

**RANYÉRE SILVA NÓBREGA**

**ASPECTOS CLIMÁTICOS DA RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA SOBRE O  
BRASIL**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
MESTRADO EM METEOROLOGIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
METEOROLOGIA DE MESO E GRANDE ESCALA

Campina Grande – PB

2003

**RANYÉRE SILVA NÓBREGA**

**ASPECTOS CLIMÁTICOS DA RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA SOBRE O  
BRASIL**

Dissertação apresentada ao  
Curso de Mestrado em  
Meteorologia da Universidade  
Federal de Campina Grande,  
em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de  
mestre.

Orientadores: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti  
Prof. Dr. Enio Pereira de Souza

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Mestrado em Meteorologia



N754a Nóbrega, Ranyére Silva.  
Aspectos climáticos da reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil / Ranyére Silva Nóbrega. - Campina Grande, 2003. 90 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2003.  
"Orientação: Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti, Prof. Dr. Enio Pereira de Souza".  
Referências.

1. Vapor d'Água Atmosférico - Brasil. 2. Vapor d'Água - Reciclagem. 3. Aspectos Climáticos. 4. Meteorologia - Dissertação. I. Cavalcanti, Enilson Palmeira. II. Souza, Enio Pereira de. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

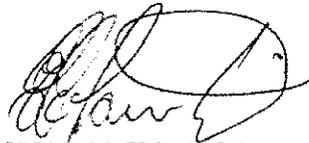
CDU 551.57(81)(043)

RANYÉRE SILVA NÓBREGA

ASPECTOS CLIMÁTICOS DA RECICLAGEM DE VAPOR D'ÁGUA  
SOBRE O BRASIL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/5/2003

BANCA EXAMINADORA



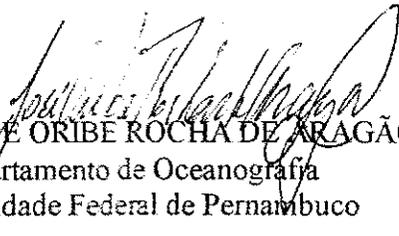
Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof.ª Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ ORIBE ROCHA DE ARAGÃO  
Departamento de Oceanografia  
Universidade Federal de Pernambuco

As minhas filhas Raissa  
Luana e Sonally, meus  
pais Rudenmére e Fátima,  
e a minha esposa Soraya,  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir-me chegar até aqui.

Aos meus pais Rudenmére e Fátima, simplesmente, por tudo.

A minha esposa Soraya, pelo seu companheirismo e compreensão.

Aos orientadores Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti e Dr. Enio Pereira de Souza, pela confiança depositada em mim.

A Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aos professores Dr. José Oribe Aragão e Dra. Maria Regina da Silva Aragão pela presença na Banca Examinadora.

A Universidade Federal de Campina Grande, pela infra-estrutura.

Ao Curso de Mestrado em Meteorologia, pela oportunidade profissional.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas da UFCG, pelo aprendizado.

A secretária Divanete Cruz, pela atenção dada aos alunos do curso.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas.

A minha irmã Fabíola, tios, tias, primos, sobrinhos, avós, enfim, todos os parentes e amigos que contribuíram de forma direta ou indireta nessa grata experiência profissional e de vida.

Muito Obrigado.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	13
ABSTRACT .....	14
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA ATMOSFÉRICO .....	21
2.2 RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA .....	26
3. MATERIAL E MÉTODO .....	34
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	34
3.2 PERÍODO DE ESTUDO .....	36
3.3 DADOS UTILIZADOS .....	37
3.3 FORMULAÇÃO TEÓRICA .....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1 FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA .....	45
4.2 – PRECIPITAÇÃO .....	52
4.3 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	58
4.4 – RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA .....	62
4.4.1 Área da Bacia Amazônica .....	67
4.4.2 Área Nordeste .....	72

4.4.3 Área Sul-Sudeste.....	75
4.5 Comentários Finais.....	78
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	80
5.1 SUGESTÕES.....	82
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema gráfico do volume armazenado de água nos oceanos, nos continentes e na atmosfera e precipitação pluviométrica (P), evaporação (E) e "runoff" (R <sub>0</sub> ). Adaptado de Peixoto e Oort (1992).....	16
Figura 2 – Esquema gráfico representativo do ciclo hidrológico.....	17
Figura 3 – Mapa geográfico do Brasil com áreas de estudo em destaque.....	36
Figura 4 – Modelo conceitual do fluxo de umidade atmosférica sobre uma região. Adaptado de Brubaker et al. (1993).....	39
Figura 5 – Valores da reciclagem do vapor d'água como função do fluxo de umidade e evapotranspiração para: (a) L = 500 km e (b) L = 1000 km. Adaptada de Trenberth (1999).....	41
Figura 6 – Esquema gráfico para o volume de controle.....	43
Figura 7 – Transporte de Vapor d'água integrado verticalmente - $\bar{Q}$ (kg/m.s), médias para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ.....	50
Figura 8 – Distribuição espacial da precipitação média para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ.....	56
Figura 9 – Distribuição espacial da evaporação média para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ.....	60
Figura 10 – Distribuição espacial da reciclagem do vapor d'água média para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ.....	65
Figura 11 – Relação entre F <sub>c</sub> e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Bacia Amazônica.....	69
Figura 12 – Comparação entre valores médios mensais de p encontrado por Brubaker et al.	

(1993) e nesse trabalho sobre a Bacia Amazônica: N – nesse trabalho; Br – Brubaker et al. (1993).....72

Figura 13 – Relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Nordeste.....74

Figura 14 – Relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Sul-Sudeste.....77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes utilizadas na estimacão de $\rho$ sobre a rea Bacia Amazônica .....	68
Tabela 2 – Fluxo médio de vapor d’água que entra (Fe) e que sai (Fs) em cada face (mm/mês) para a área da Bacia Amazônica .....	70
Tabela 3 – Comparaco entre os valores de Brubaker et al. (1993) e valores encontrados nesse trabalho das componentes utilizadas na estimacão de $\rho$ sobre a Bacia Amazônica: N – valores obtidos com os dados utilizados nesse trabalho; Br – Brubaker et al. (1993).....	71
Tabela 4: Componentes utilizadas na estimacão de $\rho$ sobre a rea Nordeste.....	73
Tabela 5: Fluxo médio de vapor d’água que entra (Fe) e que sai (Fs) em cada face (mm/mês) para a rea Nordeste .....	75
Tabela 6: Componentes utilizadas na estimacão de $\rho$ sobre a rea Sul-Sudeste .....	76
Tabela 7: Fluxo médio de vapor d’água que entra (Fe) e que sai (Fs) em cada face (mm/mês) para a rea Sul-Sudeste.....	78

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASO – Agosto, setembro e outubro

CMAP – Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation

ECMWF – European Centre for Medium-range Weather Forecasts

ENSO – El-Niño Oscilação Sul

FMA – Fevereiro, março e abril

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

MJJ – Maio, junho e julho

NCEP/NCAR – National Center of Environmental Prediction

NDJ – Novembro, dezembro e janeiro

NEB – Nordeste do Brasil

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

ET – evapotranspiração

F – fluxo de umidade

$F_a$  – fluxo absoluto

$F_e$  – fluxo de umidade que entra

$F_r$  – fluxo resultante

$F_s$  – fluxo de umidade que sai

L – Comprimento de escala

P – precipitação total

$P_a$  – precipitação advectiva

$P_m$  – Precipitação local

Q – transporte horizontal de vapor d'água

$\rho$  – reciclagem do vapor d'água

## RESUMO

Nesse estudo foram investigados aspectos climáticos da reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil. Reciclagem do vapor d'água refere-se ao mecanismo de realimentação do sistema Terra-Atmosfera em que certa fração da água evaporada sobre uma região cai novamente como precipitação na mesma região. Foram estudados os campos do fluxo de vapor d'água, evapotranspiração e precipitação durante quatro trimestres (fevereiro-abril, maio-julho, agosto-outubro, novembro-janeiro) utilizando 15 anos de "reanálises" do NCEP/NCAR ("National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research"). Também foram calculados valores médios mensais da reciclagem do vapor d'água em três áreas de iguais tamanhos (15° de latitude por 15° de longitude) sobre o Brasil utilizando 40 anos de reanálises do NCEP/NCAR. Os resultados revelaram reciclagens do vapor d'água relativamente pequenas sobre as regiões Norte e Nordeste, relacionada ao fluxo de vapor d'água mais intenso. No entanto, os resultados revelaram um transporte de vapor d'água significativo da região Norte para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Sobre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, a reciclagem do vapor d'água foi mais significativa, relacionada ao fluxo de vapor d'água menos intenso. Os aspectos climatológicos da reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil indicam que os processos advectivos são mais importantes para a precipitação sobre as regiões Norte e Nordeste, enquanto nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, os processos locais têm importante papel na precipitação sobre as regiões. Esses resultados evidenciam que a quantificação da reciclagem do vapor d'água é um indicador da importância dos processos da superfície da terra para o balanço hídrico e, é também, um indicador da sensibilidade climática em relação a esses processos.

## ABSTRACT

In this study we investigated climatic aspects of the water vapor recycling on Brazil. Water vapor recycling refers to the feedback mechanism of the Land-Atmosphere system in which a certain fraction of water evaporated at a region falls again as precipitation at the same region. To evaluate these climatic aspects we studied the fields of the water vapor flow, evapotranspiration and precipitation in four terms (February-April, May-July, August-October, November-January) using 15 years of reanalysis of NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research). We also analyzed monthly average values of the water vapor recycling in three areas of equal sizes ( $15^\circ$  of latitude for  $15^\circ$  of longitude) in Brazil using 40 years of reanalysis of NCEP/NCAR. The results revealed recycling relatively low in the North and North-East regions, where the water vapor flow is more intense. However, the results revealed a transportation of water vapor from the Northern region to the Center-West, South-East and South regions. About the Center-West, South-East and South regions, where the water vapor flow is less intense, the water vapor recycling is more significant. The climatological aspects of the recycling of the water vapor on Brazil indicate that the processes advectivos are more important in the precipitation on the Northern and North-East regions, while in the Center-West, Southeast and South regions, the local processes have important paper in the precipitation. The results evidence that the water vapor recycling quantification is an indicator of the importance of the land-surface process to the hydrological cycle and it is, as well, an indicator of the climatic sensitivity.

## **1 INTRODUÇÃO**

A Terra possui aproximadamente 70% de sua superfície coberta pelos oceanos. Apesar de apenas um centésimo de água existente no mundo estar disponível para utilização, a água é um dos elementos responsáveis pelo funcionamento da grande máquina que é a vida. Cerca de 97% do volume total de água na hidrosfera estão contidos nos oceanos, enquanto que apenas 2,4% estão nos continentes, incluindo as regiões glaciais (Peixoto e Oort, 1992). A atmosfera contém 0,001% do total. O que aparentemente tem pequena representação, equivale a um volume em torno de 13 trilhões de metros cúbicos de água, como apresentado na Figura 1. Quantitativamente a água representa o constituinte orgânico mais abundante na matéria viva. O homem possui aproximadamente 63% do seu peso constituído de água e alguns animais aquáticos chegam a ser formados de até 98% deste composto.

Devido às diferentes e particulares condições climáticas e termodinâmicas presentes no planeta Terra, a água pode ser encontrada, na natureza, em vários estados: sólido, líquido e gasoso. As regiões glaciais do globo terrestre comportam grande volume de água na

forma de gelo. Oceanos e mares são os principais reservatórios de água na forma líquida cobrindo até três quartos da superfície do planeta Terra.

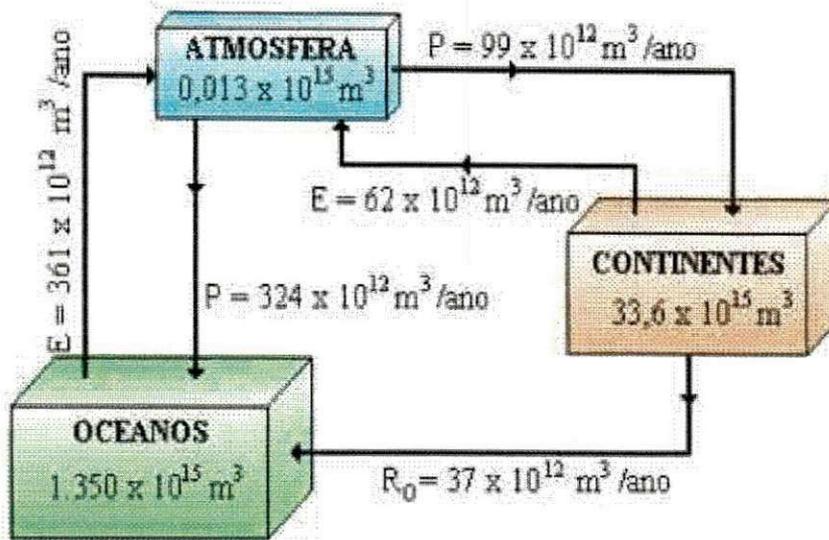


Figura 1 – Esquema gráfico do volume armazenado de água nos oceanos, nos continentes e na atmosfera e precipitação pluviométrica (P), evaporação (E) e "runoff" (R<sub>0</sub>). Adaptado de Peixoto e Oort (1992)

Na atmosfera, o vapor d'água em forma de nuvens pode ser transformado em chuva, neve ou granizo, dependendo das condições do tempo. Essa transformação provoca o que se chama de precipitação. A precipitação ocorre sobre a superfície do planeta, tanto nos continentes quanto nos oceanos. Nos continentes, uma parte das precipitações é devolvida para a atmosfera graças à evapotranspiração, outra parte escoar para os oceanos depois de percorrer os caminhos recortados pelos rios. O excesso de vapor sobre os oceanos é transportado para os continentes. Esse processo de troca de água entre a superfície e atmosfera é chamado de ciclo hidrológico.

Durante esse processo o Sol tem papel fundamental pois faz evaporar, através da radiação solar, a água dos rios, dos lagos, dos oceanos, do solo e de todos os seres vivos. Com a evaporação formam-se as nuvens, e das nuvens as águas retornam na forma de precipitação. Ao atingir o solo, uma parte infiltra-se, promovendo a recarga das reservas freáticas e o re-umedecimento do solo, ou seja, dos depósitos de água disponíveis para a vegetação terrestre e para as atividades biológicas, outra parte escoam para os rios, lagos e oceanos. A água acumulada por efeito da infiltração em parte retorna à superfície na forma de nascentes e outra parte é restituída à atmosfera por meio da evaporação.

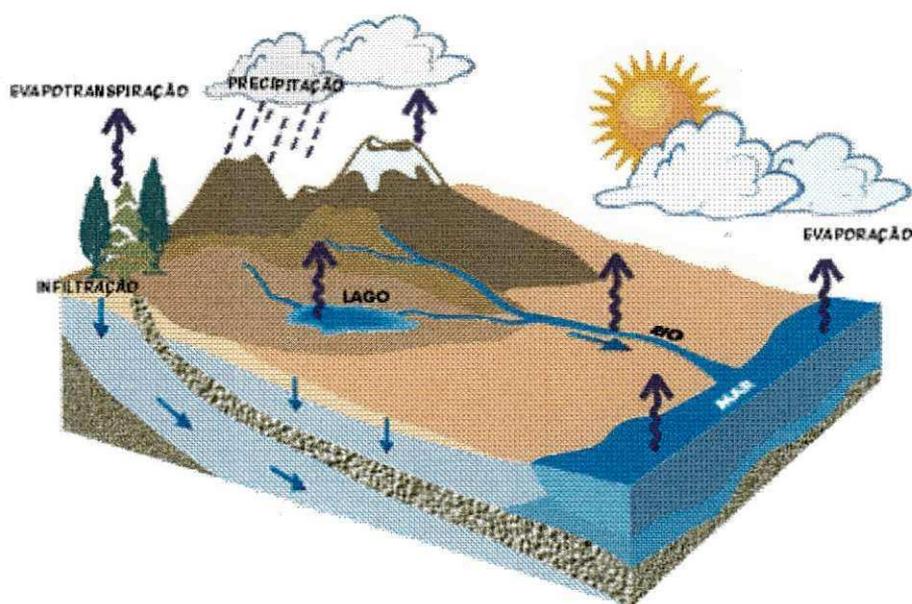


Figura 2 – Esquema gráfico representativo do ciclo hidrológico

No ramo atmosférico do ciclo hidrológico, o transporte de vapor d'água na atmosfera é um componente muito importante, pois é através deste que grande quantidade de água é transportada, na forma de vapor, de uma região para outra. Os oceanos e grandes reservatórios d'água, principais fontes de vapor d'água na superfície da Terra, abastecem a

atmosfera com vapor d'água mediante o processo de evaporação.

Para que ocorra a evaporação, é necessário que exista disponibilidade de umidade na superfície e disponibilidade de energia, já que a mudança de fase da água da forma líquida para a forma de vapor d'água consome energia, que é armazenada na forma de calor latente e liberada quando ocorre condensação (Brubaker et al., 1993; Burde e Zangvil, 2001a).

Nesse processo, a vegetação tem importante função na aceleração do processo de evaporação, através da transpiração das superfícies das folhas, repondo o vapor d'água na atmosfera, contribuindo, em parte, para o equilíbrio do clima e da própria atmosfera, e também para a prevenção dos fenômenos de erosão provocados pela ação mecânica da água sobre o solo. Parte da água acumulada que retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração é de suma importância para a precipitação.

Antes de 1930, o papel do transporte de vapor d'água no ramo atmosférico era desconhecido e acreditava-se que a precipitação era originada principalmente pela evapotranspiração local (Brubaker et al., 1993). Nesse ponto de vista, um simples aumento da evapotranspiração local aumentaria também a precipitação. Essa visão permaneceu até o início da aquisição de dados meteorológicos através de sistemas de medições de radiossondagens. Com isso, os cientistas verificaram que o tempo de residência das moléculas de água na atmosfera era de aproximadamente uma semana, indicando que as moléculas de água viajavam por grandes distâncias antes de retornar para a superfície em forma de precipitação (McDonald, 1962).

A partir desta nova visão, cientistas verificaram que a precipitação é originada dentro de uma região a partir das seguintes fontes: umidade existente na atmosfera,

convergência de umidade advectada pelo vento e umidade originada pela evaporação (evapotranspiração) na superfície (Brubaker et al., 1993). Nessa nova visão um aumento da evapotranspiração sobre uma região não implica em aumento da precipitação, já que a advecção de umidade é responsável por parte da umidade existente sobre a região, mas se o produto da evaporação (evapotranspiração) permanecesse na região e não fosse advectado para fora, poderia implicar em aumento da precipitação.

A contribuição local da evaporação (evapotranspiração) na precipitação total sobre uma região é chamada de reciclagem do vapor d'água, e definida como a água que, evaporada da superfície terrestre, dentro de uma dada região, irá cair novamente como precipitação dentro dessa mesma região. Em outras palavras, a reciclagem do vapor d'água refere-se ao mecanismo de realimentação entre o sistema Terra-Atmosfera em que uma certa fração da água evaporada sobre uma região cai novamente como precipitação na mesma região.

O estudo da reciclagem do vapor d'água tem despertado interesse na comunidade científica, pois a quantificação desse mecanismo é um indicador da importância dos processos na superfície da terra para o balanço d'água e também um indicador da sensibilidade climática relacionada às alterações nesses processos. Alguns estudos comprovaram que a reciclagem do vapor d'água é um mecanismo de realimentação climático potencialmente significativo (Brubaker et al., 1993; Eltahir e Bras, 1994; Trenberth, 1999) e que com a análise da reciclagem do vapor d'água é possível determinar o papel hidrológico da contribuição local no clima sobre uma região e adjacências.

Alterações indevidas na superfície podem afetar a contribuição local da evaporação e, conseqüentemente, o mecanismo de reciclagem do vapor d'água. Essas

alterações poderão refletir em variabilidades climáticas que podem comprometer o bem-estar econômico e social do homem e também provocar mudanças no meio ambiente.

A produção de alimentos, a agricultura e a pecuária, a indústria e o comércio, a produção de energia elétrica através de hidroelétricas, são exemplos de como a reciclagem do vapor d'água pode comprometer o desenvolvimento sócio-econômico do homem. Alterações no conteúdo de umidade do solo podem afetar o ecossistema de uma região já que a flora depende de água no solo e energia solar para se desenvolver e, alterando-se a flora, o habitat natural da fauna existente na região também será alterado. Além disso, alterações na superfície podem modificar o conteúdo de umidade do solo e do ramo atmosférico do ciclo hidrológico, e também podem contribuir para a manutenção e intensificação de períodos de estiagem.

A determinação do papel hidrológico da reciclagem do vapor d'água sobre uma região poderá contribuir não apenas para o ramo atmosférico do ciclo hidrológico, mas sim para o bem-estar sócio-econômico do homem e para o meio ambiente.

Nesse contexto, tomou-se como objetivo deste trabalho estudar o comportamento climático da reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil e, desse modo, compreender as influências de mecanismos meteorológicos relacionados nesse processo de reciclagem, para determinar o papel da reciclagem do vapor d'água no clima sobre o Brasil.

No Capítulo 2 é apresentada uma cronologia dos estudos realizados sobre fluxo de vapor d'água atmosférico e reciclagem do vapor d'água. No capítulo 3 são apresentadas as descrições da área de estudo, dados utilizados e a formulação teórica utilizada no cálculo da reciclagem do vapor d'água. No Capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos nesse estudo. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para futuros estudos nessa linha de pesquisa.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Essa revisão bibliográfica está dividida em duas partes. Na primeira parte são discutidos os aspectos do armazenamento e transporte do vapor d'água atmosférico, já na segunda parte, tem-se uma discussão das questões relacionadas à reciclagem do vapor d'água.

### **2.1 FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA ATMOSFÉRICO**

Antes de 1930, pesquisadores interessados no estudo do ciclo hidrológico acreditavam que a água precipitável sobre os continentes tinha como origem a evaporação no próprio continente. Com o início da aquisição de dados meteorológicos, como temperatura, umidade, pressão e vento, através de sistemas de medições de radiossondagens, tornou-se possível estudar o comportamento e o transporte do vapor d'água na atmosfera e a influência desses parâmetros no ramo atmosférico do ciclo hidrológico

Benton et al. (1950) criticou a teoria que água precipitável sobre os continentes era originada no próprio continente ressaltando que movimentos verticais na atmosfera são necessários para produzir precipitação significativa e que ,como a atmosfera está continuamente em movimento, existe um transporte de grande quantidade de vapor d'água dos oceanos para os continentes. Com isso a umidade adicionada na atmosfera pela evapotranspiração pode viajar por grandes distâncias antes de retornar à superfície na forma de precipitação.

Rosen et al. (1979) estudaram as variações anuais nos campos do transporte de vapor d'água na atmosfera para um período de 6 anos utilizando informações de radiossondagens sobre o Hemisfério Norte e parte tropical do Hemisfério Sul ( $0^{\circ}$  -  $10^{\circ}$  S). Os autores verificaram que a água precipitável não apresentou variações significativas de ano para ano. Entretanto, em geral, existe tendência do conteúdo de vapor d'água diminuir do equador para os pólos. Já com relação ao fluxo zonal de vapor d'água existem variações anuais. Contudo, eles constataram que na região tropical o fluxo se dá de leste para oeste, com exceção de parte da vizinhança do continente indiano. As regiões de latitudes médias são dominadas pelos fluxos de oeste em todos os anos estudados, e as regiões acima de  $60^{\circ}$  N são dominadas por fluxos de leste. Com relação ao fluxo meridional de vapor d'água os autores observaram alternância de centros com direção para norte e centros com direção para sul e que essa alternância pode estar associada com áreas de atuação de sistemas semipermanentes de alta pressão.

Marques (1981) ao estudar a energética e o fluxo de vapor d'água na atmosfera da Região Nordeste do Brasil verificou que, quanto ao fluxo de vapor d'água, as diferenças fundamentais entre as estações seca e chuvosa são reveladas através das fronteiras noroeste e

sudeste. esses dois resultados levam a crer que as variações relevantes no balanço de vapor d'água na Região devem estar ligadas às variações do posicionamento da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e também associadas com possíveis penetrações de massas de ar procedentes do sul do continente. Uma forte convergência de massa na média troposfera, encontrada na estação seca (média de 8 anos) e no ano seco (1976), parece exercer um papel fundamental no diagnóstico destas situações, pois ela força a subsidência em baixos níveis não permitindo que haja condições favoráveis à convecção e à conseqüente precipitação.

Peixoto e Oort (1983) utilizaram dados de vento e umidade específica para estudar o transporte de umidade na atmosfera sobre o Mediterrâneo, referentes a um período de 5 anos. Os autores observaram que a precipitação estava mais relacionada à convergência do fluxo de vapor d'água sobre a região do que à intensidade desse fluxo.

Marques et al. (1983), ao estudar a energética e o fluxo de vapor d'água na atmosfera sobre o NEB, sugeriram que os mecanismos de convergência e divergência de vapor d'água na troposfera exercem papel relevante na caracterização das estações seca e chuvosa da região do NEB. As maiores diferenças entre as duas estações, em termos de exportação e importação de vapor d'água, ocorreram nas partes norte e sul do NEB e as mudanças relevantes no balanço de vapor d'água na Região, portanto, parecem estar ligadas à variação do posicionamento da ZCIT e às possíveis penetrações de sistemas frontais procedentes do sul do continente. Não encontraram diferença significativa de umidade na baixa troposfera quando compararam um ano seco com um ano chuvoso.

Rao e Marques (1984) fizeram análises sobre as características do vapor d'água sobre o Nordeste do Brasil para um ano chuvoso (1974) e um ano seco (1976). Com o objetivo de avaliar o balanço d'água, os autores definiram um cilindro cuja base cobria praticamente a

área do NEB, com altura até 300 hPa. Os resultados indicaram que o sentido do fluxo na parte leste da região é para dentro e na parte oeste é para fora da região. Isso comprova a importância do Oceano Atlântico no fornecimento de vapor d'água para a região. Eles também verificaram que, no ano seco, o fluxo é divergente, conseqüentemente ocorre exportação de umidade para fora da região, e no ano úmido o fluxo é convergente, ou seja, ocorre importação de umidade.

Higgins et al. (1996) estudaram o transporte de vapor d'água sobre os Estados Unidos no mês de maio. Os autores fizeram comparações entre dados de reanálises do NCEP/NCAR para um período de 5 anos (1985 a 1989) e dados observados com o intuito de avaliar as limitações destes dados. Observaram que, geralmente, os produtos das reanálises apresentam alta correlação com a precipitação observada. Com relação ao transporte de vapor d'água, integrado verticalmente, verificaram que apresentam algumas diferenças regionais significativas quando se comparam as reanálises com dados observados.

Mo e Higgins (1996) examinaram aspectos do transporte de vapor d'água no globo terrestre para o período de janeiro de 1985 a dezembro de 1993 utilizando dados de reanálises do NCEP/NCAR. Os autores encontraram que o máximo de umidade encontra-se próximo ao equador e se move meridionalmente, acompanhando o ciclo do aquecimento solar, e que o ramo inferior da circulação de Hadley transporta umidade para a zona de convergência intertropical. Também determinaram a variação interanual relacionada ao efeito "El-Niño" Oscilação Sul (ENSO) provocada pela alteração na circulação de Walker devido ao aquecimento/resfriamento anômalo das águas do Oceano Pacífico tropical. Analisaram as anomalias para o episódio quente de 1987 e frio de 1988, e observaram que a diferença interanual na evaporação é pequena (menor que 2 mm/dia) em comparação com a divergência

do fluxo de vapor d'água.

Nóbrega (2001) verificou que os fluxos médios são os que mais contribuem para o transporte das energias estáticas seca, úmida e saturada, e também que a atmosfera sobre a região Nordeste do Brasil comporta-se como fonte de vapor d'água (exportando vapor d'água) nos meses secos e normais e como sumidouro (importando vapor d'água) nos meses chuvosos. O fluxo meridional de umidade nas latitudes médias varia consideravelmente com a época do ano, mas é predominantemente em direção aos pólos ao longo do ano. Essa variabilidade está associada com o movimento e mudanças na intensidade da célula de Hadley. O ramo descendente dessa célula é muito importante no transporte de umidade para a ZCIT.

Segundo Peixoto e Oort (1992), os oceanos exercem um papel fundamental no transporte de umidade para os continentes, já que são as fontes de umidades mais significativas, entretanto as regiões continentais também podem ser fontes de vapor d'água significativas para a atmosfera. Conclusões semelhantes foram encontradas em Cavalcanti e Rathor (1986).

Cavalcanti (2001) analisou aspectos da distribuição espacial e da variação interanual da água precipitável, do transporte de vapor d'água e o balanço d'água para a atmosfera da região NEB para o trimestre março-abril-maio comparando anos contrastantes (1977 – normal, 1983 – seco, 1986 – chuvoso). O fluxo de vapor d'água integrado verticalmente evidenciou uma relação da componente meridional com as chuvas no norte da região. No ano chuvoso, a importação de vapor d'água foi de 1,7 mm/dia, enquanto no ano seco foi observada uma exportação de 1,8 mm/dia, evidenciando a atuação da ZCIT sobre a região. O autor também concluiu que as condições dinâmicas no período chuvoso do norte do NEB favoreceram a convecção no ano chuvoso, com importação de massa nos níveis baixos e

médios, e exportação nos níveis altos; enquanto que no ano seco, ocorreu exportação de massa nas camadas baixas e altas, e importação nas camadas intermediárias, o que inibiu ou reduziu a convecção. Com relação à variação do fluxo de vapor d'água, a componente meridional foi a que apresentou maior variação entre os anos contrastantes. O autor verificou que durante o ano chuvoso ocorreu uma redução de 83% do fluxo de vapor d'água na face norte da área estudada, comparando com o ano seco.

## 2.2 RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

Budiko (1974) utilizou um modelo unidimensional para estimar a contribuição da evaporação local e umidade advectada na precipitação sobre uma região. O autor definiu  $\beta$  como a razão entre a precipitação total e a precipitação que é originada devido a umidade advectada. Calculando  $\beta$  na parte européia da antiga União Soviética, o autor estimou que a contribuição local para a precipitação média anual sobre a região é de apenas 10% e os meses de abril e maio apresentaram valores de 18% enquanto o mês de outubro apresentou 4%.

Salati et al. (1979) estudaram dados da concentração  $O^{18}$  (Oxigênio-18) em diferentes pontos da Bacia Amazônica e encontraram um gradiente da ordem de  $0,75 \times 10^{-3} \text{‰ km}^{-1}$ . Segundo os autores, para valores médios anuais, o gradiente é muito menor que em outras áreas continentais (como Europa, por exemplo) e isso é consequência da grande contribuição de umidade "reevaporada" no balanço de água da bacia, indicando a importância dessa umidade na precipitação sobre a região. Os autores não estimaram numericamente a reciclagem do vapor d'água nesse trabalho.

Brubaker et al. (1993) estenderam os do modelo desenvolvido por Budiko (1974), para uma região de duas dimensões, com fluxos de umidade entrando e saindo em um volume de controle. Utilizando dados de vento e umidade observados, os autores determinaram a convergência de vapor d'água atmosférico e a fração da precipitação que tem origem local, sobre quatro regiões continentais (Europa, África, América do Norte e América do Sul). Os resultados obtidos indicam que a contribuição da evaporação para a precipitação local varia sazonal e localmente. Nas áreas estudadas a contribuição local para o total da precipitação mensal esteve entre 0% e 48%. Sobre a região da Bacia Amazônica foram estimados valores máximos de 32% em dezembro e valores mínimos de 14% em junho. Esses valores indicam que as contribuições locais na precipitação regional são mecanismos potencialmente significantes, ressaltam a interação entre a atmosfera e a superfície terrestre, e que podem contribuir de forma indicativa nas mudanças das características de variabilidade climática de uma região.

Eltahir e Bras (1994) desenvolveram um modelo numérico bi-dimensional para estimar a reciclagem do vapor d'água regional. Nesse modelo, a região é coberta por uma grade horizontal dividindo-se a área inteira em pequenas grades. Os autores calcularam a reciclagem sobre a Bacia Amazônica para a mesma área utilizada por Brubaker et al. (1993) com dados do ECMWF ("European Center for Medium-range Weather Forecasts") e do GFDL ("Geophysical Fluid Dynamics Laboratory") e encontraram valores médios para a região de 25% e 35% para os dados do EMCWF e GFDL, respectivamente. A diferença entre os valores médios anuais de reciclagem encontrados utilizando-se dados de origens diferentes deve-se à estimativa utilizada para obter a precipitação nos dados do ECMWF, que foi obtida pela seguinte aproximação:  $P = E - \nabla \cdot \vec{F}$ , em que  $\vec{F}$  corresponde ao fluxo de vapor d'água

integrado verticalmente. O modelo apresentado nesse trabalho descreve a variabilidade espacial e sazonal do processo de reciclagem. Os autores observaram que a distribuição espacial da reciclagem apresentava diferenças significativas ao longo dos meses em um mesmo local. A razão máxima de reciclagem ocorreu na parte sudoeste da bacia, com índices maiores que 50%.

Savenije (1995) analisou a reciclagem do vapor d'água sobre a região do Sahel para um período de 40 anos (1950 a 1990). O autor observou que a evapotranspiração sobre a região é um importante mecanismo de "feedback" entre o uso da terra e o clima. Ele também estudou o efeito do uso da terra, e observou uma forte relação entre a reciclagem e a evapotranspiração proveniente da vegetação sobre a região e adjacências. O autor acredita que um aumento na evapotranspiração, durante um período seco, poderá implicar em um aumento da precipitação sobre a região.

Trenberth e Guillemont (1996) analisaram os processos físicos envolvidos na seca de 1988 e nas enchentes de 1993, que ocorreram na América do Norte, utilizando dados do ECMWF ("European Center for Environmental Prediction"). Utilizaram campos de anomalias de TSM (Temperatura à superfície do Mar), balanço de umidade, evaporação, precipitação e radiação de onda-longa para estudar tais processos. Nos campos da evaporação verificaram que no verão de 1988 a mesma era aproximadamente 2,5 mm/dia e no verão de 1993 era aproximadamente 4 mm/dia e, diante disso, deduziram que boa parte da precipitação ocorrida no verão de 1993 deve ser originada devido à evaporação local, mostrando a importância do processo de "feedback" no verão.

Burde et al. (1996) questionaram as afirmações de que a formulação desenvolvida em Brubaker et al. (1993) é uma extensão bi-dimensional do modelo Budiko, já

que Brubaker et al. (1993) utilizaram as equações unidimensionais de conservação de vapor d'água. Com base nesse questionamento, Burde et al. (1996) desenvolveram uma extensão bi-dimensional exata para o cálculo da reciclagem do vapor d'água. O coeficiente de reciclagem para o modelo proposto por Brubaker et al. (1993) é dado por  $\beta = 1 + EA/2F^+$ , em que E é a evaporação, A é a área e  $F^+$  é o fluxo que entra na região. Para o modelo bi-dimensional o coeficiente de reciclagem é  $\beta = 1 + (EA/2F^+)K$ , em que K é um fator de correção que incorpora todas as informações relativas à estrutura do fluxo e também depende do parâmetro geométrico da região, que foi definido pelos autores como  $L/H$ , em que L e H representam a escala de comprimento nos eixos x e y respectivamente. Análises das equações obtidas indicaram que os valores de K encontram-se entre 1 e 2, sendo 1 no caso do fluxo ser paralelo às linhas de corrente (suposição existente no modelo Budiko). Apesar dos autores terem desenvolvido o modelo, não foram obtidos resultados quantitativos da reciclagem do vapor d'água, entretanto a introdução do fator de correção na fórmula obtida por Brubaker indica que o papel do processo de reciclagem na formação da precipitação deve aumentar.

Trenberth (1998) estudou as implicações nas mudanças da chuva e no clima relacionadas ao ciclo e o tempo de residência da umidade na atmosfera. Segundo o autor, existem evidências que a umidade na atmosfera está aumentando em diversos locais e que aumento de umidade pode levar a um aumento de nuvens e umidade relativa, o que irá diminuir a radiação solar, podendo reduzir a energia disponível na superfície para a evaporação. Conseqüentemente, poderá existir um aumento de precipitação em tempestades individuais e aumentar o risco de enchentes.

Shär et al. (1999) estudaram a influência do conteúdo de umidade do solo na precipitação sobre a Europa e norte do Atlântico durante o verão. Utilizando um modelo

climático regional, os autores concluíram que a precipitação depende do conteúdo de umidade do solo. Em geral, altos valores de umidade do solo e evapotranspiração conduzem a precipitações mais significativas.

Trenberth (1999) estudou variações sazonais da razão de reciclagem em locais diferentes do globo. O autor combinou a razão de reciclagem obtida em Brubaker et al. (1993) e as definições de eficiência de umedecimento ( $M$ ) e intensidade do ciclo hidrológico ( $I$ ), também conhecido como eficiência de precipitação, que foram definidas em Drozdov e Grigor'Eva (1965). Foram utilizados dados do CMAP ("Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation") e Reanálies do NCEP/NCAR para o período de 1979 a 1995. Os resultados mostraram que as variações anuais de  $I$  são bastante pequenas sobre a América do Norte e Europa, enquanto a variação de  $M$  ocorre na maioria dos lugares. Os resultados obtidos para a reciclagem do vapor d'água mostram uma dependência entre a reciclagem e a escala de comprimento. Nos valores obtidos para a região da bacia do Mississipi (EUA), a reciclagem é de 6,6%, quando utilizada uma escala de comprimento de 500 km e 21%, com uma escala de comprimento de 1.800 km. No mesmo trabalho e utilizando uma escala de comprimento de 500 km, o autor calculou a média anual da reciclagem, encontrando o valor de 10%, podendo dobrar quando a escala de comprimento também era dobrada.

O processo de realimentação entre o solo e a atmosfera é fundamental para o ciclo hidrológico. Enquanto os oceanos armazenam energia solar que recebem no verão (e utiliza parte dessa energia para aquecer a atmosfera no inverno), o solo armazena precipitação que recebe no inverno (e utiliza parte dessa energia para umedecer e resfriar a atmosfera no verão). Shär et al. (1999) estudaram esse processo de realimentação em um modelo climático regional. O experimento foi analisado para Julho de 1990 e 1993, sobre a Europa. Os valores

iniciais de controle foram derivados das análises do ECMWF. A área de estudo foi dividida em 5 sub-áreas e a relação do balanço de água associado em cada área foi descrita, então, como  $\Delta W = IN - OUT + ET - P$ , em que  $W$  é a quantidade vapor d'água,  $IN$  o fluxo que entra na região,  $OUT$  o fluxo que sai da região,  $ET$  a evapotranspiração e  $P$  a precipitação. Utilizando as aproximações descritas em Budiko e Brubaker et al. (1993) e a equação do balanço de água descrita acima, os autores encontraram o razão de reciclagem da seguinte forma:  $\beta = ET/(IN + ET)$  e a eficiência da precipitação como  $\chi = P/(IN + ET)$ . Os resultados mostraram que quando o solo está mais úmido a eficiência de precipitação aumenta por exemplo, em uma das sub-áreas (citada no trabalho como FR, localizada na parte central da Europa) estudadas  $\chi$  varia de 1,6% no experimento seco a 4,4% no experimento úmido para Julho de 1990 no entanto, sobre as áreas dominadas pelo oceano, a diferença foi pequena. Também verificaram que quando se aumenta o conteúdo de umidade do solo, a razão de reciclagem também aumenta podendo ser observadas taxas de até 50%. Os resultados qualitativos indicam que altos valores de umidade do solo e evapotranspiração levam a altos valores de precipitação.

Bosilovich e Schubert (2001) calcularam a reciclagem do vapor d'água para 15 anos de dados de reanálises do "National Aeronautics and Space Administration Goddard Earth Observing System – GEOS-1" usando dados hidrológicos médios e o modelo de reciclagem desenvolvido por Eltahir e Brás (1994). O estudo enfocou a parte central do Estados Unidos no verão de 1988 (seco) e 1993 (chuvoso) e, os resultados, comparados com a média anual. Os autores verificaram que a reciclagem do vapor d'água tende a ser maior para maiores valores de evapotranspiração e menores valores de fluxo de umidade. Durante o verão de 1988 a reciclagem do vapor d'água foi maior do que a média, enquanto no verão de 1993 a

reciclagem foi menor que a média. No entanto, na primavera de 1993 a reciclagem foi maior do que a média, indicando a importância da umidade do solo já que, devido à precipitação ocorrida em 1993, o solo estava muito úmido.

Souza et al. (2001) estudaram as contribuições dos efeitos locais e advectivos na precipitação no Nordeste do Brasil durante dois períodos chuvosos contrastantes sobre a região, um seco (1983) e um chuvoso (1986). A precipitação acumulada durante 48 horas de simulação numérica utilizando o modelo RAMS (“Regional Atmospheric Modeling System”), foi interpretada em função das contribuições da advecção e geração local. Os autores observaram que durante a estação chuvosa seca, um aumento na disponibilidade de umidade do solo aumenta a evapotranspiração criando, assim, condições de formação de nuvens convectivas e induzindo a precipitação. Durante a estação chuvosa úmida, o papel dos processos advectivos é mais importante do que o dos processos locais e um aumento de umidade causado pela evapotranspiração local não induz no aumento da precipitação.

Burde e Zangvil (2001b) desenvolveram um novo modelo analítico para a reciclagem do vapor d’água, no qual é considerada a não-homogeneidade da atmosfera e os fluxos não-paralelos, suposições estas existentes no modelo descrito por Budiko e que também foram consideradas na modificação desenvolvida por Brubaker et al. Os autores apresentaram como resultado uma fórmula analítica geral e, essa fórmula pode ser aplicada para estudos teóricos da influência dos parâmetros regionais e os campos dos fluxos na estimativa da reciclagem do vapor d’água. Analisando a formulação analítica os autores verificaram que, em geral, os desvios em uma estrutura de fluxo paralelo afetam significativamente a razão de reciclagem, ou seja, a reciclagem regional para fluxo não-paralelo é maior que para fluxo paralelo, o que leva a crer que os resultados obtidos por Brubaker et al. (1993) podem ser ainda

mais significativos e conseqüentemente, os resultados obtidos por outros autores que utilizaram o modelo de Brubaker et al. (1993). Apesar do modelo desenvolvido pelos autores descrever com maior precisão o papel da reciclagem do vapor d'água, a utilização desse modelo não é tão simples quanto o de Brubaker principalmente pelo fato de ser necessários utilizar uma metodologia que ainda está em desenvolvimento para a obtenção dos desvios que o fluxo pode sofrer, e assim, poder desconsiderar a suposição existente no modelo Brubaker et al. (1993).

### **3. MATERIAL E MÉTODO**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

O Brasil, por ser um país de grande extensão territorial, possui diferentes regimes de precipitação e temperatura. De norte a sul encontra-se uma grande variedade de climas com distintas características regionais.

Segundo Nimer (1979), na região Norte observa-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca, sendo a região com maior índice pluviométrico. Já na região Nordeste existe uma alta variedade espacial e sazonal da precipitação, com precipitação acumulada inferior a 500 mm/ano no interior da Região, até acumulada anual superior a 1600 mm/ano. As regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência tanto de sistemas tropicais quanto de sistemas de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas. Em geral, a precipitação distribui-se uniformemente nessas regiões, com a precipitação média anual acumulada variando em torno de 1500 e 2000 mm. Dois núcleos máximos são registrados na região do Brasil Central e no

litoral da Região Sudeste, enquanto que no norte de Minas Gerais verifica-se uma relativa escassez de chuvas ao longo do ano. O sul do Brasil sofre a influência dos sistemas de latitudes médias, em que os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano. A distribuição anual das chuvas se faz de forma bastante uniforme. Ao longo de quase todo seu território a média anual da precipitação varia de 1250 a 2000 mm.

Vários fenômenos, que podem ser de grande escala, e até de origem local, são responsáveis por estes contrastes climáticos. Os ciclones (centros de baixa pressão) e anti-ciclone (centros de alta pressão), que ocorrem durante o ano sobre o Brasil e em suas adjacências; a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é originada do encontro dos alísios na faixa equatorial; linhas de instabilidade; aquecimento anômalo das águas do Pacífico e do Atlântico; o aquecimento diferenciado do Oceano-Continente que origina as brisas e combina com outros fenômenos na formação de chuva; o aquecimento anômalo da água do Pacífico e do Atlântico, e a evaporação local são exemplos de fenômenos que provocam efeitos climáticos sobre o Brasil, especialmente no regime pluvial.

Nesse contexto, a reciclagem do vapor d'água foi analisada ao longo do território brasileiro entre as latitudes de 5° N e 35° S e as longitudes de 35° W e 75° W e, também, sobre três áreas com 15 graus por 15 graus de latitude e longitude, respectivamente, e aqui definidas como: Área Bacia Amazônica (0° a 15° S e 50° W a 65°W), que compreende parte da região Norte e Centro-Oeste; Área Nordeste (0° a 15° S e 35° W a 50° W), que compreende a região Nordeste, parte das regiões Norte e Centro-Oeste, e a Área Sul-Sudeste (15°S a 30° S e 40° W a 55° W), que compreende parte das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, como mostra a Figura 3.

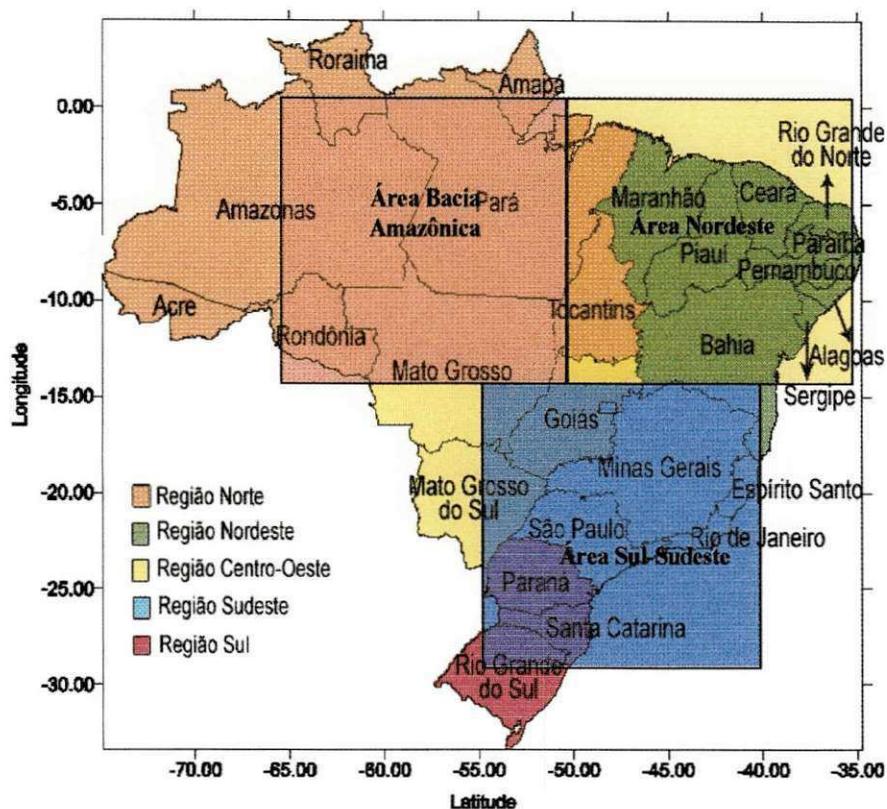


Figura 3 – Mapa geográfico do Brasil com áreas de estudo em destaque

### 3.2 PERÍODO DE ESTUDO

Nesse estudo, foram analisadas as variações sazonais e espaciais da reciclagem do vapor d'água ao longo do ano e durante os trimestres de fevereiro, março e abril (FMA); maio, junho e julho (MJJ); agosto, setembro e outubro (ASO) e novembro, dezembro e janeiro (NDJ), referentes a 20 anos de dados (1978 a 1998). Nesse caso, foram utilizadas as estimativas médias mensais de precipitação de Xie-Arkin, também disponíveis no projeto

“reanálises”. Também foi analisada a reciclagem do vapor d’água para todos os meses do ano (janeiro a dezembro) sobre as três áreas definidas anteriormente (Figura 3). Nesse caso foram utilizados 40 anos de dados. A utilização de dois períodos de dados distintos fez-se necessário devido ao uso direto da precipitação na determinação da variabilidade espacial da reciclagem do vapor d’água. As explicações para a utilização de períodos distintos estão na seção seguinte.

### 3.3 DADOS UTILIZADOS

Os dados referem-se as “reanálises do modelo global do “National Center of Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research” – NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996). As variáveis utilizadas estão em pontos de grade de 2,5 por 2,5 graus de latitude e longitude, respectivamente, e são: umidade específica do ar; e componentes zonal e meridional do vento para 8 níveis de pressão (superfície, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300 hPa), e também precipitação e fluxo de calor latente (na obtenção da evapotranspiração) na superfície.

O projeto “reanálises” do NCEP/NCAR teve início por volta de 1995 e gerou uma base de informações de variáveis meteorológicas em pontos de grade. Nesse processamento foi aplicado o estado atual da arte em análise e previsão dentro de um rígido controle de qualidade, para assimilação dos dados observados. Diferentes plataformas de observações foram utilizadas na geração das “reanálises”, dentre as quais se destacam: estações de superfície, navios, aeronaves, balões piloto, radiossondas, bóias e satélites (Kalnay

et al. 1996).

Tem-se observado que as “reanálises” superestimam os valores de umidade relativa do ar nos níveis superiores da atmosfera (Higgins et al., 1996). Como a maior concentração de vapor d’água encontra-se nos baixos níveis atmosféricos (abaixo de 500 hPa) esse fato não é relevante nesse trabalho. Com relação à precipitação, Trenberth e Guillemot (1996) verificaram que o método utilizado nas “reanálises” para obtenção da precipitação não representa bem a precipitação observada. Entretanto, para o propósito deste trabalho esse fato também não é relevante, já que o uso da precipitação na obtenção da reciclagem do vapor d’água é necessário apenas na análise da variabilidade espacial, como mostrado a seguir e nesse caso, foram utilizados os valores segundo a estimativa de Xie-Arkin para o período de 1978 a 1998.

### 3.3 FORMULAÇÃO TEÓRICA

No esquema mostrado na Figura 4 tem-se, conceitualmente, as fontes de precipitação em forma de um modelo simplificado do fluxo de umidade atmosférica sobre uma região, ou volume de controle.

As setas horizontais indicam o fluxo advectivo de vapor d’água entrando e saindo do volume de controle atmosférico,  $W$  é o total de vapor d’água contido no ar e que se move através do volume de controle;  $ET$  é a evapotranspiração;  $P$  é a precipitação. As duas fontes de precipitação são indicadas pelas ramificações que se unem para formar a seta da precipitação.  $P_m$  é a precipitação de origem local, ou seja, devido a evapotranspiração, e  $P_a$  é a precipitação de origem advectiva. Na seta que corresponde a  $ET$  pode-se ver que parte da

evapotranspiração torna-se precipitação e parte se une ao vapor d'água existente na atmosfera e é advectado para fora do volume de controle.

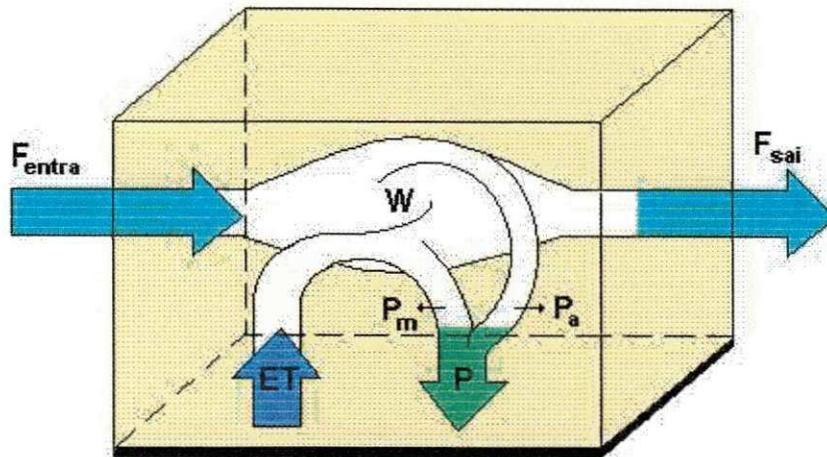


Figura 4 – Modelo conceitual do fluxo de umidade atmosférica sobre uma região. Adaptado de Brubaker et al. (1993)

Como mostra a Figura 4, a precipitação é composta por duas partes: parte devida à contribuição advectiva ( $P_a$ ) e a parte devida à contribuição local ( $P_m$ ). Com isso tem-se que:

$$P = P_a + P_m \quad (1)$$

A razão de reciclagem ( $\rho$ ) mede a contribuição da evapotranspiração local para a precipitação total sobre a região (Budiko, 1974) e é dada por:

$$\rho = \frac{P_m}{P} \quad (2)$$

Considerando que os fluxos médios devido a evapotranspiração local e a advecção são dados, respectivamente, por:

$$\overline{w_a u} = \frac{F_e}{L} + \frac{(-P_a)L}{2}, \quad (3a)$$

e

$$\overline{wu} = \frac{F_e}{L} + \frac{(ET-P)L}{2}; \quad (3b)$$

em que  $F_e$  é o fluxo que entra na região e  $L$  a escala de comprimento. Encontra-se a razão de reciclagem da seguinte forma

$$\rho = \frac{EL}{EL + 2\frac{F_e}{L}}, \quad (4)$$

Segundo Trenberth (1999), a reciclagem do vapor d'água também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\rho = \frac{EL}{PL + 2\overline{F}}, \quad (5)$$

em que  $P$  é a precipitação e  $\overline{F}$  o fluxo médio. Essa equação tem a vantagem de possibilitar avaliar a distribuição espacial com dados em pontos de grade.

A reciclagem do vapor d'água, dada pela equação acima, está relacionada a escala de comprimento  $L$ . Quanto maior for a escala de comprimento, maior será a reciclagem. Notem que, se considerarmos um  $L$  percorrendo todo o globo terrestre, o índice de reciclagem do vapor d'água tende a 1, indicando que toda a precipitação sobre o globo é devida a evapotranspiração por outro lado, se considerarmos um ponto específico no globo terrestre, ou seja,  $L = 0$ , a reciclagem do vapor d'água tende a 0, indicando que toda a precipitação sobre esse ponto será de origem advectiva. Nas Figuras 5 (a) e (b), é possível observar essa relação entre a reciclagem do vapor d'água e a escala de comprimento. Para um mesmo valor de  $ET$  e  $F$ , tem-se diferentes valores de reciclagem do vapor d'água apenas modificando o  $L$ .

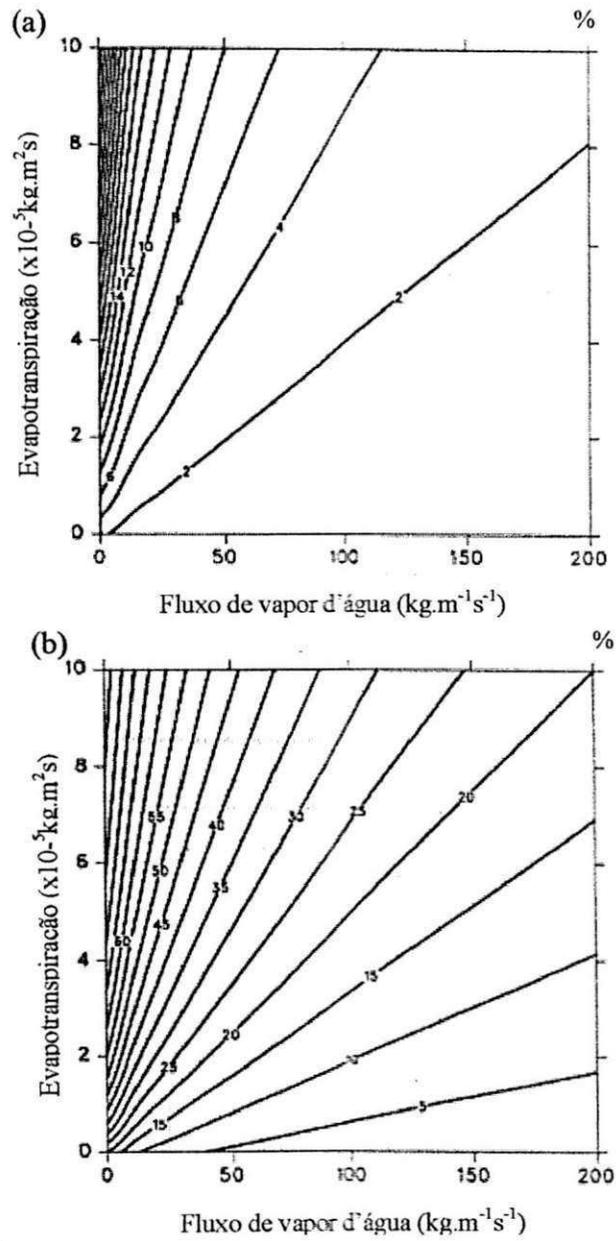


Figura 5 – Valores da reciclagem do vapor d'água como função do fluxo de umidade e evapotranspiração para: (a)  $L = 500$  km e (b)  $L = 1000$  km. Adaptada de Trenberth (1999)

A quantificação do mecanismo de reciclagem é um indicador da importância

dos processos da superfície da terra no balanço hídrico e é também um indicador da sensibilidade climática em relação a esses processos. Portanto, a reciclagem do vapor d'água na atmosfera é um mecanismo climático de realimentação potencialmente significativo e, dessa forma, alterações indevidas em superfície afetam a interação terra-atmosfera e podem contribuir para a manutenção e intensificação de secas.

Brubaker *et al.* (1993) estenderam os argumentos do modelo Budyko (1974) para uma região bidimensional, com fluxo de umidade entrando e saindo através dos lados do volume de controle atmosférico.

Os limites da região consistem de segmentos ou partes de segmentos ( $\lambda_e$ ) do fluxo de umidade que entra e segmentos ou partes de segmentos ( $\lambda_s$ ) do fluxo de umidade que sai da região. Com isso ele definiu o fluxo de vapor d'água integrado verticalmente da seguinte forma:

$$F_e \equiv - \int_{\lambda_e} \bar{Q} \cdot \hat{n}_\lambda d\lambda ; \quad (6a)$$

$$F_s \equiv \int_{\lambda_s} \bar{Q} \cdot \hat{n}_\lambda d\lambda , \quad (6b)$$

em que  $\hat{n}_\lambda$  é o vetor normal na direção de saída e o transporte horizontal de vapor d'água integrado da superfície até o topo da atmosfera , expresso por:

$$\bar{Q}(\lambda, \phi, t) = \int_0^{Ps} q \bar{V} \frac{dp}{g} = Q_\lambda + Q_\phi. \quad (7)$$

As componentes zonal e meridional de Q são dadas, respectivamente por:

$$Q_\lambda = \int_0^{Ps} q u \frac{dp}{g} ; \quad (8a)$$

$$Q_\phi = \int_0^{Ps} q v \frac{dp}{g}. \quad (8b)$$

Os fluxos médios de umidade total e advectada podem ser escritos como:

$$\bar{Q} = F_e - \frac{P_a A}{2}; \quad (9a)$$

$$\bar{Q}_a = \frac{(ET - P_a)A}{2}, \quad (9b)$$

em que  $F_e$  é o fluxo que entra na área  $A$ . Supondo que a atmosfera está bem misturada (Budiko, 1974) de forma que  $P_a/P_m = Q_a/Q_m$ , a reciclagem do vapor d'água é escrita da seguinte forma:

$$\rho = \frac{ET.A}{ET.A + 2.F_e} \quad (10)$$

Para calcular o fluxo que entra e que sai de um volume de controle, considera-se um esquema conforme a Figura 6.

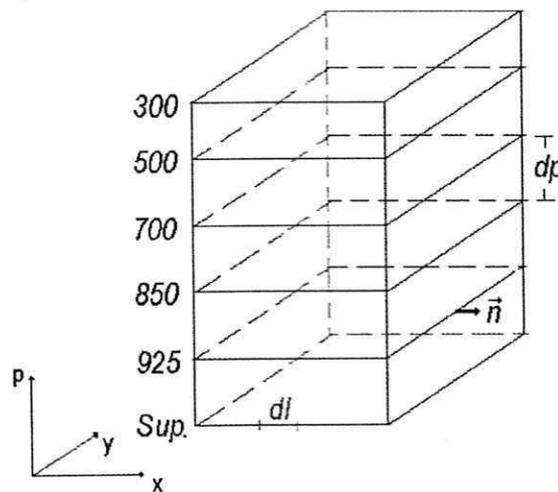


Figura 6 – Esquema gráfico para o volume de controle

Definindo-se fluxo resultante ( $F_r$ ) em um volume de controle qualquer, como:

$$F_r = F_s + F_e = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left( \oint q \vec{V} \cdot \vec{n} dl \right) dp, \quad (11)$$

e, também, o fluxo absoluto ( $F_a$ ) como:

$$F_a = F_s + |F_e| = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left( \oint_l q \vec{V} \cdot \vec{n} |dl \right) dp, \quad (12)$$

em que  $F_s$  é o fluxo que sai do volume (positivo quando  $q \vec{V} \cdot \vec{n} > 0$ ),  $F_e$  é o fluxo que entra no volume (negativo quando  $q \vec{V} \cdot \vec{n} < 0$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade,  $q$  é a umidade específica,  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$  é o vetor velocidade do vento,  $\vec{n}$  é o vetor normal unitário (positivo dirigindo-se para fora do volume de controle),  $dl$  é um elemento infinitesimal da curva fechada em cada nível de pressão e  $dp$  é um elemento infinitesimal de pressão na vertical.

Visto que  $|F_e| = -F_e$ , se  $F_e < 0$ , tem-se, então, que:

$$F_s = (F_a + F_r)/2, \quad (13)$$

e

$$F_e = -(F_a - F_r)/2. \quad (14)$$

Portanto,

$$F_s = \frac{1}{2g} \left[ \int_{300}^{Sup} \left( \oint_l q \vec{V} \cdot \vec{n} |dl \right) dp + \int_{300}^{Sup} \left( \oint_l q \vec{V} \cdot \vec{n} dl \right) dp \right]; \quad (15)$$

e

$$F_e = -\frac{1}{2g} \left[ \int_{300}^{Sup} \left( \oint_l q \vec{V} \cdot \vec{n} |dl \right) dp - \int_{300}^{Sup} \left( \oint_l q \vec{V} \cdot \vec{n} dl \right) dp \right] \quad (16)$$

O fluxo resultante ( $F_r$ ) e o absoluto ( $F_a$ ) em termos de cada face do volume são dados, respectivamente, por:

$$F_r = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left( \int_{Sul} qvdl + \int_{Leste} qudl + \int_{Norte} qvdl + \int_{Oeste} qudl \right) dp; \quad (17)$$

$$F_a = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left( \int_{Sul} |qv| dl + \int_{Leste} |qu| dl + \int_{Norte} |qv| dl + \int_{Oeste} |qu| dl \right) dp, \quad (18)$$

ou ainda,

$$F_r = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left[ (\overline{qvL})_{Sul} + (\overline{quL})_{Leste} + (\overline{qvL})_{Norte} + (\overline{quL})_{Oeste} \right] dp; \quad (19)$$

e

$$F_a = \frac{1}{g} \int_{300}^{Sup} \left[ (\overline{qvL})_{Sul} + (\overline{quL})_{Leste} + (\overline{qvL})_{Norte} + (\overline{quL})_{Oeste} \right] dp, \quad (20)$$

em que  $L$  é o comprimento da respectiva face.

A divergência de umidade foi calculada através da equação do balanço de massa, desprezando a taxa local da mudança no armazenamento de umidade atmosférica, ou seja:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \bar{E} - \bar{P}, \quad (21)$$

Foi utilizado o ajuste de massa, para garantir a continuidade de massa no volume de controle, de acordo com Cavalcanti (2001).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 FLUXO DE VAPOR D'ÁGUA**

O fluxo de vapor d'água atmosférico, integrado verticalmente, tende a expressar a configuração do escoamento do ar nos baixos níveis da atmosfera, devido às características da distribuição vertical do vapor d'água, que decresce com a altitude havendo, portanto, maior concentração nas camadas inferiores da atmosfera.

Na Figuras 7 tem-se o fluxo de vapor d'água para os períodos de: (a) - fevereiro, março e abril (FMA); (b) - maio, junho e julho (MJJ); (c) - agosto, setembro e outubro (ASO); (d) - novembro, dezembro e janeiro (NDJ), respectivamente, obtidos pelas equações (8a) e (8b), respectivamente.

O transporte de vapor d'água diminui em direção ao pólo sul, refletindo a circulação geral da atmosfera da Terra. Os ventos alísios na faixa equatorial, predominantemente de leste, e os ventos de oeste, nas latitudes médias, refletem claramente o transporte zonal

O aquecimento atmosférico pela radiação solar, e por sua vez, a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água, devem estar relacionados com a diminuição do conteúdo de vapor d'água em direção ao sul. Isso é coerente com a afirmação feita por Rose et al. (1979) de que a água precipitável diminui do equador em direção aos pólos. O ar quente tropical favorece a saturação do vapor d'água que armazena maior quantidade de umidade e é transportada do Oceano Atlântico a uma taxa elevada para a região Nordeste. Por outro lado, os baixos valores no transporte de vapor d'água sobre a região Sudeste são atribuídos à velocidade do vento e baixo conteúdo de vapor d'água.

O posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), formada pela convergência dos Alísios está diretamente relacionada às maiores ou menores intensificações do fluxo de vapor d'água sobre as regiões Norte e Nordeste e também em mudanças na direção do fluxo, visto que durante o verão o fluxo é mais intenso sobre essas regiões, acompanhando o deslocamento da ZCIT que durante esse período, está posicionada mais ao sul do equador.

A umidade evaporada sobre o Oceano Atlântico é transportada para a região Nordeste, e parte desta é transportada para a região Norte, indicando a importância do Oceano Atlântico no suprimento de umidade para essas regiões. Isso está de acordo com os resultados obtidos por Nóbrega et al. (2002a, 2002b), Nóbrega (2001) e Cavalcanti (2001). A umidade transportada para a região Norte, proveniente do Nordeste e do Atlântico, é adicionada à umidade originada da evapotranspiração sobre a região e, em algumas épocas do ano, parte desta umidade é transportada em direção ao Sudeste e Sul. Esse transporte está relacionado à presença de uma corrente de jato em baixos níveis (LLJ - "Low Level Jet") localizada à leste dos Andes. Estudos recentes têm investigado a associação dessa corrente com as estações

secas e chuvosas sobre as regiões Centro-Oeste e Sudeste (Cavalcanti e Souza, 2002; Gan et al. 2002, Marengo et al., 2002). Essa característica também foi observada por Eltahir e Brás (1994), em que os autores afirmaram que o fluxo que sai da bacia Amazônica pode contribuir significativamente para o ciclo hidrológico das regiões adjacentes.

Comparando-se as Figuras 7 (a) a 7 (d), observa-se no trimestre FMA intenso transporte de vapor d'água ao norte e transporte menos intenso na região central e parte da região Sul do Brasil. Sobre o Nordeste, o transporte de vapor d'água é praticamente para oeste, com exceção da Bahia, em que o transporte tem uma pequena variação para sudoeste. Sobre a região Norte o transporte é ligeiramente para sudoeste.

Durante o trimestre MJJ observa-se que a região com intenso transporte de vapor d'água, agora se estende desde o estado do Ceará até Roraima. Comparando com o período anterior, existem mudanças na direção do transporte de vapor d'água sobre o Nordeste, que passa a ser para noroeste e, sobre a região Norte, para oeste, principalmente sobre o estado do Pará.

No trimestre ASO, período em que a ZCIT está mais ao Norte, observa-se que a intensidade do fluxo sobre as regiões Norte e Nordeste é menor do que nos períodos anteriores. A direção do transporte sobre a região Norte é praticamente para oeste, com exceção do estado do Acre e parte sul do estado de Rondônia, em que o transporte é para sudoeste.

No trimestre NDJ o transporte de vapor d'água sobre as regiões Norte e Nordeste é menos intenso, comparando com os demais períodos, e a direção também sofre variação, sendo para sudoeste em quase toda a região Norte, com exceção de parte sudoeste do estado do Amazonas, estados do Acre e Rondônia, em que se observa transporte para sudeste,

indicando que existe transporte de umidade da região Norte para a região Sudeste. Também há mudança significativa na direção do transporte sobre o estado de Minas Gerais, indicando a maior proximidade do anticiclone semi-permanente do Atlântico Sul na costa leste do Brasil.

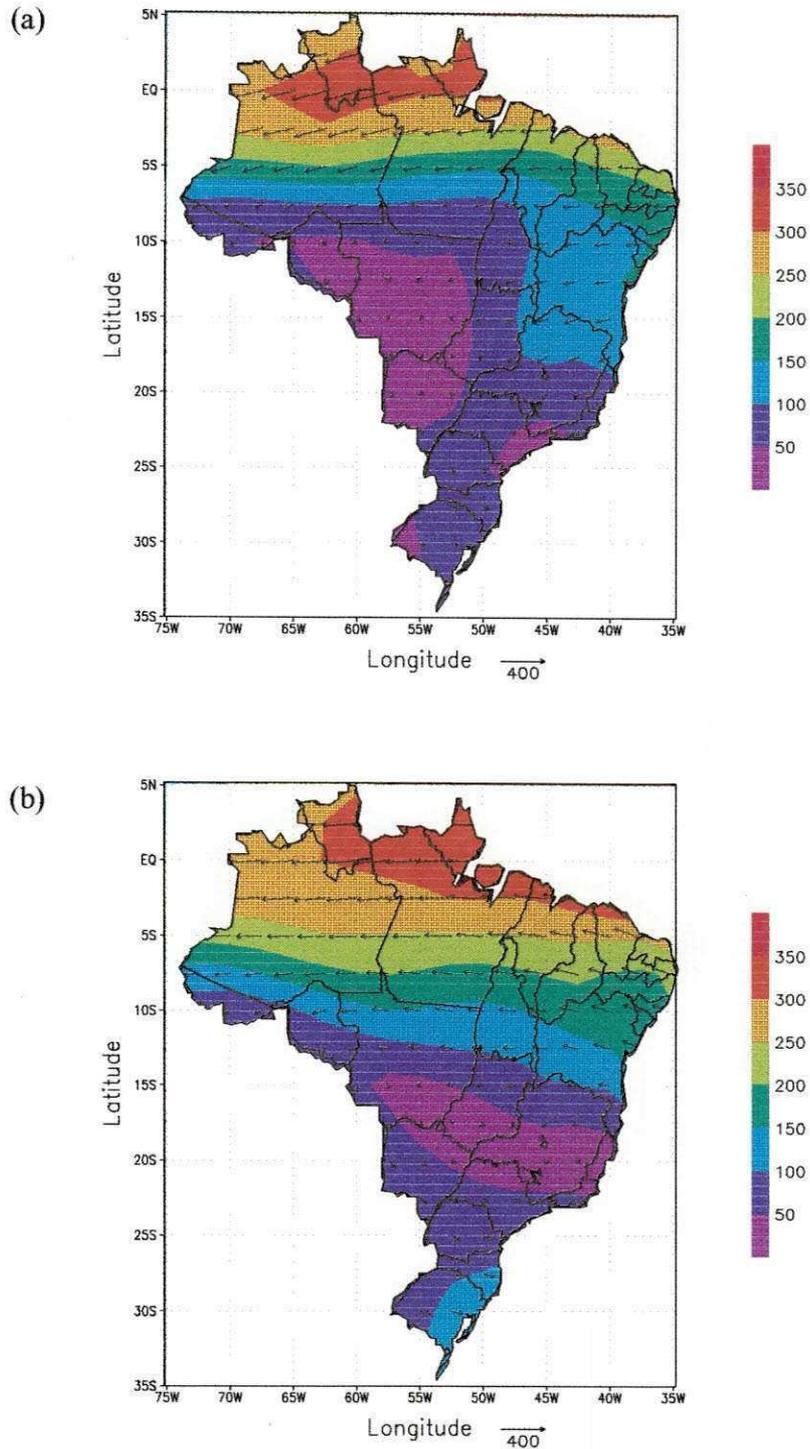


Figura 7 – Transporte de Vapor d'água integrado verticalmente -  $\bar{Q}$  (kg/m.s), médias para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ

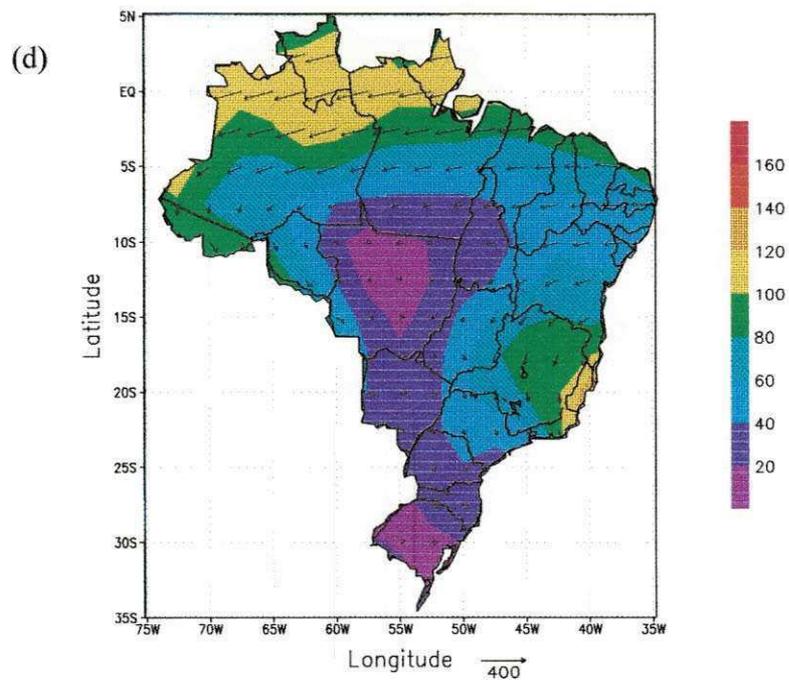
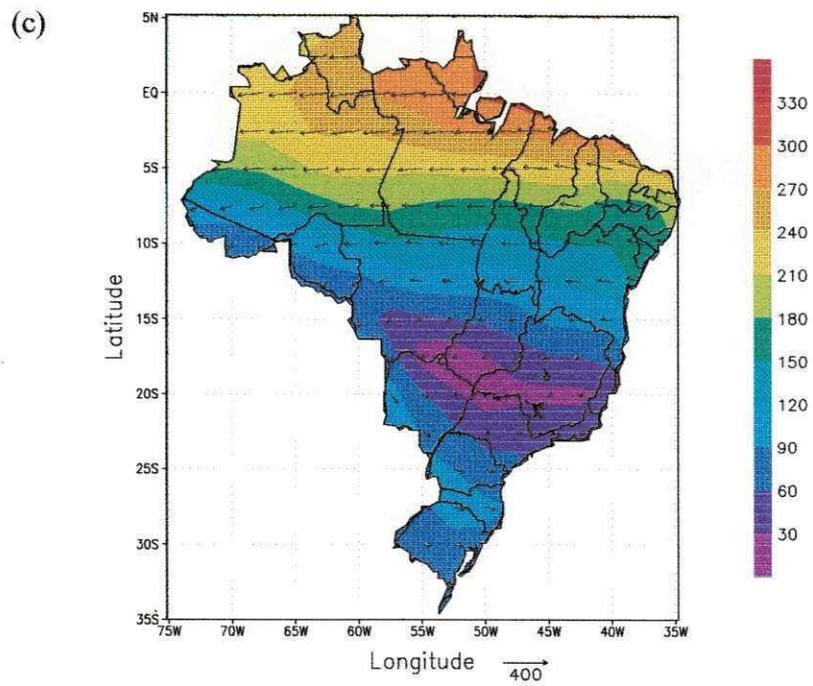


Figura 7 – (Continuação)

## 4.2 – PRECIPITAÇÃO

A distribuição espacial da precipitação média, apresentada na Figura 8, foi obtida com os dados disponíveis no projeto “reanálises” do NCEP/NCAR, em que foram utilizadas as estimativas de Xie-Arkin (Trenberth, 1999). De acordo com Trenberth e Guillemot (1996), as precipitações geradas pela estimativa de Xie-Arkin (1996) se correlacionam melhor com a precipitação observada, quando se compara com as geradas pelas “reanálises” do NCEP/NCAR sendo, assim mais adequadas para o objetivo deste trabalho.

A extensão territorial proporciona diferentes regimes de precipitação ao longo do Brasil. A precipitação sobre a região Sul é quase uniformemente distribuída nas quatro estações. Rao et al. (1996) afirmaram que a contribuição em cada estação é em torno de 25%. Entre os fenômenos atmosféricos mais importantes que atuam sobre a região, pode-se citar a passagem de sistemas frontais, que são responsáveis por grande parte dos totais pluviométricos registrados e está diretamente ligada ao posicionamento e intensidade do jato subtropical da América do Sul e os sistemas convectivos de mesoescala (Oliveira, 1986).

As mudanças nas precipitações sobre a região Sudeste podem estar relacionadas ao conteúdo de vapor d’água atmosférico que por sua vez, são influenciadas tanto pelos sistemas tropicais quanto pelos sistemas de latitudes médias. Nessa região se observa estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa no verão, período em que, como visto anteriormente, o fluxo de vapor d’água é mais intenso. Segundo Fernandes e Satyamurty (1994) os cavados invertidos atuam principalmente durante o inverno, provocando condições de tempo moderado principalmente sobre o Mato Grosso do Sul e São Paulo. Vórtice- ciclones em altos níveis, oriundos da região do Pacífico, organizam-se com intensa convecção

associada à instabilidade causada pelo jato subtropical. Linhas de instabilidade pré-frontais, geradas a partir da associação de fatores dinâmicos de grande escala e características de meso-escala são responsáveis por intensa precipitação.

A precipitação sobre a parte central do Brasil, também está relacionada ao transporte de vapor d'água. Em períodos que o transporte é mais intenso, são observados maiores valores de precipitação, e períodos com transporte menos intenso, menores valores de precipitação. As regiões Sudeste e Centro-Oeste são caracterizadas pela atuação de sistemas que associam características de sistemas tropicais com sistemas típicos de latitudes médias. Durante os meses de maior atividade convectiva, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais fenômenos que influenciam no regime de chuvas dessas regiões (Quadro e Abreu, 1994).

Sobre a região Nordeste o transporte de vapor d'água é significativo ao longo do ano. Durante os dois primeiros trimestres foram observados maiores valores de precipitação, coerente com Strang (1972), que afirmou que a principal estação chuvosa da região é março-maio. Nóbrega (2001) afirmou que apesar da região ter conteúdo de vapor d'água elevado durante todo o ano, mecanismos dinâmicos influenciam a precipitação sobre a região. A convergência e divergência de massa, que são entendidas como efeitos dinâmicos, são os principais responsáveis para que ocorra a precipitação, e o que determina a possibilidade de convecção sobre a região é a quantidade de energia de inibição convectiva. Segundo Nóbrega (2001) os meses de junho a setembro apresentam muita energia de inibição e quase nenhuma energia potencial convectiva e para formar nuvens convectivas em um mês como setembro, por exemplo, é necessária a atuação de um sistema dinâmico muito forte, como uma frente fria que atinja a região ou um complexo convectivo de meso escala, cuja

força seja capaz de sobrepujar os efeitos inibidores ditados pela termodinâmica local.

Na região Norte, praticamente não se observa estação seca. Entretanto, a região apresenta um mínimo de precipitação no início do segundo semestre (Nobre et al, 1992) que, provavelmente, está diluído entre as Figuras 8(b) e 8(c). Investigações sobre a influência dos mecanismos dinâmicos na precipitação da região devem ser feitas para uma melhor explicação da precipitação já que sobre a região, assim como a região Nordeste, observa-se conteúdo de vapor d'água atmosférico significativo. Investigações sobre os mecanismos dinâmicos que podem influenciar a precipitação sobre a região estão sendo desenvolvidas como parte do projeto LBA ("Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia", ou "Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia").

Na Figura (8a) observa-se os maiores valores de precipitação sobre a região Norte associada ao posicionamento da ZCIT. Na região Nordeste observa-se os maiores valores ao longo dos períodos analisados relacionados à atuação da ZCIT e penetração de frentes frias oriundas do Sul do país. Sobre as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste a precipitação está relacionada a ocorrência de ciclogêneses e frontogêneses..

Observa-se na Figura (8b) que a precipitação sobre o Brasil diminui significativamente na região central do Brasil e interior do Nordeste, observando valores inferiores a 2 mm/dia. Sobre o Nordeste, em contraste com o período anterior, os valores aumentam para leste, com precipitações mais intensas sobre o litoral leste da região. Na região Norte os valores diminuem em direção ao Sul, com valores mínimos sobre o estado de Rondônia e Tocantins. A diminuição da precipitação sobre as regiões Norte e Nordeste devem estar relacionadas ao posicionamento da ZCIT. Os maiores valores à leste do Nordeste podem estar relacionados às linhas de instabilidade e à máxima convergência dos alísios com a

brisa terrestre, a qual deve ser mais forte durante as estações de outono e inverno quando o contraste de temperatura entre a terra e o mar é maior. Nas regiões Centro-Oeste e Sudeste observam-se maior precipitação ao sul dessas regiões que podem estar associadas aos sistemas sinóticos que atingem o sul do país, como por exemplo, sistemas frontais.

Na Figura (8c) observa-se que a precipitação sobre a região Norte é menor, comparando com os períodos anteriores. Possíveis mecanismos dinâmicos devem estar relacionados a essa diminuição, visto que sobre a região a quantidade de vapor d'água é considerável. Sobre o Nordeste observa-se uma isolinha de 2 mm/dia em quase toda a região, e também em parte de Minas Gerais, indicando que nestas regiões a precipitação foi inferior a 1mm/dia durante esse período.

Na Figura (8d) destaca-se um núcleo de 10 mm/dia na parte central do Brasil, sendo que nesse período foi observado um transporte de vapor d'água mais intenso sobre a região, que está relacionado à atuação da ZCAS ("Zona de Convergência no Atlântico Sul") e sistemas frontais. O interior do Nordeste também apresenta valores maiores que o período anterior que podem estar relacionadas a presença de vórtice-ciclones de ar superior. Sobre a Bahia a precipitação pode estar relacionada aos sistemas frontais. Já na região Sul do Brasil e oeste da Bahia a presença da ZCAS influencia a precipitação.

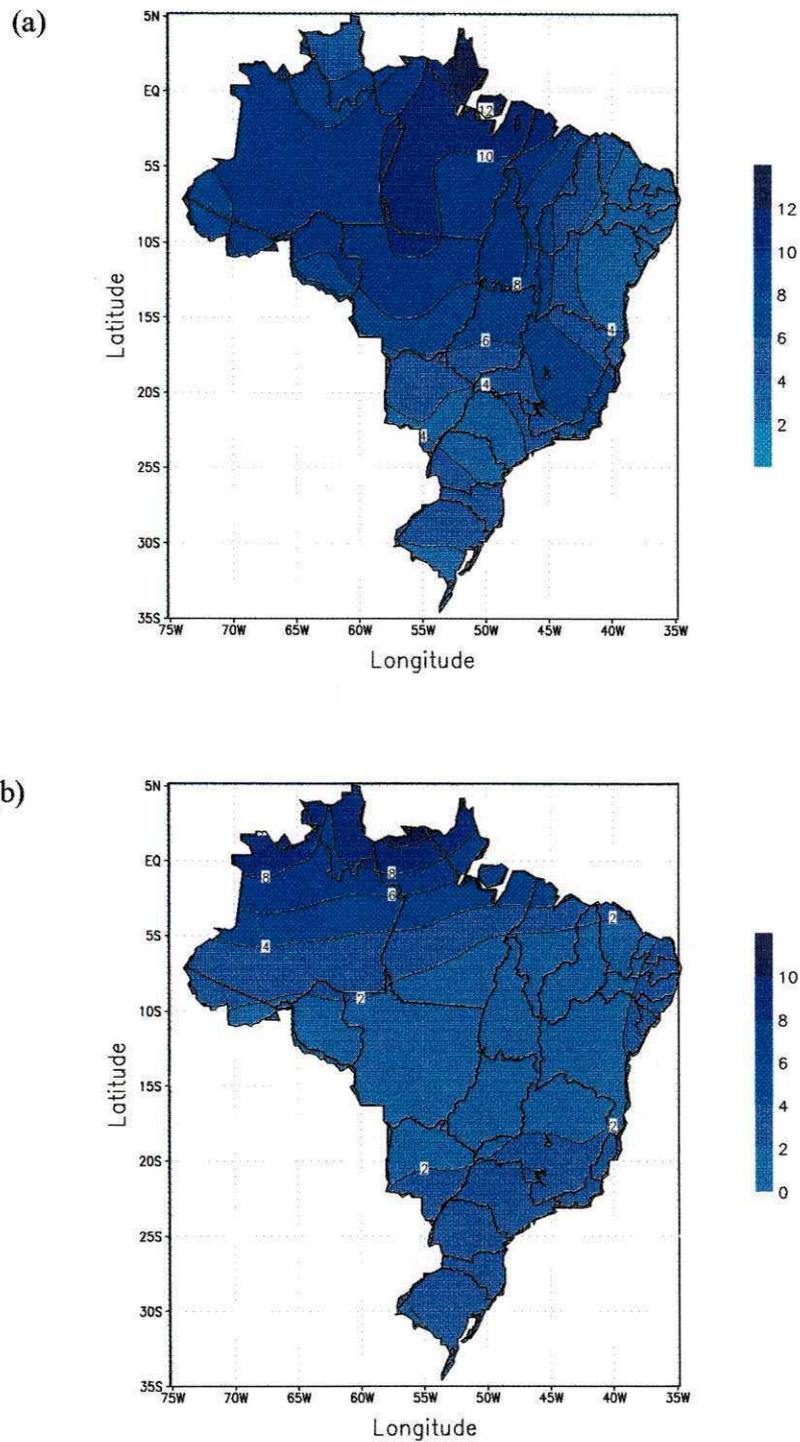


Figura 8 – Distribuição espacial da precipitação média (mm/dia) para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ

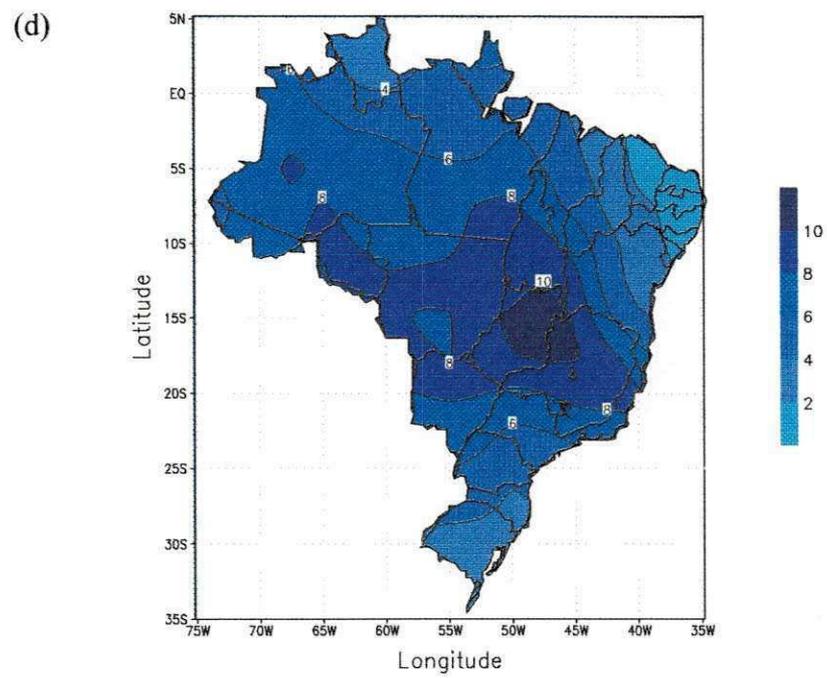
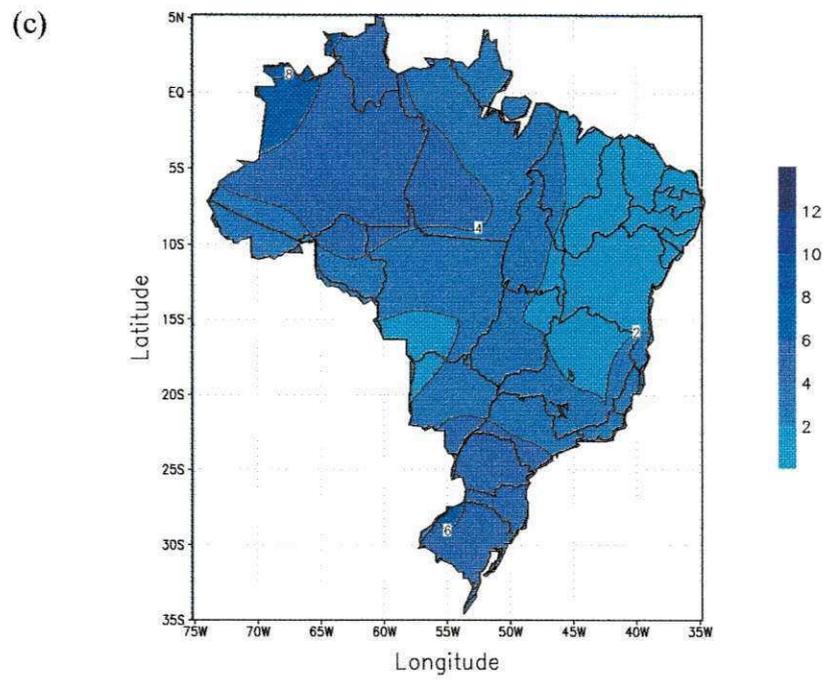


Figura 8 – (Continuação)

### 4.3 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A distribuição espacial da evapotranspiração média, obtida pela integração do fluxo de calor latente médio do trimestre, é apresentada através da Figura 9.

As condições para a evapotranspiração (disponibilidade de energia e água), favorecem variações ao longo do território brasileiro. Parte da radiação de onda curta do Sol é convertida em calor na superfície de folhas, lagos, etc, aquecendo a água e aumentando a evapotranspiração.

A evapotranspiração sobre a região Norte é alta ao longo do ano, contrastando com o Nordeste. Apesar das duas regiões receberem uma quantidade de energia solar considerável ao longo do ano, a disponibilidade de água afeta a evapotranspiração sobre o NE. Sobre as demais regiões, períodos secos refletem baixa evapotranspiração e períodos úmidos refletem alta evapotranspiração. Os valores obtidos através da integração do fluxo de calor latente mostram-se coerentes com valores obtidos em diferentes situações por Silva (2000).

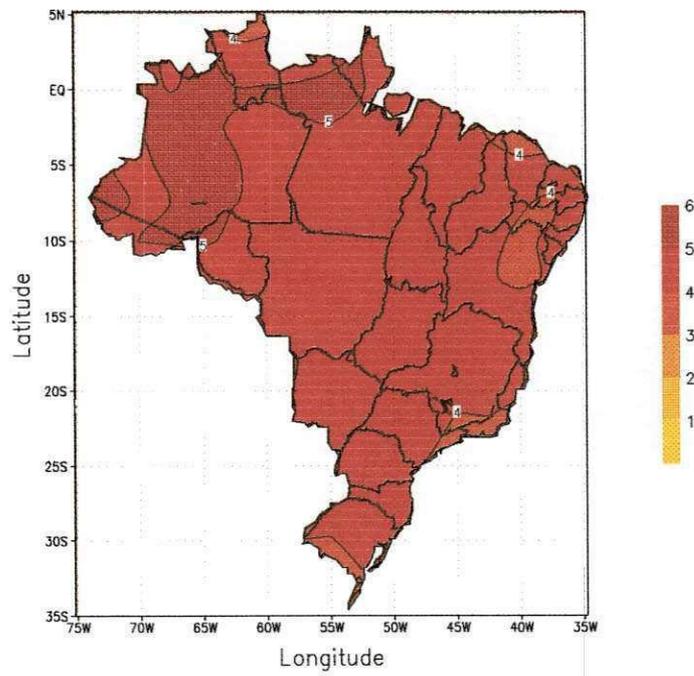
Na Figura 9 (a) observa-se que a evapotranspiração é quase uniforme sobre o Brasil, com valores entre 5mm/dia à 3 mm/dia. Os maiores valores são observados sobre o a região Norte e os menores valores em uma porção do Nordeste evidenciando a necessidade das condições favoráveis à evapotranspiração.

Na Figura 9 (b) observam-se isolinhas com valores de evapotranspiração entre 4 mm/dia à 2 mm/dia. Os maiores valores de evapotranspiração são observados sobre a região Norte que podem estar relacionadas à quantidade de água disponível na superfície influenciada pela ocorrência de precipitação mais intensa em apenas uma porção da região Norte, como observado na Figura 8 (b).

Na Figura 9 (c) observa-se a maior variação espacial dentre os trimestres estudados. São observadas isolinhas com valores entre 5 mm/dia à 1 mm/dia, indicando que evapotranspirou menos em algumas regiões nesse período. Os maiores valores são observados sobre a porção norte da região Norte. Essa parte da região recebe mais radiação solar do que as demais nesta época do ano, com exceção do Nordeste que neste caso, não apresenta disponibilidade de água como a região Norte. Isso também reflete o fato da estação chuvosa dessa época acontecer na parte norte da região amazônica. Sobre o NE são observados baixos valores de evapotranspiração, que estão associados à baixa precipitação registrada nesse período, exceto na parte leste, o que está de acordo com Kousky (1980).

Na Figura 9 (d) a variação espacial encontrada durante o período anterior, diminui significativamente e comparando com a Figura 8 (d), a alta evapotranspiração encontrada na parte central do Brasil está relacionada à precipitação encontrada nesse período. Nota-se isolinhas com valores entre 5 mm/dia à 1 mm/dia, com os menores valores sobre a parte da região central do Nordeste.

(a)



(b)

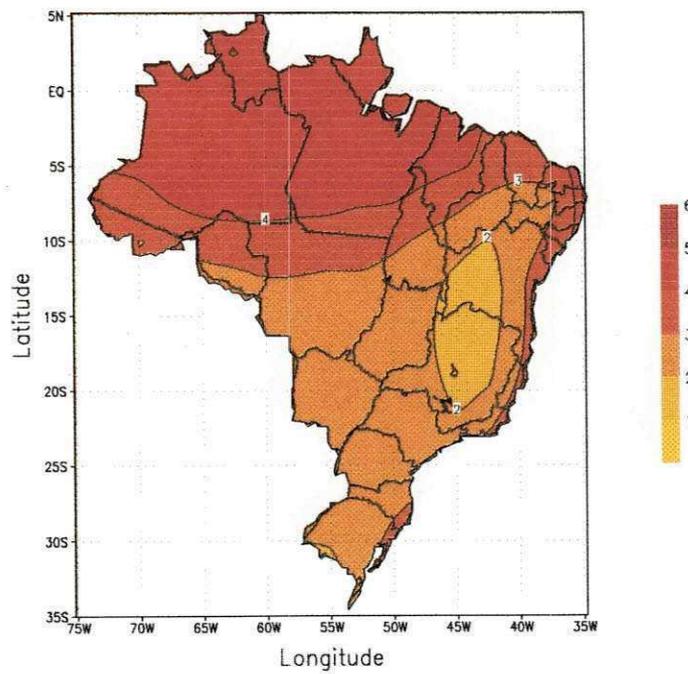


Figura 9 – Distribuição espacial da evapotranspiração média (mm/dia) para os trimestres: (a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ



#### 4.4 – RECICLAGEM DO VAPOR D'ÁGUA

A distribuição espacial do índice de reciclagem do vapor d'água, obtida através da Equação (5), com escala de comprimento de 500 km é apresentada na Figura 10.

A reciclagem do vapor d'água está relacionada ao fornecimento local de vapor d'água que, por sua vez, está relacionado à evapotranspiração (evaporação, se for sobre o oceano) e que, como visto anteriormente, depende da disponibilidade de energia e água. No entanto, regiões com altos valores de evapotranspiração não implicam, necessariamente, em altas taxas de reciclagem, devido ao fluxo de vapor d'água transportado para a região (Souza et al., 2001). Essa característica é observada sobre a região Norte, cujo índice de reciclagem é menor do que em regiões em que a contribuição da evapotranspiração não é tão significativa. A explicação para esse fato é o intenso transporte de vapor d'água sobre a região, que pode ser utilizado, também, para explicar o fato do índice de reciclagem sobre o Nordeste ficar na faixa de 5% a 10%. Valores semelhantes foram obtidos por Trenberth (1999) para um L de 500 Km, porém, o autor verificou que a utilização de um L de 1000 km implica em aumento significativo nos valores de reciclagem.

Valores relativamente altos de reciclagem ocorrem na porção central do Brasil, onde o fluxo de vapor d'água é menos intenso, como observado na Figura 7. A presença de sistemas convectivos pode estar relacionada a esses valores. Trenberth (1999) afirmou que a reciclagem do vapor d'água é alta em zonas de convergência localizadas nas latitudes médias. Os altos valores de reciclagem não se repetem sobre a ZCIT porque o fluxo de umidade é máximo nas regiões equatoriais. Outros autores também afirmam que em regiões com transporte de vapor d'água menos intenso observam-se índices de reciclagem significativos

(Brubaker et. al, 1993; Brubaker et. al, 1994; Eltahir e Brás, 1994, Trenberth, 1999).

Comparando os trimestres em estudo através da Figura 10, nota-se que na Figura 10 (a) a reciclagem apresentou valores menores que 5 % ao Norte do Brasil. Sobre o NE observam-se valores entre 5% e 10%. Valores maiores que 20 % são observados na região Centro-Oeste, sobre o pantanal mato-grossense e, também em parte da região Sul, que estão relacionados ao transporte de vapor d'água menos intenso, observado na Figura 7 (a). Isso indica que a contribuição da evapotranspiração para o conteúdo de vapor d'água foi significativa.

Na Figura 10 (b) o fluxo de vapor d'água mais intenso juntamente com a baixa evapotranspiração sobre as regiões Norte e Nordeste faz com que ocorram baixos valores de reciclagem. Observam-se centros de reciclagem do vapor d'água na parte central da região Centro-Oeste e no estado de Espírito Santo, associado ao transporte de vapor d'água observado na Figura 7 (b). O que está de acordo com a afirmação de Trenberth (1999) que em zonas de convergências próximas as altas subtropicais, cujo fluxo de umidade advectiva é pequeno, a reciclagem do vapor d'água pode ser maior que 20% para um L de 500 km.

Na Figura 10 (c) observa-se menores reciclagens sobre o Nordeste, apesar do fluxo advectivo ser menor que no período anterior, como visto na Figura 7 (c), a evapotranspiração também é pequena, o que faz com a reciclagem do vapor d'água seja menor do que no período anterior. Comparando as Figuras 7 (c) e 10 (c) observa-se que em regiões cujo fluxo de vapor d'água é menos intenso, a reciclagem é maior. Esse fato é observado, nesse trimestre, mais uma vez, na região Centro-Oeste e Sudeste.

Na Figura 10 (d) observa-se índice de reciclagem sobre a parte oeste do Nordeste entre 10% e 5 %. Sobre a região Centro-Oeste, observam-se valores maiores que

30%. Tanto o fluxo de vapor d'água quanto a evaporação fazem com que o índice de reciclagem aumente nesse período. Savenije (1995) afirmou que, em regiões pantanosas, o aumento na evapotranspiração pode vir a aumentar significativamente graças ao conteúdo de umidade existente na superfície dessas regiões.

A importância da reciclagem do vapor d'água fica evidente quando analisamos que ao longo de 500km a contribuição local para a precipitação pode ser significativa, dependendo das condições favoráveis à reciclagem, durante o ano.

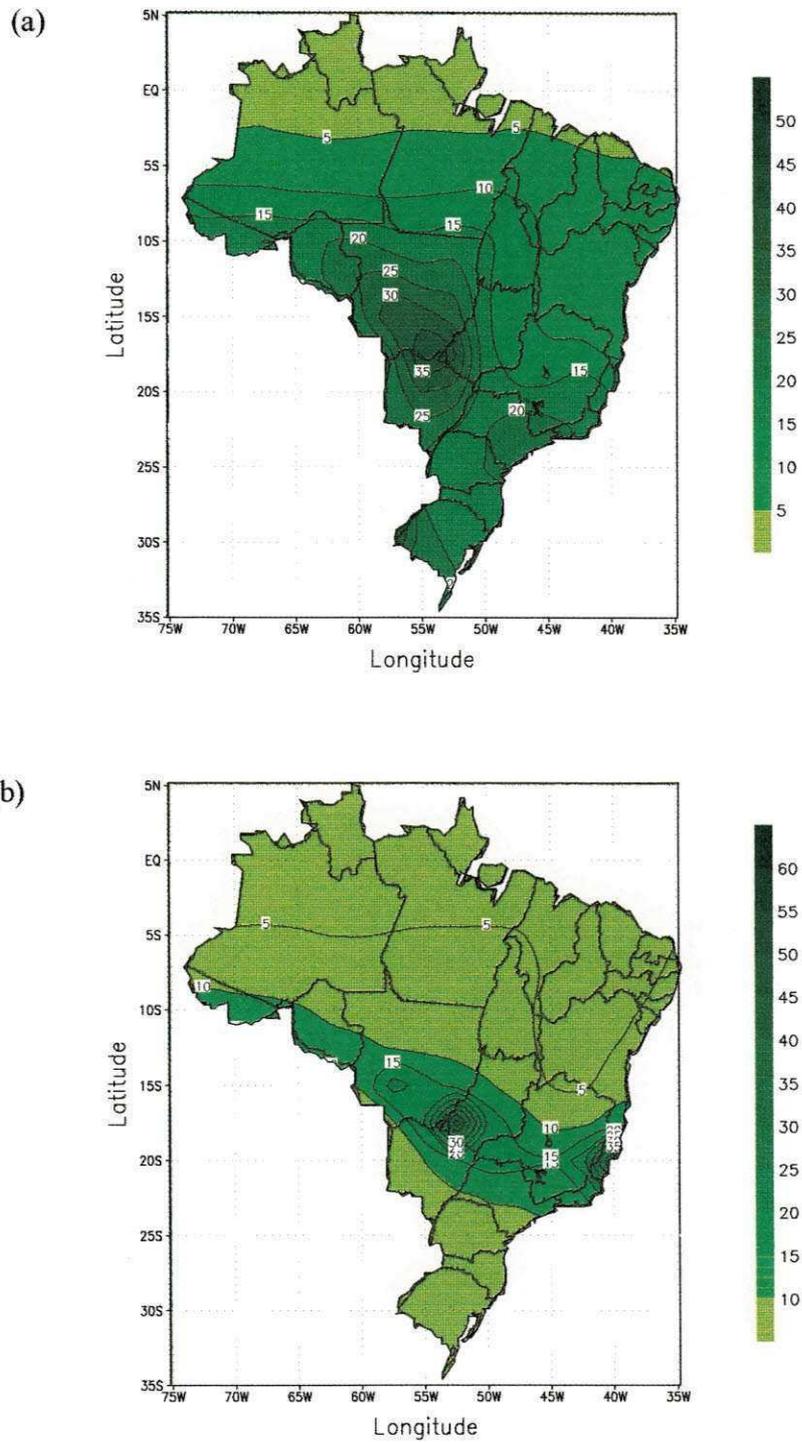


Figura 10 – Distribuição espacial da reciclagem do vapor d'água (%) média para os trimestres:

(a) FMA, (b) MJJ, (c) ASO e (d) NDJ

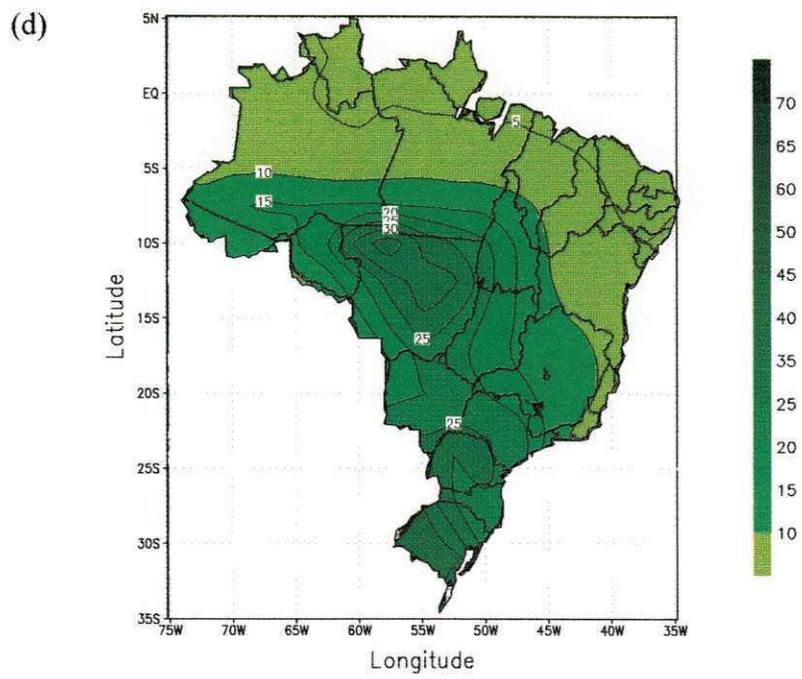
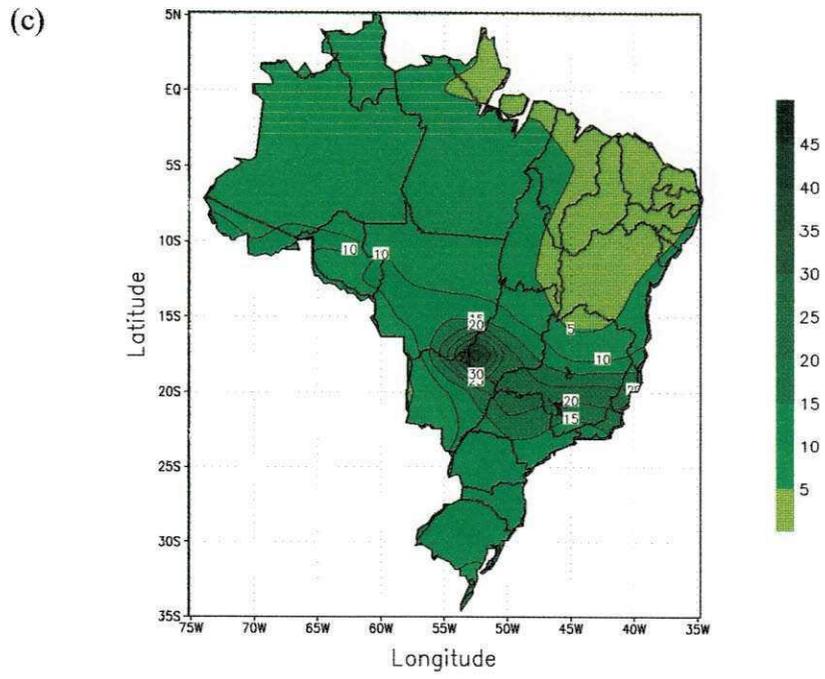


Figura 10 – (Continuação)

A equação (10) permite validar o índice de reciclagem sobre uma área, utilizando o Fluxo de vapor d'água médio que entra nesta área e a evapotranspiração média dentro desta área, não necessitando da precipitação.

Nesse contexto, foram calculadas as componentes médias mensais para as áreas descritas na Figura 3. Como a escala de comprimento é maior, os valores observados para a reciclagem do vapor d'água também são maiores que os encontrados pelo método anterior.

#### **4.4.1 Área da Bacia Amazônica**

Na Tabela 1 têm-se as componentes médias mensais obtidas para a área da Bacia Amazônica, em que  $\nabla \cdot \bar{Q}$  é a divergência do fluxo de vapor d'água obtida pela equação (21),  $P$  é a precipitação média mensal sobre a área,  $ET$  é a evapotranspiração média mensal na área,  $F_e$  e  $F_s$  são os fluxos médios mensais de vapor d'água que entra e que sai da área, respectivamente, e  $\rho$  o índice médio mensal de reciclagem do vapor d'água.

Os resultados mostram que a região comportou-se como sumidouro de vapor d'água atmosférico em todos os meses, exceto em julho que é o mês mais seco da região. Os maiores índices de precipitação e evapotranspiração ocorrem de janeiro e abril e de outubro e dezembro. A evapotranspiração tem uma variação sazonal semelhante à da precipitação, com valores acima da média anual, entre janeiro a abril e outubro a dezembro, e abaixo dessa média nos demais meses. A componente  $F_e$  é mais intensa durante os meses de janeiro a maio e também em dezembro. Já o  $F_s$  apresenta os maiores valores nos meses de janeiro e fevereiro e, entre os meses de maio a agosto. A reciclagem média anual é de 24%, com valores entre 21% e 27%. Valores mínimos foram encontrados nos meses de junho e julho (21% em ambos

os meses), e máximos valores ocorreram nos meses de outubro e novembro (26% e 27%, respectivamente).

Tabela 1: Componentes utilizadas na estimação de  $\rho$  sobre a área Bacia Amazônica

Mês	$\nabla \bar{Q}$ (mm/mês)	P (mm/mês)	ET (mm/mês)	F <sub>e</sub> /A (mm/mês)	F <sub>r</sub> /A (mm/mês)	P
Janeiro	-58	216	157	-237	179	24%
Fevereiro	-60	219	158	-237	177	24%
Março	-59	215	153	-225	166	25%
Abril	-59	202	142	-223	165	23%
Mai	-45	174	127	-224	178	22%
Junho	-18	134	116	-214	196	21%
Julho	1	109	109	-193	194	21%
Agosto	-9	120	110	-192	182	22%
Setembro	-33	160	126	-203	170	23%
Outubro	-55	202	145	-196	141	26%
Novembro	-65	218	151	-197	132	27%
Dezembro	-63	218	153	-227	164	25%
<b>Média Anual</b>	<b>-44</b>	<b>182</b>	<b>137</b>	<b>-214</b>	<b>170</b>	<b>24%</b>

A relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem pode ser analisada na Figura 11. Observa-se que os meses em que a reciclagem é máxima está relacionado a  $F_e$  menos intenso e ET é maior. Observa-se também a importância da evapotranspiração no processo de reciclagem, por exemplo, em agosto o fluxo foi mínimo, mas a reciclagem não foi máxima devido à evapotranspiração também ter sido pequena. Ao analisar a curva da reciclagem e a variação da evapotranspiração observa-se que a curva da reciclagem tende a variar ao longo do ano seguindo a variação da evapotranspiração.

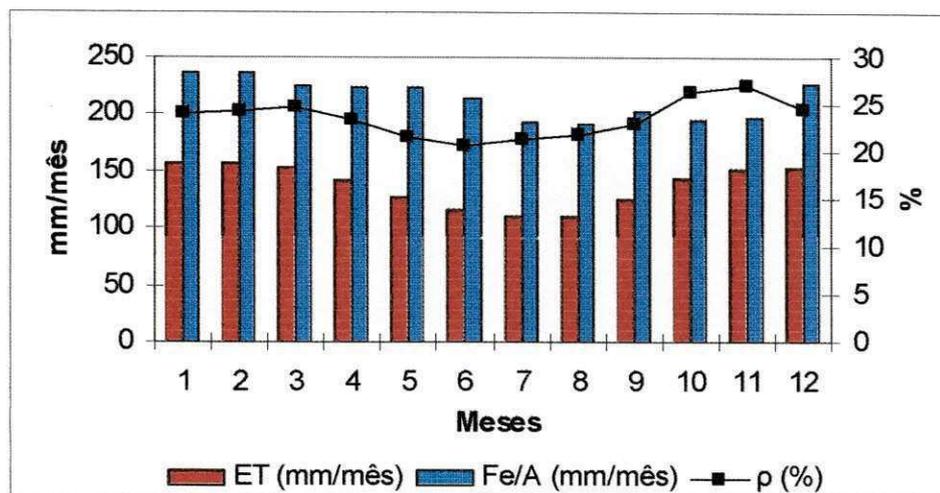


Figura 11– Relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Bacia Amazônica

Na Tabela 2 têm-se os fluxos médios de vapor d'água em cada uma das faces Norte, Sul, Leste e Oeste. A maior contribuição para o  $F_e$  total ocorre na face Leste e é da ordem de 73%. A contribuição do  $F_e$  na face Norte para o  $F_e$  total é de 21% ao longo do ano, entretanto, nos meses de dezembro e de janeiro a março observa-se uma contribuição da ordem de 35%. Ao analisar a face Oeste, observa-se que parte do fluxo de vapor d'água é advectada e, como visto na Figura 7, esse fluxo, que varia de direção ao longo do ano, transporta umidade para as regiões adjacentes, como por exemplo, a região Sudeste, em alguns meses do ano.

Tabela 2 – Fluxo médio de vapor d'água que entra ( $F_e$ ) e que sai ( $F_s$ ) em cada face (mm/mês) para a área da Bacia Amazônica

Mês	Norte		Sul		Leste		Oeste		Total	
	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$
Janeiro	-89,7	4,6	-4,9	85,5	-129,6	12,4	-13,0	76,7	-237,3	179,3
Fevereiro	-85,2	6,7	-6,3	75,4	-133,9	9,3	-11,1	85,5	-236,7	177,0
Março	-76,7	11,4	-6,6	57,7	-133,3	7,7	-8,5	88,9	-225,2	165,9
Abril	-59,4	15,9	-7,7	47,3	-153,0	2,8	-3,2	98,5	-223,4	164,7
Mai	-39,0	21,3	-6,2	45,9	-176,7	2,7	-1,6	108,2	-223,6	178,3
Junho	-18,8	23,2	-1,4	55,0	-192,4	3,3	-0,9	113,9	-213,6	195,6
Julho	-10,5	25,0	-1,5	52,4	-181,0	3,3	-0,3	113,0	-193,4	193,9
Agosto	-13,1	22,7	-2,4	55,3	-175,3	2,5	-0,6	101,6	-191,5	182,1
Setembro	-17,7	17,2	-4,5	64,9	-177,8	1,6	-2,8	86,2	-203,0	170,0
Outubro	-27,5	8,2	-4,0	73,8	-156,4	1,1	-7,9	57,6	-195,9	140,8
Novembro	-45,5	4,3	-4,1	71,7	-137,7	4,2	-9,6	51,5	-197,0	131,8
Dezembro	-77,4	3,3	-4,9	83,5	-133,6	8,8	-11,1	68,4	-227,1	164,2
<b>Média</b>	<b>-46,7</b>	<b>13,6</b>	<b>-4,5</b>	<b>64,0</b>	<b>-156,7</b>	<b>5,0</b>	<b>-5,9</b>	<b>87,5</b>	<b>-214,0</b>	<b>170,3</b>

Brubaker et al. (1993) encontraram uma reciclagem média anual de 23% sobre a Bacia Amazônica. Entretanto, esse valor não pode ser comparado com o da Tabela 1, pois a área de estudo utilizada pelos autores foi diferente da utilizada neste trabalho. Para possibilitar uma comparação, calcularam-se também as componentes utilizadas para a estimativa da reciclagem do vapor d'água sobre a mesma área utilizada por Brubaker et al. (1993). Na tabela 3 têm-se valores obtidos no trabalho de Brubaker et al. (1993) e valores obtidos nesse trabalho. Comparando os valores da reciclagem do vapor d'água parece haver diferenças significativas, principalmente nos meses com menores reciclagens. Esse fato deve estar relacionado às origens dos dados, que são distintas e também, a evapotranspiração utilizada em Brubaker et al. (1993) que foi obtida através da equação do balanço de massa. Eltahir e Brás (1994), também verificaram diferenças significativas nos valores da reciclagem ao utilizaram dados de origens distintas sobre uma mesma região e utilizando a mesma metodologia.

Tabela 3 – Comparação entre os valores de Brubaker et al. (1993) e valores encontrados nesse trabalho das componentes utilizadas na estimação de  $\rho$  sobre a Bacia Amazônica: N – valores obtidos com os dados utilizados nesse trabalho; Br – Brubaker et al. (1993)

Mês	$\nabla \bar{Q}$ (mm/mês)		P (mm/mês)		ET (mm/mês)		F <sub>c</sub> A (mm/mês)		ρ	
	N	Br	N	Br	N	Br	N	Br	N	Br
Janeiro	-61	-104	214	256	151	152	-268	-205	28%	27%
Fevereiro	-66	-117	221	249	152	132	-269	-223	27%	23%
Março	-68	-113	220	88	149	175	-257	-212	28%	29%
Abril	-66	-110	208	250	140	140	-251	-197	27%	26%
Mai	-50	-59	179	183	127	124	-245	-201	26%	24%
Junho	-24	-51	140	120	115	69	-228	-219	25%	14%
Julho	-2	-18	111	95	109	77	-201	-177	27%	18%
Agosto	-7	-17	117	73	110	56	-198	-155	26%	15%
Setembro	-25	-33	149	100	123	67	-212	-174	28%	16%
Outubro	-51	-30	194	145	140	115	-214	-144	31%	29%
Novembro	-65	-56	213	187	146	131	-221	-147	31%	31%
Dezembro	-63	-54	213	213	148	159	-255	-169	28%	32%
<b>Média Anual</b>	<b>-46</b>	<b>-64</b>	<b>182</b>	<b>163</b>	<b>134</b>	<b>116</b>	<b>-235</b>	<b>-185</b>	<b>28%</b>	<b>24%</b>

Apesar das diferenças quantitativas entre os valores encontrados por Brubaker et al. (1993) e os encontrados neste trabalho, observam-se na Figura 12 semelhanças na variação sazonal, que indica consistência na metodologia utilizada aqui nesse trabalho para o cálculo da reciclagem do vapor d'água.

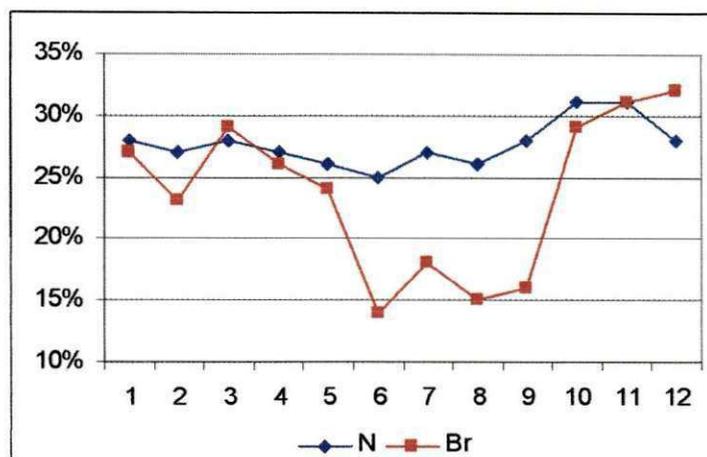


Figura 12 – Comparação entre valores médios mensais de  $\rho$  encontrado por Brubaker et al. (1993) e nesse trabalho sobre a Bacia Amazônica: N – valores obtidos com os dados utilizados nesse trabalho; Br – Brubaker et al. (1993)

#### 4.4.2 Área Nordeste

Na Tabela 4 têm-se as componentes médias mensais obtidas para a área Nordeste. A componente da divergência mostra que essa área comportou-se com fonte de vapor d'água entre julho e setembro e sumidouro de vapor d'água nos demais meses. A precipitação e a evapotranspiração tem valores acima do valor médio anual entre janeiro a maio e em dezembro. Já o  $F_e$  é mais intenso durante os meses de janeiro a junho e também em dezembro, o  $F_s$  apresenta os maiores valores nos meses entre junho e outubro. A reciclagem média anual é de 20%, com valores entre 17% e 22%. Os valores mínimos foram encontrados nos meses de agosto e setembro (17% em ambos os meses) e máximo valor no mês de novembro (22%). Observa-se que os meses com mínimos valores de reciclagem são os meses

em que a evapotranspiração foi maior do que precipitação.

Tabela 4: Componentes utilizadas na estimativa de  $\rho$  sobre a área Nordeste

Mês	$\nabla \vec{Q}$ (mm/mês)	P (mm/mês)	ET (mm/mês)	F <sub>v</sub> /A (mm/mês)	F <sub>v</sub> /A (mm/mês)	$\rho$
Janeiro	-104	242	134	-491	387	21%
Fevereiro	-124	264	135	-495	370	21%
Março	-134	269	131	-485	350	20%
Abril	-116	245	126	-469	354	20%
Mai	-77	197	118	-477	400	19%
Junho	-26	136	109	-471	446	18%
Julho	6	95	101	-435	440	18%
Agosto	23	69	93	-414	438	17%
Setembro	16	77	93	-428	443	17%
Outubro	-10	120	110	-417	407	21%
Novembro	-50	178	126	-436	386	22%
Dezembro	-82	216	131	-476	394	21%
<b>Média</b>	<b>-56</b>	<b>176</b>	<b>117</b>	<b>-458</b>	<b>401</b>	<b>20%</b>

Na Figura 13 observa-se a relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água. Os meses em que se observam menores índices de reciclagem não estão, necessariamente, associados aos fluxos menos intensos. Por outro lado, em meses em que o fluxo de vapor d'água é menos intenso e a evaporação é maior, a reciclagem também aumenta. Do mesmo modo que na área Bacia Amazônica observa-se que a curva da reciclagem tende a variar ao longo do ano seguindo a variação da evapotranspiração.

Na Tabela 5 têm-se os fluxos médios de vapor d'água em cada uma das faces Norte, Sul, Leste e Oeste da área do Nordeste. Da mesma maneira que na área da Bacia Amazônica, a maior contribuição para o  $F_e$  total ocorre na face Leste e é da ordem de 88%. O vapor d'água originado da evaporação sobre o Oceano Atlântico adjacente é transportado para a região e, parte deste, pode ser transportado para a área da Bacia Amazônica, como mostra os

valores da Tabelas 2 e 5, referente à face Leste.

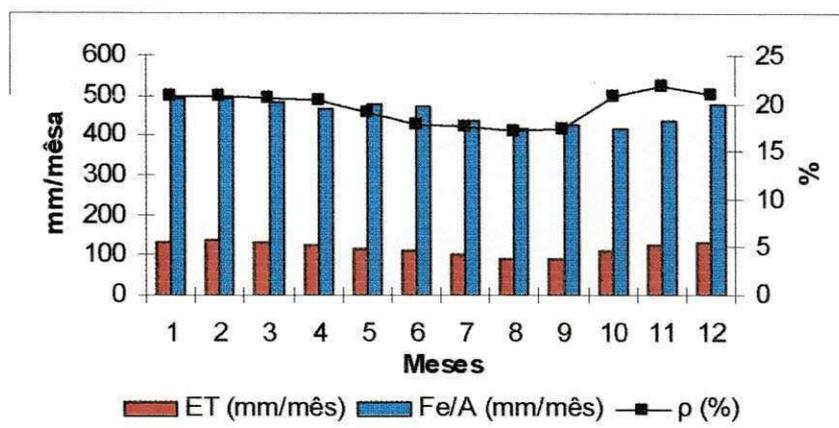


Figura 13 – Relação entre  $F_e$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Nordeste

A componente do  $F_e$  na Face Norte contribui em 25% para o  $F_e$  total entre os meses de janeiro a abril. Tanto na área da Bacia Amazônica, quanto na área do Nordeste, a contribuição do  $F_e$  na face Norte para o fluxo total é mais significativa nos primeiros meses do ano, de janeiro a maio, e também, em dezembro para o primeiro caso, e de janeiro a abril para o Nordeste. Essa contribuição mais significativa nestes meses deve-se à migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o Hemisfério Sul durante o verão. Segundo Mo e Higgins (1996), a componente meridional do fluxo de vapor d'água integrado verticalmente, indica a contribuição para a configuração da Célula de Hadley e, por sua vez, a atuação da ZCIT, que é formada pela convergência dos Alísios.

Tabela 5: Fluxo médio de vapor d'água que entra ( $F_e$ ) e que sai ( $F_s$ ) em cada face (mm/mês) para a área Nordeste

Mês	Norte		Sul		Leste		Oeste		Total	
	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$
Janeiro	-84,6	31,3	-10,4	106,8	-358,8	4,2	-37,5	244,7	-491,4	387,1
Fevereiro	-101,7	24,3	-17,9	80,2	-349,1	2,8	-25,8	262,9	-494,7	370,3
Março	-106,2	22,1	-22,0	61,9	-337,1	1,4	-19,2	264,9	-484,6	350,4
Abril	-81,2	21,8	-44,7	27,6	-335,8	0,4	-7,56	303,7	-469,3	353,6
Mai	-44,3	30,8	-55,6	14,4	-364,8	1,4	-11,9	353,1	-476,7	399,9
Junho	-22,9	51,3	-50,3	13,0	-386,2	0,0	-12,5	382,2	-472,1	446,5
Julho	-21,4	69,0	-50,4	9,2	-352,6	0,1	-11,3	363,0	-435,8	441,4
Agosto	-27,1	78,9	-43,1	10,6	-336,9	0,4	-8,4	349,0	-415,5	439,0
Setembro	-37,7	64,6	-39,1	19,0	-344,1	2,1	-8,3	359,4	-429,4	445,3
Outubro	-40,2	49,3	-22,9	51,8	-347,8	1,5	-5,9	304,5	-416,9	407,2
Novembro	-43,2	46,7	-11,4	94,8	-370,5	4,4	-10,5	239,5	-435,8	385,6
Dezembro	-64,2	38,5	-10,6	112,2	-371,8	5,2	-28,9	237,7	-475,2	393,8
<b>Média</b>	<b>-56,3</b>	<b>44,1</b>	<b>-31,6</b>	<b>50,2</b>	<b>-354,6</b>	<b>2,0</b>	<b>-15,6</b>	<b>305,4</b>	<b>-457,8</b>	<b>401,3</b>

#### 4.4.3 Área Sul-Sudeste

Na Tabela 6 têm-se as componentes médias mensais obtidas para a área Sul-Sudeste. A componente da divergência mostra que essa área comportou-se com fonte de vapor d'água de abril a setembro e, sumidouro de vapor d'água nos demais meses. As componentes P e ET tem valores acima do valor médio anual nos meses de janeiro a abril e de outubro a dezembro, com máximos valores em janeiro e dezembro, respectivamente. Valores de  $F_e$  acima do valor médio anual são encontrados entre os meses de janeiro a março e de outubro a dezembro. A reciclagem média anual é de 31%, com valores entre 24% e 38%. O valor máximo foi encontrado em abril e o mínimo em agosto. A variação da reciclagem do vapor d'água nesta área difere das demais sazonalmente e, em ordem de grandeza. Destaca-se o comportamento da reciclagem no mês de abril, em que  $F_e$  foi menor que  $F_s$  e, a evapotranspiração maior do que a precipitação. De acordo com Trenberth e Guillemot (1996)

evapotranspiração maior do que a precipitação. De acordo com Trenberth e Guillemot (1996) e Savenije (1995), o armazenamento de água no solo, proporcionado pela precipitação nos meses anteriores, faz com que a evapotranspiração local assuma um papel ainda mais relevante na contribuição à precipitação local. Esse fato, em especial, explica a importância da evapotranspiração na origem da precipitação local, já que nesse mês o transporte advectivo de vapor d'água foi menos intenso sobre a área, por outro lado, a precipitação foi acima do valor médio.

Tabela 6: Componentes utilizadas na estimativa de  $\rho$  sobre a área Sul-Sudeste

Mês	$\nabla \cdot \bar{Q}$ (mm/mês)	P (mm/mês)	ET (mm/mês)	$F_c/A$ (mm/mês)	$F_r/A$ (mm/mês)	$\rho$
Janeiro	-64	209	143	-276	213	32%
Fevereiro	-57	200	141	-264	208	33%
Março	-38	176	137	-221	183	36%
Abril	6	122	128	-189	195	38%
Mai	31	71	103	-188	218	34%
Junho	36	45	83	-210	246	27%
Julho	34	37	72	-193	227	26%
Agosto	31	37	69	-197	227	24%
Setembro	24	60	85	-220	244	26%
Outubro	-10	128	118	-252	241	30%
Novembro	-33	173	140	-256	223	34%
Dezembro	-53	199	144	-276	223	33%
<b>Média</b>	<b>-8</b>	<b>121</b>	<b>113</b>	<b>-228</b>	<b>221</b>	<b>31%</b>

A relação entre  $F_c$  e ET no índice de reciclagem do vapor d'água é observada na Figura 14. Do mesmo modo que foi observada para as áreas anteriores, a reciclagem é maior quando o  $F_c$  é menos intenso e a evapotranspiração maior. Nessa área analisar a curva da reciclagem e a variação da evapotranspiração observa-se que a curva da reciclagem tende a variar ao longo do ano seguindo a variação da evapotranspiração em quase todos os meses,

intenso do que nos demais (com exceção de fevereiro que foi menor do que janeiro, no entanto foram encontrados valores menores que nesse mês) fazendo com que a reciclagem do vapor d'água tendesse a aumentar.

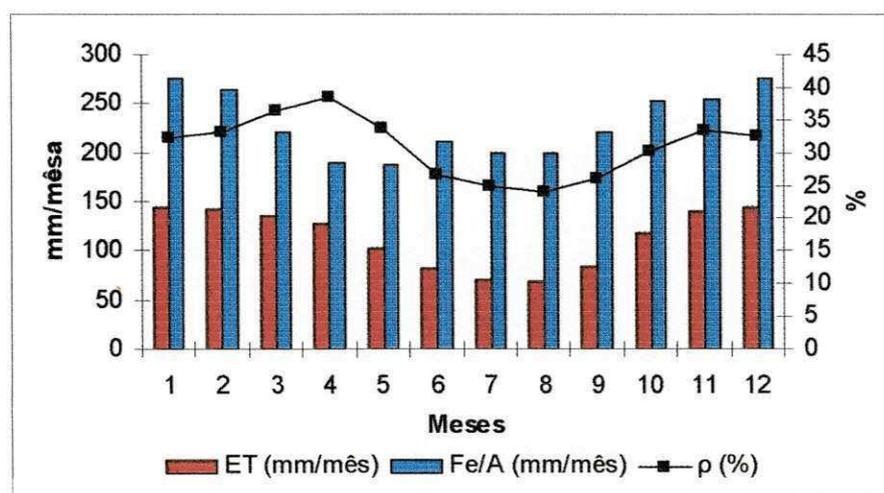


Figura 14 – Relação entre Fe e ET no índice de reciclagem do vapor d'água para a área Sul-Sudeste

Na Tabela 7 têm-se os fluxos médios de vapor d'água em cada uma das faces Norte, Sul, Leste e Oeste, desta vez, para a área Sul-Sudeste. Como mencionado anteriormente, o comportamento do fluxo nesta área é diferente das demais. O valor médio anual de  $F_e$  é bastante próximo de  $F_s$ . A maior contribuição para o  $F_e$  acontece na face Norte. Analisando o  $F_e$  nas faces norte e oeste observa-se que a contribuição dessas faces para o fluxo que entra na região é de aproximadamente 85%. Os resultados são coerentes com os obtidos na Figura 7 e Tabela 2 que indicam um transporte de umidade da Amazônia para esta área. Portanto, a Amazônia é fonte de vapor d'água para a área Sul-Sudeste.

Tabela 7: Fluxo médio de vapor d'água que entra ( $F_e$ ) e que sai ( $F_s$ ) em cada face (mm/mês) para a área Sul-Sudeste

Mês	Norte		Sul		Leste		Oeste		Total	
	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$	$F_e/A$	$F_s/A$
Janeiro	-169,9	4,1	-14,9	61,8	-35,1	92,1	-56,5	54,7	-276,3	212,8
Fevereiro	-144,9	2,9	-6,7	80,9	-57,4	75,9	-55,4	48,0	-264,4	207,7
Março	-105,7	10,0	-9,4	54,6	-47,3	75,5	-58,4	42,6	-220,8	182,6
Abril	-77,8	16,7	-9,8	45,4	-26,9	105,7	-74,2	27,0	-188,8	194,8
Mai	-75,5	17,5	-9,4	45,6	-11,7	141,6	-90,9	13,5	-187,5	218,2
Junho	-97,3	12,8	2,7	55,9	-6,1	167,0	-109,8	10,8	-210,6	246,5
Julho	-86,8	13,4	-2,9	76,4	-11,8	130,6	-97,6	12,5	-199,0	232,9
Agosto	-86,7	16,8	-0,4	55,4	-13,8	139,0	-99,0	19,5	-200,0	230,6
Setembro	-100,5	22,4	-0,3	49,8	-21,5	132,5	-99,1	40,4	-221,4	245,1
Outubro	-125,2	11,5	-8,8	41,7	-27,6	128,5	-90,2	59,7	-251,7	241,5
Novembro	-134,3	5,6	-21,1	31,1	-27,4	122,6	-72,8	63,6	-255,5	222,9
Dezembro	-164,9	5,0	-20,5	48,5	-27,5	111,6	-63,2	58,2	-276,1	223,2
<b>Média</b>	<b>-114,1</b>	<b>11,6</b>	<b>-8,5</b>	<b>53,9</b>	<b>-26,2</b>	<b>118,6</b>	<b>-80,6</b>	<b>37,5</b>	<b>-229,3</b>	<b>221,6</b>

#### 4.5 Comentários Finais

Ao analisar a reciclagem observou-se que a precipitação sobre as regiões Nordeste e Norte são, em grande parte, de origem advectiva, proveniente do transporte de vapor d'água originado da evaporação sobre o Oceano Atlântico. Quando utilizado a escala de comprimento de 500 Km, os valores sobre a região são entre 5% ao leste 15% a oeste. Ao utilizar as áreas da Figura 3 (com L de aproximadamente 1665 km), os valores da reciclagem média anual para as áreas que abrangem as regiões Norte e Nordeste são 24% e 20%, respectivamente. Distribuições espaciais semelhantes foram encontradas, sobre a Bacia Amazônica, por Lettau et al. (1979) e Eltahir e Brás (1994) com a contribuição da reciclagem do vapor d'água aumentando para oeste.

Os índices de reciclagem sobre essas regiões, apesar de serem relativamente

baixos, indicam a importância da contribuição da evapotranspiração local no conteúdo de vapor d'água sobre o Brasil. Parte do vapor d'água, originado localmente sobre a região Nordeste se adiciona ao vapor d'água advectado do oceano e é transportado para região Norte, que por sua vez, é somado ao vapor d'água originado da evapotranspiração sobre a região e parte deste vapor d'água é transportado para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

Os resultados não permitem fazerem afirmativas prognósticas específicas sobre o efeito de desmatamento ou qualquer outra alteração nos parâmetros da superfície sobre a Bacia Amazônica, fundamentadas apenas no estudo da reciclagem. No entanto, é evidente que alterações na evapotranspiração sobre a Bacia Amazônica podem afetar o conteúdo de vapor d'água e, conseqüentemente, a precipitação nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Esse fato ressalta a importância da reciclagem do vapor d'água no ramo atmosférico do ciclo hidrológico sobre o Brasil.

Diferente das regiões Norte e Nordeste, o fluxo de vapor d'água menos intenso nas latitudes médias faz com que a reciclagem sobre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul seja mais significativa. Entretanto, é importante lembrar que a reciclagem não pode ser associada apenas à intensidade do fluxo de vapor, já que a própria definição de reciclagem se refere à contribuição local da evapotranspiração e, que sobre estas regiões de fluxo menos intenso foi observado que, quando a evapotranspiração diminui, a reciclagem também diminui.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e indicam que a quantificação da reciclagem do vapor d'água é um indicador da importância dos processos da superfície da terra para o balanço hídrico e, é também, um indicador da sensibilidade climática em relação a esses processos.

## **5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Os resultados obtidos no estudo dos aspectos climatológicos da reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil permitiram as conclusões descritas abaixo.

Regiões com altos valores de evapotranspiração não implicam, necessariamente, em altos valores de reciclagem do vapor d'água. Essa característica é observada sobre a região Norte e no primeiro trimestre da região Nordeste. Sobre essas regiões os processos advectivos são mais importantes para a precipitação do que os processos locais.

Na região Norte a reciclagem aumenta para oeste relacionada à diminuição da intensidade do fluxo de vapor d'água provocada pela corrente de jato em baixos níveis à leste dos Andes. Os maiores índices de reciclagem ocorreram durante o primeiro trimestre (fevereiro-abril). Enquanto na região Nordeste, a reciclagem é maior próximo à costa oceânica relacionada com a disponibilidade de água no solo necessária para a evapotranspiração.

A contribuição da reciclagem do vapor d'água na precipitação é maior sobre as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, onde o fluxo de vapor d'água é menos intenso. Foram observados centros com valores relativamente altos (maiores que 30%) de reciclagem entre as regiões Centro-Oeste e Sudeste em todos os trimestres estudados. Essa variação sazonal está associada à intensidade do fluxo sobre as regiões.

A reciclagem média anual sobre a área Bacia Amazônica é de 24%, com valores máximo e mínimo de 27% e 21%, respectivamente. Sobre a área Nordeste a reciclagem média anual é de 20%, com valores máximo e mínimo de 22% e 17%, respectivamente. Sobre a área Sul-Sudeste a reciclagem média anual é 31% com valores máximos de 38% e mínimo de 24%.

A disponibilidade de água no solo, necessária para aumentar ou diminuir a evapotranspiração, pode alterar a precipitação sobre uma região.

O fluxo de vapor d'água que entra na área Sul-Sudeste indica um transporte proveniente da área Bacia Amazônica responsável por, aproximadamente, 86% do fluxo de vapor d'água que entra na área Sul-Sudeste.

De um modo geral, os resultados obtidos foram satisfatórios e indicam a importância da quantificação da reciclagem do vapor d'água.

## 5.1 SUGESTÕES

Aqui, estudou-se a importância do processo de reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil e os efeitos meteorológicos relacionados no processo de "feedback" entre a superfície e a atmosfera e os resultados mostraram a importância desse processo.

Nesse contexto, sugere-se estudar a variação interanual da reciclagem do vapor d'água, e tentar associar as mudanças nos mecanismos de grande escala que influenciam a precipitação sobre o Brasil (como por exemplo, o El-Niño) com o índice de reciclagem do vapor d'água sobre o Brasil.

O uso de modelagem numérica poderá levar a afirmações prognósticas concretas sobre os efeitos das mudanças nas características do solo da Amazônia no clima sobre o Brasil. Sugere-se, então, a utilização de modelos de meso-escala, como o RAMS ("Regional Atmospheric Modeling System") por exemplo, para simular modificações nos parâmetros de superfície e investigar essas alterações no clima sobre o Brasil.

## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BENTON, G.S; ESTOQUE, M. A. Water vapor transfer over the North American Continent.

**Journal of Meteorology**, 11, 462-477. 1954.

BOSILOVICH, G. M. On the Vertical Distribution of Local and Remote Sources of Water for Precipitation. **NASA/Data Assimilation Office**, Goddard Space Flight Center, 7 p. 2002.

BOSILOVICH, G. M. e SHUBERT, D. S. Precipitation Recycling over the Central United States Diagnosed from the GEOS-1 Data Assimilation System. **Journal of Hydrometeorology**, 2, 26-35. 2001.

BRUBAKER, L.K., ENTEKHABI, D., EAGLESON, P.S. Atmospheric water vapor transport and continental hydrology over the Americas. **Journal of Hydrology**, 155, 407-428. 1994.

BRUBAKER, L.K., ENTEKHABI, D., EAGLESON, P.S. Estimation of Continental

Precipitation Recycling. **Journal of Climate**, 6, 1077-1089. 1993.

BUDIKO, M.I. *Climate and Life*. Academic Press, 508 p. 1974.

BURDE, G.I. e ZANGVIL, A. The Estimation of Regional Precipitation Recycling. Part I: Review of Recycling Models. **Journal of Climate**, 14, 2497-2508. 2001.

BURDE, G.I. e ZANGVIL, A. The Estimation of Regional Precipitation Recycling. Part II: A New Recycling Model. **Journal of Climate**, 14, 2509-2527. 2001.

BURDE, G.I.; ZANGVIL, A.; LAMB, P.J. Estimating the role of local evaporation in precipitation for a two-dimensional region. **Journal of Climate**, 9, 1328-1338. 1996.

CAVALCANTI, F.A.I.; SOUZA, C.A. The Low Level Jet East Of Andes in the Ncep/Ncar reanalysis And Cptec/Cola Agcm Simulation. **Conference on South American low-level jet**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 5-7. 2002.

CAVALCANTI, E.P.; GANDU, A. W.; AZEVEDO, P. V. Transporte e balanço de vapor d'água atmosférico sobre o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.2, 207-217. 2002.

CAVALCANTI, E.P. **Teor e Transporte de Vapor d'água na Atmosfera do Nordeste do Brasil**. 2001. 103p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da

Paraíba, Departamento de Recursos Naturais, Campina Grande. 2001.

CAVALCANTI, E.P., SOUZA, F.A.S., FILHO, M.F.G., GANDU, A.W. Simulação numérica da precipitação para o Estado da Paraíba. **Atmosfera & Água**, 4, 36-40. 1998.

CAVALCANTI, E.P., RATHOR, H.S. Distribuição espacial de energia estática para o Nordeste do Brasil em fevereiro e março de 1980. In: **CONGRESSO BRASILEIRO E INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA**. BRASÍLIA, 5, 1986, Distrito Federal. Anais 179-184. Salvador. 1986.

DROZDOV, O.A.; GRIGOR'EVA, A.S. The hydrologic cycle in the atmosphere. **Israel Program for Scientific Translations**. 35-50. 1965.

ELTAHIR, E.A.B; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. **Q. J. R. Meteorolo. Soc.**, 120, 861-880. 1994.

FERNANDES, K.A.; SATYAMURTY, P. Cavados invertidos na região central da América do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, Belo Horizonte, 8, 1994, Minas Gerais. Anais: 93-94.

GAN, A.M.; KOUSKY, V.E.; ROPELEWSKI, C. The influence of the low level jet (LLJ) on the onset of Central Brazil precipitation. **Conference on South American low-level jet**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 5-7. 2002.

HIGGINS, R.W.; MO, K.C.; SHCUBERT, S.D. The moisture budget of the central United States in springs as evaluated in the NCEP/NCAR and NASA/DAO reanalysis. **Monthly Weather Review**. 124, 939-963. 1996.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., R., *et al.* The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 77, 437-471. 1996.

KOUSKY, V.E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**. V. 108, 488-498. 1980

LETTAU, H.; LETTAU, K.; MOLION, L.C.B. Amazonia's hydrologic cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. **Monthly Weather Review**. 170, 227-238. 1979.

MARENGO, J.A.; DIAS, P.L.S. The South American low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC campaign. **Journal of Geophysical Research**. 107, 8079-8095. 2002.

MARQUES, V.S.; RAO, V.B.; MOLION, L.C.B. Interannual and seasonal variation in the structure and energetic of the atmosphere over Northeast Brazil. **Tellus** 35A, 136-148. 1983.

MARQUES, S.V. **Estudos da energética e do fluxo de vapor d'água na atmosfera sobre o Nordeste Brasileiro**. 1981. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais – INPE. 1981.

MCDONALD, J. E. The evapotranspiration-precipitation fallacy. **Weather**, 17, 168-177. 1962.

MO, K.C.;HIGGINS, R.W. Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyzes. **Journal of Climate**. V. 9, 1531-1545. 1996.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. SUPREN/IBGE. Volume 4, 1979.

NOBRE, C.A; SELLERS, P.S.; SHURLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**. V. 4, 957-988. 1992.

NOBREGA, R.S; CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P. Energia Estática na Atmosfera sobre o Nordeste do Brasil – Parte 1: Fluxo de Energia. In: **CONGRESSO BRASILEIRO E INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA**. Foz do Iguaçu, 7, 2002, Paraná. Anais: 3792-3798. 2002a.

NOBREGA, R.S; CAVALCANTI, E.P.; SOUZA, E.P. Energia Estática na Atmosfera sobre o Nordeste do Brasil – Parte 2: Variação Sazonal da Energia. In: **CONGRESSO BRASILEIRO E INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA**. Foz do Iguaçu, 7, 2002, Paraná. Anais: 3799-3802. 2002b.

NOBREGA, R.S. Transporte de Energia na Atmosfera do Nordeste Brasileiro. In: **IX CONGRESSO LATINO-AMERICANO E IBÉRICO DE METEOROLOGIA**, Buenos Aires, 2001. Anais: 550-573. Argentina. 2001.

OLIVEIRA, A.S. **Interações entre sistemas na América do Sul e convecção na Amazônia**. 1986. Dissertação (Mestrado em Meteorologia – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 1986.

PEIXOTO, J.P. e A.H. OORT. Physics of Climate. **American Institute of Physics**. 270-307. 1992.

PEIXOTO, J.P. e OORT, A.H. **The atmospheric branch of the hydrological cycle and climate. Variants in the Global Water Budget**. A. Street-Perrot. M. Beran, R. Ratcliffe. Eds. Reidel, 5-65. 1983.

QUADRO, M.F.L.; ABREU, M.L. Estudos de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul sobre a América do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, Belo Horizonte, 8, 1994, Minas Gerais. Anais: 620-623

ROSEN, R.D.; SALSTEIN, D.A.; PEIXOTO, J.P. Variability in the annual fields of large-scale atmospheric water vapor transport. **Monthly Weather Review**. AMS, Boston, USA. 107. 26-37. 1979.

RAO, V.B.; HADA, K.; CAVALCANTI, I.F.A. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **Journal of Geophysical Research**. 27, 26539-26551. 1996.

SALATIJE, DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J.. Recycling of water in the Amazon Basin: an isotopic study. **Water Resource Review**. 15, 1250-1558. 1979.

SAVENIJE, H. G. HUBERT. The New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. **Journal of Hydrology**, 167, 57-78. 1995.

SCHÄR, C., LÜTH, D., BEYERLE, U. The Soil-Precipitation Feedback: A process study with a Regional Climate Model. **Journal of Climate**, 12, 722-741. 1999.

SILVA, V.P.R. da. **Estimativa das necessidades hídricas da mangueira**. 2000. 129p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2000.

SOUZA, E.P; RAO, T.V.R.; PRESTE, A.C.A. Contribuições dos efeitos locais e advectivos para a precipitação no nordeste do Brasil em dois períodos chuvosos contrastantes. **Rev.Bras. Met.** V. 16, 135-244. 2001.

STRANG, D.M.G. **Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste do Brasil**. São José dos Campos - SP, CTA/IAE, 70 p. 1972.

TRENBERTH, K. E. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. **Journal of Climate**, 12, 1368-1381. 1999.

TRENBERTH, L. E. Atmospheric moisture residence times and cycling implications for rainfall rates and climate change. **Climate Change**, 39, 667-694. 1998.

TRENBERTH, K. E. e GUILLEMOT, K. C. Physical Processes Involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America. **Journal of Climate**, 9, 1288-1298. 1996.

XIE, P.; ARKIN, P.A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. **Journal of Climate**, 9, 840-858. 1996.