

Artigo

Tendências de Índices de Extremos Climáticos para o Estado do Amazonas e suas Relações com a TSM dos Oceanos Tropicais

Carlos Antonio Costa dos Santos, Maria Monalisa M. S. Melo, JoséIVALDO Barbosa de Brito
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Recebido: 1/7/2013 – Aceito: 13/5/2015

Resumo

Esse estudo teve como objetivo principal analisar as tendências de onze índices de extremos climáticos dependentes da precipitação diária para o Estado do Amazonas, dividindo-o em quatro mesorregiões, bem como, analisar suas relações com as anomalias de TSM nos Oceanos Pacífico (ENOS) e Atlântico (Dipolo do Atlântico). Os dados de precipitação pluviométrica diários, para o período de 1970-2010, foram oriundos do INMET. Dados das anomalias mensais de TSM dos Oceanos Tropicais foram obtidos do CPC/NOAA. Os resultados obtidos mostram que em todo Estado do Amazonas não é possível afirmar categoricamente que ocorreu aumento ou diminuição dos índices extremos de precipitação nas últimas décadas. Além disso, identificou-se que as TSM dos Oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical apresentaram correlações estatisticamente significativas com os índices de extremo de precipitação. Portanto, é possível afirmar que a anomalia de TSM destas áreas tem influência nos índices de precipitação do Estado do Amazonas.

Palavras chave: mudanças climáticas, aquecimento global, precipitação, Amazônia ocidental.

Trends in Climate Extremes Indices for the State of Amazonas and its Relationship with SST of Tropical Oceans

Abstract

This study aimed to analyze the trends of eleven indices of climate extremes depend on daily precipitation for the state of Amazonas, dividing it into four mesoregions, as well as, to evaluate its relationship with SST anomalies in the Pacific (ENSO) and Atlantic (Atlantic Dipole) Oceans. The daily rainfall data for the period 1970-2010 were derived from INMET. Data of monthly anomalies of SST in the Tropical Oceans were obtained from CPC/NOAA. The results show that in the state of Amazonas is not possible to affirm categorically that there was an increase or decrease of extreme precipitation events in recent decades. Furthermore, it was found that the SST in the equatorial Pacific and Atlantic Tropical Oceans showed statistically significant correlations with indices of extreme precipitation. Thus, it is possible states that SST anomaly in these areas has an influence on precipitation rates in the state of Amazonas.

Keywords: climate change, global warming, precipitation, western Amazon.

1. Introdução

Eventos climáticos extremos podem ocorrer de muitas formas diferentes, por exemplo, como inundações, secas prolongadas e ondas de calor. Durante muitos séculos, a humanidade tem desenvolvido uma boa compreensão da frequência de eventos climáticos extremos e as localizações geográficas onde eles são mais prováveis de acontecer. Os eventos extremos de tempo e clima têm atraído muito a atenção nos últimos anos, devido aos seus potenciais impactos na vida humana, economia social e ecossistemas

naturais (Jiang *et al.*, 2011). Os impactos das mudanças climáticas são sentidos mais fortemente através das variações de extremos. O IPCC (2013) mostra que muitos estudos regionais têm analisado as mudanças nos extremos climáticos e têm, geralmente, identificado que as temperaturas mínimas têm aumentado mais rápido do que às máximas.

A precipitação está entre as variáveis climáticas mais relevantes, principalmente nos trópicos, e, investigar o comportamento dos extremos de chuva em escala regional

é altamente relevante e significativo. Easterling *et al.* (2000) evidenciam que estudos recentes têm mostrado que eventos de precipitação intensa têm aumentado sobre diferentes partes do mundo, tais como: Estados Unidos, China, Austrália, Japão, Noruega, África do Sul, Canadá, enquanto que os eventos de seca também têm aumentado em algumas regiões com destaque para China, Japão, Etiópia e Tailândia.

Marengo (2009) afirma que estudos de longo-prazo sobre tendências e mudanças climáticas na América do Sul são poucos devido à escassez de dados climáticos e hidrológicos. A bacia amazônica tem experimentado crescente aumento nas mudanças de uso e ocupação do solo ao longo dos anos e, suas possíveis consequências no clima regional e global têm motivado uma série de experimentos. Entretanto, segundo Marengo (2009) nenhum sinal de tendência sistemática de longo prazo tem sido detectado nos dados de precipitação na referida bacia hidrográfica.

Santos *et al.* (2012) indicam que um possível aquecimento global trará sérios impactos para a Amazônia e, conforme evidenciado por Fearnside (2009), a manutenção da floresta amazônica oferece uma das opções mais valiosas e de baixo custo para mitigar as mudanças climáticas. Outros fatores que podem trazer impactos sobre a Amazônia tais como secas, cheias dos rios e incêndios florestais, são as oscilações da temperatura dos oceanos tropicais. O entendimento do comportamento das Temperaturas da Superfície do Mar (TSMs) nos trópicos é muito importante devido à atmosfera ser sensível às condições das superfícies continental e oceânica, que tem uma forte influência na variabilidade do clima regional (Yoon e Zeng, 2010). As referidas oscilações dão origem ao fenômeno de El Niño - Oscilação Sul (ENOS) (Kousky *et al.*, 1984), causado por variações da TSM no Oceano Pacífico Equatorial, e ao Dipolo do Atlântico, oriundo das oscilações de TSM no Oceano Atlântico Tropical (Ronchail *et al.*, 2005). A água reciclada pela floresta fornece parte da chuva que mantém as condições climáticas apropriadas para floresta tropical, especialmente durante a estação seca (Fearnside, 2009; Yoon e Zeng, 2010).

De acordo com Chen (1985) a precipitação sobre a região tropical da América do Sul não é mantida somente pela evapotranspiração local, mas também pela convergência do fluxo de vapor de água atmosférico de grande escala, controlada pela circulação atmosférica tropical. Movimento ascendente sobre a América do Sul Tropical constitui uma parte importante na circulação de Walker e exerce o papel de uma conexão da atmosfera com o Oceano Pacífico tropical central (Kousky *et al.*, 1984). A depender do comportamento das TSMs dessa região do Oceano Pacífico, haverá aumento ou redução das precipitações sobre a região tropical da América do Sul. Também, tem sido documentado que o comportamento das TSM das partes sul e norte do Oceano Atlântico exerce um importante papel na

variabilidade do balanço hídrico da região tropical da América do Sul (Uvo *et al.*, 2000).

Sabe-se também, que um possível aquecimento global tem potencial de causar altas taxas de evaporação e intensificar o transporte de grandes quantidades de vapor de água na atmosfera, provavelmente acelerando o ciclo hidrológico global (Zhang *et al.*, 2010). Shouraseni e Robert (2004) apontam que uma das mais significativas consequências do aquecimento global poderá ser um aumento na magnitude e frequência dos extremos de precipitação através do acréscimo dos níveis de umidade na atmosfera e/ou atividades convectivas de grande escala.

O Estado do Amazonas é o maior em área territorial do País, com 1.559.161,682 km², detém um dos mais baixos índices de densidade demográfica do país, com 2,23 hab./km² (IBGE, 2013). A população do Estado é de 3.483,985 habitantes, dos quais 2.755.490 vivem na área urbana e 728.495 na área rural (IBGE, 2013). Moraes *et al.* (2005) afirmam que a produção agrícola na Região amazônica é controlada principalmente pela quantidade e distribuição de chuva, dado que as características do regime de chuva afetam as variações na temperatura e umidade do ar, nebulosidade e quantidade de radiação incidente à superfície. Portanto, no Estado do Amazonas, a prática da agricultura familiar é dependente basicamente do regime de precipitação e, o conhecimento, não apenas da quantidade do total anual de chuva, mas também da sua distribuição ao longo do ano, a variabilidade e os eventos extremos é de grande importância.

O objetivo desse estudo é analisar as tendências de onze índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária, definidos pela Organização Meteorológica Mundial (Zhang e Yang, 2004), para o Estado do Amazonas, dividindo-o em quatro mesorregiões, bem como, analisar suas relações com as anomalias de TSM nos Oceanos Pacífico (ENOS) e Atlântico (Dipolo do Atlântico). Os resultados esperados deste trabalho são muito importantes para o Estado do Amazonas, uma vez que mudanças no clima poderão trazer profundas influências na sociedade e causar sérios impactos ambientais.

2. Material e Métodos

Os dados de precipitação pluviométrica diários, para o período médio de 1970-2010, foram oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizados dados de treze estações meteorológicas (Tabela 1) para o Estado do Amazonas, bem distribuídas espacialmente (Figura 1a), sendo estas divididas em quatro mesorregiões, conforme definido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que são: Centro Amazonense (Coari, Codajás, Itacoatiara, Manaus e Parintins), Norte Amazonense (Barcelos, Iauaretê e São Gabriel da Cachoeira), Sudoeste Amazonense (Benjamim Constant, Eirunepé e Fonte Boa) e Sul Amazonense (Lábrea e Manicoré) (Figura 1b). A escolha em dividir por mesorregiões deveu-se ao

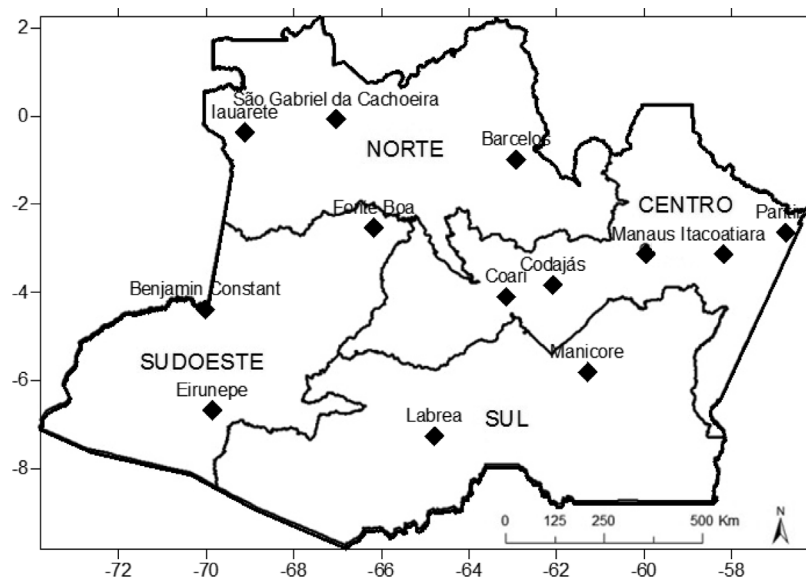
Tabela 1 - Descrição e coordenadas geográficas das 13 localidades estudadas no Estado do Amazonas.

Localidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período
Barcelos	-0,58	-62,55	40	1970-2010
Benjamin Constant	-4,22	-70,01	65	1970-2010
Coari	-4,1	-63,15	46	1970-2010
Codajás	-3,83	-62,08	48	1976-2010
Eirunepé	-6,4	-69,52	104	1974-2010
Fonte Boa	-2,53	-66,17	56	1970-2010
Itacoatiara	-3,07	-58,28	40	1971-2010
Iauaretê	-0,37	-69,12	120	1970-2010
Lábrea	-7,15	-64,5	61	1973-2010
Manaus	-3,08	-59,58	61	1970-2010
Manicoré	-5,49	-61,17	50	1970-2010
Parintins	-2,4	-56,47	29	1970-2010
São Gabriel da Cachoeira	-0,07	-67,04	90	1970-2010

fato do Amazonas ser o Estado com maior área territorial do Brasil, o que dificultaria na interpretação das correlações entre os índices de extremos de precipitação e as anomalias de TSM dos Oceanos Tropicais. Sendo assim, foram observadas as estações que se localizavam dentro de cada Mesorregião (Figura 1) e extraída uma média representativa dos índices da mesma. Dados das anomalias mensais de TSM nas regiões dos Oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical foram obtidos do *site* eletrônico do Climate Prediction Center (CPC) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>).

Os nove índices de extremos climáticos derivados de dados de precipitação diária, utilizados nessa pesquisa, foram: 1) Rx1 dia (precipitação máxima em 1 dia - mm/dia); 2) Rx5 dia (precipitação máxima em 5 dias consecutivos - mm/5 dias); 3) R20mm (número de dias em um ano com precipitação ≥ 20 mm/dia); 4) R50mm (número de dias em um ano com precipitação ≥ 50 mm/dia); 5) DCS (máximo número de dias consecutivos secos, ou seja, com precipitação total diária (PRCP) $< 1,0$ mm/dia); 6) DCU (máximo número de dias consecutivos úmidos, ou seja, com PRCP $\geq 1,0$ mm/dia); 7) R95p (dias muito úmidos, soma da PRCP em um ano, quando PRCP $> 95p$ - mm/ano); 8) R99p (dias extremamente úmidos, soma da PRCP em um ano, quando PRCP $> 99p$ - mm/ano) e 9) PRCPTOT (precipitação total anual, quando PRCP $\geq 1,0$ mm - mm/ano). Na avaliação da homogeneização dos dados e no cálculo dos índices foi utilizada a metodologia de Zhang *et al.* (2005). O controle de qualidade, que é um pré-requisito para a obtenção dos índices de extremos climáticos, consistiu na identificação de erros nos dados, conforme proposto por Alexander *et al.* (2006) e descrito por Viney e Bates (2004). O software utilizado foi o RCLimindex, que obedece os seguintes procedimentos: 1) substitui todos os dados faltosos (codificados como -99,9) em um formato interno reconhecido pelo R e 2) substitui todas as quantidades de precipitação diárias menores que zero por -99,9. Após esse procedimento, foi observado que nenhuma das estações foi reprovada no controle de qualidade, ou seja, nenhuma das séries temporais apresentou mais do que 5% de dados faltantes.

Resultados estatísticos, para todos os índices, são fornecidos pelo software, tais como: tendência linear anual calculada pelo método de mínimos quadrados; nível de significância estatística da tendência (valor p); coeficiente

**Figura 1** - Distribuição espacial das 13 localidades estudadas e das 4 Mesorregiões no Estado do Amazonas.

de determinação (r^2) e erro padrão de estimativa; assim como os gráficos das séries anuais. Como os dados não se ajustaram a uma distribuição de frequência normal, foi utilizado o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (Sneyers, 1990) para identificar se as tendências apresentam nível de significância para o intervalo definido. Nesse estudo só foram consideradas significativas às tendências, que apresentam nível de significância igual ou superior a 90% ($p \leq 0,1$), conforme mostrado na Tabela 2.

O método de correlação de Pearson foi utilizado na análise das relações existentes entre as anomalias anuais de TSM dos Oceanos Pacífico, regiões de Niño 1+2 (0-10S, 90W-80W), Niño 3 (5N-5S,150W-90W), Niño 3.4 (5N-5S,170-120W) e Niño 4 (5N-5S,160E-150W) e Atlântico, TNAI (5.5N-23,5N, 15W-57,5W) e TSAI (Equador-20S, 10E-30W) (Menezes *et al.*, 2008), no período de 1970 a 2010, e os índices de extremos climáticos anuais obtidos para as diferentes mesorregiões do Estado do Amazonas. Os índices foram correlacionados individualmente com a anomalia de TSM de cada área estudada e as correlações, com significância estatística ao nível de 95%, estão apresentadas nas Tabelas 3 a 6. A significância estatística foi obtida através do teste *t-Student* aplicada a uma série que apresenta graus de liberdade (N) igual a 41, correspondentes aos 41 anos da série histórica de dados analisados.

3. Resultados e Discussão

Os valores das tendências anuais dos índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial estão apresentados na Tabela 2, correspondentes às treze localidades estudadas. Os valores marcados com duas estrelas apresentaram alta significância estatística ($p \leq 0,05$) e os

Tabela 3 - Correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Centro Amazônico e as anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Índices	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	TNAI	TSAI
Rx1dia	-0,12	-0,31	-0,32	-0,30	-0,18	0,24
Rx5dias	-0,08	-0,11	-0,10	-0,05	-0,05	0,35
R20mm	-0,19	-0,28	-0,30	-0,27	-0,16	0,48*
R50mm	-0,11	-0,25	-0,29	-0,30	-0,17	0,43*
DCS	0,37*	0,52*	0,46*	0,34*	0,11	-0,42*
DCU	-0,16	-0,16	-0,12	-0,10	-0,15	0,24
R95p	-0,18	-0,34*	-0,38*	-0,37*	-0,21	0,37*
R99p	-0,19	-0,33*	-0,36*	-0,38*	-0,35*	0,32*
PRCPTOT	-0,26	-0,38*	-0,39*	-0,34*	-0,19	0,54*

* Estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).

com uma apresentaram boa significância estatística ($0,05 < p \leq 0,1$). Analisando a Tabela 2, observa-se que para o índice Rx1dia apenas 3 localidades apresentaram tendências com significância estatística, sendo duas (Iauaretê e Parintins) com tendências de aumento e uma (Coari) de redução da intensidade das precipitações em um único dia no ano. Para o índice Rx5dias apenas 1 localidade (Parintins) mostrou tendência estatisticamente significativa de aumento no total de precipitação em 5 dias consecutivos. Em relação ao índice R20mm, a localidade de Parintins, também apresenta tendência de aumento, isto é, verificou-se que o número de dias em um ano com chuvas de intensidades superiores a 20 mm/dia no município tem aumentado. Enquanto, em Iauaretê e Lábrea observou-se tendências de redução do número de dias no ano com precipitações superiores a 20 mm, contrastando com a

Tabela 2 - Tendências anuais dos índices de extremos de precipitação para o estado do Amazonas para o período de 1970 a 2010.

Localidade	Rx1dia (mm)	Rx5dias (mm)	R20mm (dias)	R50mm (dias)	DCS (dias)	DCU (dias)	R95p (mm)	R99p (mm)	PRCPTOT (mm)
Barcelos	0,67	0,06	-0,12	-0,03	0,00	0,06	-1,23	3,18	-3,61
B. Constant	0,31	1,23	0,11	-0,01	0,12**	0,05	-0,57	0,82	-1,03
Coari	-0,87*	-0,10	0,05	0,02	0,17	-0,07	-1,07	-6,51*	1,69
Codajás	-0,54	-0,42	-0,07	0,05	0,03	-0,07	0,02	-5,04	-4,09
Eirunepé	0,57	0,68	-0,03	0,08	0,08	0,00	7,48	2,18	2,81
Fonte Boa	0,24	0,00	-0,11	-0,07	-0,01	-0,05	-4,72	-1,39	-6,42
Itacoatiara	-0,69	0,42	-0,03	-0,03	0,32*	0,03	-3,07	-3,46	-3,42
Iauaretê	1,06*	-0,79	-1,23**	-0,05	-0,17**	0,16*	-2,29	-1,93	-24,62*
Lábrea	0,08	-0,65	-0,43**	-0,05	0,05	-0,04	-4,41	-4,06	-15,24**
Manaus	0,52	1,20	0,10	0,07	-0,15	0,01	5,26	1,41	6,00
Manicoré	0,08	-0,40	-0,15	-0,08	0,17	0,00	-5,31	-1,40	-8,81
Parintins	0,81*	1,43*	0,32**	0,06	0,26*	0,03	5,91	4,16*	11,71
S. G. da Cachoeira	-0,28	-0,38	0,11	0,05	-0,02	-0,04	2,03	0,01	4,27

* Estatisticamente significativo ao nível de 10% ($p \leq 0,1$).

** Estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).

Tabela 4 - Correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Norte Amazonense e as anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Índices	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	TNAI	TSAI
Rx1dia	0,08	0,11	0,13	0,13	-0,02	0,09
Rx5dias	0,03	-0,08	-0,16	-0,23	-0,28	-0,19
R20mm	-0,27	-0,39*	-0,44*	-0,47*	-0,38*	-0,25
R50mm	-0,19	-0,22	-0,21	-0,16	-0,11	0,00
DCS	0,11	0,04	0,00	-0,01	0,03	-0,13
DCU	0,01	-0,10	-0,19	-0,17	0,17	-0,02
R95p	-0,21	-0,24	-0,22	-0,17	-0,11	-0,03
R99p	-0,01	0,04	0,07	0,10	0,09	-0,06
PRCPTOT	-0,18	-0,28	-0,34*	-0,38*	-0,37*	-0,22

* Estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).

Tabela 5 - Correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Sudoeste Amazonense e as anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Índices	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	TNAI	TSAI
Rx1dia	0,01	-0,12	-0,23	-0,26	0,08	0,34*
Rx5dias	-0,05	-0,15	-0,25	-0,28	0,12	0,26
R20mm	-0,21	-0,24	-0,29	-0,33*	-0,09	0,18
R50mm	-0,08	-0,19	-0,30	-0,36*	0,06	0,18
DCS	-0,04	-0,08	-0,07	0,05	0,44*	0,23
DCU	-0,15	-0,13	-0,08	0,00	0,09	-0,20
R95p	-0,02	-0,14	-0,26	-0,36*	-0,02	0,04
R99p	-0,18	-0,26	-0,35*	-0,35*	0,11	0,19
PRCPTOT	-0,18	-0,22	-0,29	-0,34*	-0,20	0,13

* Estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).

Tabela 6 - Correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Sul Amazonense e as anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico.

Índices	Niño 1+2	Niño 3	Niño 3.4	Niño 4	TNAI	TSAI
Rx1dia	-0,17	-0,15	-0,06	0,00	-0,17	0,22
Rx5dias	-0,36	-0,26	-0,15	-0,10	-0,24	-0,01
R20mm	-0,56*	-0,57*	-0,46*	-0,41*	-0,55*	0,08
R50mm	-0,42*	-0,41*	-0,36	-0,32	-0,31	-0,08
DCS	0,13	0,13	0,18	0,26	0,51*	0,04
DCU	-0,36	-0,33	-0,32	-0,31	-0,28	-0,29
R95p	-0,37	-0,38	-0,36	-0,34	-0,27	-0,16
R99p	-0,12	-0,15	-0,07	-0,04	-0,18	0,24
PRCPTOT	-0,50*	-0,51*	-0,45*	-0,42*	-0,43*	-0,11

* Estatisticamente significativo ao nível de 5% ($p \leq 0,05$).

apresentada para Parintins. O índice R50mm, que representa o número de dias anuais com precipitação superior a 50 mm, não apresentou tendências com significância esta-

tística para nenhuma das localidades estudadas, além disso, das 13 localidades analisadas, 6 demonstraram tendências de redução e 7 de aumento no referido índice. Os resultados apresentados acima estão em concordância com os encontrados por Haylock *et al.* (2006), que estudando índices de extremos de precipitação sobre a América do Sul e suas conexões com a TSM, observaram que a porção norte do Brasil não apresenta consistência nos sinais das tendências dos índices extremos de precipitação. Santos *et al.* (2012), estudando índices de extremos de precipitação sobre a parte norte do Brasil com dados de reanálises do ERA-40, encontraram tendências positivas para os índices descritos acima sobre o estado do Amazonas, no entanto, a maior parte das tendências nos pontos de grades sobre a região não apresentou significância estatística.

O número máximo de dias consecutivos secos em um ano, representados pelo índice DCS, mostrou tendências de aumento em 3 localidades (Benjamim Constant, Itacoatiara e Parintins) e de redução em 1 (Iauaretê). Comparando os resultados apresentados pelas localidades Iauaretê e Parintins com os dos demais índices descritos anteriormente, é possível identificar que em Iauaretê as chuvas têm sido bem distribuídas ao longo dos meses, mas suas intensidades têm sido moderadas, haja vista que o índice R20mm tem mostrado decréscimo para a região. No entanto, para Parintins, as chuvas têm se intensificado, conforme observado nos índices Rx1dia, Rx5dias e R20mm, mas têm se concentrado em um período mais curto, pois o número de dias consecutivos secos no ano tem mostrado tendência de aumento com significância estatística. Para o índice DCU, apenas Iauaretê apresentou tendência com significância estatística. A tendência de aumento do número de dias consecutivos úmidos sobre a região concorda com o comportamento dos demais índices já discutidos anteriormente. Os resultados descritos acima discordam daqueles apresentados por Santos *et al.* (2012), que encontraram predominante tendência de redução dos índices DCS e DCU.

O índice R95p não demonstrou tendência com significância estatística e, para o índice R99p apenas 2 localidades (Coari e Parintins), mais uma vez é observado aumento dos eventos extremos de precipitação sobre a região de Parintins conforme já evidenciado nos demais índices. A precipitação total anual, representada pelo índice PRCPTOT, mostrou tendências de redução da precipitação para Iauaretê (24,62 mm/ano) e Lábrea (15,24 mm/ano). É importante ressaltar que de todas as localidades estudadas Iauaretê foi a que apresentou maior tendência de redução da precipitação total anual. De maneira geral, evidencia-se que os índices apontam para uma diminuição dos dias úmidos (R95p) e da precipitação total anual (PRCPTOT), mesmo não apresentando muitas localidades com significância estatística nas suas tendências, ou seja, os resultados demonstram aumento na intensidade das secas e diminuição dos eventos fortes de precipitação sobre o Estado do Amazonas. Esses resultados diferem dos encontrados por Santos

et al. (2012), pois os mesmos observaram tendência de aumento da precipitação sobre a região estudada. Entretanto, vale salientar que Santos *et al.* (2012) utilizaram dados de reanálises do ERA-40, enquanto esse estudo se baseia em dados provenientes de estações meteorológicas.

Baseado nas tendências descritas na Tabela 2 foi possível obter a configuração espacial das referidas tendências para todo o estado do Amazonas. A Figura 2a apresenta a distribuição espacial das tendências do índice Rx1dia, é possível notar que a maior parte do estado apresentou tendências de aumento, no entanto, podem ser observadas três áreas com tendências de diminuição, localizadas nas

porções norte, central e leste do Amazonas. Na Figura 2b, está descrita a distribuição espacial do Rx5dias, esse índice apresenta tendências de diminuição em quase todo o estado, com exceção das partes leste e oeste. Esses resultados são indicativos de que os eventos chuvosos tendem a ocorrerem de forma descontínua temporalmente, ou seja, observou-se tendência de aumento do total de precipitação do dia de maior precipitação no ano e diminuição do total de precipitação dos cinco dias consecutivos mais chuvosos no ano. Isto mostra que a precipitação convectiva isolada tornou-se mais intensa, provavelmente decorrente da intensificação das correntes ascendente de ar devido ao aqueci-

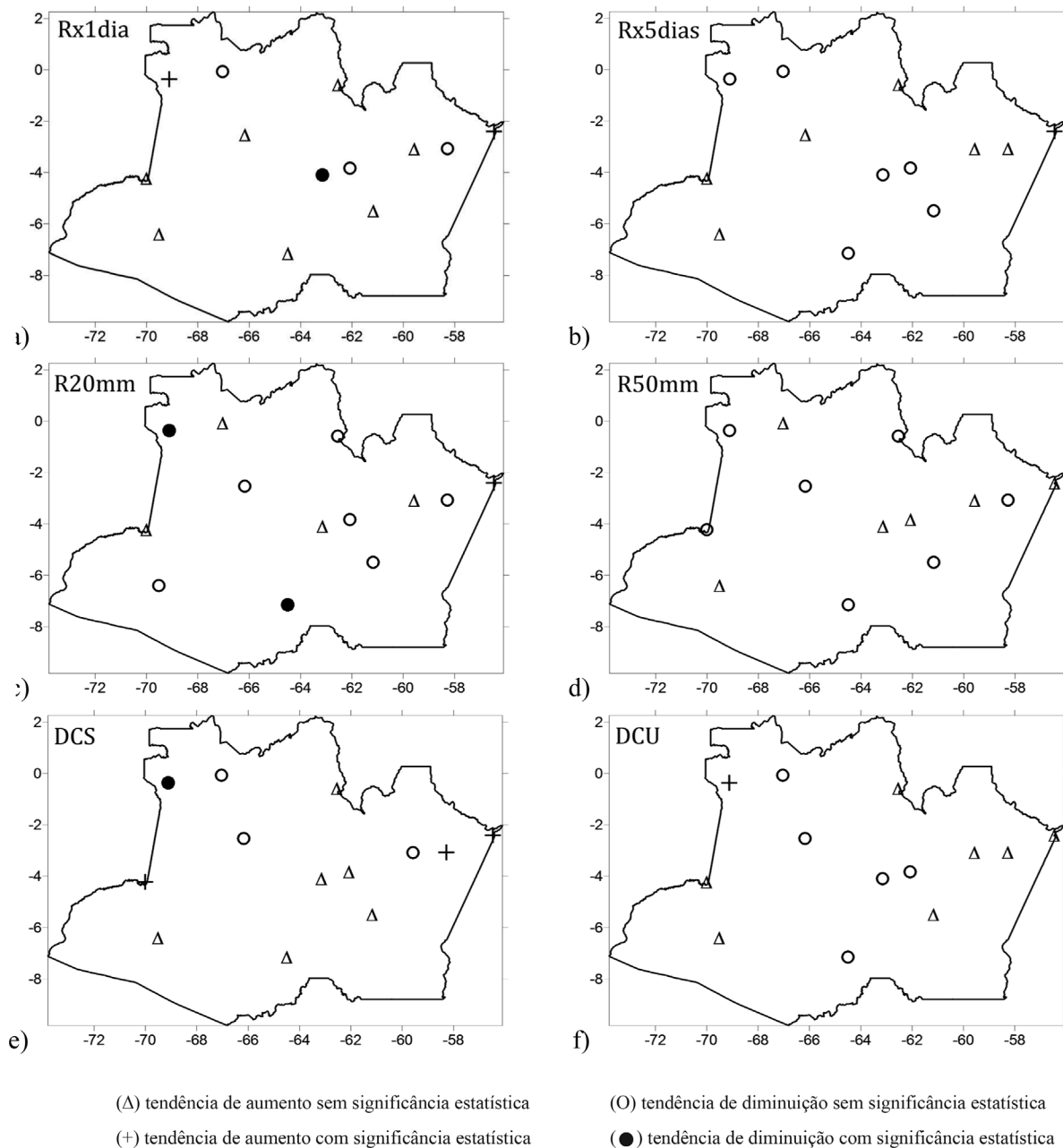


Figura 2 - Distribuição espacial das tendências dos índices de extremos climáticos baseados na precipitação diária para o Estado do Amazonas. a) Rx1dia, b) Rx5dias, c) R20mm, d) R50mm, e) DCS, f) DCU, g) R95p, h) R99p e i) PRCPTOT.

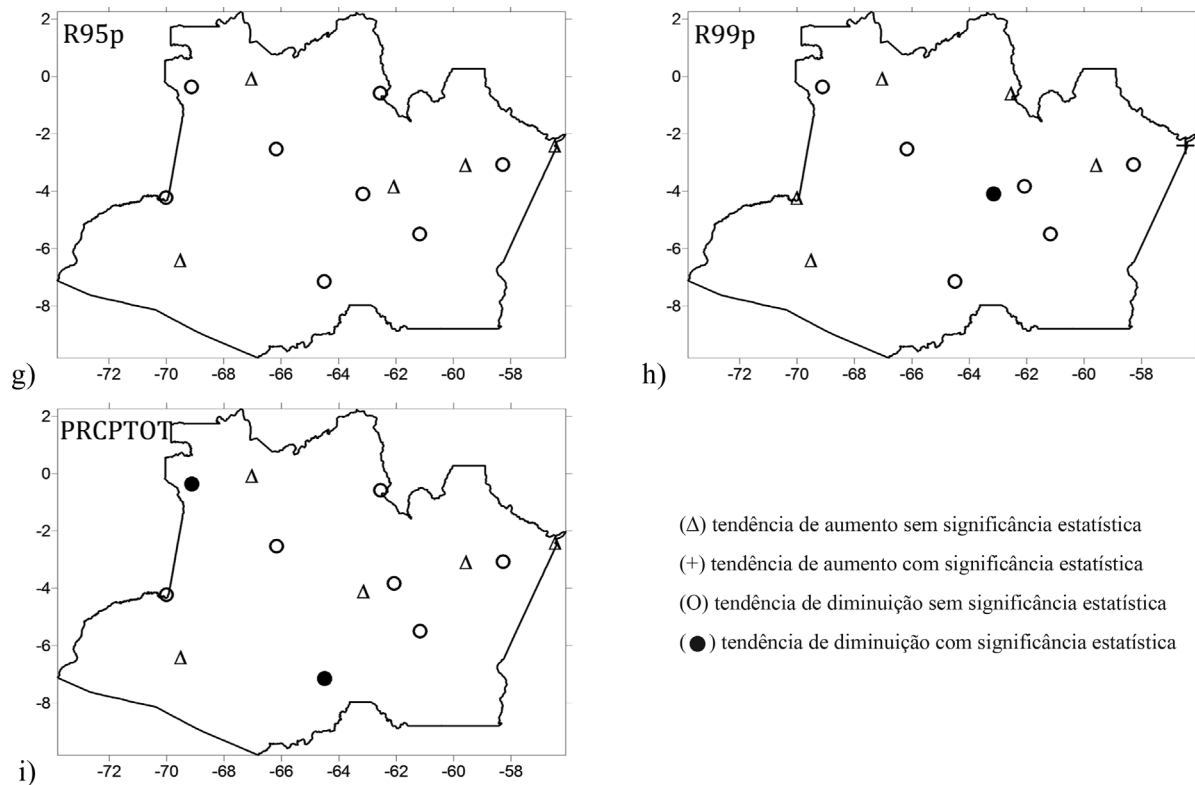


Figura 2 (cont).

mento mais intenso da superfície nas últimas décadas, conforme evidenciado pelo IPCC (2013). Enquanto, as chuvas mais intensas dos sistemas com atuação superior a um dia tornaram-se mais fracas possivelmente devido ao aumento da temperatura regional.

A espacialização do índice R20mm, evidenciada na Figura 2c, caracteriza tendências predominantemente de aumento do número de dias com precipitação iguais ou superiores a 20 mm. Os eventos mais intensos de precipitação, representados pelo número de dias em um ano com precipitações iguais ou superiores a 50 mm (Figura 2d) têm sido reduzidos, especificamente, na parte sul, central e norte do Amazonas. O número de dias consecutivos secos não apresenta um padrão claro de tendências, porém na maior parte do estado do Amazonas observou-se tendência de aumento (Figura 2e). Enquanto, na Figura 2f, pode ser observado que o número de dias consecutivos chuvosos tem sido reduzido em todo o estado. Este resultado reforça a observação do decaimento no tempo dos sistemas organizadores de precipitação com atuação contínua durante vários dias.

Os dias muito úmidos e extremamente úmidos (Figuras 2g e 2h) não demonstram um padrão bem definido, com exceção da parte central do Amazonas que demonstra redução desses índices. Na Figura 2i está descrito o padrão espacial das tendências da precipitação total anual, da referida figura é possível notar que as porções do extremo norte, assim como, o sul do estado do Amazonas têm sido

evidenciada redução da precipitação total anual. No entanto, não é possível afirmar categoricamente que essas mudanças estão ocorrendo, pois há pouca disponibilidade de dados, quando comparados às dimensões espaciais do estado. Além disso, poucas localidades apresentaram tendências dos índices com significância estatística o que pode levar a conclusões errôneas. Entretanto, devido ao grande número de índices analisados os resultados de certa forma mostram uma tendência de decaimento da precipitação, principalmente do número de dias consecutivos com chuva. Para uma conclusão mais categórica é necessário uma investigação mais profunda.

As mudanças nos padrões de precipitação na Amazônia tem sido alvo de frequentes estudos, Marengo (1992) e Marengo e Hastenrath (1993). Para Marengo *et al.* (1998) a precipitação na Amazônia apresenta variações multidecais. As condições oceânicas, principalmente as de superfície (TSM) são de grande importância para o clima global e regional. Alguns estudos apontam para a influência dos oceanos sobre as precipitações na Amazônia (Souza *et al.*, 2000; Fu *et al.*, 2001; Yoon e Zeng, 2010). Nesse contexto, houve a necessidade de averiguar a relação entre as precipitações no Estado do Amazonas e as TSMs do Atlântico e Pacífico, bem como sua relação com a atividade do ENOS. Para esse estudo, o Estado do Amazonas foi dividido em quatro mesorregiões (Mesorregião do Centro Amazonense; Mesorregião do Norte Amazonense; Mesorregião do Sudoeste Amazonense e Mesorregião do Sul Amazonense).

Todos os índices de precipitação calculados foram utilizados nas correlações com a TSM. Para isso, foram extraídas as médias dos índices de todas as estações inseridas dentro de cada Mesorregião.

A Tabela 3 apresenta as correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Centro Amazonense e as anomalias de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico. Observa-se que as anomalias de TSM no Oceano Pacífico (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4) têm correlações positivas, estatisticamente significativas, com o índice DCS indicando que anomalias positivas na TSM dessas regiões acarretam no aumento dos dias consecutivos secos sobre a Mesorregião do Centro Amazonense. Resultados similares podem ser observados para os índices R95p, R99p e PRCPTOT que apresentam correlações negativas com as anomalias das TSM no Oceano Pacífico, indicando que aumento das TSM nessas regiões implica em redução da precipitação na referida Mesorregião. Quanto às influências dos setores norte e sul do Oceano Atlântico sobre a Mesorregião do Centro Amazonense, é possível observar que o setor sul, representado pelo índice TSAI, exerce maior influência positiva na precipitação sobre a área estudada, indicando que aumento da TSM no setor sul do Oceano Atlântico acarreta no deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o Hemisfério Sul e, conseqüentemente, aumenta a ocorrência de eventos extremos de precipitação (R20mm, R50mm, R95p e R99p) levando ao aumento da precipitação total anual (PRCPTOT).

As correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação diária para a Mesorregião do Norte Amazonense e as anomalias de TSM dos Oceanos Pacífico e Atlântico estão descritas na Tabela 4. Observa-se forte correlações negativas entre o índice R20mm e as anomalias de TSM nas regiões de Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4 no Pacífico, assim como, com o setor norte do Atlântico (TNAI). Similarmente, pode ser observado para o índice PRCPTOT. Nessa Mesorregião do Estado do Amazonas os eventos de precipitação superiores a 20 mm, que contribui para o comportamento da precipitação total anual, são fortemente influenciados pelas anomalias das TSM desses Oceanos.

Os eventos extremos de precipitação sobre a Mesorregião do Sudoeste Amazonense são bastante influenciados pelo comportamento das anomalias de TSM na região de Niño 4 (Tabela 5). Identifica-se forte correlações negativas entre os índices R20mm, R50mm, R95p, R99p e PRCPTOT com o Niño 4 indicado que anomalia positiva na TSM dessa região do Pacífico reduz os eventos de precipitação intensa e a precipitação total sobre essa Mesorregião.

A Tabela 6 apresenta as correlações entre os índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial diária para a Mesorregião do Sul Amazonense e as anomalias

de TSM nos Oceanos Atlântico e Pacífico. Observa-se que as anomalias de TSM no Oceano Pacífico (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4) têm correlações negativas, estatisticamente significativas, com o índice R20mm e PRCPTOT indicando que anomalias positivas na TSM dessas regiões acarretam na redução do número de dias no ano com precipitações iguais ou superiores a 20 mm, refletindo assim na precipitação total anual sobre a Mesorregião do Sul Amazonense. Além dessa influência, identifica-se a influência negativa do setor norte do Oceano Atlântico (TNAI) sobre a referida Mesorregião, é possível observar que o TNAI exerce maiores influências negativas nos índices R20mm e PRCPTOT, assim como, influência positiva no índice DCS. Esses resultados indicam que aumento da TSM no setor norte do Oceano Atlântico acarreta no deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o Hemisfério Norte e, conseqüentemente, reduz às ocorrências de eventos extremos de precipitação (R20mm) levando a redução da precipitação total anual (PRCPTOT).

De um modo geral, é observado que as anomalias de TSM da área do Niño 4 apresenta correlações estatisticamente significativa com as precipitações das quatro Mesorregiões do estado do Amazonas. As da área do Niño 3.4 com as chuvas das mesorregiões Sul, Centro e Norte, do Niño 3 com as das Centro e Sul e do Niño 1+4 apenas com as chuvas da mesorregião Sul, ou seja, as anomalias da área do Niño mais ao leste influencia as chuvas na mesorregião mais ao leste, enquanto, as precipitações das mesorregiões mais aos oeste são influenciadas pelas anomalias de TSM das áreas dos Niños mais ao oeste. Este resultado, possivelmente, é decorrente do deslocamento oeste-leste do ramo ascendente da célula de Walker, no Pacífico Equatorial, que é induzida pelas anomalias de TSM mais elevadas, levando a um deslocamento do ramo descendente que inibe a precipitação nas mesorregiões do Amazonas que estão sob a sua influência.

Em relação às anomalias de TSM das áreas do Atlântico Tropical observa-se que apenas a precipitação da mesorregião Centro Amazonense apresenta correlação positiva e estatisticamente significativa com as anomalias de TSM do Atlântico Sul. Enquanto, as chuvas das mesorregiões Norte e Sul estão correlacionadas negativamente com significância estatística com as anomalias de TSM da área do Atlântico Norte. Este resultado é decorrente do deslocamento na direção norte-sul da ZCIT no Atlântico Tropical.

4. Conclusões

Séries temporais longas são fundamentais para as análises do clima e suas mudanças, para isso, a manutenção das estações meteorológicas históricas é muito importante. A falta de um banco de dados climáticos de longo prazo tem sido um grande obstáculo para quantificar se os eventos extremos têm mudado nas últimas décadas sobre a Região Norte do Brasil. Esse estudo apresenta, pela primeira vez, a

análise dos extremos de precipitação e temperatura para o Estado do Amazonas. A série contínua dos dados de precipitação diária para 13 localidades, no período de 1970 a 2010, foi analisada nesse estudo. Baseado nos resultados observados dos índices de extremos climáticos dependentes dessa variável pode-se concluir que:

- 1) Considerando todos os índices de todas as estações em apenas 13,6% dos casos as tendências observadas foram estatisticamente significativas. Isto mostra que para o estado do Amazonas como um todo não é possível afirmar categoricamente que ocorreu aumento ou diminuição dos índices extremos de precipitação.
- 2) Observa-se para DCS que das 13 estações em 4 (31%) as tendências foram estatisticamente significativas, sendo que destas, três foram positivas e uma negativa. Portanto, de uma maneira geral verificou-se tendência de aumento dos dias consecutivos secos para o estado do Amazonas como um todo.
- 3) Para os demais índices e localidades considerados todas as 104 situações possíveis em 49 (47,1%) verificou-se tendência de aumento, em 51 (49,1%) de diminuição e em 4 (3,8%) neutro, ou seja, tendência nula. Entretanto, destas 104 situações em apenas 13 (12,5%) verificaram-se tendências estatisticamente significativas, sendo 6 positivas e 7 negativas. Com base nestes resultados pode concluir que não ocorreram aumento nem diminuição no total de chuvas e nos índice extremos de precipitação no estado do Amazonas.
- 4) Dos índices de anomalias de TSM do Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical os que apresentaram correlações estatisticamente significativas com os índices de extremo de precipitação foram às anomalias de TSM das áreas do Niño 3, 3.4 e 4 e TSAI. Portanto, é possível afirma que a anomalia de TSM destas áreas tem influência nos índices de precipitação do estado do Amazonas.

É importante observar que os resultados das tendências e também das correlações estão baseados estritamente no sinal anual dos índices estudados. Logo, vale a pena observar se essa configuração também é identificada nas tendências em escala sazonal. Visto que, uma característica intrínseca da variabilidade pluviométrica da Amazônia (exceto, na região noroeste) é sua sazonalidade pronunciada. Adicionalmente, sabe-se que os Oceanos Pacífico e Atlântico apresentam padrões dominantes em determinadas épocas do ano: a) ENSO na primavera/verão/outono com impactos na Amazônia no verão/outono e, b) Dipolo do Atlântico no verão/outono com impactos na Amazônia no outono. Logo, levando em consideração os resultados anuais encontrados nesse estudo e dos aspectos sazonais, pode-se conjecturar que é possível que as tendências anuais estejam “mascarando” tendências sazonais, isto é, pode ser que haja sinais de tendências dos índices extremos na es-

cala sazonal que não aparecem quando se analisam índices anuais, havendo assim, necessidade de estudos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Produtividade em Pesquisa para o primeiro autor e aos revisores anônimos pelas suas valiosas sugestões e correções.

Referências

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v.111, doi: 10.1029 = 2005JD006290, 2006.
- CHEN, T.C. Global water vapor flux and maintenance during FGGE. **Monthly Weather Review**, v.113, p.1801-1819, 1985.
- FEARNSIDE, P.M. Global warming in Amazonia: Impacts and Mitigation. **Acta Amazonica**, v.39, p.1003-1012, 2009.
- FU, R.; DICKINSON, R.E.; CHEN, M.; WANG, H. How do tropical sea surface temperatures influence the seasonal distribution of precipitation in the equatorial Amazon? **Journal of Climate**, v.14, p.4003-4026, 2001.
- HAYLOCK, M.R.; PETERSON, T.C.; ALVES, L.M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y.M.T.; BAEZ, J.; BARROS, V.R.; BERLATO, M.A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; GARCIA, V.J.; GRIMM, A.M.; KAROLY, D.; MARENGO, J.A.; MARINO, M.B.; MONCUNILL, D.F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J.L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L.A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v.19, p.1490-1512, 2006.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#populacao). Acesso em 27/06/2013.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Summary for Policymakers. IPCC, Stockholm, Sweden.
- JIANG, D.; WANG, K.; LI, Z.; WANG, Q. Variability of extreme summer precipitation over Circum-Bohai-Sea region during 1961-2008. **Theoretical and Applied Climatology**, v.104, p.501-509, 2011.
- KOUSKY, V.E.; CAVALCANTI, I.F.A.; KAYANO, M.T. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus A**, v.36, p.490-504, 1984.
- MARENGO J.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. **Journal of Climate**, v.6, p.617-627, 1993.

- MARENGO, J.A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, v.12, p.853-863, 1992.
- MARENGO, J.A. Long-term trends and cycles in the hydro-meteorology of the Amazon basin since the late 1920s. **Hydrological Processes**, v.23, p.3236-3244, 2009.
- MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; UVO, C.R.B. Long-term streamflow and rainfall fluctuations in tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwest Peru. **Journal of Geophysical Research**, v.103, p.1775-1783, 1998.
- MENEZES, H.E.A.; BRITO, J.I.B.; SANTOS, C.A.C.; SILVA, L.L. A relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, p.152-161, 2008.
- MORAES, B.C.; COSTA, J.M.N.; COSTA, A.C.L.; COSTA, M.H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v.35, p.207-214, 2005.
- RONCHAIL, J., BOURREL, L., COCHONNEAU, G., VAUCHEL, P., PHILLIPS, L., CASTRO, GUYOT, J.; OLIVEIRA, E. Inundations in the Mamore basin (south-western Amazon-Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Hydrology**, v.302, p.223-238, 2005.
- SANTOS, C.A.C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E.M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Acta Amazonica**, v.42, p.329-336, 2012.
- SHOURASENI, S.R.; ROBERT, C.B.J.R. Trends in extreme daily precipitation indices in India. **International Journal of Climatology**, v.24, p.457-466, 2004.
- SNEYERS, R. **On the Statistical Analysis of Series of Observations**. Technical Note No. 143, WMO No. 415 World Meteorological Organization: Geneva, 1990.
- SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; TOTA, J.; PEZZI, L.P.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, p.30, p.305-318, 2000.
- UVO, C.B., TÖLLE, U., BERNDTSSON, R. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. **International Journal of Climatology**, v.20, p.1495-1507, 2000.
- VINEY, N.R.; BATES, B.C. It never rains on Sunday: The prevalence and implications of untagged multi-day rainfall accumulations in the Australian high quality data set. **International Journal of Climatology**, v.24, p.1171-1192, 2004.
- YOON, J.H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate Dynamics**, v.34, p.249-264, 2010.
- ZHANG, Q.; XU, C.Y.; ZHANG, Z.; CHEN, X.; HAN, Z. Precipitation extremes in a karst region: a case study in the Guizhou province, southwest China. **Theoretical and Applied Climatology**, v.101, p.53-65, 2010.
- ZHANG, X.; HEGERL, G.; ZWIERS, F.; KENYON, J. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. **Journal of Climate**, v.18, p.1641-1651, 2005.
- ZHANG, X.; YANG, F. **RclimDex (1.0) User Guide**. Climate Research Branch Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada. 22p., 2004.
- EASTERLING, D. R.; EVANS, J. L.; PY, G.; KARL, T. R.; KUNKEL, K. E.; AMBENJE, P. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 81, p. 417-425, 2000.