



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

SECAS NO NORDESTE BRASILEIRO: UMA ANÁLISE PALEOCLIMÁTICA

Tyhago Aragão Dias¹; Francisco de Assis Souza Filho²; Luiz Martins Araujo Junior³; Cleiton da Silva Silveira⁴; Samuelson Lopes Cabral⁵

RESUMO – O presente trabalho tem como objetivo analisar os eventos de seca ocorridos no Holoceno médio 6 mil anos antes do presente no Nordeste Brasileiro (NEB) mostrando que alguns os modelos do PMIP3 tem a capacidade de representar mudanças climatológicas forçadas por mecanismos de baixa frequência e que os mesmo podem ser utilizados para sinalizar a ocorrência dos eventos de seca no NEB fomentando o conhecimento de mais longo prazo e assim aumentar o nível de confiança em projeções futuras.

ABSTRACT– This study aims to analyze the events that occurred in the middle Holocene drought 6000 years before present in the Brazilian Northeast (NEB) showing that some models of PMIP3 has the ability to represent forced by mechanisms of low-frequency climatic changes and the it may be used to sinalizar the occurrence of drought events in NEB fostering knowledge of longer term and thus increase the level of confidence in future projections.

Palavras-Chave – Secas no NEB. Paleoclimatologia, Índices de seca.

INTRODUÇÃO

A variabilidade da atividade solar (Foukal et al., 2006) e a mudança da insolação forçada orbitalmente (Berger and Loutter, 1991) são os dois principais mecanismos que explicam o clima do Holoceno. Sendo os sistemas de grande escala ZCIT e a monção da América do Sul com grande correspondência tendo fortemente influenciando o clima tropical, onde se encontra o contexto do Nordeste Brasileiro NEB. Os mecanismos podem ser corroborados com mostrado por outros trabalhos como Vettoretti *et al.*, (1998) apresenta resultados para o período do Holoceno médio (HM) mostrando que o ciclo sazonal do gelo marinho foi modificados em ambos os hemisférios, com o norte exibindo uma resposta mais forte associada à mudança da insolação forçada pela configuração orbital de 6 Kyr BP. Strikis *et al.*, (2011) mostra que a ocorrência de variações abruptas na precipitação de monção não é aleatória sendo completamente antefásica com a monção da Ásia e da Índia. Os resultados sugerem que isso acontece principalmente devido à mudança meridional na circulação do norte do Atlântico que pode ter modulado não apenas a monção na AS, mas também afetado as condições do Pacífico tropical no Holoceno e fenômenos de El Niño Oscilação Sul (ENSO), onde os resultados mostram a porção norte do estado de Minas Gerais foi mais úmida no HM, devido a incursões mais ao sul da ZCIT (Turcq *et al.*, 2002).

Cruz *et al.*, (2009) mostra a ante fase da precipitação tropical entre os hemisférios associada a mudança da energia solar recebida, modificando a intensidade da monção e a posição meridional da célula atmosférica Hadley. O autor comenta que durante o Holoceno o NEB experimenta condições mais úmidas durante o verão com insolação menor no caso do Holoceno e uma secagem quando a estação de verão tem maior insolação no caso do presente, comportamento contraria ao sul da América do Sul tropical.

O estudo do clima passado é muito complexo e requerem outras ferramentas além do uso de *proxies*, nesse sentido a modelagem numérica é necessária como uma importante ferramenta de análise, podendo ser utilizada para propor hipóteses e comparar causa e efeito. O *Paleoclimate Modeling Intercomparison Project* (PMIP) teve seu início com o intuito de coordenar e incentivar os estudos de Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) aplicados ao paleoclima e mensurar sua capacidade de simular grandes variações climáticas, como as ocorridas no passado, comparando as diferentes repostas dos modelos para as mesmas condições de contorno.

Para o presente trabalho o objetivo é estudar fenômenos de seca ocorridos no NEB através do *Standardized Precipitation Index* (SPI) para uma realidade paleoclimática considerando a probabilidade para a precipitação ou sua falta, o que ocasiona à seca, e as possíveis consequências desse evento forçados por mecanismos de baixa frequência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição dos experimentos

Mudanças nos parâmetros orbitais da Terra são introduzidas (inclinação do eixo da Terra, excentricidade e posição do periélio), pois elas implicam uma mudança na insolação, levando a uma mudança significativa da circulação geral da atmosfera, tornando-a bem diferente da atual, no experimento para 6.000 anos antes do presente, no PMIP, foi utilizada a insolação conforme Berger (1978).

Nas simulações para o HM, o principal forçante é a mudança sazonal da insolação, causada principalmente pela precessão dos equinócios, sendo que as latitudes extratropicais no hemisfério norte receberam mais radiação solar no verão do que no presente, aumentando o aquecimento dos continentes o inverso no Hemisfério Sul, com impacto importante sobre o SMAS.

Tabela 1. Sumário para as condições Pré-Industriais

Parâmetros Orbitais	[$ecc = 0.016724$] - [$obl = 23.446^\circ$] - [$peri-180^\circ = 102.04^\circ$]
Gases	[$CO_2 = 280$ ppm] - [$CH_4 = 760$ ppb] - [$N_2O = 270$ ppb] - [$CFC = 0$] - [$O_3 =$ Moderno - 10 DU]

Fonte: (Taylor *et al.*, 2009)

A depender da complexidade do modelo a vegetação pode ser computada, interativa, ou prescrita onde alguns modelos ESMs podem apenas calcular a fenologia da vegetação e do ciclo de carbono, características como o manto de gelo, topografia e a linhas de costa são definidas a partir valores do presente.

Tabela2 Sumario de condições para Holoceno médio

Parâmetros Orbital	[$ecc = 0.018682$] - [$obl = 24.105^\circ$] - [$peri-180^\circ = 0.87^\circ$]
Gases	[$CO_2 = 280$ ppm] - [$CH_4 = 650$ ppb] - [$N_2O = 270$ ppb] - [$CFC = 0$] - [$O_3 =$ same as PI]
Vegetação	prescribed or interactive as in CMIP5 PI
Manto de gelo	Mesmo que no CMIP5 PI
Topografia e linhas de costa	Mesmo que no CMIP5 PI

Fonte: (Taylor *et al.*, 2009)

Variáveis como constante solar e concentração de aerossóis se mantem constante para ambas as simulações e são descritas a partir de valores do presente. Para maiores informações consultar (Taylor *et al.*, 2009).

Como se sabe apenas a excentricidade altera a quantidade total de energia solar chegando ao topo da atmosfera, mas a diferença nesse parâmetro mostrada nas tabelas 1 e 2 são insuficientes para produzir diferenças discerníveis. Os outros dois parâmetros, porem, particularmente o parâmetro de precessão, produzem, nessa escala de tempo (6000 anos de diferença), mudanças significas na insolação regional. Sobre o hemisfério Sul, particularmente, vale ressaltar que, no Holoceno médio, o periélio ocorria próximo ao equinócio, com impactos importantes sobre a Monção d América do Sul.

3.2 Conjunto de modelos do PMIP3

Para este trabalho foi utilizado nove modelos do CMIP5/PMIP3 disponíveis no site pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/ que possibilitavam a análise das três variáveis dos dois períodos em frequência mensal. Os modelos apresentam resolução espacial distinta entre se, e ate entre os mesmos se comparada a componente atmosférico com a oceânica como mostrado na tabela 3.

Tabela 3. Lista de nomes dos modelos com resolução e referencias para os modelos do PMIP3

<i>Modelos</i>	<i>Atmosférico</i> <i>Lat. x Lon.</i>	<i>Oceânico</i> <i>Lat. x Lon.</i>	<i>Referencia</i>
BCC-CSM-1	T42L26	360 x 384 L40	Wu (2012)
CCSM4	0.9° x 1,25° L26	320 x 384 L60	Gent <i>et al.</i> , (2011)
CNRM-CM5	T127 x L31	362 x 292 L42	Voldoire <i>et al.</i> , (2012)
CSIRO-MK3-6-0	T63 x L18	192 x 192 L31	Collier <i>at al.</i> , (2011)
HadGEM2-CC	1.25° x 1.875° L38	360 x 216 L40	Martin et al. (2011)
IPSL-CM5A-LR	1.875° x 3.75° L39	182 x 149 L31	Dufresne et al. (2012)
MPI-ESM-P	T63L47	256 x 220 L40	Giorgetta et al. (2012)
MRI-CGCM3	T159L48	364 x 368 L51	Yukimoto et al. (2012)

Selecionado sempre os últimos cem anos de cada simulação para cada variável foram calculados os campos médios anuais e sazonais para a precipitação pluviométrica é calculada a diferença entre a os modelos do HM menos o PI onde possamos ver a mudança. O ciclo anual das variáveis é mostrado em gráficos mostrando o padrão de flutuação e a diferença dos períodos.

Também foi calculado o SPI (*Standardized Precipitation Index*) proposto por McKee *et al.*, (1993) que tem como objetivo identificar períodos de seca em múltiplas escalas temporais, o SPI é fundamentado na distribuição de probabilidade da precipitação e demonstra o desvio relativamente as condições tidas como normais.

Tabela 04 – Classificação dos valores de SPI de acordo do o Monitor da Seca.

SPI	Classificação	Categoria
0 a -0,99	D0	Seca Ligeira
-1,00 a -1.49	D1	Seca Moderada
-1,50 a -1,99	D2	Seca Severa
$\leq -2,00$	D3	Seca Extrema

4 RESULTADOS

4.1 Validação do Conjunto de modelos do PMIP3

Os nove modelos tem grade capacidade em representar os sistemas meteorológicos de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) além do regime de estações nesse sentido as simulações do PMIP3 para o período pré-industrial mostraram uma concordância consistente com a climatologia vigente da região do NEB considerando seus aspectos espaciais e temporais (ciclo anual).

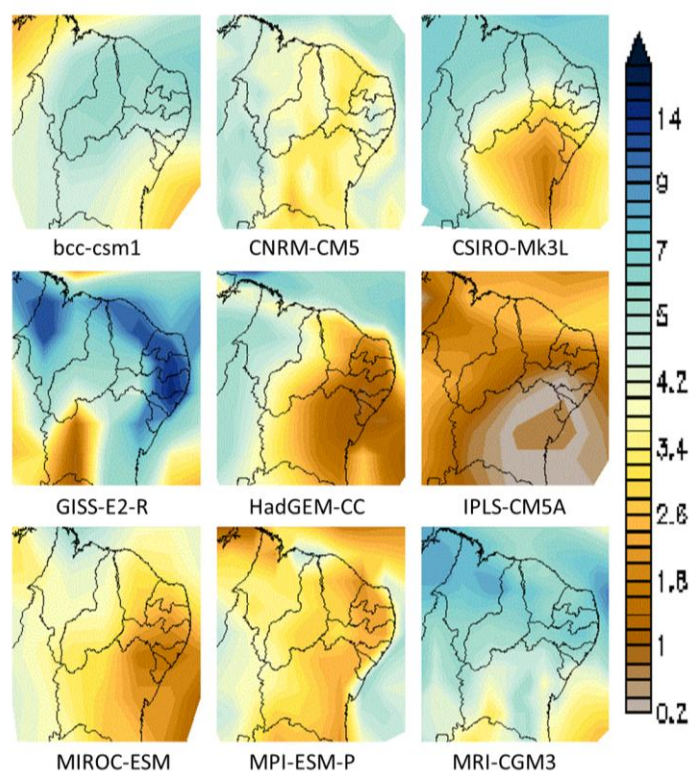


Figura 1. Media anual dos modelos analisados em mm/dia.

Para o ciclo anual da precipitação em mm/dia os modelos tendem a apresentar valores mais elevados que o observado em destaque o modelo GISS-ER mostra valores muito elevados durante todo o ano assim como o MRI-CGCM3, a média dos modelos acertam a fase do dado observado com grande destreza mesmo que tenha o viés de sobrestimar a precipitação no primeiro semestre em valores em média de 2 mm/dia e sendo para o segundo semestre a curva da média dos modelos e dos valores observados estão quase que sobrepostas. O modelo IPSL-CM5A é o único que permanece todo o ciclo mostrando valores abaixo do observado.

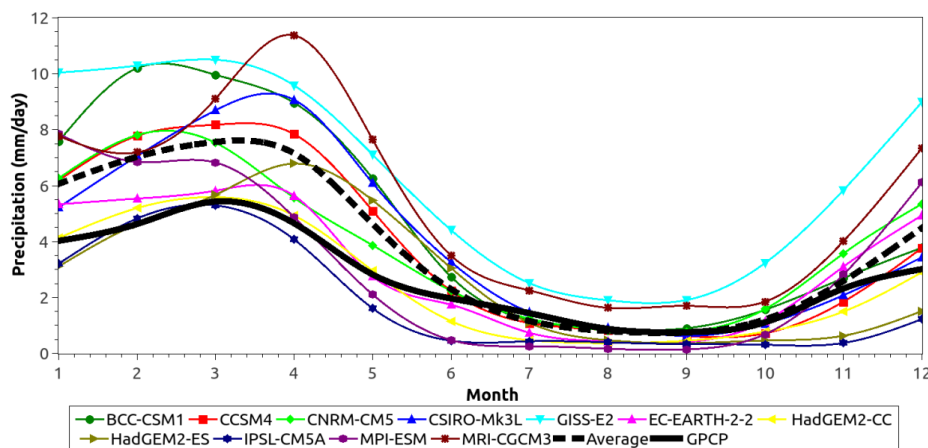


Figura 2. Climatologia dos modelos para a precipitação pluviométrica do pré-industrial, média dos modelos em linha preta pontilhada e a observação linha preta contínua. Resultado em milímetros por dia.

4.2 Holoceno médio menos Pré-Industrial

O que mais se destaca entre os dois períodos é a diferença entre a longitude do periélio em relação ao equinócio vernal. Segundo Vettoretti et al. (1998) a diferença entre a insolação do HM e do PI é devido à mudança na posição do solstício de verão para uma posição mais próxima ao periélio no HM, assim no hemisfério sul em DJF existe uma redução na insolação de 24,8% em comparação com o PI, como um aumento em JJA que não é descrito no referido artigo. Muitos autores sugerem que a região do NEB foi mais úmida no período do HM, mesmo que essa alteração na insolação para o hemisfério sul tenha enfraquecido a monção da América do Sul.

Cane (2005) sugere que os eventos ENSO (El Niño oscilação sul) se tornaram muito raro favorecendo o NEB com precipitação, os resultados encontrados mostram que a maioria dos modelos coloca a TSM mais fria no HM fazendo com que o período tenha um numero reduzidos e enfraquecidos de ENSO. Strikis et al. (2011) apresenta resultados através de espeleotemas que mostra que a porção norte do estado de Minas Gerais foi mais úmida no HM, devido a incursões mais ao sul da ZCIT. Cruz et al. (2009) também mostra através de espeleotemas que o NEB foi mais úmido que o presente.

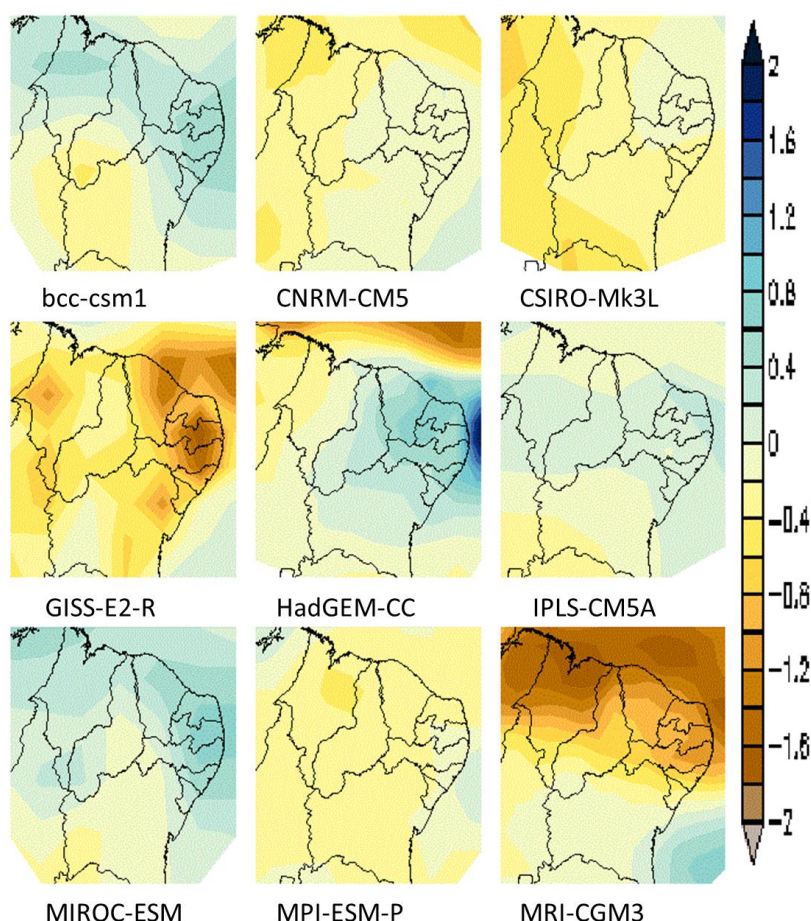


Figura 3. Diferença sobre a média anual dos modelos (mm/dia).

A figura 3 apresenta a diferença da média anual para a precipitação mostrando que nem todos os modelos corroboram com os resultados apresentados pelos autores citados. A nossa análise mostra que nem todos os modelos mostram que apenas quatro dos nove modelos mostram apresentam o NEB mais úmido esse modelos são os, BCC-CSM1, HadGEM-CC, IPSL-CM5A e MIROC-ESM, como mostrado na tabela 4 a mudança percentual da precipitação entre os dois períodos enquanto a tabela 5 mostra a mudança percentual do coeficiente de variação.

Tabela 5 - Mudança percentual da precipitação em mm/mês

	<i>HM</i>	<i>PI</i>	%
bcc-csm1	2034,0	1948,1	4,4
CNRM-CM5	1349,1	1427,5	-5,5
CSIRO-Mk3L	1876,4	1960,5	-4,3
GISS-E2-R	2670,1	2953,7	-9,6
HadGEM-CC	1380,5	1296,3	6,5
IPSL-CM5A	1005,0	988,2	1,7
MIROC-ESM	1412,5	1302,8	8,4
MPI-ESM-P	990,6	1108,3	10,6
MRI-CGM3	1946,6	2378,5	18,2

Tabela 6 - Mudança percentual do coeficiente de variação.

	<i>HM</i>	<i>PI</i>	%
bcc-csm1	0,15	0,16	-8,27
CNRM-CM5	0,09	0,08	13,48
CSIRO-Mk3L	0,12	0,12	-3,94
GISS-E2-R	0,06	0,06	-3,22
HadGEM-CC	0,20	0,27	-23,61
IPSL-CM5A	0,12	0,15	-16,75
MIROC-ESM	0,10	0,10	-4,05
MPI-ESM-P	0,17	0,16	8,31
MRI-CGM3	0,11	0,12	-9,50

A figura 4 nos mostra o mosaico das CDF (*Cumulative Density Function*) para cada modelo mostrando que para o HM os modelos CNRM-CM5, CSIRO-MkL3, GISS-E2-R, MPI-ESM-P e MRI-CGM3 apresentam uma tendência no NEB a ser mais seco onde o modelo HadGEM-ES e IPLS-CM5A mostra que a variação desse evento é muito pequena apesar de apresentar um HM mais úmido de 6,5% e 1,7% respectivamente. Mesmo os modelos que mostram o HM mais úmido essa mudança percentual não é muito grande não chegando a 10%.

Figura 4. CDF (*Cumulative Density Function*) para cada modelo.

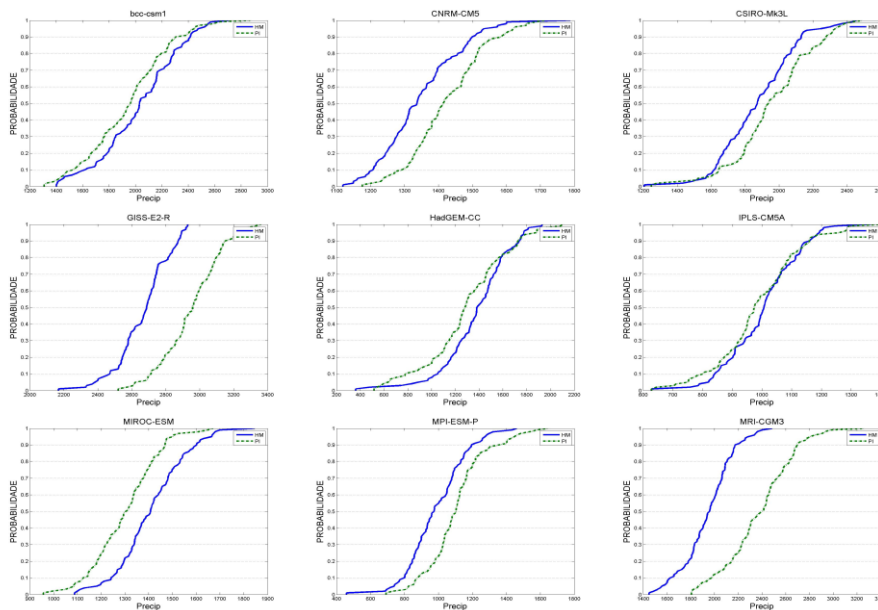
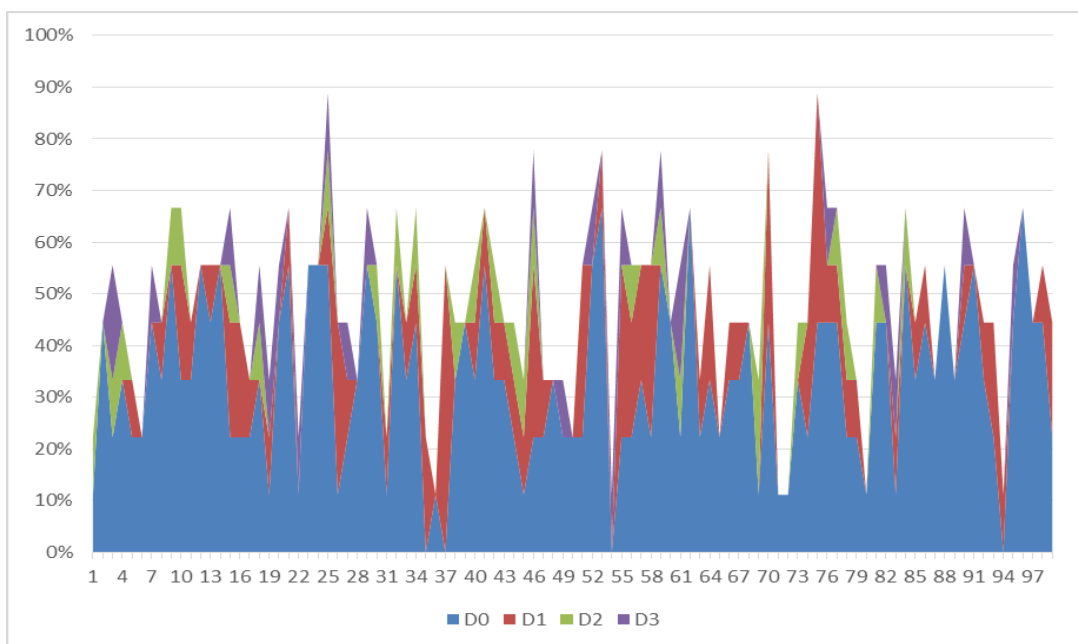


Figura 5. Porcentagem do numero de modelos por ano



A figura 5 apresenta a porcentagem de modelos que mostram níveis de seca divididos em classe como mostrado na seção 3.2 mostrando que eventos de seca eram comuns mesmo para modelos que corroboram com as evidências que mostram um HM mais úmido que o presente.

5 CONCLUSÃO.

Os resultados mostram que o NEB durante HM apresentou-se mais úmido para apenas quatro dos nove modelos observados, dados conhecidos de *proxies* até o presente mostra que existe um forte indicio que o período do HM tenha sido realmente mais úmido. Mas mesmo que tenha períodos mais úmidos existiram eventos de secas através do SPI podemos estudar a severidade destes eventos e tentar aumentar o nível de conhecimento sobre esses eventos forçados por mecanismos de mais baixa frequência como se dá no estudo paleoclimático. Conhecer como esses eventos ocorreram no passado sua intensidade e frequência é necessário para poder criar mecanismos de proteção e políticas de combate mais apropriadas para um cenário mais severo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

BIRD, Broxton W. et al. Holocene tropical South American hydroclimate revealed from a decadal resolved lake sediment $\delta^{18}O$ record. **Earth And Planetary Science Letters**, O'hara St., Pittsburgh, v. 130, n. 3-4, p.192-202, 15 Oct. 2011.

CANE, Mark A.. The evolution of El Nino, past and future. **Earth And Planetary Science Letters**, New York, v. 230, n. , p.227-240, 13 Jan. 2005.

CRUZ, F. W., VUILLE, M., BURNS, S. J., WANG, X., CHENG, H., WERNER, M., EDWARDS, R. L., MARMANN, I., AULER, A. S., NGUYEN, H. Orbitally driven east–west antiphasing of South American precipitation. **Nature Geoscience**. DOI: 10.1038/NGEO 444. 2009.

MELO, Maria Luciene Dias de; MARENGO, José Antonio. The influence of changes in orbital parameters over South American climate using the CPTEC AGCM: simulation of climate during the mid Holocene. **The Holocene**, Cachoeira Paulista, p. 501-516. 2008.

MORAN, J.M.; MORGEN, M.D. Meteorology: The atmosphere and the science of weather. Mnneapolis: Burgess Publishing, 1986

PESSEDA, Luiz Carlos Ruiz et al. Late Pleistocene and Holocene vegetation changes in northeastern Brazil determined from carbon isotopes and charcoal records in soils. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Piracicaba, n. 297, p.597-608, 2010.

RAO, V.B; HADA ,K. Characteristics of rainfall over Brazil. Annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theor. Appl. Climatology**, v.42, p. 81-91, 1990

STRÍKIS, Nicolás M. et al. Abrupt variations in South American monsoon rainfall during the Holocene based on a speleothem record from central-eastern Brazil. **Geological Society Of America**, São Paulo, p. 1075-1078. Nov. 2011.

TURCQ, B. et al. Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. **Sedimentary Geology**, Bondy, p. 319-342. 2002.

UVO, C.B; NOBRE, C.A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. **Climanálise**, v. 4, p. 34-40, 1989a

VETTORETTI, G.; PELTIER, W. R.. Simulations of Mid-Holocene Climate Using an Atmospheric General Circulation Model. **Journal Of Climate**, Toronto, p. 2607-2627. out. 1998.

WHITNEY, Bronwen S. et al. A 45 kyr palaeoclimate record from the lowland interior of tropical South America. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Edinburgh, n. 307, p.177-192, 2011.

QUININO, U.C.; CAMPOS, L.F.; GADELHA, C.L. (2000). “*Avaliação da qualidade das águas subterrâneas na bacia do rio Gramame no Estado da Paraíba*” in Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, Nov. 2000, 1, pp. 162-176