

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

**REVISTA DE GEOGRAFIA
(UFPE)**

www.ufpe.br/revistageografia

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

RECENTES VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NO NORDESTE DO BRASIL COM ÊNFASE A PRECIPITAÇÃO: RELAÇÕES COM O ENOS, DIPOLO DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR NO ATLÂNTICO TROPICAL E A OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO

José Maria Brabo Alves

¹*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME – Av. Rui Barbosa, 1246 – Aldeota – Fortaleza – CE – Brazil, email: brabo@funceme.br*

Artigo Recebido em 07/11/2012 e Aceito em 05/09/2012

RESUMO

Recentes variações de precipitação e temperatura no Nordeste do Brasil (NEB) são investigadas entre os períodos de 1974/1990 e 1991/2005. Foram usadas séries de precipitação diária observada em pontos de grade sobre o NEB e dados mensais de precipitação e temperatura do ar, das reanálises do *National Center for Environment Prediction (NCEP) – National Center for Atmospheric Research (NCAR)* para o período 1974/2005. Os resultados com os dados de reanálises mostraram uma diminuição nos totais anuais de precipitação (com magnitudes entre 250 mm a 300 mm) entre os dois períodos de estudo. Na temperatura média anual foi observado um aumento em torno de 0,4°C sobre o NEB no período de 1991-2005 comparado ao período de 1974-1990. As análises com os dados interpolados de precipitação observados sobre o NEB foram consistentes com a diminuição de chuva no NEB, porém com uma magnitude um pouco inferior da ordem 100 a 150 mm. Análises complementares sugeriram que a diminuição da precipitação no NEB esteve mais diretamente associada ao ciclo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e ao dipolo de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico tropical, do que a possíveis efeitos antropogênicos, embora que para este último não foram realizadas análises mais detalhadas a este respeito.

Palavras-chave: Variações climáticas, variabilidade interanual, Nordeste do Brasil.

RECENT CLIMATE VARIATIONS IN NORTHEASTERN BRAZIL WITH EMPHASIS ON A PRECIPITATION: RELATIONS WITH ENSO, SEA SURFACE TEMPERATURE DIPOLE IN TROPICAL ATLANTIC AND THE PACIFIC DECADAL OSCILLATION

ABSTRACT

Recent variations in temperature and precipitation in northeastern Brazil (NEB) are investigated between the periods 1974/1990 and 1991/2005. We used a series of daily precipitation observed in grid points over NEB and monthly data of precipitation and air temperature re-analysis of the National Center for Environment Prediction (NCEP) - National Center for Atmospheric Research (NCAR) for the period 1974/2005. The results with the data re-analysis showed a decrease in total annual precipitation (with magnitudes ranging from 250 mm to 300 mm) between the two study periods. Annual mean temperature increase was observed at around 0,4°C over the NEB in the period 1991-2005 compared with 1974-1990. Analyses with data interpolated observed rainfall over NEB were consistent with the decrease of rainfall in the NEB, but with a slightly lower magnitude of order 100 to 150 mm. Additional analysis suggested that the decrease of precipitation in NEB was more associated with El Niño-Southern Oscillation (ENSO) cycle and the dipole sea surface temperature (SST) in the

tropical Atlantic than possible anthropogenic effects, although for the latter that the study did not make details analysis about it.

Keywords: Climate variations, climate variability, northeastern Brazil.

INTRODUÇÃO

Nosso sistema climático terrestre é caótico, o qual exibe alguns padrões preferenciais de variabilidade. Como exemplo destes modos cita-se: Oscilação do Ártico, El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Multi-Decadal do Oceano Atlântico e oscilação Decadal do Oceano Pacífico (PDO). Em função desta característica caótica, uma dificuldade é diferenciar em um sistema dinâmico o que é uma variação climática, associado a estes modos preferenciais, e o que se define como mudanças climáticas e como estas afetam as condições climáticas de uma região. Segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change-Fourth Assessment Report IPCC-AR4* (BERSNTEIN et al. 2007) mudança climática é qualquer mudança no clima ao longo do tempo devido à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Este conceito difere do da Convenção das Nações Unidas sobre mudanças do clima, a que denota a mudança climática atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, com alterações na atmosfera global, adicional a variabilidade natural do clima observada ao longo de períodos comparáveis de tempo (IPCC-AR4, 2007).

No Brasil, dependendo do cenário de emissão de gases na atmosfera os aumentos de temperatura são estimados em torno de 1°C a 6°C, o que deverá aumentar a evaporação à superfície e, por sua vez alterações no balanço hídrico da vegetação natural e das culturas agrícolas (IPCC, 2007a, 2007b). Esse efeito deve ser mais negativo em regiões onde predominam a agricultura de sequeiro; a não ser que o aumento de temperatura seja acompanhado de aumento e/ou regularização no regime de chuvas.

O Nordeste do Brasil (NEB), ao longo dos anos, vem passando por uma variabilidade natural do clima, alternando anos de chuvas extremas a secas severas (NOBRE, 2001; MOURA & SHUKLA, 1991; ALVES et al. 2003; SUN et al. 2005 e outros) que associada à ação antropogênica pode mudar totalmente as características do clima de uma determinada região. Estudos regionais de temperatura na América do Sul mostram uma tendência de aquecimento, notadamente com noites mais quentes do que em períodos anteriores (HAYLOCK et al., 2006, COLLINS et al. 2009). Para precipitação estudos de tendência mostraram resultados largamente

conflitantes devido ao uso de diferentes períodos e a pouca densidade de dados observacionais (WILBY, 2008).

Evidências globais têm mostrado variações climáticas de precipitação e uma tendência positiva de aumento de temperatura relacionada com o aquecimento global (GEMMER et al. 2004; ENDO et al. 2005; QIN et al. 2005, DANG et al. 2007). A questão de variações interdecadais de características climáticas desérticas a semidesérticas tem sido muito observada na Ásia, nos desertos de Taklamakan e Gobi (KIM et al. 2008). E na região do semi-árido do Nordeste brasileiro, Krol & Bronstert (2007) identificaram tendência significativa de redução nas vazões do Rio Jaguaribe após 2025, considerando cenário de redução de 50% da precipitação nas próximas cinco décadas. Para um cenário de redução de 21% da precipitação, estes autores não encontraram tendência significativa de alteração da vazão.

Segundo o *IPCC-AR4*, há grande incerteza de como a precipitação deverá variar no setor nordeste da América do Sul. Esta, se deve a falta de sensibilidade das projeções dos modelos acoplados oceano-atmosfera em simular a amplitude e frequência dos eventos ENOS. Além disso, nas projeções do *IPCC-AR4* não foram incluídas as trocas no ciclo do carbono no sistema atmosfera-oceano, nem a

influência nas variações da vegetação e uso do solo que devem afetar o clima regional.

Vicente et al. (2005) com dados observados sobre o Brasil e América do Sul mostraram, em seus resultados mais relevantes, que houve uma tendência positiva de aumento das temperaturas mínimas sobre o Nordeste do Brasil, indicando noites mais quentes do que observadas em anos passados. Dufleck et al. (2008) sugeriu que as reanálises do *NCEP/NCAR* podem ser usadas para estudos de temperaturas mínimas na área do Brasil Tropical. Em seus resultados foi evidente uma tendência de aumento de dias consecutivos de mínimas temperaturas em várias células de grade sobre o Brasil. As discrepâncias entre as observações, segundo Dufleck et al. (2008), devem-se a ineficiência do modelo usado nas reanálises em representar os processos físicos da interação superfície-atmosfera, a resolução espacial e outros processos como discutidos em Cai e Kalnay (2005).

Collins et al. (2009) mostraram uma análise entre 1948-2007 para a temperatura do ar a 2 metros de altura usando dados de reanálises do *NCEP/NOAA* para a América do Sul. Seus resultados mostraram que em média a temperatura do verão (dezembro a janeiro) sobre grande parte da América do Sul oscilou entre 21°C e 24°C entre 1948-1975 e após este período a temperatura esteve acima de 24°C. Na estação de

inverno austral (junho a agosto) as temperaturas recentes são mais quentes na região tropical da América do Sul, e para o Nordeste do Brasil este aquecimento é mais pronunciado. Para o período de 2001-2007 no verão a diferença deste período para os períodos de 1948-2007 e 1976-2007 foi acima de 1,2°C.

Dai (2006) mostrou um estudo de análise observacional e de modelagem de temperatura e umidade atmosférica usando 1500 estações de observações a superfície ao longo do globo. Sobre os trópicos este estudo mostrou que a umidade específica é altamente controlada pela variação da temperatura, oscilando com valores de 17 a 19 g/kg. Para o Hemisfério Norte no período de 1974-2006 a tendência é positiva e significativa estatisticamente de umidade específica e temperatura com valores de 0,06 g/kg e 0,16°C por década. No hemisfério sul embora as tendências observadas tenham sido positivas estas não foram estatisticamente significativas. As recentes tendências de umidade e temperatura foram capturadas pela modelagem dinâmica, entretanto, o modelo superestimou o resfriamento atmosférico provocado pela influência vulcânica e as tendências no Hemisfério Sul (Dai, 2006).

Usando dados das saídas dos modelos do *IPCC-AR4*, Vera et al. (2006), fez um estudo mostrando uma comparação entre os resultados destes modelos para o

chamado clima presente (1970-1999), e uma simulação de clima futuro, onde as emissões de gases do efeito estufa estariam estabilizadas a 720 ppm (2070-2099). Seus resultados mostraram que os modelos são capazes de representar as principais características da distribuição pluviométrica sobre a América do Sul. Porém, estes não capturam os máximos de precipitação associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e no Sudeste deste continente. Com relação às mudanças de precipitação entre 1970-1999 e 2070-2099 houve um consenso nos modelos com as seguintes características: Um aumento da chuva no verão no setor sudoeste da América subtropical, uma redução da precipitação na estação de inverno em grande parte do continente e uma redução da precipitação em todas as estações do ano ao longo do setor sul dos Andes.

É importante ressaltar que o fenômeno ENOS e o dipolo de temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico tropical têm significativas influências na variabilidade climática interanual do NEB. Vários estudos na literatura têm mostrado que em anos de El Niño (La Niña) o NEB apresenta mais (menos) precipitação anual do que a climatologia (ROPELEWSKI & HALPERT, 1987 e outros). Em geral, anos de El Niño (La Niña) estão associados com as fases positivas (negativas) do padrão de

dipolo de TSM. A fase positiva deste padrão caracteriza-se com anomalias de TSM positivas (negativas) nos setores norte (sul) do Atlântico tropical, e também com ventos e pressão ao nível do mar com anomalias negativas (positivas) nestas duas áreas da bacia. Em anos da fase negativa do dipolo de TSM, estas características são contrárias (MOURA & SHUKLA, 1981; HASTENRATH, 1990; NOBRE & SHUKLA, 1996). Nas fases positivas (negativas) do dipolo de TSM a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se posiciona, em média, em latitudes mais ao norte (sul) do que a sua posição climatológica provocando menos (mais) chuvas do que a climatologia. Outro fenômeno que está ligado ao ciclo ENOS é a PDO (ZHANG et al. 1997). A PDO é modo de interação oceano-atmosfera na bacia do oceano Pacífico dominante acima da escala interanual (ZHANG et al. 1997; MANTUA et al. 1997). A PDO tem influência na distribuição de chuva do NEB como mostrado no estudo de Andreolli & Kayano (2005).

Análises mais recentes sugerem que a frequência de chuvas intensas tem aumentado sobre a América do sul como um todo (MARENGO & AMBRIZZI, 2006; WILBY, 2008). O Nordeste do Brasil e a Amazônia são as regiões onde é esperado ocorrer o mais rápido aquecimento, maior que a média global,

durante o século 21 com um intenso aquecimento simulado durante os meses de verão na maior parte das suas áreas continentais. Dependendo do modelo, o aquecimento médio projetado para América do Sul para o final do século 21 é da ordem de 1° C a 4°C para os cenários de baixas emissões (B2) ou 2°C a 6°C para os cenários de emissões mais altas (A2).

Marengo et al. (2009a) apresentaram um estudo usando modelagem regional com o *PRECIS (Providing Regional Climate for Impacts Studies)* comparando extremos de precipitação e temperatura sobre a América do Sul em um passado recente (1961-1990) e no futuro (2070-2100) usando as saídas de modelos do *IPCC-SRES* para os cenários de emissões de gases de efeito estufa A2 e B2. Seus resultados mostraram que a modelagem representa bem o clima recente da distribuição de extremos de precipitação e temperatura quando comparados as observações, no entanto os dados de temperatura encontram-se mais próximo da realidade. Para o clima futuro, os resultados mais relevantes, dizem respeito a um aumento de noites quentes e uma diminuição das noites mais frias em toda a América do Sul. Quanto aos extremos de precipitação é projetado um incremento destes eventos no sudeste da América do Sul e Amazônia, consistente com uma tendência no aumento no total de chuvas

nesta região. No NEB e Amazônia Oriental não foram observadas trocas climáticas significativas, ressalta-se um aumento no número de dias secos consecutivos.

Outro estudo interessante foi desenvolvido por Marengo et al. (2009b) usando as saídas do modelo HadAM3P com cenário A2 para alimentar três modelos regionais para comparar o clima presente (1961-2000) com a projeção futura advinda do *downscaling* dinâmico para o período (2070-2100). Este estudo faz parte do projeto chamado CREAS (Cenários Regionalizados de Clima Futuro da América do Sul). Os resultados mostraram para o clima presente que os modelos conseguiram representar as características da circulação, precipitação e temperatura sobre a América do Sul. Para o NEB a projeção, a partir dos resultados dos três modelos usados, sugere deficiência de chuva para o clima futuro e um aumento da temperatura. Nas estações de verão e inverno austral os resultados mostraram um aumento da temperatura do ar (redução da precipitação) da ordem de 4°C-6°C (menos 3 mm/dia) em áreas sobre o NEB.

Diante do contexto, este estudo tem como objetivo investigar uma possível variação climática no NEB usando precipitação e temperatura (duas principais variáveis meteorológicas consideradas componentes primárias do clima que podem refletir, inicialmente, ao efeito de

mudanças climáticas (KÖPPEN, 1931, QIN et al. 2005)), em dois períodos 1974-1990, com pouco aumento na concentração de gases de efeito estufa e 1991-2004 com um incremento exponencial nestes gases na atmosfera terrestre. Além disso, é feita uma análise da variação de precipitação no NEB com o ENOS, dipolo de TSM no Atlântico Tropical e a Oscilação Decadal do Oceano Pacífico.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste artigo foram utilizados dados de reanálises de precipitação e temperatura do ar próximo à superfície obtidos do *National Center for Environment Prediction (NECP) – National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, (KALNAY et al., 1996), para o período de 1974-2005, selecionados em uma área que compreende 90°W-10°E e 60°S-60°N, aproximadamente. Os resultados podem não representar a variabilidade intra-regional no NEB, portanto, devem ser interpretados com cautela devido à baixa densidade espacial de informações destas variáveis sobre a região que alimenta as reanálises e a não captura dos principais processos físicos sobre a continente pelo modelo dinâmico usado nas reanálises (CAI & KALNAY, 2005). Dados diários de precipitação entre 1974-2005 medidos em pluviômetros distribuídos no Nordeste

do Brasil (Figura 1) também foram usados neste estudo. As fontes destes dados são do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE), Agência Nacional de Águas (ANA) e Núcleos Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos do NEB. Detalhes sobre o processo de controle e qualidade destes dados podem ser obtidos em Souza et al. (2004).

Com os dados de reanálises foi determinada a diferença do total anual de chuva e da temperatura média anual, entre os períodos 1974/1990 e 1991/2005. Como não há dados diários de temperatura observada no NEB, para todos os postos pluviométricos da figura 1, ou se existem é difícil coletá-los e organizá-los em séries de arquivos de dados, somente os dados de precipitação em pontos de grade da figura 1 foram usados para comparar os resultados obtidos com os dados de reanálises. É importante mencionar que os resultados obtidos com os dados do NEB em pontos de grade da figura 1 têm melhor densidade de observações do que os dados das reanálises. Além disso, para se verificar se o ciclo ENOS e o dipolo de TSM são os principais responsáveis por estas trocas climáticas nos períodos de estudo, foram calculadas as diferenças entre os anos de El Niño e La Niña associados aos padrões de dipolo de TSM no Atlântico Tropical entre os períodos 1991/2005 e 1974/1990 e

também em relação ao período de 1974-2005.

Apesar do número de décadas ser pequeno no período 1974-2005, para uma análise decadal para identificar possíveis relações da precipitação e temperatura no NEB e a PDO foram calculadas as anomalias neste período. Uma anomalia média anual, para uma área (2°S-15°S e 45°W-38°W) representativa do setor norte do NEB (2°S-15°S e 45°W-38°W) e para a PDO o índice foi obtido no site do NCEP/NOAA proposto por Mantua et al. 1997. Para TSM foram usados os dados em pontos de grade obtidos de Reynolds e Smith (1996). A climatologia usada em todos os cálculos das anomalias de precipitação, temperatura do ar e TSM referem-se ao período de 1974-2005.

A significância, de todas as diferenças, foi calculada segundo Harrison & Larkin (1998). Os anos de El Niño e La Niña, embora na literatura haja uma série de metodologias para definir eventos de ENOS (TRENBERTH, 1997), associados às fases do dipolo de TSM no Atlântico Tropical, neste trabalho, foram definidos segundo a metodologia de Alves et al. (2009). Segundo esta metodologia de classificação a Tabela 1 mostra os anos nos períodos de 1974-1990 e 1991-2005 classificados com estes padrões térmicos nos oceano Pacífico e Atlântico Tropicais. Nesta classificação foi dada ênfase ao

período de maior correlação da região de Niño 3 (dezembro a janeiro, UVO et al, 1998) e do dipolo de TSM no Atlântico

Tropical (fevereiro a abril, ALVES et al. 2009) nas chuvas do setor norte do NEB.

Figura 1 – Postos pluviométricos com observações diárias (pontos em branco) de precipitação usada no estudo. Os pontos em preto indicam o centro da grade de interpolação dos dados.

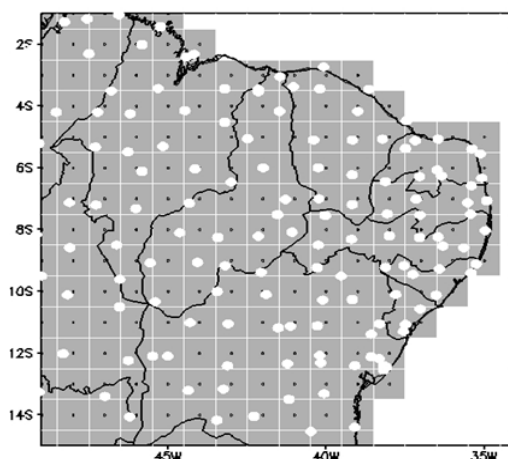


Tabela 1 – Classificação dos eventos de El Niño (Pacífico Positivo - PacPos) e La Niña (Pacífico Negativo - PacNeg) e Neutro (Pacífico Neutro - PacNeu) associados a fases do dipolo de TSM (dipolo negativo-DipNeg, dipolo neutro-DipNeu e dipolo positivo-DipPos) no Atlântico tropical nos períodos de 1974-2005.

DipNeg/PacNeg 1974, 1984, 1985, 1986, 1989, 2000

DipNeg/PacNeu 1991, 1994

DipNeg/PacPos 1988, 1995

DipNeu/PacNeg 1975, 1976, 1996, 1999

DipNeu/PacNeu 1982, 1990, 1993

DipNeu/PacPos 1977, 1987, 1998

DipPos/PacNeg 1997

DipPos/PacNeu 1978, 1979, 1980, 1981

DipPos/PacPos 1983, 1992

Uma análise de correlação parcial foi feita para mostrar a relação entre o ENOS, PDO e do dipolo de TSM na precipitação no Nordeste do Brasil. A

correlação parcial mostra a exclusiva relação entre duas variáveis enquanto se retira a influência de uma terceira ou mais

variáveis independentes e é calculada pela fórmula:

$$r_{npxprep.,dippdo} = \frac{r_{npxprep.} - (r_{dipxprep.} * r_{pdoxprep.})}{\sqrt{1 - r_{dipxprep.}^2} * \sqrt{1 - r_{pdoxprep.}^2}}$$

, onde, nxprep, dipxprep. e pdoxprep, são as correlações lineares entre as variáveis, índice Niño3 e precipitação em pontos de grade no NEB, índice do dipolo de TSM no Atlântico Tropical e precipitação em pontos de grade no NEB e o índice da PDO nestes pontos de grade no NEB. Nesta formulação a correlação expressa à relação da influência da região Niño3 na precipitação do setor norte do NEB com os índices de PDO e dipolo de TSM no Atlântico Tropical mantendo-se constantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a diferença de precipitação (totais anuais) e temperatura média anual sobre o NEB, entre os períodos de 1974/1990 e 1991/2005. Nota-se que para precipitação ocorreu uma diminuição do total anual de precipitação entre 200 mm a 350 mm, significativos estatisticamente em grande parte do NEB. Esta redução de precipitação no NEB é inconsistente com os estudos de Rao et al. (2006) que mostraram um incremento de chuvas no NEB nestes últimos anos, principalmente após os anos 70. Na temperatura houve um aumento da ordem de 0,4°C, porém não estatisticamente significativo a 95%

segundo teste t Student (Figura 2b). Este aquecimento na região semiárida do NEB é consistente com a expectativa do IPCC e estudos mais recentes como os de Jones et al (2007), que mostraram um aquecimento de até 0,6°C nesta região. Uma análise entre a diferença na temperatura média anual dos anos de El Niño menos os anos de La Niña observados no período de 1991-2005 (figura não mostrada) mostrou que há um aumento da temperatura da mesma ordem, não significativo estatisticamente, como observado na figura 2b.

Segundo Chaves et al. (2008) analisando um outro período nos dados de reanálises, quando é feita esta diferença, entre os anos do fenômeno ENOS, na temperatura média anual, se o ciclo ENOS fosse o único responsável por este aquecimento, está diferença da figura não mostrada, comentada acima, deveria apresentar valores em magnitude maiores do que os observados na figura 2b e serem significativos estatisticamente. Esta característica evidencia que o aumento de temperatura no NEB em torno de 0,4°C, não significativo estatisticamente, pode estar associado, sob hipótese, aos efeitos antropogênicos ou mudanças no uso do solo sobre a região. Neste estudo não há observações que possam sustentar esta afirmação. Estudos mais específicos sobre esta questão devem ser objetos de análises futuras. Estes resultados para temperatura

foram similares aos de Collins et al. (2009), que mostraram que para a área sobre o NEB na América do Sul houve um aquecimento da ordem de 0,5°C no período após 1992-2007 quando comparado a 1976-1990.

A Figura 3 (a, b, c, d, e, f, g e h) mostra apenas para a precipitação algumas análises interessantes que possibilitam inferir explicações sobre o decréscimo de precipitação observada na figura 2a. Como mencionado na metodologia, estas análises não foram feitas para temperatura porque não existem dados observados nas estações pluviométricas usadas, mostradas na figura 1. Na figura 3a o decréscimo no total anual médio de chuva, no período de 1991-2005 com relação a 1974-1990, também foi observado, significativo estatisticamente a 95% segundo teste t Student sobre o NEB. A magnitude do decréscimo em milímetros foi um pouco menor do que o observado na figura 2a, ficando com valores entre 50 e 150 mm. Ressalta-se uma pequena área no norte do Estado da Bahia cuja diferença mostra totais anuais médios aproximados, com valores em torno de zero.

Como a variabilidade interanual da precipitação no NEB, em particular o seu setor norte, é afetada pelo ciclo do fenômeno ENOS e as fases do dipolo de TSM no Atlântico Tropical, as figuras 3b, 3c, 3d, 3e, 3f, 3g e 3h apresentam algumas

características que evidenciam que o decréscimo de precipitação, ao longo do NEB, foi influenciado por estes padrões térmicos dos oceanos tropicais.

As figuras 3b e 3c mostram que o total anual de precipitação médio nos anos de La Niña, observados entre 1974/1990 apresentaram chuvas acima do total médio para o período 1974/2005 e 1991/2005, com significância estatística de 95% em grande parte do setor norte do NEB, com valores acima de 300 mm em algumas áreas dessa região. Isto implica que o total de precipitação médio, dos anos de La Niña no período de 1991/2005 foi menor comparado a 1974-1990 e ao período de 1974-2005, comprovado na figura 3d, áreas com um total médio inferior a 50 mm. Nos anos de El Niño, que climatologicamente, tem totais anuais pluviométricos inferiores à climatologia (Figuras 3e e 3f). E comparando apenas os anos de El Niño (Figura 3g) para os dois períodos, verifica-se que, o período de 1974-1990 teve um total anual médio maior do que o período 1991-2005 em grande parte do NEB, principalmente seu setor norte com valores superiores a 100 mm e até 200 mm, e não significativos a 95% segundo teste t Student (Figura 3g).

Figura 2 – Diferença entre os totais anuais médios entre 1991/2005 e 1974/1990 com os dados de reanálises: a) precipitação e b) temperatura. Às áreas em cores indica significância estatística de 95% segundo teste t Student.

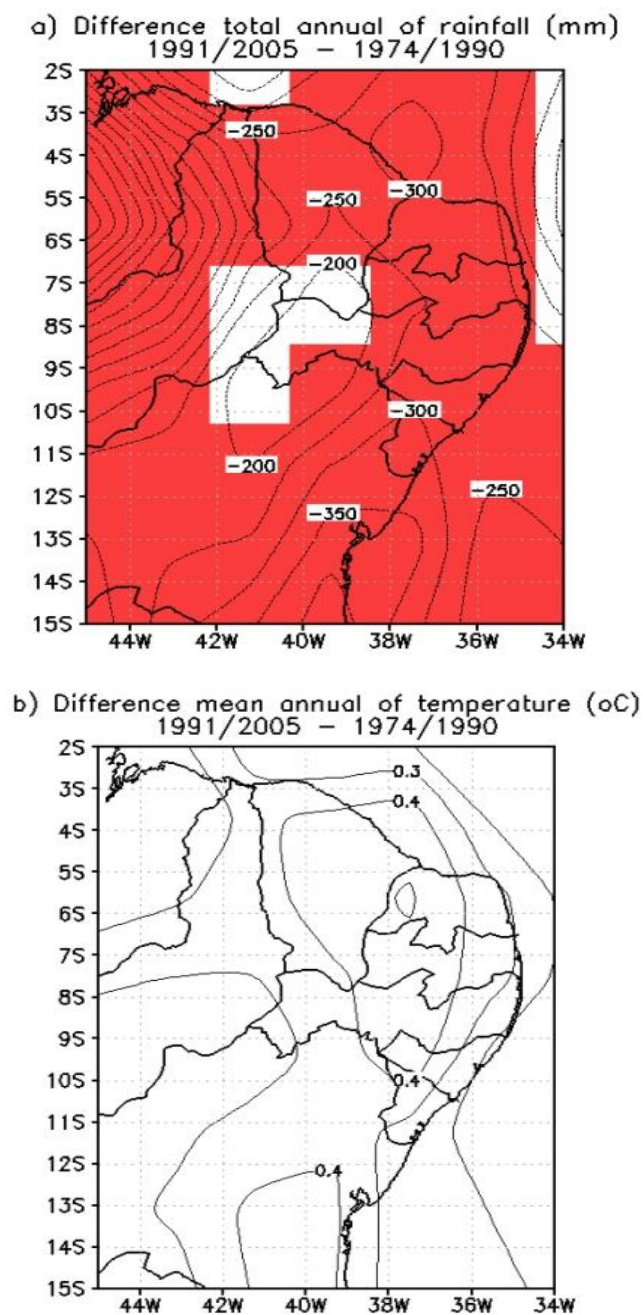
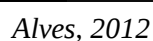
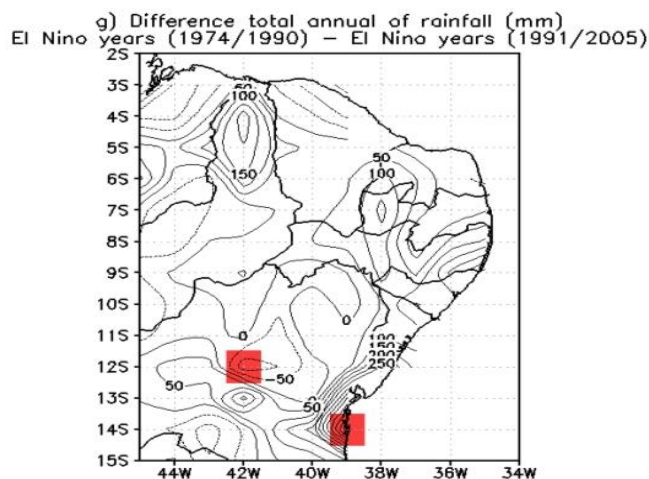


Figura 3 – Diferença entre os totais anuais, médios, de precipitação observada (mm). a) 1991/2005 menos 1974-1990, b) anos de La Niña (1974/1990) menos 1974-2005, c) anos de La Niña (1974/1990) menos anos de La Niña (1991/2005) d) Anos de La Niña (1991/2005) menos 1974/2005, e) anos de El Niño (1974/1990) menos 1971-2005, f) anos de El Niño





Estas análises mostram que a diminuição do total anual de precipitação no NEB entre 1991/2005 comparado a 1974/1990 foi provocada, principalmente, pela influência do fenômeno ENOS associado às condições térmicas do Oceano Atlântico Tropical. A maior parte dos anos de La Niña observado no período de 1974-1990 foi associada à fase negativa do dipolo de TSM no Atlântico tropical que favorece a um maior índice de chuva no NEB.

O dipolo de TSM do oceano Atlântico também parece ter influenciado mais significativamente na diminuição de chuva no período de 1991-2005 comparado a 1974-1990. A tabela 3 mostra que no período de 1974-1990 ocorreu mais anos de La Niña com dipolo negativo de TSM, proporção de quatro (04) para um (01) que favorece a um total anual de chuva acima da média no NEB (NOBRE & SHUKLA, 1996). Quando se compara o número de

anos de eventos La Niña e El Niño associado as demais categorias do dipolo, entre os dois períodos, não se observa uma diferença significativa. Estas análises concordam com o estudo de Andreoli et al. (2004) que mostrou que a anomalia de TSM no Atlântico tropical, em particular no Atlântico Tropical Sul tem uma relação muito forte com chuva no Nordeste do Brasil, principalmente sua região semi-árida, com um sinal aparente com mais de cinco meses de defasagem da estação chuvosa da região (fevereiro a maio).

Para auxiliar as análises espaciais sobre o NEB, a figura 4 mostra a relação de um índice de desvio normalizado da precipitação, média de janeiro a dezembro, em uma área representativa do setor norte do NEB (45°W-38°W e 2°S-12°S) e anomalias de temperatura da superfície do mar, extraídas do banco de dados de Reynolds e Smith (1996) para as áreas de Niño3 (150°W-90°W e 5°N-5°S), média

dezembro a janeiro e de um dipolo de TSM no Atlântico Tropical dado pela diferença entre o setor norte da bacia (5°N-20°N e 60°W-30°W) e sul da bacia (5°S-20°S e 30°W-10°S) para o período de fevereiro a abril.

Nesta figura nota-se a relação das anomalias de TSM nos oceanos tropicais e as chuvas no setor norte do NEB entre 1974-2005, já consenso científico em vários estudos anteriores (MOURA & SHUKLA, 1981, HASTERANTH, 1990, NOBRE & SHUKLA, 1996, e outros). Quando são observados eventos de El Niño (La Niña) e dipolos de TSM no Atlântico Tropical positivo (negativo) os desvios de precipitação no Setor Norte do Nordeste do Brasil (SNNEB) são negativos (positivos). Em geral, quando as anomalias de TSM nas áreas do Niño3 foram negativas (positivas) e no dipolo foram negativas (positivas) com a PDO apresentando anomalias positivas (negativas) as chuvas no setor norte do NEB apresentaram desvios negativos próximos à média (positivos).

Relacionado à PDO, foi exceção os anos entre 1978, 1984 e 1988, 2003 e 2004 quando a PDO esteve com valores positivos no seu índice, as chuvas no SNNEB apresentaram desvios positivos. Mas nestes anos o dipolo no Atlântico esteve com valores negativos de anomalias de TSM. Estes resultados concordam com os resultados mostrados por Andreoli e

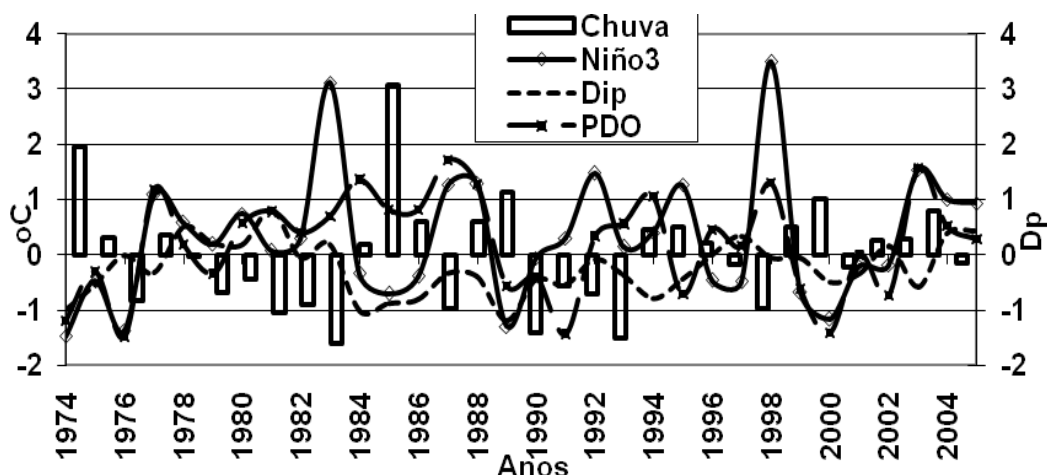
Kayano (2005) que mostraram que as magnitudes positivas (negativas) mais intensas da PDO associam-se, em geral, com desvios negativos (positivos) de chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil e a eventos de El Niño (de La Niña) mais intensos.

A Figura 5 complementa as análises anteriores mostrando correlações parciais para o período (1974-2004 ou 2005?) entre precipitação em ponto de grade sobre o NEB (Figura 1) e os índices de Niño3, de dipolo de TSM no Atlântico Tropical e da PDO. Por exemplo, correlações parciais entre a precipitação no NEB e Niño3, excluindo as influências do dipolo de TSM e no Atlântico e a PDO, e analogamente para os índices do dipolo e PDO.

A Figura 5 apresenta algumas características interessantes. As correlações lineares simultâneas evidenciam que as correlações significativas maiores em magnitudes, em módulo acima 0,3 a 95% segundo teste t Student, são aparentes em todo NEB na figura 5b. Fato que explica que o dipolo de TSM, no trimestre mais chuvoso do SNNEB (fevereiro a abril), tem mais controle na variabilidade pluviométrica interanual da precipitação nessa região do que a região Niño3 e a PDO (figuras 5a e 5c). Fisicamente, estas correlações mostram que se na região Niño3 e na área de atuação da PDO forem observadas anomalias positivas (negativas)

de TSM os totais anuais de chuva no SNNEB tendem a ter desvios negativos (positivos de precipitação).

Figura 4 - Índices de desvios padronizados para as regiões de Niño3 (novembro a janeiro), dipolo de TSM no Atlântico Tropical (fevereiro a abril) e PDO de novembro a março (eixo da esquerda) e precipitação no SNNEB total de anual (eixo da direita).



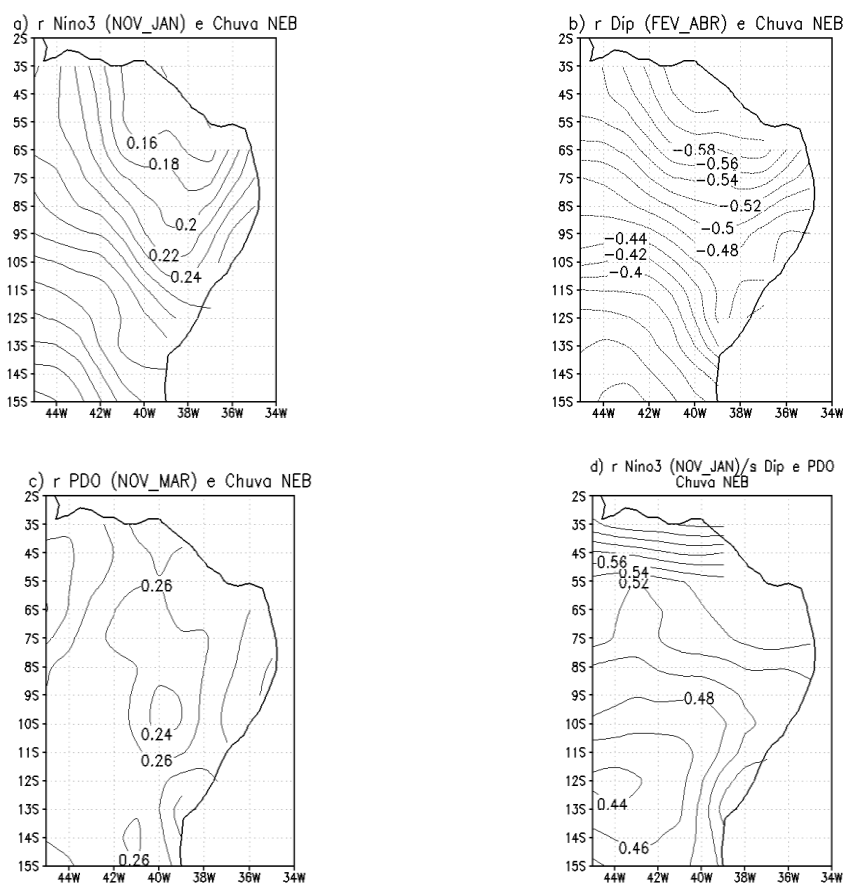
As correlações parciais evidenciam, embora tanto nas áreas de Niño3 como para a PDO, que quando se excluiu os efeitos do dipolo e PDO no caso do Niño3 e do dipolo e Niño3 no caso da PDO (figuras 5d e 5f), as magnitudes das correlações passaram a ser significativas com valores superiores a 0,3. Porém, tais áreas explicaram menos de 30% do total de chuva no NEB. Por outro lado, a figura 5e mostra que o dipolo de TSM no Atlântico Tropical, quando se exclui a variabilidade térmica no Pacífico Tropical e na Região da PDO, tende a explicar mais de 40% do total anual de chuva no NEB, principalmente suas áreas localizadas mais ao norte da região.

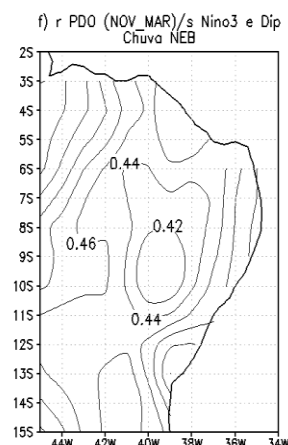
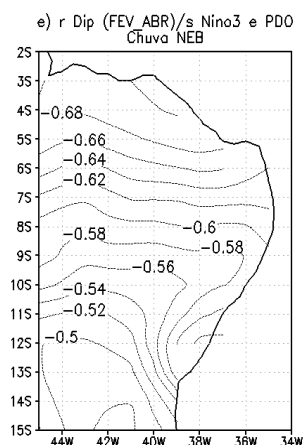
Estas análises são consistentes com a análise do aumento de chuva observado entre o período de 1974-1990 em relação ao de 1991-2005. Isto é, condições favoráveis em particular no Atlântico Sul (dipolos negativos), além disso, associados a eventos de La Niña e fases da PDO com predomínio de anos com anomalias negativas ou próximos a média, intensificaram os totais anuais de chuva no NEB, comparados ao período de 1991-2005 quando estas condições foram em geral contrária, com eventos de El Niño, La Niñas associadas a dipolos positivos e a PDO com predomínio de anomalias positivas.

Estes resultados corroboraram as análises espaciais feitas anteriormente que evidenciaram que a relação ENOS/dipolo de TSM no Atlântico Tropical tem mais impacto no controle da chuva na variabilidade interanual, que afeta períodos mais longos, por exemplo, de 10-15 anos, do que a possibilidade de uma influência direta de mudanças climáticas (efeito

antropogênico). Ressalta-se que ainda há muita incerteza de como o acúmulo de gases de efeito estufa tende a influenciar o regime de precipitação interanual em várias áreas do globo, comparado a variabilidade dos fenômenos e sistemas atmosféricos que afetam e interferem, ao longo do globo, nesta escala temporal de variabilidade (BERSNTEIN et al. 2007).

Figura 5 – Correlações simultâneas e parciais entre a precipitação no NEB e índices climáticos de Niño3, dipolo de TSM no Atlântico e PDO. a) Niño3, b) dipolo de TSM, c) PDO, d) Niño3 sem influência da PDO e do dipolo de TSM, e) dipolo de TSM, sem influência do Niño3 e PDO e f) PDO sem influência do Niño3 e do dipolo de TSM. Valores em módulo superiores a 0,3 são significativos a 95% segundo teste t Student.





CONCLUSÕES

De acordo com os resultados as principais conclusões que podem ser retiradas do estudo são: i) espacialmente no NEB, com os dados de reanálises, ocorreu uma diminuição do total médio anual da precipitação com magnitudes de 250 mm a 300 mm entre 1991/2005 e 1974/1990. Esta diminuição foi significativa estatisticamente a 95% segundo teste t Student. Para temperatura entre os períodos analisados foi observado um aumento de aproximadamente $0,4^{\circ}\text{C}$, porém este não significativo estatisticamente a 95%. Análises comparativas com dados observados em pluviômetros ao longo do NEB, interpolados para uma grade de 1° por 1° de latitude e longitude, mostraram também uma diminuição nos totais médios anuais de precipitação entre 1991/2005 de 1974/1990, embora que com magnitudes inferiores ao observado nos dados de reanálises. A diminuição, em magnitude, com usando dados observados foi de 100

mm a 150 mm, significativos estatisticamente segundo o teste t Student aplicado. Uma análise mais detalhada da influência do ENOS e padrão de dipolo de TSM nesta diferença de precipitação entre os dois períodos mostraram que a diminuição de chuva deve ter sido causada pela variabilidade interanual destes fenômenos. No período de 1991/2005 tanto a média dos totais anuais de chuva para os anos de La Niña como dos anos de El Niño ao longo de grande parte do NEB foram inferiores a climatologia e aos observados no período de 1974/1990. As análises sugerem que estudos de diferenças de precipitação no NEB devem levar em conta a variabilidade dos fenômenos ENOS e do dipolo de TSM do Atlântico Tropical mais detalhadamente, a despeito de inferir conclusões imprecisas sobre mudanças climáticas da precipitação sobre o NEB.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. B.; SERVAIN, J. CAMPOS, J. N. B. 2007. Relationship between ocean climatic variability and rain-fed agriculture in northeast Brazil. *Climate Research*, Amsterdam, v. 38: 225–236, 2009, doi: 10.3354/cr00786.
- ALVES, J. M. B. *et al.* Uma aplicação da técnica de *downscaling* dinâmico no setor norte da Região Nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Meteor.*, São Paulo, v.18, n.2, p.161-180, 2003.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. *International Journal of Climatology*, v. 25, p. 2017-2030, 2005.
- ANDREOLI, R. V., KAYANO, M. T.; GUEDE, R. L., OYAMA, M. D. & ALVES, M. A. S. A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade da precipitação em Fortaleza. *Rev. Bras. Meteor.* São Paulo, v.19, n.2, p.113-122. 2004.
- BERNSTEIN, L. *et al.* 2007: Climate Change. Synthesis. Report. IPCC, Londres, 104 pp. 2007.
- CAI, M.; KALNAY, E. Can reanalysis have anthropogenic climate trends without model forcing? *J. Climate*, Boston, v.18, p.1844–1849. 2005.
- COLLINS, J. M.; CHAVES, R.; MARQUES, V. S. Temperature variability over South America. *Journal of Climate*, Boston, v.22, p.5854-5868. 2009.
- CHAVES, R. R.; COLLINS, J.; MARQUES, V. DA SILVA. Summertime temperature variability in South America between 1948-2007. *CLIVAR Exchanges*, Seattle, v.13, n.3, july. 2008.
- DAI, A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity. *Journal of Climate*, Boston, v.19, p.3589-3605. 2006.
- DANG, H.; GILBERT, N. P.; WEAVER, A. J.; ZWIERS, E. W. Climate change detection over different land surface vegetation classes. *Int. J. Climatol.*, Londres, 27, p.211-220. 2007.
- ENDO, N.; AILIKUN, B.; YASUNARY, T. Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rain events during summer in China from 1961 to 2000. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 83, Tóquio, p.621-331. 2005.
- DUFECK, A. S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P. Are reanalysis data useful for calculating climate indices over South America? Trends and directions in climate research *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1146, p.87–104. 2008.
- GEMMER, M.; BECKER, S.; JIANG, T. Observed monthly precipitation trends in China 1951-2002. *Theor. Appl. Climatol.*, Viena, 77, p.39-45. 2004.
- HAYLOCK, M.R., PETERSON, T.C., ALVES, L.M. *et al.* 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, Boston, 19, 1490-1512.
- HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *Journal of Climate*, Boston, v.3, p. 893-904, 1990.
- HARRISON, D. E.; LARKIN, N. K. El Niño-Southern Oscillation sea surface temperature and wind anomalies, 1946-1993. *Rev. Geophysics*, Boston, v. 36, n.3, p. 353-399. 1998.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 2007a. Climate Change

- 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 18. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. 2007b. Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers, 23.
- JONES R.G.; MURPHY, J.M.; HASSEL, D.C., WOODAGE, M.J. A high resolution atmospheric GCM for the generation of regional climate scenarios. Submitted to Climate Dynamics. Amsterdam, 2007.
- KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., Boston, v.77, p.437–471. 1996.
- KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, Londres, v.423, p.528–531. 2003.
- KIN, H-J.; WANG, B.; DING, Q., CHUNG, U-H. Changes in arid climate over north China detected by the Köppen climate classification. J. Meteor. Soc. Japan, Tóquio, 86, p.981–990. 2008.
- KÖPPEN, W. Grundriss der Klimakunde, Walter de Gruyter, 388pp. 1931.
- KROL, M.S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. *Environmental Modelling & Software*, Oxford, v.22, p.259–68, 2007.
- MANTUA, N. J. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull. Amer. Meteor. Soc., Boston, v.78, p.1069–1079. 1997.
- MARENGO, J., AMBRIZZI, T. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24–28, 2006, p.291–296. 2006.
- MARENGO, J. A. et al. Future change of temperature and precipitation extremes in South-America from derived as PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.* (2009a). Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/joc.1863.
- MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Clim Dyn.* DOI 10.1007/s00382-009-0721-6. 2009b.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Scie.*, Boston, v.38, n.12, p.2653–2675. 1981.
- NOBRE, C.A. *Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do País.*
- Parcerias Estratégicas*, Brasília, n.12, p.239–58, 2001.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperatures, wind stress, and rainfall over the tropical over the tropical Atlantic and South America. *J. Climate*, Boston, v.9, n.10, p.2464–2479, 1996.

- QIN, D. H.; DING, Y. H.; SU, J. L.; WANG, S. M. Climate and Environment Changes in China. China Science Press, 562p. 2005.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. Monthly Weather Review, Boston, v.115, p.1606-1626. 1987.
- RAO, V. B.; GIAROLLA, M.; KAYANO, M. T.; FRANCHITO, S. H. Is the recent increasing trend of rainfall over Northeast Brazil related to Sub-Saharan drought? J. Climate, Boston, v.19, p.4448-4453. 2006.
- SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over eastern amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. Rev. Bras. Meteor., São Paulo, v.19, n.2, p.113-122. 2004.
- SUN, L.; MONCUNILL, D. F.; LI, H.; MOURA, A. D.; FILHO, F. D. D. S. Climate downscaling over Nordeste Brazil using NCEP RSM97. J. Climate, Boston, 18, p.551-567. 2005.
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. Bulletin of American Meteorological Society, Boston, v. 78, p. 2771-2777. 1997.
- UVO, C. B.; REPELLI, C. A; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationship between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation, Journal of Climate, Boston, v.11, n.4, p.551-562, 1998.
- WILBY, R. A review of climate change scenarios for Northeast Brazil. Tearfund is a Christian relief and development agency building a global network of local churches to help eradicate poverty. Londres, p.23. 2008.
- VICENTE, L. A. et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. J. Climate, Boston, v.18, p.5011–5023. 2005.
- VERA, C.; SILVESTRE, G.; LIEBMAN, B.; GONZÁLES, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. Geophys. Res. Lett., 33, Boston, L13707, doi:10.1029/2006GL025759. 2006.
- ZHANG, Y., WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. S. ENSO-like interdecadal variability. J. Climate, Boston, v.10, p.1004–1020. 1997.