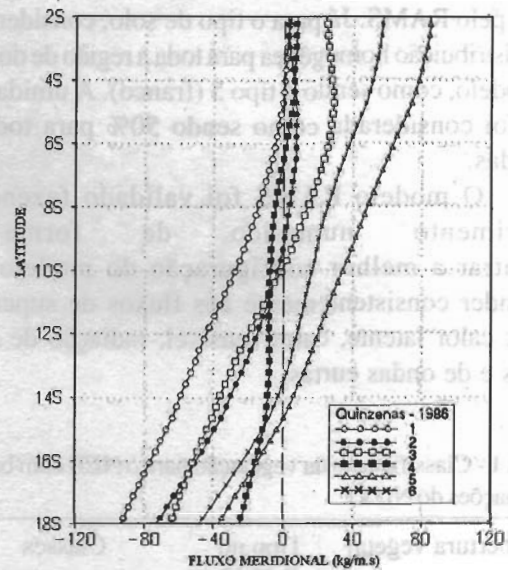


Figura 6 - Distribuição média zonal (48°-32° W) da componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente - Q_y (Kg/m.s) para: médias quinzenais 1986 (chuvoso)

Um refinamento maior dessa análise é apresentado com o auxílio das Figuras 7 e 8 para 1983 e 1986, respectivamente. Foi plotada a média zonal entre os meridianos de 48° e 32° W para o fluxo meridional de vapor d'água correspondente ao transporte de norte para sul (valores menores que zero). Essas médias, obtidas a cada três horas de integração do modelo, são mostradas em função da latitude, sendo que o procedimento teve como meta verificar o comportamento temporal de um padrão que indique a atuação da ZCIT sobre o norte NEB.

Nas Figuras 7 e 8, observa-se, entre 10° e 18° S, freqüente incidência de fluxo meridional de vapor d'água de norte, comum às duas situações, cuja característica reflete o comportamento médio do fluxo de vapor d'água observado; este padrão parece ser regido pela atuação do anticiclone semipermanente do Atlântico Sul, mas para a faixa de 2° a 10° S a incidência é pequena em 1983, comparada ao ano de 1986, indicando que, no trimestre março-abril-maio do ano seco de 1983, o fluxo meridional de vapor d'água esteve atuando fortemente nessa faixa de latitude, impedindo que a Zona de Convergência Intertropical alcançasse posição satisfatória para favorecer a ocorrência de chuvas nessa faixa do NEB. Para o trimestre de 1986, tem-se um padrão diferente ao de 1983, na faixa de 2° a 10° S. Observa-se (Figura 8) grande incidência de fluxo de vapor d'água de norte para sul (comportamento convergente), principalmente nos meses de março e abril (60 primeiros

dias), indicando uma atuação mais efetiva da ZCIT. Nos últimos 30 dias, houve considerável diminuição desse padrão, com menos incidência de fluxo de vapor d'água de norte, natural para a época do ano, quando a Zona de Convergência Intertropical já migra para alcançar latitudes mais ao norte. Resultados semelhantes foram obtidos por Rao & Marques (1984) usando radiossondagens.

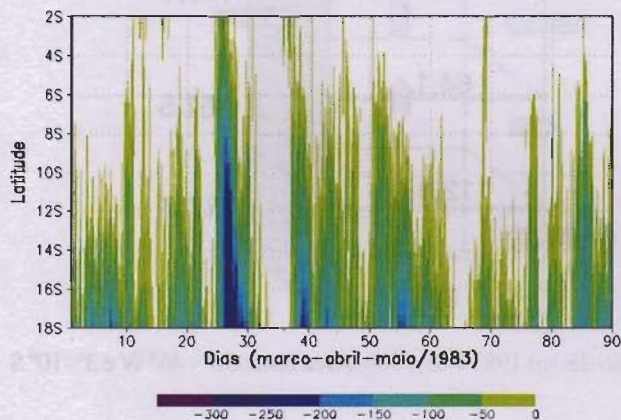


Figura 7- Distribuição da média zonal do fluxo meridional de vapor d'água integrado verticalmente - Q_0 (Kg/m.s) a cada 3 horas de integração, 1983 (seco). Plotada somente a componente de norte para sul

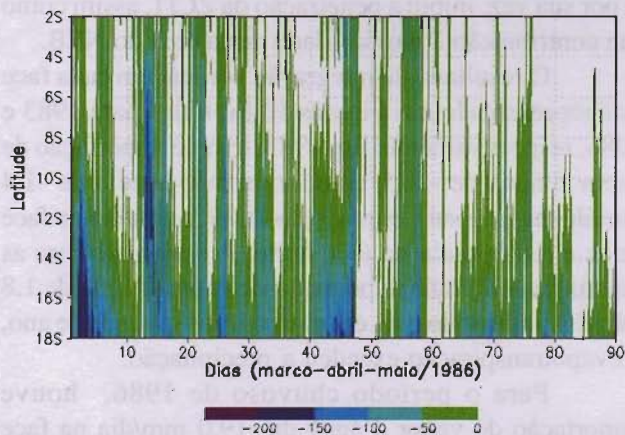


Figura 8 - Distribuição média zonal do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente - Q_0 (Kg/m.s) a cada 3 horas de integração, 1986 (chuvoso). Plotada somente a componente de norte para sul.

3.3. Balanço de massa

A Tabela 3 expressa o fluxo de massa resultante sobre a área norte do NEB para as camadas sup.-850;

850-700; 700-500; 500-200; 200-20 hPa. Na camada sup.-850 hPa, onde se concentra cerca de 40% do conteúdo total de água precipitável, há exportação de massa para o ano seco de 1983 e importação para o ano chuvoso de 1986. Condições semelhantes, com exportação em 1983 e importação em 1986, ainda se verificam quando se toma o saldo na camada sup.-700 hPa. Esses resultados indicam que as condições dinâmicas, no período chuvoso dessa área do NEB, favoreceram a convecção em 1986, com importação de massa nos níveis baixos e médios, e exportação nos níveis altos. Já para o trimestre março-abril-maio de 1983, as condições dinâmicas atuaram, em média, desfavoravelmente, inibindo ou reduzindo a convecção com exportação de massa nas camadas baixas e altas, e importação nas camadas intermediárias.

Tabela 3 - Balanço de massa para o trimestre março-abril-maio dos anos de 1983 e 1986. Área base: 36° - 46° W e 3° - 10° S

Camadas (hPa)	Fluxo de massa (10^7 kg/s)	
	Ano de 1983	Ano de 1986
Sup - 850	185,4	-112,6
850 - 700	-58,9	51,5
700 - 500	-238,4	-175,4
500 - 200	-49,0	2,9
200 - 020	160,9	233,6
Importação	-346,3	-288,0
Exportação	346,3	288,0
Balanço	0,0	0,0

O esquema gráfico traçado nas Figuras 9 (a) e (b) representa um sumário dos resultados discutidos anteriormente, em que as setas entrando no "cubo" indicam importação de massa e as que saem do "cubo", indicam exportação de massa. Neste contexto, no ano seco de 1983, os principais causadores da redução dos índices pluviométricos observados no trimestre mais chuvoso do ano foram os efeitos dinâmicos que, em média, atuaram inibindo a convecção nessa área do NEB, uma vez que se verificou haver substancial disponibilidade de vapor d'água na atmosfera em baixos níveis.

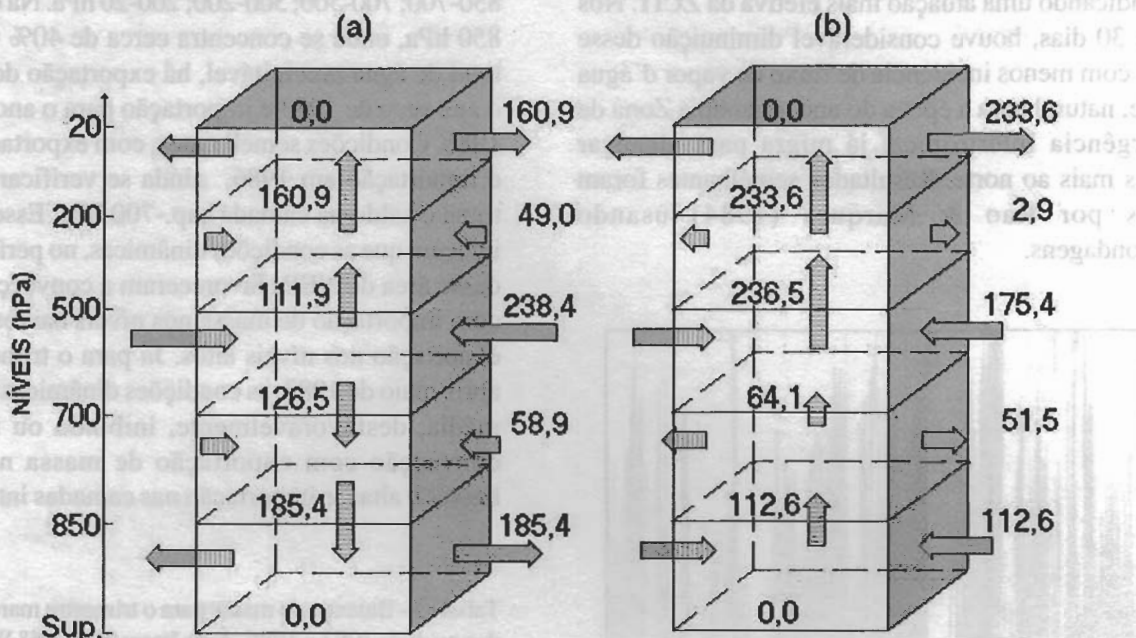


Figura 9 - Balanço de massa (10^7 kg/s) para o trimestre março-abril-maio de: (a) 1983 e (b) 1986. Área base: $36^\circ - 46^\circ \text{ W}$ e $3^\circ - 10^\circ \text{ S}$

3.4. Balanço de vapor d'água

O conteúdo de vapor d'água atmosférico que atravessou as faces laterais do "cubo" (faces leste; oeste; norte e sul) e o fluxo resultante obtido pela soma das faces, para o trimestre março-abril-maio de 1983 e 1986, respectivamente, apresentaram valores negativos, indicando a entrada de vapor d'água no "cubo" e os positivos, saída. Portanto, os resultados demonstram que a entrada de vapor d'água na parte norte do NEB se dá, efetivamente, através da face leste (em 36° W ao longo de $3^\circ - 10^\circ \text{ S}$) numa intensidade de cerca de $-20 \times 10^7 \text{ kg/s}$. Esse resultado comprova a importância do Oceano Atlântico Sul no processo de fornecimento de vapor d'água para o NEB, e sua variabilidade depende essencialmente do posicionamento do anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul. Em estudos realizados para a região Amazônica, Marques et al. (1979) constataram uma adição de vapor d'água de origem oceânica e com comportamento do fluxo predominantemente zonal.

Outro destaque é dado à face norte (em 3° S ao longo de $46^\circ - 36^\circ \text{ W}$), zonalmente posicionada em três graus sul, por representar bem o comportamento da atuação do fluxo meridional de vapor d'água. Observa-

se que, em 1983, o fluxo de vapor d'água, saindo do "cubo" através desta face, foi de $5,8 \times 10^7 \text{ kg/s}$ contra $1,0 \times 10^7 \text{ kg/s}$ para 1986. Desta forma, comprova-se, mais uma vez, que, no ano seco de 1983, o fluxo meridional de vapor d'água atuou mais intensamente nesta latitude e, por sua vez, inibiu a penetração da ZCIT, assim como sua contribuição à pluviosidade desta área do NEB.

O resultado da integração vertical em cada face está representado nas Figuras 10 (a) e (b) para 1983 e 1986, respectivamente. Em 1983, tem-se importação de vapor d'água de $-20,5 \text{ mm/dia}$ na face leste e de $-1,4 \text{ mm/dia}$ na face sul e exportação de $17,9 \text{ mm/dia}$ na face oeste e $5,8 \text{ mm/dia}$ na face norte. A resultante para as quatro faces dá uma exportação de vapor d'água de $1,8 \text{ mm/dia}$, indicando que, em março-abril-maio deste ano, a evapotranspiração excedeu a precipitação.

Para o período chuvoso de 1986, houve importação de vapor d'água de $-19,0 \text{ mm/dia}$ na face leste e de $-1,1 \text{ mm/dia}$ na face sul e exportação de $17,4 \text{ mm/dia}$ na face oeste e de 1 mm/dia na face norte. Assim, a resultante para as quatro faces do "cubo" dá uma importação de $-1,7 \text{ mm/dia}$, caso em que a precipitação excedeu a evapotranspiração e, portanto, explica por que março-abril-maio de 1986 foi chuvoso.

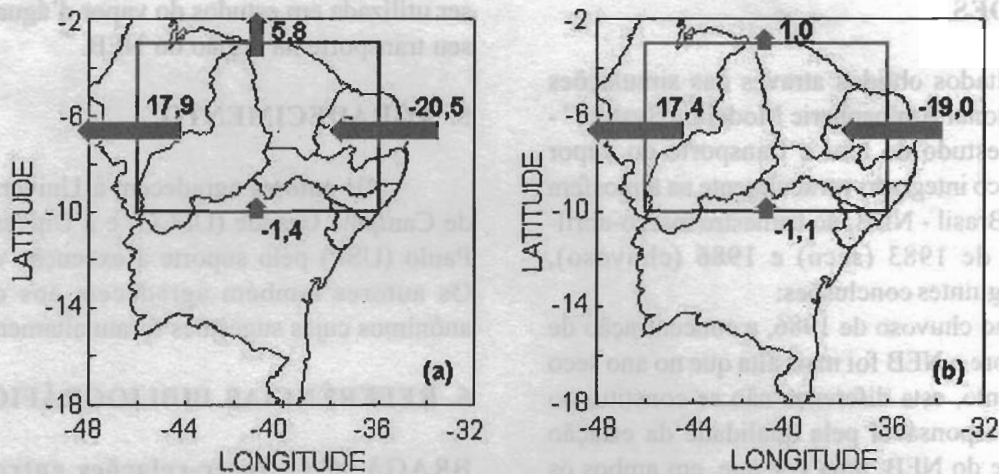


Figura 10 - Balanço do fluxo de vapor d'água (mm/dia) nas faces laterais do cubo (36°-46° W e 3°-10°S) sobre o NEB (mm/dia): (a)1983 e (b)1986.

Por intermédio da Tabela 4, é possível notar o comportamento de cada mês do trimestre nos dois anos contrastantes. Para 1983, os três meses apresentaram balanço positivo (exportação de vapor d'água), enquanto,

para 1986, todos os meses apresentaram balanço negativo (importação de vapor d'água) com importação máxima em março, diminuindo seqüencialmente em abril e maio, quando já se estabelece o final do período de chuvas na área.

Tabela 4 - Balanço do fluxo de vapor d'água nas faces laterais do cubo (36°- 46° W e 3°-10°S) sobre o NEB (mm/dia)

Faces	Ano de 1983				Ano de 1986			
	março	abril	maio	trimestre	março	abril	maio	trimestre
Leste	-18,1	-21,2	-22,2	-20,5	-14,9	-19,6	-22,3	-19,0
Oeste	15,0	18,8	19,8	17,9	13,3	18,9	19,9	17,4
Norte	5,1	4,6	7,6	5,8	-1,7	-0,8	5,4	1,0
Sul	-0,2	-0,9	-3,1	-1,4	0,5	-0,4	-3,4	-1,1
Balanço	1,8	1,3	2,1	1,8	-2,8	-1,9	-0,4	-1,7

Pelas contribuições em diferentes camadas para o balanço de vapor d'água (Tabela 5), pode-se verificar que as maiores contribuições se dão nos níveis baixos da atmosfera, entre a superfície e 850 hPa, sendo que, nessa camada, a quantidade de vapor d'água exportada em 1983 foi de duas vezes a importada em 1986. Para 1983, tem-se exportação de 3,2 mm/dia e importação de -1,4 mm/dia, com balanço final de 1,8 mm/dia, mas, para 1986, tem-se exportação de 0,6 mm/dia e importação de -2,3 mm/dia com balanço final de -1,7 mm/dia.

Tabela 5 - Balanço de vapor d'água para o trimestre março-abril-maio dos anos de 1983 e 1986

Camadas (hPa)	Vapor d'água (mm/dia)	
	Ano de 1983	Ano de 1986
Sup - 850	3,0	-1,5
850 - 700	-0,4	0,5
700 - 500	-1,0	-0,8
500 - 200	0,2	0,1
200 - 020	-	-
Importação	-1,4	-2,3
Exportação	3,2	0,6
Balanço	1,8	-1,7

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através das simulações feitas pelo "Regional Atmospheric Modeling System" - RAMS, para o estudo do teor e transporte do vapor d'água atmosférico integrado verticalmente na atmosfera do Nordeste do Brasil - NEB, no trimestre março-abril-maio dos anos de 1983 (seco) e 1986 (chuvoso), permitiram as seguintes conclusões:

1) No ano chuvoso de 1986, a concentração de vapor d'água sobre o NEB foi mais alta que no ano seco de 1983; entretanto, esta diferença não se constitui no principal fator responsável pela qualidade da estação chuvosa do norte do NEB, uma vez que, em ambos os anos, houve bastante vapor d'água disponível na atmosfera.

2) O suprimento de vapor d'água para a atmosfera do NEB é feito pelos ventos Alísios, que transportam umidade do Oceano Atlântico Tropical para o interior da região e variam dependendo do posicionamento do Anticiclone Semipermanente do Atlântico Sul.

3) A atmosfera sobre o norte do NEB esteve mais convergente no trimestre chuvoso de 1986, apresentando maior incidência de componente meridional do fluxo de vapor d'água negativa, ou seja, de norte para sul.

4) As condições dinâmicas no período chuvoso do norte do NEB favoreceram a convecção em 1986, com importação de massa nos níveis baixos e médios, e exportação nos níveis altos; já para 1983, as condições dinâmicas atuaram em média, desfavoravelmente, inibindo ou reduzindo a convecção com exportação de massa nas camadas baixas e altas, e importação nas camadas intermediárias.

5) O fluxo de vapor d'água através da face norte do "cubo" sobre o NEB foi o que apresentou maior variação, 5,8 mm/dia para 1983 e 1,0 mm/dia para 1986, uma diferença de 4,8 mm/dia (redução de 83%) e confirma o enfraquecimento do fluxo meridional de vapor d'água, favorecendo a atuação da Zona de Convergência Intertropical sobre esta região, em 1986.

6) No período chuvoso, houve importação de vapor d'água de -1,7 mm/dia e, no período seco, ocorreu exportação de 1,8 mm/dia.

Esta simulação, feita com o modelo RAMS, foi capaz de reproduzir, com coerência, entendimentos obtidos anteriormente em estudos com sondagens aerológicas. Este fato contribui, efetivamente, para credenciar este modelo como importante ferramenta a

ser utilizada em estudos do vapor d'água atmosférico e seu transporte na região do NEB.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e à Universidade de São Paulo (USP) pelo suporte á execução deste trabalho. Os autores também agradecem aos dois revisores anônimos cujas sugestões foram altamente relevantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, C.C. **Inter-relações entre padrões de índices de vegetação e de pluviometria no Nordeste do Brasil**. 2000. 129f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) CDRN/CCT/Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2000.

CAVALCANTI, E.P. **Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil**. 2001. 115f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). CDRN/CCT/Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2001.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** Boston, v.77, n.3, p.437-471. 1996.

KALNAY, E.; JANNE, R. Summary of the NMC/NCAR reanalysis workshop of April 1991. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** Boston, v.72, n.12, p.1897-1904. 1991.

KOUSKY, V.E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.** Boston, v.107, p.1140-1153. 1979.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south Atlantic. **Tellus**. Copenhagen, v.33, p.539-551. 1981.

MARQUES, J.; SANTOS, J.M. dos; SALATI, E. O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a região Amazônica. **Acta Amazônica**, Manaus, n.9, p.701-713. 1979.

MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **J. Atmos. Sci.** Boston, v.38, p.2653-2675, 1981.

NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in Northeast Brazil. *Tellus*. Copenhagen, v.24, p.336-343, 1972.

PEIXOTO, J.P. **Atmospheric vapor flux computations for hydrological purposes.** World Meteorological Organization. Geneva: WMO/IHD, 1973. 83f. (Report, 20)

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H. **Physics of climate.** New York: American Institute of Physics, 1992. 520 f.

PHILANDER, S.G.H. **El Niño, La Niña, and the southern oscillation.** New York, Academic Press, 1990. 293f.

PIELKE, R.A. et al. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.* v.49, p.69-91, 1992.

RAO, V.B.; MARQUES, V. da S. Water vapor characteristics over Northeast Brazil during two contrasting years. *J. Clim. Appl. Meteorol.* Boston, v.23, n.3, p.440-444, 1984.

RAO, V.B.; CAVALCANTI, I.F.A.; HADA, K. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. *J. Geophys. Res.*, Washington, v.27, p.26539-26551, 1996.

RAO, V.B.; CHAPA, S.R.; CAVALCANTI, I.F.A. Moisture budget in the tropics and the Walker circulation. *J. Geophys. Res.*, Washington, v.103, p.13713-13728, 1998.

RASMUSSEN, E.M.; CARPENTER, T.H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.* Boston, v.110, p.354-384, 1982.

RATHOR, H.S.; ARAÚJO, M.A.A.; MELLO, C.C. Atmospheric water vapour flux and its divergence over the drought prone region of tropical Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geofís. Rio de Janeiro*, v.3, p.107-113, 1987.

ROUCOU, P. et al., Vertical motion changes related to north-east Brazil rainfall variability: A GCM simulation. *Int. J. Climatol.* Boston, Boston, v.16, p.879-891, 1996.

STRANG, D.M.G. **Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro.** São José dos Campos: CTA, 1972. (IAE-M-02/72).

TRENBERTH, K.E.; SHEA, D.J. On the evolution of the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* Boston, v.115, p.3078-3096, 1987.

TRIPOLI, G.J.; COTTON, W.R. The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models. *Mon. Wea. Rev.* Boston, v.109, p.1094-1102. 1981.