

**FLUXO DE CALOR LATENTE NO ATLÂNTICO TROPICAL,
CONVECÇÃO SOBRE O NORDESTE
E A REDE PIRATA**

Bruno Durand ¹, Jacques Servain ^{2,1}, Henri Laurent ^{2,3}, Luis A. T. Machado ³

Abstract

This work aims at studying the relationship between tropical Atlantic latent heat flux and convective cloud coverage over the Northeast of Brazil (NEB) during the four months of the main rainy season (February to May) in this region. The correlation with the anomalies of these data is investigated, without lag and with one-month lag (the heat flux in advance). In both cases, a significant positive correlation appears in the Northern Western Tropical Atlantic, and a significant negative correlation is obtained for a limited area off eastern NEB. The positive correlation is linked to anomalies in the wind field that in turn relate to the latent heat flux anomalies. The negative correlation is related to an abnormal position of the inter-tropical convergence zone (ITCZ). The patterns obtained here show that the Northern Tropical Atlantic has a predominant influence on NEB, and that the key-region of the Southern Tropical Atlantic is only located around the NEB eastern coast. The positive correlation pattern indicates that the location of the northern branch of the PIRATA (Pilot Research moored Array in the Tropical Atlantic) moorings is pertinent to monitor the ocean-atmosphere interface parameters.

¹ FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) - Avenida Rui Barbosa, 1246 - Aldeota - 60115-221 - Fortaleza, BRASIL. Fone: (85) 4331844. Fax: (85) 4331810. bruno@funceme.br, servain@funceme.br

² IRD (Institut de Recherche pour le Développement), FRANCE. Henri.Laurent@ird.fr

³ CTA/IAE/ACA (Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronautica e Espaço / Divisão de Ciências Atmosféricas), São José dos Campos, BRASIL. machado@iae.cta.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é de estudar as relações entre o fluxo de calor latente do Atlântico tropical e a cobertura de nuvens convectivas sobre o Nordeste do Brasil (NEB) durante os quatro meses da estação chuvosa principal (Fevereiro a Maio) nessa região. A correlação entre anomalias desses dados é investigada, sem *lag* e com *lag* de um mês (o fluxo de calor com um mês de antecedência). Nos dois casos, uma correlação positiva significativa ocorre no Atlântico tropical noroeste, e uma correlação negativa significativa se localiza numa área limitada junto ao NEB. A correlação positiva é ligada à anomalias no campo de vento que induzem anomalias de fluxos. A correlação negativa é ligada à uma posição anormal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os padrões obtidos aqui mostram que o Atlântico tropical norte tem uma influência predominante sobre o NEB e que a região-chave do Atlântico tropical sul é localizada somente nos arredores da costa leste do NEB. O padrão de correlação positiva indica que a localização da parte norte das bóias PIRATA (Pilot Research moored Array in the Tropical Atlantic) é pertinente para monitorar as interações oceano-atmosfera.

Palavras-chave: Atlântico tropical, fluxo de calor latente, convecção, PIRATA.

INTRODUÇÃO

O regime de precipitação da parte norte do Nordeste do Brasil (nNEB), com estação chuvosa principal de Fevereiro a Maio (Strang, 1972), é o regime de precipitação dominando na região semi-árida do Nordeste brasileiro (NEB) (Kousky, 1979). Fevereiro-maio (FMAM) é a época do ano em que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) atinge sua posição mais ao Sul, alcançando o NEB (Hastenrath e Heller, 1977). A variabilidade interanual muito alta das precipitações mostra a alternância de anos normais e de anos de seca e de enchentes, e seus impactos econômicos e sociais. Vários estudos já relacionaram essa variabilidade interanual com parâmetros oceânicos como a Temperatura de Superfície do Mar (TSM). Estudos de correlações (Hastenrath e Heller, 1977; Moura e Shukla, 1981) entre anomalias de TSM e anomalias de precipitações no NEB destacaram um padrão de dipolo de cada lado da ZCIT. Anomalias de TSM negativas (positivas) no Atlântico tropical sul e anomalias positivas (negativas) no Atlântico tropical norte são associadas a anos secos (chuvosos). Hastenrath e Heller (1977) associaram anos secos com um enfraquecimento da parte equatorial da Alta Subtropical do Atlântico norte, um deslocamento em direção ao equador da Alta Subtropical do Atlântico sul, e uma posição anormal, ao norte, da ZCIT. Padrões opostos foram observados para anos chuvosos.

Os fluxos na superfície do oceano – fluxos de calor latente e sensível, e fluxo de momento – são parâmetros essenciais no estudo das interações oceano/atmosfera. Esses fluxos tem efeitos importantes sobre a atmosfera, trazendo umidade e calor nela, essenciais para a organização da convecção e das precipitações (Tao 1991). Da mesma forma, as condições atmosféricas (vento, cobertura de nuvens, precipitações) podem alterar os parâmetros da superfície do oceano modificando os fluxos (Webster e Lukas 1992). Num estudo de sensibilidade, Wang (1996) mostrou que entre os três fluxos já citados, o fluxo de calor latente tem a maior influência sobre a estrutura e a dinâmica interna de sistemas convectivos intensos.

Para medir parâmetros da interação oceano-atmosfera foi instalada uma rede de monitoramento, o PIRATA (Pilot Research moored Array in the Tropical Atlantic) (Servain et al., 1998). A localização das bóias (Ver Figura 2) foi escolhida para monitorar os dois modos principais de variabilidade do Atlântico tropical - o modo meridional (dipolo) e o modo equatorial (Servain et al., 2000). Nesse trabalho será também investigado se a posição dessas bóias é adequada para estudar as relações entre o fluxo de calor latente e a convecção sobre NEB.

Este trabalho preliminar tem o objetivo de entender as relações entre o fluxo de calor latente sobre o oceano Atlântico tropical, e a cobertura de nuvens convectivas do NEB. Este estudo visa averiguar as seguintes questões: qual é o impacto dos fluxos de calor do Atlântico tropical na convecção sobre o NEB? Qual é a importância relativa dos fluxos de calor latente intensos de cada lado da ZCIT? Inicialmente são apresentados os dados utilizados neste trabalho e os métodos de análise. Após, este trabalho apresenta resultados de um estudo de correlações sem *lag* e com *lag* de um mês; finalmente, uma discussão permite analisar-se esses resultados, tentando responder às perguntas precedentes.

DADOS E MÉTODOS

Cobertura de nuvens convectivas

Os dados de cobertura de nuvens foram obtidos por satélite e processados pelo projeto ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project, Schiffer e Rossow, 1985). Neste trabalho foi utilizada somente a cobertura de nuvens convectivas (nuvens altas com topo superior a 310 hPa). Os dados são disponíveis numa grade de 2,5°, a cada 3h, de 1983 a 1994. Utilizando esta base de dados calculou-se as médias mensais. A climatologia da cobertura de nuvens convectivas nos meses FMAM (Fig. 1a) mostra um máximo intenso (valores médios entre 20 e 30% da superfície) sobre a Amazônia e o nNEB. Sobre o oceano, os valores são geralmente mais baixos, mas a ZCIT é obviamente a região do Atlântico tropical de convecção máxima. Valores até 20% são observados entre 10°S e 5°N na parte

oeste do Atlântico e entre o equador e 5°N na parte leste. No mapa, o polígono preto delimita a área escolhida para definir o NEB: são 11 pontos de grade entre 45°W e 35°W e entre 10°S e 2,5°S. A resolução dos dados (2,5°) não permitiu uma ótima definição da região estudada. Foi calculada uma série temporal mensal de cobertura de nuvens convectivas do NEB, média das coberturas desses 11 pontos. Um índice de cobertura convectiva do NEB foi então calculado, como série das anomalias normalizadas (pelo desvio padrão) dessa série mensal.

Fluxo de calor latente

Ao respeito do fluxo de calor latente, o conjunto de dados escolhido foi elaborado por da Silva (da Silva, 1994). São fluxos baseados em observações de navios ; da Silva realizou um tratamento para fornecer um conjunto de dados globais, com uma resolução de 1 grau. Os dados foram ajustados na mesma grade de 2,5 graus que a grade dos dados ISCCP. São dados mensais no período de 1945 a 1993. Foi escolhido o período comum entre os dois conjuntos de dados: 10 anos de 1984 a 1993. Neste estudo fluxos de calor positivos significam uma troca de calor do oceano para a atmosfera. A climatologia do fluxo de calor latente nos meses FMAM (Fig. 1b) mostra valores fortes de fluxo dos dois lados da ZCIT. Nessas regiões os ventos alísios são fortes, e a cobertura de nuvens relativamente fraca contribui para o aumento da radiação solar atingindo a superfície. Mas pode-se notar que os máximos de fluxo de calor latente não coincidem exatamente com as regiões de mínimo de cobertura. Isso sugere que o vento é um parâmetro essencial na modulação da intensidade dos fluxos. Pode-se notar também que os valores máximos no Atlântico tropical norte (até 160 W/m²) são maiores que no Atlântico tropical sul.

Vento

Os gráficos da Figura 1 e da seção de resultados representam também o vento no nível 925 hPa nos meses FMAM, oriundo das reanálises mensais do NCEP (Kalnay et al., 1996). Esse campo de vento é utilizado para definir a posição da ZCIT como a linha onde a componente meridional do vento é igual a zero. Esses dados de vento são utilizados para realizar a interpretação dos resultados.

Método de cálculo

Para analisar as relações entre o fluxo de calor latente e a cobertura de nuvens, foram calculadas correlações entre as anomalias normalizadas (pelo desvio padrão) do fluxo de calor latente e o índice de cobertura convectiva do NEB já definido. Dois tipos de correlações são calculadas: sem *lag* e com um mês de *lag*. Quando fala-se de correlações com um *lag* de um mês, isso significa que o fluxo de calor

latente é considerado primeiro com relação à cobertura convectiva. Para as correlações sem *lag*, as duas series de anomalias são constituídas dos valores mensais individuais dos meses de fevereiro a maio para cada ano do período 1984-1993 (i. e. 40 valores). Para as correlações com um *lag* de um mês, a serie de índice de convecção é constituída de novo dos valores de fevereiro a maio, enquanto a série de fluxo de calor é constituída agora dos valores de janeiro a abril. Para verificar quais correlações são significativas aplicou-se o teste t-Student que apresentou o seguinte resultado: com as séries de 40 valores (40 meses), as correlações acima de 0,31 são significativas a 95%.

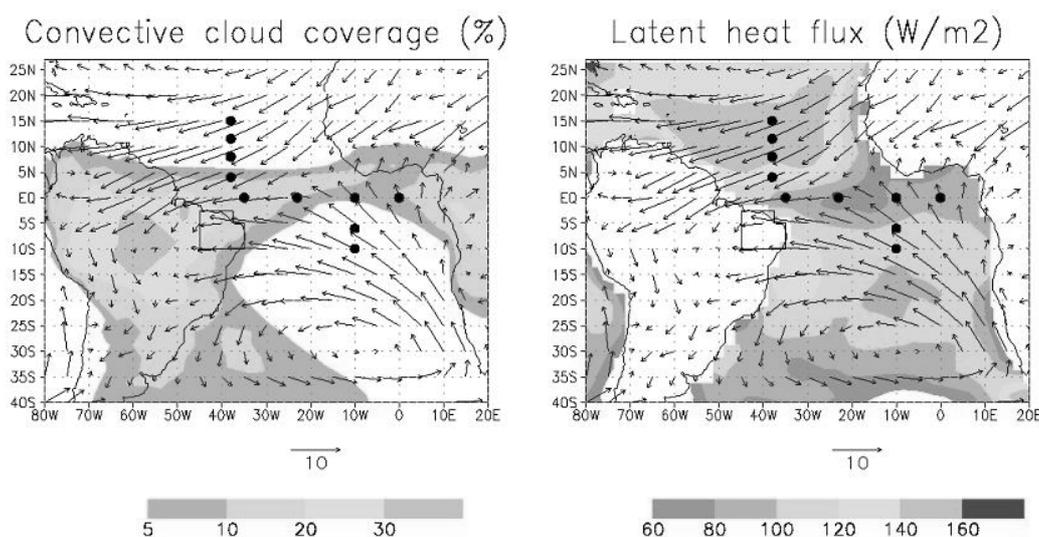


Figura 1: Climatologias nos meses de Fevereiro a Maio (1984-1993) (a) da cobertura de nuvens convectivas, (b) do fluxo de calor latente. O polígono preto define o NEB, e os pontos pretos localizam as bóias PIRATA. O vento a 925 hPa (climatologia dos meses FMAM) é também representado.

RESULTADOS

A figura 2 mostra mapas de correlações (a) em fase, e (b) com um mês de *lag*, entre as anomalias de fluxo de calor latente do oceano Atlântico tropical inteiro, e as anomalias da cobertura de nuvens do NEB, durante a estação chuvosa. Nesses mapas, somente as correlações significativas a 95% são coloridas.

Esses mapas ajudam a determinar quais regiões do Atlântico tropical são ligadas (com respeito ao fluxo de calor latente) à variabilidade da cobertura de nuvens convectivas do NEB. A correlação em fase (Fig. 2a) mostra um padrão de correlação positiva no atlântico tropical noroeste com um máximo (maior que 0,6) nos arredores de 15°N-38°W onde uma bóia PIRATA está localizada. A correlação diminui nas regiões perto da costa norte da América do Sul. Observa-se também uma forte correlação

negativa (até $-0,5$) perto da costa leste do NEB, na região entre 2°S and 12°S , e entre a costa brasileira e 30°W . Essas correlações positiva e negativa formam um padrão do tipo do dipolo, embora bastante diferente do dipolo de TSM já conhecido (por exemplo Servain, 1991). Neste caso a parte norte tem uma extensão espacial bem maior do que a parte sul, que está confinada perto da costa leste do NEB.

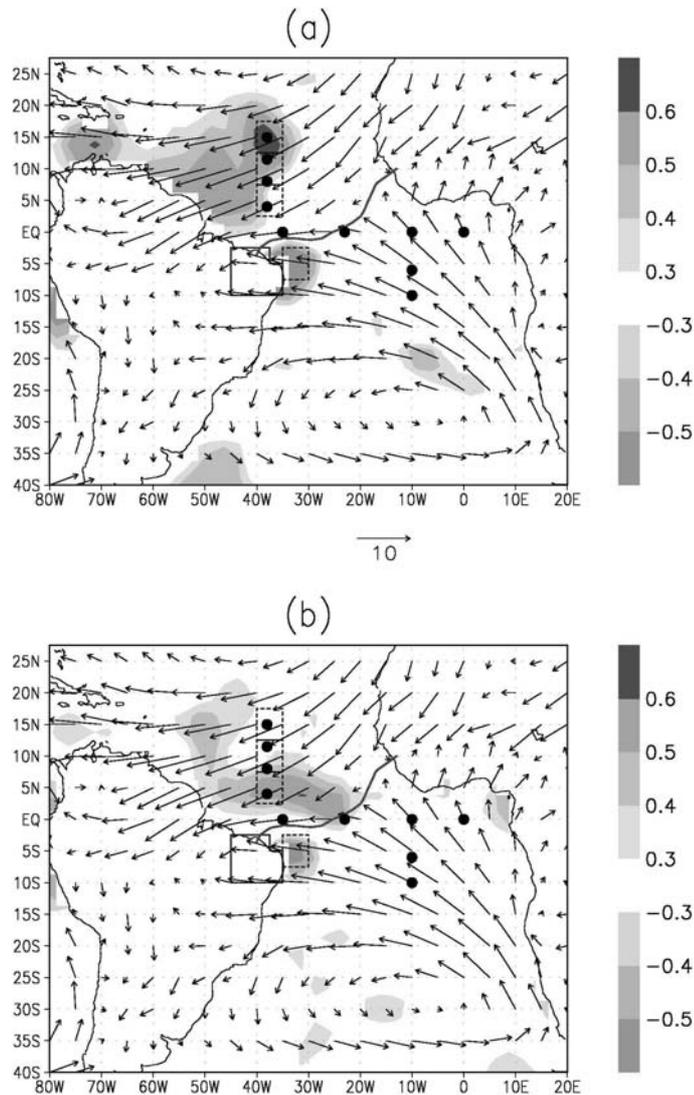


Figura 2: (a) Correlações das anomalias da cobertura de nuvens convectivas do NEB com as anomalias de fluxo de calor latente no Atlântico tropical, para os meses FMAM de 1984-1993; (b) idem com a cobertura de nuvens convectivas nos meses de FMAM e o fluxo de calor do Atlântico tropical nos meses de JFMA (*lag* de um mês). O vento a 925hPa (climatologia dos meses FMAM) e a posição média da ZCIT (linha azul) para os meses FMAM são também representados.

No mapa de correlações com um mês de *lag* (Fig. 2b), observa-se também dois padrões de correlações fortes, um positivo no Atlântico tropical norte, e o outro negativo perto da costa leste do NEB. A respeito da correlação positiva, os valores calculados ficam menores do que no caso em fase, embora tenha ainda vários valores entre 0,5 e 0,6. Mas a extensão espacial da área de forte correlação é menor que no caso em fase, e localizada mais ao sul (ao longo de 5°N). Da mesma maneira que no caso sem *lag*, observa-se uma forte correlação negativa perto da costa leste do NEB. O fato que os padrões de correlação em fase estejam coerentes com os padrões de correlação com um *lag* de um mês, incentiva a investigar as possibilidades de aplicações de previsão.

Para entender melhor esses padrões de correlação foram calculadas as anomalias do campo de vento durante os meses FMAM. Dos 10 anos estudados aqui, cinco são caracterizados por uma anomalia positiva da cobertura convectiva do NEB (1984, 85, 86, 88 e 89), e os outros cinco (1987, 90, 91, 92 e 93) apresentam uma anomalia negativa. A figura 3 mostra as anomalias compostas do vento a 925 hPa para essas duas categorias, e a posição média da ZCIT.

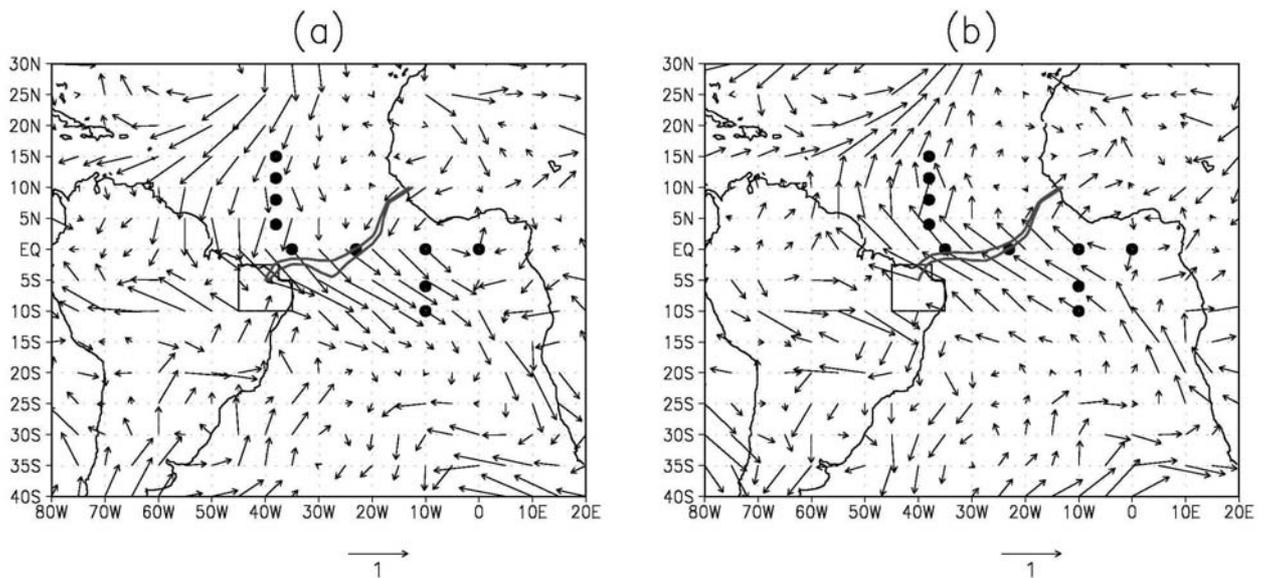


Figura 3: Anomalias compostas do vento a 925hPa (m/s) para os meses FMAM dos anos (a) 1984, 85, 86, 88 e 89; and (b) 1987, 90, 91, 92 e 93. A linha azul indica a posição média da ZCIT nos meses de FMAM dos cinco anos considerados; a linha vermelha mostra a posição média da ZCIT nos meses FMAM dos dez anos 1984-1993.

Os anos caracterizados por anomalia positiva -(a)- (negativa -(b)-) da cobertura de nuvens convectivas do NEB são caracterizados por ventos alísios mais intensos (fracos) no hemisfério norte, e ventos alísios mais fracos (intensos) no hemisfério sul. Essas anomalias no campo de vento são associadas a um deslocamento ao sul (ao norte) da ZCIT. Isso é coerente com os resultados obtidos por Hastenrath e Heller (1977), mostrando que anos chuvosos (secos) no NEB são caracterizados por uma posição da ZCIT mais ao sul (ao norte) do que sua posição climatológica. Durante os anos de anomalia positiva (negativa) de cobertura convectiva (Fig. 3a e 3b, respectivamente), ventos alísios mais intensos (fracos) no hemisfério norte implicam uma anomalia positiva (negativa) do fluxo de calor latente nessa região, e ventos alísios mais fracos (intensos) no sul implicam uma anomalia negativa (positiva) de fluxo de calor latente nessa região. Isso justifica a presença do padrão de correlação positiva no Atlântico tropical noroeste, e o padrão de correlação negativa perto da costa leste do NEB.

O vento médio do Atlântico tropical noroeste (Fig 2), e conseqüentemente o fluxo horizontal de umidade dessa região, não está alimentando a convecção sobre o NEB diretamente, mas dirige-se em direção a regiões ao noroeste do NEB. Assim o padrão de correlação positiva não caracteriza uma relação causal. Há uma ligação indireta através de uma modificação da circulação atmosférica, que precisa ser estudada em estudos futuros.

CONCLUSÃO

Os resultados principais deste estudo são padrões de correlação entre as anomalias do fluxo de calor latente e as anomalias da cobertura convectiva sobre o Nordeste. A forte correlação positiva obtida no Atlântico tropical norte indica a pertinência da posição das bóias PIRATA ao longo de 38°W para esse tipo de estudo. Essas bóias poderiam fornecer informações importantes para serem utilizadas em experiências de previsões. A correlação com *lag* de um mês mostra a potencialidade de aplicações de previsão, e a disponibilidade dos dados PIRATA em tempo real fornece uma grande vantagem para isso.

A importância da variabilidade do fluxo de calor latente no Atlântico tropical noroeste foi confirmada, e o peso do Atlântico tropical sul parece limitado à região oceânica próxima da costa leste do NEB. Esses resultados obtidos nos meses FMAM deverão ser também comparados com estudos realizados na estação chuvosa da região litorânea leste do NEB (de abril a agosto).

Estudos futuros ou já iniciados utilizarão dados com uma resolução temporal mais fina, semanal por exemplo, pois essa escala de tempo parece mais adequada ao transporte horizontal de umidade do Atlântico tropical ao NEB. Estudos mais finos de *lag* serão então realizados, e incluirão fluxos estimados com as bóias PIRATA.

REFERÊNCIAS

- da Silva, A. M., C. C. Young, and S. Levitus, 1994: Algorithms and Procedures. Vol.1, Atlas of Surface Marine Data, NOAA Atlas Series, 74 pp.
- Hastenrath, S. and L. Heller, 1977: Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103, 77-92.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chellah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne, and Dennis Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Kousky, V. E., 1979: Frontal Influences on Northeast Brazil. *Month. Weath. Rev.*, 107, 1140-1153.
- Moura, A. D. and J. Shukla, 1981: On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2653-2675.
- Schiffer, R. A. e Rossow, W. B., 1985: ISCCP global radiance data set: A new resource for climate research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 66, 1498-1505.
- Servain, J., 1991: Simple Climatic Indices for the Tropical Atlantic Ocean and Some Applications. *Jour. Of Geophys. Res.*, 96, 15,137-15,146.
- Servain, J., A. J. Busalacchi, M. J. McPhaden, A. D. Moura, G. Reverdin, M. Viana, S. E. Zebiak, 1998: A Pilot Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2019-2031.
- Servain, J., I. Wainer, L. H. Ayina, and H. Roquet, 2000: Relationship between the simulated climatic variability modes of the tropical Atlantic, *Int. J. Climatol.*, 20, 939-953.
- Strang, D. M. G. D., 1972: Climatological analysis of rainfall normals in Northeast Brazil – IAE-MO2/72 (available from C.T.A., São José dos Campos, SP, Brasil)
- Tao, W. K., and J. Simpson, 1991: Numerical simulation of a subtropical squall line over Taiwan Strait. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 2699-2723.
- Wang, Y., W.-K. Tao, J. Simpson, 1996: The Impact of Ocean Surface Fluxes on a TOGA COARE Convective System. *Monthly Weather Review*, 124, 2753-2763.
- Webster, J., and R. Lukas, 1992: TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1377-1416.