



CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÃO DA VAZÃO DE TUCURUI COM ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO

Amanda Rodrigues de Souza¹, Andrea de Oliveira Cardoso², Willians Bini Silva³

¹Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil (amanda.souza@ufabc.edu.br)

²Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil

³ClimaTempo, São Paulo, Brasil

Resumo: Devido ao uso da vazão na geração de energia, o artigo visa caracterizar a vazão em Tucuruí e sua precipitação de contribuição, utilizando dados de 1980 a 2020. As estações de precipitação foram agrupadas em seis regiões. A precipitação na parte alta da bacia contribui para a elevação e sustentação da vazão. Foi realizada a correlação de índices (anual e mensal) de precipitação de cada região com a vazão. Destaca-se os índices de acumulado de chuva e de limiares quantílicos secos e chuvosos.

Palavras-chave: Rio Tocantins; r de Pearson; vazão natural; chuva; análise de *cluster*.

INTRODUÇÃO

O regime de vazão dos rios é influenciado por diversos fatores, entre eles destaca-se a precipitação que ocorre sobre o rio e sua bacia. A precipitação também contribui para a infiltração, recarga dos aquíferos e consequentemente, a sustentação do escoamento subterrâneo, que também contribui para vazão (LUCAS, 2012; TUCCI, 2001).

O padrão climatológico da precipitação e os totais pluviométricos associados são diferenciados para várias regiões do país. Os regimes de chuva estão associados aos tipos de sistemas atuantes, que variam com a região e a época do ano, sendo de alta ou baixa frequências (REBOITA *et al.*, 2010).

O Brasil apresenta grande disponibilidade hídrica, com vazão média anual de 260 m³/s (ANA, 2018). Porém é observado uma grande variabilidade espaço-temporal na vazão nos rios brasileiros, sendo tais variabilidade em diferentes escalas relacionadas a variabilidades de fenômenos climáticos (CAPOZZOLI *et al.*, 2017).

A área da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins (BHRT) corresponde a cerca de 10% do território Nacional, com aproximadamente 920 mil km² (ANA, 2015), abrangendo os estados do Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal, como mostrado na Figura 1. Grande parte da bacia se situa na região Centro-Oeste, adentra a região Norte até sua foz (ANA, 2015). A extensão total do Rio Tocantins é de 1.960 km (ANA, 2015).

Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins

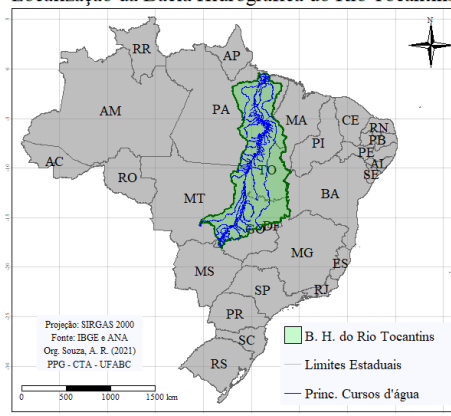


Figura 1. Localização da BHRT. (ANA, [s. d.]; IBGE, 2020).

Cerca de 76% dos 8,6 milhões de habitantes da região encontra-se na em centros urbanos (ANA, 2015), porém o maior consumo de água da bacia é para a irrigação, seguido pelo uso animal, abastecimento urbano, termelétrica, mineração, indústria e abastecimento rural (ANA, 2020). Em parâmetros nacional, a bacia destaca-se pelo potencial hidro energético (ANA, 2015).

Está presente na bacia os climas *Af* – Zona Tropical sem estações secas, *Am* – Zona tropical com monções e *Aw* – Zona Tropical com inverno seco, a estação Tucuruí está no clima *Am* (ALVARES *et al.*, 2013).

A utilização de índices de precipitação pode fornecer uma descrição abrangente da variação de importante extremos de precipitação (KARL *et al.*, 1999), podendo ser útil para avaliação da influência da precipitação na vazão do rio em diferentes escalas, também podendo ser utilizada como parâmetros para a predição da vazão.



Este estudo tem como objetivo caracterizar padrões sazonais, variabilidades interanuais e extremos de precipitação e vazão na bacia do Tocantins e encontrar associações entre essas variáveis, com foco na influência de índices de precipitação sobre a vazão.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do estudo foi necessário informações de vazão natural do posto de Tucuruí e precipitação a montante do posto presente na BHRT.

A vazão natural é definida como a vazão que ocorreria em um corpo hídrico caso não houvesse ação antrópica a montante da bacia (ONS, [s. d.]).

Os dados de vazão de 1980 a 2019 foram obtidos pelo Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS, 2020) e, para completar a série até dezembro de 2020, foi utilizado os dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (ANA, [s. d.]). Totalizando 41 anos de dados, de 1980 a 2020.

Os dados históricos de precipitação diárias foram obtidos pela ANA, a partir do portal HIDROWEB. Utilizando os dados das coordenadas geográficas das estações, o *software* QGIS (QGIS, [s. d.]), os limites das bacias (ANA, 2016) e cursos d'água (ANA, 2018), foram selecionadas as estações pluviométricas a montante do ponto de vazão. Com os dados diários, foram geradas as séries mensais e anuais.

Os dados de precipitação passaram por um tratamento prévio, visando eliminar estações com mais de 25% de dados faltantes nas séries de dados.

Com o intuito de analisar e resumir o conjunto de dados de precipitação, foi realizada o agrupamento dos dados. A regionalização foi feita através da análise de *cluster*, uma ferramenta para análise exploratória, onde é realizada uma estratificação empiricamente útil dos dados (WILKS, 2011).

Como informações de entrada, foram utilizados os valores das médias e quantis mensais de 15%, 35%, 65% e 85% dos dados de precipitação de cada estação.

Um quantil de ordem p ou um p -quantil onde p é uma proporção qualquer, admitindo valores entre 0 e 1. O $q(p)$ é o valor tal que a soma das probabilidades dos valores menores que ele é p (BUSSAD; MORETTIN, 2013).

Dada uma determinada série de dados P_i , com i variando de 1 a n observações, é necessário determinar o número de ordem $w(P_i)$ de cada elemento i desta série, com observações em ordem crescente. Então, calcula-se os quantis a partir da equação:

$$q(P_i) = \frac{1}{2n} + \frac{[w(P_i)-1]}{n}. \quad (1)$$

Para definir a quantidade de grupos, foi avaliada a distância entre os grupos, identificando saltos entre a formação de um conjunto e o próximo, bem como a disposição geográfica das estações de cada grupo.

Para garantir a qualidade dos dados de precipitação, foram retirados dados duvidosos das séries históricas. Para tanto, os dados de precipitação foram separados pelas regiões homogêneas. Para cada estação, foram realizadas a técnica do *boxplot* com separação mensal dos dados e com isso, foram identificados os *outliers*. Cada *outlier* foi avaliado se é maior que o triplo do desvio padrão mais a média da série, sendo classificado como um evento duvidoso.

O *boxplot* é constituído de basicamente seis elementos: três quartis, os limites inferiores e superiores e os *outliers*. O quartil inferior corresponde ao limite de 25% dos dados, o superior corresponde ao limite de 75% dos dados e a mediana (quartil de 50%). Os limites inferiores e superiores são definidos por 1,5 vezes a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro. Valores que excedem essa marca, são classificados como um *outliers*, ou seja, um valor discrepante (DEVORE, 2006).

Com informações dos grupos e eventos classificados como *outliers* foi observado se nas estações da mesma região também ocorreu eventos semelhantes no período. Os dados duvidosos injustificáveis foram retirados, tornando um dado faltante.

Para a caracterização dos padrões e variabilidades da precipitação e vazão, foram realizadas as médias mensais e os quantis mensais de 15%, 35%, 65% e 85% dos dados de precipitação de cada região de precipitação. Para a vazão, além das técnicas utilizadas para a precipitação, também foi realizado o diagrama *boxplot* mensal e a classificação dos eventos de vazão de acordo com os limiares quantílicos, seguindo metodologia realizada por outros autores para a caracterização da vazão (DIONISIO *et al.*, 2021; SOUZA; CARDOSO, 2021; TORI *et al.*, 2021).

A separação das categorias assumiram o aplicado por Xavier, Xavier *et al.* (2003), adaptado ao caso de vazão, conforme a Tabela 1:

Tabela 1. Classificação dos intervalos quantílicos para a vazão. Fonte: Xavier, Xavier *et al.* (2003).

Classificação	Intervalos Quantílicos
Muito Baixa	$q(X_i) \leq 0,15$
Baixa	$0,15 < q(X_i) \leq 0,35$
Normal	$0,35 < q(X_i) \leq 0,65$
Alta	$0,65 < q(X_i) \leq 0,85$
Muito Alta	$q(X_i) > 0,85$



Visando avaliar a distribuição de tipos de eventos mensais de vazão ao longo dos anos e a variabilidade interanual desta variável, associada ao tipo de evento, considerando os limiares quantílicos mensais na classificação mensal, avaliando todo o histórico.

Para relacionar a vazão com a precipitação mensais e anuais, foram calculados índices de precipitação mensais e anuais baseados nas séries diárias nas regiões homogêneas de precipitação.

Para a construção dos índices anuais foi admitido até 10% de dados faltantes. Foram construídos índices em escala mensal e anual, que enfatizem padrões secos e chuvosos. Para a escala anual, foi construído os índices de duas formas distintas: Ano a ano e conjunto com doze meses móveis, com passos mensais.

Para a construção de todos os índices foram utilizados dados diários de precipitação. Na Tabela 2 estão expostos os índices de precipitação utilizados, a sigla utilizada na pesquisa e sua fonte. Os índices sem informação de fonte foram idealizados pelos autores para o presente estudo. Para os índices que utilizam os limiares quantílicos foram utilizados apenas os dias com precipitação.

Tabela 2. Índices de Precipitação.

Sigla	Nome	Fonte
CDD-MAX e	Máximo e Média de dias Consecutivos Secos	Peterson, <i>et al.</i> (2001)
CDD-MED		
CWD-MAX e	Máximo e Média de dias Consecutivos Úmidos	Peterson, <i>et al.</i> (2001)
CWD-MED		
PRCTOT	Acumulado da Precipitação em dias Úmidos	CLIMDEX ([s. d.])
SDII	Índice Simples de Intensidade Diária	Peterson, <i>et al.</i> (2001)
ND1mm-	Número de dias sem Precipitação	
R1mm, R10mm, R20mm e R30mm	Número de Dias com precipitação acima de 1, 10, 20 e 30 mm	CLIMDEX ([s. d.])
R1DAY, R3DAY, R5DAY, R7DAY e R10DAY	Máximo de Precipitação acumulada em um, três, cinco, sete e dez dias	CLIMDEX ([s. d.])
ND15q- e ND35q-	Número de dias com precipitação abaixo do limiar de 15% e 35%	
ND65q+ e ND85q+	Número de dias com precipitação acima do limiar de 65% e 85%	

Foi realizada a análise de correlação simples, sem e com defasagem (precipitação precedendo a vazão) entre cada um dos índices de precipitação e a série de vazão de Tucuruí, através de Análise de Correlação Simples (WILKS, 2011). Nesta análise, o grau de relacionamento entre as variáveis contínuas é sintetizado por um coeficiente de correlação conhecido como “r de Pearson”, conforme:

$$r_{xy} = \frac{\left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{1/2} \left\{ \left[\frac{1}{(n-1)} \right] \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

Os resultados da correlação variam de -1 a +1, onde +1 demonstra correlação direta perfeita, -1 mostra uma correlação oposta perfeita e linear e zero indica ausência de correlação (WILKS, 2011).

A análise foi aplicada aos dados de três formas: correlação mensal, feita através dos meses corridos, ou seja, as séries completas são correlacionadas sem e com defasagem de até doze meses; correlação anual fixa, considerando o período anual fixo (de janeiro a dezembro); e correlação anual móvel, considerando cada doze meses consecutivos móvel, com passos mensais. Para tanto, foi utilizado da linguagem de programação R (ANACONDA INC., 2021) e o pacote ‘tidyverse’ (WICKHAM, 2017). Para minimizar possíveis erros nas correlações causados pela presença de dados faltantes, foram realizadas as correlações apenas de séries com mais de trinta anos.

Para as correlações anuais foram usados os índices: PRCTOT, SDII, CWD – MED, CWD – MAX, CDD – MED, CDD – MAX, ND15q-, ND35q-, ND65q+ e ND85q+. Para as análises mensais, além dos índices também utilizados como índices anuais, foram utilizados os índices: ND1mm-, R1mm, R10mm, R20mm, R30mm, RX1DAY, RX3DAY, RX5DAY, RX7DAY e RX10DAY.

Para avaliar a significância da correlação foi utilizado o t de Student, um teste de hipótese utilizado para rejeitar ou aceitar uma hipótese nula quando a estatística de teste (t) segue uma distribuição t de Student (WILKS, 2011). Para a pesquisa, foi utilizado o nível de significância de 0,05.

Neste estudo, foram avaliados diversos índices. Porém, entre eles há índices semelhantes por definição, sendo eles:

- (a) CWD – MAX e CWD – MED;
- (b) CDD – MAX e CDD – MED;
- (c) PRCTOT e SDII;
- (d) R1mm, R10mm, R20mm e R30mm;
- (e) RX1day, RX3day, RX5day, RX7day e RX10day;
- (f) ND35q- e ND15q-;
- (g) ND65q+ e ND85q+.



Para selecionar os melhores índices por região, foram utilizados critérios de eliminação, sendo eles a amplitude da correlação e a quantidade de valores significativos. As correlações anuais e mensais foram avaliadas separadamente. Para a correlação anual, foi desconsiderado índices que apresentaram correlação significativa em apenas uma das modalidades anuais.

Pela necessidade de dados de forma seguida para o índice de valores máximos acumulados em dias seguidos (item *e* da listagem anterior), sendo maior a quantidade de dias, mais difícil a reprodutividade, foi selecionado o índice com menor quantidade de dias como critério adicional.

Para os índices de contagem de dias por limiares (itens *0*, *0* e *0*), em caso de empate nos critérios, foi selecionado o que representa o cenário mais crítico.

Foram eliminados índices que apresentem resultados incoerentes com a sua natureza ou seja, índices que representam seca com correlação positiva com a vazão ou índices de chuva com correlação negativa com a vazão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise de *cluster* foi obtida a regionalização da precipitação, separando o conjunto de estações de precipitação da BRHT em seis regiões, como mostrado na Figura 3. A Região 1 se encontra totalmente no Centro-Oeste brasileiro, ocupando a porção leste da cabeceira da bacia. A região 2 está situada à direita da região 1, com quase todas as estações desta região estão localizadas no estado de Goiás. A região 3 ocupa o lado oeste da cabeceira, contornando as regiões 1 e 2, tendo estações na porção oeste do estado de Goiás, leste do Mato Grosso e sul do estado do Tocantins. A região 4 está localizada na área central da bacia, no estado do Tocantins, sendo contornada pela região 5. A região 5 ocupa uma pequena parte do estado no Mato Grosso, no extremo nordeste do estado, sudeste do Pará, centro-norte do estado do Tocantins e oeste do Maranhão. A região 6 encontra-se próxima do ponto de vazão, localizada na porção leste do Pará e oeste da Maranhão.

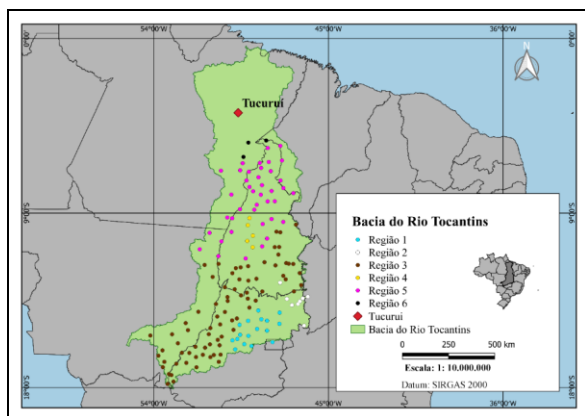


Figura 3. Estações de Precipitação regionalizadas.

Na BHRT, que contribui para o ponto de vazão de Tucuruí, as regiões de precipitação homogênea apresentam valores mínimos no inverno. Os valores máximos ocorrem no verão para as regiões 1 a 4 e no outono nas regiões 5 e 6.

Na Figura 4 estão apresentados as precipitações médias mensais e os limiares quantílicos mensais (15%, 35%, 65% e 85%) de cada região. A região 6 (Figura 4-f) apresentou o maior valor médio mensal, com precipitação de 339 mm em março. O valor mais baixo encontrado na bacia ocorreu na região 2 (Figura 4-b), com 0,5 mm de precipitação em julho. Tais valores corroboram com o encontrado por Marcuzzo e Goularte (2013), que identificou os períodos secos da bacia de junho a agosto, sendo mais severos na porção sul e mais brandos na porção norte. Avaliando a regionalização realizada e os estudos de Loureiro e Fernandes (2013), tem-se que as regiões 4 (Figura 4-d) e 5 (Figura 4-e) concentram aproximadamente 35% da precipitação anual, sendo a única parte da bacia que não apresentou variações significativas de precipitação através dos anos analisados (LOUREIRO; FERNANDES, 2013).

Para as regiões 1 e 2 (Figura 4-a e Figura 4-b), o pico de precipitação ocorre em dezembro, com os respectivos valores de 281 mm e 213 mm. Para as regiões 3 e 4 (Figura 4-c e Figura 4-d) ocorre pico de vazão em janeiro, com os respectivos valores de 286 mm e 336 mm. Nas regiões 5 e 6, o pico ocorreu em março (Figura 4-e e Figura 4-f), com os valores de 274 mm e 339 mm.

As menores médias por região ocorreram em julho para as regiões 1 (2,3 mm), 2 (0,5 mm), 3 (2,6 mm), 4 (1,3 mm) e 5 (5,2 mm) e em agosto para a região 6 (10,6 mm).

Realizando a média anual, os valores de precipitação média mais altos ocorrem na parte central da bacia, na região 4 (165mm) e os mais baixos na parte leste, na região 2 (96 mm).

As maiores diferenças entre os limiares quantílicos ocorrem em janeiro para as regiões 1, 2, 3, 4 e 5 e março para a região 6. Os limiares quantílicos de 15% mais baixos ocorreram nas regiões 1 (junho a agosto), 2 (junho a agosto), 3 (julho) e 4 (junho a agosto), com valor de 0 mm e o mais alto ocorreu na região 6, no mês de março, com valor de 250 mm. O limiar quantílico de 85% mais alto ocorreu em janeiro na região 4, com valor de 442 mm e o mais baixo na região 2, em julho, com valor de 0,56 mm.

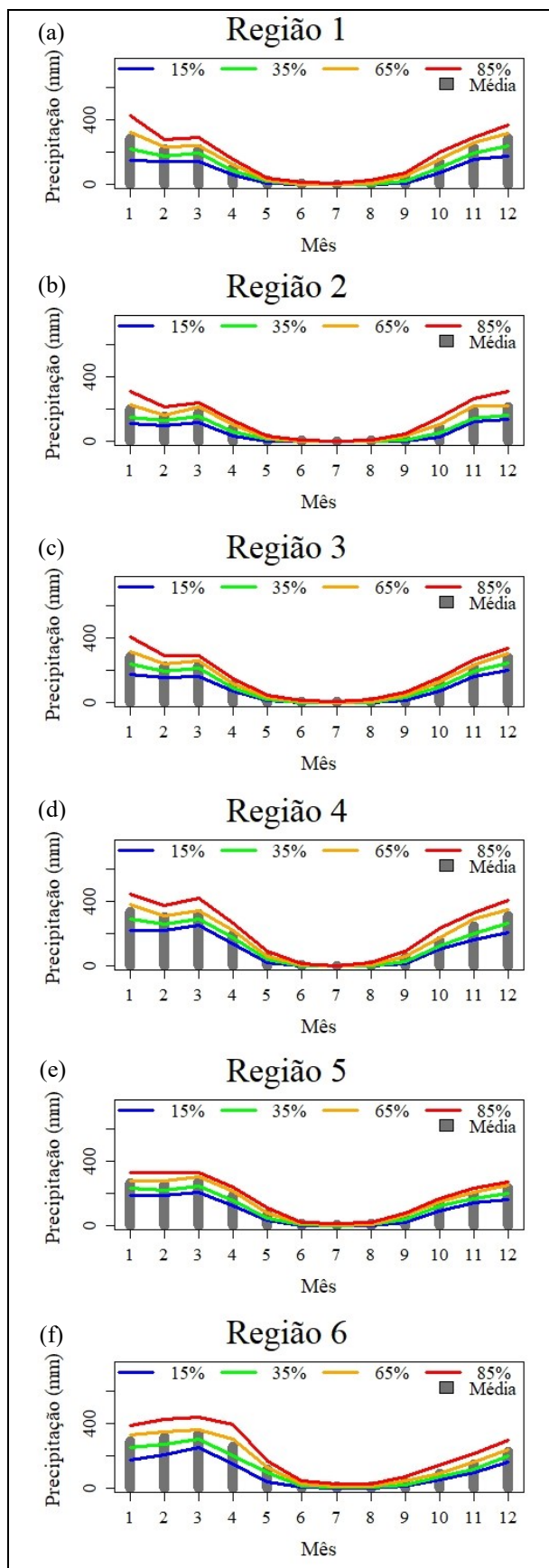


Figura 4. Médias e Quantis mensais de precipitação das regiões de precipitação homogênea.

Em Tucuui, as vazões se elevam no verão atingindo o máximo no outono e o mínimo no inverno (Figura 5a). O mínimo de vazão é atingido em setembro (2128 m³/s) e segue em um aumento até atingir o seu máximo em abril (24631 m³/s). Os meses de setembro e outubro tiveram suas médias abaixo do valor de 2550 m³/s, que é o valor de vazão de estiagem para a bacia (MATOS *et al.*, 2007).

O padrão sazonal da vazão mostra um aumento gradativo e uma queda mais abrupta, o que demonstra a importância da precipitação na parte alta da bacia, a elevação e sustentação da vazão. A defasagem nos picos de vazão varia em relação a precipitação. Para as regiões 1 e 2, a defasagem é de quatro meses (pico de precipitação em dezembro), para as regiões 3 e 4 são de três meses e para as regiões (pico de precipitação em janeiro) 5 e 6, que estão mais próximas da estação de Tucuui, a defasagem é de um mês (pico de precipitação em março).

Os onze eventos raros de vazão registrados foram de vazão elevada (extremo positivo), apontados pelo *boxplot* (Figura 5-b). Janeiro foi o mês com a maior ocorrência, com três eventos raros (nos anos de 1990, 1986 e 2002, em ordem decrescente de vazão). Dois eventos raros foram verificados em junho, nos anos de 2009 e 1995. Ocorreu apenas um evento raro em março (1980), abril (1997), maio (2009), julho (1997), novembro (1981) e dezembro (1989). Nota-se que oito dos eventos raros ocorreram na primeira metade dos anos analisados (de 1980 a 2000).

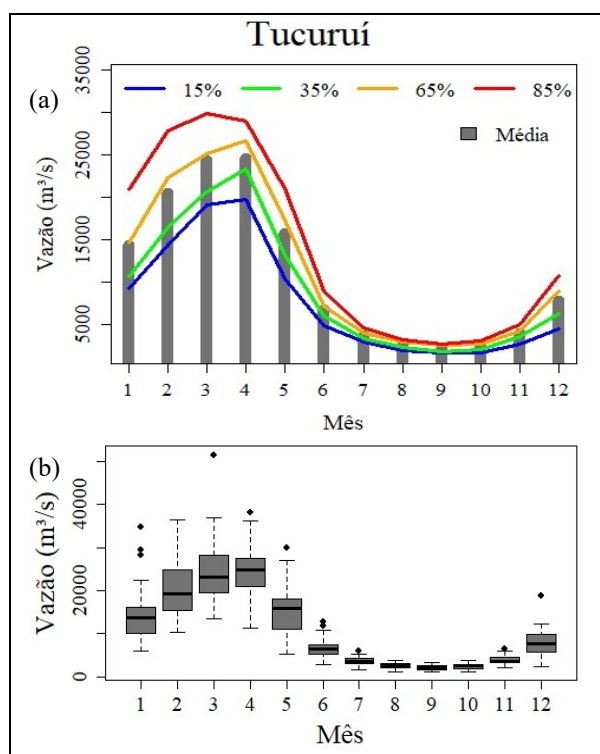


Figura 5. Médias e Quantis mensais (a) e o diagrama *boxplot* mensal da vazão de Tucuui.



Com os limiares quantílicos mensais, foi realizada a classificação da vazão como ilustrado na Figura 6. Os tons quentes indicam valores de vazão abaixo do normal, os tons azulados, os eventos de vazão acima do normal e verde a normalidade. Os tons escuros sinalizam os eventos mais extremos. Nota-se que os três primeiros anos apresentam uma densidade maior de eventos de vazão acima do normal, como o ano de 1983, com 9 eventos de vazão muito alta que pode ser justificada pela ocorrência de um *El Niño* que influenciou a precipitação em toda América do Sul (KAYANO; MOURA, 1986). Feischmann *et al.*, (2020) identificaram o *El Niño* de 1983 como o responsável pelas inundações ocorridas na BHRT.

Destaca-se também o período maio de 1989 a março de 1990, uma sequência de 11 meses de vazão acima do normal. Os cinco últimos anos do gráfico (de 2015 a 2020) apresenta comportamento oposto, com muitos eventos de vazão abaixo do normal, onde o período de setembro de 2015 a janeiro de 2017 apresentou 17 meses seguidos de vazão muito baixa (Figura 6).

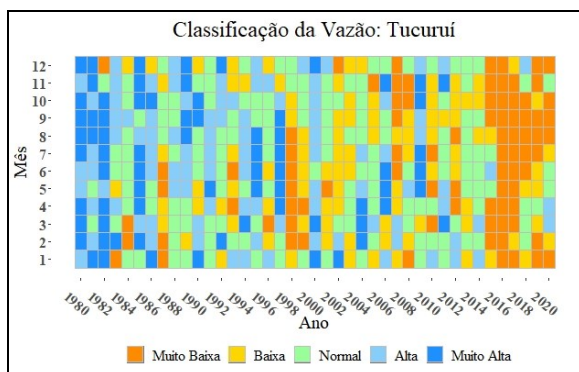


Figura 6. Classificação dos eventos mensais de vazão.

Os resultados das correlações anuais fixas estão presentes na Figura 7. Os tons azulados representam as correlações negativas e os tons vermelhos as positivas, sendo a intensidade da cor referente a intensidade da correlação. Os resultados escritos de cinza indicam que o valor não foi significativo e os escritos de preto, os valores significativos.

As maiores quantidades de correlações significativas com a vazão ocorreram com índices da Região 2 (Figura 6-b) onde cinco índices obtiveram correlações significativas com até dois anos de defasagem (SDII, PRCTOT, ND65q+, ND15q- e CDD – MAX). Porém as correlações com valores mais altos ocorreram com a Região 1 (Figura 6-a), com destaque para o índice PRCTOT, que para a correlação sem defasagem apresentou correlação de 0,73.

Para as regiões 1 (Figura 6-a) e 3 (Figura 6-c), o índice CWD-MAX apresentou correlações negativas com a vazão, indicando que a sequência máxima de precipitação acima de 1 mm não é o suficiente para interferir de forma construtiva para a vazão em tais

regiões, sendo então identificados como correlações incoerentes. O índice ND15q- na Região 2 apresentou correlação positiva significativa com a vazão para a defasagem de dois anos, o que é incoerente para a natureza do índice, por se tratar de um índice que indica seca. Tal comportamento pode ser justificado pela baixa variabilidade da precipitação nos meses secos.

A vazão de Tucuruí apresentou correlações significativas nas Regiões 5 (Figura 6-e) e 6 (Figura 6-f) apenas para correlações sem defasagem, devido suas posições, que são mais próximas ao ponto de vazão.

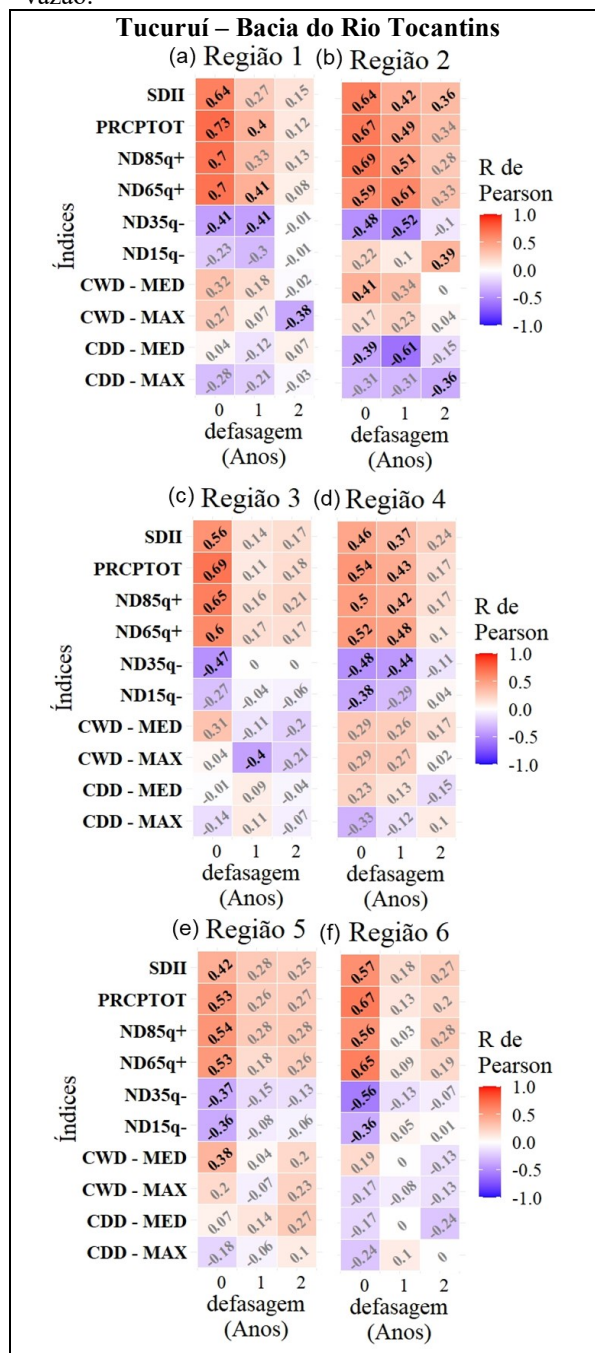


Figura 7. Correlação anual fixa dos índices de Precipitação com a vazão de Tucuruí.



Analisando os resultados das correlações anuais móveis, a Região 3 (Figura 8-c) apresentou a menor quantidade de índices de precipitação com correlações significativas com a vazão, as Regiões 1 (Figura 8-a) e 4 (Figura 8-d) as maiores quantidade de índices de precipitação com correlações significativas com a vazão, porém a Região 2 (Figura 8-b) apresentou correlações significativas em todas as defasagens para os índices de precipitação com correlações significativas. Há correlações significativas com os índices de precipitação da Região 6 (Figura 4.42-f) até a defasagem de 7 meses. Para alguns índices com resultados significativos (ND15q- e CWD – MED na Região 1, CWD – MED e MAX na Região 4 e ND35q- na Região 5) foi identificado um atrasado no início das correlações significativas, indicando uma demora de um ou dois meses para iniciar a influência de tais índices de chuva sobre a vazão.

Os índices significativos das Regiões 4 e 5 foram os mesmos para os dois tipos de correlação anual. Para as demais regiões, ocorreu alterações: Na Região 1, a correlação anual móvel apresentou também correlação significativa para os índices ND15q- e CWD – MED. Para CWD – MAX, apesar de aparecer nas duas modalidades, representam sinais e períodos diferentes, para a correlação anual móvel, que a defasagem vai até doze meses, o índice apresentou correlação positiva, para a correlação fixa, o resultado significativo ocorreu com defasagem de dois anos, resultando numa correlação incoerente. Para a Região 2, os índices ND15q-, CWD – MED e CDD – MED não apresentaram correlações significativas para a correlação móvel. Na Região 3, o índice CWD – MAX apresentou correlação significativa na correlação anual fixa, porém não apresentou na correlação anual móvel (Figura 4.42-c) devido a diferença temporal, que não foi contemplada na modalidade móvel. Os índices CWD – MAX e MED não apresentaram resultados significativos na correlação anual fixa para a região 4 (Figura 8-d).

Utilizando os critérios estabelecidos, foram selecionados os seguintes índices:

- R1: PRCTOT, ND65q+, ND35q- e CWD - MED;
- R2: PRCTOT, ND85q+, ND35q- e CDD - MED;
- R3: PRCTOT, ND85q+ e ND35q-;
- R4: PRCTOT, ND65q+ e ND35q-;
- R5: PRCTOT, ND85q+, ND15q- e CWD – MED;
- R6: PRCTOT, ND85q+ e ND35q-.

Apesar da divergência entre os índices ND85q+ e ND65q+ para a região 2 dentre as modalidades de correlação anual (fixa e móvel), foi selecionado o índice ND85q+ por representar o cenário mais extremo. Para a região 3, tais índices obtiveram o mesmo desempenho na correlação móvel e foi selecionado o índice ND85q+ por ter apresentado desempenho superior na modalidade de correlação anual fixa e por representar o cenário mais extremo.

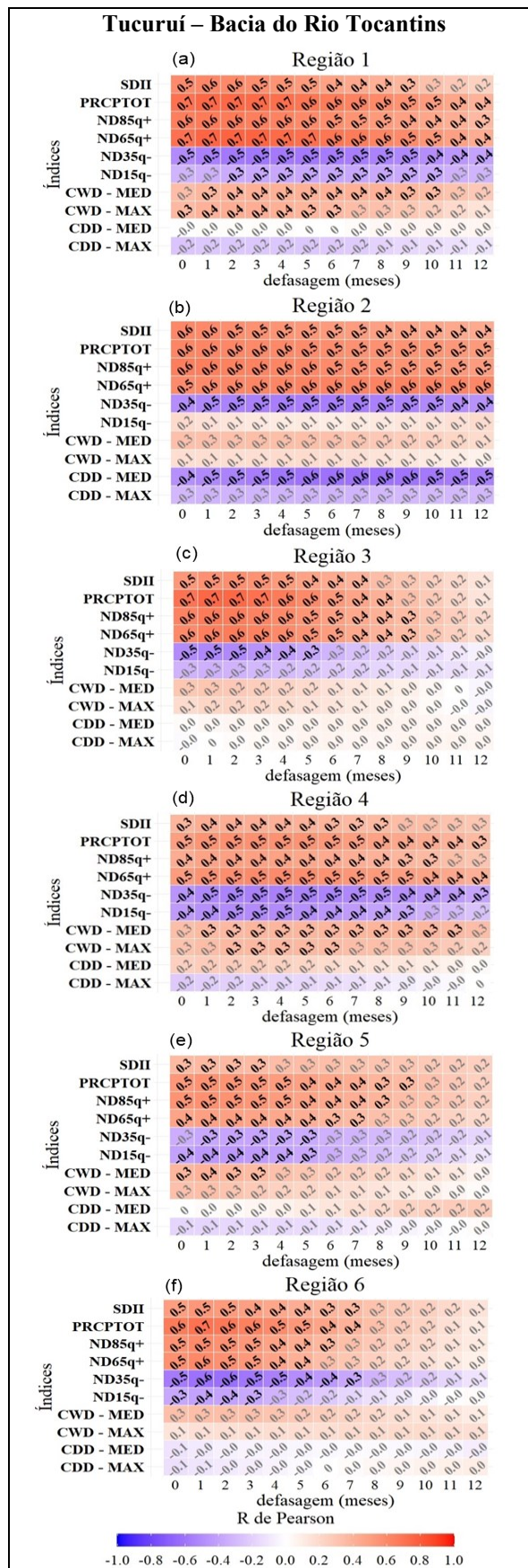


Figura 8. Correlação anual móvel dos índices de Precipitação com a vazão de Tucuruí.



Para as correlações mensais, alguns dos índices não apresentaram resultados de correlação devido as séries não possuírem a quantidade de dados necessárias ou por apresentarem apenas o mesmo valor em toda a série (exemplo, uma série apenas de zeros por não haver dias de precipitação acima de 30 mm), sendo tais resultados sinalizados pelo preenchimento cinza.

Para os resultados mensais não foi apresentado nenhum índice com resultados incoerentes, ou seja, correlação com sinal contrário ao esperado para a natureza do índice de precipitação (exemplo: índices que representam pouca precipitação com correlação positiva com a vazão).

A Região 6 (Figura 9-f) apresentou a maior quantidade de índices com correlações significativas (quinze índices), porém apenas a defasagem de um mês obteve correlação significativa nos índices ND85q+, ND65q+, ND35q-, ND15q-, RX10DAY, RX7DAY, RX5DAY, RX3DAY, RX1DAY, R10mm, R1mm, ND1mm-, SDII e PRCTOT. A Região 2 (Figura 4.43-d) se destacou apresentando a maior quantidade de defasagens com correlações significativas, nos índices ND85q+, ND65q+, RX10DAY, RX7DAY, RX5DAY, RX3DAY, RX1DAY, R10mm, SDII e PRCTOT, com pelo menos duas defasagens por índice (lag 0 e 1 mês), sendo a única com resultados significativos para defasagens mais longas, nos índices ND65q+ (lag 6 a 8), SDII (lag 8) e PRCTOT (lag 8 a 10).

As correlações anuais móveis apresentaram mais correlações significativas e com valores absolutos mais altos do que as correlações mensais, levando a concluir que apenas a variabilidade da precipitação mensal (curto prazo) não afeta de forma expressiva a vazão, sendo o acumulado anual da precipitação mais relevante para produzir variações na vazão.

Utilizando os critérios de seleção, os índices mensais escolhidos foram:

R1: PRCTOT, ND85q+, ND35q-, RX5DAY e R10mm;

R2: PRCTOT, ND65q+, RX1DAY e R10mm;

R3: PRCTOT, ND85q+, ND35q-, RX3DAY, R10mm e ND1mm-;

R4: PRCTOT, ND65q+, ND35q-, RX10DAY e R10mm;

R5: PRCTOT, ND85q+, ND35q-, RX3DAY, R10mm e ND1mm-;

R6: PRCTOT, ND85q+, ND35q-, RX1DAY, R10mm e ND1mm-.

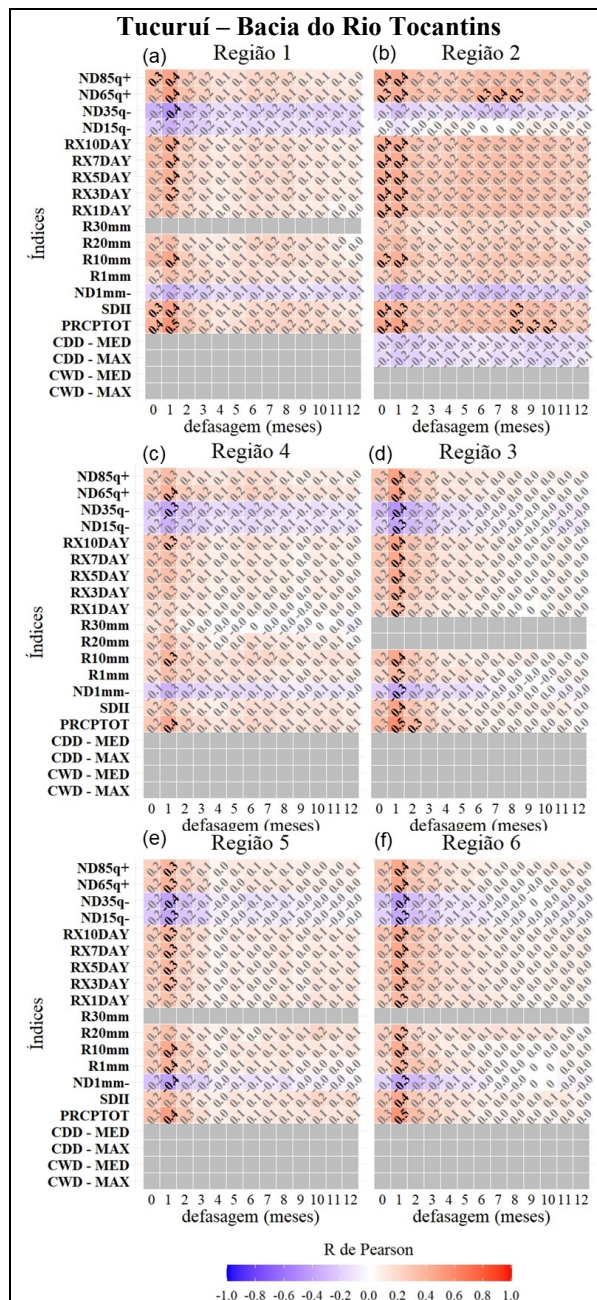


Figura 9. Correlação mensal dos índices de Precipitação com a vazão de Tucuruí.

CONCLUSÃO

A separação das estações de precipitação em regiões de precipitação, além de ser conveniente para reduzir a quantidade de dados utilizados, foi útil para a redução de dados faltantes, pois o dado agrupado é tratado a partir da média das estações sobre a região considerada.

Todas as regiões de precipitação apresentaram valores mínimos no inverno e máximos ocorrendo no verão para as regiões 1, 2, 3 e 4 e no outono para as regiões 5 e 6, que se encontram mais ao norte. Os valores de precipitação média mais altos ocorrem na parte central da bacia, na região 4 e os mais baixos na parte leste, na região 2.



A vazão em Tucuui é caracterizada por valores máximos mensais em abril e mínimos em setembro, havendo uma clara defasagem mensal em relação à precipitação, sendo está maior para as regiões na parte alta e menor (apenas 1 mês) para a região da parte baixa (mais ao norte). As defasagens chuva-vazão e forma do padrão sazonal da vazão indicam a importância da precipitação na parte alta da bacia para a elevação e sustentação da vazão.

Com a separação mensal dos dados, foi possível identificar onze eventos raros de vazão, sendo todos classificados como vazão muito alta. A ocorrência de tais eventos se concentraram nas primeiras duas décadas dos dados analisados (de 1980 a 2000), sugerindo uma tendência de queda na ocorrência dos eventos de vazão mensal muito alta.

Tanto para as correlações anuais e mensais, o índice PRCTOT foi selecionado para todas as regiões, indicando a relevância dos valores acumulados de precipitação em dias úmidos para a vazão, tanto em escala anual quanto mensal.

Os índices com limiares quantílicos foram selecionados em todas as regiões para as correlações anuais, porém foram apresentadas intensidades diferentes. Para as regiões 1 e 4, foi selecionado o índice de limiar quantílico chuvoso ND65q+ enquanto para as demais, foi selecionada a opção mais extrema (ND85q+). As regiões 1, 2, 3, 4 e 6 indicaram a opção menos extrema de limiar quantílico de seca (ND35q-) como o melhor para a correlação com a vazão, enquanto a região 5 indicou o índice mais extremo (ND15q-).

A média de dias úmidos consecutivos (CWD - MED) foram selecionados nas correlações anuais apenas para as regiões 1 e 5 enquanto a média de dias secos (CDD - MED) foi selecionado apenas para a região 2. Porém nenhum dos índices de contagem de dias consecutivos secos e úmidos foram selecionados nas correlações mensais, indicando baixa relevância de tais índices na correlação com a vazão mensal.

Os índices de limiares quantílicos foram avaliados tanto para as correlações anuais quanto mensais, porém os índices selecionados foram diferentes para as duas escalas. Para as regiões 1, 3, 5 e 6 foi mais relevante os índices com limiares quantílicos de chuva mais extremos (ND85q+), enquanto para as regiões 2 e 4 foi selecionado o índice ND65q+. Não foi selecionado nenhum índice de limiar quantílicos seco para a região 2, para as demais regiões foi selecionado o índice ND35q-.

Também não foi selecionado índices de máximo acumulado de precipitação em dias seguidos para a região 2. A região 4 apresentou o índice com a maior sequência de dias (RX10DAY), seguido pela região 1, onde foi selecionado o índice RX5DAY. A região 3 e 5 foi selecionado o índice RX3DAY e para a

região 6, o RX1DAY. As regiões que apresentaram índices com as menores quantidade de dias (região 3, 5 e 6) foram as únicas regiões que apresentaram correlações significativas para o índice de contagem de dias com precipitação abaixo de 1 mm, sendo ele selecionado como relevante para tais regiões.

Para todas as regiões de precipitação homogênea, o índice R10mm foi selecionado para a correlação mensal, indicando que para toda a bacia, há relevância da quantidade de dias com precipitação acima de 10 mm para a correlação com a vazão mensal.

Tais resultados visam contribuir para o entendimento da precipitação sobre BHRT e a influência da precipitação na vazão de Tucuui. Os índices aqui selecionados, além de identificar características da influência da precipitação na vazão também podem ser utilizados em modelos de previsibilidade de vazão nas escaladas estudadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa por meio de Bolsa de Mestrado da primeira autora e a empresa *ClimaTempo* pela parceria para a realização de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANA. **Conjuntura de Recursos Hídricos 2018**. Brasília: BRASIL, 2018.

ANA. **Conjuntura de Recursos Hídricos 2020**. Brasília: BRASIL, 2020.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras**. Brasília: BRASIL, 2015.

ANA. **Divisões hidrográficas do Brasil**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/copy_of_divisoes-hidrograficas. Acesso em: 28 jun. 2021.

ANA. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin#>. Acesso em: 20 abr. 2021.

ANACONDA INC. **Anaconda | Individual Edition**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.anaconda.com/products/individual#windows>. Acesso em: 19 jul. 2021.

BUSSAD, W. de O.; MORETTIN, P. A. **Estatística**



Básica. 8. ed. São Paulo, SP: [s. n.], 2013.v. 51.

CAPOZZOLI, C. R.; DE OLIVEIRA CARDOSO, A.; FERRAZ, S. E. T. Padrões de Variabilidade de Vazão de Rios nas Principais Bacias Brasileiras e Associação com Índices Climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 243–254, 2017.

CLIMDEX WEBPAGE. **Índices | Climdex**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.climdex.org/learn/indices/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6. ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2006. 2006.

DIONISIO, C. B.; CARDOSO, A. D. O.; SOUZA, A. R. De. PADRÕES E EXTREMOS DE VAZÕES NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. **II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**, [s. l.], n. 2016, 2021.

FLEISCHMANN, A. S.; SIQUEIRA, V. A.; WONGCHUIG, S.; COLLISCHONN, W.; DE PAIVA, R. C. D. The great 1983 floods in South American large rivers: a continental hydrological modelling approach. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], p. 35, 2020.

IBGE. **Geociência: Organização do Território**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 19 jul. 2021.

KARL, T. R.; NICHOLLS, N.; GHAZI, A. **Weather and Climate Extremes: Changes, Variations and a Perspective from the Insurance Industrial**. [S. l.]: Springer Netherlands, 1999. 1999.v. 42.

KAYANO, M. T.; MOURA, A. D. O El Niño de 1982-1983 e a precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, [s. l.], v. 4, p. 201–214, 1986.

LOUREIRO, G. E.; FERNANDES, L. L. Variação da precipitação por método de interpolação geoestatística. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 8, n. 2, 2013.

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. São Carlos: EESC/USP, 2012.

MARCUZZO, F. F. N.; GOULARTE, E. R. P. Caracterização do Ano Hidrológico e Mapeamento Espacial das Chuvas nos Períodos Úmido e Seco do Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Geofísica**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 91–99, 2013.

MATOS, B. A.; TEIXEIRA, A. L. de F.; BURNETT, J. A.; ZOBY, J. L. G.; FREITAS, M. A. de S.

DISPONIBILIDADE E DEMANDAS DE RECURSOS HÍDRICOS NAS 12 REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO BRASIL. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo, SP. **Anais [...]**. São Paulo, SP: [s. n.], 2007. p. 20.

ONS. **Atualização de Séries Históricas de Vazões - Período de 1931 a 2019**. Rio de Janeiro: ONS DOP-REL 0142/2020, 2020.

ONS. **Glossário**. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>. Acesso em: 20 abr. 2021.

PETERSON, T. C.; FOLLAND, C.; GRUZA, G.; HOGG, W.; MOKSSIT, A.; PLUMMER, N. Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs Methods with emphasis on analyses of extreme events. **Wmo**, [s. l.], n. 48, p. 144, 2001.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

SOUZA, A. R. De; CARDOSO, A. D. O. PADRÃO DE VAZÃO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL: ESTAÇÃO PARAIBUNA. **II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**, [s. l.], p. 6, 2021.

TORI, S. A.; CARDOSO, A. de O.; DE SOUZA, A. R. PADRÃO DE VAZÃO E EXTREMOS NA PARTE BAIXA DA BACIA DO RIO PARANÁ. **Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos**, [s. l.], n. 28, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 2001.

WICKHAM, H. **Tidyverse: Easily Install and Load the “Tidyverse”**. Versão R package version 1.2.1. [S. l.: s. n.], 2017.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 3. ed. Oxford: Elsevier Inc., 2011. 2011.v. 100.

XAVIER, T. de M. B.; XAVIER, A. F. S.; DIAS, M. A. F. da S.; DIAS, P. L. da S. Interrelações Entre Eventos ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico e a Chuva nas Bacias Hidrográficas do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 111–126, 2003.