MUDANÇAS NAS MÁXIMAS ANUAIS DE VAZÃO E COTA NO RIO ACRE

Luiz Felipe Pereira de Brito [1]; Alondra Beatriz Alvarez Perez [2]; Gabriel Anzolin [3]; Marcus Suassuna Santos [4] & Pedro Luiz Borges Chaffe [5]

Palavras-Chave – Não estacionariedade, Cheias, Capacidade de transporte do canal.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as cheias na Amazônia têm aumentado em magnitude, frequência e extensão espacial (Bartiko *et al.*, 2019; Fleischmann *et al.*, 2023). Essas mudanças são geralmente associadas a fatores climáticos (Barichivich *et al.*, 2018), como alterações nos padrões de chuva e a ocorrência de eventos extremos, bem como mudanças no uso e cobertura da terra (Chagas *et al.*, 2022). A estimativa e a gestão de cheias geralmente se baseiam em análises de frequência para descrever mudanças na magnitude e na frequência de eventos extremos. Entretanto, o perigo de inundação não é controlado apenas pelas condições hidrológicas, mas também pela capacidade de transporte do canal (Slater *et al.*, 2015). Alterações na largura, profundidade e rugosidade do canal podem modificar a relação entre cota e vazão ao longo do tempo, fazendo com que uma mesma vazão corresponda a diferentes cotas. Dessa forma, mudanças geomorfológicas podem amplificar ou atenuar os efeitos do aumento das vazões sobre as cheias.

Grandes rios da bacia Amazônica, como o Rio Negro, o Rio Solimões e o Rio Purus apresentam aumento na magnitude e frequência das cheias. Esses rios possuem grandes áreas de drenagem e desempenham papel importante na hidrologia regional e no transporte de sedimentos. No entanto, tributários podem apresentar respostas hidrológicas e geomorfológicas distintas, e sua contribuição para as mudanças no regime de cheias permanece menos explorada. O Rio Acre, tributário do Rio Purus, apresenta elevada suscetibilidade a processos erosivos e inundações, com recorrentes eventos que resultaram em declarações de emergência ou calamidade pública em municípios do estado do Acre (Santos *et al.*, 2021). Ainda assim, não está claro se as mudanças nas cheias ao longo do rio são explicadas principalmente pelo aumento das vazões ou por ajustes na geometria do canal que alteram a relação cota–vazão. Neste trabalho, analisamos as séries de máximas anuais de cota e vazão e medições do canal em quatro estações fluviométricas do Rio Acre, Brasil, no período de 1968–2025, para investigar a não estacionaridade das cheias.

METODOLOGIA

Foram analisadas as séries de máximas anuais de cota e vazão, curvas-chave e dados de geometria do canal, incluindo batimetrias de seções transversais e relações de geometria hidráulica. As análises foram realizadas em quatro estações fluviométricas ao longo do canal principal do Rio Acre: Assis Brasil (3.728 km²), Brasiléia (7.193 km²), Xapuri (13.049 km²) e Rio Branco (23.500 km²). A bacia do Rio Acre está localizada no sudoeste da Amazônia e possui área de drenagem de ~23.500 km². Os dados hidrológicos foram obtidos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do sistema HidroWeb, para o período de 1968 a 2025. As séries de máximas anuais de cota e vazão foram extraídas de registros diários, considerando o ano hidrológico com início em setembro. As curvas-chave disponibilizadas pela ANA foram utilizadas para avaliar mudanças temporais na

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, britofelipe85@gmail.com
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, alondra.ens@gmail.com
3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, gabriel_anzolin@hotmail.com
4) Pesquisador em Geociências, Serviço Geológico do Brasil, marcus.santos@sgb.gov.br
5) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, pedro.chaffe@ufsc.br

relação cota–vazão entre diferentes períodos de validade. As medições de descarga em campo, incluindo cota, área da seção transversal e largura do canal, foram utilizadas para caracterizar a geometria hidráulica e estimar a elevação média do leito.

Para identificar mudanças temporais na magnitude das cheias, foram analisadas tendências nas máximas anuais de cota e vazão. A magnitude das tendências foi estimada pelo estimador de Theil–Sen (relação log–linear), e sua significância foi avaliada pelo teste de Mann–Kendall, com os resultados expressos como variação percentual por década para permitir a comparação entre estações. Também foi analisada a elevação média do leito (BE, do inglês *Bed Elevation*), calculada a partir da diferença entre a cota do nível de água na régua linimétrica e a profundidade média da seção transversal, obtida pela razão entre área molhada e largura do canal (Slater e Singer, 2013). As tendências da BE, denominadas BET (*Bed Elevation Trend*), foram interpretadas como agradação e degradação do leito quando positivas e negativas, respectivamente.

As curvas-chave, a geometria hidráulica e a elevação média do leito foram analisadas conjuntamente para identificar possíveis ajustes na capacidade de transporte do canal. Para a análise de frequência não estacionária, foi ajustado um modelo não estacionário de valores extremos generalizados (GEV, do inglês *Generalized Extreme Value*) às séries de máximas anuais de vazão. O parâmetro de posição da distribuição foi ajustado como uma função linear do tempo, enquanto os parâmetros de escala e forma foram mantidos constantes. O modelo foi utilizado para estimar as vazões associadas ao período de retorno de 100 anos no início e no final das séries históricas. Também foi recalculado, sob as condições do final de cada série, o período de retorno da cheia de 100 anos estimada no início dos registros. Para a cheia observada em 2015, os períodos de retorno foram estimados tanto no início quanto no final de cada série histórica.

RESULTADOS

As vazões máximas anuais aumentaram significativamente em todas as estações fluviométricas, com tendências entre +6,9 e +15,0% por década ($p < 0,05$). Por outro lado, as cotas máximas anuais não apresentaram tendências significativas na maior parte das estações, exceto em Assis Brasil, onde cota e vazão aumentaram significativamente (+6,5 e +15,0% por década, respectivamente). Assim, o aumento das vazões não foi acompanhado por elevação proporcional das cotas ao longo do Rio Acre. As curvas-chave mostram que essa diferença está associada a mudanças temporais na relação cota–vazão: para uma mesma cota, foram observadas vazões mais elevadas nos períodos recentes. Esse resultado indica que parte do aumento das vazões passou a ser acomodada dentro do canal, refletindo aumento da capacidade de transporte.

A geometria do canal apresentou ajustes distintos ao longo do Rio Acre (Figura 1). Em Rio Branco, as seções transversais e a relação largura–vazão indicam aumento da largura do canal nos registros mais recentes. Em Brasiléia, observa-se tendência oposta, com redução da largura para vazões semelhantes. Em Assis Brasil e Xapuri, as relações de geometria hidráulica não apresentam deslocamentos temporais claramente definidos. A profundidade média do fluxo e a velocidade mantem a relação com a vazão, indicando que o ajuste das mudanças na frequência das cheias é acomodado na mudança da largura. As tendências da elevação média do leito evidenciaram um padrão longitudinal de ajuste morfológico. Em Assis Brasil, a elevação do leito aumentou significativamente (+11,96% por década), indicando agradação. Nas demais estações, foram observadas reduções significativas, correspondentes a −31,14% por década em Brasiléia, −8,21% por década em Xapuri e −15,70% por década em Rio Branco, indicando degradação do leito. Em Brasiléia, a redução acentuada da elevação do leito ocorre juntamente com a ausência de tendência significativa de cota, apesar do aumento da vazão. Isso sugere que o ajuste do canal ocorre principalmente por meio do estreitamento do canal.

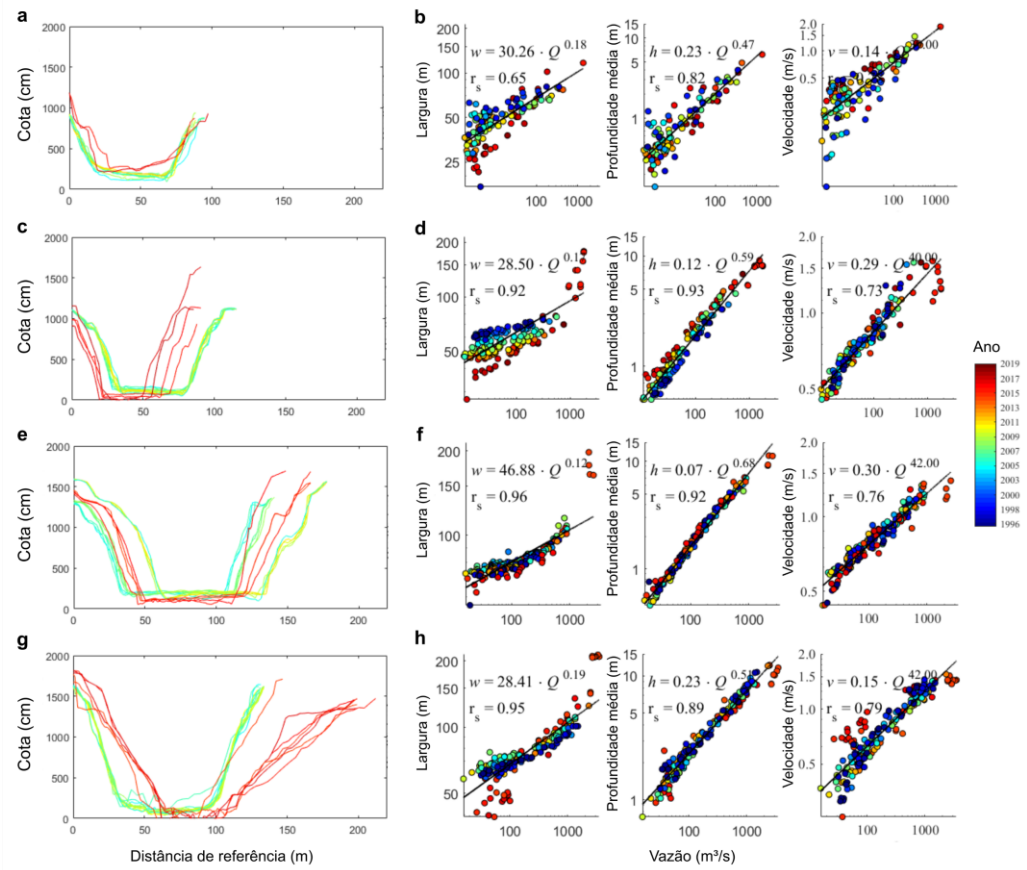


Figura 1. Geometria hidráulica do Rio Acre em quatro estações fluviométricas: (a–b) Assis Brasil, (c–d) Brasiléia, (e–f) Xapuri e (g–h) Rio Branco. Os painéis à esquerda mostram batimetrias de seções transversais, enquanto os painéis à direita mostram largura, profundidade média e velocidade em função da vazão. As cores representam o ano das medições.

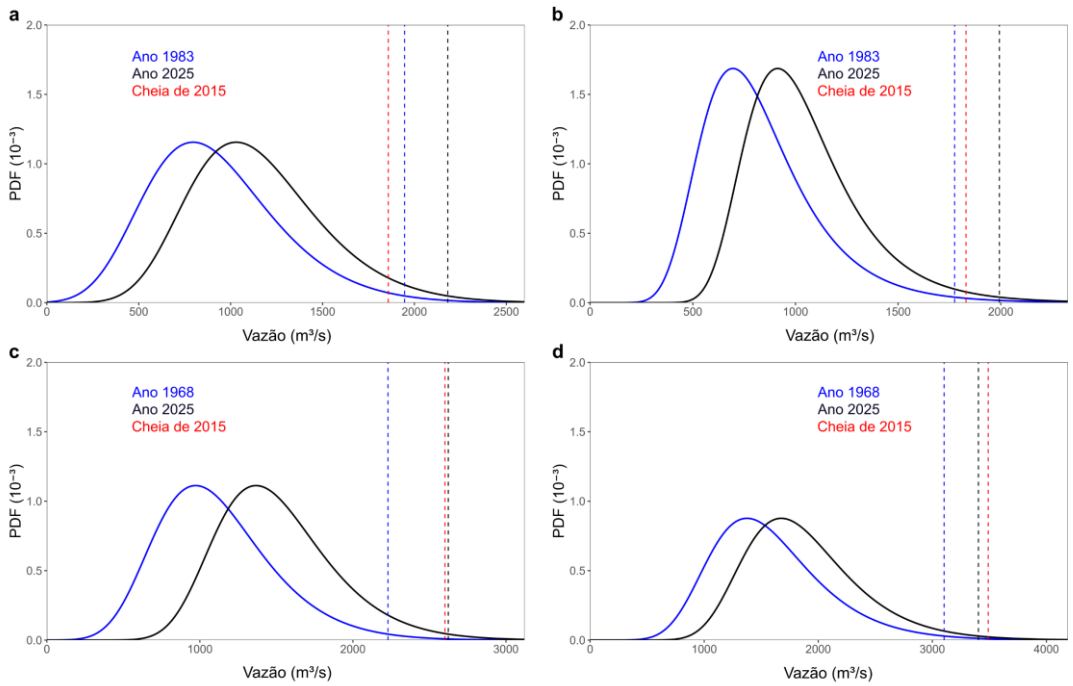


Figura 2. Análise não estacionária de frequência de cheias baseada no modelo GEV ajustado às séries de máximas anuais de vazão em: (a) Assis Brasil, (b) Brasiléia, (c) Xapuri e (d) Rio Branco. As curvas representam as distribuições estimadas para o início e o final das séries históricas. As linhas tracejadas indicam as vazões associadas à cheia de 100 anos no início e no final dos registros, além da vazão observada durante a cheia de 2015.

A análise não estacionária de frequência de cheias indicou aumento da probabilidade de ocorrência da cheia histórica de 100 anos em todas as estações (Figura 2). Os períodos de retorno foram reduzidos de 100 anos para 21 a 43 anos, correspondendo a reduções de até cerca de 80%. A cheia observada em 2015 também apresentou redução do período de retorno entre o início e o final das séries históricas. Em Assis Brasil e Brasiléia, a probabilidade de ocorrência de uma cheia com magnitude semelhante dobrou nos últimos 43 anos. Em Xapuri, o aumento foi superior a seis vezes, enquanto em Rio Branco a probabilidade também dobrou nos últimos 58 anos. Essas mudanças indicam que um evento com magnitude comparável à cheia de 2015 passou a ser mais frequente no Rio Acre.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigamos a não estacionariedade das cheias no Rio Acre. As vazões máximas anuais aumentaram significativamente em todas as estações, enquanto as cotas apresentam tendências não significativas. As curvas-chave mostraram aumento da capacidade de transporte do canal. A geometria do canal revela agradação a montante e degradação a jusante, indicando desequilíbrio morfológico ao longo do rio. A análise não estacionária de frequência de cheias indica aumento da probabilidade da cheia histórica de 100 anos, com redução dos tempos de retorno em até ~80%. Nossos resultados destacam que a avaliação do risco de inundação deve considerar ajustes do canal além das mudanças na vazão, visto que os ajustes morfológicos alteram a relação cota–vazão e a capacidade de transporte do canal.

REFERÊNCIAS

BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J. C.; PATTNAYAK, K. C. (2018). "*Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation*". Science advances, v.4, n.9, p.eaat878.

BARTIKO, D.; OLIVEIRA, D. Y.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. (2019). "*Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil*". Hydrological Sciences Journal, v.64, n.9, p.1071–1079. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1619081

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. (2022). "*Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*". Nature Communications, v.13, 10.1038/s41467-022-32580-x.

FLEISCHMANN, A. S.; PAPA, F.; HAMILTON, S. K.; FASSONI-ANDRADE, A.; WONGCHUIG, S.; ESPINOZA, J. C.; PAIVA, R.; MELACK, J.; FLUET-CHOUINARD, E.; CASTELLO, L.; ALMEIDA, R.; BONNET, M. P.; ALVES, L.; MOREIRA, D.; YAMAZAKI, D.; REVEL, M.; COLLISCHONN, W. (2023). "*Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980*". Environmental Research Letters, v.18, n.3, p.034024.

SANTOS, M. S.; CASTRO, H.; MATOS, A. J. S. (2021). Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Acre: Relatório anual de operação 2021. Departamento de Hidrologia, CPRM.

SLATER, L. J.; SINGER, M. B. (2013). "*Imprint of climate and climate change in alluvial riverbeds: Continental United States*". Geology, v.41, n.5, p.595–598.

SLATER, L. J.; SINGER, M. B.; KIRCHNER, J. W. (2015). "*Hydrologic versus geomorphic drivers of trends in flood hazard*". Geophysical Research Letters, v.42, n.2, p.370–376.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES, do CNPq e do Serviço Geológico do Brasil.