

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

EFEITO DA MUDANÇA NO LEITO DA SEÇÃO TRANSVERSAL SOBRE O PERIGO DE INUNDAÇÃO EM RIOS BRASILEIROS

Alondra Beatriz Alvarez Perez¹; Fernando Grison², Vinícius Bogo Portal Chagas³; Marcus Suassuna Santos⁴ & Pedro Luiz Borges Chaffe⁵

Abstract: Erosional and depositional processes alter riverbed elevation over time, which in turn affects the accommodation of water and sediment volumes transported from upstream. Consequently, changes in channel cross-sectional geometry can amplify or reduce flood hazard. In this context, quantifying trends in mean bed elevation (BET) becomes critical for robust flood prediction. In this study, we investigated decadal-scale BET trends in 178 Brazilian rivers and evaluated their relationship with the Conveyance Capacity Effect (CCE) on flood hazard, as well as the Flow Frequency Effect (FFE). Results indicate that the cross sections of most rivers exhibit non-stationary behavior at the proposed temporal scale, with an approximately equal distribution between deepening and aggrading channels. BET is directly correlated with channel conveyance capacity. We hypothesize that variability in high flow regimes alters the cross-sectional shape, which subsequently governs conveyance capacity. The CCE was found to be more significant and widespread than the FFE. An integrated understanding of the simultaneous processes that trigger flooding and control channel morphology is essential to support flood forecasting and management, as well as to inform strategic decisions regarding the placement of hydrological monitoring stations.

Resumo: Processos erosivos e de deposição alteram a elevação do leito dos rios ao longo do tempo, que por sua vez acomodam os volumes de água e sedimentos que são transportados de montante. Como consequência, mudanças na seção transversal amplificam ou reduzem o perigo de inundaçāo. Nesse contexto, a quantificação das tendências na elevação média do leito (BET) se torna crucial para a previsão de inundações de maneira robusta. Neste trabalho investigamos a BET em escala decadal de 178 rios brasileiros e avaliamos sua relação com o efeito da capacidade de escoamento sobre o perigo de inundaçāo (CCE) e o efeito da frequência das vazões (FFE). Os resultados mostraram que as seções da maioria dos rios são não estacionárias na escala proposta, distribuindo-se igualmente entre seções que estão se tornando mais profundas e seções mais rasas. A BET correlaciona-se diretamente com a capacidade de escoamento do canal. Nossa hipótese é que a variabilidade das vazões altas altera o formato da seção transversal, que, por sua vez, controla a capacidade de escoamento. O CCE mostrou-se mais significativo e abrangente do que o FFE. A visão integrada dos processos simultâneos que desencadeiam as inundações e controlam a geometria do canal são fundamentais para dar apoio à previsão de cheias e gestão de inundaçāo, além de darem apoio à tomada de decisão sobre os locais de monitoramento hidrológico.

Palavras-Chave – Perigo de inundaçāo; Capacidade de Escoamento; Rios Brasileiros.

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-970, Brasil; Email: alondra.ens@gmail.com

2) Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, 89815-899, Brasil. E-mail: fernando.grison@uffs.edu.br

3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-970, Brasil; Email: vbchagas@gmail.com

4) Pesquisador em Geociências, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), marcus.santos@sgb.gov.br

5) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-970, Brasil; Email: pedro.chaffe@ufsc.br

1. INTRODUÇÃO

Os rios ajustam a geometria de seus canais ao longo do tempo, sendo a seção tanto um determinante como um resultado dos processos fluviais. Mudanças no leito das seções ocorrem devido processos naturais, como mudanças na carga de sedimentos em suspensão (FAGUNDES et al., 2021; NONES; GUO, 2023), tipo e presença de vegetação ciliar (LELPI et al., 2022), ocorrência de eventos extremos de vazão (LEENMAN et al., 2023; LI; WRIGHT; BLEDSOE, 2021), e às atividades humanas, como mudanças na cobertura da terra (LIVERS et al., 2018), operação de reservatórios (WANG et al., 2018) e mineração de areia (ZHANG et al., 2015). Enquanto alguns rios mudam dramaticamente sua geometria e outros são mais estáveis, a falta de informações sobre a dinâmica da morfologia fluvial é uma lacuna para o aprimoramento da estimativa do perigo de inundações e estratégias de adaptação em escala de tempo de gestão de desastres hidrológicos (SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015).

A mudança na elevação média do leito do rio é afetada pela frequência das vazões capazes de modelar o canal, ou seja, pelo regime climático e a variabilidade das vazões altas, aliadas à disponibilidade de sedimentos (PHILLIPS; JEROLMACK, 2016; SLATER; SINGER, 2013), produzindo assoreamento ou erosão em escala de trecho de canal após múltiplos ciclos de cheias. Rios em regiões áridas podem ter sua capacidade de transportar sedimentos amplificada pela alta variabilidade das vazões, tornando seus canais mais planos (CHEN et al., 2019) e mais largos (PHILLIPS et al., 2024). Em regiões mais úmidas, onde o perfil do rio tende a ser mais côncavo (CHEN et al., 2019), a menor variabilidade das vazões torna o transporte de sedimentos menos eficientes (CHAPMAN; FINNEGANT, 2024). Com o tempo, o formato e a capacidade de escoamento dos canais se ajustam para que eles possam transportar os volumes de água e sedimentos do leito que lhes são fornecidos pela bacia à montante (CHRISTOFOLLETTI A., 1981).

Inundações ocorrem quando a vazão excede a capacidade de escoamento de um canal, levando os fluxos para além das margens. Os mecanismos que desencadeiam as inundações estão atrelados à frequência na ocorrência das vazões e à capacidade do canal em transportar a vazão para jusante. A mudança no perigo de inundaçāo é tradicionalmente atribuída à tendência de vazões máximas, muitas vezes negligenciando as mudanças na capacidade de escoamento do canal (MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005; MONTANARI; KOUTSOYIANNIS, 2014). Por outro lado, mudanças na capacidade de escoamento do canal, como mudanças em sua geometria ou área, podem levar a mudanças no perigo de inundaçāo sem que necessariamente ocorram mudanças na frequência das vazões (SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015, STOVER; MONTGOMERY, 2001). Na prática, normalmente se assume que existe uma relação de equilíbrio entre a geometria média de longo prazo do canal e o suprimento de água e sedimentos para o rio. Por outro lado, o perigo de inundaçāo pode ser mais frequentemente afetado pela alteração na capacidade de escoamento do canal do que pela mudança na frequência da vazão, quando analisados separadamente (SLATER; SINGER; KIRCHNER, 2015), indicando que alterações na vazão podem não ser acompanhadas de alterações no canal, e vice-versa.

Neste trabalho investigamos a tendência na elevação média da seção transversal de 178 rios brasileiros. A partir de tendências em escalas decadais, avaliamos a relação entre a dinâmica na seção transversal e o perigo de inundaçāo devido aos efeitos da frequência das vazões (FFE) e da capacidade de escoamento dos canais (CCE).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Avaliamos a influência da tendência na elevação média do leito sobre o perigo de inundação sobre a hipótese de que mudanças na seção alteram a capacidade de escoamento e, consequentemente, o perigo de inundação. Combinamos as metodologias propostas por Slater e Singer (2013) e Slater et al. (2015) para estimar separadamente os efeitos da frequência das vazões e da capacidade de escoamento do canal na ocorrência de inundações e correlacionamos estes efeitos com a tendência na elevação do leito.

Selecionamos 178 estações hidrométricas da Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) do Brasil. Obtivemos as vazões no banco de dados CAMELS-BR (CHAGAS et al., 2020), dados de vazão, cota, largura e área da seção molhada medidos em campo da ferramenta HidroApp (SOUZA, 2021), disponível em <<https://www.labhidro.ufsc.br/hidroapp/>>. Removemos dados com erros tipográficos, zeros e ausentes. A fim de evitar controles hidráulicos sobre as seções desconsideramos estações em pontes. Foram consideradas estações com pelo menos 20 medições em campo distribuídas em pelo menos 10 anos. Como referência de cota para todas as seções utilizamos cota do nível da água na seção de margens plenas (e.g. PEREZ et al., 2024; SOFIA; NIKOLOPOULOS, 2020). A seção de margens plenas pode ser definida como o nível máximo da seção, a partir do qual o escoamento extravasa o canal e passa a ocupar a planície de inundação (WOLMAN; LEOPOLD, 1957) e em regiões tropicais e temperadas é estimada como a vazão período de entre 1,5 e 1,8 anos (LIU et al., 2024). Em cada estação definimos o valor de vazão na cota de margens plenas um tempo de retorno de 1,58 anos (Q_{mp}), a partir dos dados medidos em campo, representando um valor fixo médio para todo o período.

2.1. Mudanças na elevação média do leito

Representamos a mudança na geometria da seção do canal como a mudança na elevação média do leito, e caracterizamos as estações de acordo com a tendência de assoreamento e erosão. A elevação do leito (do inglês, *bed elevation*) é descrita como a diferença entre a cota do nível de água na régua linimétrica e a profundidade média (SLATER; SINGER, 2013):

$$BE = h - \left(\frac{A}{w} \right) \quad (1)$$

onde BE é a elevação média do leito, h é a cota na régua linimétrica, fixa no tempo e no espaço, A é a área da seção transversal e w é a largura da seção na superfície d'água (ou largura do topo), considerando a seção transversal no formato retangular. Todas as estações tiveram como limite da análise a cota do nível de margens plenas. Esta simplificação na interpretação do formato da seção a um retângulo permite sua comparação ao longo do tempo.

Mudanças na posição da régua linimétrica e da estação foram averiguadas por meio da inspeção visual das séries de h , w e A ao longo do tempo, removendo dados inconsistentes. Nas séries com mudanças abruptas foram selecionados somente os dados mais recentes ou a estação foi excluída da análise. Para evitar outliers na série de BE aplicamos o método de Tukey, que rejeita medições que estão 3 medidas interquartílicas abaixo do percentil 25 ou acima do percentil 75 (SHEIN; FITRIANTO, 2017).

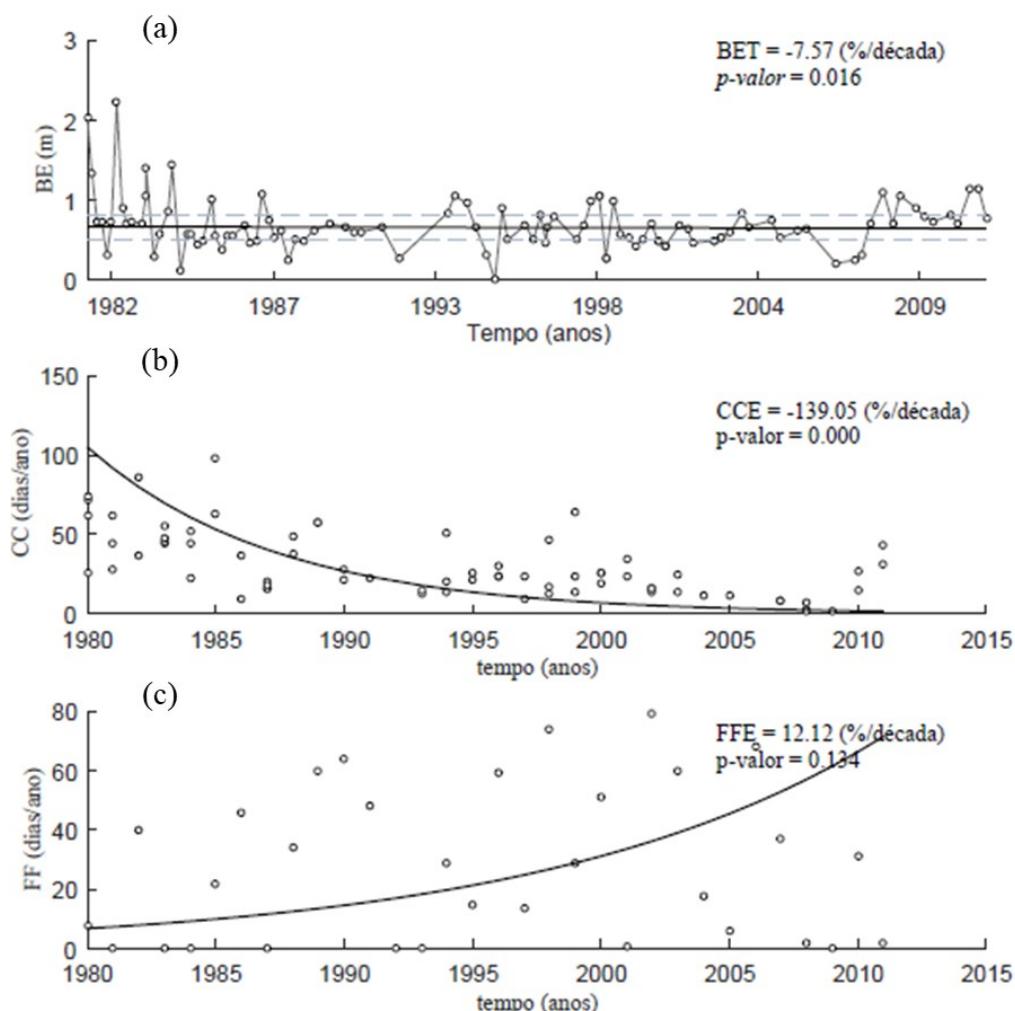
A tendência da elevação do leito (BET, do inglês *Bed Elevation Trend*) em cada estação foi calculada como a mudança de BE ao longo do tempo, estimada pela regressão de Theil-Sen não-

paramétrica (Figura 1a). A declividade da reta da regressão foi interpretada como a taxa de assoreamento ou degradação em porcentagem por década e sua significância foi estimada pelo teste Mann-Kendall.

2.2. Efeito da capacidade do canal sobre o perigo de inundaçāo

Avaliamos o efeito da tendência de alterações na capacidade do canal no nível de margens plenas com a premissa de que a distribuição de frequências da vazão fosse constante, como proposto por Slater et al. (2015). Uma vez que as medições em campo raramente são feitas exatamente no nível de inundaçāo, precisamos estimar qual teria sido a vazão no nível de inundaçāo no momento de cada medição (\hat{Q}). Para remover o efeito das diferenças na cota da régua limimétrica e a relação da vazão medida e o tempo, ajustamos uma curva de suavização de gráfico de dispersão ponderado localmente (LOESS) relacionando a vazão e a cota, e calculamos os resíduos em relação à curva. Podemos então inferir que os resíduos são representativos da vazão que deveria ser adicionada ou retirada para que a cota se mantivesse no nível de margens plenas, sob a premissa de que a tendência temporal dos resíduos na fase de cheia é a mesma que a dos resíduos no resto da curva como um todo.

Figura 1 - Estimativa da (a) tendência da elevação do leito, (b) efeito da capacidade do canal e (c) efeito da frequência das vazões sobre o perigo de inundaçāo para a estação fluviométrica 14330000, no rio Negro - AM.



Para quantificar como mudanças na capacidade do canal afetam a frequência do perigo de inundaçāo, calculamos com que frequência cada valor de \hat{Q} seria alcançado (CC), dada a distribuição de probabilidade da vazão diária de cada local. Logo, ajustamos uma função exponencial à série temporal de CC, e obtivemos o coeficiente de regressão, que representa a mudança percentual da capacidade do canal por década (Figura 1b). Em seguida, estimamos o nível de significância da tendência através do teste não-paramétrico Mann-Kendall, e definimos como significativas as tendências com p-valor < 0,05.

2.3. Efeito da frequência da vazão sobre o perigo de inundaçāo

Para isolar o efeito da tendência da frequência das vazões do efeito da tendência da capacidade de escoamento do canal, nós quantificamos a frequência com que a vazão supera a vazão de inundaçāo por ano (FF), como o número de dias por ano em que a vazão média diária se iguala ou excede a vazão em nível de margens plenas, Q_{mp} (Figura 1c). Em seguida ajustamos uma curva exponencial média através do método dos mínimos quadrados não lineares à série temporal de FF, e obtivemos o coeficiente de regressão, que representa a mudança percentual na frequência de vazões por década, como proposto por Slater et al. (2015). Assim como fizemos com CC, categorizamos as estações por seu nível de significância (p-valor <= 0,05)

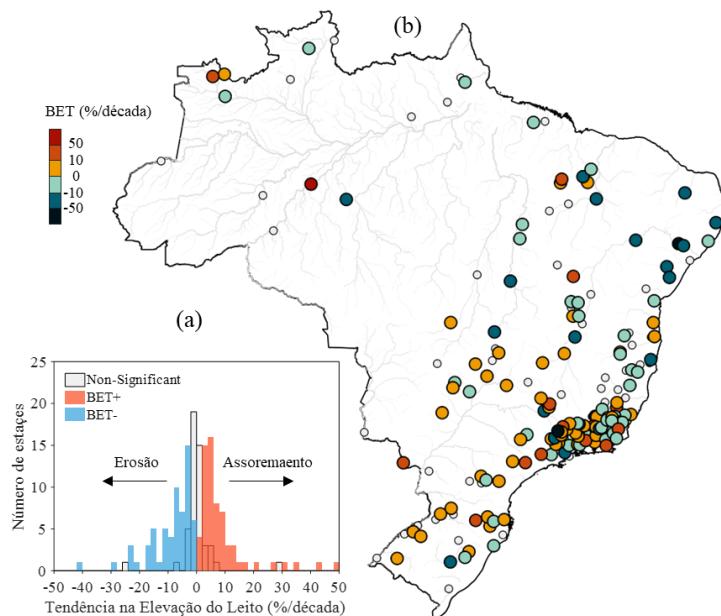
Finalmente, calculamos o efeito total no perigo de inundaçāo como a soma dos efeitos da capacidade do canal e da frequência da vazão, independentemente dos níveis de significância e analisamos a interação entre os dois controles.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mais da metade (72%, 129/178) das estações tiveram mudanças significativas em BET (p-valor <= 0,05), mostrando a não-estacionariedade das seções em escala decadal. A distribuição se dá quase que igualmente entre seções que ficaram mais profundas (64) e seções que ficaram mais rasas (65). Em termos de magnitudes, podemos dizer que as seções estão se tornando mais profundas em escala decadal, com uma mediana de diminuição na elevação do leito de -7,14%/década e uma taxa mediana de elevação do leito de 5,82%/década (Figura 2a).

Na Região Nordeste predominam as estações com tendência negativa, ou seja, tendência de erosão da seção (Figura 2b), enquanto na Região Centro-Sul predomina a tendência de assoreamento do canal. Nas demais regiões a distribuição se dá de forma heterogênea no espaço, sem padrões claros na direção e na magnitude da mudança. As estações com seções estacionárias na escala trabalhada se distribuem igualmente em todo o território, indicando que estabilidade da seção e a resposta às mudanças nas condições ambientais são altamente dependentes do contexto local. Cabe lembrar que as seções analisadas são medidas nos mesmos locais da estação fluviométrica, sendo a estabilidade das margens das seções uma das premissas para a escolha do local. Logo, nossos dados podem estar subestimando a representatividade da tendência da elevação do leito em escala de trecho de canal. Além disso, espera-se que eventualmente o aumento da erosão em um trecho do canal possa corresponder a um aumento da deposição à jusante (AHRENDT et al., 2022). Eventualmente esses efeitos ao longo dos rios pode atenuar qualquer sinal regional.

Figura 2 - Tendências de assoreamento e degradação do leito. (a) Distribuição da tendência de aumento (BET-) e diminuição (BET+) da elevação do leito em todas as estações analisadas. (b) Magnitude da tendência da elevação do leito (BET). Pontos cinzas são estações com BET não significativo.



A tendência da frequência de inundações se mostrou não estacionária na maioria das estações analisadas. Em 65% ($n = 116$) das estações houve mudança significativa do perigo de inundaçõe devido ao efeito da frequência das vazões, efeito da capacidade de escoamento do canal, ou ambos (Figura 3). Ao avaliarmos separadamente o efeito do canal e o efeito da vazão sobre o perigo de inundaçõe, tivemos um número maior de estações com mudança significativa do perigo de inundaçõe devido a mudanças no canal (Figura 3a e Figura 3b). Encontramos que 95 estações têm mudança significativa em CCE (53%, 95/178), das quais 54 estações tiveram um aumento na capacidade do canal, diminuindo os dias em que a capacidade do canal é superada a uma taxa mediana de -34 %/década (de -139 a -11). Já 41 estações tiveram sua capacidade de escoamento diminuída, levando a um incremento do perigo de inundações com uma taxa mediana de 28 %/década (de 2 a 247).

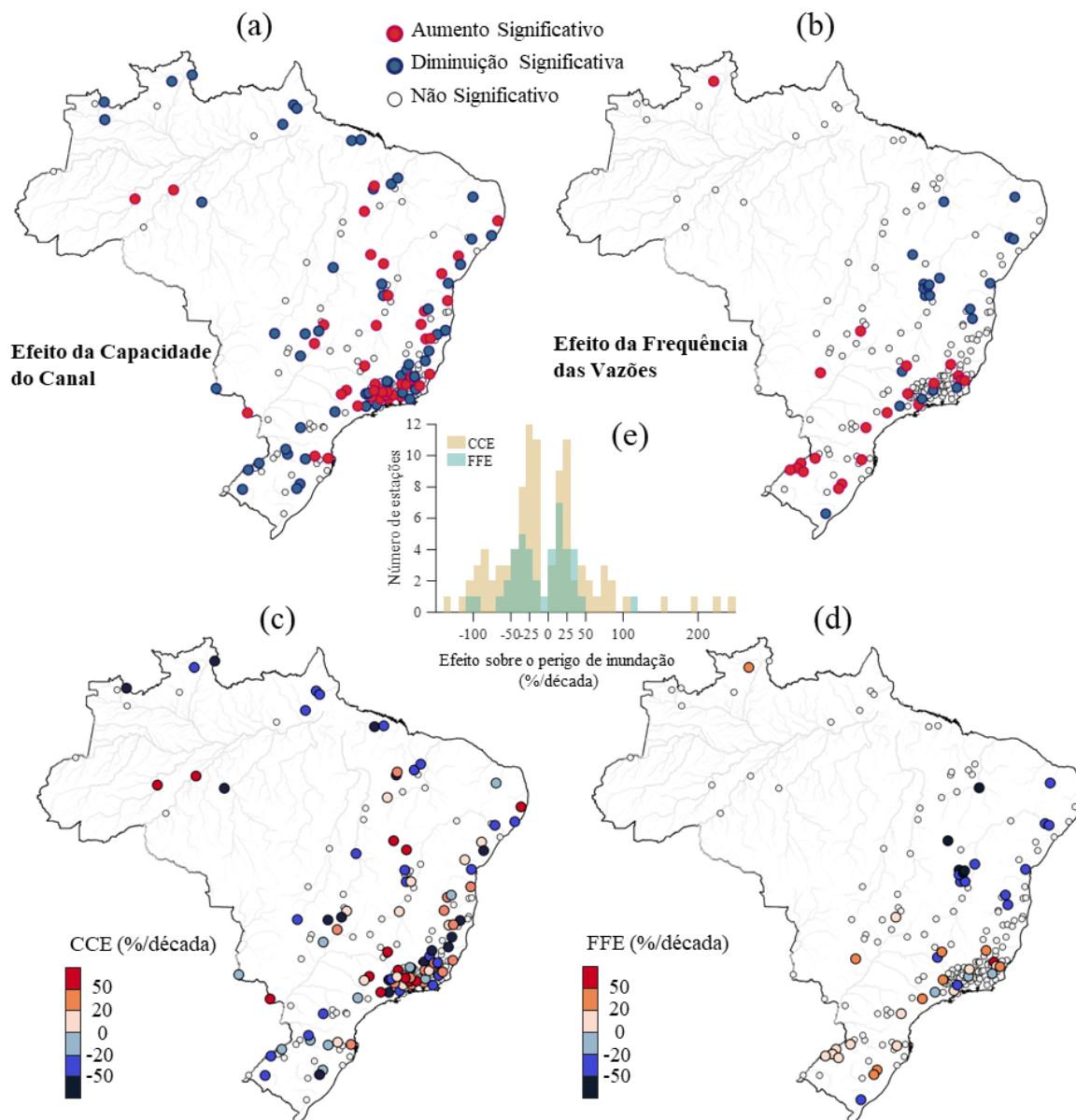
O efeito da capacidade do canal tem maior amplitude que FFE (Figura 3e) e, em termos absolutos de magnitude, as estações com CCE>FFE correspondem a 63% da amostra. Nossos resultados concordam com os encontrados por Slater et al. (2015), que mostrou que mudanças na capacidade de escoamento do canal são mais comuns e/ou mais fáceis de detectar em escalas de tempo decadais, do que mudanças na frequência das vazões que superam o nível da cota de inundaçõe ao avaliar bacias em uma ampla gama de climas e fisiografias nos Estados Unidos. Este parece ser um comportamento generalizado devido a controles de escalas diferentes sobre a morfologia do canal e a hidrologia da bacia.

Nós encontramos que em escala decadal a frequência da vazão, o formato da seção e a capacidade de escoamento se correlacionam, afirmado o pressuposto de que existe uma relação de equilíbrio entre a geometria média do canal e o suprimento de água e sedimentos para o canal (SOFIA; NIKOLOPOULOS, 2020). As tendências de CCE e FFE não se correlacionam diretamente ($\rho = -0,15$, p -valor = 0,51), mas o efeito da frequência das vazões tem forte correlação com a tendência da elevação do leito ($\rho = 0,55$, p -valor < 0,05, Figura 4a), indicando que a vazão é o principal agente de

mudança da seção. As mudanças na elevação do leito têm forte controle sobre o efeito do canal no perigo de inundação ($\rho = 0,45$, p -valor $< 0,05$, Figura 4b).

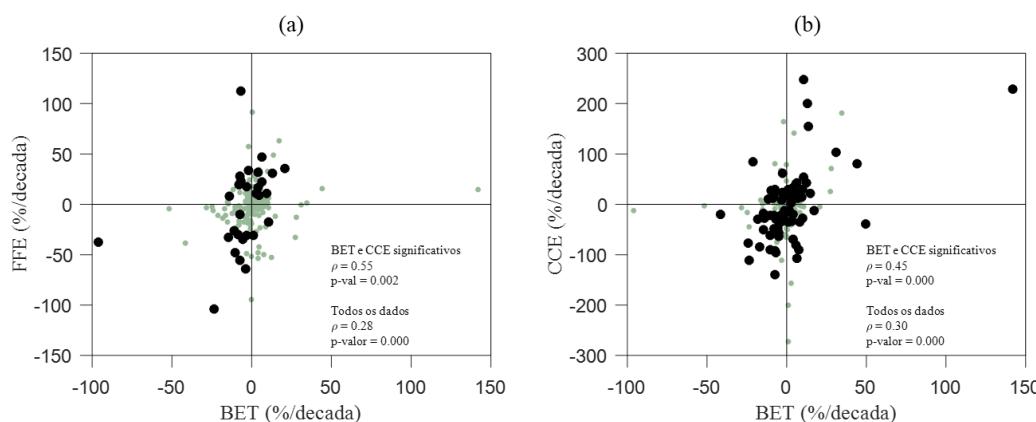
Das 95 estações com tendência significativa em CCE, 72 tiveram tendência significativa na elevação do leito do canal (Figura 4b). Seções com tendência a se tornarem mais profundas (BET-) tiveram aumento na capacidade de escoamento do canal e, consequentemente, um efeito de diminuição sobre o perigo de inundação (CCE -). Por outro lado, seções com tendência a se tornarem mais rasas (BET+) tiveram uma diminuição na capacidade de escoamento do canal, aumentando o perigo de inundação (CCE +).

Figura 3 - Distribuição espacial do efeito da (a) capacidade de escoamento do canal e da (b) frequência das vazões aumentando ou diminuindo o perigo de inundação, em estações com tendência significativa e não significativa. Magnitude de (c) CCE e (d) FFE. (e) Histograma do efeito da frequência das vazões e da capacidade de escoamento do canal sobre o perigo de inundação (%/década) em estações com tendência significativa.



Embora nosso trabalho tenha se concentrado na dinâmica do formato da seção como principal controle na capacidade de escoamento do canal, alterações na velocidade do escoamento também têm influência no efeito do canal sobre o perigo de inundação. A presença de vegetação no leito e nas margens do canal, mudanças na textura do sedimento devido a alterações no uso da terra e o acúmulo temporário de sedimentos formando bancos no leito (BUFFINGTON, 2012) alteram a rugosidade e a área da seção transversal, e, consequentemente, a velocidade do fluxo, impactando na capacidade do canal de escoar a água para jusante.

Figura 4 - (a) Relação entre a tendência da elevação do leito (BET) e o efeito da frequência das vazões (FFE) e (b) o efeito da capacidade do canal (CCE) sobre o perigo de inundação. O valor de ρ é o coeficiente de correlação de Spearman e seu p -valor. Os círculos pretos são as estações com BET e FFE significativos e BET e CCE significativos (p -valor $\leq 0,05$), respectivamente. Os círculos menores cinzas são as estações com BET não-significativo.



4. CONCLUSÃO

Averiguamos a tendência na elevação do leito e sua relação com a tendência na capacidade de escoamento do canal e seu efeito sobre o perigo de inundação separadamente do efeito da tendência da frequência das vazões em 178 seções de rios Brasileiros.

Encontramos que a maioria das estações tem mudanças significativa na elevação do leito na escala decadal. Os resultados mostraram que as tendências na elevação do leito explicam a mudança na capacidade de escoamento do canal, se correlacionando diretamente, e havendo igual distribuição entre seções mais rasas e mais profundas. A tendência da frequência de inundações foi geralmente não estacionária nas estações analisadas e o efeito da capacidade do canal é predominante e alcança maior magnitudes do que o efeito da frequência das vazões. Além disso, a maioria das estações tem tendência média de aumento na capacidade de escoamento e um efeito de decrescente sobre as inundações.

Essas descobertas sugerem que ignorar a influência potencial da mudança da capacidade de escoamento do canal na previsão de inundações pode subestimar a estimativa do perigo. Uma melhor compreensão e quantificação da influência das tendências geomorfológicas do perigo de inundação fornecerá uma visão mais abrangente sobre os mecanismos de condução das inundações fluviais.

REFERÊNCIAS

AHRENDT, S.; HORNER-DEVINE, A. R.; COLLINS, B. D.; MORGAN, J. A.; ISTANBULLUOGLU, E. Channel Conveyance Variability can Influence Flood Risk as Much

as Streamflow Variability in Western Washington State. *Water Resources Research*, v. 58, n. 6, 20 jun. 2022.

BUFFINGTON, J. M. Changes in Channel Morphology Over Human Time Scales. Em: *Gravel-Bed Rivers*. [s.l.] Wiley, 2012. p. 433–463.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; ADDOR, N.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A. CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. *Earth System Science Data*, v. 12, n. 3, p. 2075–2096, 8 set. 2020.

CHAPMAN, W. A. L.; FINNEGAR, N. J. The Signature of Climate in Fluvial Suspended Sediment Records. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 129, n. 1, 3 jan. 2024.

CHEN, S.-A.; MICHAELIDES, K.; GRIEVE, S. W. D.; SINGER, M. B. Aridity is expressed in river topography globally. *Nature*, v. 573, n. 7775, p. 573–577, 26 set. 2019.

CHRISTOFOLLETTI A. *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A.; BUARQUE, D. C.; KORNOWSKI, L. W.; LAIPELT, L.; COLLISCHONN, W. Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. *Water Resources Research*, v. 57, n. 2, 4 fev. 2021.

LEENMAN, A. S.; SLATER, L. J.; DADSON, S. J.; WORTMANN, M.; BOOTHROYD, R. Quantifying the Geomorphic Effect of Floods Using Satellite Observations of River Mobility. *Geophysical Research Letters*, v. 50, n. 16, 28 ago. 2023.

LELPI, A.; LAPÔTRE, M. G. A.; GIBLING, M. R.; BOYCE, C. K. The impact of vegetation on meandering rivers. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 3, n. 3, p. 165–178, 25 jan. 2022.

LI, Y.; WRIGHT, D.; BLEDSOE, B. Watershed Controls and Tropical Cyclone-Induced Changes in River Hydraulic Geometry in Puerto Rico. *Earth and Space Science Open Archive*, p. 34, 2021.

LIU, Y.; WORTMANN, M.; HAWKER, L.; NEAL, J.; YIN, J.; SANTOS, M. S.; ANDERSON, B.; BOOTHROYD, R.; NICHOLAS, A.; SMITH, G. S.; ASHWORTH, P.; CLOKE, H.; GEBRECHORKOS, S.; LEYLAND, J.; ZHANG, B.; VAHIDI, E.; GRIFFITH, H.; DELORME, P.; MCLELLAND, S.; PARSONS, D.; DARBY, S.; SLATER, L. *Global Estimation of River Bankfull Discharge Reveals Distinct Flood Recurrences Across Different Climate Zones*, 22 out. 2024.

LIVERS, B.; WOHL, E.; JACKSON, K. J.; SUTFIN, N. A. Historical land use as a driver of alternative states for stream form and function in forested mountain watersheds of the Southern Rocky Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 43, n. 3, p. 669–684, 15 mar. 2018.

MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A.; VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, v. 438, n. 7066, p. 347–350, nov. 2005.

MONTANARI, A.; KOUTSOYIANNIS, D. Modeling and mitigating natural hazards: Stationarity is immortal! *Water Resources Research*, v. 50, n. 12, p. 9748–9756, 29 dez. 2014.

NONES, M.; GUO, Y. Can sediments play a role in river flood risk mapping? Learning from selected European examples. *Geoenvironmental Disasters*, v. 10, n. 1, p. 20, 28 set. 2023.

- PEREZ, A. B. A.; GRISON, F.; SOUZA, K. I. S. DE; CHAFFE, P. L. B. Hydroclimatic drivers of at-a-station hydraulic geometry of Brazilian rivers. *Journal of Hydrology*, v. 640, p. 131594, ago. 2024.
- PHILLIPS, C. B.; MASTELLER, C. C.; BLAYLOCK, J.; VAN IWAARDEN, F.; JOHNSON, J. P. L. Variability in River Width Reveals Climatic Influence on Channel Geometry. *Geophysical Research Letters*, v. 51, n. 23, 16 dez. 2024.
- PHILLIPS, C. B.; JEROLMACK, D. J. Self-organization of river channels as a critical filter on climate signals. *Science*, v. 352, n. 6286, p. 694–697, 6 maio 2016.
- SHEIN, W. H.; FITRIANTO, A. A Comparative Study of Outliers Identification Methods in Univariate Data Set. *Advanced Science Letters*, v. 23, n. 2, p. 1422–1427, 1 fev. 2017.
- SLATER, L. J.; SINGER, M. B. Imprint of climate and climate change in alluvial riverbeds: Continental United States, 1950–2011. *Geology*, v. 41, n. 5, p. 595–598, maio 2013.
- SLATER, L. J.; SINGER, M. B.; KIRCHNER, J. W. Hydrologic versus geomorphic drivers of trends in flood hazard. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 2, p. 370–376, 28 jan. 2015.
- SOFIA, G.; NIKOLOPOULOS, E. I. Floods and rivers: a circular causality perspective. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 5175, 20 mar. 2020.
- SOUZA, K. I. S. DE. Definição de áreas de preservação permanente com função de proteção aos recursos hídricos naturais. Tese—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.
- WANG, Y.; RHOADS, B. L.; WANG, D.; WU, J.; ZHANG, X. Impacts of large dams on the complexity of suspended sediment dynamics in the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, v. 558, p. 184–195, mar. 2018.
- WOLMAN, G.; LEOPOLD, L. B. River flood plains: Some observations on their formation. *United States Geological Survey*, v. Profession, p. 30, 1957.
- ZHANG, W.; WANG, W.; ZHENG, J.; WANG, H.; WANG, G.; ZHANG, J. Reconstruction of stage–discharge relationships and analysis of hydraulic geometry variations: The case study of the Pearl River Delta, China. *Global and Planetary Change*, v. 125, p. 60–70, fev. 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e CNPQ pelas bolsas de pesquisa.