

ISSN 0104-1347

Uma análise da evolução termodinâmica no Atlântico tropical em anos de contrastes climáticos

An analysis of the thermodynamic evolution in the the tropical Atlantic in years of climatic contrasts

Flaviano Fernandes Ferreira¹ e José Maria Brabo Alves²

Resumo - Hoje com todo o desenvolvimento de modelos numéricos que prognosticam a configuração termodinâmica, em particular a temperatura da superfície do mar, no Pacífico tropical, a evolução dessa configuração no Atlântico tropical, entre novembro a maio, período crucial para definir a qualidade da estação chuvosa do setor norte do Nordeste do Brasil (SNNEB) ainda não é previsível com confiabilidade. Esse estudo apresenta uma análise observacional da evolução termodinâmica no Atlântico tropical com ênfase a composição de anos de El Niño, La Niña e Neutros no Pacífico tropical. Os resultados mostraram que nos anos de El Niño, o Atlântico norte (sul) aquece (resfria), principalmente, entre novembro a janeiro. Essa característica na parte norte da bacia é típica da influência remota do El Niño (teleconexão). Para os anos Neutros não foi observado nenhum sinal termodinâmico significativo entre os setores norte e sul da bacia do Atlântico tropical. No período de novembro a maio, quantitativamente, a maior diferença foi observada no balanço de calor para anos de El Niño (16 W/m^2), entre as anomalias observadas entre o setor norte e sul do Atlântico tropical.

Palavras-Chave: El Niño, La Niña, configuração termodinâmica

Abstract – With the current development of numerical models which allow to forecast the thermodynamic configuration, in particularly the sea surface temperature, in the tropical Pacific, the evolution's in tropical Atlantic, from November to May, crucial period to define the quality of the rainfall season of the north sector Northeast Brazil (NSNB), isn't forecast with accuracy yet. This study presents an analysis of the thermodynamic evolution at tropical Atlantic with emphases in the composition of the El Niño, La Niña and Neutral in the tropical Pacific. The results showed that in El Niño years, the Atlantic north (south) warm (cold), principally, between November to January months. This characteristics in the north region of the basin is typical of the remote influence of the El Niño (teleconnection). During neutral years wasn't observed any significant evolution of the thermodynamic signal between the north and south sectors of the Atlantic tropical basin. During the period from November to May, the major difference was observed in heat budget during El Niño years (16 W/m^2), between the observed anomalies between the north and south of the tropical Atlantic.

Key Words: El Niño, La Niña, thermodynamic configuration

Introdução

Variações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais são

as grandes causas de variabilidades climáticas ao longo do globo (PHILANDER, 1990). As fases fria ou quente do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e os modos de variabilidade da TSM no oceano Atlân-

¹FUNCEME – Av. Rui Barbosa, 1246 – CEP: 60.115 – 221 – Fortaleza-CE – email: flaviano@funceme.br

²FUNCEME – Av. Rui Barbosa, 1246 – CEP: 60.115 – 221 – Fortaleza-CE – email: brabo@funceme.br

tico tropical, conhecidos como modo de contraste térmico entre o setor norte e sul da bacia (gradiente inter-hemisférico) e o modo equatorial, suas interações com a atmosfera e seus impactos climáticos, principalmente, no Caribe, América Central e Nordeste da América do Sul tem sido nos últimos anos assuntos de interesse nas pesquisas climáticas (UVO et al., 1998; SOUZA et al., 1998; CHANG et al., 1997; HASTENRATH, 2000; HARZALLAH et al., 1998; SERVAIN, 1998; HUANG & SHUKLA, 1997; NOBRE & SHUKLA, 1996, WANG, 2002).

Desde o estudo de BJERKNES (1964), um dos pioneiros em investigar a interação oceano-atmosfera na bacia do oceano Atlântico tropical, muito se tem estudado sobre as relações de variáveis termodinâmicas na bacia do oceano Atlântico tropical e seus impactos no clima das Américas e África, e principalmente seus impactos no período chuvoso (fevereiro a maio) do setor norte do Nordeste do Brasil - NEB (MOURA & SHUKLA, 1981; ALVES & REPELLI, 1992; CRAWFORD et al., 1990; WAGNER & SILVA, 1994 e outros). Além disso, estudos mais recentes têm mostrado uma teleconexão remota entre a variabilidade da TSM no Pacífico tropical e a bacia do Atlântico tropical, em particular, no seu setor norte (ENFIELD & MAYER, 1997; KLEIN et al., 1999), com impactos significativos na qualidade da estação chuvosa do norte do NEB. Essa teleconexão ficou conhecida como “atmospheric bridge”, (NOBRE & SHUKLA, 1996). Em ALVES (2002) pode ser encontrado um estudo de reanálise sobre a variabilidade da TSM nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais e a sua relação com chuva de fevereiro a maio do setor norte do NEB.

No Atlântico tropical, são observados dois modos importantes de variabilidade da TSM, um com variabilidade mais presente na escala interanual e outro na escala decadal. O primeiro, conhecido também como modo equatorial, é semelhante ao que acontece no oceano Pacífico durante o fenômeno ENOS (ZEBIAK, 1993). O segundo, conhecido também como modo dipolar, consiste na variação inter-hemisférica da TSM em escala aproximadamente decadal (SERVAIN et al., 1998; ENFIELD et al., 1999; HASTENRATH, 2002).

Em termos de características oceanográficas, particularmente, o oceano Atlântico é uma espécie de elo de ligação entre as demais bacias do planeta. Além de receber águas dos seus dois vizinhos (oceanos Pacífico e Índico), via respectivamente Estreito de

Drake e região de retroflexão da corrente das Agulhas, o Atlântico sul possui ainda a peculiaridade de possuir um fluxo líquido de calor na direção equatorial a partir de sua região subtropical, resultando num transporte superficial de calor (e de massa) através do Equador para o Hemisfério Norte, compensado pelo transporte profundo da massa d'água fria do Atlântico Norte no sentido oposto (CAMPOS et al., 1999). Atualmente encontra-se em operação o projeto PIRATA (*A Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic*), que tem como objetivo monitorar o oceano Atlântico subsidiando com informações em tempo real a variabilidade das suas características físicas para que possam ser usadas em estudos de impactos climáticos e de áreas correlatas. Maiores detalhes sobre esse projeto podem ser encontradas em SERVAIN et al. (1998).

Como o fluido atmosférico responde rapidamente as características da TSM, principalmente nos trópicos, o deslocamento e posicionamento meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é talvez o maior sinal da variabilidade dos mecanismos de interação atmosfera-oceano no Atlântico tropical (STRAMMA & SCHOTT, 1999; PHILANDER, 1996). As características da evolução sazonal da localização da ZCIT e da TSM dependem da dinâmica das correntes e dos ventos alísios. As variações da circulação superficial respondem, sobretudo às distribuições sazonais de cisalhamento eólico interfacial, afetando a migração da ZCIT. Com o movimento da ZCIT em direção ao Hemisfério Norte no período da primavera para o verão desse hemisfério, observa-se igualmente o deslocamento em direção ao norte das correntes oceânicas zonais (corrente Norte Equatorial e corrente Sul Equatorial, alterando em consequência o transporte de calor na superfície do Atlântico equatorial.

Nos trópicos, a formação de convecção profunda é altamente associada com altas TSMs e convergência do vento na superfície (GUTZLER & WOOD, 1990; FU et al., 1990 e 1994; WALISER et al., 1993; ZHANG, 1993). Concomitantemente, o calor latente liberado nas regiões de convecção profunda serve como fonte de energia principal para muitos sistemas de grande escala, tal como a ZCIT e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ). Estudos como os de LAU & PENG (1987); LAU & SHEN (1988); SWINBANK et al. (1988); HESS et al. (1993) também mostraram que a intensidade da OMJ e da ZCIT pode ser significativamente modulada pela TSM, com resposta mais forte em cima do oceano

aquecido. Regiões com alta precipitação estão, também, geralmente associadas com a TSM mais quente.

Embora com a significativa evolução dos estudos dessas interações oceano-atmosfera-clima, ainda se conhece muito pouco, mais detalhadamente, de uma possível evolução das condições termodinâmicas entre o período de pré-estação chuvosa do setor norte do NEB (novembro a janeiro), para a estação chuvosa (fevereiro a maio), quando no oceano Pacífico tropical foram observadas características térmicas definidas como de El Niño, La Niña ou Neutra. XAVIER et al., (2000) mostraram que déficit ou chuvas em torno da média (na média ou acima) estão associados com episódios El Niño (La Niña ou anos Neutros) no Pacífico tropical. ALVES et al. (2000) mostraram que em anos de El Niño a TSM tem uma tendência de aquecimento (resfriamento) nos setores norte (sul) da bacia do Atlântico tropical, principalmente, entre janeiro a maio, enquanto em anos de La Niña essa característica é contrária, sendo evidente a partir do mês de outubro.

Este estudo teve como objetivo investigar a tendência termodinâmica no Atlântico tropical inferida pelas anomalias de TSM, anomalias dos campos de estresse do vento à superfície, Pressão ao Nível Médio do Mar (PNM) e balanço de calor na superfície em anos definidos como de El Niño, La Niña e Neutros no Pacífico Tropical.

Material e métodos

As variáveis atmosféricas e oceânicas (TSM, estresse do vento à superfície do mar, PNM, fluxos de calor latente e sensível e radiação de onda curta e onda longa), observadas sobre o Atlântico tropical, foram extraídas da mais nova versão do *Comprehensive Atmospheric-Ocean Data Set* (COADS), compilada por SILVA et al. (1994). Esse conjunto de dados é composto por um extenso número de observações durante o período de janeiro de 1945 a dezembro de 1993. Esses dados são médias mensais com resolução de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de latitude-longitude, provenientes de projetos de colaboração entre *University Winsconsin-Milwaukee* e o *National Ocean Atmosphere Data Center*.

Os anos de El Niño, La Niña e Neutros na bacia do Oceano Pacífico Tropical foram classificados de acordo o *National Centers for Environmental*

Prediction (NCEP) como: El Niño (47, 52, 54, 58, 64, 66, 70, 73, 77, 78, 83, 87 e 92), La Niña (50, 55, 65, 71, 74, 76, 86 e 89) e Neutros (45, 46, 48, 49, 51, 53, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 68, 69, 72, 75, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 88, 90, 91 e 93).

Para se identificar a evolução dessas variáveis analisadas nos anos de contrastes climáticos no Pacífico Tropical primeiramente foram calculadas suas respectivas médias de longo tempo (1945-1993). Posteriormente, o ciclo sazonal foi removido calculando-se as anomalias entre o valor médio de cada variável, para cada composição de anos de El Niño, La Niña, Neutros, menos as suas respectivas MLT. Para se inferir o balanço de calor o mesmo foi estimado pela diferença entre a radiação de ondas curtas que chega à superfície menos o somatório entre a radiação de onda longa que deixa a superfície mais os fluxos de calor latente e sensível. Maiores detalhes desses cálculos são encontrados em SILVA et al., (1994).

Uma análise mais detalhada da tendência dessas variáveis termodinâmicas no Atlântico tropical foi executada para alguns anos (dois) escolhidos como de El Niño e La Niña classificadas como eventos fracos, moderados e fortes. Essas classificações tiveram com base somente o valor médio da anomalia de TSM na região de Niño 3, para o período de fevereiro a maio que coincide com a quadra chuvosa do setor norte do NEB. Os limites dessa anomalia de TSM que definiu a classificação desses eventos levou em consideração as seguintes características: El Niño: fraco: $\geq 0,5^{\circ}\text{C} \leq 1,0^{\circ}\text{C}$; moderado: $> 1,0^{\circ}\text{C} \leq 1,5^{\circ}\text{C}$ e forte: $> 1,5^{\circ}\text{C}$ e La Niña: fraca: $\leq -0,5^{\circ}\text{C} \geq -1,0^{\circ}\text{C}$; moderada: $< -1,0^{\circ}\text{C} \geq -1,5^{\circ}\text{C}$ e forte: $< -1,5^{\circ}\text{C}$. Após essa classificação os seguintes anos foram escolhidos como de El Niño fraco (52 e 77), moderado (66 e 87) e forte (58 e 83) e para La Niña fraca (76 e 86), moderada (65 e 74) e forte (71 e 89).

Para essa análise foi utilizado um índice inter-hemisférico das variáveis TSM, PNM, estresse do vento e balanço de calor dado pela diferença entre o valor médio das anomalias da área do dipolo de TSM (MOURA & SHUKLA, 1981) setor norte da bacia ($5^{\circ}\text{-}25^{\circ}\text{N}$; $50^{\circ}\text{-}20^{\circ}\text{W}$) menos a área do setor sul ($25^{\circ}\text{-}5^{\circ}\text{S}$; $30^{\circ}\text{W-}0^{\circ}$). Essas diferenças foram feitas para o período de novembro do ano anterior definido como de El Niño e La Niña (fraco, moderado e forte) a maio do referido ano.

Resultados e discussão

As anomalias de TSM, estresse do vento, PNM e balanço de calor sobre o oceano Atlântico tropical (30°N–30°S), médias para o período de fevereiro a maio, são apresentadas nas Figuras 1, 2, 3 e 4 para os anos de El Niño, La Niña e Neutros. Na Figura 1 observando-se o padrão das anomalias de TSM, verifica-se nos anos de El Niño, que a bacia do Atlântico sul esteve mais fria que a sua área norte, com um núcleo próximo à costa da África, entre 10° e 25°S, bem mais frio. Essa característica, principalmente no setor norte da bacia é típica da influência remota do ENOS, via teleconexão remota, atuante em geral, com defasagem de 5 meses, entre as condições térmicas do Pacífico e Atlântico Norte (WANG, 2002). Para anos de La Niña o padrão é

inverso, a bacia norte é bem mais fria com valores abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$ do que foi observado no sul para anos de El Niño, e anomalias positivas de igual magnitude são observadas na bacia sul, indicando um aquecimento. Fisicamente, esse padrão é consistente com o aumento (diminuição) da PNM que age fazendo com que ocorra uma diminuição (aumento) dos ventos alísios de nordeste (sudeste), favorecendo uma diminuição (aumento) da TSM nesses setores norte (sul) do Atlântico tropical (HASTENRATH & HELLER, 1977; WAGNER, 1996).

Para anos Neutros, aparecem dois núcleos de anomalias positivas de TSM de fraca magnitude, um na bacia sul e outro na área norte da bacia. E entre estes, observa-se um resfriamento no setor equatorial, estendendo-se da costa africana à brasileira, esta

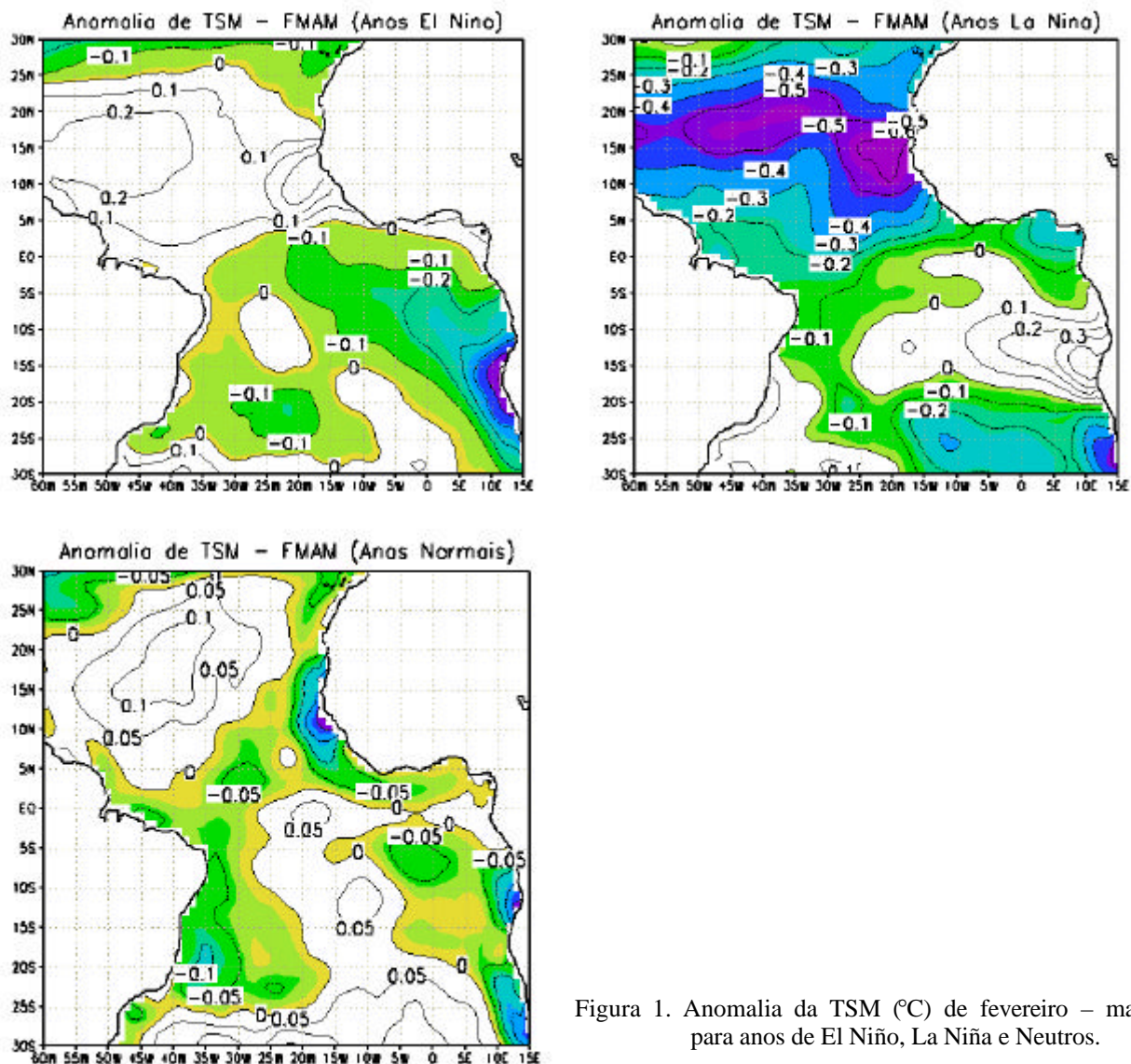


Figura 1. Anomalia da TSM ($^{\circ}\text{C}$) de fevereiro – maio para anos de El Niño, La Niña e Neutros.

última, por sua vez, apresenta praticamente toda faixa litorânea com anomalias negativas de TSM. Os resultados de SOUZA et al. (1998) mostraram que, quando à configuração de TSM no Atlântico tropical foi similar a de anos Neutros, à distribuição de chuva no setor norte do NEB é irregular no período de fevereiro a maio, caracterizada por uma grande variabilidade temporal e espacial.

O padrão das anomalias do estresse do vento (Figura 2), para anos de El Niño mostra que os ventos de sudeste são mais fortes, próximo a costa norte do Brasil (anomalias mais fortes que a média). Com esse padrão, a ZCIT é forçada a permanecer mais ao norte diminuindo as precipitações no setor norte e semi-árido do NEB. Para os anos de La Niña, ocorre o inverso à configuração observada nos anos de El Niño

e com valores mais intensos isto é, a ZCIT é empurrada para o sul podendo atingir latitudes mais próximas à costa nordestina, com isso, tende à ocorrer um aumento nas chuvas no setor norte do NEB (UVO, 1988). Também, observa-se que em grande parte da bacia sul as anomalias do estresse do vento são fracas, mostrando um padrão próximo a normal. Para anos Neutros observa-se o estresse do vento mais fraco que a média acima de 15°N, e em torno à acima da média entre o equador e 15°N. Na parte sul da bacia observa-se um predomínio de estresse do vento em torno a abaixo da climatologia.

A Figura 3 mostra a configuração de anomalias de PNM. A bacia sul, nos anos de El Niño mostra um núcleo positivo exatamente na região onde ocorre um resfriamento da TSM, enquanto para anos

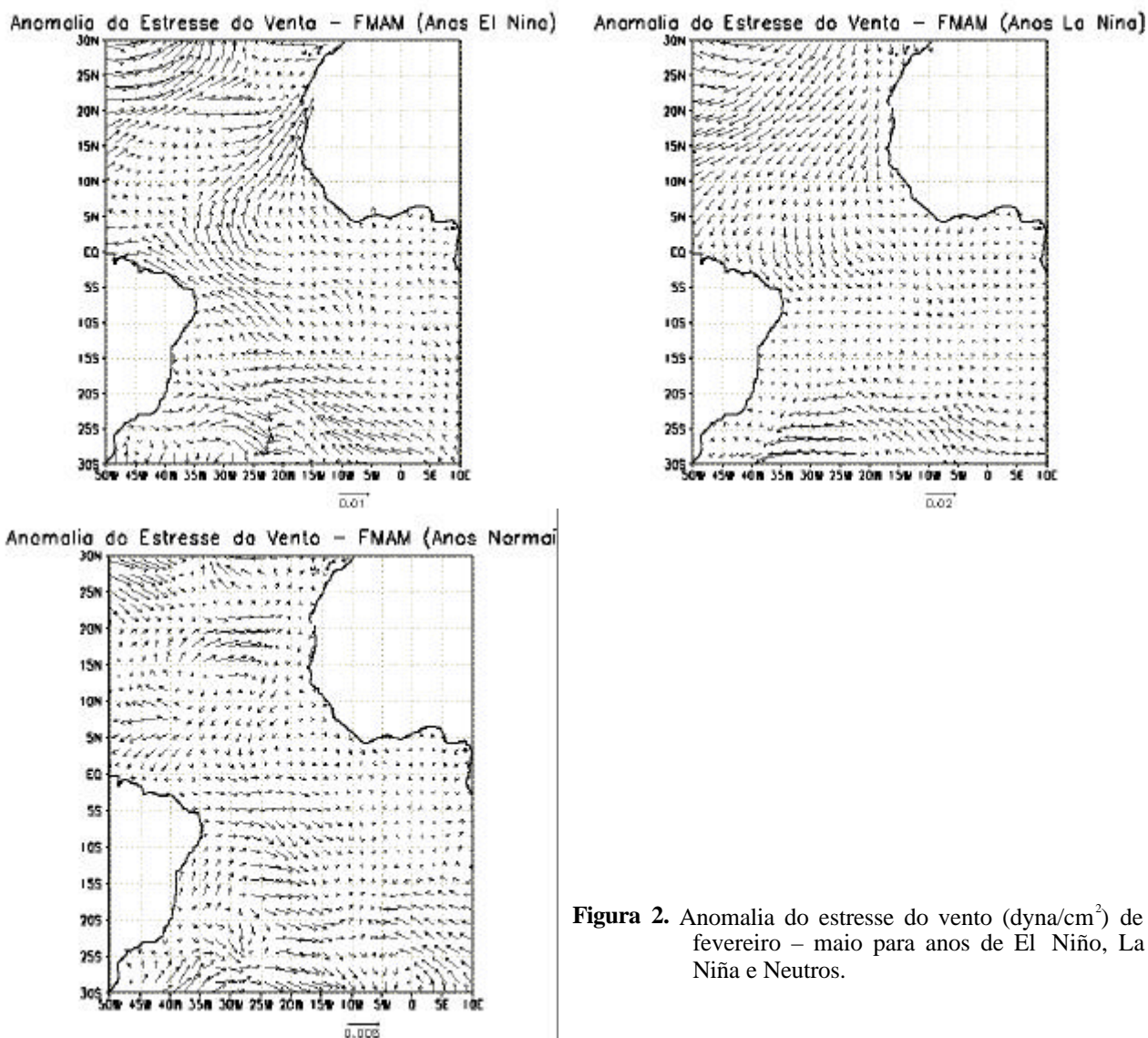


Figura 2. Anomalia do estresse do vento (dyna/cm^2) de fevereiro – maio para anos de El Niño, La Niña e Neutros.

de La Niña. Em grande parte do setor sul da bacia predominou anomalias negativas de PNM, inferiores a $-1,0$ hPa. Durante os anos Neutros a configuração das anomalias de PNM é heterogênea, não apresentando um predomínio para nenhum um tipo de anomalias de PNM em toda a bacia do Atlântico tropical.

O balanço de calor (Figura 4), mostra, em média, uma perda de calor na bacia sul representando o resfriamento da mesma em anos de El Niño, consistente com a predominância de anomalias negativas de TSM nessa área da bacia. Na bacia norte, verifica-se um ganho de calor demonstrado na TSM com um aquecimento. Em anos de La Niña, a bacia do Atlântico apresenta-se, praticamente, em toda sua extensão com uma perda de calor mais proeminente no setor norte da mesma, fisicamente consistente com as anomalias negativas de TSM observadas nessa

bacia. Para os anos Neutros foi observado uma perda de calor em toda a bacia do Atlântico tropical. Essas relações físicas de perda (ganho) de calor com anomalias negativas (positivas de TSM), são mais claras no setor norte da bacia do Atlântico tropical. Essas características foram mostradas no estudo de WAGNER (1996).

A seguir é apresentado uma análise mostrando a evolução da anomalia do índice inter-hemisférico entre as duas áreas de dipolo de TSM definido na secção de metodologia. Essa análise foi feita para cada composição de eventos de El Niño e La Niña classificados como fraco, moderado e forte, de novembro do ano anterior a maio do ano classificado em cada respectiva categoria.

As Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram a evolução da anomalia da TSM, estresse do vento, PNM e balanço de calor, respectivamente, para anos característicos

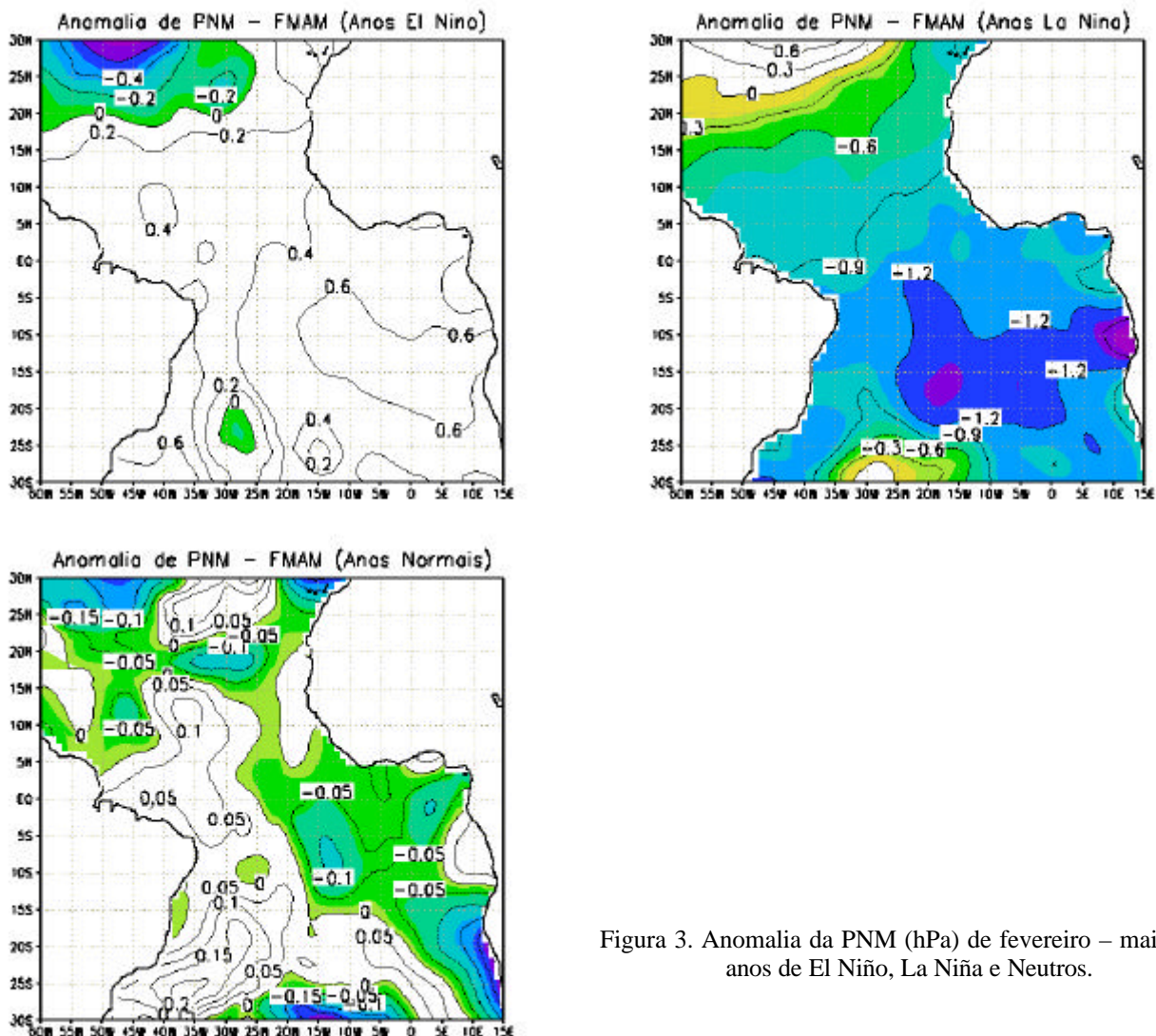
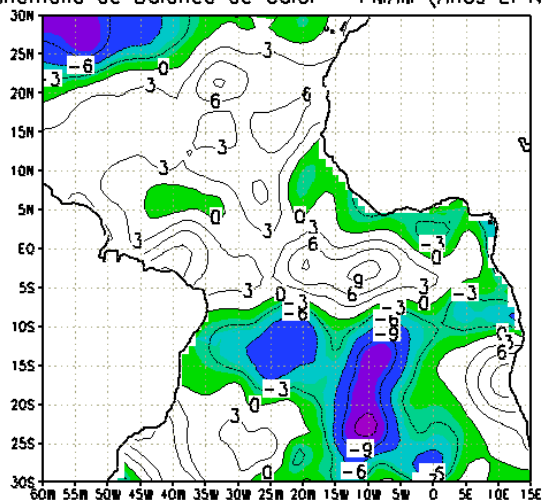
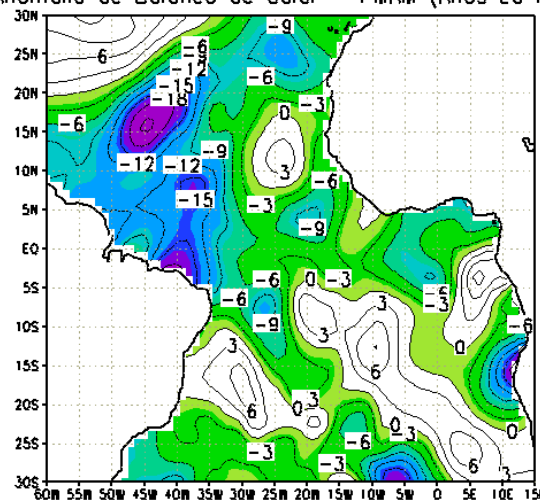


Figura 3. Anomalia da PNM (hPa) de fevereiro – maio para anos de El Niño, La Niña e Neutros.

Anomalia de Balanço de Calor – FMAM (Anos El Niño)



Anomalia de Balanço de Calor – FMAM (Anos La Niña)



Anomalia de Balanço de Calor – FMAM (Anos Normais)

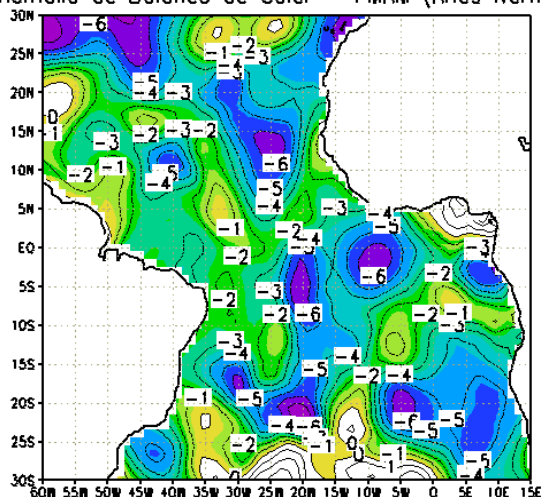


Figura 4. Anomalia do balanço de calor (W/m^2) de fevereiro – maio para anos de El Niño, La Niña e Neutros.

de El Niño fraco (51-52 e 76-77), moderado (65-66 e 86-87) e forte (57-58 e 82-83). As figuras desses índices inter-hemisféricos indicam que, em média, as áreas do dipolo de TSM de MOURA & SHUKLA (1981), norte (sul) mostram um ganho (perda) de calor de janeiro a abril. Fisicamente, a essa condição de mais (menos) calor na bacia, predomínio de anomalias positivas, tende a ocorrer um aumento (diminuição) da TSM, ao mesmo tempo a PNM tende a diminuir (aumentar) fazendo com que o estresse do vento de nordeste se torne mais fraco (mais forte) reduzindo (aumentando) a evaporação na superfície, corroborando para o aumento (diminuição) da TSM. A resposta atmosférica a essa configuração termodinâmica é permanência e o deslocamento da ZCIT para latitudes mais afastadas (próximas) da costa

norte do NEB e uma redução (aumento) de chuvas sobre o setor norte do NEB.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram a evolução da anomalia da TSM, estresse do vento, PNM e balanço de calor, respectivamente, para anos característicos de La Niña fraca (75-76 e 85-86), moderada (64-65 e 73-74) e forte (70-71 e 88-89). Essas figuras mostram que nesses anos, esses índices inter-hemisféricos apresentam características físicas associadas a anos chuvosos observados no setor norte do NEB. A bacia norte, apresenta uma perda de calor de janeiro a abril. Fisicamente, essa condição de menos calor na bacia, predomínio de anomalias negativas, tende a ocorrer uma diminuição da TSM, ao mesmo tempo a PNM tende a aumentar fazendo com que o estresse do vento de nordeste se torne mais

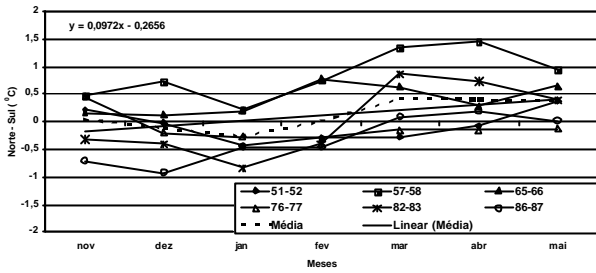


Figura – 5 Evolução da anomalia de TSM do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5°-25°N; 50°-20°W) menos a área sul (25°-5°S; 30°W-0°) no Atlântico tropical para anos de El Niño. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

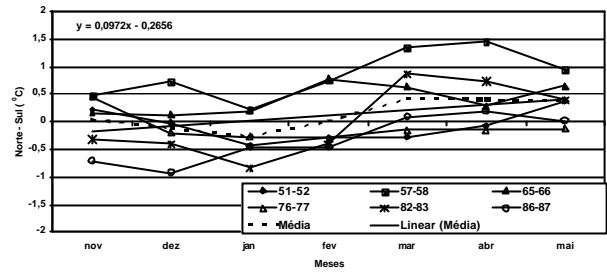


Figura – 5 Evolução da anomalia de TSM do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5°-25°N; 50°-20°W) menos a área sul (25°-5°S; 30°W-0°) no Atlântico tropical para anos de El Niño. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

na superfície, contribuindo para a diminuição da TSM. Na bacia sul, as condições observadas apresentaram uma predominância para condições termodinâmicas contrárias. Houve um predomínio de um ganho de calor de janeiro a abril. Fisicamente, a essa condição de mais calor na bacia, predomínio de anomalias positivas, tende a ocorrer um aumento da TSM, que força a uma diminuição da PNM, fazendo com que o estresse do vento de sudeste se torne mais fraco, diminuindo a evaporação na superfície, colaborando para o incremento da TSM. Toda essa interação física oceano-atmosfera entre os setores norte e sul da bacia influencia para o deslocamento da ZCIT para latitudes mais próximas à costa norte do NEB e um aumento de chuvas sobre essa região. As análises dessas figuras são consistentes com o apresentado nas Figuras 1, 2, 3 e 4. Para os anos Neutros (figuras não mostradas) não foi observada nenhuma evolução significativa

nesses índices inter-hemisféricos de anomalias de TSM, PNM, estresse do vento e balanço de calor.

Os resultados apresentados são consistentes com o estudo observacional e de modelagem apresentados por OKUMURA et al., (2001). Esses autores mostraram que, para uma composição de anos quando ocorreu à presença de anomalias positivas (negativas) de TSM nos setores norte e sul do Atlântico tropical, as características observadas e modeladas foram similares às observadas para os anos de El Niño e La Niña. Segundo seus resultados para os anos em que o gradiente inter-hemisférico é de norte para o sul, a ZCIT é deslocada anormalmente para o sul.

A resposta do vento é caracterizada pelo enfraquecimento (fortalecimento) dos ventos alísios sobre as áreas positiva (negativa) de TSM nos setores norte (sul) da bacia, em sintonia há uma interação

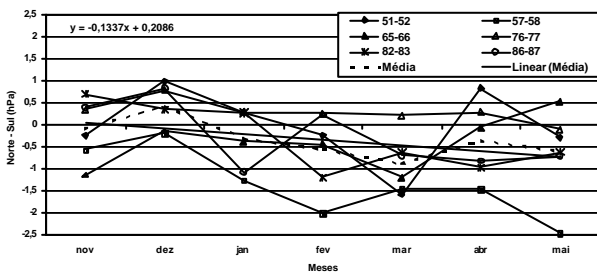


Figura 7 - Evolução da anomalia da PNM do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5°-25°N; 50°-20°W) menos a área sul (25°-5°S; 30°W-0°) no Atlântico tropical para anos de El Niño. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

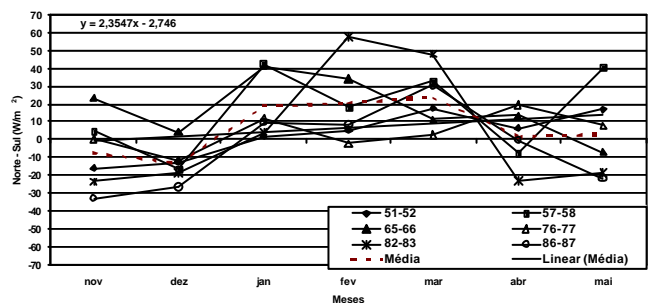


Figura 8 - Evolução da anomalia do balanço de calor do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5°-25°N; 50°-20°W) menos a área sul (25°-5°S; 30°W-0°) no Atlântico tropical para anos de El Niño. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

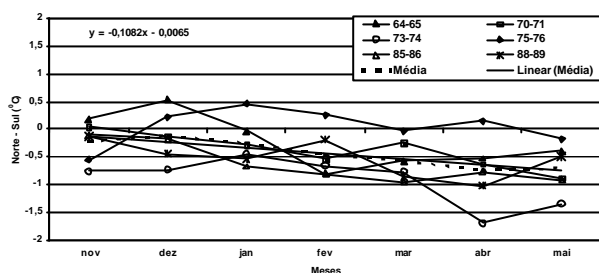


Figura 9 - Evolução da anomalia de TSM do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5° - 25° N; 50° - 20° W) menos a área sul (25° - 5° S; 30° W- 0°) no Atlântico tropical para anos de La Niña. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

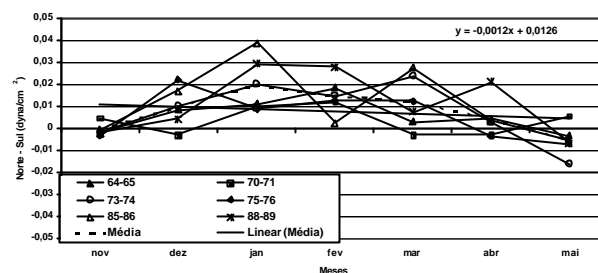


Figura 10 - Evolução da anomalia do estresse do vento do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5° - 25° N; 50° - 20° W) menos a área sul (25° - 5° S; 30° W- 0°) no Atlântico tropical para anos de La Niña. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

entre essa configuração de vento, evaporação e TSM (CHANG et al., 1997; XIE & TANIMOTO, 1998). A força de Coriolis que atua sobre os ventos de norte induzem uma anômala componente do vento de oeste (este) nos setores sul (norte) do equador. Estes ventos de oeste (este) superpostos à média dos ventos de este, reduzem (intensificam) a evaporação da superfície do mar nos setores sul (norte) do Atlântico tropical, reintensificando o gradiente inter-hemisférico inicial (OKUMURA et al., 2001).

Relativo ao balanço de calor, com configuração de ganho (perda) associado a anomalias positiva (negativa) de TSM nos setores norte (sul) do Atlântico tropical observada particularmente para os anos de El Niño (Figura 4), há uma certa relação física

dessa configuração com a interação positiva da variabilidade de nuvens baixas entre 10° S- 10° N. Essa variabilidade na cobertura de nuvens está associada ao deslocamento meridional da convecção profunda associada a ZCIT, tal variabilidade dirige um “feedback” negativo com as anomalias de TSM (OKUMURA et al., 2001). O resfriamento (aquecimento) da superfície do mar aumenta (diminui) a estabilidade estática no topo da camada limite planetária, que por sua vez aumenta (diminui) o total de nuvens baixas estratificadas (KLEIN & HARTMANN, 1993). Estas nuvens refletem radiação solar para o espaço e a suas variabilidades interferem na radiação que chega a superfície amplificando as trocas nas TSMs (PHILANDER et al., 1996).

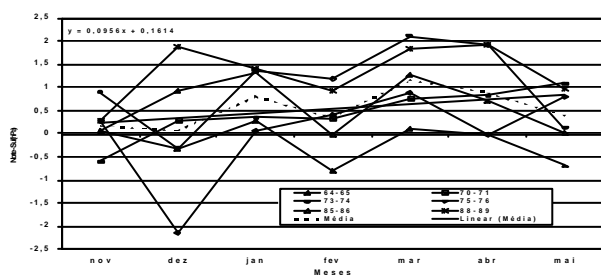


Figura 11 - Evolução da anomalia da PNM do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5° - 25° N; 50° - 20° W) menos a área sul (25° - 5° S; 30° W- 0°) no Atlântico tropical para anos de La Niña. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

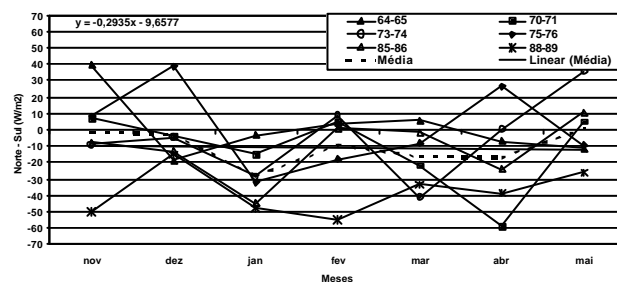


Figura 12 - Evolução da anomalia do balanço de calor do índice inter-hemisférico dado pela diferença do setor norte (5° - 25° N; 50° - 20° W) menos a área sul (25° - 5° S; 30° W- 0°) no Atlântico tropical para anos de La Niña. Média (linha preta tracejada), tendência linear da média (linha preta contínua).

A Tabela 1 sumariza as informações da tendência das variáveis das Figuras 5 a 12. A tendência do índice inter-hemisférico de TSM, PNM, estresse do vento e balanço de calor foi calculada pelo valor da inclinação da reta de tendência mostrada em cada figura multiplicado por 7 meses (novembro a maio). Os sinais algébricos positivos (negativos) para os anos de El Niño (La Niña) para cada variável são consistentes com os padrões físicos discutidos anteriormente, e relacionados com condições favoráveis (desfavoráveis) à chuva no setor norte do NEB. Por exemplo, para os anos de El Niño, os índices inter-hemisféricos de TSM e balanço de calor são positivos, indicando TSMs e energia disponível para manter esse aquecimento maiores em magnitude climatologicamente do que o setor sul da bacia, enquanto para PNM e o estresse do vento seus valores de tendência são negativos, corroborando com pressões e ventos mais fracos, climatologicamente, do que os observados no setor sul. Essas características termodinâmicas do oceano e atmosfera favorecem a um posicionamento da ZCIT mais afastada da costa norte do NEB, reduzindo as chuvas nessa região. Para os anos de La Niña essa tendência, em quase todas as variáveis, é contrária. As maiores diferenças foram observadas no balanço de calor, da ordem de $16W m^{-2}$ entre as duas composições.

Conclusões e recomendações

Esse artigo apresentou uma análise observacional da evolução termodinâmica no Atlântico tropical em anos definidos como de La Niña, El Niño e Neutro no Pacífico tropical. Os resultados mostraram uma relação consistente entre as anomalias das variáveis termodinâmicas (TSM, estresse do vento, PNM e balanço de calor), no Atlântico tropical desde a pré-estação (novembro a janeiro) e a estação

chuvosa (fevereiro a maio) do setor norte do NEB. Foi observado que em anos de El Niño o setor norte (sul) da bacia apresenta um predomínio de um balanço de calor positivo (negativo), a TSM permanece mais quente (fria), a PNM diminui (aumenta), e os estresses de ventos de nordeste (sudeste) permanecem mais fracos (fortes). Para os anos de La Niña, em geral, essas características foram contrárias.

Nos anos Neutros a configuração das variáveis termodinâmicas não mostram nenhuma característica predominante como a identificada nos anos de El Niño e La Niña. As análises mostraram também que a tendência termodinâmica nas áreas dos setores norte e sul do chamado dipolo de TSM definido em MOURA & SHUKLA (1981), já é evidente a partir dos meses de novembro a janeiro, consolidando-se entre os meses de fevereiro a maio. Essas configurações são importantes e devem ser monitoradas para que se possa, na eminência da previsão de eventos La Niñas e de El Niños futuros similares aos analisados, ter-se subsídios no sentido de auxiliar a previsão climática do setor norte do NEB.

Em particular, para o período de janeiro a abril, que coincide com o final de verão e parte do outono do Hemisfério Sul, OKUMURA et al. (2001), inferiram que a interação entre as características de TSM na parte norte do Atlântico tropical está diretamente ligada ao deslocamento meridional da ZCIT e a variabilidade associada da Circulação de Hadley. Também, há evidências que a variabilidade de distúrbios transientes de latitudes médias na bacia do Atlântico norte, pode induzir as trocas oceano-atmosfera nos trópicos através da variabilidade na região de alta pressão dos Açores (XIE & TANIMOTO, 1998). DIMA et al. (2001), mostraram que há uma defasagem de 5 a 7 anos entre os modos de variabilidade oceano-atmosfera entre as latitudes médias e os trópicos na bacia do oceano Atlântico tropical.

Tabela 1. Tendência do índice inter-hemisférico para o período de 7 meses (novembro a maio) para as variáveis TSM(°C), PNM(hPa), estresse do vento (EV) em dyna/cm² e balanço de calor (BC) em W/m² para a composição de anos de El Niño e La Niña. Os valores entre parêntese representam a inclinação da reta de tendência média das equações das figuras 5 a 12.

	TSM(0,0972)	EV(-0,0021)	PNM(-0,1337)	BC(2,3547)	PADRÃO
El Niño	0,648	-0,0147	-0,9356	16,4829	desfavorável
La Niña	TSM(-0,1082) -0,7574	EV(-0,0012) -0,0084	PNM(0,0956) -0,6692	BC(-0,2935) -2,0545	favorável

Porém, estudos mais específicos a respeito dessa interação trópicos extra-trópicos precisam ser aprofundados, principalmente, para o setor sul da bacia do Atlântico tropical. Além disso deve-se investigar como tais interações estão relacionadas com a evolução termodinâmica nessa bacia desde o período de pré-estação do setor norte do NEB (novembro a janeiro), durante e até o final da sua estação chuvosa (maio).

Referencias Bibliográficas

ALVES, J.M.B. et al. **Diferenças na tendência da temperatura da superfície do mar no Atlântico Intertropical em anos de contrastes climatológicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 579-587 (CD-Rom).

ALVES, J.M.B. Reanálise de índices de temperatura da superfície do mar no Atlântico e Pacífico tropicais potenciais indicadores da qualidade da estação chuvosa do setor norte do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 179-187, 2002.

ALVES, J.M.B.; REPELLI, C.A.A Variabilidade pluviométrica no setor norte do nordeste e os eventos El Niño/Oscilação Sul (ENOS). **Revista Brasileira Meteorologia**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 583-592, 1992.

BJERKNES, J. Atlantic air-sea interaction. **Advances in Geo-Physics**, Londres, v. 10, p. 1-82. 1964.

CAMPOS, E. et al. **The South Atlantic and the Climate.** Conferência Internacional sobre os Oceanos, São Rafael, 20 p. 1999. (OCEANOBS99).

CHANG, P.L.; JI, L.; LI, H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. **Nature**, Londres, v. 385, p. 516-518. 1997.

CRAWFORD, R.J.M. et al., Environmental influences on marine biota off Southern Africa. **Southern African Journal Science.**, Pretoria, v. 86, p. 330-339, 1990.

DIMA, M. et al. Quase-decadal variability in the Atlantic basin involving tropics-midlatitudes and ocean-atmospheric interactions. **Journal of Climate**, Boston, v. 14, n. 5, p. 823-832, 2001.

ENFIELD, D.B.; MAYER, D.A. Tropical Atlantic SST variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research Letter**, Washington. v. 102, n. ??, p. 929-945, 1997.

ENFIELD, D.B. et al. How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface

temperatures? **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 104, n. C4, p. 7841-7848, 1999.

FU, R.; DEL GENIO, A. D.; ROSSOW, W.B. Behavior of deep convection clouds in the tropical Pacific deduced from ISCCP radiances. **Journal of Climate**, Boston, v. 3, n. 10, p. 1129-1152, 1990.

FU, R.; DEL GENIO, A.D.; ROSSOW, W.B. Influence of ocean surface conditions on atmospheric vertical thermodynamic structure and deep convection. **Journal of Climate**, Boston, v. 7, n. 7, p. 1092-1108, 1994.

GUTZLER, D.S.; WOOD, T.M. Structure of large-scale convective anomalies over tropical oceans. **Journal of Climate**, Boston, v. 3, n. ??, p. 483-496, 1990.

HASTENRATH, S. In search of zonal circulation in the equatorial Atlantic sector from the NCEP-NCAR reanalysis. **International Journal of Climatology**, Londres, v. 21, n. 1, p. 37-47, 2001.

HASTENRATH, S. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v. 3, n. 5, p. 735-738, 2002.

HASTENRATH, S.; HELLER, L., Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, Boston, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.

HARZALLAH, A.; ARAGÃO, J.O.R. de; SADOURNY, R. Interannual rainfall variability in north-east Brazil: Observation and model simulation. **International Journal of Climatology**, Londres, v. 16, n. 8, p. 861-878, 1996.

HESS, P.G., BATTISTI, S.D.; RASCH, P.J.D.S. The maintenance of the intertropical convergence zones and the large-scale tropical circulation on a water-covered earth. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 50, n. 5, p. 691-713. 1993.

HUANG, B.; SHUKLA, J. Characteristics of the interannual and decadal variability in a general circulation model of the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, Boston, v. 27, n. 8, p. 1693-1712, 1997.

KLEIN, S.A.; HARTMANN, D.L. The seasonal cycle of low stratiform clouds. **Journal of Climate**, Boston, v. 6, n. 8, p. 1587-1606, 1993.

KLEIN, S.A.; SODEN, B.J.; LAU, N.C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for tropical Atmospheric bridge. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, n. 4, p. 917-932, 1999.

LAU, K.M.; SHEN, S. 1988: On the dynamics of intraseasonal oscillation and ENSO. **Journal of the**

- Atmospheric Sciences**, Boston, v. 45, n. 12, p. 1781-1797, 1988.
- LAU, K. M.; PENG, L. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 44, n. 6, p. 950-972, 1987.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, Boston, v. 10, n. 4, p. 2464-2479, 1996.
- OKUMURA, Y. et al. Tropical Atlantic variability and ~~its influence on the NAO~~ **Geophysical Research Letter**, Washington, v. 28, n. 8, p. 2185-2188, 2001.
- PHILANDER, S. G. **El Niño, La Niña, and Southern Oscillation**. Londres: Academic Press, 1990. 289 p.
- PHILANDER, S. G. et al. Why the ITCZ is mostly north of the equator? **Journal of Climate**, Boston, v.9, n.12, p.2958-2972, 1996.
- SERVAIN, J. Simple climate indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research**. Washington, v. 96, n. ??, p. 15137-15146, 1991.
- SERVAIN, J. et al. A pilot research moored array in the tropical Atlantic (PIRATA). **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v. 79, n. 10, p. 2019-2031, 1998.
- SWINBANK, R.; PALMER, T. N.; DAVEY, M. K. Numerical simulations of the Madden-Julian oscillation. **Journal of Atmospheric Sciences**. Boston, v.45, n.5, p.774-788. 1988.
- SILVA, A.M. da; YOUNG, A.C.; LEVITUS, S. **Algorithms and Procedures**, v. 1, Atlas of Surface Marine Data. Maryland: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1994. 83 p.
- SOUZA, E.B.; ALVES, J.M.B; XAVIER, T.M.B.S. A estação chuvosa no Semi-Árido nordestino nos anos de predominância de aquecimento ou resfriamento em toda a bacia do Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 47-56. 1998.
- STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean, **Deep Sea Research**, Florida, v. 46, n. 1-2, p. 279-304, 1999.
- WALISER, D.E.; GRAHAM, N.E.; GAUTIER, C. Comparison of highly reflective cloud and outgoing longwave radiation datasets for use in estimating tropical deep convection. **Journal of Climate**, Boston, v. 6, n. 2, p. 331-353, 1993.
- WAGNER, R.G. SILVA, A da. Surface conditions associated with anomalous rainfall in the Guinea coastal region. **International Journal of Climatology**, Londres, v. 14, n. 2, p. 179-199, 1994.
- WAGNER, R. G. Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic. **Journal of Climate**, Boston, v. 9, n. 9, Boston, p. 2010-2019, 1996.
- WANG, C. Atlantic Climate variability and its associated atmospheric circulation cells. **Journal of Climate**, Boston, v. 15, n. 13, p. 1516-1536, 2002.
- UVO, C.R.B. **A Zona de Convergência Intertropical e sua relação com a precipitação sobre a norte do Nordeste do Brasil**. São José dos Campos-SP, 1989. 82 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). São José dos Campos: INPE, 1989. (INPE-4887-TDL/378).
- XAVIER et al. **Climatologia da precipitação no Ceará e suas relações com eventos El Niño e La Niña: 1900-1999**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...**, Sociedade Brasileira de Meteorologia: Rio de Janeiro, 2000. p.967-975. (CD-Rom).
- XIE, S. -P.; TANIMOTO, Y. A pan-Atlantic decadal climate oscillation. **Geophysical Research Letter**, Washington, v. 25, n. ??, p. 2185-2188, 1998.
- ZEBIAK, S.E. Air-sea interactions in the equatorial Atlantic region. **Journal of Climate**, Boston, v. 6, n. 8, p. 1567-1586, 1993.
- ZHANG, C. Large-scale variability of atmospheric deep convection in relation to sea surface temperature in the tropics. **Journal of Climate**, Boston, v. 6, n. 10, p. 1898-1913, 1993.