

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AJUSTE DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE ÀS SÉRIES DE ÍNDICES DE SECA NO ESTADO DO PARANÁ

Robinson Ploszai¹; Miriam Rita Moro Mine² & Daniel Henrique Marco Detzel³

RESUMO – As mudanças climáticas alteram o ciclo hidrológico e impactam significativamente os recursos hídricos. O maior número e a extensão mais prolongada dos eventos extremos de secas são indicativos de que ocorrem mudanças climáticas em uma região. Uma forma de se avaliar os extremos mínimos é através dos índices de seca, combinados para diversos períodos e ajustados a distribuições estatísticas. O método aplicado neste trabalho é o Índice de Reconhecimento de Seca (RDI, em inglês) para ao qual se ajustaram quatro distribuições de probabilidade (Log-Normal de dois parâmetros, Gama, Weibull e Generalizada de Valores Extremos tipo I) e sete agrupamentos temporais (3, 6, 9, 12, 18, 24 e 48 meses). Os resultados apontaram que a distribuição Weibull é a mais indicada a ser ajustada às séries de RDI, tanto no período passado quanto no futuro.

ABSTRACT – Climate changes alter the hydrological cycle and impact significantly the water resources. The great number and prolonged extension of drought extreme events are indicative that climate changes occur in a region. A way to evaluate the drought extremes is using the drought indices, clustered to diverse periods and adjusted to statistical distributions. The applied method in this work is the Reconnaissance Drought Index (RDI) adjusted to four statistical probability distributions (e.g. two-parameter Log-Normal, Gamma, Weibull and Generalized of Extreme Values type I) and seven temporal clusters (e.g. 3, 6, 9, 12, 18, 24, and 48 months). The results pointed that Weibull distribution is the most indicated to be adjusted to RDI series, both in past and future series.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas, índices de seca, análise de tendências.

INTRODUÇÃO

O tema mudanças climáticas e seus impactos nos recursos hídricos é recorrente em diversas esferas da sociedade, sobretudo na ciência devido as alterações na temperatura e, conseqüentemente, no ciclo hidrológico. É importante analisar os impactos destas mudanças para a tomada de decisões quanto ao gerenciamento dos recursos hídricos, bem como para a mitigação de impactos.

Segundo Salas *et al.* (2012), o intenso processo de urbanização e o desmatamento denotam a chegada do homem nas regiões, bem como a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) emitidos na atmosfera. Mohor *et al.* (2015) afirmam que nas últimas décadas observou-se um aumento nas

¹ Estudante de doutorado na Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, CEP 81531-990 Curitiba (PR) Telefone: +55 41 3361 3707 ploszai@ufpr.br

² Professora titular na Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, CEP 81531-990 Curitiba (PR) Telefone: +55 41 3361 3145, mrmine.dhs@ufpr.br

³ Professor na Universidade Federal do Paraná e pesquisador no Lactec, Caixa Postal 19011, CEP 81531-990 Curitiba (PR) Telefone: +55 41 3361 3707, Fax: +55 41 3361 3143, daniel@lactec.org.br

concentrações de dióxido de carbono na atmosfera. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês) apresenta relatórios acerca dos efeitos das mudanças climáticas no planeta e cenários futuros de previsão (IPCC, 2013).

Os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos são percebidos com o acréscimo dos eventos extremos (secas). As secas são eventos que podem impactar significativamente as sociedades e economias, sendo consideradas por muitos autores como os eventos mais desastrosos do planeta, causando fome e desequilíbrio da flora e da fauna.

As secas são avaliadas utilizando índices que revelam a intensidade, duração e magnitude destes eventos. Entre os índices mais utilizados na literatura, estão o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI, em inglês) (Palmer, 1965), o Índice Padronizado de Precipitação (SPI, em inglês) (McKee et al., 1993), Índice de Reconhecimento de Seca (RDI) (Tsakiris e Vangelis, 2005) e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI, em inglês) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

São ajustadas distribuições de probabilidade às séries dos índices de secas, tal qual realizaram (Stagge *et al.*, 2015). Os mesmos ajustaram as distribuições Pearson III, Lognormal de dois parâmetros (LN2), Generalizada de Valores Extremos tipo I (GEV I) e Log-logística (LLOG) às séries de SPI e SPEI no continente europeu. Os resultados apontaram que a distribuição Gama melhor se ajusta para o cálculo do SPI e a GEV I para o cálculo do SPEI, na maioria das estações hidrometeorológicas.

Tsakiris e Vangelis (2005) e Kousari *et al.* (2014) ajustaram a distribuição Gama às séries de RDI. Sienz *et al.* (2012) e Stagge *et al.* (2015) atestam sobre a importância de escolher a distribuição de probabilidades que melhor se ajusta aos cenários locais, pois a escolha da distribuição não apropriada pode resultar na previsão de secas mais (ou menos) intensas que o esperado. Stagge *et al.* (2015) aplicaram os testes de aderência Anderson-Darling (AD), Kolmogorov-Smirnov (KS) e Shapiro-Wilk (SW) em seus estudos.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar qual distribuição de probabilidade melhor se ajusta às séries de precipitação em 35 estações hidrológicas distribuídas no Estado do Paraná. Para isso, é aplicado o RDI às séries de precipitação e evapotranspiração potencial ajustadas às distribuições de probabilidades Log-Normal de dois parâmetros (LN2), Gama, Weibull e Generalizada de Valores Extremos tipo I (GEV I). A análise das distribuições teóricas *versus* empírica é realizada através das Funções de Distribuição Acumulada (FDA), bem como a aplicação dos testes de aderência Anderson-Darling (AD) e Kolmogorov-Smirnov (KS).

MÉTODO

Entre os métodos consagrados para avaliação de secas, o RDI é amplamente utilizado em diversas localizações no planeta, sendo recomendado para estudos de mudanças climáticas (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). O método foi inicialmente proposto por Tsakiris e Vangelis (2005) e consiste na razão entre a precipitação e evapotranspiração potencial (α_k), conforme Equação (1).

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, \text{ com } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

em que P_{ij} é a precipitação do mês j e do ano i e PET_{ij} é a evapotranspiração potencial (descrito na próxima seção) do mês j e do ano i e n é número total de anos dos registros e/ou simulações.

São ajustadas distribuições estatísticas aos valores de α_k , e segundo Kousari *et al.* (2014) a distribuição gama possui o melhor ajuste, seguida da distribuição LN2. A Equação (2) apresenta a expressão padronizada do RDI.

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\widehat{\sigma}_{y_k}} \quad (2)$$

em que $y_k^{(i)}$ é o logaritmo natural de $\alpha_k^{(i)}$ ou $\ln(\alpha_k^{(i)})$, \bar{y}_k é a média aritmética da série e $\widehat{\sigma}_{y_k}$ é o desvio padrão. Outras distribuições de probabilidade são ajustadas às séries de RDI, como a Gama (Kousari *et al.*, 2014), Weibull e GEV I (Stagge *et al.*, 2015).

A evapotranspiração potencial é obtida pela aplicação do método de Blaney-Criddle, conforme realizado em LPB (2012). Os testes de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS) e Anderson-Darling (AD) são aplicados às séries de RDI. Nos testes, verifica-se a hipótese nula (H_0) para certo nível de significância ($\alpha = 5\%$) e os parâmetros da distribuição de probabilidades são estimados pelo método da máxima verossimilhança (Stagge *et al.*, 2015).

ÁREA DE ESTUDOS E DADOS

A área de estudo compreende o Estado do Paraná. É um dos três estados da região sul do Brasil e situa-se entre os meridianos 48° 05' 37" L e 54° 37' 08" O e entre os paralelos 22° 30' 58" N e 26° 43' 00" S. O Paraná possui 199.308 km² de área e conta com a sexta maior população do país (em torno de 5,5% da população nacional), bem como o quinto maior Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (IBGE, 2019).

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima do Paraná é classificado em quatro tipos: (1) savânico, (2) subtropical úmido, (3) subtropical úmido influenciado pelas monções e (4) clima oceânico (Alvares *et al.*, 2013).

A precipitação anual do Paraná situa-se entre 1.200 mm (norte, centro-oeste e oeste) e 1.500 mm (centro e sudeste) e a temperatura média anual varia de 17°C (norte, centro-oeste e oeste) até 20°C (centro e sudeste). A vegetação é marcada por coníferas e latifoliadas, sendo que a Mata Atlântica é encontrada apenas na região da serra do mar. Entre as espécies típicas citam-se o Pinheiro do Paraná, erva-mate, cedro e imbuia (MMA, 2016). Os estudos são realizados nas estações hidrológicas localizadas no Estado do Paraná, conforme apresentado na Figura 1.

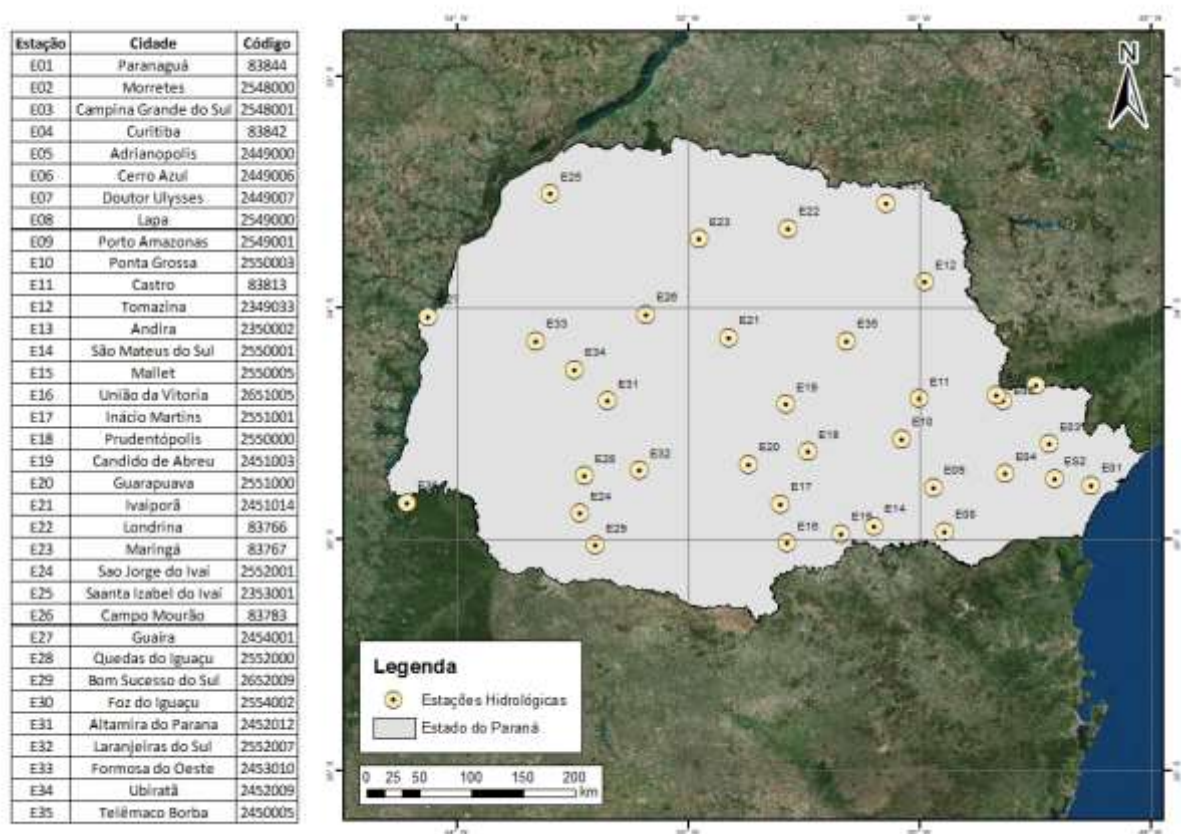


Figura 1 – Localização das estações hidrológicas no Paraná.

Os dados utilizados são os registros históricos das estações hidrológicas e hidrometeorológicas, bem como as saídas dos Modelos de Circulação Regional (RCM, em inglês). Os cenários gerados pelo RCM ETA compreendem o período base (1968 a 2005), RCP4.5 (2006 a 2099) e RCP8.5 (2006 a 2099). Os registros históricos são coletados na plataforma Hidroweb da Agência Nacional das Águas (ANA) e no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto

Nacional de Meteorologia (INMET). As simulações do RCM ETA são coletadas na plataforma PROJETA do Centro de Previsão Tecnológica (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As séries de RDI foram obtidas ajustando as distribuições de probabilidade LN2, Gama, Weibull e GEV I para todas as estações indicadas na Figura 1. Primeiramente foram analisados os ajustes das distribuições teóricas *versus* a empírica (Figura 2). Analisando as Funções de Distribuição Acumulada da Figura 2, verifica-se que os melhores ajustes são das distribuições Normal, LN2, Gama e Weibull. A distribuição GEV I possui o pior ajuste, indicando que deva ser desconsiderada das análises posteriores.

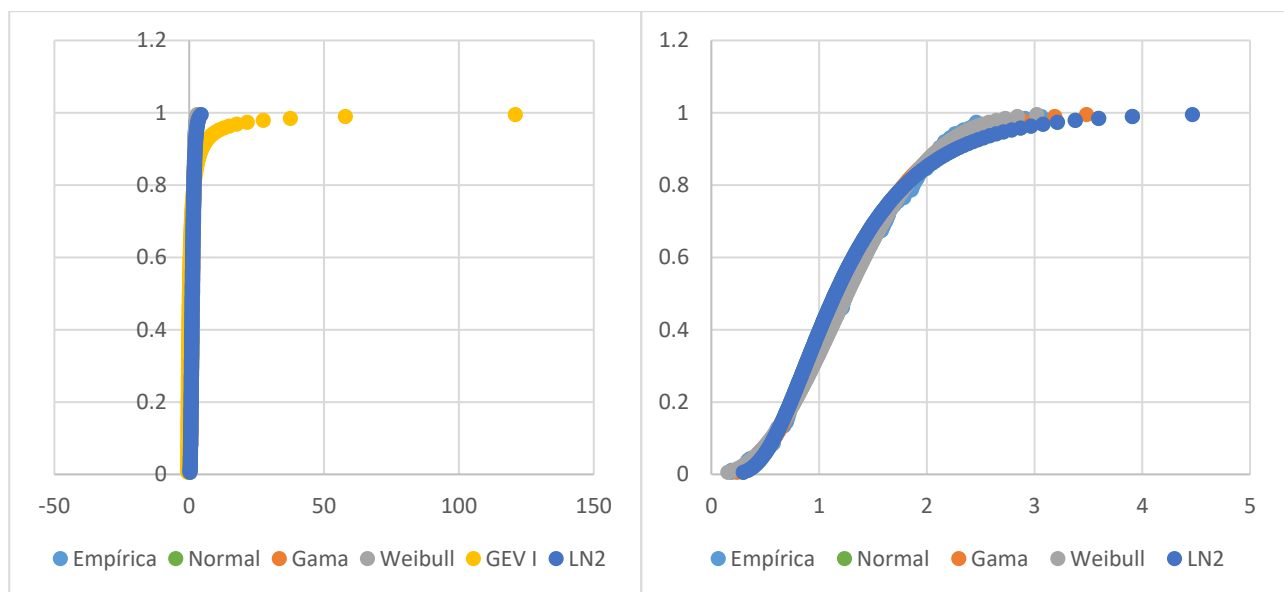


Figura 2 – Ajuste das distribuições teóricas *versus* empírica da estação E04.

As distribuições LN2, Gama e Weibull possuem ajustes visuais próximos e foram submetidas aos testes de AD e KS. Em todos foi considerada a quantidade de rejeites pela quantidade de aceites (falha em rejeitar a hipótese nula H_0) em duas etapas: (1) por estação hidrológica e (2) por agrupamento de meses. O resumo do percentual de rejeites pela quantidade de aceites é apresentado na Tabela 1, Tabela 2 e na Tabela 3. Uma quantidade de rejeites maior que a de aceites significa que a série de RDI não possui o melhor ajuste a esta distribuição. Procura-se então as séries com menor quantidade de rejeites para justificar a escolha da distribuição de probabilidade.

Analisando a Tabela 1 observa-se que a menor quantidade de rejeites *versus* aceites por estação hidrometeorológica no teste de AD é da distribuição Weibull com 58% dos menores valores, recomendando o ajuste desta às séries de RDI. Tal fato é observado para os quatro cenários (séries históricas observadas e período base e séries futuras RCP4.5 e RCP8.5). Seguindo a análise, a distribuição Gama é a segunda candidata (33%) para o ajuste e sendo a última a distribuição LN2 (8%). Analisando ainda a Tabela 1, observa-se que todas as estações apresentaram maior quantidade de aceites do que de rejeites para o teste KS, tornando o resultado deste teste inconclusivo.

Tabela 1 – Resumo de rejeites *versus* aceites por estação para os testes de Anderson-Darling (AD) e Kolmogorov-Smirnov (KS).

AD	LN2	GAM	WEIB	KS	LN2	GAM	WEIB
OBS HIST	14%	11%	23%	OBS HIST	0%	0%	0%
OBS SIM	89%	77%	43%	OBS SIM	0%	0%	0%
SIM 4.5	100%	100%	100%	SIM 4.5	0%	0%	0%
SIM 8.5	94%	94%	83%	SIM 8.5	0%	0%	0%
%	8%	33%	58%	%	Inconclusivo neste teste		

Tabela 2 – Resumo de rejeites *versus* aceites por agrupamento para o teste de Anderson-Darling (AD).

AD	HIST OBS			HIST SIM		
	LN2	GAM	WEIB	LN2	GAM	WEIB
AD3	100%	100%	97%	100%	100%	100%
AD6	66%	66%	66%	100%	97%	89%
AD9	37%	37%	34%	97%	74%	46%
AD12	23%	23%	26%	89%	86%	74%
AD18	6%	3%	0%	80%	77%	51%
AD24	9%	14%	26%	57%	49%	11%
AD48	3%	3%	6%	6%	3%	0%
%	36%	21%	43%	5%	5%	90%
AD	SIM 4.5			SIM 8.5		
	LN2	GAM	WEIB	LN2	GAM	WEIB
AD3	96%	96%	96%	100%	100%	100%
AD6	100%	100%	100%	100%	100%	100%
AD9	100%	100%	100%	100%	100%	100%
AD12	100%	100%	97%	91%	97%	97%
AD18	91%	89%	77%	74%	74%	71%
AD24	74%	71%	54%	91%	94%	54%
AD48	94%	94%	74%	14%	9%	3%
%	14%	14%	71%	29%	14%	57%

Analisando a Tabela 2 observa-se que a menor quantidade de rejeites *versus* aceites por agrupamento de meses no teste AD é da distribuição Weibull para todos os cenários. A segunda

candidata seria LN2 para a série histórica observada (36%) e para o cenário futuro RCP8.5 também seria a LN2 (29%). Para os cenários históricos simulados (período base) e simulados RCP4.5 tanto a distribuição LN2, quanto a distribuição Gama apresentaram o mesmo percentual de rejeites *versus* aceites, tornando inconclusiva a análise do segundo melhor ajuste para as séries de RDI.

Tabela 3 – Resumo de rejeites *versus* aceites por agrupamento para o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

KS	HIST OBS			HIST SIM		
	LN2	GAM	WEIB	LN2	GAM	WEIB
KS3	15%	6%	6%	7%	0%	0%
KS6	0%	0%	0%	9%	3%	0%
KS9	0%	0%	0%	0%	0%	0%
KS12	0%	0%	0%	3%	0%	0%
KS18	0%	0%	0%	0%	0%	0%
KS24	0%	0%	0%	0%	0%	0%
KS48	0%	0%	0%	0%	0%	0%
%	29%	36%	36%	19%	33%	48%
KS	SIM 4.5			SIM 8.5		
	LN2	GAM	WEIB	LN2	GAM	WEIB
KS3	91%	74%	43%	100%	100%	100%
KS6	26%	31%	34%	3%	6%	14%
KS9	37%	11%	3%	0%	0%	0%
KS12	0%	0%	0%	3%	0%	0%
KS18	0%	0%	0%	0%	0%	0%
KS24	0%	0%	0%	0%	0%	0%
KS48	0%	0%	0%	0%	0%	0%
%	33%	19%	48%	38%	31%	31%

Analisando a Tabela 3 observa-se que a menor quantidade de rejeites *versus* aceites por agrupamento de meses no teste KS é referente a 36% de frequência tanto para a distribuição Weibull, quanto para a distribuição Gama no cenário histórico observado. A distribuição LN2 aparece como a última colocada (29%) das menores quantidades de rejeites *versus* aceites no mesmo cenário. Para o período histórico simulado, a distribuição Weibull possui o melhor ajuste, visto que possui a menor quantidade de rejeites *versus* aceites (48%), seguida da distribuição Gama (33%) e da LN2 (19%). O cenário simulado RCP4.5 apresenta um resultado igual em termos de percentuais aos analisados no período histórico simulado (período base).

O período simulado RCP8.5 apresenta a distribuição LN2 como a candidata do ajuste das distribuições, com 38% das menores quantidades de rejeites *versus* aceites, seguida da Gama e da Weibull com valores iguais nos percentuais (31%), apresentando as duas como sendo as segundas candidatas a serem ajustadas neste cenário. Analisando todos os cenários e distribuições, a

distribuição Weibull é que apresenta o melhor ajuste, seguida da distribuição LN2 pela análise dos testes estatísticos.

CONCLUSÃO

As mudanças climáticas impactam nos recursos hídricos e estas podem ser responsáveis pela elevação de eventos extremos, como as secas. Estes eventos podem ser avaliados por meio de índices que indicam a severidade, duração e magnitude de uma seca e em suas respectivas séries são ajustadas distribuições de probabilidade.

Foram avaliadas as FDAs das quatro distribuições e conforme o ajuste visual das distribuições teóricas *versus* empírica, a distribuição GEV I foi descartada pois não se ajusta às séries de RDI para o Estado do Paraná. As análises posteriores, como os testes de aderência de AD e KS apresentaram menor percentual de rejeites da hipótese H_0 por estação hidrológica e por agrupamento de meses para a distribuição Weibull.

Os resultados apontaram que a distribuição Weibull possui o melhor ajuste entre as quatro distribuições avaliadas, enquanto que a distribuição LN2 possui o segundo melhor ajuste.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. (2013). “Köppen’s climate classification map for Brazil.” *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728.

IBGE (2019). “*Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*” Estatísticas.

IPCC (2013). “*Evaluation of Climate Models.*” *IPCC Climate Change*. v. 9, p.741–866.

KOUSARI, M. R.; DASTORANI, M. T.; NIAZI, Y.; et al. Trend Detection of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran Based on Implementation of Reconnaissance Drought Index (RDI) and Application of Non-Parametrical Statistical Method. *Water Resources Management*, v. 28, n. 7, p. 1857–1872, 2014.

- LPB, C. (2012). “*Project Final Report.*” Institut de Recherche pour le Développement.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. (1993). “*The relationship of drought frequency and duration to time scales.*” In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, p. 179–184.
- MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L. (2015). “*Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant.*” Journal of Hydrology: 116, Regional Studies, v. 4, p. 41–59.
- MMA, M. (2016). “*Cadastro nacional de unidades de conservação*”. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF.
- PALMER, W. C. (1965). “*Meteorological Drought.*” Washington, DC: U.S. Weather Bureau.
- SALAS, J. D.; RAJAGOPALAN, B.; SAITO, L.; BROWN, C. (2012). “*Special Section on Climate Change and Water Resources: Climate Nonstationarity and Water Resources Management.*” Journal of Water Resources Planning and Management, v. 138, n. 5, p. 385–388.
- SIENZ, F.; BOTHE, O.; FRAEDRICH, K. (2012). “*Monitoring and quantifying future climate projections of dryness and wetness extremes: SPI bias.*” Hydrology and Earth System Sciences, v. 16, n. July, p. 2143–2157.
- STAGGE, J. H.; TALLAKSEN, L. M.; GUDMUNDSSON, L.; VAN LOON, A. F.; STAHL, K. (2015). “*Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI).*” International Journal of Climatology, v. 35, n. 13, p. 4027–4040.
- TSAKIRIS, G.; VANGELIS, H. (2005). “*Establishing a drought index incorporating evapotranspiration.*” European Water, v. 9, n. 10, p. 3–11.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010). “*A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index.*” Journal of Climate, v. 23, n. 7, p. 1696–1718.