



**Impacto da Variabilidade Interanual da
Precipitação nos Reservatórios do Semiárido do Nordeste do Brasil**
Impact of the Interannual Variability of
Precipitation on the Reservoirs of the Semiarid Northeast Brazil Region

Felipe Jeferson de Medeiros¹; Kellen Carla Lima¹;
Darllin de Araújo Caetano¹ & Francisco Jânio de Oliveira Silva¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Climáticas, Campus Universitário, Caixa Postal 1524, Lagoa Nova, 59078-970. Natal, RN, Brasil

E-mails: felipetkd_@hotmail.com; kellen Carla@gmail.com; Darllin.meteoro@gmail.com; fjaniooliveira@gmail.com

Recebido em: 14/08/2018 Aprovado em: 19/11/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_731_741

Resumo

Os principais reservatórios dos Estados que compõem o Nordeste do Brasil podem apresentar problemas técnicos e econômicos de acordo com as condições meteorológicas. Desta forma, esta pesquisa descreve como os volumes armazenados do maior reservatório dos Estados do Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN) e Paraíba (PB) foram afetados em dois anos extremos de precipitação. Para tanto, utilizam-se análise subjetiva e a técnica estatística da correlação cruzada para inferir como as variações interanuais dos reservatórios ocorreram em virtude da distribuição espaço-temporal da precipitação. Os resultados mostraram que os impactos hidrometeorológicos apresentaram relação direta com os anos extremos, com o volume anual armazenado variando +61,37 (-18,01), +37,30 (-33,11) e +35,09 (-29,59) % no ano 2004/chuvoso (2012/seco) nos reservatórios Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB), respectivamente. Por intermédio do método da correlação cruzada, defasagem entre a precipitação dos anos extremos e o nível dos reservatórios, foi possível inferir para o ano chuvoso de 2004, que os aumentos no volume armazenado dos três reservatórios ocorreram na lag 0, indicando que os excessos de precipitação no semiárido norte influenciaram no nível dos reservatórios Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB) no mesmo mês de ocorrência. No entanto, no ano seco de 2012, a defasagem nos três reservatórios foi registrada no lag -2, indicando que as chuvas influenciam no nível do reservatório somente após dois meses. Portanto, esta pesquisa apresenta aos gestores como os maiores reservatórios dos seus estados podem se comportar em anos extremos de precipitação, servindo como uma ferramenta para o planejamento de controle do uso da água.

Palavras-chave: recursos hídricos; nordeste do Brasil; seca; precipitação; correlação cruzada

Abstract

The main reservoirs of the Northeast Brazil may present technical and economic problems according to the meteorological conditions. In this sense, the aim of this present paper is to analyze how the volumes stored in the largest reservoir of the states of Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN) and Paraíba (PB) were affected in two contrasting extreme years of precipitation. It was used subjective analysis and the cross-correlation statistical technique to infer how the annual variations of the reservoirs occurred due to the spatiotemporal variability patterns of the precipitation. The results showed that the hydrometeorological impacts were directly related to the extreme precipitation years, with the annual volume stored varying +61.37 (-18.01), +37.30 (-33.11) and +35.09 (-29.59) % in the wet/2004 (dry/2012) year in the Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) and Coremas (PB) reservoirs, respectively. According to the cross-correlation, it was verified that in the wet year, all the reservoirs presented an increase of stored in lag 0, indicating that the above-normal precipitation in the northern semi-arid influenced the reservoirs' levels on the same month of occurrence. On the other hand, in the dry year, the cross-correlation was higher in the lag -2, indicating that the below-average precipitation influenced the reservoirs' levels after two months. Therefore, these results indicates to decision makers how the largest reservoirs of their states can behave in extreme precipitation years, serving as a tool for water resources management at the use control.

Keywords: water resources; northeast Brazil; drought; precipitation; cross-correlation

1 Introdução

Eventos hidrológicos extremos, como enchentes e secas, têm um impacto profundo na sociedade e afetam consideravelmente a segurança humana, o abastecimento de água, a produção de alimentos e a **geração de energia** (Getirana, 2016; Ye *et al.*, 2016). Em particular para o Brasil, apesar do país apresentar um enorme potencial hídrico, com estimativas em torno de 12% da disponibilidade de água doce do planeta e 18% do potencial de água de superfície, percebe-se uma enorme desigualdade regional na distribuição dos recursos hídricos, com aproximadamente 80% do volume total das águas concentrados na região Norte, enquanto que outras regiões, como o Nordeste, detêm em torno de apenas 5% (Machado, 2003; Getirana, 2016).

Essa baixa capacidade **hídrica observada no Nordeste do Brasil (NEB) é resposta aos baixos acumulados pluviiais, elevadas taxas de evaporação e episódios frequentes de secas que assolam a região** (Marengo *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017). Todos esses fatores tornam a oferta de água limitada, sendo que esse recurso pode ser maximizado/minimizado em anos extremos de precipitação (Bezerra *et al.*, 2018). Essa variabilidade anual da precipitação pode trazer consequências aos indicadores sociais e econômicos, haja vista que a sobrevivência, a permanência da população e o desenvolvimento agrícola dependem essencialmente da oferta de água (Paz *et al.*, 2000).

Vários estudos têm evidenciado como os recursos hídricos na região Nordeste vem sendo afetados em anos com marcantes anomalias de precipitação (Marengo *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2017; Azevedo *et al.*, 2018 e Rodell *et al.*, 2018). Por exemplo, de outubro de 2011 a setembro de 2012 os dias com déficit hídrico foram superiores a 70% em grande parte da área do semiárido norte, resultando em estresse **hídrico e menor suprimento de água para a vegetação**, de acordo com Marengo *et al.* (2017). A pesquisa de Rodell *et al.* (2018) evidenciou que o armazenamento de água terrestre no NEB entre abril de 2002 a março de 2016 apresentou uma tendência negativa de 2 cm.-ano⁻¹ devido aos episódios de seca que afetaram a região. Martins *et al.* (2017) mostram que a bacia do rio São Francisco atingiu em janeiro

de 2016 apenas 5% do seu volume de capacidade **máxima** e, além disso, afirmam que outros inúmeros reservatórios do NEB atingiram níveis semelhantes, causando escassez de água em vários municípios.

Toda essa disponibilidade hídrica está condicionada aos fenômenos de interação oceano-atmosfera verificados nos Oceanos Pacífico e Atlântico. Os principais sistemas que ocorrem na região tropical modulando os anos extremos de precipitação no NEB estão relacionados aos padrões de circulação atmosférica em escala global associado às anomalias do gradiente inter-hemisférico de temperatura da superfície do mar do Atlântico (GradATL) (Moura & Shukla, 1981; De Souza *et al.*, 2005) e pelas fases quente (El Niño) e fria (La Niña) do fenômeno climático global El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Coelho *et al.*, 2002; Timmermann *et al.*, 2018), que agem em diferentes formas favorecendo ou desfavorecendo as atividades convectivas. Em anos de El Niño, por exemplo, um dos ramos descendentes da célula de Walker situa-se sobre o NEB, suprimindo os mecanismos de convecção que produzem chuvas (Grimm, 2003). Nos anos de La Niña, por outro lado, anomalias positivas de precipitação são observadas no norte do NEB, em decorrência das perturbações nas circulações de Walker e Hadley (Grimm, 2004).

Essas interações oceano-atmosfera afetam principalmente a posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema meteorológico do NEB (De Souza *et al.*, 2005; Rodrigues & McPhaden, 2014). Quando a ZCIT encontra-se ao sul da posição climatológica, normalmente observa-se que os acumulados pluviométricos na estação chuvosa apresentam acentuada intensidade e boa distribuição espacial, contribuindo para aumentar os níveis dos reservatórios. Na situação inversa, isto é, com a ZCIT deslocada para o norte, as consequências são de chuvas escassas e diminuição dos recursos hídricos.

Sendo assim, dada a relação entre a precipitação e os reservatórios, a pesquisa tem os seguintes questionamentos: Como comporta-se a distribuição espaço-temporal da precipitação em anos extremos de precipitação no NEB? E sobre um ano normal, como ocorre esta distribuição? Qual o impacto dessa distribuição no armazenamento dos reservatórios?

Diante desse contexto, o objetivo do trabalho é comparar o volume armazenado do maior reservatório dos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba em dois anos extremos de precipitação (chuvoso e seco), juntamente com um ano dentro da média climatológica (normal).

2 Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo desta pesquisa compreende a região do semiárido norte (2°S - $9,5^{\circ}\text{S}$ e 41°W - $34,7^{\circ}\text{W}$) (Oliveira *et al.*, 2017), em especial os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, cujos maiores reservatórios hídricos são o Açude do Castanhão, a barragem Armando Ribeiro Gonçalves e o açude de Coremas, respectivamente (Figura 1). Em função da localização em municípios do semiárido brasileiro, esses reservatórios tendem a apresentar como características, segundo o Artigo 2 da resolução

n^o107/2017, precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm e/ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Apesar desses fatores climáticos limitantes, de acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), dezenas de cidades e mais de 1 milhão de pessoas são abastecidas pelas águas desses reservatórios.

Uma outra característica importante da região é a alta variabilidade espaço-temporal da precipitação (Silva, 2004; Medeiros *et al.*, 2017). De modo geral, os maiores acumulados pluviais ocorrem nos meses de Março-Abril-Maio (MAM) e os menores nos meses de Setembro-Outubro-Novembro (SON) (Marengo *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2017). Os fenômenos atmosféricos causadores de precipitação mais comuns nessa área são a ZCIT, Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), convergência de umidade (brisas e ventos alísios) e convecção local (Palharini & Vila, 2017).

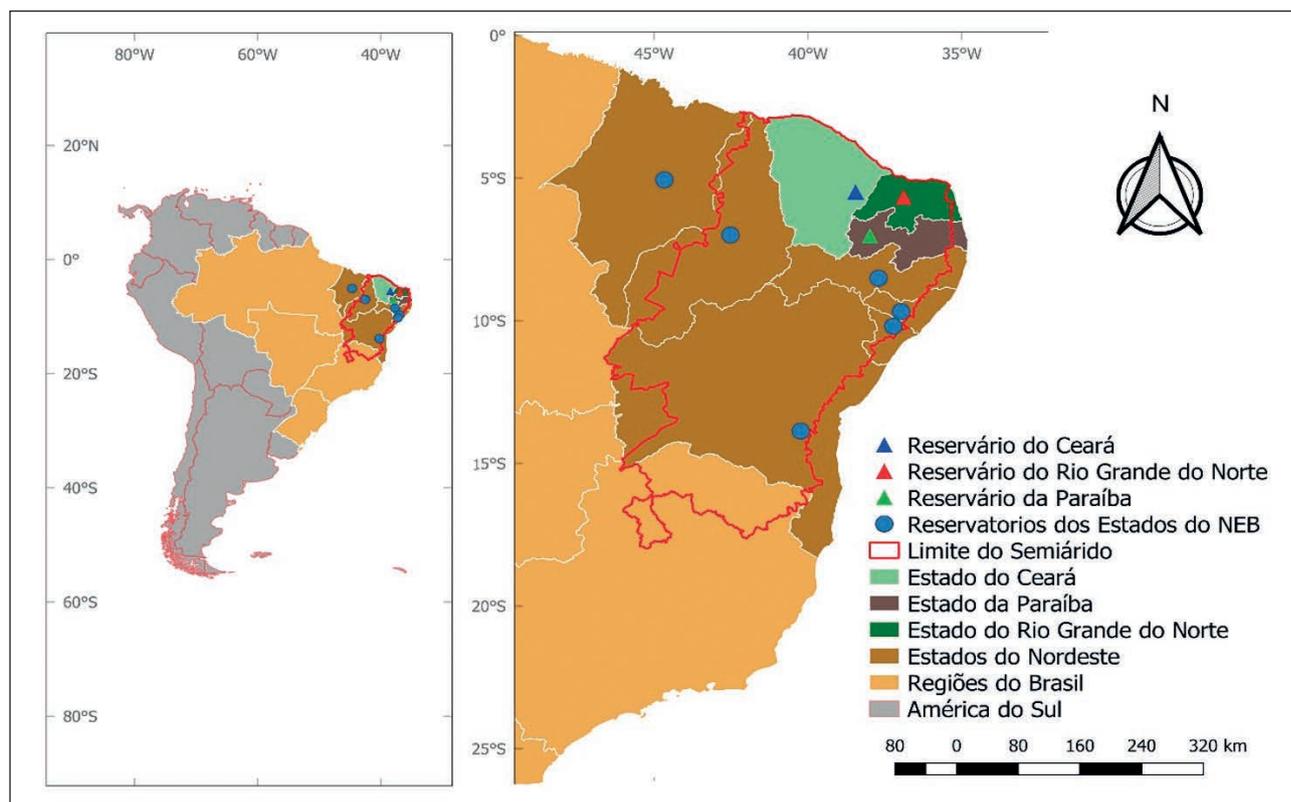


Figura 1 Localização espacial do maior reservatório de cada Estado do Nordeste do Brasil (à esquerda), com destaque aos três reservatórios analisados nesse estudo (à direita).

2.2 Dados

Os dados de precipitação aqui utilizados foram os disponibilizados por Xavier *et al.* (2016). Esses dados possuem discretização diária e são distribuídos em pontos de grade com uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ compreendendo o período de 1980 a 2015. Esses dados foram gerados por meio do método de interpolação *angular distance weighting* (Hofstra & New, 2009) utilizando 3.625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas distribuídas por todo o território brasileiro.

Os dados dos reservatórios foram obtidos através da ANA por intermédio do portal HidroWeb e Olho N'água do Instituto Nacional do Semiárido (INSA). A princípio, pretendia-se coincidir os períodos dos dados de precipitação com os do volume armazenado no maior reservatório de cada Estado do Nordeste do Brasil, isto é, de 1980 a 2015, no entanto, devido à escassez e a enorme quantidade de falhas nos dados diários hídricos (Tabela 1), o período de estudo restringiu-se aos anos de 2002 a 2015 para somente três reservatórios, que estão localizados na área do semiárido norte.

2.3 Metodologia

Neste trabalho, são utilizados os dados de precipitação para construir o gráfico de anomalia que ilustra a ocorrência de anos com chuvas acima e abaixo da média. Com base nesses anos, serão selecionados os anos extremos bem como o ano normal (dentro da média climatológica), que servirá como parâmetro de controle. O período de 1980-2009 foi considerado climatológico, e, a partir dele, realizou-se o cálculo das anomalias (Figura 2).

Em seguida, são construídas as séries temporais do maior reservatório de cada Estado do Nordeste do Brasil. No entanto, logo que isso foi feito, visualizou-se a grande carência de dados que existe diariamente, conforme pode ser notado na Tabela 1, nos quais seis dos nove maiores reservatórios apresentam menos de 20% dos dados, tornando inviável até mesmo aplicar um método para preenchimento de falhas. A fim de solucionar esse problema e permitir a avaliação da relação do volume armazenado nos reservatórios com

a distribuição espacial da precipitação, considerou-se um valor medido de capacidade próximo ao final do mês como representativo. Desta forma, conseguiu-se obter a série temporal de três reservatórios, o Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB), cujas capacidades hídricas máximas são: 6.700, 2.400, e 1.358 hm^3 (Tabela 1), respectivamente.

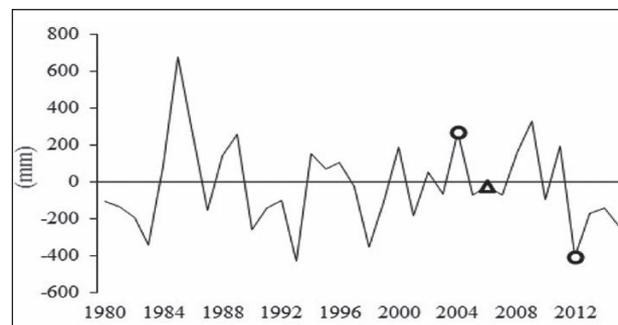


Figura 2 Anomalia de precipitação anual na área do semiárido norte. Os marcadores ○ e △ indicam os anos extremos e o ano normal, respectivamente, selecionados para o estudo.

ESTADO	BACIA	RESERVATÓRIO	CAPA-CIDADE (hm^3)	% DADOS
RN	ALTO PIRANHAS	ENG. ARM. RIBEIRO GONÇALVES	2.400,00	57,79
AL	S.FCO./ TRAIPIU	JARAMATAIA	19,01	0,23
CE	ALTO JAGUARIBE	CASTANHÃO	6.700,00	49,36
BA	CONTAS	PEDRA	1.640,00	16,00
PB	PIANCÓ	COREMAS	1.358,00	72,20
PB	MOXOTÓ	ENG. FRANC. SABOIA	504,00	7,22
PI	CANINDÉ	SALINAS	387,41	3,49
SE	SÃO FRANCISCO	TRÊS BARRAS	7,98	0,49
MA	GRAJAÚ/ MEARIM	FLORES	1.014,00	1,77

Tabela 1 Informações da capacidade hídrica e porcentagem de dados do maior reservatório de cada Estado do NEB no período de 01 de Janeiro de 2002 a 31 de Dezembro de 2015.

A partir do gráfico das anomalias de precipitação e da série temporal dos três reservatórios, decidiu-se selecionar os anos de 2004 (chuvoso), 2006

(normal) e 2012 (seco) para visualizar o impacto hidrometeorológico das mudanças na distribuição espaço-temporal da precipitação no volume armazenado dos reservatórios. Esses três anos foram selecionados de maneira estratégica para realçar a relação entre precipitação versus volume armazenado. Inclusive, esse é o principal fator que justifica a escolha do ano de 2004, que embora não seja o mais chuvoso da série temporal, foi selecionado por não apresentar influência positiva da precipitação dos anos anteriores no volume inicial dos reservatórios, como aconteceria caso o ano de 2009 fosse escolhido, por exemplo, dado que o ano de 2008 também apresentou anomalias positivas de precipitação.

O impacto dos anos extremos na disponibilidade hídrica é inferido por intermédio da análise subjetiva da variação anual do volume armazenado, bem como por meio da função de correlação cruzada (CC) (Equação 1), que é uma técnica estatística que mede a correlação entre as séries temporais em diferentes períodos de tempo (Vandaele, 1983).

$$\hat{\rho}_{xy}(h) = \frac{\sum_{t=1}^{n-h} (x_{t+h} - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{n^{-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (1)$$

onde x e y são as séries temporais; \bar{x} e \bar{y} são as médias; h é o coeficiente de defasagem entre as séries; e n é o número de observações.

Essa técnica já vem sendo aplicada para diversos fins, tais como, interpretação do comportamento diário da precipitação (Silva *et al.*, 2006), impacto das mudanças climáticas nos vetores de transmissão da dengue (Banu *et al.*, 2014) e índices de secas hidrológicas e meteorológicas (Ye *et al.*, 2016).

3 Resultados e Discussão

Os anos de 2004, 2006 e 2012 apresentaram características distintas com relação à precipitação na área do semiárido norte conforme pôde ser observado no gráfico de anomalia anual (Figura 2). Em 2004 houve uma anomalia positiva de 270,1 mm, enquanto que em 2012 ocorreu uma anomalia negativa de 404,9 mm. Por outro lado, em 2006 o acumulado pluviométrico anual foi próximo da média histórica, apresentando anomalia de apenas -23,9 mm. Esses

valores possibilitaram os anos de 2004, 2006 e 2012 serem classificados como chuvoso, normal e seco, respectivamente.

A distribuição espacial dos acumulados anuais de precipitação desses anos extremos e normal são apresentados na Figura 3. Visualiza-se que a precipitação no Nordeste do Brasil mostra uma alta variabilidade espacial, com algumas localidades apresentando acumulados inferiores a 500 mm enquanto que em outras regiões são registradas chuvas anuais superiores a 1800 mm. Especificamente para a área do semiárido norte, os totais pluviométricos anuais entre os anos foram iguais a 1027,4; 736,1 e 351,9 mm em 2004, 2006 e 2012, respectivamente (Tabela 2).

Ainda de acordo com a Figura 3, verifica-se que os acumulados anuais de precipitação observados nas regiões circunvizinhas aos reservatórios do CE, RN e PB apresentaram padrões heterogêneos entre si. O esperado para a região, com base no ano normal de 2006, é que os acumulados anuais sejam em torno de 600 a 900 mm nos reservatórios do Castanhão (CE) e Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e que em Coremas (PB) seja na faixa de 900 a 1200 mm. No entanto, a partir da Figura 3, constata-se que nas proximidades dos reservatórios do Ceará e do Rio Grande do Norte foram registrados totais pluviométricos superiores no ano de 2004 em comparação com 2006, isto é, acima de 900 mm. No reservatório da Paraíba, apesar da distribuição espacial indicar a mesma faixa categórica (900 a 1200 mm), o volume de chuva em 2004 foi cerca de 150 mm superior ao de 2006. Em contrapartida, no ano de 2012 visualiza-se que houve uma queda acentuada dos acumulados pluviométricos nos três reservatórios, com valores inferiores a 600 mm no Castanhão (CE) e Coremas (PB) e 300 mm no Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN).

Na Figura 4 é apresentada de modo espacial a distribuição sazonal da precipitação dos três anos verificados, 2004 (A), 2006 (B) e 2012 (C). Observa-se que a distribuição espaço-temporal da precipitação no semiárido norte é bem distinta entre os anos, principalmente nas estações do verão (Dezembro-Janeiro-Fevereiro/DJF) e outono (MAM). Além disso,

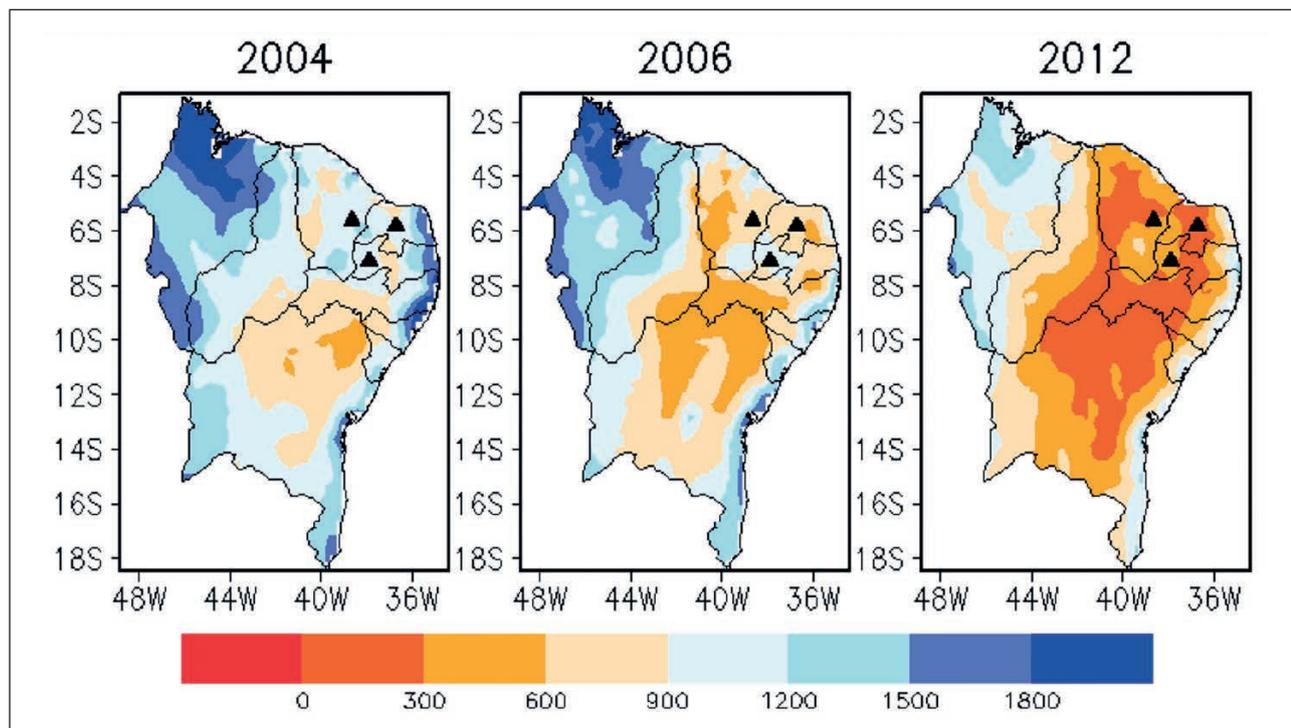


Figura 3 Acumulado anual de precipitação no Nordeste do Brasil nos anos de 2004, 2006 e 2012. Os marcadores ▲ identificam os reservatórios do Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB).

verifica-se que a estação mais chuvosa de cada ano extremo (2004 e 2012) e normal (2006) não coincide entre si. Em 2004, diferentemente da climatologia esperada para a região, a estação mais chuvosa ocorreu no verão (Tabela 2), enquanto no ano de 2012, devido à grave seca que assolava o semiárido norte, considerada a pior dos últimos anos (Rodrigues & McPhaden, 2014; Marengo *et al.*, 2017), todas as estações do ano apresentaram baixos volumes de chuvas. O ano de 2006 por outro lado, apresentou as maiores intensidades de precipitação na estação do outono, coincidindo com o comportamento climatológico esperado para a região (Moura & Shukla, 1981).

A partir da análise sazonal (Figura 4), visualiza-se que a precipitação no verão de 2004 foi aproximadamente 5 mm/dia maior em comparação com os anos de 2006 e 2012. Na estação do outono, a mais chuvosa da região, as maiores intensidades (> 6 mm/dia) foram registradas no ano de 2006, com destaque para as porções central e oeste dos estados do RN e PB e faixa norte do CE, que abrangem a localização espacial do maior reservatório dos seus respectivos Estados (Figura 1). Possivelmente, essas precipitações

no outono de 2006 estiveram associadas às atividades convectivas da ZCIT, que atinge sua posição mais ao sul nesta época do ano (Hastenrath & Lamb, 1977). No outono 2004, observa-se que as intensidades de precipitação nas regiões próximas aos reservatórios foram inferiores quando comparadas ao ano de 2006, sendo em torno de 4 mm/dia. No outono de 2012, embora estivesse configurado um padrão oceânico de La Niña no oceano Pacífico, que tende a causar chuvas acima da média no semiárido norte (Marengo *et al.*, 2013), verifica-se que as intensidades de precipitação foram inferiores a 3 mm/dia. Esse baixos acumulados pluviométricos provavelmente estiveram associados ao fortalecimento dos ventos alísios de sudeste, que gera um gradiente inter-hemisférico positivo da superfície do mar do Atlântico, favorecendo o deslocamento da ZCIT para o norte, implicando em déficit de precipitação na porção norte do Nordeste (Rodrigues & McPhadenm 2014). Comparando o outono de 2012 (ano seco) com o de 2006 (ano normal) nota-se como a distribuição espaço-temporal da precipitação de 2012 foi inferior ao comportamento esperado. Com isso, sabendo da relação direta existente entre a precipitação e o armazenamento de água terrestre (Rodell *et al.*,

2018), espera-se que os três reservatórios no ano de 2012 tenham apresentado uma diminuição dos estoques de águas superficiais, dado as baixas intensidades de precipitação verificadas na estação mais chuvosa (MAM), que é a principal responsável por encher os reservatórios no interior do semiárido norte.

No inverno (Julho-Julho-Agosto/JJA), apesar da predominância dos baixos valores de precipitação no interior do continente em todos os anos (< 3mm/dia), observa-se que na região litorânea ocorreram expressivos registros de chuvas, associados especialmente a eventos de Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), que é o principal sistema meteorológico atuante nessa estação no litoral do Nordeste (Gomes *et al.*, 2015). O inverno mais chuvoso foi registrado no ano de 2004. Por outro lado, na primavera (Setembro-Outubro-Novembro/SON), o comportamento é homogêneo em toda região nos três anos examinados (Figuras 4 A, B e C). A primavera é caracterizada pelos baixos acumulados de precipitação, conforme pode ser visto na tabela 2, sendo considerada a estação seca do semiárido norte (Oliveira *et al.*, 2017).

Analisando a variação anual do armazenamento do maior reservatório do CE, RN e PB nos anos extremos de 2004 e 2012, bem como no ano normal de 2006 (Figura 5), verifica-se como a variabilidade anual da precipitação influencia a disponibilidade

	2004	2006	2012
Verão (DJF)	582,3	128,1	150,9
Outono (MAM)	237,1	430,1	97,8
Inverno (JJA)	182,5	135,6	88,1
Primavera (SON)	25,5	42,1	13,4
Anual	1027,4	736,1	351,6

Tabela 2 Acumulados pluviométricos sazonais e anual na área do semiárido norte nos anos investigados.

hídrica nos Estados do Nordeste do Brasil. Pode-se observar que nos anos considerados normal (2006) e chuvoso (2004) houve aumento no volume armazenado em todos os três reservatórios. Em 2012, detecta-se uma redução do corpo d'água nos reservatórios devido à diminuição da precipitação, corroborando com resultados encontrados por Marengo *et al.* (2017) para o reservatório de Três Marias, Martins *et al.* (2017) para bacia do rio São Francisco e por Azevedo *et al.* (2018) para o reservatório de Sobradinho.

As maiores variações no ano normal (2006) ocorreram no reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN). No final de 2006, o reservatório continha 83,95% da capacidade máxima, o que representou um aumento de 15,6% em comparação ao final do mês de janeiro. A variação anual no reservatório de Coremas (PB) também foi similar ao do RN. O reservatório passou de 74,01% em janeiro para

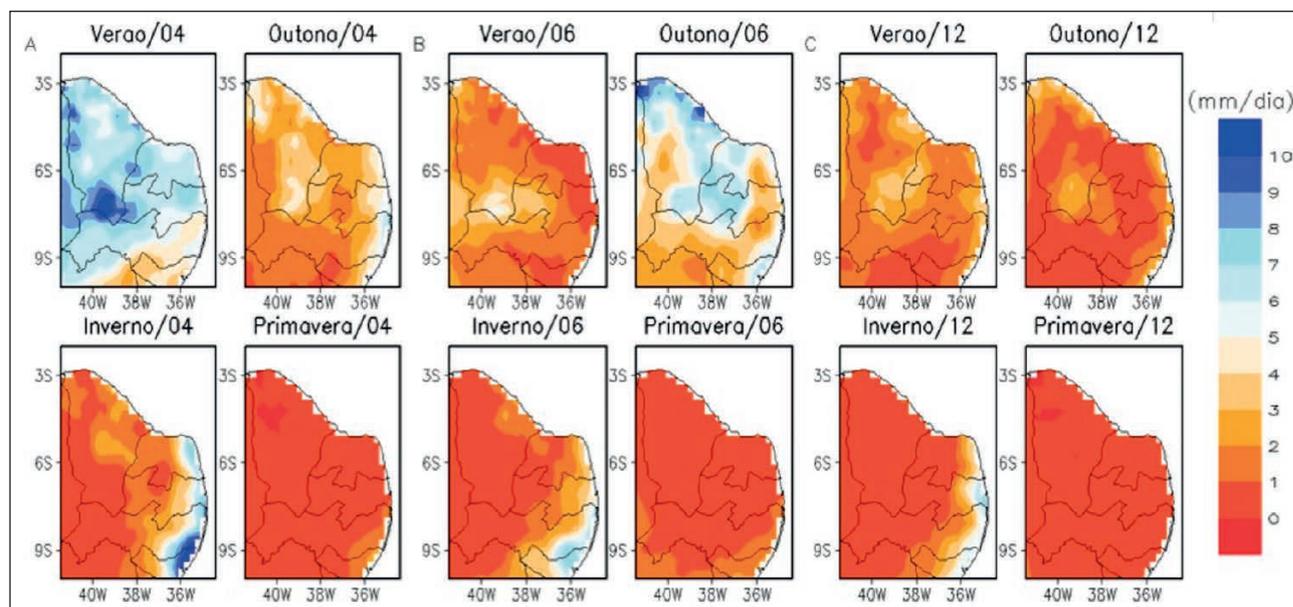


Figura 4 Distribuição sazonal da precipitação no semiárido norte durante os anos de (A) 2004, (B) 2006 e (C) 2012.

86,74% ao término do mês de dezembro, representando um incremento de 12,73%. O reservatório do Castanhão (CE) apresentou uma variação menor, de apenas 3,65%, aumentando sua capacidade de 56,62% para 60,27%. Todos esses incrementos representam valores inferiores tanto a média como o desvio padrão da série temporal de cada reservatório analisado (Tabela 3).

No ano chuvoso (2004), o aumento anual do volume armazenado foi superior a 30% em todos os reservatórios (Figura 5). Destaca-se a recarga d'água verificada no Castanhão (CE), que saltou de 4,73% para 66,10%, o que representa um acréscimo de 4.112 hm³ de água. Esse aumento de 61,67% no volume hídrico no ano de 2004 corresponde a um total superior a água média disponível que o reservatório apresentou no período de 2002 a 2015 (Tabela 3). Nos reservatórios Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB) os volumes armazenados subiram de 44,55% para 81,85% e de 51,65% para 86,74%, respectivamente. Ressalta-se que essas elevações nos estoques de águas superficiais beneficiam tanto a população urbana (por meio da distribuição de água potável para uso domiciliar e industrial, por exemplo) como a rural (para a prática das atividades agrícolas).

Em 2012, entretanto, os baixos acumulados de precipitação em todas as estações do ano (Figura 4) ocasionaram a diminuição do volume armazenados nos três reservatórios analisados (Figura 5). A diminuição percentual dos corpos d'água nos reservatórios do RN e PB foi similar, aproximadamente 30%, o que representa uma perda de 722,64 hm³ e 401,84 hm³, respectivamente. Em Coremas (PB), a variação anual foi inferior a 20%, diminuindo de 73,62% em janeiro para 55,61% ao final de dezembro.

Em suma, relacionando o incremento e decréscimo da precipitação nos anos extremos em comparação ao ano normal e seus impactos em relação aos reservatórios, observa-se que com chuvas de 32,3% acima da média no ano de 2004, o reservatório do Castanhão (CE) aumentou sua capacidade em 61,37%. No reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) as chuvas de 21,5% acima da média em 2004, implicou em um aumento de 37,7% no corpo hídrico. Já em Coremas (PB), apesar das chuvas no ano de 2004 ficarem apenas 7,1% acima da média, o

reservatório apresentou uma recarga d'água de 35,09%. No ano considerado seco (2012), como as chuvas foram abaixo da média nos três reservatórios analisados, a situação do volume armazenado nos reservatórios reverteu-se, apresentando um quadro de diminuição, corroborando com os resultados de Azevedo *et al.* (2018). As chuvas de 74; 74,1 e 65% abaixo da média, implicou em uma diminuição de -18,01; -33,11 e -29,59% na capacidade dos reservatórios Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB), respectivamente.

	Castanhão (CE)	Eng. Arm. Ribeiro Gonçalves (RN)	Coremas (PB)
Média	52,5	70,2	71,2
Desvio Padrão	26,1	23,0	23,1

Tabela 3 Média e desvio padrão em porcentagem (%) do volume armazenado do maior reservatório dos estados do Ceara, Rio Grande do Norte e Paraíba entre 2002 e 2015.

Esses resultados reforçam a importância do monitoramento hidrometeorológico e a necessidade do uso consciente da água na região, haja vista a grande variabilidade de armazenamento hídrico que ocorreu nos anos extremos analisados. Uma outra questão que merece atenção são os cenários de mudanças climáticas propostos pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), que apontam para um aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação e de seca na região do semiárido norte (IPCC 2014; Marengo & Bernasconi, 2015; Oliveira *et al.*, 2017). Caso isso se confirme, espera-se que as variações dos corpos hídricos desses três reservatórios apresentem uma taxa anual similar às expostas nesse trabalho de maneira mais frequente. Desta forma, os resultados aqui apresentados exibem potencial para utilização como instrumento para gerar políticas públicas no setor de gerenciamento hídrico.

Além da quantificação subjetiva do aumento/diminuição do volume armazenado nos reservatórios em função da distribuição espaço-temporal da precipitação (Figura 5), o método da correlação cruzada foi utilizado para definir qual a defasagem entre a precipitação dos anos extremos e o nível dos reservatórios (Figura 6). De acordo com a Figura 6, observa-se que os valores dos coeficientes de defasagem (lag) que maximizaram a correlação cruzada no ano chuvoso (2004) e no ano seco (2012) foram diferentes. Em 2004, verifica-se que as maximizações nos três reservatórios ocorreram no

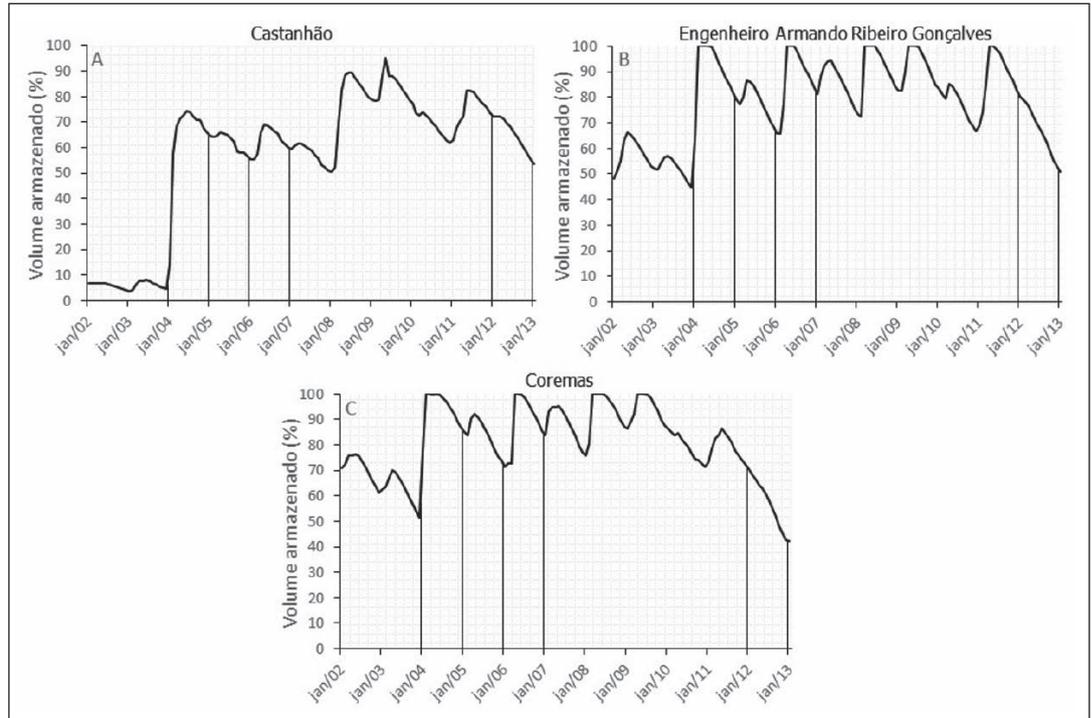


Figura 5
 Variação anual do armazenamento do maior reservatório dos Estados do (A) Ceará, (B) Rio Grande do Norte e (C) Paraíba durante os anos chuvoso (2004), normal (2006) e seco (2012).

lag 0, indicando que os excessos de precipitação no semiárido norte influenciaram o nível dos reservatórios Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB) no mesmo mês de

ocorrência. Em 2012, por outro lado, a defasagem nos três reservatórios é registrada no lag -2, indicando que as chuvas influenciaram no nível do reservatório somente após dois meses.

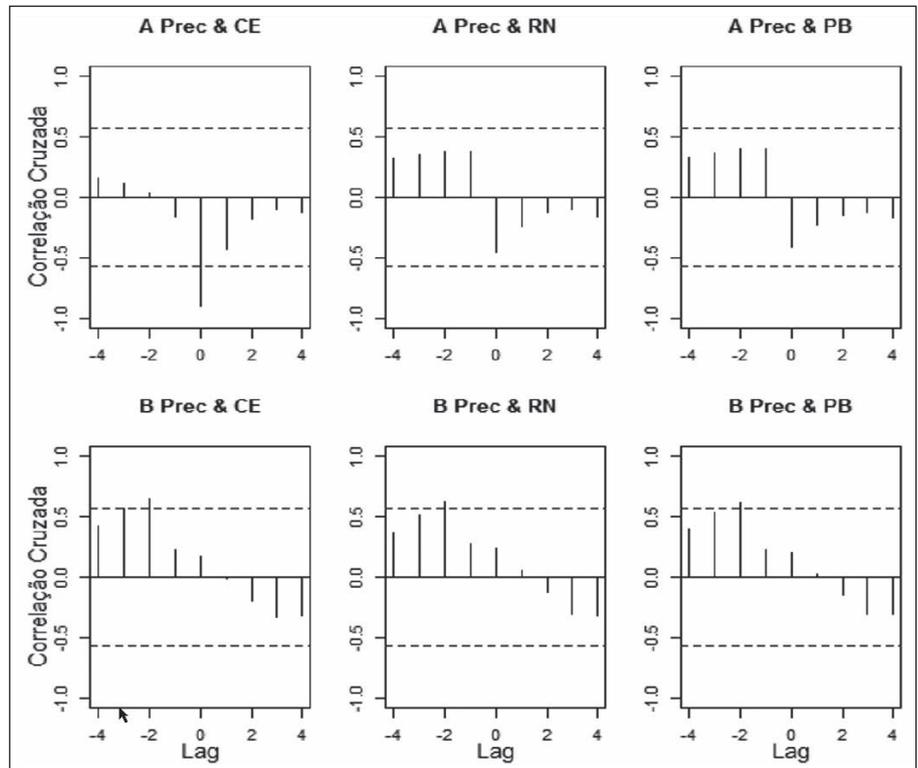


Figura 6 Correlação cruzada entre o acumulado mensal de precipitação no semiárido norte do Brasil e a variação anual do armazenamento do principal reservatório dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba durante os anos de (A) 2004 e (B) 2012.

A distribuição mais regular e intensa da precipitação no ano chuvoso são fatores que possivelmente explicam essa resposta imediata do aumento dos níveis dos reservatórios. Além disso, com o solo mais úmido o escoamento superficial é otimizado, favorecendo o transporte mais rápido da água na superfície terrestre em direção aos reservatórios (Knapp *et al.*, 2008). Em contrapartida, no ano seco, como o solo encontra-se muito insaturado, é necessário um tempo maior até que o lençol freático seja reabastecido e o nível do reservatório comece a aumentar, justificando a defasagem encontrada.

Essa informação do conhecimento das defasagens mostra-se como uma ferramenta essencial para o planejamento de atividades em diversos setores da sociedade, tais como a, agropecuária e a geração de energia elétrica, pois tomadas de decisões podem ser aplicadas com base no tempo de resposta em que os reservatórios reagem às condições pluviométricas.

4 Conclusões

A questão hídrica no Nordeste do Brasil é uma temática pertinente e de amplo interesse social e econômico, dado as condições climáticas adversas da região. Nesse sentido, este trabalho buscou relacionar a precipitação em anos extremos com o incremento/decremento do depósito d'água em reservatórios inseridos no semiárido norte.

A partir da análise realizada, constatou-se como os volumes armazenados do maior reservatório dos Estados do Ceará (Castanhão), Rio Grande do Norte (Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves) e Paraíba (Coremas) são afetados pela variabilidade anual da precipitação em dois anos extremos, em comparação a um ano dentro da média climatológica. A partir da escolha dos anos de 2004, 2006 e 2012 observou-se que a distribuição espaço-temporal da precipitação no semiárido norte mostrou características distintas entre si. O ano normal (2006) apresentou um acumulado anual de 736,1 mm, com as maiores intensidades ocorrendo no outono austral, que climatologicamente é a estação mais chuvosa da região. No ano chuvoso (2004), o acumulado anual foi superior 28,4% em relação ao ano normal, com as maiores intensidades sendo verificadas no verão austral. Por outro lado, em 2012 (ano seco), o acumulado anual foi inferior a 400 mm, com todas as estações do ano apresentando baixas intensidades de precipitação (< 4 mm/dia).

Relacionando a distribuição espaço-temporal

da precipitação com os impactos nos reservatórios, corrobora-se que os volumes armazenados nos reservatórios do Castanhão (CE), Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Coremas (PB) exibiram relação direta com os anos extremos de precipitação. Os resultados indicaram que no ano extremo chuvoso houve uma maior variação anual no volume armazenado em todos os três reservatórios analisados, em comparação com o ano seco. Além disso, observou-se que no reservatório do Castanhão (CE), a boa intensidade da precipitação, em especial no verão, contribuiu para elevar o armazenamento em 61,37%, melhorando assim a disponibilidade de água no Estado, que sofre frequentemente com a escassez hídrica.

Além da análise subjetiva, utilizou-se a técnica estatística da correlação cruzada para medir o tempo de resposta entre a distribuição da precipitação e o acréscimo/decrécimo do armazenamento hídrico nos reservatórios. Observou-se que no ano chuvoso, o impacto hidrometeorológico ocorreu instantaneamente (lag 0), isto é, a precipitação contribuiu para aumentar os níveis hídricos no mesmo mês de ocorrência. Em contrapartida, no ano seco, o efeito da precipitação foi visualizado somente após dois meses (lag -2), pois como o solo encontrava-se muito seco, foi necessário um tempo maior até que o lençol freático fosse reabastecido e o escoamento superficial tornasse mais eficiente.

Estes resultados podem viabilizar um melhor planejamento de ação e uso dos recursos hídricos nesses Estados do Nordeste, uma vez que as discussões aqui expostas permitem aos tomadores de decisão ter um conhecimento aproximado de como serão afetados os maiores reservatórios em anos com anomalias positivas e negativas de precipitação. Vale ressaltar que, neste trabalho, não leva-se em consideração a demanda de água utilizada para abastecimento urbano e uso rural, nem tampouco foi aferida a taxa de evaporação dos reservatórios nos diferentes anos, o que poderia fornecer uma estimativa mais precisa do quanto a variação do armazenamento ocorreu em virtude exclusivamente da precipitação. Não obstante, estes tópicos necessitam de estudos futuros.

5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6 Referências

- Azevedo, S.C.; Cardim, G.P.; Puga, F.; Singh, R.P. & Silva, E.A. 2018. Analysis of the 2012-2016 drought in the northeast Brazil and its impacts on the Sobradinho water reservoir. *Remote Sensing Letters*, 9(5): 439 - 447.
- Banu, S.; Hu, W.; Guo, Y.; Hurst, C. & Tong, S. 2014. Projection the impact of climate change on dengue transmission in Dhaka, Bangladesh. *Environment International*, 63: 137-142.
- Bezerra, B.G.; Silva, L.L.; Santos E Silva, C.M. & Carvalho, G.G. 2018. Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. *Theoretical and Applied Climatology*, 132: 1-12.
- Brito, S.S.B.; Cunha, A.P.M.A.; Cunningham, C.C.; Alvalá, R.C.; Marengo, J.A. & Carvalho, M.A. 2018. Frequency, duration and severity of the drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 23: 200-213.
- Coelho, C.A.S.; Uvo, C.B. & Ambrizzi, T. 2002. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. *Theoretical and Applied Climatology*, 71: 185-197.
- De Souza, E.B.; Kayano, M.T. & Ambrizzi, T. 2005. Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theoretical and Applied Climatology*, 81: 177-191.
- Getirana, A. 2016. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *Journal of Hydrometeorology*, 17: 591-599.
- Grimm, A.G. 2003. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, 16: 263-280.
- Grimm, A.G. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, 22: 123-138.
- Hastenrath, S. & Heller, L. 1997. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103: 77-92.
- Hofstra, N. & New, M. 2009. Spatial variability in correlation decay distance and influence on angular-distance weighting interpolation of daily precipitation over Europe. *International Journal of Climatology*, 29: 1872-1880.
- IPCC. Central and South America. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: BARROS, V.R.; FIELD, C.B.; DOKKEN, D.J.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; BILIR, T.E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K.; ESTRADA, Y.O.; GENOVA, R.C.; GIRMA, B.; KISSEL, E.S.; LEVY, A.N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P.R. & WHITE, L.L. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.1499-1566.
- Knapp, A.K.; Beier, C.; Briske, D.D.; Classen, A.T.; Luo, Y.; Reichstein, M.; Smith, M.D.; Smith, S.D.; Bell, J.E.; Fay, P.A.; Heisler, J.L.; Leavitt, S.W.; Sherry, R.; Smith, B. & Weng, E. 2008. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 58: 811-821.
- Machado, C.J.S. 2003. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. *Ambiente & Sociedade*, 7: 122-136.
- Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Soares, W.R.; Rodrigues, D.A.; Camargo, H.; Riveros, M.P. & Pabló, A.D. 2013. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. *Journal of Climate*, 26: 9137-9154.
- Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Alvalá, R.C.S.; Cunha, A.P.; Brito, S. & Moraes, O.L.L. 2017. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 23: 1-13.
- Marengo, J.A. & Bernasconi, M. 2015. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climate Change*, 129: 103-115.
- Marengo, J.A.; Torres, R.R. & Alves, L.M. 2016. Drought in Northeast Brazil – past, present, and future. *Theoretical Applied Climatology*, 20: 1-12.
- Martins, E.S.P.R.; Coelho, C.A.S.; Haarsma, R.; Otto, F.E.L.; King, A.; Oldenborgh, G.J.V.; Kew, S.; Philip, S.; Vasconcelos Jr., F.C. & Cullen, H. 2017. A multimethod attribution analysis of the prolonged Northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-16). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99: 65-69.
- Medeiros, F.J.; Lucio, P.S. & Silva, H.J.F. 2017. Análise de métodos de krigagem na estimativa da precipitação no estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10 (5): 1668 - 1676.
- Moura, A.D. & Shukla, J. 1981. On the dynamics of droughts in the Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a generation circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 38: 2653-2675.
- Gomes, H.B.; Ambrizzi, T.; Herdies, D.L.; Hodges, K. & Silva, B.F.P. 2015. Easterly wave disturbance over Northeast Brazil: An observational analysis. *Advances in Meteorology*, 2015: 1-20.
- Paz, V.P.S.; Teodoro, R.E.F. & Mendonça, F.C. 2000. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(3): 465 - 473.
- Oliveira, P.T.; Santos E Silva, C.M. & Lima, K.C. 2017. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130: 77-90.
- Palharini, R.S.S. & Vila, D.A. 2017. Climatological behavior of precipitating in the Northeast Region of Brazil. *Advances in Meteorology*, 2017: 1-12.
- Rodell, M.; Famiglietti, J.S.; Wiese, D.N.; Reager, J.T.; Beaudoin, H.K.; Landerer, F.W. & Lo, M.-H. 2018. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557: 651-659.
- Rodrigues, R.R. & McPhaden, M.J. 2014. Why did the 2011-2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? *Geophysical Research Letters*, 41: 1012-1018.
- Silva, M.E.S.; Carvalho, L.M.V.; Silva Dias, M.A.F. & Xavier, T.M.B.S. 2006. Complexity and predictability of daily precipitation in a semi-arid region: an application to Ceará, Brazil. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13: 651-659.
- Silva, V.P.R. 2004. On climate variability in northeast of Brazil. *J. Arid Environ*, 58: 575-596.
- Timmermann, A.; An, S.-I.; Kug, J.-S.; Jin, F.-F.; Cai, W.; Capotondi, A.; Cobb, K.; Lengaigne, M.; McPhaden, M.J.; Stuecker, M.F.; Stein, K.; Wittenberg, A.T.; Yun, K.-S.; Bayr, T.; Chen, H.-C.; Chikamoto, Y.; Dewitte, B.; Dommengot, D.; Grothe, P.; Guilyardi, E.; Ham, Y.-G.; Hayashi, M.; Ineson, S.; Kang, D.; Kim, S.; Kim, W.; Lee, J.-Y.; Li, T.; Luo, J.-J.; McGregor, S.; Planton, Y.; Power, S.; Rashid, H.; Ren, H.-L.; Santoso, A.; Takahashi, K.; Todd, A.; Wang, G.; Wang, G.; Xie, R.; Yang, W.-H.; Yeh, S.-W.; Yoon, J.; Zeller, E. & Zhang, X. 2018. El Niño-Southern Oscillation complexity. *Nature*, 559: 535-545.
- Vandaele, W. 1983. *Applied time series and box-jenkins models*. San Diego, Academic Press. iii p.
- Xavier, A.C.; King, C.W. & Scanlon, B.R. 2016. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, 36(6): 2644 - 2659.
- Ye, X.; Li, X.; Xu, C. & Zhang, Q. 2016. Similarity, difference and correlation of meteorological and hydrological drought indices in a humid climate region – the Poyang Lake catchment in China. *Hydrology Research*, 47(6): 1211 - 1223.