Mecanismos das Mudanças de Cheias de Diferentes Magnitudes

Gabriel Anzolin[1]; Vinícius B. P. Chagas[2]& Pedro L. B. Chaffe[3]

Palavras-Chave – Cheias; Chuvas extremas; Umidade antecedente.

INTRODUÇÃO

Em regiões tropicais, as mudanças na magnitude das cheias são controladas por uma combinação das características do evento de chuva e das variações na umidade antecedente. No entanto, ainda não está claro como as interações entre a capacidade de armazenamento das bacias, a chuva de evento e a umidade antecedente influenciam as mudanças nas cheias de diferentes magnitudes na escala de evento. A atribuição de mudanças no regime de cheias geralmente foi avaliada em regiões de clima frio, cujos regimes de chuva, taxas de evaporação e dinâmicas de armazenamento de água diferem substancialmente das observadas em regiões tropicais (Minasny e Hartemink, 2011; Wohl *et al*., 2012). Essas diferenças dificultam a generalização dos mecanismos de mudança das cheias entre eventos de diferentes magnitudes para climas tropicais. No Brasil, as mudanças em cheias de grande magnitude têm sido analisadas principalmente em estudos globais que incluem um número limitado de bacias hidrográficas e desconsideram efeitos locais (Wasko *et al*., 2021). O Brasil representa uma oportunidade única para investigar como as interações entre a capacidade de armazenamento das bacias, a chuva de evento e a umidade antecedente influenciam as mudanças nas cheias de diferentes magnitudes.

Neste trabalho, analisamos dados diários de vazão e precipitação de 765 bacias hidrográficas brasileiras (1980–2018) para investigar se as mudanças nas cheias e seus mecanismos variam conforme a magnitude dos eventos. A detecção e atribuição dessas mudanças foram feitas combinando as tendências dos mecanismos associados às cheias com suas respectivas elasticidades em escala de evento através da regressão linear quantílica.

METODOLOGIA

Dados hidrometeorológicos e identificação dos eventos de cheia

Utilizamos dados diários de vazão (1980-2018) de 765 bacias hidrográficas do Brasil, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio do sistema HidroWeb (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/) e organizados na versão brasileira da base de dados *Catchment Attributes and Meteorology for Large-Sample Studies* (CAMELS-BR; Chagas *et al.*, 2020). Os dados foram filtrados conforme os procedimentos de controle de qualidade do CAMELS-BR e pela influência antrópica inferior a 30%, medida pela razão entre o volume total de armazenamento em reservatórios artificiais e a vazão anual da bacia (i.e., grau de regularização de vazão). Para os dados de chuva, utilizamos a chuva média diária de cada bacia, provenientes da base de dados *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS v2.0), também disponível no CAMELS-BR.

Eventos independentes de vazão foram extraídos utilizando um método não paramétrico de separação de escoamento de base, baseado em mínimos locais da série temporal diária de vazão. Para evitar a detecção de respostas de vazão muito pequenas, apenas os eventos com vazão de pico superior à mediana de longo prazo das vazões diárias são mantidos. A chuva de evento foi atribuída com base

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Eng. Ambiental, gabriel_anzolin@hotmail.com.
2) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Eng. Ambiental, vbchagas@gmail.com.
3) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental, pedro.chaffe@gmail.com.

em uma série temporal de chuva de uma média móvel de 3 dias e no ramo ascendente do evento de vazão, i.e., no intervalo entre as datas de início e pico do evento de vazão. Para cada evento, definiu-se a vazão de pico (mm d^{-1}), pico da chuva (mm d^{-1}) e a umidade antecedente (mm d^{-1}). O estado de umidade também foi aproximado com base no ramo ascendente, utilizando-se o valor da vazão um dia antes do início do evento. Os eventos foram amostrados com base nas magnitudes da chuva para garantir que as condições antecedentes sejam independentes da resposta hidrológica (Wasko *et al.*, 2021). Apenas eventos com picos de chuva superiores a um limiar que garante, em média, três eventos por ano são mantidos na amostra.

Detecção e atribuição de mudanças em eventos de cheia

A detecção e atribuição das mudanças nas cheias foi investigada por meio de regressão quantílica (Koenker, 2005). Selecionamos dois quantis de interesse: o quantil 0,50 (mediana), que representa o comportamento médio das cheias ou eventos de menor magnitude; e o quantil 0,95, que representa os eventos de cheia de grande magnitude. Para a detecção de mudanças, assumimos uma dependência log-linear entre a variável de interesse (picos de cheia, picos da chuva e umidade antecedente) e o tempo. Para o modelo de atribuição, analisamos a variabilidade interanual dos picos de cheia e de seus mecanismos (picos da chuva e umidade antecedente) em um modelo linear multivariado. A significância dos parâmetros dos modelos foi avaliada utilizando estimadores robustos da matriz de covariância, com nível de significância local (α) de 5%, levando em conta possíveis efeitos de heterocedasticidade, autocorrelação e não normalidade dos resíduos. Além disso, utilizamos o método *False Discovery Rate* (FDR; Benjamini e Hochberg, 1995) para lidar com a superestimativa de resultados significativos ao realizar múltiplos testes estatísticos em diferentes bacias hidrográficas para avaliar a significância regional e para garantir uma análise robusta de variáveis com dependência espacial. Seguimos a recomendação de Wilks (2016) para dados altamente dependentes no espaço e assumimos um nível de significância ajustado pelo FDR equivalente ao dobro do nível de significância local (i.e., α_{FDR} = 10%).

RESULTADOS

Eventos de cheia de pequena e grande magnitude têm mudado de forma distinta no Brasil (Fig. 1). As tendências nos eventos de pequena magnitude (Fig. 1a) são majoritariamente negativas em todo o país, com 70,2% das bacias apresentando redução nas magnitudes. Das 765 bacias analisadas, 17,3% apresentaram mudanças estatisticamente significativas (α_{FDR} = 10%), valor 3,5 vezes superior ao nível de significância local esperado de 5%. Em contraste, os eventos de cheia de grande magnitude (Fig. 1b) apresentam uma proporção maior de bacias com aumento nas magnitudes (43,5%) em comparação com os eventos pequenos (29,7 %). Também se observou uma proporção maior do que o esperado de mudanças estatisticamente significativas nos eventos de grande magnitude (13,7%), cerca de 2,7 vezes acima da proporção esperada. Esses padrões contrastantes são destacados na Fig. 1c, que mostra a diferença entre as mudanças nas cheias de grande e pequena magnitude. Na maior parte do Brasil, os eventos grandes estão aumentando mais (ou diminuindo menos) do que os eventos pequenos, o que pode ser facilmente observado pela grande proporção de diferenças positivas na Fig. 1c (57,5%). Diferenças marcantes entre as mudanças em eventos de pequena e grande magnitude são observadas nas regiões Sudeste e Sul, onde a maioria das cheias pequenas apresenta redução de magnitude (tendência mediana de -2,4% e -6% por década, respectivamente), enquanto as cheias de grande magnitude estão aumentando (ambas com tendência mediana próxima de +3% por década). Na região Norte, as cheias de pequena magnitude estão diminuindo a taxas mais elevadas do que as grandes (tendências medianas de -9,4% e -4,2% por década, respectivamente).

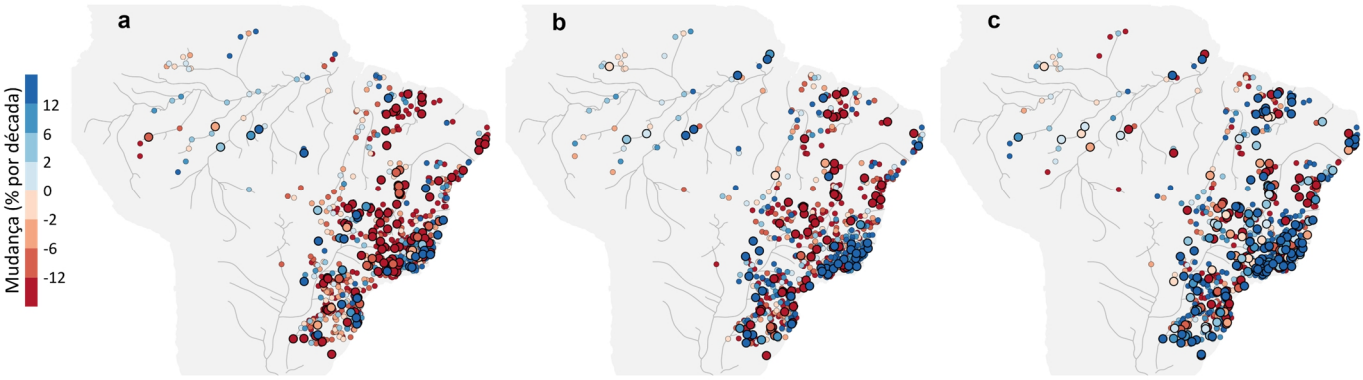


Figura 1. Mudanças observadas, em % por década, para eventos de cheia de (a) pequena e (b) grande magnitude. (c) Diferenças entre as mudanças nas cheias grandes e pequenas. Os círculos grandes com bordas grossas em (a-b) indicam significância estatística com nível de significância ajustado por FDR (α_{FDR} = 10%). A significância em (c) refere-se à significância estatística observada para cheias de pequena ou grande magnitude.

Para as cheias pequenas (Fig. 2a), as mudanças nas cheias estão mais associadas à umidade antecedente do que ao pico da chuva em 69,8% das bacias, especialmente na Amazônia (mediana da contribuição relativa de 0,80), Norte (0,82), e Sudeste (0,64), com contribuições baixas a moderadas do pico da chuva – a contribuição relativa da chuva é de, no máximo, 0,36. Na região Sul, apesar da maior contribuição mediana da umidade antecedente (0,60), há uma grande sobreposição com a contribuição relativa do pico da chuva, sugerindo que o mecanismo dominante varia consideravelmente entre as bacias. Para as cheias de grande magnitude, a importância do pico da chuva: em 58,8% das bacias, as mudanças nas cheias estão mais associadas às mudanças no pico da chuva do que na umidade antecedente. Observa-se uma mudança clara nos mecanismos que explicam as mudanças nas cheias grandes nas regiões Sudeste e Sul (Fig. 2b), onde as mudanças tornam-se predominantemente controlada pela precipitação, com contribuição relativa mediana de 0,68 e 0,64, respectivamente. Nas demais regiões, o mecanismo dominante continua sendo a umidade antecedente, como na Amazônia (0,58) e Norte (0,63), embora haja maiores contribuições do pico da chuva em comparação às cheias pequenas. Nestas regiões, as contribuições relativas são de até 0,42.

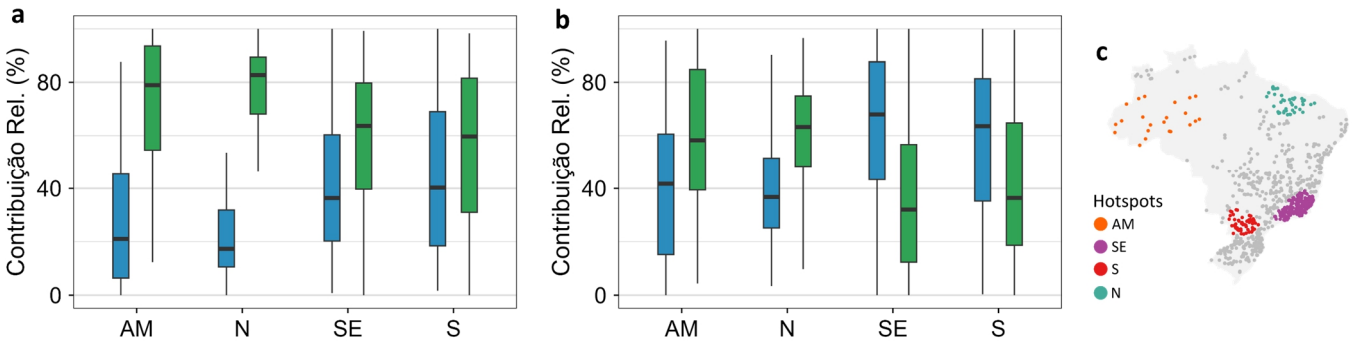


Figura 2. Contribuições relativas dos mecanismos para mudanças de eventos de cheia de pequena e grande magnitude. Contribuição relativa do pico de precipitação (azul) e da umidade antecedente (verde) para as mudanças nas cheias em: (a) eventos de pequena magnitude; (b) eventos de grande magnitude; e (c) regiões de destaque (hotspots) no Brasil. Os hotspots são Amazônia (AM), Norte (N), Sudeste (SE) e Sul (S).

As diferenças regionais entre mudanças em pequenas e grandes cheias e seus mecanismos estão relacionadas à capacidade de armazenamento das bacias, conforme descrito anteriormente para mecanismos de geração de Cheias no Brasil. O primeiro padrão encontrado – mudanças similares (em termos de sinal e mecanismos) entre cheias de pequena e grande magnitude é mais frequentemente obsetrvada em regiões com alta capacidade de armazenamento, como as regiões da Amazônia e Norte, em que vários atributos da paisagem controlam a responsividade das bacias hidrográficas, incluindo solos profundos e altamente permeáveis, baixas declividades e a formação de extensas planícies de

inundação, tornando essas regiões menos sensíveis a mudanças em extremos de precipitação. O segundo padrão encontrado – diferentes padrões de mudança e mecanismos entre pequenas e grandes cheias, é mais frequentemente observado em regiões com baixa capacidade de armazenamento, como as regiões Sul e Sudeste, em que os atributos da paisagem são caracterizados por regiões com cadeias de montanhas com grandes declividades e solos mais rasos, tornando essas bacias hidrográficas mais sensíveis a mudanças em extremos de precipitação.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigamos se as mudanças nas cheias e seus mecanismos variam conforme a magnitude dos eventos. As tendências para cheias de pequena magnitude são predominantemente negativas, enquanto eventos de grande magnitude estão aumentando mais do que os de pequena magnitude. Nós encontramos que em regiões com alta capacidade de armazenamento, as mudanças em eventos de pequena e grande magnitude são semelhantes e ambos controlados pela umidade antecedente. Em regiões com baixa capacidade de armazenamento, os padrões de mudança e seus mecanismos variam de acordo com a magnitude do evento. Enquanto eventos de pequena magnitude são controlados pela umidade antecedente, cheias de grande magnitude são predominantemente controladas pela chuva. Nossos resultados mostram que estimativas confiáveis de mudanças no regime de cheias devem levar em conta tanto a magnitude dos eventos quanto a capacidade de armazenamento das bacias hidrográficas, visto que os fatores climáticos isoladamente são insuficientes para explicar completamente as mudanças nas cheias.

REFERÊNCIAS

BENJAMINI, Y.; HOCHBERG, Y. (1995). "Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing". Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, v.57, n.1, p.289–300.

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

KOENKER, R. (2005). *Quantile Regression*. Cambridge: Cambridge University Press.

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. (2011). "Predicting soil properties in the tropics". Earth-Science Reviews, v.106, n.1–2, p.52–62.

WASKO, C.; NATHAN, R.; STEIN, L.; O'SHEA, D. (2021). "Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change". Journal of Hydrology, v.603, p.126994.

WILKS, D. S. (2016). "The Stippling Shows Statistically Significant Grid Points: How Research Results are Routinely Overstated and Overinterpreted, and What to Do about It". Bulletin of the American Meteorological Society, v.97, n.12, p.2263–2273.

WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; CHAPPELL, N. A.; COE, M.; GIAMBELLUCA, T.; GOLDSMITH, S.; HARMON, R.; HENDRICKX, J. M. H.; JUVIK, J.; MCDONNELL, J.; OGDEN, F. (2012). "The hydrology of the humid tropics". Nature Climate Change, v.2, n.9, p.655–662.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do Serviço Geológico do Brasil (SGB) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) – Edital FAPESC n° 32/2024 (Termo de Outorga 2024TR002697 e 2024TR2698).