

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TEMPO DE DELOCAMENTO DE ONDAS DE CHEIA NO RIO URUGUAI EM COTAS ALTAS

Camila Dalla Porta Mattiuzzi¹; Tomás X. Cavedon²

Abstract: Floods are hydrological events that can cause social and economic impacts. Understanding the processes and characteristics of flood events are important to support planning and decision-making aimed at reducing and mitigating adverse effects. This knowledge also contributes to the study of hydrological processes and to calibration of forecast models. In large rivers, such as the Uruguai river, located in South Brazil, the flood propagation processes depend on many variables. In this context, the objective of this study was to characterize flood wave propagation in the Urugai river by determining peak travel times, estimating wave celerity, and analyzing flood stage levels. Data from nine automatic gauge stations were analyzed for the period of 2017 to 2024, considering flood events that exceeded attention threshold according to the Flood Warning System of the Uruguai River Basin, operated by the Brazilian Geological Survey. The results indicated median peak wave travel times ranging from 6 to 35h, and median celerity values between 0.67 and 4.09 m/s. Shorter travel times and higher celerity were associated with river reaches with steeper slopes, whereas longer travel times and lower celerity were observed in flatter river reaches, and possibly also influenced by other geomorphological and hydraulic characteristics, such as floodplains, soil with low drainage capacity and tributary contributions.

Resumo: Inundações são eventos hidrológicos que podem causar impactos sociais e econômicos. A compreensão dos processos e das características destes eventos são fundamentais para subsidiar o planejamento e as tomadas de decisão, com objetivo de diminuir e mitigar seus efeitos adversos. Além disso, esse conhecimento contribui para o estudo dos processos hidrológicos e a calibração de modelos de previsão. Em grandes rios, como o Rio Uruguai, localizado na região Sul do Brasil, os processos de propagação de inundação dependem de muitas variáveis. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar a propagação das ondas de cheia no rio Uruguai por meio da determinação dos tempos de deslocamento, da celeridade e da análise das cotas de cheia. Foram analisados dados de nove estações telemétricas no período de 2017 a 2024, considerando eventos que ultrapassaram as cotas de atenção definidas no Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Uruguai, operado pelo Serviço Geológico do Brasil. Os resultados apontaram que os tempos medianos de deslocamento das ondas de cheia variaram entre 6 e 35h; a mediana dos valores de celeridade variou entre 0,67 e 4,09 m/s. Os menores tempos de deslocamento e maiores celeridades estão associados aos trechos com maior declividade, enquanto os maiores tempos e menores velocidades ocorreram em trechos com menor declividade e sob possível influência de outras características geomorfológicas, pedológicas e hidráulicas, como planícies de inundação, solos com baixa capacidade de drenagem e contribuições de rios afluentes.

Palavras-Chave – Rio Uruguai, onda de cheia, Sistema de Alerta Hidrológico

1) SGB - Serviço Geológico do Brasil - Rua Banco da Província, 105 - Santa Teresa - Porto Alegre/RS - CEP 90.840-030, Tel.: (51) 3406-7300. camila.mattiuzzi@sgb.gov.br, camilamattiuzzi@gmail.com

2) Estagiário do SGB/GEHITE – PA. Geografia – IGEO/UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9090 - Agronomia, Porto Alegre/RS - CEP: 90040-060, Tel.: (51) 33086000. tomascavedon@gmail.com

INTRODUÇÃO

As inundações ribeirinhas ocorrem quando o volume de água do rio atinge a planície de inundaçāo adjacente. Essa ação é controlada por uma combinação de processos que atuam em escalas local e de bacia hidrográfica (Benito e Hudson, 2010). Dentre os impactos à sociedade causados pelas inundações estão as perdas humanas e econômicas. Dados do relatório da Organização das Nacionais Unidas (ONU, 2021) apontam que inundações e eventos de precipitações extremas têm aumentado mais de 50% na última década em termos globais; entre 2009 e 2019 inundações causaram aproximadamente 55 mil mortes e afetaram mais de 103 milhões de pessoas, causando aproximadamente 77 bilhões de dólares em perdas econômicas. Somente no Brasil, conforme estimativas do Banco Mundial (2020), entre 1995 e 2019 os danos e prejuízos causados por inundações somaram um montante de 32 bilhões de reais.

A compreensão da dinâmica hidrológica durante eventos de inundaçāo é essencial para subsidiar tomadas de decisão para prevenção e mitigação de riscos e danos, e também para gerar conhecimento e apoiar a calibração de modelos de previsão, e aprofundar o conhecimento sobre as bacias hidrográficas. Uma maneira de compreender os processos de inundaçāo em um curso d'água é através da análise de ondas de cheias, que consiste em determinar o tempo que uma onda de cheia leva para se deslocar de um ponto conhecido (uma estação fluviométrica, por exemplo) para outro ponto à jusante. A obtenção dos tempos de deslocamento permite, ainda, avaliar a celeridade, ou seja, a velocidade da onda de cheia, que é um parâmetro chave para o estudo das propagações de cheia em rios (Meyer et al., 2019).

Especialmente em grandes rios, os processos de propagação de inundaçāo dependem de muitas variáveis (Suizu, Latrubesse, Bayer; 2023). Na região Sul do Brasil, o Rio Uruguai percorre uma extensão de 2.200 km, delimitando a fronteira primeiramente entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e em seguida marcando a divisa entre Brasil e Argentina. Na extensão do rio Uruguai são recorrentes os episódios de inundações: a dinâmica das inundações, além de ser influenciada pela duração, intensidade e localização das precipitações, também depende do relevo, através da declividade e das variações nas seções transversais do canal principal, da dinâmica das planícies de inundaçāo no Baixo Uruguai e da contribuição dos afluentes (Mattiuzzi, Matos, Buffon, 2023; MMA, 2006).

Devido à recorrência de eventos de inundaçāo e à importância de compreender a dinâmica dos níveis do Rio Uruguai em cotas altas, neste trabalho foram avaliados (i) os tempos de deslocamento das ondas de cheia, (ii) a celeridade e (iii) a relação entre os níveis de cheia nas estações fluviométricas da calha principal do rio Uruguai, entre Iraí e Uruguiana.

METODOLOGIA

Tempo de deslocamento

Para a obtenção do tempo de deslocamento das ondas de cheia são plotados, em pares, os hidrogramas das estações de montante e jusante, através do qual é determinado o intervalo de tempo Δt , em horas, que corresponde ao tempo de deslocamento do pico de uma mesma cheia de uma estação fluviométrica para a seguinte. Utilizou-se as séries disponíveis de estações automáticas para maior discretização da análise.

Celeridade

A celeridade é definida como a velocidade de deslocamento da onda de cheia, e foi obtida com base no tempo de deslocamento da onda de cheia entre duas estações, conforme Equação 1, na qual c é a celeridade (em m/s), Δx é a distância entre as estações fluviométricas (em m), e Δt é o tempo de deslocamento da onda de cheia (em s). A distância entre as estações fluviométricas e o perfil de elevação do trecho do rio Uruguai entre Iraí e Uruguaiana foram obtidos através do Google Earth.

$$c = \Delta x / \Delta t \quad (1)$$

Área de Estudo

O Rio Uruguai possui aproximadamente 2.200 km de extensão, e é formado pela confluência dos rios Pelotas e Canoas, tendo sua foz no estuário do rio da Prata, sendo o principal curso d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. Inicialmente o rio Uruguai corre na direção leste-oeste e divide os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em seu trecho nacional; após a confluência com o rio Peperi-Guaçu, o Rio Uruguai muda para a direção sudoeste e passa a delimitar a fronteira entre o Brasil e a Argentina, e por fim, após a afluência do rio Quaraí, deixa o território nacional, e passa a definir a fronteira entre o Uruguai e a Argentina, até a sua foz. (Mattiuzzi e Matos, 2023; MMA, 2006)

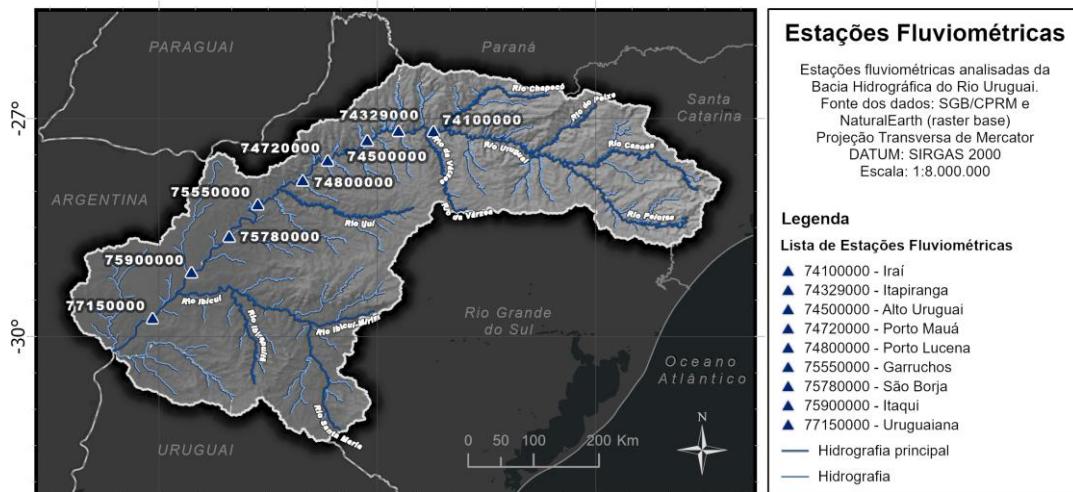
A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai tem uma área aproximada de 174 mil km² em território brasileiro (Marcuzzo, 2017), ocupando parte dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, abrangendo um total de 391 municípios, os quais somam uma população superior a 4.9 milhões de habitantes (IBGE, 2022). O Serviço Geológico do Brasil implementou e opera o Sistema de Alerta Hidrológico do Rio Uruguai, através do qual é realizado o monitoramento de chuvas e níveis dos rios em diversas estações hidrometeorológicas ao longo da bacia, além da previsão de níveis, durante eventos de inundação, que subsidiam as tomadas de decisões por parte dos órgãos relacionadas à mitigação dos impactos. O acesso às informações do monitoramento SAH Uruguai pode ser realizado através do Sistema de Alerta de Eventos Críticos [SACE SAH Uruguai](#).

Dados de Entrada

Para a análise do tempo de deslocamento de ondas de cheia foram utilizadas séries fluviométricas com intervalo horário de 9 estações hidrometeorológicas ao longo do Rio Uruguai. O período analisado variou de 2017 a 2024, conforme disponibilidade de dados. As informações e a localização das estações fluviométricas estão apresentadas na Tabela 1 e Figura 1. Na Figura 2 é apresentado o perfil de elevação do rio Uruguai e as estações fluviométricas, obtidos através do Google Earth.

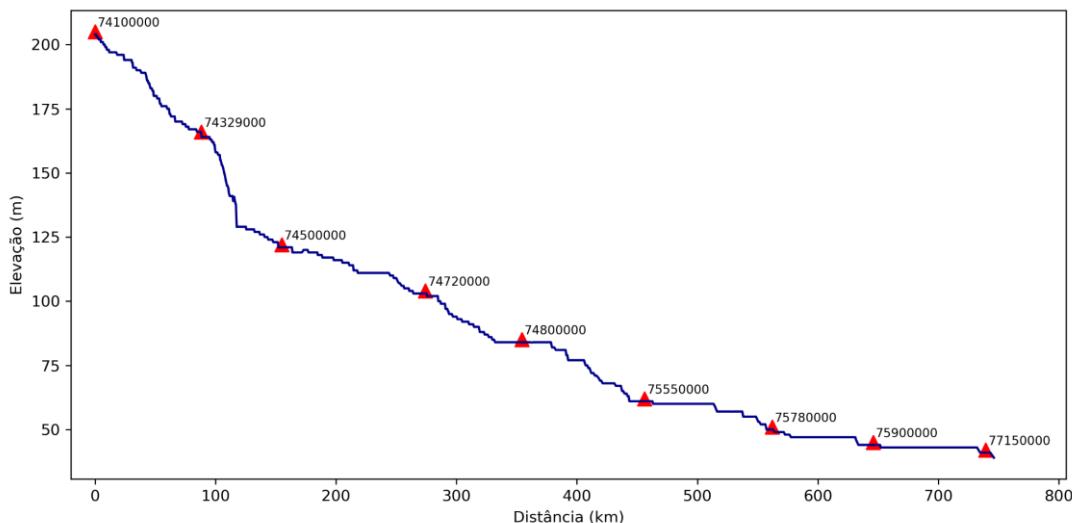
Considerando que o objetivo do estudo é avaliar os tempos de descolamento para cotas em que há possibilidade de ocorrência de inundação, a análise foi realizada para os eventos que ultrapassaram as cotas de atenção das estações fluviométricas. As cotas de referência, estabelecidas no âmbito dos Sistemas de Alertas Hidrológicos, estão associadas aos níveis das inundações fluviométricas em cada município e são definidas como: *cota de atenção* (possibilidade moderada de ocorrência de inundação), *cota de alerta* (possibilidade elevada de ocorrência de inundação) e *cota de inundação* (cota em que o primeiro dano é observado no município). As cotas de referência são obtidas diretamente nos municípios, através de visitas às áreas suscetíveis à inundação acompanhadas pelas Defesas Civis locais. As cotas de referência podem ser visualizadas na plataforma [SACE SAH Uruguai](#) e em Mattiuzzi e Matos (2023).

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai, principais afluentes e estações fluviométricas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 – Perfil de Elevação do Rio Uruguai



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1 – Estações fluviométricas

Código	Estação	Município	UF	Lat	Long	AD (km ²)	Altitude (m)
74100000	Iraí	Iraí	RS	-27,1756	-53,2297	61.900	204
74329000	Itapiranga	Itapiranga	SC	-27,1717	-53,7097	72.300	164
74500000	Alto Uruguai	Tiradentes do Sul	RS	-27,3019	-54,1397	82.300	124
74720000	Porto Mauá	Porto Mauá	RS	-27,5781	-54,6831	90.700	104
74800000	Porto Lucena	Porto Lucena	RS	-27,8525	-55,0256	95.200	87
75550000	Garruchos	Garruchos	RS	-28,1822	-55,6433	116.000	63
75780000	Passo São Borja	São Borja	RS	-28,6244	-56,0369	125.000	51
75900000	Itaqui	Itaqui	RS	-29,1175	-56,5544	131.000	45
77150000	Uruguaiana	Uruguaiana	RS	-29,7486	-57,0886	190.000	41

AD = Área de drenagem

Fonte: Elaborado pelos autores.

RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta as distâncias e declividades entre as estações fluviométricas analisadas. A elevação do trecho analisado varia de 204m a 39m. A distância entre os trechos variou de 66,8km a 119,1km. A declividade do canal, que é dada através da relação entre a diferença de elevação e a distância entre duas estações fluviométricas, variou entre 0,60m/km e 0,04m/km; destaca-se o trecho entre as estações 743290000 Itapiranga e 74500000 Alto Uruguai como o mais declivoso, e o trecho entre 75900000 Itaqui e 77150000 Uruguaiana como o trecho mais plano.

Tabela 2 – Distância (em km), declividade (em m/km), quantidade de eventos e período analisado, tempo de deslocamento das ondas de cheia (em horas) mínimo, mediano e máximo, e celeridade (em m/s) mínima, mediana e máxima entre os pares de estações do Rio Uruguai

Estação (montante → jusante)	Distância (km)	Declividade (m/km)	Nº de Eventos (período)	Tempo (h)			Celeridade (m/s)		
				Mín	Med	Máx	Mín	Med	Máx
Iraí → Itapiranga	88,3	0,45	39 (2022-24)	2	6	9	2,73	4,09	12,3
Itapiranga → Alto Uruguai	66,8	0,60	9 (2022-24)	4	7	9	2,06	2,65	4,64
Alto Uruguai → Porto Mauá	119,1	0,17	11 (2020-24)	7	11	20	1,65	3,01	4,73
Porto Mauá → Porto Lucena	80,1	0,21	11 (2020-24)	8	9	19	1,17	2,47	2,78
Porto Lucena → Garruchos	101,9	0,24	5 (2022-24)	20	20	30	0,94	1,42	1,42
Garruchos → São Borja	105,8	0,11	22 (2019-24)	9	17	43	0,68	1,73	3,27
São Borja → Itaqui	83,9	0,07	24 (2017-24)	12	35	68	0,34	0,67	1,94
Itaqui → Uruguaiana	93,4	0,04	28 (2017-24)	14	26,5	41	0,63	0,98	1,85

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tempos de Deslocamento

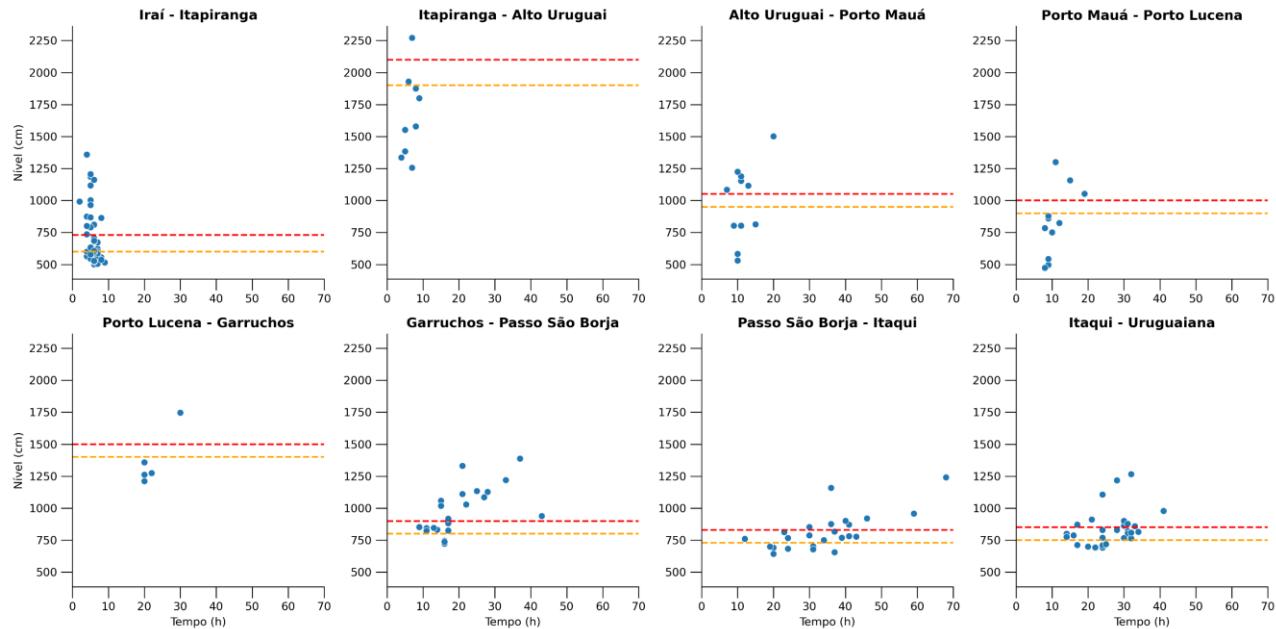
Conforme o período analisado de cada par de estações foram identificados entre 5 e 39 eventos de ondas de cheia acima da cota de atenção. Os resultados de tempo de deslocamento mínimo, mediano e máximo para cada conjunto de eventos de cada par de estações estão apresentados na Tabela 2. Os resultados completos estão apresentados na Figura 3, na qual o eixo y e as cotas de referência (laranja = alerta e vermelho = inundação) se referem às estações de jusante de cada par.

A mediana do tempo de deslocamento variou de 6h a 35h, aumentando de montante para jusante, com exceção do par Passo São Borja – Itaqui em que se observaram valores maiores do que no par seguinte, isto é, Itaqui-Uruguaiana. Este comportamento pode estar relacionado com a mudança de declividade, o formato das seções transversais e a dinâmica das planícies de inundação no Baixo Uruguai, além da contribuição dos afluentes ao rio Uruguai, e será investigado em estudos futuros.

Na análise do tempo de deslocamento mínimo se destaca o par Iraí-Itapiranga, com um deslocamento de 2h ocorrido durante a cheia de outubro de 2023; em relação aos máximos, destacou-se o tempo de 68h de deslocamento de onda entre São Borja e Itaqui, o qual foi observado em maio de 2024, período em que, além da cheia do rio Uruguai, também ocorreu cheia histórica no rio Ibicuí, que é um importante tributário do rio Uruguai cuja foz está 44km à jusante de Itaqui.

Por fim, observou-se que nos pares de estações mais à jusante, cujas declividades são menores, as maiores cheias em termos de magnitude de cota estão associadas a tempos de deslocamento mais longos.

Figura 3 – Tempo (h) de deslocamento da onda de cheia nos pares de estações fluviométricas do Rio Uruguai; linhas tracejadas em laranja e vermelho se referem, respectivamente, às cotas de referência de alerta e inundaçao da estação de jusante do par analisado



Fonte: Elaborado pelos autores.

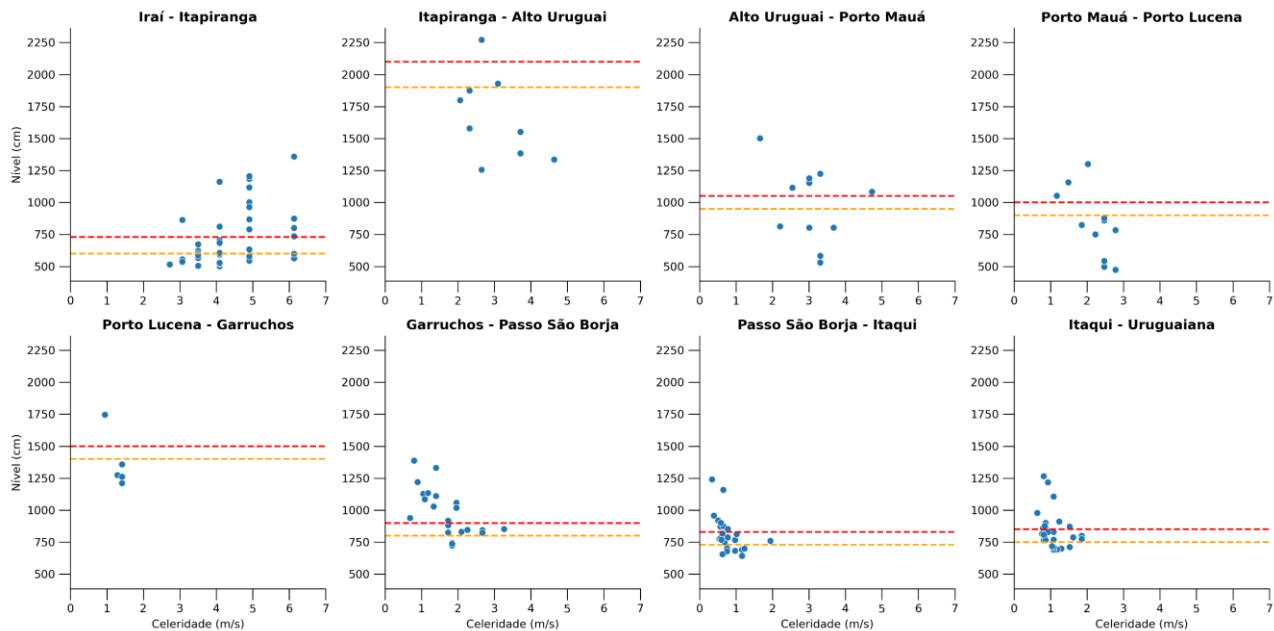
Celeridade

Os resultados de celeridade, isto é, da velocidade do deslocamento de onda de cheia mínimo, mediano e máximo para cada conjunto de eventos de cada par de estações estão apresentados na Tabela 2. Os resultados completos estão apresentados na Figura 4, na qual o eixo y e as cotas de referência (laranja = alerta e vermelho = inundaçao) se referem às estações de jusante de cada par.

Da mesma maneira como foi observado na análise do tempo de deslocamento, a celeridade diminui de montante para jusante no trecho do rio Uruguai em estudo. A mediana da celeridade variou entre 4,09 m/s a 0,67 m/s, sendo o trecho mais rápido entre Iraí e Itapiranga, e o mais lento entre Passo São Borja e Itaqui; embora entre Itaqui e Uruguaiana tenha sido observada a menor declividade, o trecho entre Passo São Borja e Itaqui é o mais lento em termos de deslocamento de onda de cheia mediano.

Já em termos máximos, o maior valor de celeridade máxima foi observado entre Iraí e Itapiranga, com 12,3 m/s; em termos mínimos, a menor celeridade foi observada entre Passo São Borja e Itaqui, com 0,34 m/s.

Figura 4 – Celeridade (m/s) do deslocamento da onda de cheia nos pares de estações fluviométricas do Rio Uruguai; linhas tracejadas em laranja e vermelho se referem, respectivamente, às cotas de referência de alerta e inundação da estação de jusante do par analisado



Fonte: Elaborado pelos autores.

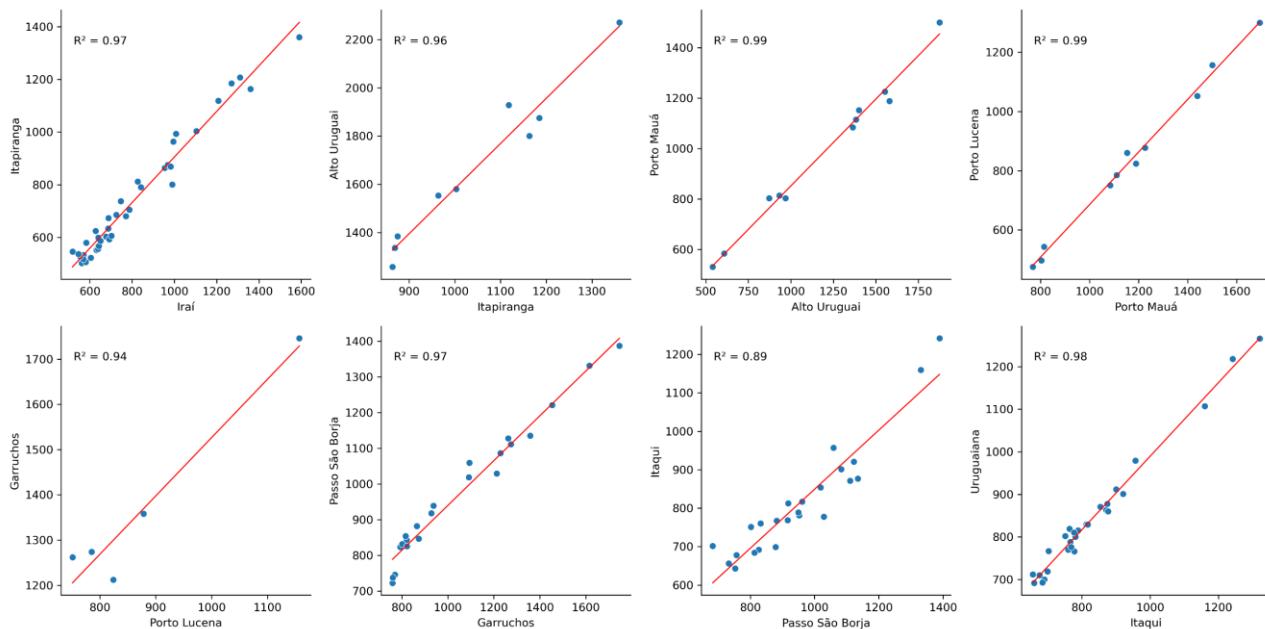
Relação entre cotas de cheia nos pares de estações

Os resultados do levantamento das cotas de cheia nos pares das estações estão plotados na Figura 5; em cada gráfico, o eixo x representa a estação de montante e o eixo y a estação de jusante de cada par. A partir dos conjuntos de picos, ou seja, das cotas máximas observadas em cada par de estação nos eventos de cheia levantados, ajustou-se uma reta para se avaliar a relação entre as cotas. Dessa forma, sendo conhecida a cota máxima atingida na estação de montante, pode-se utilizar a equação para estimar a cota máxima que será atingida na estação de jusante.

O coeficiente de determinação (R^2) dos ajustes das equações variou entre 0,89 e 0,99, sendo maior nos pares Alto Uruguai – Porto Mauá e Porto Mauá – Porto Lucena. O ajuste com menor R^2 , de 0,89, foi observado no par Passo São Borja – Itaqui.

Destaca-se, entretanto, que estes ajustes não devem ser utilizados diretamente para previsões numéricas, mas sim como apoio à estimativa da magnitude das cheias, pelos seguintes motivos: (1) o tamanho de conjuntos amostrados é pequeno, variando de 5 a 39 pares de cheias; (2) o período de dados disponível para o levantamento dos picos é curto, variando entre 2 e 7 anos, e (3) os processos de cheia envolvem diversos fatores os quais não foram avaliados separadamente neste estudo, tais como os processos relacionados às planícies de inundação, as operações de usinas hidroelétricas, as quais podem influenciar os tempos de deslocamento e a magnitude, além de eventos de cheias em tributários, como os rios Ibicuí, Ijuí, da Várzea, entre outros, que também podem contribuir para as elevações do rio Uruguai.

Figura 5 – Relação entre as cotas dos picos de cheia nos pares de estações do rio Uruguai, onde o eixo x corresponde à estação de montante e o eixo y à estação de jusante; cotas em cm



Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÕES

Observou-se que a mediana dos tempos de translação de onda de cheia nas estações da calha principal do rio Uruguai variou entre 6h e 35h. A mediana dos valores de celeridade, por sua vez, variou entre 0,67 e 4,09 m/s. Os tempos de translação foram menores nas estações mais a montante, e maiores nas estações mais à jusante.

Com relação aos níveis durante os eventos de cheia, observou-se que, entre Iraí e Itapiranga, as cheias de maior magnitude apresentaram os menores tempos de translação, enquanto que, no par de estações mais à jusante, Itaqui e Uruguaiana, verificou-se o comportamento diferente, ou seja, as cheias de maior magnitude apresentaram tempos de translação intermediários. Os menores tempos de deslocamento e maiores celeridades estão associados aos trechos com maior declividade, enquanto os maiores tempos e menores velocidades ocorreram em trechos com menor declividade e sob possível influência de outras características geomorfológicas, pedológicas e hidráulicas, como planícies de inundação, solos com baixa capacidade de drenagem e contribuições de rios afluentes, as quais ainda devem ser estudadas em maior detalhe.

Este resultado apresenta duas maneiras como os municípios são impactados pelos grandes eventos de inundações: a primeira, com eventos rápidos, nos quais são necessárias ações de prevenção e mitigação mais aceleradas; e a segunda, com eventos de maior persistência temporal, nos quais são necessárias ações de planejamento e convivência com as inundações por um maior período de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANCO MUNDIAL. (2020). *“Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2019”*. Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão

Universitária. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. [Organização Rafael Schadeck] – 2. ed. – Florianópolis, FAPEU, 156 p.

BENITO G, HUDSON PF. (2010). “*Flood hazards: the context of fluvial geomorphology*”. In: Alcántara-Ayala I, Goudie AS, eds. *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge University Press; 2010:111-128.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). “*Censo Brasileiro de 2022*”.

MARCUZZO, F. F. N. (2017). “*Bacia hidrográfica do rio Uruguai: altimetria e áreas*”. In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 22., Florianópolis. Anais[...] Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/18489>.

MATTIUZI, C.D.P; MATOS, A.J.S. (2023). “*Relatório de operação do Sistema de Alerta Hidrológico da bacia do Rio Uruguai 2023*”. Serviço Geológico do Brasil, Relatório Técnico, 45p. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24740>

MATTIUZI, C.D.P; MATOS, A.J.S.; BUFFON, F.T. (2023). “*Inundação da Bacia do Rio Uruguai em 1983: Estudo de Caso de Uruguaiana*”. In Desastres e água: eventos históricos no Brasil /organização Franciele Zanandrea et al. ABRHidro, Porto Alegre/RS, 1^aed. Cap 6, pp 103-116.

MEYER, A.; FLEISCHMAN, A.S.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.; JARDIM, P. (2018) “*Empirical assessment of flood wave celerity–discharge relationships at local and reach scales*”. Hydrological Sciences Journal, DOI: 10.1080/02626667.2018.1557336

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. (2006). “*Caderno da região hidrográfica do Uruguai*”. Brasília, DF: MMA, 2006.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (2021). “*Valuing Water*”. The United Nations World Water Development Report. UNESCO, Paris, 206p

SUIZU, T.M.; LATRUBESSE, E.M.; BAYER, M. (2023). “*The Role of Geomorphology on Flood Propagation in a Large Tropical River: The Peculiar Case of the Araguaia River, Brazil*”. Water, 5, 3725. <https://doi.org/10.3390/w15213725>