XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES E DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO RIO NEGRO (AM) NA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA SERRINHA (1992–2023)

Ana Beatriz Oliveira Barreto de Souza[1]*; Joecila Santos da Silva*[2]*; Ieda Hortêncio Batista*[3]*; Francisca da Silva Ferreira*[4]*; Fernanda Fraga de Seixas*[5]*; Carlos Henrique das Chagas Albuquerque*[6]

RESUMO

A Amazônia possui papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas e, com o Rio Negro percorrendo mais de 1.700 km no estado do Amazonas, sua vazão influencia significativamente a distribuição hídrica na região. Para a caracterização do regime de vazões e da disponibilidade hídrica desta bacia, foram utilizados dados de vazão diária para a construção do hidrograma de vazões médias diárias interanuais, do gráfico de vazões máximas e mínimas anuais e da curva de permanência de vazões. Os dados são disponibilizados pela ANA e de acesso público por meio do HidroWeb, tendo sido escolhida a estação fluviométrica Serrinha (código 14420000) para a análise. A série de 1992 a 2023 evidencia um ciclo sazonal bem definido, com cheia entre dezembro e junho e estiagem entre julho e novembro. As vazões máximas e mínimas anuais seguiram um padrão de aumento e diminuição proporcional. A maior vazão máxima anual foi registrada em 2022 (24.712 m³/s) e a menor em 1992 (15.412 m³/s); a maior vazão mínima anual ocorreu em 2022 (18.591 m³/s) e a menor em 1992 (10.820 m³/s). A Q95 é de 12.414 m³/s e a vazão outorgável, correspondente a 75% da Q95, é de 9.310 m³/s. A razão Q10/Q95, igual a 2,3, indica regime perene e de baixa variabilidade em termos de permanência, ainda que com forte sazonalidade intra-anual. As oscilações de vazão também estão associadas a fenômenos climáticos como El Niño e La Niña.

[1]Universidade do Estado do Amazonas, (92) 99240-0909, anabeatrizolibas@gmail.com

[2]Universidade do Estado do Amazonas, jsdsilva@uea.edu.br

[3]Universidade do Estado do Amazonas, ibatista@uea.edu.br

[4]Universidade do Estado do Amazonas, fsferreira@uea.edu.br

[5]Universidade do Estado do Amazonas, fernandafraga86@gmail.com

[6]Universidade do Estado do Amazonas, chdca.mgr23@uea.edu.br

ABSTRACT

The Amazon rainforest plays a fundamental role in mitigating climate change, and with the Rio Negro running over 1,700 km in the state of Amazonas, its flow significantly influences water distribution in the region. In order to characterise the flow regime and the water availability of this basin, daily discharge data were used to build the interannual mean daily hydrograph, the annual maximum and minimum flow chart and the flow duration curve. These data are provided by ANA and are publicly accessible through HidroWeb, with the Serrinha gauging station (code 14420000) chosen for the analysis. The 1992–2023 series shows a well-defined seasonal cycle, with high water from December to June and low water from July to November. Annual maximum and minimum flows followed a proportional pattern of increase and decrease. The highest annual maximum flow was recorded in 2022 (24,712 m³/s) and the lowest in 1992 (15,412 m³/s); the highest annual minimum flow occurred in 2022 (18,591 m³/s) and the lowest in 1992 (10,820 m³/s). Q95 is 12,414 m³/s and the flow available for water-use permits, corresponding to 75% of Q95, is 9,310 m³/s. The Q10/Q95 ratio of 2.3 indicates a perennial regime with low variability in terms of flow duration, although with strong intra-annual seasonality. Flow oscillations are also associated with climatic phenomena such as El Niño and La Niña.

Palavras-Chave: Disponibilidade hídrica; Curva de permanência; Outorga.

1 - INTRODUÇÃO

A Amazônia desempenha papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas e na preservação da biodiversidade, recebendo atenção global por sua importância no desenvolvimento dos rios voadores (Taveras et al., 2023). O Rio Negro, um dos principais rios da região, tem coloração escura decorrente da decomposição de matéria orgânica e pH médio em torno de 4,5. Ao longo de seus mais de 1.700 km, apresenta estilo fluvial anabranching, com multicanais que isolam ilhas alongadas e formam diversos arquipélagos (Souza et al., 2024).

O Rio Negro é o principal fornecedor de abastecimento hídrico de Manaus (ANA, 2021), sendo os principais usos consuntivos das águas no Amazonas o abastecimento urbano (41%), o uso animal (21%) e o abastecimento rural (20%) (ANA, 2019, 2023). Essa gestão é amparada pela Lei das Águas nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e orienta o uso racional e sustentável desses recursos (Franco et al., 2015).

Diante do aumento populacional, das mudanças climáticas, do desmatamento e da poluição, pesquisas sobre a caracterização hidrológica das bacias hidrográficas são fundamentais para subsidiar políticas públicas, sobretudo o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas – PERH/AM. Essa relevância é reforçada pelos eventos de seca extrema registrados recentemente na bacia amazônica, que expuseram a vulnerabilidade do abastecimento público, da navegação e dos demais usos múltiplos da água na região.

Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar o regime de vazões do Rio Negro no trecho monitorado pela estação Serrinha, por meio do hidrograma de vazões médias diárias interanuais, das vazões máximas e mínimas anuais e da curva de permanência de vazões, estimando a partir desta a vazão de referência para outorga estabelecida pela legislação estadual.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo - A bacia do Rio Negro abrange território do Brasil, da Colômbia e da Venezuela, com extensão total de 2.250 km, situada na Floresta Amazônica, rica em biodiversidade e água doce (Campos; Dos Santos, 2017). Neste estudo, considerou-se a região da bacia situada no Estado do Amazonas, onde o rio se estende por cerca de 1.700 km. A Figura 01 apresenta o trecho estudado, a localização da estação Serrinha e a foz do Rio Negro.

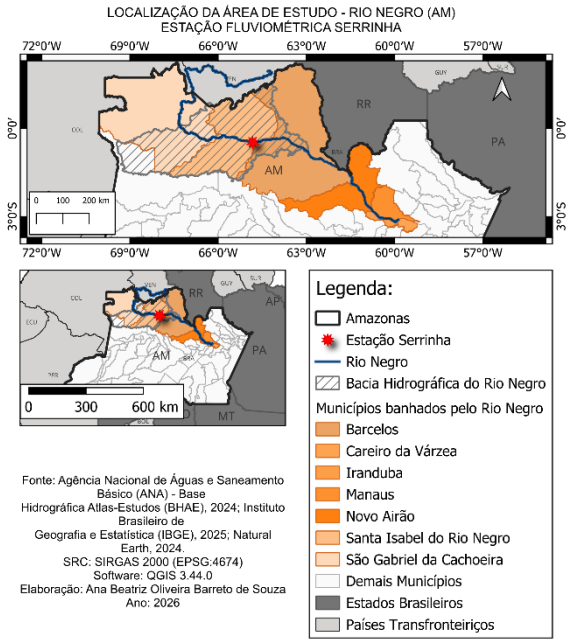


Figura 01 – Localização da área de estudo, da estação fluviométrica Serrinha e da foz do Rio Negro.
Fonte: elaborado pelos autores a partir de HidroWeb (2024).

2.2 Dados

Foram utilizados os dados de vazão da estação fluviométrica Serrinha (ANA, código 14420000/64003), situada a 695 km da foz do Rio Negro, com 47 anos de dados disponíveis, obtidos no Portal HidroWeb (SNIRH), alimentado pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

A escolha da estação considerou a proximidade da foz e a disponibilidade de dados. Dos 47 anos de registros, adotou-se o período mais recente, de 1992 a 2023, exceto 2021, cujos dados não foram disponibilizados em razão da pandemia da COVID-19.

2.3 Métodos

A partir dos dados disponíveis, foram elaborados o hidrograma de vazões médias diárias interanuais, o gráfico de vazões máximas e mínimas anuais e a curva de permanência de vazões, além do cálculo da vazão outorgável do trecho, utilizando-se o software Excel para organização e análise dos dados.

2.3.1 Hidrograma

Este gráfico foi obtido a partir da ordenação, no Excel, dos dados de vazão, de forma que cada coluna representasse um ano e cada linha dessa coluna, um dia. Formou-se, assim, uma matriz de 366 linhas (considerando o dia 29/fev) e N_a (número de anos) colunas. De cada linha foi extraído o valor médio, representando a vazão média daquele dia do ano considerando todos os anos registrados, conforme a equação 1.

$$q_{md} = \Sigma q_d / n_{rd} \quad (1)$$

O gráfico foi construído com os dias do ano (01/jan a 31/dez) no eixo das abscissas e as vazões médias diárias interanuais no eixo das ordenadas.

2.3.2 Máximas e mínimas

Utilizou-se a mesma organização de dados adotada para o hidrograma; a obtenção dos valores máximos e mínimos, entretanto, foi feita a partir dos dados de cada ano, separadamente, dos quais foram extraídos os valores máximos e mínimos anuais. Para fins de otimização do potencial de análise, foram inseridas as linhas representativas da média de cada grupo (média das máximas e média das mínimas), conforme as equações 2 e 3.

$$\bar{q}_{máx} = \Sigma q_{máx} / n_a \quad (2)$$

$$\bar{q}_{mín} = \Sigma q_{mín} / n_a \quad (3)$$

2.3.3 Curva de permanência

A elaboração desta curva se deu, inicialmente, a partir da organização dos dados de vazão em classes. Para a definição destas, adotaram-se as equações 4 e 5.

$$N_c = \sqrt{n_r} \quad (4)$$

$$A = (q_{máx} - q_{mín}) / N_c \quad (5)$$

Em seguida, as vazões foram ordenadas de forma crescente e numeradas de 1 (menor) a n_r (maior), calculando-se a frequência acumulada de cada classe segundo as equações 6 e 7.

$$f = N_o / n_r \quad (6)$$

$$f_{acum} = f + f_a \quad (7)$$

Finalmente, procedeu-se à determinação da permanência das vazões, conforme a equação 8.

$$P = 1 - f_{acum} \quad (8)$$

2.3.4 Vazão outorgável

A vazão de referência para outorga foi obtida a partir da curva de permanência, conforme o critério estabelecido pela Resolução CERH/AM nº 01, de 19 de julho de 2016, que define como disponibilidade hídrica passível de outorga o percentual de 75% da vazão de permanência Q95, de acordo com a equação 9.

$$Q_{out} = 0{,}75 \times Q_{95} \quad (9)$$

2.3.5 Teste de Mann-Kendall e estimador de Sem

A tendência monotônica das séries de máximas e mínimas anuais foi avaliada pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), que dispensa a normalidade dos dados. Para cada par de anos (i,j), com i menor que j, calculou-se o sinal da diferença entre as observações, conforme a equação 10.

$$sgn(x_j - x_i) = +1, \text{ se } (x_j - x_i) > 0 \quad (10)$$

sendo −1 se a diferença for negativa e 0 se igual. S, a soma de todos os sinais das n(n−1)/2 comparações possíveis, é dada pela equação 11.

$$S = \Sigma_{i=1}^{n-1} \Sigma_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i) \quad (11)$$

Sob a hipótese nula de ausência de tendência, S tem média zero e variância dada pela equação 12 — sem correção por empates, pois as séries analisadas não apresentam valores repetidos.

$$Var(S) = n(n-1)(2n+5) / 18 \quad (12)$$

A estatística padronizada Z (equação 13) permite calcular o valor-p bicaudal a partir da distribuição normal padrão, Φ (equação 14), adotando-se α = 5% como limiar de significância.

$$Z = (S-1)/\sqrt{Var(S)}, \text{ se } S > 0;\ Z = 0, \text{ se } S = 0;\ Z = (S+1)/\sqrt{Var(S)}, \text{ se } S < 0 \quad (13)$$

$$\text{valor-p} = 2 \times [1 - \Phi(|Z|)] \quad (14)$$

A magnitude da tendência foi estimada pelo estimador de Sen (1968) — a mediana das declividades entre todos os pares da série (equação 15), pouco sensível a valores extremos, o que é desejável em séries hidrológicas.

$$\beta = mediana\ [\ (x_j - x_i) / (t_j - t_i)\ ], \text{ para todo i menor que j} \quad (15)$$

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O hidrograma (Figura 02) evidencia os períodos de cheia e estiagem do Rio Negro: a estiagem ocorre de julho a meados de novembro, e a cheia, de dezembro a junho.

Entre abril e junho, a vazão média de cheia atinge 28.905 m³/s; entre agosto e outubro, a vazão média de estiagem cai para 12.173 m³/s — razão de aproximadamente 2,4 entre os dois períodos, que dimensiona a amplitude do ciclo sazonal do trecho.

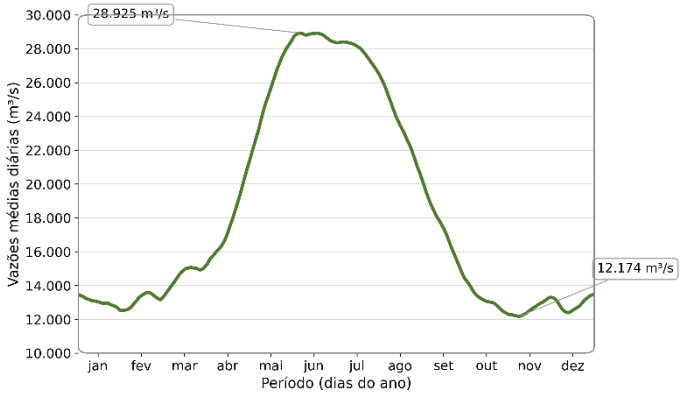


Figura 02 – Hidrograma de vazões médias diárias interanuais da estação Serrinha (1992–2023).

As vazões máximas e mínimas anuais (Figura 03) acompanham o mesmo padrão de aumento e diminuição do fluxo fluvial ao longo do período analisado.

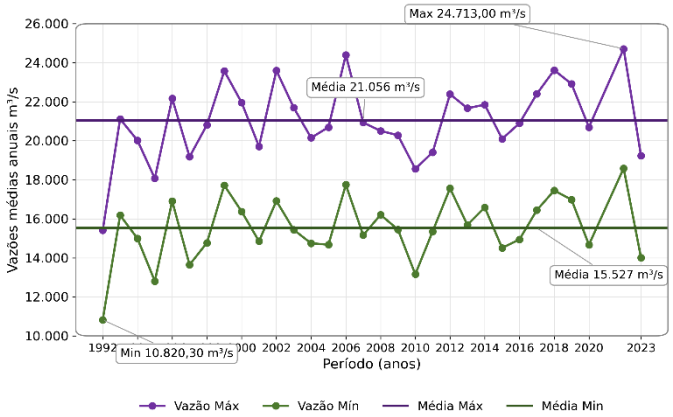


Figura 03 – Vazões máximas e mínimas anuais e respectivas médias, estação Serrinha (1992–2023).

A maior vazão máxima anual ocorreu em 2022 (24.712 m³/s) e a menor em 1992 (15.412 m³/s); a vazão mínima anual variou entre 10.820 m³/s (1992) e 18.591 m³/s (2022). As médias da série são de 21.056 m³/s (máximas) e 15.527 m³/s (mínimas).

A curva de permanência (Figura 04) expressa a porcentagem do tempo em que determinada vazão é igualada ou superada, sendo a Q95 uma das referências de disponibilidade hídrica adotadas pelo PERH/AM (2020). Obteve-se Q95 de 12.414 m³/s — abaixo desse valor a vazão ocorre em menos de 5% do tempo, caracterizando estiagem acentuada — e Q10 de 28.377 m³/s, associada ao pico da cheia.

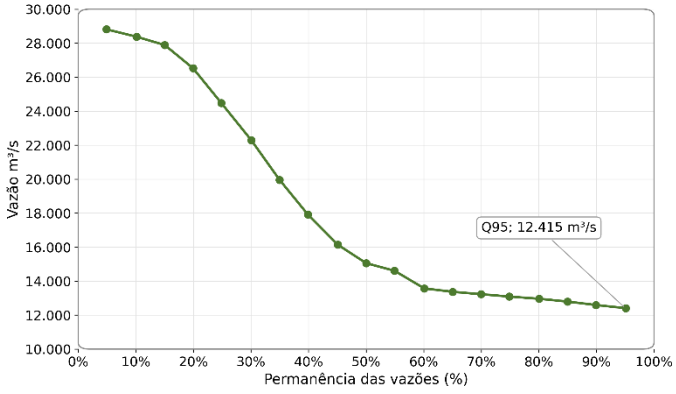


Figura 04 – Curva de permanência das vazões diárias da estação Serrinha (1992–2023).

A razão Q10/Q95, igual a 2,3, indica regularidade do regime — valores próximos da unidade caracterizam escoamento pouco variável — e, associada ao traçado suave da curva entre 50% e 95%, aponta para um regime perene e naturalmente regularizado pelo volume armazenado na bacia e pela extensa planície de inundação, apesar da forte sazonalidade intra-anual.

Pela Resolução CERH/AM nº 01/2016, a disponibilidade para outorga corresponde a 75% da Q95 (equação 9), resultando em vazão outorgável de 9.310,5 m³/s no trecho da Serrinha — valor expressivo frente às demandas consuntivas da região (abastecimento urbano 41%, uso animal 21%, abastecimento rural 20%; ANA, 2019, 2023), o que sugere que eventuais conflitos pelo uso da água estejam mais associados à sazonalidade e à localização das captações do que ao volume total disponível.

Essas variações também se correlacionam a eventos climáticos discutidos por Campos e Dos Santos (2017): as secas de 1997-1998 relacionaram-se ao El Niño; a de 2005, a anomalias de TSM no Atlântico Norte (Marengo et al., 2008 apud Campos; Dos Santos, 2017); e a de 2010, ao El Niño associado ao aquecimento do Atlântico Tropical (Espinoza et al., 2011 apud Campos; Dos Santos, 2017). As enchentes de 1999, 2011 e 2012 associam-se à La Niña (Marengo et al., 2010; Espinoza et al., 2014 apud Campos; Dos Santos, 2017), e a de 2009, ao aquecimento anormal do Atlântico Sul (Marengo et al., 2013 apud Campos; Dos Santos, 2017).

Complementarmente, aplicou-se às séries de máximas e mínimas anuais o teste de Mann-Kendall e o estimador de Sen (Tabela 01). Em nenhuma das duas séries a tendência foi estatisticamente significativa a 5% (valor-p de 0,126 e 0,221, respectivamente), apesar da declividade de Sen positiva em ambos os casos — resultado compatível com a oscilação interanual de El Niño e La Niña já discutida, cuja alternância tende a mascarar tendências de longo prazo numa série de 31 anos. A correlação quantitativa com índices climáticos, como o ONI, permanece como trabalho futuro.

Tabela 01 – Resultados do teste de Mann-Kendall e do estimador de Sen para as vazões máximas e mínimas anuais, estação Serrinha (1992–2023).

Estatística	Vazões Máximas Anuais	Vazões Mínimas Anuais
n (anos)	31	31
S (soma dos sinais)	91	73
Var(S)	3.461,67	3.461,67
Estatística Z	1,530	1,224
valor-p (bicaudal)	0,126	0,221
tau de Kendall	0,196	0,157

Estatística	Vazões Máximas Anuais	Vazões Mínimas Anuais
Declividade de Sen (m³/s por ano)	+65,90	+49,02
Variação total estimada no período (m³/s)	+1.976,9	+1.470,5
Tendência (α = 5%)	não significativa	não significativa

Fonte: elaborado pelos autores a partir dos dados da estação Serrinha (ANA/HidroWeb), com aplicação do teste de Mann-Kendall e do estimador de Sen (planilha de cálculo disponível como material suplementar).

4 - CONCLUSÃO

A caracterização das vazões do Rio Negro na estação Serrinha (1992–2023) evidencia ciclo sazonal bem definido — cheia de dezembro a junho e estiagem de julho a novembro, com razão de 2,4 entre as vazões médias dos dois períodos —, com vazão máxima anual entre 15.412 m³/s (1992) e 24.712 m³/s (2022) e vazão mínima anual entre 10.820 m³/s (1992) e 18.591 m³/s (2022).

A curva de permanência indicou Q95 de 12.414 m³/s e Q10 de 28.377 m³/s (razão 2,3), caracterizando regime perene e regularizado. Pela Resolução CERH/AM nº 01/2016, a vazão outorgável do trecho é de 9.310,5 m³/s, referência direta para outorga e para o balanço hídrico do PERH/AM. O teste de Mann-Kendall não indicou tendência significativa nas séries de máximas e mínimas (valor-p > 0,05), resultado compatível com a variabilidade associada a El Niño e La Niña.

Como continuidade, recomenda-se estender a análise de tendência a outras estações da bacia, correlacionar quantitativamente as vazões com índices climáticos e confrontar a vazão outorgável com as demandas efetivamente outorgadas.

5 - AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo financiamento (Código 001; Projeto ProfÁgua, CAPES/ANA AUXPE n.º 2717/2015); à ANA, pela cessão dos dados; à FAPEAM, pela bolsa concedida à primeira autora; e à FINEP, pelo apoio via projetos PARHINTINS e GRHAMA.

6 - REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (Brasil). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: ANA, 2019. Acesso em: 14 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (Brasil). Atlas Águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília: ANA, 2021. Acesso em: 14 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (Brasil). Power BI: usos consuntivos das águas no Brasil. Brasília: ANA, 2023. Acesso em: 14 ago. 2024.

AMAZONAS (Estado). Plano Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas – PERH/AM. Manaus: Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Amazonas, 2020.

BRASIL. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

CAMPOS, T. L. D. O. B.; DOS SANTOS, A. P. P. Frequências dos eventos extremos de seca e chuva na Amazônia utilizando diferentes bancos de dados de precipitação. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 10, n. 2, p. 468-478, 2017. Acesso em: 14 ago. 2024.

CERH/AM. Resolução n.º 01, de 19 de julho de 2016. Estabelece critérios técnicos a serem utilizados pelo Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas – IPAAM para o processo de análise de pedido de outorga do direito de uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Amazonas. Manaus: IPAAM, 2016.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; JUNQUAS, C.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W.; POMBOSA, R. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. Geophysical Research Letters, v. 38, n. 13, 2011. Acesso em: 14 ago. 2024.

ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J. M.; FLORES, L. N.; GUYOT, J. L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. Environmental Research Letters, v. 9, n. 12, 124007, 2014. Acesso em: 14 ago. 2024.

FRANCO, A. C. L.; UDA, P. K.; QUEEN, G.; BERNARDI, N. Aplicação do método de balanço hídrico sazonal na bacia do alto rio Negro. Porto Alegre: ABRHidro, 2015. Acesso em: 14 ago. 2024.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; CARDOSO, M. F.; OYAMA, M. D. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 363, n. 1498, p. 1773-1778, 2008. Acesso em: 14 ago. 2024.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M.; NOBRE, C. A. Extreme climatic events in the Amazon basin: climatological and hydrological context of recent floods. Theoretical and Applied Climatology, v. 107, n. 1, p. 73-85, 2010. Acesso em: 14 ago. 2024.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLO, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. Journal of Climate, v. 26, n. 22, p. 9137-9154, 2013. Acesso em: 14 ago. 2024.

SOUZA, J. J.; SOARES, E. A. A.; TATUMI, S. H.; TARABOSSI, R. R. P.; YEE, M.; DINO, R.; DIAS, F. L. Caracterização multitemporal de barras fluviais no Arquipélago de Mariuá, médio Rio Negro, Amazonas. Revista Geonorte, v. 15, n. 48, 2024. Acesso em: 14 ago. 2024.

TAVERAS, I. D. L.; SILVA, T. A. S.; FECURY, A. A.; DE CÁRDENAS, A. M. C.; DA PUREZA, D. Y.; DE ANDRADE, R. F. Região Amazônica e o seu papel na saúde e no meio ambiente: uma revisão bibliográfica. Observatório de la Economía Latinoamericana, v. 21, n. 12, p. 23913-23922, 2023. Acesso em: 14 ago. 2024.