



# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ANÁLISE DA TENDÊNCIA DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO AMAZONAS

\* Luanna Costa Dias <sup>1</sup>  
Lindemberg Lima Fernandes <sup>1</sup>  
Bruna Roberta Pereira Lira <sup>1</sup>  
Junior Hiroyuki Ishihara <sup>1</sup>  
Francisco Carlos Lira Pessoa <sup>1</sup>  
Luís Gustavo de Lima Sales <sup>2</sup>

## TREND ANALYSIS OF HISTORIC DISCHARGE SERIES IN THE AMAZON RIVER HYDROGRAPHIC BASIN

Recibido el 16 de marzo de 2022. Aceptado el 20 de febrero de 2023

### Abstract

*Studying flow trends is important to understand hydrological variability and to determine what has influenced their increases or decays. The present work analyzes the spatio-temporal trends of the annual series of average flow in the Amazon River Basin (Brazilian portion) of 92 fluviometric stations through non-parametric Mann-Kendall and Sen's Slope tests for five distinct periods (1975-2014, 1980-2014, 1985-2014, 1995-2014 and 2000-2014). The results indicate that the series of average flows are increasing in the Amazon Basin for all analyzed periods. In the sub-basins of the right bank of the Amazon River, Tapajós and Madeira, the most recent period (2000-2014) records the greatest trends of significant increase in the average annual flow from 1998 onwards, reaching the highest values ever observed. Mean flow decay trends were found at six stations in the Tapajós and Madeira sub-basins. The magnitude of trends by Sen's Slope test, of significant or non-significant data, shows that there is behavior of increase in flow rates throughout the Amazon basin, which can be influenced by atmospheric systems operating in the Amazon (such as the Intertropical Convergence Zone, ENOS, General and Upper Circulation in Bolivia) or changes in land use and occupation, such as deforestation of the right bank of the Amazon River.*

**Keywords:** Amazon, trends, discharge.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

\* *Autor correspondente:* Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, nº 01, Guamá, Belém, Pará, 66075-110. Brasil. Email: [luanna.dias@itec.ufpa.br](mailto:luanna.dias@itec.ufpa.br)

## Resumo

Estudar as tendências de vazão é importante para compreender a variabilidade hidrológica e para determinar o que têm influenciado nos seus aumentos ou decaimentos. O presente trabalho analisa as tendências espaço-temporais das séries anuais de vazão média na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas (porção brasileira) de 92 estações fluviométricas através de testes não paramétricos de Mann-Kendall e Sen's Slope para cinco períodos distintos (1975-2014, 1980-2014, 1985-2014, 1995-2014 e 2000-2014). Os resultados apontam que as séries de vazões médias estão aumentando na Bacia Amazônica para todos os períodos analisados. Nas sub-bacias da margem direita do rio Amazonas, Tapajós e Madeira, o período mais recente (2000-2014) registra as maiores tendências de aumento significativo da vazão média anual a partir de 1998 e que atingem os maiores valores já observados. Tendências de decaimento da vazão média foram encontradas em seis estações das sub-bacias do Tapajós e Madeira. A magnitude das tendências pelo teste de Sen's Slope, de dados significativos ou não significativos, mostra que há comportamento de aumento das taxas de vazão em toda bacia amazônica, que pode ser influenciado por sistemas atmosféricos atuantes na região (como Zona de Convergência Intertropical, ENOS, Circulação Geral e Alta da Bolívia) ou mudanças de uso e ocupação do solo, como o desmatamento da margem direita do Rio Amazonas.

**Palavras-chave:** Amazônia, tendências, vazão.

## Introdução

Os estudos de tendências das componentes hidrológicas, como vazão e precipitação, têm aumentado para identificar uma possível mudança climática (Molnár e Ramírez, 2000), como encontrado por Zhao *et al.* (2014), utilizando o teste de Mann Kendall na Bacia do Rio Yellow (China) para identificar impactos no clima. Calcular as tendências contribui para a compreensão da variabilidade climática global e é essencial para o desenvolvimento de modelos hidrológicos e gestão de recursos hídricos (Macêdo, 2013).

É importante ressaltar que a vazão não é um componente climático, mas é variável que influencia indiretamente nas características climatológicas (Limberger e Silva, 2012), que através da contribuição para o escoamento superficial pela evaporação, retorna a atmosfera onde há atuação climática. Sendo assim, a vazão é o parâmetro que mensura o volume de água em determinado intervalo de tempo de uma bacia hidrográfica, importante para estudos de disponibilidade hídrica, controle de cheias e de projetos de engenharia como as barragens.

As transformações climáticas e mudanças no uso e ocupação do solo tendem a afetar a demanda de água do planeta e o padrão dos parâmetros hidrológicos (Gomes Júnior e Ely, 2021; Santos *et al.*, 2020). Isto reflete em alterações no ciclo hidrológico e na dinâmica socioambiental. As comunidades ribeirinhas na Amazônia sentem essas mudanças na disponibilidade hídrica da região, com a intensificação das cheias e dos períodos de estiagem. Diversos modelos matemáticos e estatísticos permitem o entendimento de tendências climáticas globais a partir de dados hidrológicos e meteorológicos.

Na Amazônia não foram observadas tendências sistemáticas em longo prazo às condições mais secas ou chuvosas, também não foram observadas tendências importantes das vazões dos rios da Amazônia (Marengo, 2008).

Do *et al.*, (2017) aplicaram a análise de tendência através do teste de Mann Kendall com significância de 90% em 9213 estações fluviométricas ao redor do mundo e identificaram tendência crescente em algumas partes da América do Sul. Neste estudo, curiosamente, nem a presença de barragens e mudanças na cobertura florestal tiveram grandes efeitos nos resultados da tendência, mas o tamanho da bacia influenciou, já que as bacias com tendência crescente tendiam a ser menores.

O trabalho de Limberger e Silva (2012), identificou que na Amazônia para bacias menores há média e forte correlação entre chuva e vazão. George (2007) na bacia do Winnipeg (Canadá) constatou o aumento da vazão na década de 1960 a 1970 que coincidiu com as precipitações acima da média.

Já o estudo de Higashino e Stefan (2019) no Rio Banjo (Japão) identificou que a descarga não é afetada apenas pelas mudanças climáticas, mas pelas mudanças de uso e ocupação do solo, que identificou tendência de aumento na vazão e baixa correlação com a precipitação.

Novotny e Stefan (2007) utilizaram vazões médias e a  $Q_{7-10}$  no verão e inverno nos Estados Unidos com estações de 100, 70 e 50 anos de dados e também a precipitação, identificaram que há tendências mais fortes a partir de 1990, relacionado com o aquecimento da temperatura da superfície terrestre no final do século XIX até os anos 2000. O aumento de temperatura deixa o Ciclo Hidrológico mais ativo e aumenta a capacidade de retenção de água em toda a atmosfera, o estudo identificou aumento da precipitação e dos picos de inundação nos EUA.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em seu Guia de Práticas Hidrológicas, OMM (1994), recomenda que para cálculos dos padrões e normais climatológicos é necessário o período mínimo de 30 anos de observações sequenciais. Entretanto, diversos trabalhos que analisam tendências utilizaram períodos de até 10 anos de dados (Lima Júnior e Zanella, 2017; Novotny e Stefan, 2007; Crowley *et al.*, 2008; Marengo e Tomasella, 1998; Moura, 2015). Além disso, quando o período é maior ou igual a 10 anos a variável  $S$  do teste de Mann-Kendall pode ser comparada como uma distribuição normal (Salviano *et al.*, 2016).

Para Limberger (2016) e Marengo (2008) as vazões da Amazônia possuem altas correlações com as anomalias de TSM (Temperatura da Superfície do Mar), o que sugere associação com o ENOS (El Niño Oscilação Sul). Projeções de Marengo (2008) indicam que para a América latina o aumento da temperatura e a diminuição de água no solo devem transformar parte da Amazônia

em savanas. No Sul da Espanha, a aplicação do teste de tendência de Mann-Kendall verificou redução de 60% do fluxo, um cenário de déficit (Yeste *et al.*, 2018).

Os estudos supracitados aplicaram testes de tendência não paramétricos e mostram a importância de utilizar a variável vazão. A análise de tendência é base para identificação de alterações no ciclo hidrológico e também para aplicação de modelos globais para previsão dos extremos. Identificar estas mudanças e prevê-las é essencial para a gestão de recursos hídricos e para aqueles que dependem da água.

Por isso, este trabalho é realizado em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas na porção brasileira, que possui um dos maiores reservatórios de água doce do planeta. Este estudo utiliza estações de vazão, com pelo menos 15 anos de dados disponíveis, para a análise de tendência e a variabilidade espaço temporal através do teste de Mann-Kendall e Sen's Slope. Este é um importante trabalho para a compreensão da variabilidade hidrológica e de disponibilidade hídrica na Amazônia.

### Área de Estudo

A Bacia do Rio Amazonas, mais importante dos rios do planeta, cobre aproximadamente 6.3 milhões de km<sup>2</sup> (aproximadamente 5% das terras emergidas) e descarrega no Atlântico um volume de água que representa 17% da descarga total de água doce do mundo e abrange a maior parte da floresta amazônica. Cerca de metade da floresta tropical remanescente do mundo encontra-se na Bacia Amazônica (Heerspink *et al.*, 2020).

Se estende por 7 países: Brasil (63%), o Peru (16%), a Bolívia (12%), a Colômbia (5.6%), o Equador (2.3%), a Venezuela (0.8%) e a Guiana (0.3%) e abrange uma população total de 54 milhões de pessoas. No Brasil, aproximadamente 2/3 da Bacia do Rio Amazonas inclui os estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima e parte dos estados do Amapá, Mato Grosso e Pará (Molinier, *et al.*, 1995; Trejo, *et al.*, 2021).

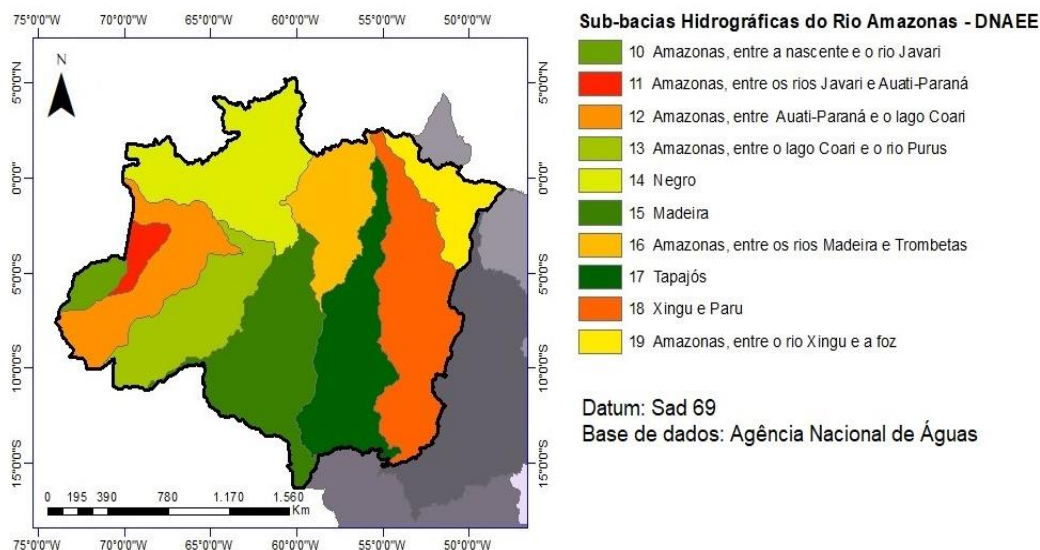
O Amazonas apresenta grande regularidade no regime hidrológico anual, quando as sub-bacias estão na estiagem são compensadas pelas sub-bacias na época de cheia. Sendo assim, o regime hidrológico varia pouco a cada ano. Quanto à sazonalidade essa normalidade muda, pois a estação chuvosa (novembro a abril) possui 70% da precipitação total anual e a menos chuvosa (maio a outubro) somente 30% (Coutinho *et al.*, 2018).

Quanto à hidrografia, a bacia amazônica, está dividida em três grandes unidades morfoestruturais: os escudos (44% da superfície total), a cordilheira dos Andes (11%) e a planície amazônica (45%) em que os principais rios formadores do Amazonas apresentam características hidrográficas ligadas a estas três unidades. Os dois rios de origem andina são o Solimões e o

Madeira. Na região de Manaus, a convergência das contribuições dos rios Solimões, Negro e Madeira conduzem a um importante aumento das superfícies drenadas e das vazões. Esta concentração de descarga tem um declive hidráulico fraco, que gera perturbações no escoamento destes rios e reflete na não-univocidade das curvas-chave (Moliner *et al.*, 1995).

No período de 1973-1990, de acordo com Molinier *et al.* (1995), a vazão média anual na foz do Amazonas foi de 209000 m<sup>3</sup>/s, e no ponto de maior contribuição, que é a estação de Óbidos, a descarga chega a 168700 m<sup>3</sup>/s com uma área de drenagem de 4680000 km<sup>2</sup>, sendo um dos maiores pontos de medição de descarga líquida do mundo. As principais sub-bacias da bacia amazônica na porção brasileira são as do Rio Negro, Solimões, Purus, Madeira, Tapajós e Xingu.

A Figura 1 apresenta a área de estudo, que corresponde aos limites da Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas na porção brasileira, divisão instituída pelo antigo DNAEE (Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica) e a divisão em dez (10) sub-bacias hidrográficas.



**Figura 1.** Limites da Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas e suas sub-bacias (porção brasileira).

### Metodologia

É utilizado os dados de vazão disponíveis no Hidroweb <<https://snirh.gov.br/hidroweb/>> da Agência Nacional de Águas (ANA), através da consulta de todas as estações disponíveis e que tenham um período mínimo de 15 anos até o ano de 2014, que é o ano limite em que a série fluviométrica está consistida e sem falhas.

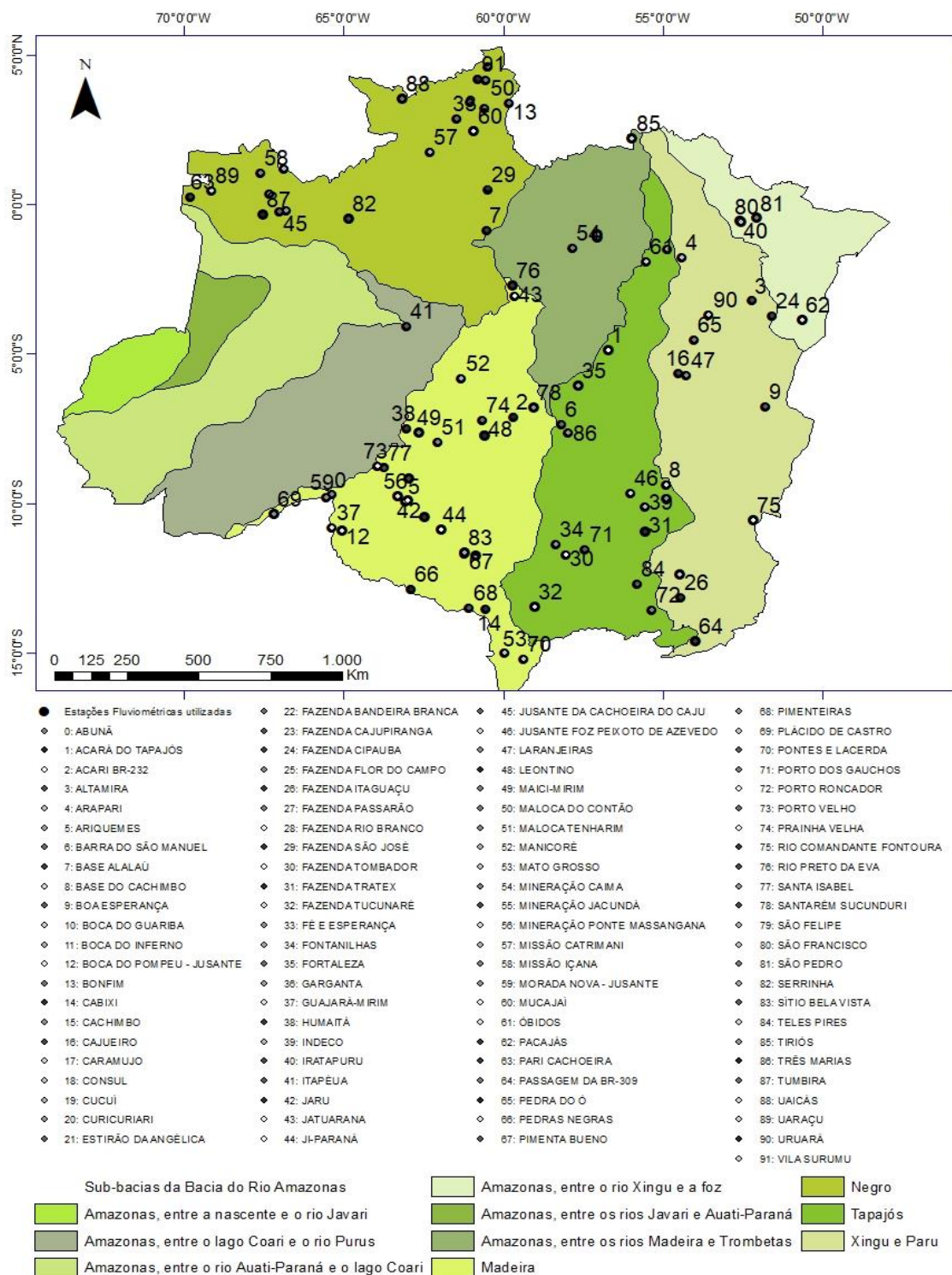


Figura 2. Estações Fluviométricas utilizadas inseridas nas sub-bacias hidrográficas do Rio Amazonas.

Na escolha das estações fluviométricas foi considerada as estações que possuíssem dados de vazão (aquelas com medição de descarga líquida e curva-chave), período sem falhas (em função das poucas metodologias consolidadas na literatura sobre o preenchimento de dados de vazão), com período mínimo de 15 anos e ano limite de 2014. O ano limite de 2014 foi escolhido, pois só há dados consistidos de vazão até 2014 no banco de dados da ANA, ou seja, os dados utilizados são consolidados pela ANA através de métodos estatísticos como regressão linear e de preenchimento com base nas áreas de drenagem de estações de apoio. Como os dados já estão consistidos e validados, os autores não aplicaram nenhum método de preenchimento. Após a análise do banco de dados e consulta aos dados disponíveis, 92 estações fluviométricas são utilizadas como mostra a Figura 2.

#### Análise de Tendência: Mann-Kendall e Sen's Slope

O teste de Mann-Kendall e de Sen's Slope foi aplicado nas séries anuais de vazão média, com o uso do software livre "R". Os testes foram aplicados em cinco períodos distintos, para melhor compreender a variabilidade temporal. Sendo assim, os dados das séries históricas foram divididos e o teste aplicado para cada período, ressaltando que nem todas as estações se enquadram em todos os períodos, algumas têm apenas 15 anos, outras apenas 30 anos. Os períodos de aplicação dos testes foram: 1975 a 2014 (40 anos), 1980 a 2014 (35 anos), 1985 a 2014 (30 anos), 1995 a 2014 (20 anos) e 2000 a 2014 (15 anos), como indicado por Novotny e Stefan (2007).

De acordo com Mann (1945) e Kendall (1975) a estatística do teste é definida pela Equação 01:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad \text{Equação (1)}$$

$x_i$ : Dados observados

$x_j$ : Dados estimados da sequência de valores

$n$ : Comprimento da série temporal

E o sinal  $(x_i - x_j)$  é igual a -1 para  $(x_i - x_j) < 0$ , 0 para  $(x_i - x_j) = 0$  e 1 para  $(x_i - x_j) > 0$ .

O valor de S é normalmente distribuído com média  $E(S)$  e variância  $Var(S)$ , para uma situação na qual pode haver valores iguais de  $x$ , que são calculados pelas Equações 02 e 03:

$$E(S) = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18}$$

Equação (3)

Onde

$t_p$ : é o número de dados com valores iguais num certo grupo

$q$ : é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados num certo grupo  $p$

O teste estatístico parametrizado de Mann-Kendall ( $Z_{MK}$ ) é dado pela equação 04:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad \text{Equação (4)}$$

A presença de uma tendência estatisticamente significativa é avaliada usando o valor de  $Z_{MK}$ . Após o teste de hipótese, um valor positivo ou negativo de  $Z_{MK}$  pode indicar um aumento ou diminuição na tendência, dentro de um nível de confiança de 95% do valor de  $Z_{MK}$  entre -1.96 a +1.96 (Lopes e Silva, 2013).

O teste Sen's Slope é utilizado para calcular a magnitude da tendência e dá uma dimensão numérica do quanto realmente aquela série aumentou ou diminuiu a cada ano, e mensura o resultado do teste de Mann-Kendall.

Segundo Alcântara et al. (2019) o método é insensível a outliers e dados ausentes, e mais rigoroso que a curvatura da regressão linear provendo medidas mais reais. É obtido através do cálculo dos pares de valores da série conforme a Equação 05:

$$\beta = \text{Mediana} \frac{(x_i - x_j)}{(j - i)} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde

x: vazão correspondente ao ano j e i, sendo j sempre menor que i.

## Resultados

Ao todo foram realizados 272 testes de Mann-Kendall e Sen's Slope na série de vazão média de 92 estações e aplicadas nos cinco períodos analisados (1970-2014, 1980-2014, 1985-2014, 1995-2014 e 2000-2014). A Tabela 1 apresenta a porcentagem de estações com tendência positiva ou negativa significativa com  $p$  value = 0.05, ou seja, com 95% de chances dessa tendência ser verdadeira. O período que apresentou maiores resultados significativos foi o de 35 anos (1980-2014), para o período de 30 e 20 anos a tendência positiva diminui e aumenta para os últimos 15 anos.

A vazão média teve maior porcentagem para tendência de aumento em comparação com a de decaimento, como mostra a Tabela 1. A Figura 3, apresenta a distribuição espacial das tendências pelo teste de Mann-Kendall da série de vazão média para cada período analisado. Ao analisar a Figura 3 (b), no período de 1980-2014, as tendências positivas estão bem distribuídas nas



estações localizadas na margem esquerda do Rio Amazonas (porção norte), e apenas três estações da margem direita (porção sul) possuem tendência negativa. No entanto, deve-se levar em conta que há poucas estações estudadas nos afluentes da margem direita para o período de 1980-2014. No entanto, o estudo de Heerspink *et al.* (2020) com a utilização de mais estações para o período de 1980-2014 na área da bacia amazônica e do Tocantins, mostrou descargas crescentes na porção norte e oeste e descarga decrescente na porção sul e leste da bacia amazônica.

**Tabela 1.** Porcentagem das estações com série de vazão média com tendência positiva (S+) ou negativa (S-) significativas e tendência não significativa (NS) na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas.

Período	1975-2014 (40 anos)	1980-2014 (35 anos)	1985-2014 (30 anos)	1995-2014 (20 anos)	2000-2014 (15 anos)
n° estações	10	19	66	85	92
% S+	40%(+)	68.4%(+)	15.2%(+)	16.5%(+)	22.8%(+)
% S-	10%(-)	21.1%(-)	1.5%(-)	1.2%(-)	1.1%(-)
% NS	50%	10.5%	83.3%	82.3%	76.1%

Das 66 estações estudadas no período de 1985-2014, Figura 3 (c), apenas 9 estações tiveram tendência positiva e uma tendência negativa. Quando se diminui o período, para os últimos 20 anos (1995-2014) e 15 anos (2000-2014), há um aumento no número de estações com tendência positiva, e é nítido na Figura 3 que esse aumento ocorre nas estações localizadas a margem direita do Rio Amazonas, sendo evidente no período de 2000-2014. Nestes dois períodos há apenas uma estação (Fazenda Tucunaré) com tendência negativa, as demais são positivas.

Em síntese para os períodos de 1975-2014 e 1980-2014 as tendências positivas estão nas estações dos afluentes da margem esquerda, no entanto, não há estações analisadas na margem direita por falta de dados. Os demais períodos, a partir de 1985, apresentam estações distribuídas em toda a área da bacia (com exceção das sub-bacias 10 – Amazonas, entre a nascente e o Javari; 11 – Amazonas, entre os rios Javari e Auati-Paraná e 12- Amazonas entre Auati -Paraná e o lago Coari) e a distribuição das tendências positivas significativas se concentram na margem direita do Amazonas, principalmente nos últimos 15 anos.

Ao analisar os resultados das vazões médias por sub-bacia, a sub-bacia 13 – Entre o lago Coari e o rio Purus, só teve uma estação com tendência positiva significativa que é Itapéua, no período de 1975-2014, com  $Z_{MK}=2.02$ . Na sub-bacia 19 – Amazonas entre o Rio Xingu e a foz, das 4 estações analisadas, apenas a estação de São Francisco apresentou tendência significativa de aumento para o período de 1980-2014.

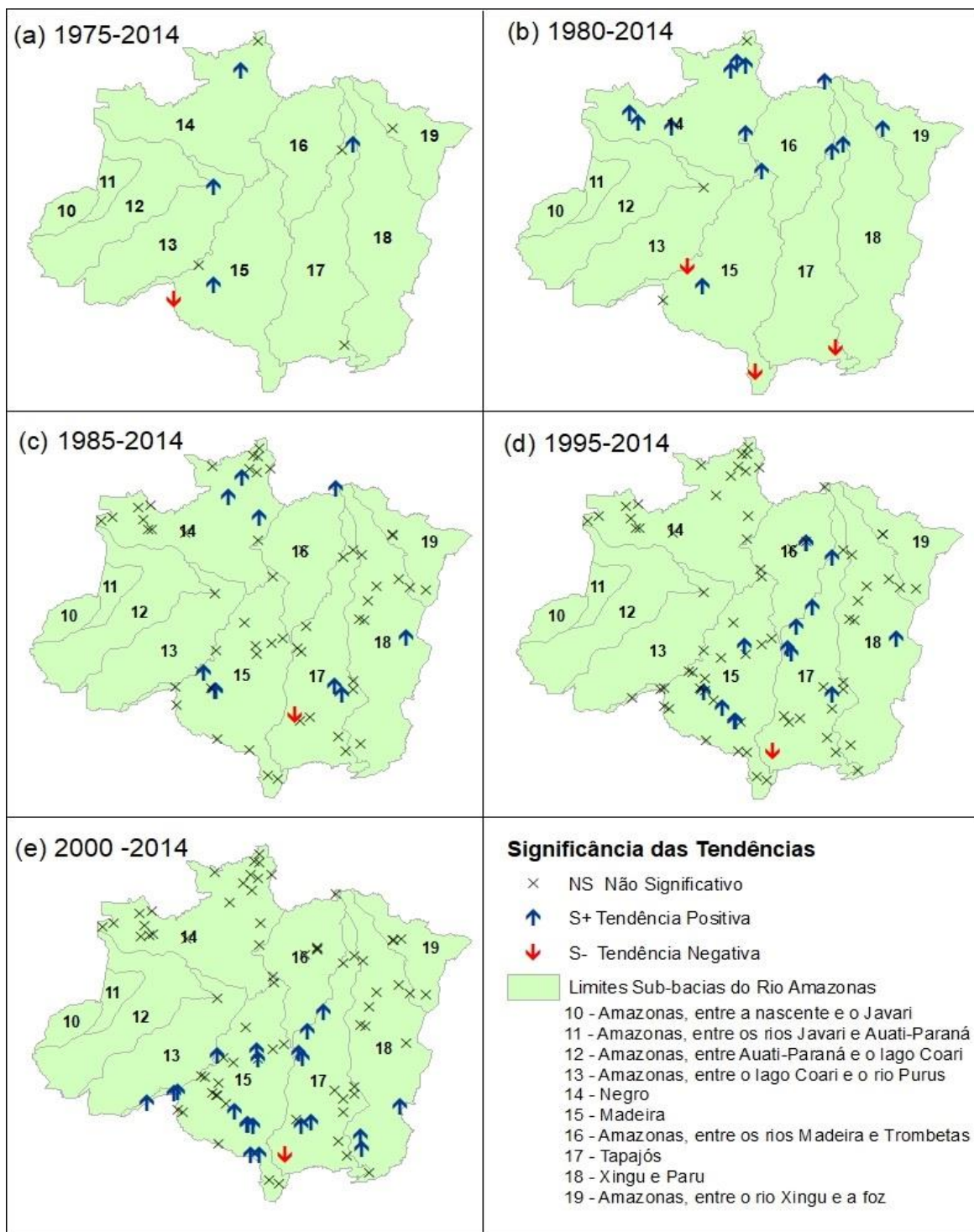


Figura 3. Distribuição espacial das tendências pelo teste de Mann-Kendall nas séries de vazões médias.

Na sub-bacia 16 – Amazonas, entre os rios Madeira e Trombetas, foi realizado a aplicação do teste em apenas 5 estações. Destas, houve tendência positiva significativa em 3 estações: Caramujo (1995-2014), Estirão da Angélica (1995-2014) e Tiriós (1980-2014 e 1985-2014). O trabalho de Hachem (2016) analisou sete estações, nesta mesma região da sub-bacia 16 mas levando em conta a divisão do Estado do Pará em mesorregiões, e aplicou o teste de Mann Kendall para o período de 1995-2013, neste estudo as estações de Caramujo e Tiriós não apresentaram tendência positiva e as demais valores positivos de  $Z_{MK}$  só que menor que 1.96.

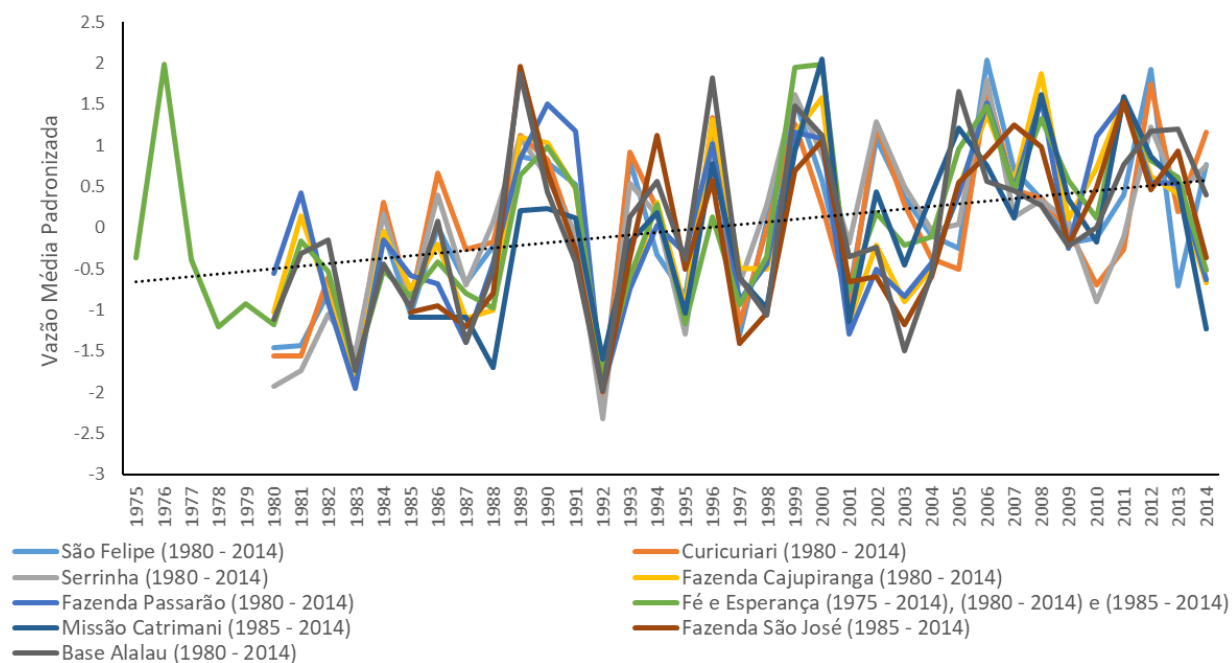
Apesar de não haver significância, os resultados das cinco estações deste trabalho e das sete estações do estudo de Hachem (2016) apresentaram valores de  $Z_{MK}$  positivos. O estudo de variabilidade hidrológica realizado por Coutinho *et al.* (2019) também identificou tendência de crescimento da vazão na sub-bacia do Rio Trombetas.

Na sub-bacia 18 – Rio Xingu e Paru, o teste de Mann-Kendall foi aplicado em 12 estações fluviométricas. Mas apenas as estações Fazenda Itaguaçu (2000-2014), Consul (2000-2014), Rio Comandante Fontoura (2000-2014) e Boa Esperança (1985-2014 e 1995-2014) tiveram tendência positiva. O estudo de Moura (2015), na sub-bacia do Xingu, mostrou tendência significativa positiva de aumento na estação de Boa Esperança. Coutinho *et al.* (2019) identificou através de análise dos hidrogramas que a estação de Arapari teve tendência positiva e a de Altamira teve tendência negativa para o período de 1982-2012, no entanto, ao aplicar o teste de Mann Kendall não houve tendência.

A sub-bacia 14 – Rio Negro, para as vazões médias, apresentou apenas tendência positiva nos períodos de 1975-2014, 1980-2014 e 1985-2014, como encontrado por Coutinho *et al.* (2019). Marengo e Tomasella (1998) aplicou o teste de Mann Kendall para a descarga média durante os três meses de cheia em estações localizadas na sub-bacia do Rio Negro no período e 1903-1992, os resultados do  $Z_{MK}$  foram positivos, mas não significativos. O comportamento da sub-bacia 14 é semelhante ao encontrado por Marengo e Tomasella (1998) e a tendência positiva torna-se significativa. No entanto, para os períodos mais recentes estas estações não tiveram tendência significativa, ou seja, nos últimos 20 e 15 anos o aumento não foi significativo quando comparado aos períodos com mais de 30 anos.

A Figura 4, apresenta a distribuição da vazão média padronizada das estações que tiveram tendência positiva na sub-bacia 14 do Rio Negro. Para melhor visualizar os dados, foi calculada a vazão padronizada (valor adimensional) que é a diferença entre a vazão média anual e a vazão média da série histórica, dividido pelo desvio padrão da série histórica realizado para cada estação com tendência significativa positiva da sub-bacia-14 Rio Negro. Desta forma os valores ficam na mesma escala, já que cada estação possui uma magnitude diferente de vazão. A vazão média padronizada foi aplicada no trabalho de Coutinho *et al.* (2019).

### Sub-bacia 14 - Rio Negro



**Figura 4.** Vazão média padronizada das estações do Rio Negro (sub-bacia 14) com tendência significativa positiva.

No Rio Negro, a Figura 4 aponta tendência de aumento gradativa, ou seja, não há mudança abrupta na série em algum período específico, por isso que os períodos curtos (de 20 e 15 anos) não apresentam tendência significativa, pois não há grande variação em comparação aos mais antigos. Este resultado é melhor observado na Figura 5, que é a Curva de Duração Decadal da vazão pela sua frequência de excedência (%) de seis estações do Rio Negro, esta curva também foi aplicada no estudo de Guzha *et al.* (2013). Na Figura 5, é possível observar um sutil “salto” da vazão média a partir de 1990 (que é um aumento de cerca de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  na estação São Felipe), e após este período as curvas de 1990-1999 e 2000-2009 são bem próximas, que justifica ainda mais a não ocorrência de tendência significativa analisando apenas este período.

Na sub-bacia 15 – Rio Madeira, que contribuí com o Amazonas na margem direita, as tendências positivas ocorrem na maioria das estações nos últimos 20 e 15 anos. A Figura 6 apresenta, a vazão média padronizada das estações com tendência positiva. Em 1998 há um pico de diminuição significativa da vazão em todas as estações da Figura 6, neste período (1997-1998) teve a ocorrência do fenômeno ENOS fase positiva forte de acordo com os dados do CPTEC (2021). Sendo que em 2005 houve período de seca na Amazônia, o que acarretou em diminuição mas que não é tão significativa em comparação ao ano de 1998, que mostra a influência do fenômeno ENOS, resultados também encontrados nos estudos de Coutinho *et al* (2019) e Lima e Dias (2015).

A partir de 1999 há aumento significativo dos picos de cheia no hidrograma em comparação ao período de 1975-1998, em que os dados eram mais uniformes.

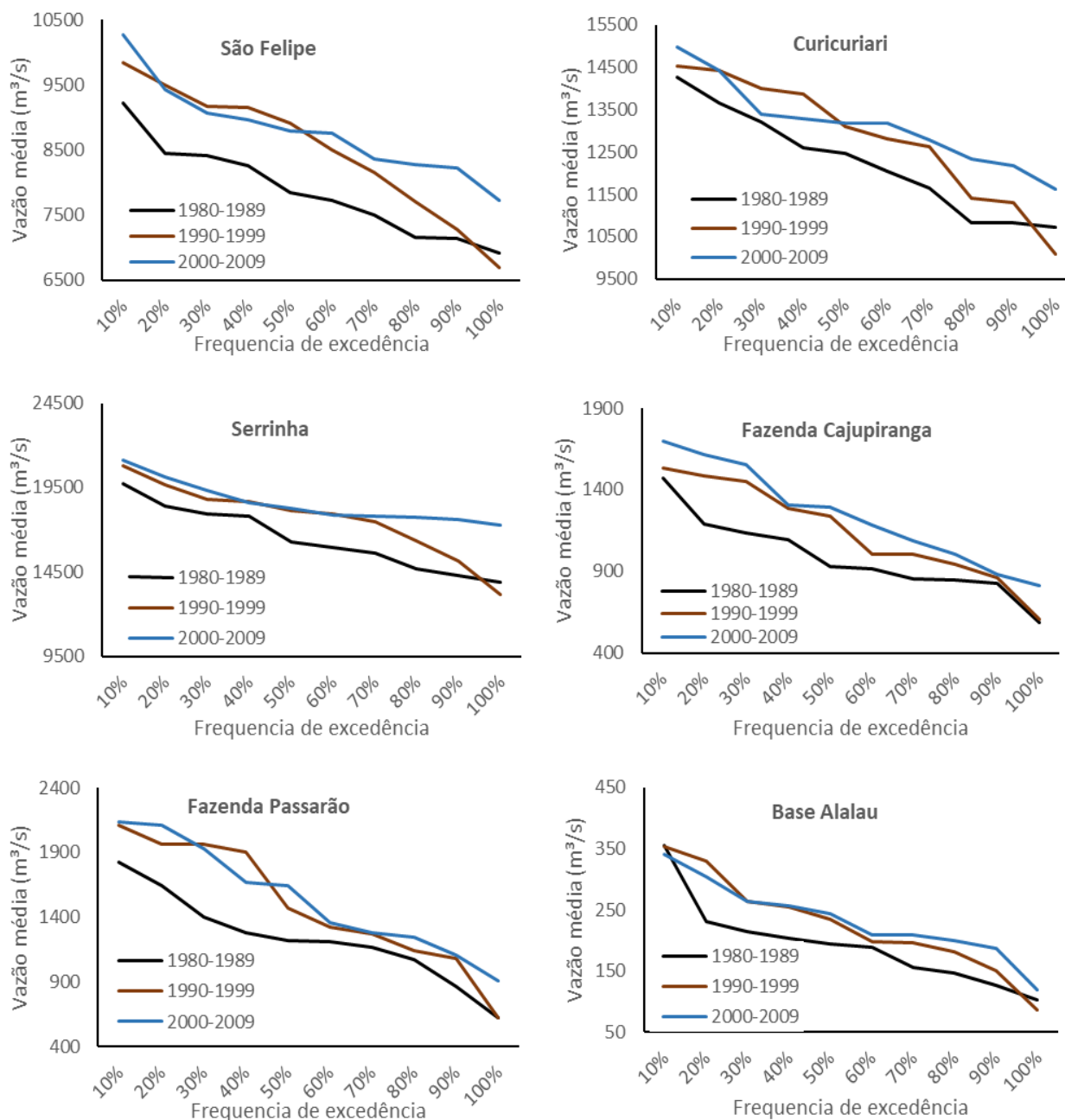
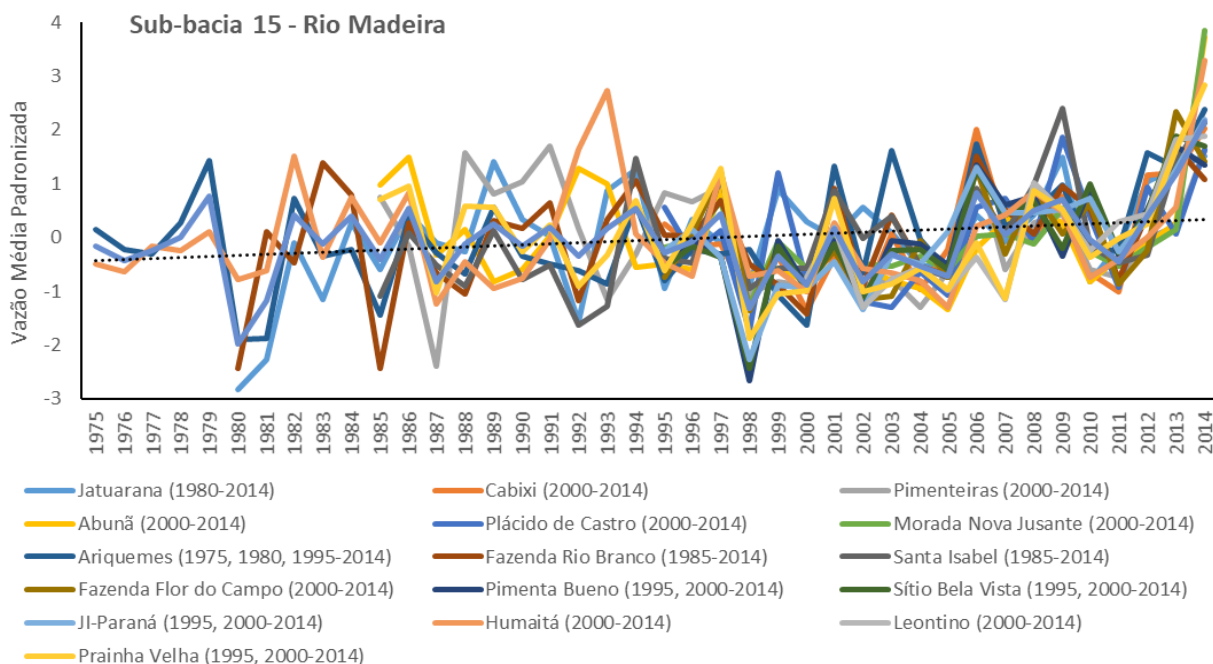


Figura 5. Curva de Duração Decadal de 6 estações com tendência positiva da Sub-bacia 14 - Rio Negro.



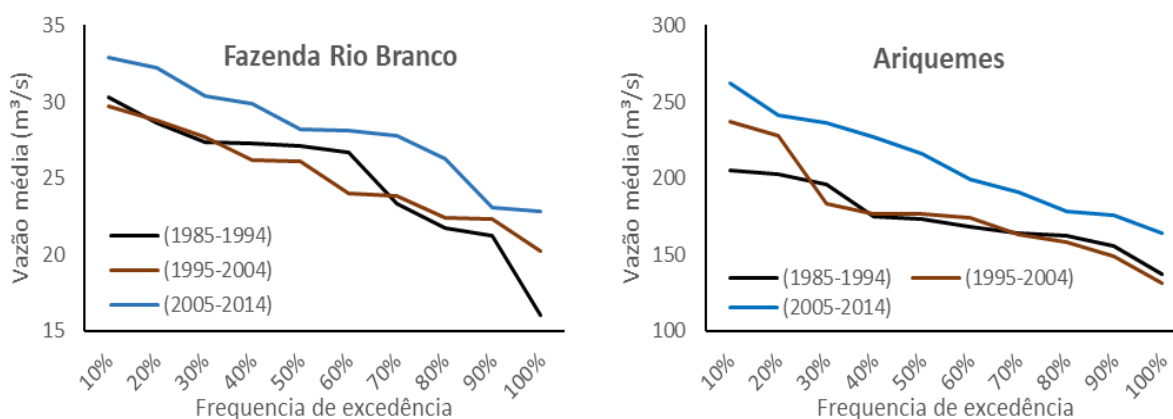
**Figura 6.** Vazão média padronizada das estações do Rio Madeira (sub-bacia 15) com tendência significativa positiva.

Deve-se ressaltar que em 2010 também houve seca na Amazônia, que de acordo com o INPE (2011) foi a maior seca já registrada em mais de 100 anos de monitoramento na estação de Manaus, superando a seca de 2005. A seca de 2010, segundo o INPE, teve início durante o verão com a ocorrência de El Niño moderado mas que foi intensificado pelo aquecimento das águas tropicais do Atlântico Norte.

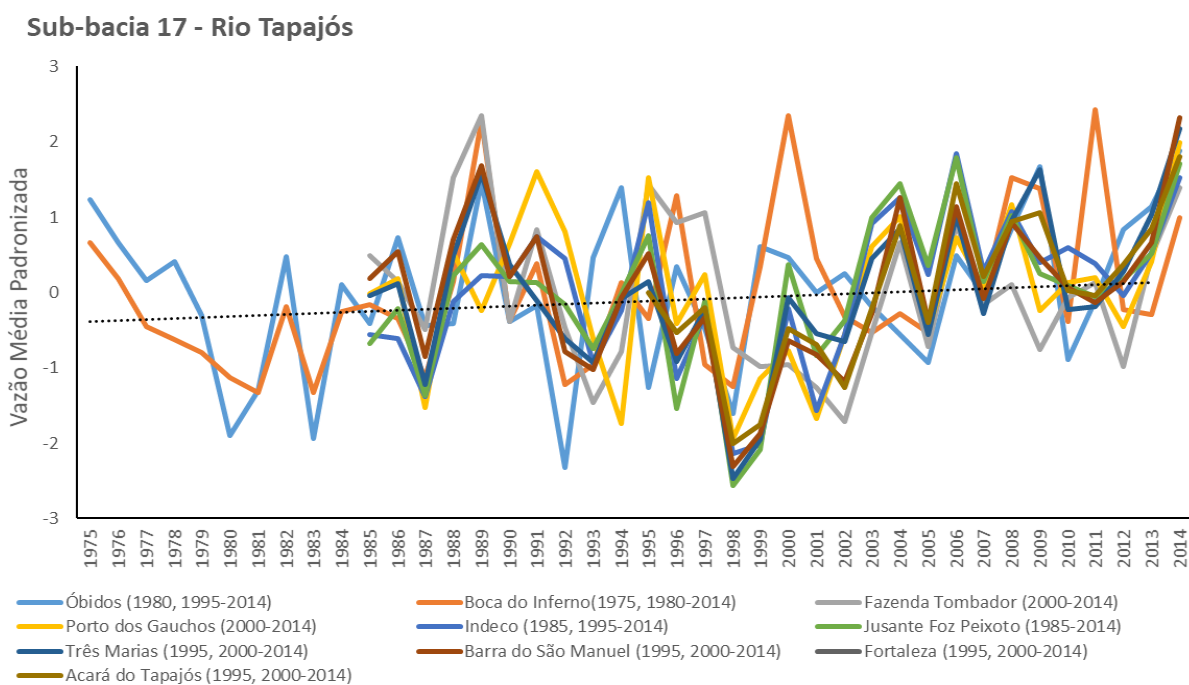
A partir de 2010, a maioria das estações com tendência significativa positiva aumentam a vazão média anual, atingindo os maiores valores observados desde 1975 no ano de 2014. A evolução de aumento da vazão após 2010 é muito mais intensa na sub-bacia 15 do Rio Madeira do que na sub-bacia 14 do Rio Negro. A Figura 7 apresenta as curvas de duração decadal da vazão média de 2 estações na sub-bacia 15 do Rio Madeira, em que o período de 2005-2014 mostra o aumento da vazão, com comportamento diferente do observado na sub-bacia 14 do Rio Negro em que as estações aumentam a vazão sutilmente a partir de 1990 e se mantém.

Comportamento semelhante ao da sub-bacia 15 – Rio Madeira é encontrado na sub-bacia 17 - Rio Tapajós, em que a partir de 1999 as estações localizadas a margem direita do Amazonas apresentam aumento na vazão média, mostrado no hidrograma da Figura 8. O ano de 1998 é o que apresenta a menor média anual de vazão de todas as estações com tendência significativa

positiva, também influenciado pelo El Niño forte de 1998, como na sub-bacia do Madeira. Tanto a sub-bacia do Madeira como do Tapajós tem maior área delimitada a margem direita do Rio Amazonas.



**Figura 7.** Curva de Duração Decadal de 2 estações com tendência positiva da Sub-bacia do Rio Madeira.



**Figura 8.** Vazão média padronizada das estações do Rio Tapajós (sub-bacia 17) com tendência significativa positiva.

Os resultados obtidos por Nóbrega *et al.* (2018) mostraram um aumento de 2% na vazão do Rio Tapajós na micro-bacia do Jamanxin com uso de dados físicos do HYBAM (Serviço de Observação da Bacia Amazônica) de 1996-2015 e do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), sendo que na área de pastagem o coeficiente de escoamento foi de 0.67 e de floresta é de 0.28. Nas demais áreas da bacia não foi encontrada tendência significativa nos últimos 20 anos na vazão.

O estudo de Moura (2015) mostrou que na bacia do Tapajós, utilizando estações com diferentes períodos com mais de 30 anos até 2013, a parte sudeste da bacia tem tendências crescentes e na parte sudoeste diminui as tendências. Isto coincide com a distribuição espacial das estações, que na parte sudoeste da sub-bacia 17 encontra-se duas estações com tendência significativa negativa.

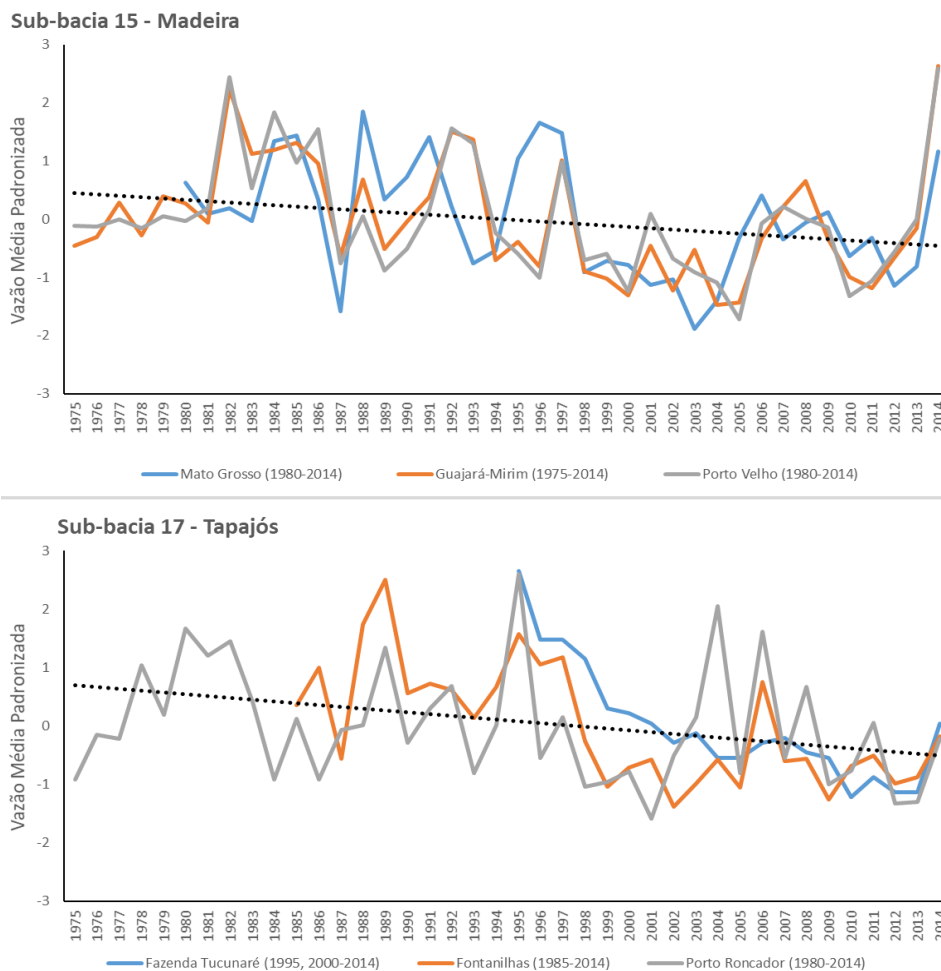
Apenas três estações da sub-bacia 15 – Rio Madeira que são Mato Grosso (1980-2014), Guajará-Mirim (1975-2014) e Porto Velho (1980-2014) e três estações da sub-bacia 17 – Rio Tapajós que são Fazenda Tucunaré (1995-2014 e 2000-2014), Fontanilhas (1985-2014) e Porto Roncador (1980-2014) tiveram tendência negativa significativa das 92 estudadas, como mostra a Figura 9.

Todas as seis estações com tendência negativa significativa estão localizadas a margem direita do Amazonas. A estação Fazenda Tucunaré da sub-bacia 17 foi a única com tendência significativa negativa para o período mais recente de 2000-2014, e a que apresentou menores picos de cheia após 1995 em comparação as outras estações da Figura 9 para a sub-bacia 17. Moura (2015) aplicou o teste de Mann Kendall para diversas estações da sub-bacia do Rio Tapajós, e a tendência da estação de Fontanilhas também foi negativa.

O teste de Sen's Slope determina a taxa de aumento ou decaimento de uma variável, neste estudo é uma taxa anual. Dessa forma é possível identificar o comportamento das tendências de cada estação e espacializa-las para verificar a distribuição. Com o uso do método de interpolação IDW (Ponderação do Inverso da Distância) com uso do software Arcgis 10.8. No estudo de Magalhães *et al.* (2013), o método IDW foi o método mais eficiente para espacialização da precipitação.

Através do método foi possível interpolar os resultados do teste de Sen's Slope para a vazão média do período de 2000-2014. Ressaltando que os resultados do teste de Sen's Slope são na unidade de m<sup>3</sup>/s/ano para a vazão, e incluí todos os resultados independentemente de serem significativos ou não significativos pelo teste de Mann-Kendall. A interpolação foi realizada apenas neste período (2000-2014) pois é o que apresenta o maior número de estações. Na Figura 10 é apresentada a magnitude interpolada dos testes de Sen's Slope para os dados de vazão média de todas as 92 estações para o período de 2000-2014.

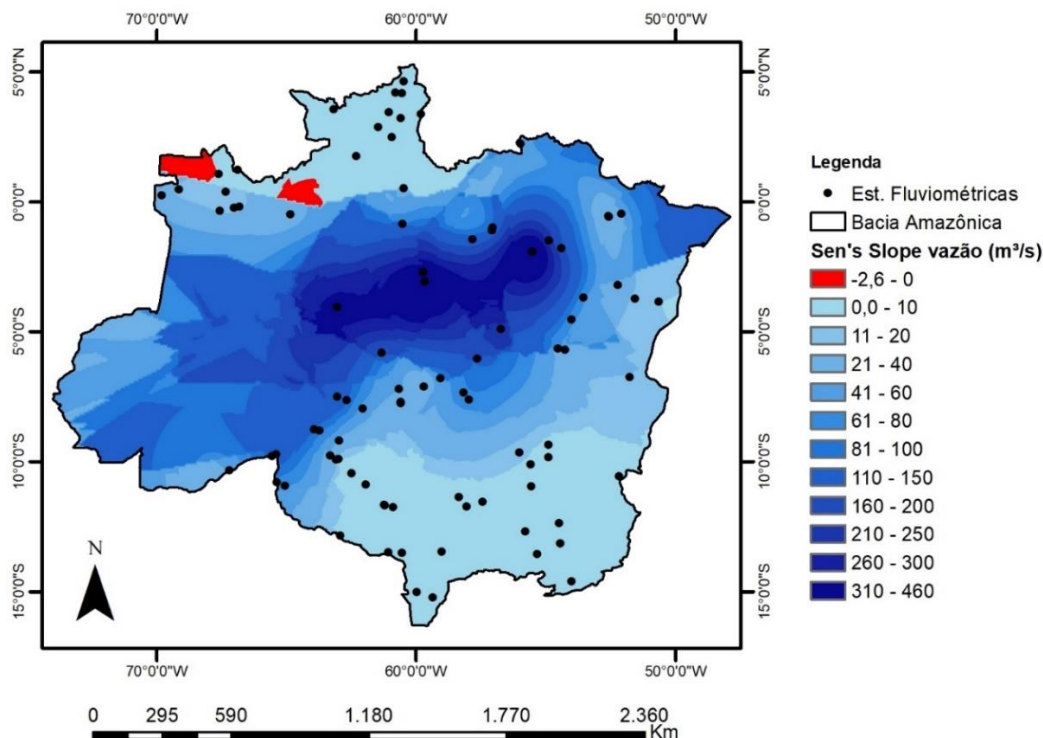




**Figura 9.** Vazão média padronizada das estações do Rio Madeira (sub-bacia 15) e Tapajós (sub-bacia 17) com tendência significativa negativa.

Na Figura 10 as vazões aumentam em toda a área de estudo para o período de 2000-2014 e com áreas de decaimento apenas no extremo Noroeste da bacia. Deve-se ressaltar que a interpolação leva em conta apenas a magnitude do teste de Sen's Slope e não a significância dos valores pelo teste de Mann-Kendall.

A região central da bacia é a que possui maiores taxas de aumento na vazão, justificado pelos altos valores de vazão, pois recebe contribuição de diversos afluentes. Nos extremos norte e sul da bacia as taxas de aumento ficam na faixa de 0 a 20 m<sup>3</sup>/s por ano. Já no extremo oeste não há estações, o que compromete a qualidade da análise da interpolação nesta área.



**Figura 10.** Magnitude anual da vazão média pelo teste de Sen's Slope no período de 2000-2014.

Importante ressaltar que nos últimos 15 anos as vazões estão aumentando. Os aumentos de eventos de cheias interferem diretamente nas comunidades locais e em diversos municípios às margens do rio Amazonas. Coutinho *et al.* (2019) afirma que o risco socioeconômico ambiental é mais perigoso durante eventos de cheia, principalmente nos Estados com menor escala espacial como Rondônia e Roraima, e as cheias acarretam maior vulnerabilidade em estados com maior escala espacial como o Pará e Amazonas.

Concomitantemente, para o período de 2000-2014 as séries de vazões média mostraram tendência significativa de aumento nas estações dos afluentes da margem direita do Rio Amazonas (região sul da bacia Amazônica) que é uma área próxima ao chamado "arco do desmatamento" que segundo Cohen *et al.* (2007) há as maiores taxas de desmatamento na Região Amazônica devido ao processo acelerado de uso e ocupação do solo.

Como afirma Marengo e Tomasella (1998), há aumento do escoamento após o desmatamento. Salati *et al.* (2006) descreve que o desmatamento aumenta, numa primeira fase, a vazão dos rios pelo incremento do escoamento superficial e diminuição da infiltração nas áreas compactadas

pela ausência de vegetação. Essa diminuição impacta no sistema solo-planta da região Amazônica, diminui a evapotranspiração e interfere nos componentes do balanço hídrico.

Modelos numéricos acoplado a circulação geral atmosférica e a modelo de superfície terrestre, ilustram influência do desmatamento na evapotranspiração e descarga no Rio Amazonas e dados reais mostram que nos rios Tocantins e Araguaia há aumento de 25% da vazão com pouca mudança na precipitação (Coe *et al.*, 2009). Simulações de Guimberteau *et al.* (2013) indicam que as sub-bacias da região sul da Amazônia terão alto coeficiente de escoamento para meados do século XXI, cuja hidrologia é fortemente afetada por eventos extremos nos últimos 20 anos.

Aplicar os testes de Mann-Kendall e Sen's Slope para períodos distintos é importante para compreender que a cada período as tendências tem comportamento diferente. No entanto, a limitação de estações com séries longas e numa região extensa como a bacia amazônica compromete a análise pontual da tendência em regiões com escassez de dados. Mesmo com essa limitação, os resultados apontaram que há estações em que as variações de aumento ou decaimento da vazão são expressivos.

### Conclusão

A aplicação dos testes de Mann-Kendall e Sen's Slope detectou que as vazões médias anuais estão aumentando na Bacia Amazônica nos períodos analisados. No período de 15 anos (2000-2014) as vazões médias apresentaram tendência positiva significativa de aumento nas estações localizadas a margem direita do Rio Amazonas (região Sul da Amazônia), área em que as mudanças de uso e ocupação do solo é mais acentuado do que nas estações dos afluentes da margem esquerda.

Na sub-bacia do Rio Negro as tendências positivas de vazão média ocorrem nos períodos com mais de 30 anos, e os períodos mais recentes não apresentaram tendência e não há aumento brusco da vazão nos últimos 15 anos. Já nas sub-bacias do Tapajós e Madeira, a vazão tem comportamento semelhante ao da sub-bacia do Rio Negro até o ano de 1998 quando houve evento de El Niño classificado como forte. Após este evento a vazão média aumentou e os picos de cheia também. Após 2010, as vazões atingiram os maiores valores observados desde a década de 1970.

As sub-bacias do Tapajós e Madeira são as únicas que apresentaram estações com tendência de decaimento da vazão e que são localizadas na margem direita do Rio Amazonas, como as estações de Porto Velho e Mato Grosso.

Ao analisar a distribuição e interpolação dos testes de Sen's slope para a vazão média, observa-se que a vazão tem taxas de aumento em toda a bacia.

A limitação do presente estudo se deu pela baixa disponibilidade de dados de séries mais antigas. Como não foram preenchidas as séries de vazões, é interessante em trabalhos futuros preencher os dados após 2014 para entender o comportamento dos anos mais recentes. Também é importante a aplicação dos testes não paramétricos para as séries sazonais e aplicar nos extremos máximos e mínimos. É importante, aplicar o teste na variável comparação para analisar se o comportamento de aumento é encontrado.

Os resultados inferem que há mudança de tendência na vazão média e metodologias mais robustas devem ser empregadas para avaliar se as mudanças climáticas e a intensificação das mudanças de uso e ocupação têm influenciado no ciclo hidrológico e nas tendências encontradas neste estudo.

### Referências bibliográficas

- Alcântara, L. R. P., Costa, I. R. A., Barros, V. H. O., Santos Neto, S. M., Coutinho, A. P. Antonino, A. C. D. (2019) Análise de Tendência para dados pluviométricos no município de Toritana-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, **4**(2), 130-139.
- Coe, M. T., Costa, M. H., Soares-Filho, B. S. (2009) The influence of historical and potencial future deforestation on the stream flow of the Amazon River. *Land surface processes and atmospheric feedbacks*, **369**(1,2), 165-174.
- Cohen, J. C. P., Beltrão, J. C., Gandu, A. W., Silva, R. R. (2007) Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. *Ciência e Cultura*, **59**(3).
- Coutinho, E. C., Rocha, E. J. P., Lima, A. M. M., Ribeiro, H. M. C., Gutierrez, L. A. C. L., Barbosa, A. J. S., Paes, G. K. A. A., Bispo, C. J. C., Tavares, P. A. (2018) Variabilidade climática da precipitação na Bacia Amazônica brasileira entre 1982 e 2012. *Revista Brasileira de Climatologia*, **22**, 475-500.
- Coutinho, E. C., Rocha, E. J. P., Lima, A. M. M., Ribeiro, H. M. C. (2019) Variabilidade do Regime Hidrológico da Bacia Amazônica. *Boletim de Geografia*, **37**(2), 129-147.
- Crowley, J. W., Mitrovica, J. X., Bailey, R.C., Tamisiea, M.E., Davis, L. J. (2008) Annual variations in water storage and precipitation in the Amazon Basin. *J Geod.*, **82**, 9-13.
- Do, H. X., Westra, S., Leonard, M. (2007) A global-scale of trends in anual maximum streamflow. *Journal of Hydrology*, **552**.
- George, S. S. (2007) Streamflow in the Winnipeg River basin, Canada: Trends, extremes and climate linkages. *Journal of Hydrology*, **332**, 396-411.
- Gomes Junior, E. C., Ely, D. F. (2021) Métodos estatísticos não-paramétricos como ferramenta no monitoramento pluviométrico. *Revista Casa da Geografia de Sobral (RCGS)*, **23**, 38-53.
- Guimberteau, M., Ronchail, J., Espinoza, J. C., Lengaigne, M., Sultan, B., Polcher, J., Drapeau, G., Guyot, J. L., Ducharme, A., Ciais, P. (2013) Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basin. *Environmental Research*, **8**.
- Guzha, A. C., Nobrega, R., Santos, C. A. G., Gerold, G. (2013). Investigating discharge and rainfall variability in na Amazonian watershed: do any trends exist?. *Climate and surface changes in hydrology*.

- Hachem, B. P. (2016) *Análise do comportamento da precipitação e da vazão em bacias hidrográficas Amazônicas*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 100 pp.
- Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T., Hyndman, D. W. (2020) Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **32**.
- Higashino, M., Stefan, H. G. (2019) Variability and change of precipitation and flood discharge in a Japanese river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **21**, 68-79.
- INPE, Instituto de Pesquisas Espaciais (2011). *Seca de 2010 na Amazônia foi a mais drástica já registrada*. Acesso em 10 de janeiro de 2022, disponível em: [http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=2639](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2639).
- Kendall, M. G. (1975) *Rank correlation methods*. London. Charles Griffin. 272pp.
- Lima Júnior, A. F., Zanella, M. E. (2017) Aplicação do Teste de Mann-Kendall para Análise e tendência climática para o Município de Fortaleza-CE. *Revista Encontros Universitários da UFC*, **2**(1).
- Limberger, L., Silva, M. E. S. (2012) Precipitação e Vazão Mensal na Amazônia. *Revista Geonorte, Edição Especial 2*, **1**(5), 719-728.
- Limberger, L. (2016) Estudos de teleconexões atmosféricas e possibilidades de avanços na climatologia geográfica: Conceitos, fontes de dados e técnicas. *Revista Brasileira de Climatologia*, **19**, 10-17.
- Lopes, J. R. F., Silva, D.F. (2013) Aplicação do teste de Mann-Kendall para análise de tendência pluviométrica no estado do Ceará. *Revista de Geografia*, **30**(3), 192-208.
- Macêdo, M. N. C., Dias, H. C. T., Coelho, F. M. G., Araújo, E. A., Souza, M. L. H., Silva, E. (2013) Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. *Ambi-Água*, **8**(1), 206-221.
- Magalhães, I. A. L., Almeida K, L., Thiago, C. R. L., Gardiman Junior, B. S; Zanetti, S. S., Cecílio, R. A. (2013) Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo - Brasil, *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Mann, H. B. (1945) *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica*, 245-259.
- Marengo, J. A., (2008) Água e mudanças climáticas. *Dossiê Água. Estudos Avançados*, **22**.
- Marengo, J. A., Tomasella, J. (1998) Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. *Journal of Geophysical Research*, **103**(D2), 1775-1783.
- Molinier, M., Guyot, J. L., Oliveira, E., Guimarães, V., Chaves, A. (1995) Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. *Ciência e Tecnologia*, 32-36.
- Molnár, P., Ramírez, J. A. (2000) Recent Trends in Precipitation and Streamflow in the Rio Puerco Basin. *American Meteorological Society, Journal of Climate*, **14**.
- Moura, L. Z. (2015) Evaluation of monotonic trends for streamflow in austral Amazon, Brazil: a case study for the Xingu and Tapajós rivers. *International Association of Hydrological Sciences*, **371**, 125-130.
- Nóbrega, R. L. B., Lamparter, G., Hughes, H., Guzha, A. C., Amorim, R. S. S., Gerold, G. (2018) A multi-approach and multi-scale study on water quantity and quality changes in the Tapajós River basin, Amazon. *International Association of Hydrological Sciences*, **277**, 3-7.
- Novotny, E. V., Stefan, H. G. (2007) Stream flow in Minnesota: Indicator of Climate change. *Journal of Hydrology*, **334**, 319-333.
- OMM, Organização Mundial de Meteorologia (1994). *Guide to hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, forecasting and other Applications*. Suíça.
- Salati, E., Dos Santos, A. A., Klabin, I. (2006) Temas ambientais relevantes. *Estudos Avançados*, **20** (56).
- Salviano, M. F., Groppo, J. D., Pellegrino, F. Q. (2016) Análise de Tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **31**(1), 64-73.
- Santos, T. V. dos; Freitas, L. dos A. de; Gonçalves, R. D., Chang, H. K. (2020) Teste de Mann-Kendall aplicado à dados hidrológicos – Desempenho dos filtros TFPW e CV2 na análise de tendências. *Revista Ciência & Natura*, **42**, e87.



- Trejo, F. P., Barbosa, H. A., Giovannettone, J., Kumar, T. V. L., Thakur, M. K., Buriti, C. O. (2021) Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. *Water*, **13** (351), 5-26.
- Yeste, P., Dorador, J., Martín-Rosales, W., Esteban-Parra, M. J., Rueda, F. J. (2018) Climate-driven trends in the streamflow records of a reference hydrologic network in Southern Spain. *Journal of Hydrology*, **566**, 55-72.
- Zhao, G., Tian, P., Um, X., Jiao, J., Wang, F., Gao, P. (2014) Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, **519**, 387-398.