

ANÁLISE DA TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NA BACIA DO RIO MADEIRA

Suzianny Cristian Salazar da Silva¹ & Aline Maria Meiguins de Lima^{2*} & José Paulino de Rocha³

Resumo – O rio Madeira é o maior afluente da margem direita do rio Amazonas, configurando uma bacia transfronteiriça que engloba os estados do Amazonas e Rondônia e o território da Bolívia; contemplando características que migram das elevadas altitudes andinas, até a típica planície amazônica. Neste trabalho, foi analisada a tendência da precipitação pluviométrica ao longo do médio-baixo curso da bacia, empregando interpoladores de análise espacial, como ferramentas para minimizar as lacunas de informações existentes pela irregularidade da rede pluviométrica. Este método permitiu o comparativo de dados das séries históricas e investigar a amplitude dos registros de precipitação pluviométrica. A análise foi realizada a partir da base dos dados de pluviometria (1977 a 2012) que foram processados empregando interpolador específico (*Nearest Neighbor* -NN) para geração das zonas de comportamento mais homogêneo quanto à precipitação. Os resultados mostraram um incremento da precipitação de montante para jusante, e das bordas em direção ao centro, demonstrando uma tendência de concentração da região central para foz da bacia. Este quadro permitiu investigar a variabilidade do comportamento da precipitação ao longo do período analisado e sua comparação à padronização da normal estabelecida para a região Amazônica.

Palavras-Chave – Rio Madeira, pluviometria, geoestatística.

TREND ANALYSIS OF RAINFALL IN THE MADEIRA RIVER BASIN

Abstract – The Madeira river is the largest tributary of the Amazon river right margin, being an international border basin involving the states of Amazonas and Rondônia and the territory of Bolivia, including characteristics that migrate from the high Andean altitudes, to the typical Amazonian lowlands. In this work, was analyzed the trend of rainfall along the middle-lower course of the basin, using the interpolation of spatial analysis as tools to minimize data gaps exist for the irregularity of rainfall network. This method allowed the comparison of time series data and investigates the extent of rainfall records. The analysis was performed from the base of the rainfall data (1977-2012). These were processed using specific interpolator (*Nearest Neighbor* - NN) for generation of more homogeneous areas of behavior regarding precipitation. The results showed an increase in rainfall from upstream to downstream, and from the edges toward the center, showing a tendency to concentrate in the central region to the mouth of the basin. This framework allowed to investigate the variability over the period analyzed and their comparison with the standard established for the Amazon region.

Keywords – Madeira river, rainfall, geostatistics.

¹Universidade Federal do Pará. suziannysalazar@gmail.com

²Universidade Federal do Pará. ameiguins@ufpa.br.

³Universidade Federal do Pará. eprocha@ufpa.br.

* Autor Correspondente.

INTRODUÇÃO

O rio Madeira representa um dos sistemas de drenagem de maior contribuição para a bacia Amazônica (16% da descarga segundo KRUSCHE et al., 2011); formado pela confluência dos rios Beni (Bolívia) e Mamoré (Brasil-Bolívia), é um afluente direto do rio Amazonas, com uma área de 548.960 km²; foi dividido em 11 Unidades de Planejamento de Recursos Hídricos, segundo ANA (2010): Alto Guaporé, Médio Guaporé, Mamoré, Abunã-Madeira, Roosevelt, Jamari, Ji-Paraná, Aripuanã, Baixo Aripuanã, Médio Madeira e Baixo Madeira-Sucunduri. Representando 23% do total da bacia Amazônica; se estende pela Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), possuindo as seguintes unidades proporcionais (MUNIZ; FILIZOLA Jr., 2012): Andes (15%), planície Amazônica (44%) e território brasileiro (41%).

Sua relevância atual está na discussão em torno de seu aproveitamento energético, porém historicamente reflete os processos de ocupação na região Amazônica, notadamente no estado de Rondônia, que compõe uma área de expansão do desmatamento (PRATES; BACHA, 2011). Para Fearnside (2005) a remoção da cobertura vegetal tende a afetar o ciclo hidrológico, uma vez que a precipitação nas áreas desmatadas escoar rapidamente, formando as cheias, seguidas por períodos de grande redução ou interrupção do fluxo dos cursos d'água.

Segundo INPE (2011) a Amazônia está periodicamente sujeita a enchentes e secas, mas os exemplos recentes destacam a vulnerabilidade das populações humanas e dos ecossistemas dos quais elas dependem, aos atuais eventos climáticos extremos; ressaltando-se a seca de 2005 que teve graves efeitos sobre as populações humanas ao longo do principal canal do Rio Amazona e de seus afluentes, incluindo o Rio Madeira. As informações monitoradas pela CPRM (2012) registram na estação de Porto Velho (Rondônia) a cota média de cheias em torno de 15,6 m e de vazante em 3,2 m, demonstrando uma variação entre os picos de cheia e vazante a cerca de 12,4 m.

No conjunto a bacia hidrográfica do rio Madeira representa uma região com clima e relevo característicos, marcados por elevadas altitudes na região Andina (Bolívia, aproximando-se de 6.400 metros) e depressões de até 500 m na planície amazônica; e por zonas de instabilidade climática, influenciadas por fenômenos de circulação atmosférica onde a variabilidade da distribuição de chuvas na bacia explica-se, muitas vezes, pela dinâmica das principais massas de ar ativas em parte de América do Sul, e pela influência da orografia dos Andes, tanto na escala continental quanto na escala de vales (MUNIZ; FILIZOLA Jr., 2012). Considerando a relevância da bacia do rio Madeira e a variabilidade climática dos últimos 10 anos (MARENGO et al., 2010) este trabalho buscou investigar a tendência da precipitação pluviométrica no médio-baixo curso do rio Madeira, a partir das séries históricas de estações distribuídas na bacia, por meio de interpoladores espaciais.

O emprego de ferramentas vinculadas a geoestatística (GOOVAERTS, 2000; VERWORN; HABERLANDT, 2010; RAMESH, 2012; ROGELIS, 2013) é associado na demanda para o preenchimento de lacunas decorrentes da baixa densidade de estações, para a área total da bacia. Segundo a Resolução Conjunta n. 003/2010 da ANEEL/ANA (Agência Nacional de Energia Elétrica/Agência Nacional de Águas) devem ser observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica a manutenção de acima de 07 estações para áreas superiores a 500.000 km². Numericamente esse número é atendido, porém a heterogeneidade das séries, com estações com diferentes períodos de funcionamento, demandam pela regionalização das informações, para a compreensão do padrão de comportamento geral da bacia.

METODOLOGIA

Neste estudo foram usadas bases de dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (Sistema HIDROWEB); no total foi obtido o registro de 82 estações; porém, no processo de escolha optou-se por 52 estações, referentes às séries hidrológicas de 15 anos (1997 a 2012). O conjunto de dados das estações pluviométricas da bacia em questão foi submetido a uma avaliação onde se buscou uma série histórica comum, com a menor quantidade de falhas. Porém, mesmo assim, houve a necessidade de preenchimento de dados em alguns meses. Ajustada a base foram calculados: média mensal, média anual e acumulado anual; para cada uma das estações tomadas. O valor obtido referente ao acumulado anual foi reavaliado em termos da média para o período considerado. Para a melhor observação da distribuição espacial de chuvas na bacia do rio Madeira, com base nos dados de precipitações (acumulado anual do período) foi gerada uma carta com a distribuição da precipitação pluviométrica, por meio de interpolação.

A estimação de superfícies da pluviometria tem importância para estimativas do balanço hídrico, além de poderem ser utilizadas como dados de entrada em modelos hidrológicos superficiais e/ou atmosféricos (TEEGAVARAPU; CHANDRAMOULI, 2005). A interpolação espacial é o procedimento utilizado para se estimar valores de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos (ALVES et al., 2012). Estas podem reproduzir como resultados (GOOVAERTS, 2000): a) uma distribuição que gera valores estimados considerando o exato local de cada amostra; b) valores condicionados pela amplitude amostral; c) uma distribuição que considere a regionalidade do fenômeno, utilizando as amostras próximas para estimar os efeitos locais e globais.

Neste processo, empregou-se o método do *Nearest Neighbor* – NN (Vizinho mais próximo), que atribui o valor do ponto mais próximo para cada nó. Este é eficiente, se os pontos estão espaçados regularmente e precisam ser convertido em arquivos de malha regular, sendo útil para o preenchimento de lacunas nos dados (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). Na tentativa de compor uma superfície cujo valor será proporcional a intensidade de amostras, foi empregada como formulação:

$$z_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

; onde z_i é o valor de cota de um ponto i qualquer da grade, z_j é a cota de uma amostra j vizinha do ponto i da grade e w_{ij} é um fator de ponderação (CAMARGO et al., 2004). Os procedimentos foram realizados no software ArcGis 10 por meio do aplicativo ArcToolbox, e posteriormente classificados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bacia do rio Madeira é composta por 3 setores bem definidos pelas suas características fisiográficas: a) O alto Madeira, transfronteiriço, que compõe a parte boliviana da bacia, constituída pelos rios formadores do Madeira (Mamoré e Beni); b) O médio curso, em território brasileiro, onde se localizou o aproveitamento energético a partir das rupturas de relevo que formam as cachoeiras (Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau); c) O baixo Madeira, que se estende até a foz no rio Amazonas, com um comprimento de 1.100 km e aproximadamente 19 m de desnível total.

Esta análise concentrou-se no médio-baixo curso em território brasileiro, onde foi calculado o acumulado anual (no período considerado) por estação. A matriz de vizinhança gerada (valor atribuído por estação) passou a definir vizinhos, a partir de relações poligonais, ou seja, pela medida de proximidade entre dois polígonos. Logo, utilizou-se de uma matriz binária, onde os valores são

associados às células correspondentes às áreas contíguas; onde cada estação comporta-se como um ponto (ou evento) localizado no espaço, que passa a definir os padrões de valores dos atributos. O comportamento resultante é apresentado na Figura 1.

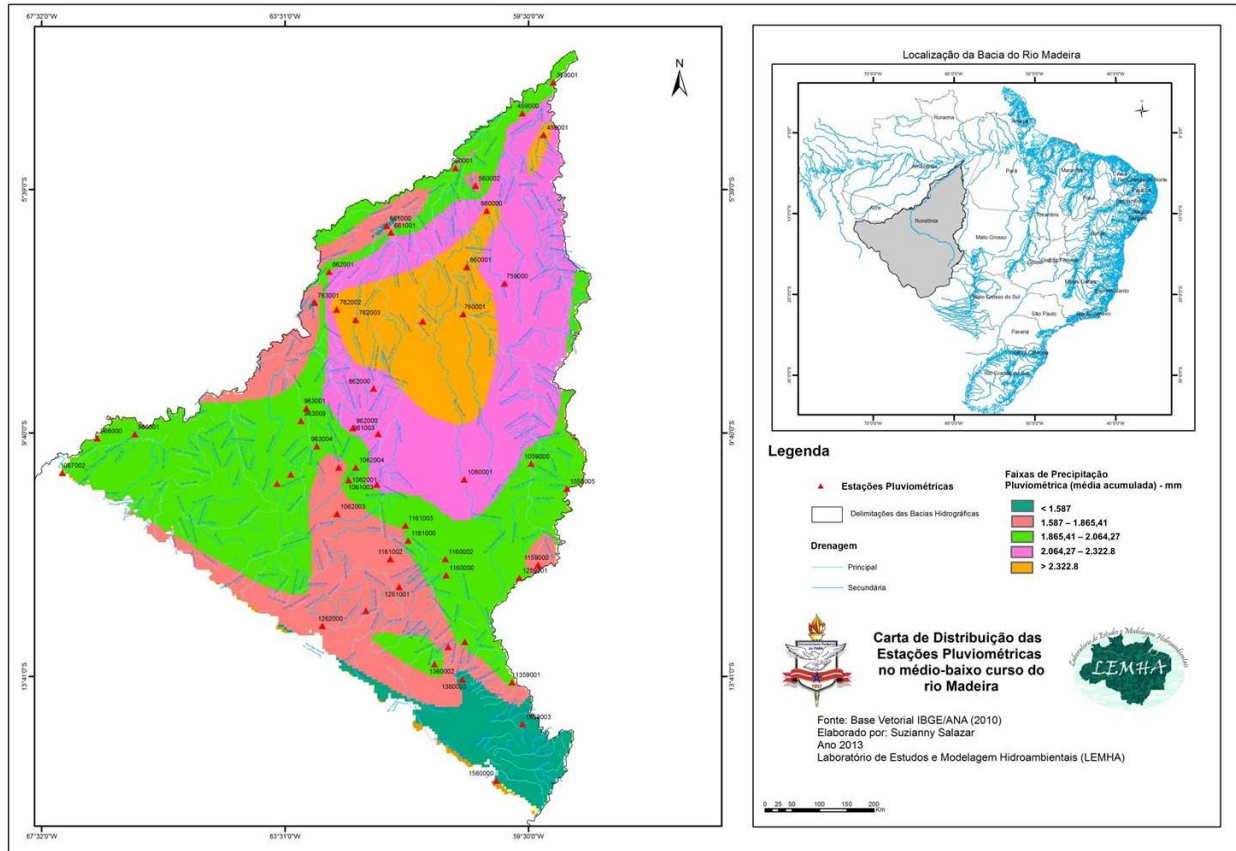


Figura 1 – Carta de distribuição da precipitação pluviométrica no médio-baixo curso do rio Madeira.

Ramesh (2012) aplicou o fator de proximidade k-NN (k-vizinho mais próximo) na estimativa de dados de precipitação pluviométrica tendo obtidos resultados compatíveis com os testes utilizando outras formulações matemáticas. Neste trabalho, também houve uma fase de teste com outros interpoladores: inverso do quadrado da distância (IDW) e a krigagem; sendo que o k-NN foi o que apresentou o melhor resultado quanto ao preenchimento dos espaços não amostrados (intervalos entre as estações).

Os valores obtidos a partir do tratamento efetuado apresentaram um comportamento tendencial crescente em direção a região central da bacia, e de montante para jusante; centralizando os maiores valores ao longo do curso d'água principal; estes são superiores a cerca de 2.323 mm/ano e os menores inferiores a 1.587 mm/ano. Estes se enquadram no quadro definido por Reboita et al. (2010) para região Amazônica, onde os autores definem três núcleos de precipitação: o primeiro máximo de precipitação anual, localizado no noroeste da Amazônia, podendo ocorrer chuvas acima de 3.000 mm/ano; o segundo, na parte central da Amazônia, em torno de 5°S, com precipitação de 2.500 mm/ano; e o terceiro, na parte sul da Amazônia, com precipitação acima de 1.750 mm/ano.

A distribuição da precipitação apresentada na Figura 2 para a América do Sul exemplifica essa tendência da precipitação na região Amazônica. Para Da Rocha et al. (2009) a precipitação no centro e no noroeste da Amazônia é associada à condensação de ar úmido transportado pelos ventos

alísios, que sofrem levantamento orográfico próximo aos Andes; configurando um ciclo sazonal composto por uma estação chuvosa de dezembro a maio, e máxima precipitação em abril, e uma estação seca de junho a outubro, com precipitação mínima em agosto (ZENG et al., 2008). Para Marengo (2008) esse comportamento está sofrendo alterações, onde as chances de ocorrerem períodos de intensa seca podem aumentar dos atuais 5% (uma forte estiagem a cada vinte anos) para 50% em 2030 e até 90% em 2100.

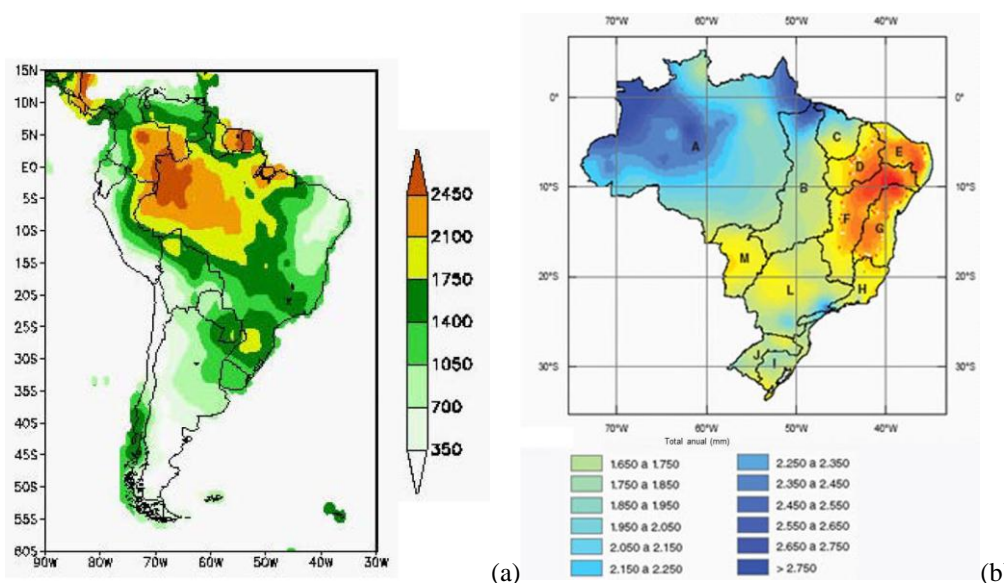


Figura 2 – (a) Precipitação média anual (mm) calculada entre 1979-1995 com base em análises diárias de precipitação no Brasil e em médias mensais (REBOITA et al., 2010); (b) precipitação média anual do Brasil, histórico de 1961-2007, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Se tal cenário se confirmar, a variabilidade mensal das chuvas na bacia do Madeira (com casos de déficit hídrico e de excesso de precipitação) pode sofrer variações (MUNIZ; FILIZOLA Jr., 2012); atingindo desde as inundações na planície amazônica boliviana, que corresponde à parte central da bacia do rio Madeira (novembro a março), até a zona sudoeste da bacia, onde acontecem secas (estado de Rondônia). Espinoza Villar et al. (2009) e Lewis *et al.* (2011) descrevem a ocorrência de máximos durante a década de 1970, em 1984-1985-1986, 1989, 1995, 1999, 2002 e 2009 (muitos deles coincidindo com anos de La Niña) e mínimos em 1983, 1992-1993, 1998, 2005 e 2010 (a maioria deles coincidindo com anos de El Niño).

CONCLUSÕES

A bacia do rio Madeira apresenta um comportamento relativo à precipitação pluviométrica com tendência de ocorrência de áreas de máximo da região central em direção a foz da bacia; acompanhando os modelos gerados para a região Amazônica e o previsto a partir do histórico de precipitações de 1961-2007. Este cenário está sujeito a variações decorrentes dos eventos de variabilidade climática ocorridos nos últimos 30-40 anos; cujos últimos eventos resultaram tanto em períodos de cheias quanto de estiagem severos e próximos entre si. Esta situação pode influenciar no regime da bacia, que já tem em seu território duas usinas hidrelétricas propostas, além de sua importância para navegação e manutenção dos ecossistemas aquáticos que integram a bacia Amazônica.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. D. L.; BIUDES, M. S.; VECCHIA, F. (2012). Interpolação espacial climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. *Revista Geonorte*, Edição Especial 2, v.1, n.5, p. 606-618.
- ANA. (2010). *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Amazônica: Afluentes da Margem Direita (PRH-MDA)*. Brasília: Agência Nacional de Águas, Vol. I e II.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. (2002). Análise espacial de superfícies. In *Análise espacial de dados geográficos*. Org. por Fuks, S. D.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. São José dos Campos: INPE, 2002. 37p.
- CPRM. (2012). *Monitoramento hidrológico*. Boletim n. 7. Brasília: CPRM/ANA, 12p.
- DA ROCHA, R. P.; MORALES, C. A.; CUADRA, S. V.; AMBRIZZI, T. (2009). Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: an evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, p. 1-19.
- ESPINOZA VILLAR, J. C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; COCHONNEAU, G.; NAZIANO, F.; LAVADO, W.; OLIVEIRA, E.; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), p. 1574-1594.
- FEARNSIDE, P. M. (2005). Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e conseqüências. *Megadiversidade*, vol. 1, n. 1, p.: 114-123.
- GOOVAERTS, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, v 228, p 113-129.
- INPE. (2011). *Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasília-DF, 56p.
- LEITE, N. K.; KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E.; GOMES, B. M. (2011). Intra and interannual variability in the Madeira River water chemistry and sediment load. *Biogeochemistry*, 105, p.37-51.
- LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. (2011). The 2010 Amazon Drought. *Science*, vol. 331, n. 6017, p. 554.
- MARENGO, J. A. (2008). Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, 22 (63), p. 83-96.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. (2010). Mudanças climáticas e recursos hídricos. In *Águas do Brasil: análises estratégicas*. Org. por Bicudo, C. E. M.; Tundisi, J. G.; Scheuenstuhl, M. C. B. Instituto de Botânica, São Paulo-SP, 224 p.
- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. (2009). Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. *Braz. Journal of Aquatic Science Technology*, 13(1), p. 53-64.
- MUNIZ, L. S.; NAZIANO, P. F. (2012). Proposta de metodologia de análise dos padrões de cotas Fluviométricas da bacia do rio Madeira-Brasil. *Revista Geonorte*, v. 3, n. 4, p. 1242-1254.
- PRATES, R. C.; BACHA, C. J. C. (2011). Os processos de desenvolvimento e desmatamento da Amazônia. *Economia e Sociedade*, v. 20, n. 3 (43), p. 601-636, dez.
- RAMESH, S. (2012). Spatial interpolation for missing precipitation data: use of proximity metrics, nearest neighbor classifiers, and clusters. *World Environmental and Water Resources Congress*, p. 3924-3933.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev. Bras. Meteorologia*, v. 25, n.2, p. 185-204.
- ROGELIS, M. C.; WERNER, M. G. F. (2013). Spatial interpolation for real-time rainfall field estimation in areas with complex topography. *Journal of Hydrometeorology*, 14, p. 85-104.

- TAESOMBAT, W.; SRIWONGSITANON, N. (2009). Areal rainfall estimation using spatial interpolation techniques. *Science Asia*, 35, p. 268-275.
- TEEGAVARAPU, R.S.V.; CHANDRAMOULI, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312, p. 191–206.
- VERWORN, A.; HABERLANDT, U. (2010). Spatial interpolation of hourly rainfall – effect of additional information, variogram inference and storm properties. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, p. 6407-6446.
- ZENG, N.; YOON, J. H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. (2008). Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Letters*, 3: 014002.