

Índice de Risco de Cheia aplicado ao mapeamento do risco de inundações urbanas em cidades turísticas de pequeno porte: o caso de Paraty/RJ

Ricardo Duarte David Filho

Mestrando, Poli-UFRJ, Brasil

rddf@poli.ufrj.br

ORCID iD <https://orcid.org/0009-0001-6940-1844>

Marcelo Gomes Miguez

Professor Doutor, Poli-UFRJ, Brasil

marcelomiguez@poli.ufrj.br

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4206-4013>

Índice de Risco de Cheia aplicado ao mapeamento do risco de inundações urbanas em cidades turísticas de pequeno porte: o caso de Paraty/RJ

RESUMO

Objetivo – Construir um índice a partir do qual seja possível mapear o risco de inundações e alagamentos em cidades turísticas de pequeno porte, com foco no componente de resiliência da vulnerabilidade.

Metodologia – São realizadas adequações no Índice de Risco de Cheia (IRC), proposto por Zonensein (2007), com alteração de indicadores e inserção de fatores de majoração, para que ele reflita os níveis de risco de inundações urbanas de acordo com as condições de enfrentamento e reposição das populações de cada local. O índice é calculado a partir da combinação de indicadores de perigo, obtidos através da modelagem realizada por Battemarco (2016), com indicadores de exposição e vulnerabilidade aderentes à proposta de priorização da resiliência na análise do risco.

Originalidade/relevância – Enquanto grande parte dos estudos sobre risco de inundações estão focados no componente de valor e em grandes cidades, populações socioeconomicamente mais vulneráveis de municípios interioranos vêm sofrendo com subsequentes impactos frente a desastres. Sem capacidade de absorção e recuperação, cada evento enfrentado significa perda de resiliência e, consequentemente, aumento da vulnerabilidade. É necessário, então, no que tange ao mapeamento do risco, que locais com alto potencial de perdas relativas, ou seja, áreas onde as populações possuem menores condições de repor suas perdas, sejam priorizados por agentes públicos no direcionamento de ações e recursos que visam adaptação e mitigação frente a inundações e alagamentos. Para isso, mostra-se fundamental a construção de um índice de risco focado no componente de resiliência da vulnerabilidade e em cidades de menor porte, onde geralmente não há adequada gestão de riscos devido a limitações financeiras e de mão de obra especializada.

Resultados – A comparação entre os indicadores de vulnerabilidade e o índice evidencia que as áreas de maior risco estão associadas à menor resiliência da população, o que valida a modificação do IRC. Dessa forma, foi possível construir um índice representativo do risco de inundações e alagamentos urbanos com ênfase na resiliência em cidades turísticas de pequeno porte.

Contribuições teóricas/metodológicas – Os resultados reforçam a importância de considerar a resiliência das populações na análise do risco. A obtenção de variadas manchas de risco a partir de diferentes combinações de pesos para indicadores e subíndices mostra a necessidade de estudos multiespectrais na atribuição desses pesos, para que sejam representativos. A flexibilização da estratificação dos indicadores a partir de dados locais permite uma maior aderência à realidade de cada área estudada. Assim, o estudo mostra a vantagem da utilização de índices locais sobre modelos genéricos.

Contribuições sociais e ambientais – A utilização do índice proposto no mapeamento de riscos de inundações possibilita incremento na eficiência e eficácia da gestão de riscos de desastres, pois pode auxiliar nas ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação através do direcionamento para áreas apontadas como de maior risco. Portanto, os resultados apresentados permitem adaptar populações e ambientes para receber eventos adversos, através da redução da exposição e da vulnerabilidade, bem como mitigar esses eventos, para que seus impactos sejam reduzidos tanto na esfera socioeconômica quanto na ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Índice. Risco. Inundações.

Flood Risk Index applied to mapping the risk of urban flooding in small tourist cities: the case of Paraty/RJ

ABSTRACT

Objective – To build an index that can be used to map the risk of flooding in small tourist cities, focusing on the resilience component of vulnerability.

Methodology – Adjustments are made to the Flood Risk Index (FRI), proposed by Zonensein (2007), with adjustments to indicators and the inclusion of increase factors, so that it reflects urban flood risk levels according to the coping and replacement conditions of the populations in each location. The index is calculated by combining hazard indicators obtained through modeling by Battemarco (2016) with exposure and vulnerability indicators that adhere to the proposal for prioritizing resilience in risk analysis.

Originality/Relevance – While most studies on flood risk focus on the value component and large cities, socioeconomically more vulnerable populations in smaller municipalities have been suffering from subsequent impacts from disasters. Lacking absorption and recovery capacity, each event represents a loss of resilience and consequently increased vulnerability. It is therefore essential, when it comes to risk mapping, that locations with a high potential for relative losses — that is, areas where populations are least able to compensate for their losses — be prioritized when it comes to allocating actions and resources aimed at adaptation and mitigation against floods. To this end, it is essential to develop a risk index focused on the resilience component of vulnerability and on smaller cities, where there is often no adequate risk management due to financial and labor constraints.

Results – The comparison between vulnerability indicators and the index shows that higher-risk areas are associated with lower population resilience, which validates the modification of the IRC. Thus, it was possible to construct a representative index of urban flood risk, with an emphasis on resilience in small tourist cities.

Theoretical/Methodological Contributions – The results reinforce the importance of considering population resilience in risk analysis. Obtaining varied risk areas from different combinations of weights for indicators highlights the need for multispectral studies to assign these weights, ensuring they are representative. The stratification of indicators based on local data allows a better representation of the characteristics of each studied area. Thus, the study demonstrates the advantage of using local index over generic models.

Social and Environmental Contributions – Using the proposed index to map flood risks enables to increase efficiency and effectiveness in disaster risk management, as it can assist in prevention, mitigation, preparation, response, and recovery efforts by targeting areas identified as at greatest risk. Therefore, the results presented allow to adapt populations and environments to withstand adverse events by reducing exposure and vulnerability, as well as mitigate these events, reducing their negative impacts in both the socioeconomic and environmental spheres.

KEYWORDS: Index. Risk. Floods.

Índice de Riesgo de Inundación aplicado al mapeo del riesgo de inundaciones urbanas en pequeñas ciudades turísticas: el caso de Paraty/RJ

RESUMEN

Objetivo – Construir un índice que pueda utilizarse para mapear el riesgo de inundaciones en pequeñas ciudades turísticas, centrándose en el componente de resiliencia de la vulnerabilidad.

Metodología – Se realizan ajustes al Índice de Riesgo de Inundación (IRC), propuesto por Zonensein (2007), con cambios en los indicadores e inclusión de factores de aumento, para que refleje los niveles de riesgo de inundación urbana según las condiciones de afrontamiento y reemplazo de las poblaciones en cada localidad. El índice se calcula combinando indicadores de amenaza, obtenidos mediante el modelo de Battemarco (2016), con indicadores de exposición y vulnerabilidad que se ajustan a la propuesta de priorizar la resiliencia en el análisis de riesgos.

Originalidad/Relevancia – Si bien la mayoría de los estudios sobre el riesgo de inundaciones se centran en el componente de valor y en las grandes ciudades, las poblaciones socioeconómicamente más vulnerables de los municipios rurales han sufrido los impactos posteriores de los desastres. Al carecer de capacidad de absorción y recuperación, cada evento representa una pérdida de resiliencia y, en consecuencia, una mayor vulnerabilidad. Por lo tanto, es esencial, en lo que respecta al mapeo de riesgos, que las ubicaciones con un alto potencial de pérdidas relativas, es decir, las áreas donde las poblaciones tienen menos capacidad de compensar sus pérdidas, sean priorizadas por los funcionarios públicos al asignar acciones y recursos destinados a la adaptación y mitigación de inundaciones. Para ello, es esencial desarrollar un índice de riesgo centrado en el componente de resiliencia de la vulnerabilidad y en las ciudades más pequeñas, donde generalmente no existe una gestión adecuada del riesgo debido a las limitaciones financieras y de mano de obra calificada.

Resultados – La comparación entre los indicadores de vulnerabilidad y el índice muestra que las zonas de mayor riesgo se asocian con una menor resiliencia poblacional, lo que valida la modificación del IRC. Por lo tanto, fue posible construir un índice representativo del riesgo de inundación urbana, con énfasis en la resiliencia en pequeñas ciudades turísticas.

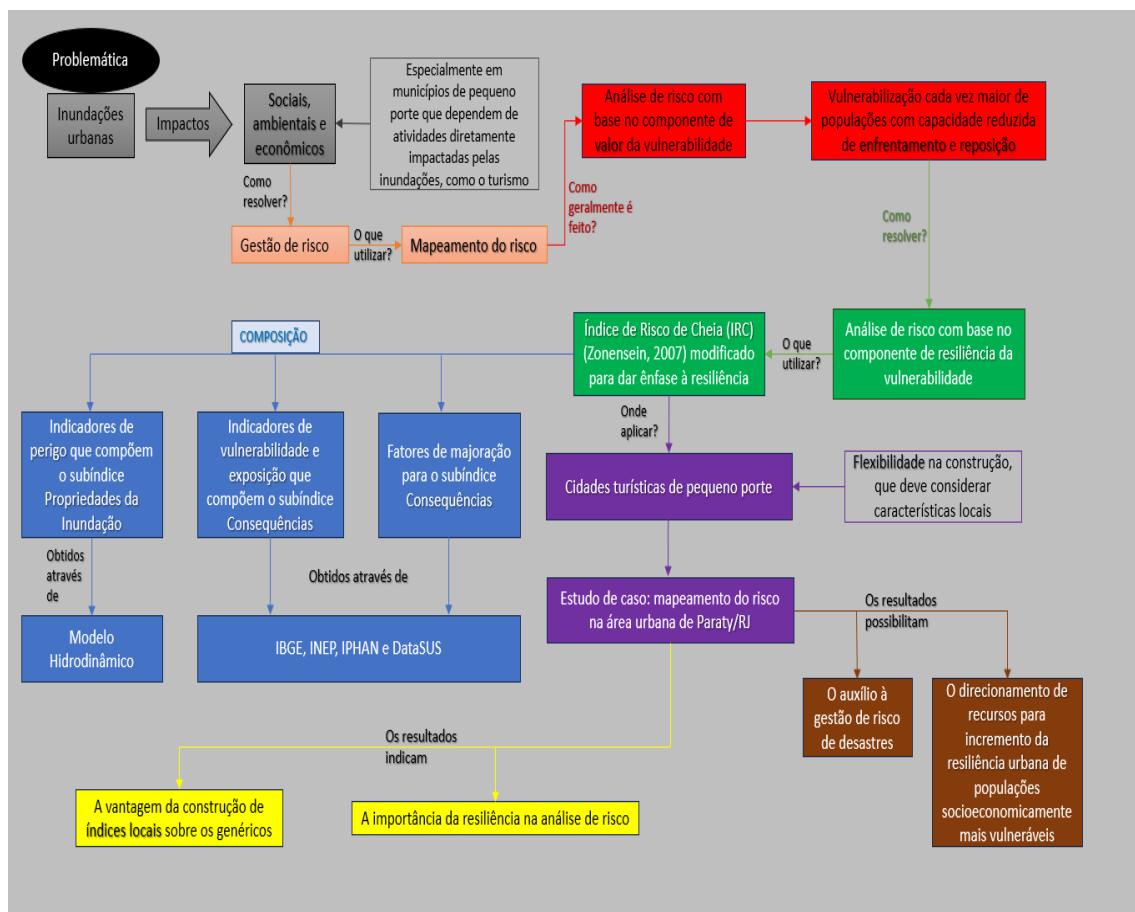
Contribuciones Teóricas/Metodológicas – Los resultados refuerzan la importancia de considerar la resiliencia poblacional en el análisis de riesgos. La obtención de diversas áreas de riesgo a partir de diferentes combinaciones de ponderaciones para indicadores y subíndices resalta la necesidad de estudios multiespectrales para asignar estas ponderaciones, garantizando su representatividad. La estratificación flexible de indicadores basada en datos locales

permite una mayor adecuación a la realidad de cada área estudiada. Por lo tanto, el estudio demuestra la ventaja de utilizar índices locales sobre modelos genéricos.

Contribuciones Sociales y Ambientales – El uso del índice propuesto para mapear el riesgo de inundaciones permite una mayor eficiencia y eficacia en la gestión del riesgo de desastres, ya que puede contribuir a las iniciativas de prevención, mitigación, preparación, respuesta y recuperación, centrándose en las zonas identificadas como de mayor riesgo. Por lo tanto, los resultados presentados permiten adaptar las poblaciones y los entornos para resistir eventos adversos, reduciendo la exposición y la vulnerabilidad, así como mitigando estos eventos y reduciendo sus impactos tanto socioeconómicos como ambientales.

PALABRAS CLAVE: Índice. Riesgo. Inundaciones.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

À escala global, as inundações constituem um problema cuja magnitude, frequência e perdas econômicas resultantes aumentaram cerca de cinco vezes nas últimas cinco décadas (Møller-Jensen et al., 2022). O crescimento de sistemas socioeconômicos expostos aos impactos das inundações se apresenta como uma questão desafiadora para o planejamento urbano (Rezende et al., 2019). Nesse contexto, as inundações passam a ser um fator de interrupção de serviços e de componentes da infraestrutura urbana (de Oliveira et al., 2022).

Bogardi (2004) aponta que a maioria das áreas urbanas estão localizadas em regiões costeiras ou às margens de algum rio, o que traduz uma grande exposição a eventos extremos, como as inundações. Populações habitantes de assentamentos informais estão particularmente expostas a eventos climáticos devido à baixa qualidade de moradia, capacidade limitada de adaptação e infraestruturas de redução de perigo limitadas ou não existentes (Twinomuhangi et al., 2021). Dessa forma, se faz necessário que as políticas governamentais e as legislações que regem o planejamento urbano estabeleçam limites e orientem a população e os órgãos gestores a fim de garantir a melhoria da qualidade do ambiente construído e a redução dos riscos de inundações (Marins, 2013).

O risco está relacionado à probabilidade de ocorrência de um evento perigoso, bem como à expectativa de perdas causadas por eles, que dependem da exposição do sistema e da vulnerabilidade dos elementos afetados (Koks et al., 2015). É possível, então, visando reduzir o risco de inundações, atuar sobre cada um de seus componentes, com intervenções no processo de transformação de chuva em vazão, redução da vulnerabilidade socioeconômica e adaptações frente aos eventos.

Miguez et al. (2018, p. 78-79) afirmam que a vulnerabilidade pode ser dividida em três componentes: o primeiro é a fragilidade do sistema receptor, ou seja, sua suscetibilidade ao dano; o segundo é relativo ao valor dos elementos expostos; e o terceiro é a capacidade de reação e recuperação do sistema frente ao dano, que está relacionada à resiliência, a qual atenua a vulnerabilidade.

A resiliência urbana, segundo Abhas et al. (2013), possui quatro componentes: social, institucional, econômico e infraestrutural. O social se refere ao perfil demográfico, como renda, idade e sexo, e também ao perfil do capital social, o qual é definido por Cutter et al. (2010) como o senso de comunidade e apego ao lugar e a capacidade de adaptação dos grupos. O componente institucional se refere aos sistemas, normalmente governamentais, que administram uma comunidade. O econômico tem relação com a diversidade econômica do grupo e sua capacidade de funcionar após um desastre. Já o componente infraestrutural está relacionado com a capacidade de oferta de serviços em caso de desastre, e com a redução da vulnerabilidade dos sistemas construídos.

Cidades de pequeno porte, especialmente as consideradas turísticas, que muitas vezes carecem de infraestrutura e pessoal devidamente especializado no que tange à gestão de riscos, podem sofrer consequências duradouras em setores essenciais para o desenvolvimento socioeconômico local. Cidades maiores geralmente possuem fontes de renda mais variadas, enquanto as menores tendem a concentrá-las em poucos ou apenas um setor. Portanto, há uma maior vulnerabilidade de cidades turísticas de pequeno porte frente a eventos socionaturais no que tange aos impactos na economia como um todo. Uma inundação que afeta patrimônios tombados, por exemplo, prejudica desde os guias de turismo até os proprietários e funcionários

de pousadas e comércios. Como não há outro setor capaz de absorver essa demanda por trabalho, a cidade como um todo tende a ser negativamente impactada, o que diminui sua resiliência e, conseqüentemente, aumenta sua vulnerabilidade.

Para reduzir os danos causados por inundações, a gestão de riscos, combinando medidas estruturais e não estruturais, deve ser considerada no contexto urbano (Bertilsson et al., 2019). Os vários aspectos da resiliência podem ser internalizados nas etapas do ciclo de gestão de riscos de desastres, contribuindo para a redução da vulnerabilidade do sistema nas fases de prevenção, mitigação, preparação, resposta e capacidade de recuperação, reduzindo assim os riscos em todo o ciclo (Lopes et al., 2025).

No que tange às medidas não estruturais, o mapeamento do risco se destaca devido ao seu papel fundamental no auxílio ao direcionamento de recursos a áreas potencialmente mais vulneráveis e expostas aos perigos. O mapeamento do risco pode ser realizado a partir da construção de um índice no qual, em uma análise multicritério, são agregados indicadores relacionados a diferentes fenômenos e setores.

O Índice de Risco de Cheia (IRC), proposto por Zonensein (2007), é um índice quantitativo multicritério que engloba tanto indicadores das propriedades da inundação como indicadores das conseqüências. O IRC tem amplitude de 0 a 100 e busca representar o risco de inundações e alagamentos em ambiente urbano. Entretanto, ele relaciona a vulnerabilidade diretamente com o potencial de perdas econômicas. Então, para um local com renda média alta e estruturas mais robustas são atribuídos valores maiores para os indicadores de conseqüências em relação a um local com renda menor e estruturas mais simples. Portanto, a autora não considera a resiliência da população e dos sistemas dentro da análise de vulnerabilidade. Todavia, para uma pesquisa que visa atribuir maior importância à vulnerabilidade social dentro do mapeamento do risco, é necessário considerar a capacidade da população de absorver impactos, recuperar de desastres ocorridos e adaptar para futuros eventos. Assim, a revisão do IRC para essa aplicação se faz necessária.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa a atualização e a adequação do IRC para sua aplicação no mapeamento do risco de inundações e alagamentos em cidades turísticas de pequeno porte, com ênfase no componente de resiliência da vulnerabilidade e na exposição de sistemas e estruturas fundamentais para a redução de desigualdades sociais, como saneamento, escolas e hospitais.

Como estudo de caso, o novo índice é aplicado à área urbana de Paraty através da combinação de resultados de um modelo de previsão de cheias com indicadores de vulnerabilidade e exposição. São obtidos, então, mapas relativos às propriedades da inundação, às conseqüências e ao risco, que representam tanto a parte física do fenômeno quanto sua interação com o ambiente construído e com as pessoas presentes nele.

O novo equacionamento do IRC deve auxiliar os tomadores de decisão na priorização dos investimentos nas áreas de maior risco, para que a resiliência urbana possa ser incrementada.

3 ESTUDO DE CASO

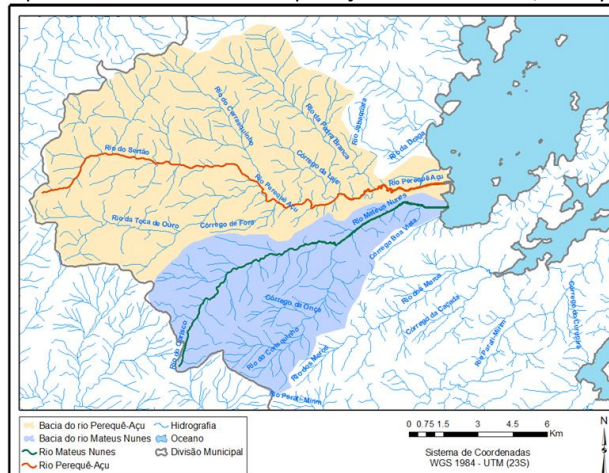
Paraty (Mapa 1) está localizada na mesorregião sul do estado do Rio de Janeiro, no Brasil. Sua área urbana ocupa pequena parcela do território municipal, onde há maior concentração populacional, de comércios e serviços, e também onde está localizado o Centro Histórico, atrativo da principal atividade econômica da cidade, o turismo.

Mapa 1 – Localização da região de estudo.



Com área de drenagem de 113 km² (Marins, 2013), a bacia do rio Perequê-Açú (Mapa 2) abrange a maior parte da área urbana do município de Paraty, inclusive o Centro Histórico. Já na bacia do rio Mateus Nunes, que possui cerca de 52 km² (Marins, 2013), estão localizados os bairros Parque da Mangueira e Ilha das Cobras, os mais populosos de Paraty.

Mapa 2 – Bacias dos rios Perequê-Açú e Mateus Nunes, Paraty-RJ



Fonte: Marins (2013).

4 METODOLOGIA

O IRC modificado é calculado conforme a Equação 1.

Equação 1 – Equação do IRC modificado.

$$IRC = [I_{Cot}^{PI} \cdot p_{Cot}^{PI} + I_{FV}^{PI} \cdot p_{FV}^{PI} + I_{FP}^{PI} \cdot p_{FP}^{PI}]^{q_{PI}} \times [F_{US} \cdot F_{UE} \cdot F_{PH} \cdot (I_{SI}^C \cdot p_{SI}^C + I_{DP}^C \cdot p_{DP}^C + I_T^C \cdot p_T^C + I_R^C \cdot p_R^C)]^{q_C}$$

Onde,

- I_i^{PI} : i-ésimo indicador, previamente normalizado, que compõe o subíndice Propriedades da Inundação (PI), variável entre 0 e 100;
- p_i^{PI} : peso associado ao i-ésimo indicador do subíndice PI, com valores entre 0 e 1, e soma dos pesos igual a 1;
- I_j^C : j-ésimo indicador, previamente normalizado, que compõe o subíndice Consequências (C), variável entre 0 e 100;
- p_j^C : peso associado ao j-ésimo indicador do subíndice C, com valores entre 0 e 1, e soma dos pesos igual a 1;
- F: fator de majoração.

Para a aplicação do IRC modificado ao estudo de caso foi utilizada a modelagem realizada por Battemarco (2016) através do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) (Mascarenhas et al., 2022; Miguez et al., 2017). Foram utilizados os tempos de retorno (TRs) de 25 e 50 anos.

Em um primeiro momento, o presente trabalho utiliza pesos iguais tanto para os indicadores que compõem cada subíndice quanto para a combinação dos subíndices no índice final. Depois, a fim de validar e testar a sensibilidade do IRC modificado, são realizadas combinações com atribuições de diferentes pesos para cada indicador e para cada subíndice.

Através do software QGIS, são utilizados arquivos vetoriais dos setores censitários e das células de escoamento, e neles são introduzidos atributos referentes aos indicadores de perigo e consequência. São geradas, então, arquivos raster da área de interesse para cada indicador, bem como para os subíndices. Por fim, considerando o peso atribuído a cada um, através da calculadora de raster, o IRC é calculado para cada pixel e o mapa de risco da área urbana de Paraty é obtido.

4.1 Indicadores do subíndice Propriedades da Inundação (PI)

4.1.1 Cota (I_{Cot}^{PI})

A cota (ou altura de cheia ou profundidade de alagamento) é o indicador que determina se a água de inundações e alagamentos encherá a rua, invadirá as calçadas e as casas. Assim, é a variável mais frequentemente utilizada para avaliação do perigo de inundações.

4.1.2 Fator de Velocidade (I_{FV}^{PI})

O Fator de Velocidade (FV) é um indicador que considera o poder de dano da força da água através do produto entre velocidade e cota. Águas turbulentas, se tiverem profundidade suficiente, podem provocar arraste de pessoas, carros e até construções.

4.1.3 Fator de Permanência (I_{FP}^{PI})

Uma permanência t_i se refere ao tempo durante o qual uma área permanece alagada com profundidade de pelo menos i centímetros. Zonensein (2007) considera t_{10} , t_{30} e t_{50} como

indicativos dos efeitos em transeuntes, tráfego e residências, respectivamente. A autora realizou a normalização dos tempos de permanência e a unificação, através de uma média ponderada, em apenas um indicador, chamado de Fator de Permanência (FP), o qual reflete a diferença de severidade das consequências entre pedestres, tráfego e residências.

Para o caso específico de Paraty, porém, o indicador Fator de Permanência não foi considerado, pois é esperado rápido esvaziamento – curtas permanências devido à rápida drenagem para o mar – em toda a área estudada, o que não causaria diferenças entre as células analisadas e reduziria a representatividade do resultado final.

4.2 Indicadores do subíndice Consequências (C)

4.2.1 Saneamento inadequado (I_{SI}^C)

A deficiência ou ausência dos serviços de saneamento básico estão diretamente relacionadas à incidência de diversas doenças veiculadas pela água, como hepatite e leptospirose. Portanto, em um evento de inundação ou alagamento, quando não há saneamento adequado, a probabilidade de a água estar contaminada é maior, logo a exposição das pessoas a essas doenças é potencializada.

Zonensein (2007) associa o indicador I_{SI}^C ao percentual de domicílios que não possuem saneamento adequado. Então, quanto maior esse percentual, maior é o valor atribuído ao indicador.

Para o caso específico de Paraty, não é considerado saneamento inadequado como um indicador de consequência, pois as condições de saneamento da área estudada são homogêneas (ver Profill, 2019), o que não causaria diferenças entre setores analisados.

4.2.2 Densidade populacional (I_{DP}^C)

Zonensein (2007) considera que, em comparação com a densidade populacional, a densidade de domicílios apresenta a vantagem de não ser variável segundo a hora do dia. Caso uma inundação atinja certa região em horário escolar e comercial, quando as residências costumam estar vazias, o potencial de danos provavelmente seria superestimado se fosse usada a densidade populacional. Entretanto, no âmbito da resiliência como fator determinante para a vulnerabilidade, a densidade populacional é mais representativa no que tange ao número de pessoas afetadas. Na área de maior densidade populacional a exposição será maior, pois haverá mais pessoas prejudicadas com os impactos negativos, mesmo que não estejam no local na hora do evento. Portanto, diferentemente do que foi feito por Zonensein (2007), o presente trabalho utiliza dados de densidade populacional, não de densidade de domicílios.

É realizada, então, a partir da distribuição de densidades populacionais dos setores censitários do Censo Brasileiro de 2022 (IBGE, 2022), uma normalização na qual $I_{DP}^C = 0$ se densidade populacional nula, $I_{DP}^C = 25$ se densidade dentro do primeiro quartil de distribuição, $I_{DP}^C = 50$ se dentro do segundo quartil, $I_{DP}^C = 75$ se dentro do terceiro quartil e $I_{DP}^C = 100$ se no quarto quartil.

4.2.3 Tráfego (I_T^C)

O tráfego é um dos aspectos mais impactados pelas enchentes. Mesmo lâminas de água relativamente pequenas podem dificultar ou até interromper o trânsito, além de aumentar o risco de aquaplanagem, o que pode resultar em acidentes. A utilização de rotas alternativas nessas situações pode não ser suficiente para resolver o problema, já que ruas secundárias nem sempre são projetadas para suportar o aumento do fluxo de veículos, o que pode gerar ainda mais transtornos. Esses problemas também estão relacionados à perda de tempo, que pode acarretar prejuízos econômicos indiretos, além de causar estresse e danos aos veículos e seus ocupantes. Em casos de inundações mais severas, os danos podem ser ainda mais graves, especialmente se o fator de velocidade for grande o suficiente para arrastar veículos. As consequências para o tráfego dependem tanto do número de veículos quanto da importância das vias afetadas. Portanto, é importante associar os indicadores de tráfego a uma hierarquização das vias que considere o fluxo de veículos, refletindo sua relevância para a conexão entre diferentes regiões. (Zonensein, 2007).

A categorização de vias para Paraty (Quadro 1) considerou que algumas vias do Centro Histórico não permitem o tráfego de veículos, incluindo, diferentemente de Zonensein (2007), o tráfego de pedestres na construção do indicador.

Quadro 1 – Categorização de vias para Paraty.

Categoria	Via
I	Rodovia Estadual ou Federal
II	Vias principais
III	Vias alimentadoras de via da categoria I, exceto as incluídas na categoria II
IV	Vias locais não enquadradas em outra categoria
V	Vias que não permitem tráfego de veículos

Via principal é aquela que conecta mais de dois bairros, ou aquela que é a única via que conecta um bairro a outro ou a uma rodovia.

Foi realizada uma normalização discreta para o indicador I_T^C (Quadro 2).

Quadro 2 – Discretização do indicador de tráfego (I_T^C).

I_T^C	Descrição da área
100	Possui pelo menos 1 via de categoria I
80	Possui pelo menos 1 via de categoria II e não possui de categoria I
60	Possui pelo menos 1 via de categoria III e não possui de categoria I ou II
40	Possui pelo menos 1 via de categoria IV e não possui de categoria I, II ou III
20	Possui apenas vias de categoria V
0	Não possui vias

No estudo de caso, para cada célula de escoamento construída por Battemarco (2016) é atribuído um valor referente ao indicador I_T^C .

4.2.4 Renda (I_R^C)

Ao contrário do que foi feito em Zonensein (2007), no presente trabalho o indicador renda pretende atribuir maior vulnerabilidade às pessoas de menor poder aquisitivo, considerando a menor capacidade de reposição e adaptação (menor resiliência). Assim, uma renda per capita menor incorre em um valor maior para o indicador.

Ao indicador I_R^C são atribuídos valores entre 0 e 100 a depender da faixa de renda que o setor censitário se encontra. A estratificação deve ser realizada de acordo com a renda média per capita da população dos setores censitários da área em estudo, diferentemente do proposto por Zonensein (2007), que utiliza normalização de faixas de renda a nível nacional.

Portanto, assim como para a densidade populacional, na delimitação das faixas relativas a cada valor do indicador são utilizados os próprios dados de renda da população em estudo, sendo garantida aderência à realidade local através de um indicador representativo. Essa especificidade garante que dentro da área de estudo haja diferenciação entre as zonas. Por exemplo, em uma cidade onde a renda média de todos os setores censitários é baixa se comparada a nível nacional, o indicador I_R^C seria irrelevante para a construção do índice, visto que o valor seria praticamente o mesmo em todas as zonas.

Para o estudo de caso do presente trabalho foi adotado $I_R^C = 0$ em áreas com densidade populacional nula, e o restante foi dividido em cinco faixas de distribuição (Quadro 3) de acordo com as informações mais recentes de salário mínimo per capita disponibilizadas por setor censitário, referentes ao Censo Brasileiro de 2010 (IBGE, 2010).

Quadro 3 – Valor do indicador I_R^C por intervalo de renda per capita.

I_R^C	Renda per capita (salários mínimos)
100	< 1,17
80	< 1,21 e $\geq 1,17$
60	< 1,55 e $\geq 1,21$
40	< 2,38 e $\geq 1,55$
20	> 2,38

4.2.5 Unidades de saúde (F_{US})

A consideração da exposição de unidades de saúde é de suma importância para o índice, visto as possíveis consequências de danos e paralisações dos serviços prestados. Caso uma unidade esteja totalmente ou parcialmente inoperante, poderá haver superlotação em outra ou, na ausência de outra opção, o paciente deverá ser encaminhado para unidades fora do município (como é de costume para casos mais graves em municípios menores), o que demanda tempo e recursos.

É considerado um fator de majoração no valor de 1,1, que multiplica o subíndice Consequências para as células que possuem pelo menos uma unidade de saúde. Caso C ultrapasse 100, é considerado como igual a 100.

Os locais das unidades de saúde foram obtidos através do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (CNES DataSUS).

4.2.6 Unidades educacionais (F_{UE})

A falta de acesso à educação é um dos fatores geradores de vulnerabilidades socioeconômicas. A paralisação de aulas e demais atividades oferecidas por unidades de ensino dos mais variados níveis prejudica o aprendizado dos alunos, o que contribui para o aumento da vulnerabilidade. Danos permanentes causados por inundações e alagamentos podem inutilizar espaços e estruturas dessas unidades, em parte ou por completo.

A exposição de unidades educacionais é considerada no equacionamento do IRC através de um fator de majoração no valor de 1,1, que multiplica o subíndice Consequências caso haja pelo menos uma unidade educacional dentro da célula analisada. Caso C ultrapasse 100, é considerado como igual a 100.

Os locais das unidades educacionais foram obtidos através do Censo Escolar de 2024 (INEP, 2024).

4.2.7 Patrimônio histórico (F_{PH})

Especificamente para cidades que possuem elementos tombados e os utilizam como atrativos turísticos, a conservação do patrimônio histórico está diretamente relacionada à manutenção da fonte de renda de parte da população.

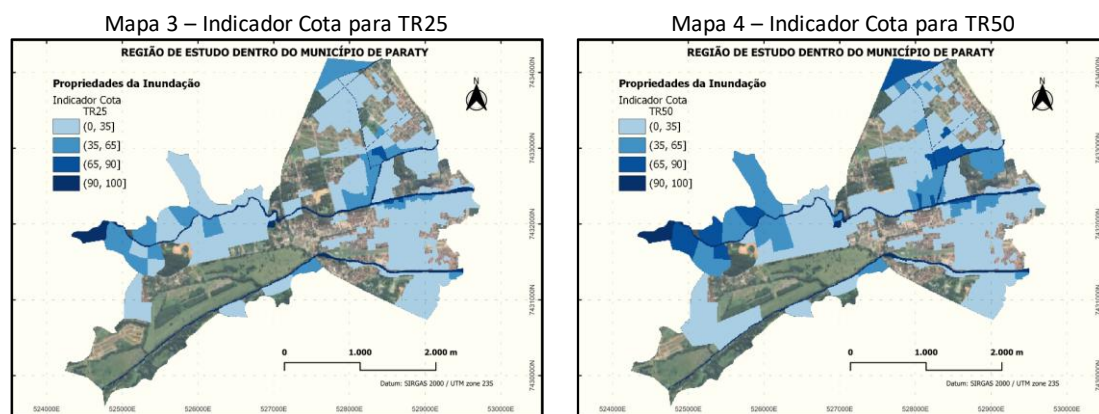
Em Paraty, grande parte dessa renda se deve às pousadas, restaurantes e comércios locais, que dependem do turismo. Portanto, a exposição de monumentos e espaços tombados é considerada como fator de majoração no valor de 1,1, que multiplica o subíndice Consequências caso haja pelo menos um monumento ou espaço tombado dentro da célula analisada. Caso C ultrapasse 100, é considerado como igual a 100.

Os locais dos elementos tombados foram obtidos através do Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SICG IPHAN).

5 RESULTADOS

5.1 Cota (I_{COT}^{PI})

São apresentados os mapas referentes aos resultados do indicador Cota aplicado na região de estudo para os tempos de retorno de 25 e 50 anos (Mapas 3 e 4). Percebe-se que, como esperado, com um maior tempo de retorno o indicador Cota se enquadra em faixas de valores mais altos em diversos locais.

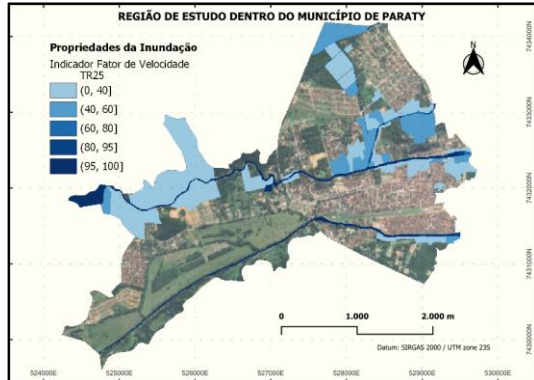


5.2 Fator de Velocidade (I_{FV}^{PI})

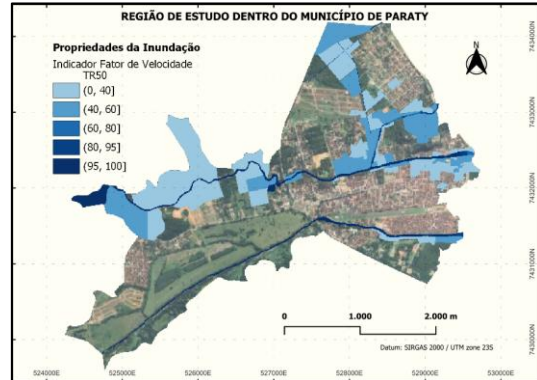
São apresentados os mapas referentes aos resultados do indicador Fator de Velocidade aplicado na região de estudo para os tempos de retorno de 25 e 50 anos (Mapas 5 e 6). Assim como para o indicador Cota, o Fator de Velocidade é mais alto em alguns locais para

um tempo de retorno maior. Entretanto, nota-se que para o indicador Cota a influência do tempo de retorno é maior se comparado ao Fator de Velocidade. Isso pode ser explicado pelas características topográficas da região em questão, onde há predominância de planície, o que leva a velocidades moderadas.

Mapa 5 – Indicador Fator de Velocidade para TR25



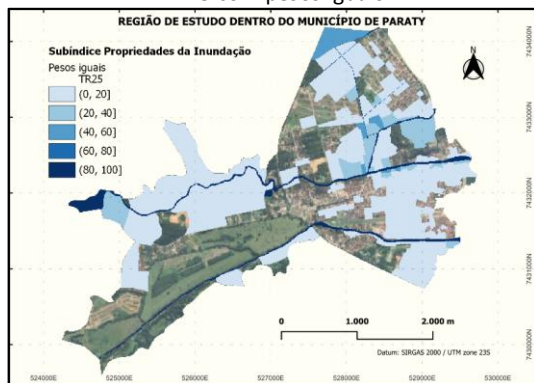
Mapa 6 – Indicador Fator de Velocidade para TR50



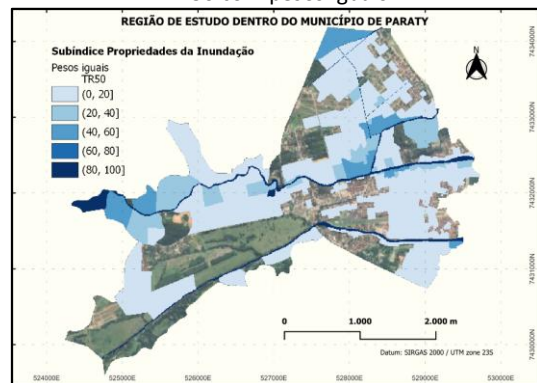
5.3 Subíndice Propriedades da Inundação (PI)

São apresentados os mapas referentes aos resultados do subíndice Propriedades da Inundação aplicado na região de estudo para os tempos de retorno de 25 e 50 anos (Mapas 7 e 8). Como esperado, um maior tempo de recorrência resulta em valores maiores para o subíndice.

Mapa 7 – Subíndice Propriedades da Inundação para TR25 com pesos iguais

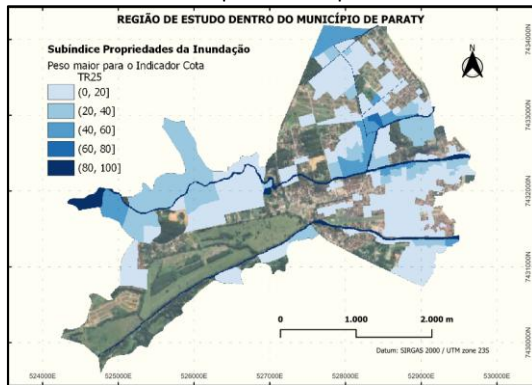


Mapa 8 – Subíndice Propriedades da Inundação para TR50 com pesos iguais

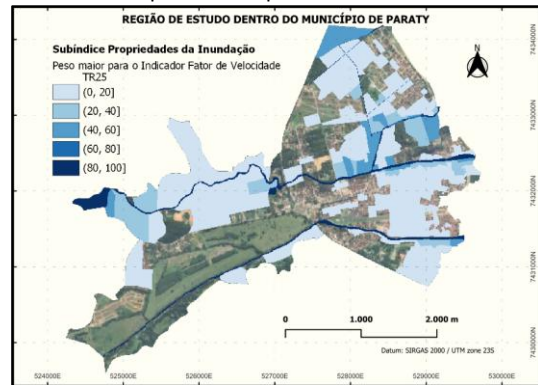


Para analisar a influência dos diferentes indicadores de perigo sobre o subíndice foram realizadas diferentes combinações considerando peso 0,75 para um indicador e 0,25 para o outro (Mapas 9 e 10). É possível identificar que as manchas dos subíndices que possuem maior peso para Cota e Fator de Velocidade se assemelham respectivamente às manchas desses indicadores, o que mostra a influência dos dois. A mancha de maior peso para Cota, entretanto, indica maiores valores se comparada à mancha de maior peso para o Fator de Velocidade.

Mapa 9 – Subíndice Propriedades da Inundação para TR25 com peso maior para Cota



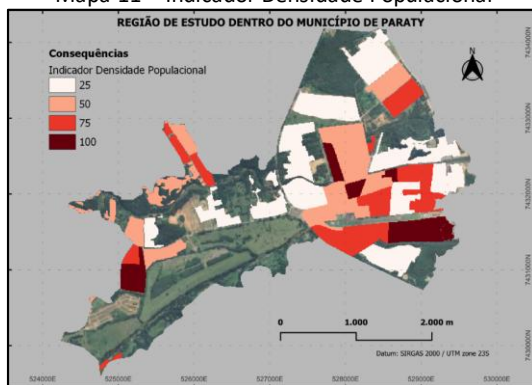
Mapa 10 – Subíndice Propriedades da Inundação para TR25 com peso maior para Fator de Velocidade



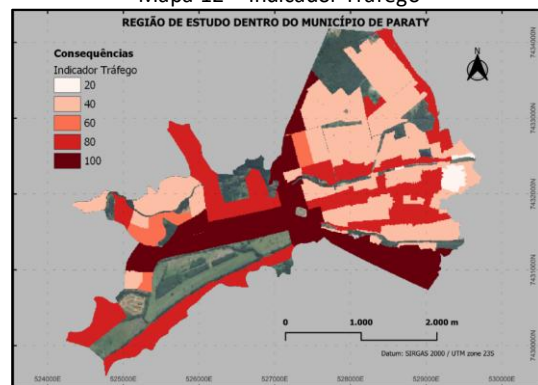
5.4 Densidade Populacional (I_{DP}^C), Tráfego (I_T^C) e Renda (I_R^C)

São apresentados os mapas referentes aos resultados dos indicadores Densidade Populacional (Mapa 11), Tráfego (Mapa 12) e Renda (Mapa 13) aplicados na região de estudo. Nota-se uma semelhança na distribuição dos valores Renda e Densidade Populacional, principalmente no que tange às áreas com valores máximos desses indicadores.

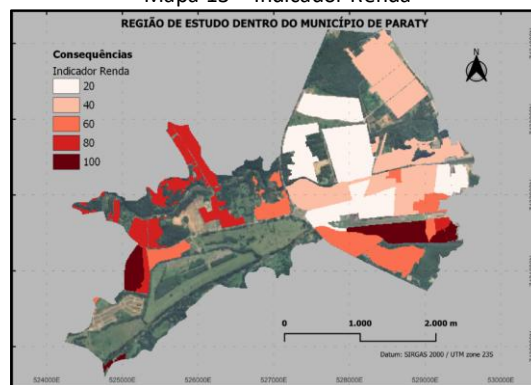
Mapa 11 – Indicador Densidade Populacional



Mapa 12 – Indicador Tráfego



Mapa 13 – Indicador Renda

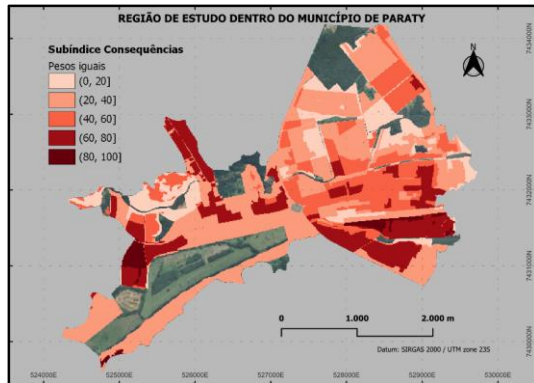


5.5 Subíndice Consequências (C)

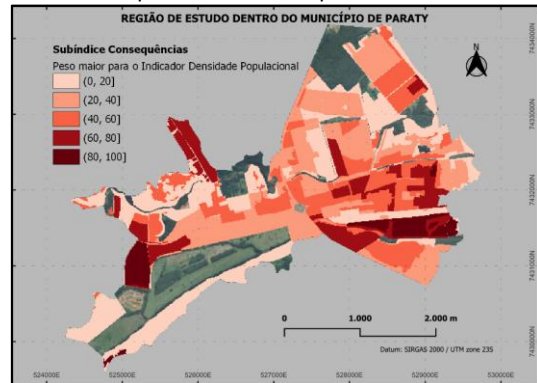
É apresentado o mapa referente aos resultados do subíndice Consequências aplicado na região de estudo (Mapa 14). Para analisar a influência dos diferentes indicadores de exposição e vulnerabilidade sobre o subíndice foram realizadas diferentes combinações

considerando peso 0,50 para um indicador e 0,25 para os outros dois (Mapas 15, 16 e 17). É possível identificar que as manchas mais escuras dos subíndices que possuem maior peso para determinado indicador se assemelham às manchas desses indicadores.

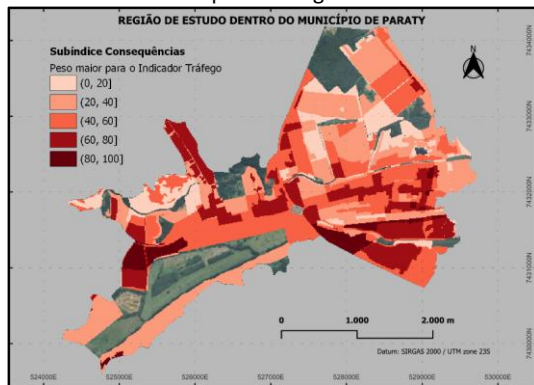
Mapa 14 – Subíndice Consequências com pesos iguais



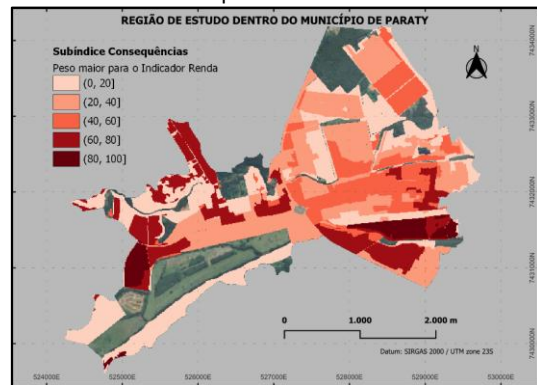
Mapa 15 – Subíndice Consequências com peso maior para Densidade Populacional



Mapa 16 – Subíndice Consequências com peso maior para Tráfego



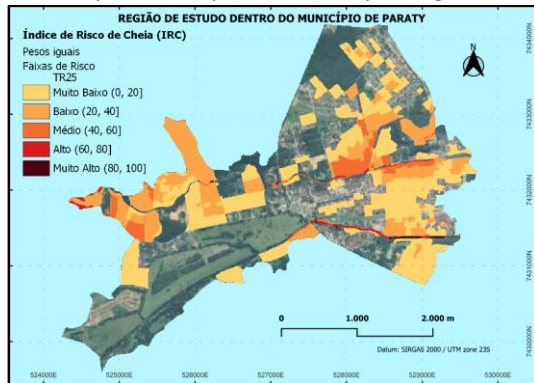
Mapa 17 – Subíndice Consequências com peso maior para Renda



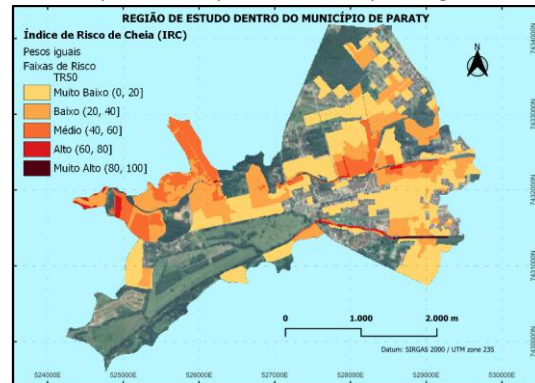
5.6 Índice de Risco de Cheia (IRC)

São apresentados os mapas referentes aos resultados do IRC aplicado na região de estudo para os tempos de retorno de 25 e 50 anos (Mapas 18 e 19). Foram obtidos valores mais altos nas margens ocupadas dos rios, com destaque para a parte mais a montante do rio Perequê-Açú, localizada no sopé da Serra do Mar, e para a parte mais a jusante do rio Mateus Nunes, onde estão localizados dois dos bairros entre os de menor renda e maior densidade demográfica da região em questão, Ilha das Cobras e Parque da Mangueira.

Mapa 18 – IRC para TR25 com pesos iguais

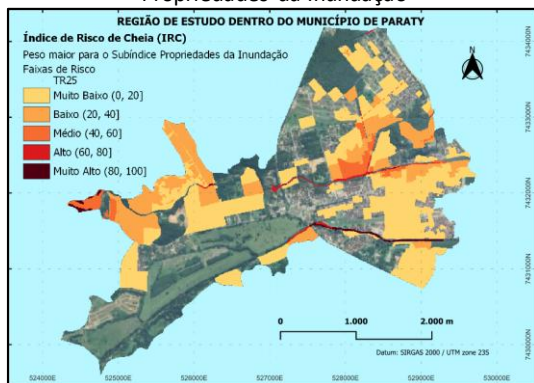


Mapa 19 – IRC para TR50 com pesos iguais

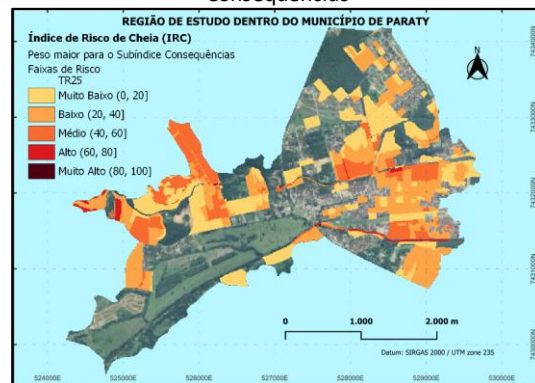


Para analisar a influência de cada subíndice sobre o IRC foram realizadas diferentes combinações considerando peso 0,75 para um subíndice e 0,25 para o outro (Mapas 20 e 21). É possível identificar que as manchas mais escuras dos índices que possuem maior peso para determinado subíndice se assemelham às manchas desses subíndices, principalmente para Propriedades da Inundação. Para o IRC com peso maior para o subíndice Consequências é possível perceber um maior número de pixels com valores mais altos se comparado às demais construções.

Mapa 20 – IRC para TR25 com peso maior para Propriedades da Inundação



Mapa 21 – IRC para TR25 com peso maior para Consequências



O maior valor obtido do IRC para um pixel foi de 89 considerando pesos iguais para os subíndices, 94 considerando maior peso para Propriedades da Inundação e 83 com maior peso para Consequências, o que mostra uma maior influência do subíndice relacionado ao perigo. Entretanto, para uma análise mais adequada quanto às características reais de cada local é necessário considerar um conjunto de pixels que formam uma área representativa. Nesse sentido, a área com o conjunto dos maiores valores obtidos para o IRC está localizada na margem esquerda do rio Mateus Nunes, nos bairros Ilha das Cobras e Parque da Mangueira (Mapa 22 e Fotografia 1), onde as projeções horizontais das casas muitas vezes invadem o leito menor do rio.

Mapa 22 – Área com o maior IRC dentro da região do estudo de caso



Fotografia 1 - Construções à margem do rio Mateus Nunes (tirada a 21/08/2022)



As diferentes manchas referentes aos valores ponderados de indicadores e subíndices ratificam a importância de estudos multidisciplinares que visam a correta distribuição dos pesos, para que haja aderência à realidade do local analisado através da representatividade de cada critério considerado.

A utilização de raster possibilitou, além da combinação de diferentes shapes com polígonos não coincidentes, uma maior precisão na relação dos locais com seus valores de risco. Por exemplo, uma célula vetorial utilizada na modelagem do perigo só poderá ter o mesmo valor de risco em toda a sua extensão, mesmo que possua locais com diferentes características, enquanto uma atribuição por pixel expõe essas diferenças, pois secciona essa célula em diversos retângulos de áreas menores. Essa precisão é fundamental, principalmente, para direcionar as ações de resposta.

No geral, nota-se, através da comparação dos indicadores de vulnerabilidade com o índice, que as áreas de maior risco estão relacionadas à menor capacidade de resposta da população. Portanto, os mapas apresentados validaram as expectativas quanto à eficácia da modificação do IRC para dar ênfase no componente de resiliência.

Assim, foi possível construir um índice para a representação do risco de inundações urbanas em cidades turísticas de pequeno porte, o que permite a incrementação da resiliência urbana através da priorização de ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação em áreas apontadas como de maior risco.

6 CONCLUSÃO

O mapeamento de risco é uma medida não estrutural utilizada no enfrentamento das inundações urbanas e possui papel primordial no que tange às tomadas de decisões por agentes públicos. Ele integra um conjunto de ações necessárias para a implantação da gestão de risco de desastres, que deve ser encarada como uma estratégia de governabilidade para que as políticas públicas referentes à defesa socioambiental sejam implantadas de forma eficaz e legítima.

A análise sistêmica é mais consistente do que a setorial no que tange ao mapeamento de risco, pois é possível ter uma visão integrada de aspectos físicos e socioeconômicos, sendo justamente essa interação a base para a construção do IRC. Portanto, a transdisciplinaridade é essencial, uma vez que nenhuma disciplina isolada fornece perspectiva suficiente para o adequado cálculo do risco.

Modificar o IRC para que tenha a influência da resiliência como fator determinante significa priorizar áreas onde as populações são historicamente mais vulneráveis. Portanto, apontar locais de maior risco não gera apenas um olhar mais atento do poder público às potenciais perdas totais, mas às perdas relativas à capacidade de reposição. Priorizá-los é fundamental para que eventos subsequentes não aprofundem desigualdades e levem à má adaptação e a novas formas de vulnerabilidade.

Apesar de ter sido construído para cidades turísticas de pequeno porte, o índice aqui proposto pode ser aplicado nas mais diversas cidades de tamanhos e características variadas. Para isso, peculiaridades de cada local devem ser levadas em consideração em sua construção, através da inclusão ou exclusão de indicadores e fatores de ponderação mais ou menos representativos, bem como da atribuição dos pesos dos indicadores e dos valores dos fatores.

7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABHAS, K. J.; MINER, T. W.; STANTON-GE, Z. *Building Urban Resilience – Principles, Tools and Practice*. Washington, D.C: International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 2013.

BATTEMARCO, B. P. Índice de resiliência a inundações aplicado para a avaliação de cenários de urbanização na cidade de Paraty, RJ. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BERTILSSON, L.; WIKLUND, K.; TEBALDI, I. de M. et al. Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, v. 573, p. 970-982, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.052.

BOGARDI, J. J. Hazard, risks and vulnerabilities in a changing environment: the unexpected onslaught on human security? *Global Environmental Hazards*, v. 14, n. 4, p. 361-365, dez. 2004.

CNES DataSUS. Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde. Disponível em: <https://cnes.datasus.gov.br/>. Acesso em: 16 mai. 2025.

CUTTER, S. L.; BURTON, C. G.; EMRICH, C. T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, v. 7, n. 1, 2010. Artigo 51.

DE OLIVEIRA, A. K. B.; BATTEMARCO, B. P.; BARBARO, G. et al. Evaluating the Role of Urban Drainage Flaws in Triggering Cascading Effects on Critical Infrastructure, Affecting Urban Resilience. *Infrastructures*, v. 7, n. 11, p. 153, 2022. DOI: 10.3390/infrastructures7110153.

IBGE. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

IBGE. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022.

INEP. Censo Escolar de 2024. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, 2024.

SICG IPHAN. Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Disponível em: <https://sicg.iphan.gov.br/sicg/pesquisarBem>. Acesso em: 14 mai. 2025.

KOKS, E. E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T. G.; BOTZEN, W. J. W. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 42-52, 2015.

LOPES, A. C. R.; REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. Urban resilience to floods in the context of the disaster risk management cycle: a literature review. *Journal of Hydrology*, v. 662, p. 133827, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133827.

MARINS, M. F. Proposta de requalificação fluvial para controle de cheias urbanas: estudo de caso: Centro Histórico de Paraty, rios Perequê-Açú e Mateus Nunes, RJ. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. Urban Flood Control through a Mathematical Flow Cell Model. **Water International Resources**, v. 27, n. 2, p. 208-218, jun. 2002.

MIGUEZ, M. G.; DI GREGÓRIO, L. T.; VERÓL, A. P. *Gestão de riscos e desastres hidrológicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; DE SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. Urban Flood Simulation Using MODCEL—An Alternative Quasi-2D Conceptual Model. **Water**, v. 9, n. 6, p. 445, 2017.

MØLLER-JENSEN, L.; AGERGAARD, J.; ANDREASEN, M. H. et al. Probing political paradox: Urban expansion, floods risk vulnerability and social justice in urban Africa. *Journal of Urban Affairs*, v. 45, n. 3, p. 505-521, 2022. DOI: 10.1080/07352166.2022.2108436.

PROFILL ENGENHARIA E AMBIENTE SA. Plano de Recursos Hídricos da Baía da Ilha Grande. 2019. Disponível em: <https://www.cbhbig.org.br/plano-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 12 dez. 2024.

REZENDE, O. M.; MIRANDA, F. M.; HADDAD, A. N. et al. A Framework to Evaluate Urban Flood Resilience of Design Alternatives for Flood Defence Considering Future Adverse Scenarios. *Water*, v. 11, n. 7, p. 1485, 2019. DOI: 10.3390/w11071485.

TWINOMUHANGI, R. et al. Perceptions and vulnerability to climate change among the urban poor in Kampala City, Uganda. **Regional Environmental Change**, v. 21, n. 2, 2021. DOI: 10.1007/s10113-021-01771-5.

ZONENSEIN, J. Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Ricardo Duarte David Filho e Marcelo Gomes Miguez.
 - **Curadoria de Dados:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Análise Formal:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Aquisição de Financiamento:** não se aplica.
 - **Investigação:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Metodologia:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Redação - Revisão Crítica:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Revisão e Edição Final:** Ricardo Duarte David Filho.
 - **Supervisão:** Marcelo Gomes Miguez.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Ricardo Duarte David Filho** e **Marcelo Gomes Miguez**, declaramos que o manuscrito intitulado "**Índice de Risco de Cheia aplicado ao mapeamento do risco de inundações urbanas em cidades turísticas de pequeno porte: o caso de Paraty/RJ**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-