PLATAFORMA DE AGENTES INTELIGENTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE VULNERABILIDADE POPULACIONAL CRÍTICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Renata Bulling Magro [1] ; Caline Cecília Oliveira Leite [2]; Ricardo Augusto de Farias Freire Filho [3]; Ennio Politi Lopes[4] & Alexandre Cláudio Botazzo Delbem[5]

Palavras-Chave – agentes inteligentes, monitoramento hidrológico, vulnerabilidade a inundações.

INTRODUÇÃO

Os desastres hidrológicos, especialmente inundações, representam um desafio crescente à segurança da população brasileira (Alvalá et al., 2024). A frequência e a intensidade desses eventos têm aumentado nas últimas décadas, em decorrência da expansão urbana sobre áreas suscetíveis (Bastos Moroz & Thieken, 2024). A lacuna entre a extensão territorial do país e a cobertura operacional de monitoramento resulta na existência de áreas urbanas localizadas em zonas de inundação sem instrumentação adequada para acompanhamento hidrológico (Gomes Jr. et al., 2023).

Nesse contexto, sistemas de Inteligência Artificial (IA) baseados em agentes autônomos apresentam-se como uma alternativa promissora para apoiar a gestão de riscos e desastres. Agentes inteligentes, ou agentes autônomos, são capazes de perceber o ambiente, processar informações e executar tarefas, podendo ser organizados em arquitetura multiagente para a resolução de problemas complexos por meio da divisão de responsabilidades especializadas (Chowa et al., 2026).

Este trabalho apresenta o hydroData, uma plataforma baseada em agentes de IA para calcular o Índice de Vulnerabilidade Populacional Crítica (IVPC) em escala de bacia hidrográfica. O IVPC quantifica a vulnerabilidade relativa de populações expostas a inundações localizadas em áreas com monitoramento hidrológico insuficiente, condição que limita a detecção e a resposta a eventos extremos e caracteriza situações de risco crítico. A plataforma integra dados geoespaciais e demográficos provenientes de múltiplas fontes, executa o processamento espacial automatizado no Google Earth Engine e gera relatórios para apoiar a priorização de investimentos em monitoramento hidrológico e ampliar a resiliência a eventos extremos.

METODOLOGIA

Arquitetura Multiagente

O sistema é composto por cinco agentes com papéis complementares no ciclo de desenvolvimento e governança da plataforma. O *IVPC Planner* é responsável pela leitura de especificações, identificação de regras observacionais e proposição de estratégias metodológicas mínimas, sendo vedada a implementação de código por esse agente. O *IVPC Implementer* executa modificações mínimas e auditáveis no código, preservando obrigatoriamente a separação

[1]) Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, renatamagro@usp.br
[2]) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, calineleit@usp.br
[3]) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, ricardofreirefilho@usp.br
[4]) Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, enniolopes@usp.br
[5]) Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, acbd@icmc.usp.br

metodológica entre os componentes. O *Geospatial Reviewer* valida a consistência das operações Earth Engine (projeções, escalas e máscaras). O *Semantic Reviewer* impede desvios semânticos e linguagem metodologicamente incorreta, garantindo que o IVPC não seja apresentado como risco absoluto ou previsão hidrológica. O *Report Reviewer* valida a coerência textual, estatística e terminológica dos relatórios gerados automaticamente. A plataforma foi inicialmente prototipada no Google AI Studio e os agentes foram implementados em ambiente VS Code com assistência de codificação via GitHub Copilot, operando com código em Python e JavaScript.

Arquitetura em Camadas e Validação de Dados

Além da arquitetura multiagente de desenvolvimento, a plataforma opera em cinco camadas funcionais: Extração (obtenção dos dados geoespaciais), Consistência/Integridade (validação geoespacial dos dados), Engine IVPC (cálculo multicritério), Frontend (visualização e interação) e Relatórios (interpretação automatizada). A camada de Consistência/Integridade avalia a qualidade dos dados por meio de quatro índices parciais contínuos em [0, 1]: FIS (disponibilidade operacional da geometria da bacia, do MDT e da rede hidrográfica), INU (disponibilidade e integridade do raster histórico de inundação), PLU (coerência espacial das estações pluviométricas em relação ao polígono da bacia) e MUN (disponibilidade de dados urbanos e populacionais). O Índice de Qualidade Analítica (IQA) é a média aritmética desses quatro componentes, calculada automaticamente antes do cálculo do IVPC.

Cálculo do Índice de Vulnerabilidade Populacional Crítica (IVPC)

O IVPC representa a vulnerabilidade espacial relativa de populações em áreas sujeitas à inundação. O cálculo segue um pipeline com separação explícita entre os filtros de elegibilidade (*Physical Hazard* e *Blind Spot*) e as componentes de intensidade (*Exposure* e *Sensitivity*). O componente *Physical Hazard* delimita áreas topograficamente suscetíveis à inundação a partir de dois critérios: declividade inferior a 8,7% (equivalente a 5°) e histórico de ocorrência de água superficial registrado no JRC Global Surface Water, gerando uma máscara binária de elegibilidade espacial (*hazardMask*). O componente *Blind Spot* identifica regiões situadas a mais de 10 km de uma estação de monitoramento hidrológico em operação (*blindSpotMask*) (valor definido em relação às diretrizes WMO-No. 168, 2008). O universo elegível do IVPC corresponde à interseção dessas duas máscaras. Sobre esse universo calculam-se, respectivamente, *Exposure* – a deficiência de monitoramento, expressa como função normalizada da distância às estações em operação – e *Sensitivity* – a densidade de grupos etários sensíveis (crianças e idosos), obtida a partir dos dados censitários do IBGE (Equação 1).

$$IVPC = (0,5\ x\ Exposure) + (0,5\ x\ Sensitivity) \quad (1)$$

Physical Hazard e *Blind Spot* funcionam como filtros de elegibilidade, não como componentes do score. Os pesos iguais atribuídos a *Exposure* e *Sensitivity* (0,5 cada) constituem escolhas metodológicas sujeitas a revisão conforme o contexto regional. O score é classificado em cinco faixas de igual amplitude: muito baixo (0,00–0,20), baixo (0,20–0,40), moderado (0,40–0,60), alto (0,60–0,80) e muito alto (0,80–1,00).

Interface Web

A plataforma hydroData disponibiliza os resultados por meio de uma interface web interativa, desenvolvida em React com visualização de mapas via React Leaflet e séries temporais via Recharts. A interface permite a seleção da bacia hidrográfica de interesse, o acompanhamento das etapas do pipeline, a visualização das manchas de inundação por NDWI (Normalized

Difference Water Index) e de gráficos de precipitação, o status operacional das estações de monitoramento e a exportação do relatório em PDF.

RESULTADOS

A plataforma hydroData consolidou automaticamente dados provenientes de seis fontes heterogêneas: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ESA WorldCover (uso e cobertura do solo), JRC Global Surface Water (frequência histórica de inundação), INMET (estações pluviométricas) e IBGE (dados populacionais e malha urbana). A partir de um polígono da bacia hidrográfica como entrada, o pipeline executou, em sequência automatizada, a busca, o recorte espacial, a consolidação e a exportação dos dados. Como saída, tem-se a rede de drenagem, o Modelo Digital de Terreno, o mapeamento das estações, as áreas inundáveis e as superfícies espaciais derivadas. A Figura 1 apresenta a visualização espacial resultante para a Bacia do Rio Paraná. Para essa bacia hidrográfica, todos os componentes do IQA atingiram valor máximo (FIS = INU = PLU = MUN = 1,0), resultando em IQA = 1,0, o que indica disponibilidade e integridade total dos dados extraídos. Esse resultado é consistente com o perfil de uma bacia com boa cobertura de dados de referência. Espera-se que a aplicação a bacias com menor disponibilidade produza valores de IQA inferiores, oferecendo um diagnóstico quantitativo da robustez do IVPC em contextos de dados mais escassos. Além disso, a arquitetura multiagente permitiu a execução coordenada das etapas do pipeline, reduzindo a necessidade de intervenção manual.

Aplicado à Bacia do Rio Paraná (958.063,58 km²; área urbana total de 12.329,43 km²), o sistema identificou 7.282,03 km² de área urbana (59,06%) com deficiência operacional de monitoramento hidrológico, contra 5.047,40 km² (40,94%) com cobertura adequada. O universo elegível para o cálculo do IVPC – definido pela interseção entre a máscara de suscetibilidade hidrológica (*hazardMask*) e a máscara de blind spot (*blindSpotMask*) – correspondeu a 13,44 km² (0,11% da área urbana total). Nessa zona, a população exposta totalizou 46.413 habitantes, dos quais 15.471 (33,3%) pertencem a grupos etários vulneráveis (crianças e idosos). O IVPC calculado para essa zona foi de 0,435, classificado na faixa de vulnerabilidade moderada (0,40–0,60), conforme os critérios definidos na Equação 1.

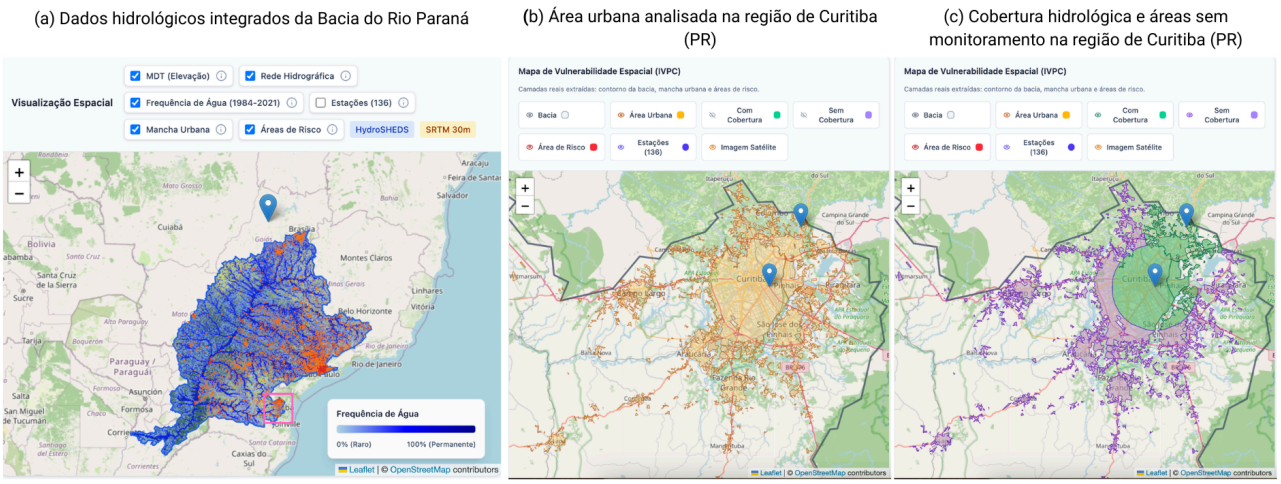


Figura 1. Visualização espacial dos dados extraídos pela plataforma hydroData e utilizados para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Populacional Crítica (IVPC) na Bacia do Rio Paraná. O painel (a) apresenta os dados hidrológicos integrados em escala de bacia; os painéis (b) e (c) mostram, respectivamente, um recorte da região metropolitana de Curitiba (PR), destacando a área urbana e a distribuição das zonas com e sem cobertura de monitoramento hidrológico. Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

Os resultados demonstram o potencial da arquitetura multiagente para apoiar o desenvolvimento de sistemas voltados à gestão de riscos. No hydroData, agentes inteligentes atuam de forma complementar na definição metodológica, implementação, validação geoespacial, revisão e geração de relatórios. Esse pipeline proporciona consistência e rastreabilidade no processo de cálculo do Índice de Vulnerabilidade Populacional Crítica (IVPC). A aplicação da plataforma hydroData permitiu a integração automatizada de dados geoespaciais e demográficos para a identificação de áreas urbanas potencialmente vulneráveis e com monitoramento hidrológico insuficiente. Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o desempenho da abordagem em bacias com diferentes níveis de disponibilidade de dados, bem como incorporar novos indicadores socioeconômicos e otimizar o desempenho computacional do sistema, ampliando a escalabilidade operacional da plataforma.

REFERÊNCIAS

ALVALÁ, R. C. S.; RIBEIRO, D. F.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; GONÇALVES, D. A.; ANTUNES DA SILVA, L.; CUARTAS PINEDA, L. A.; SAITO, S. M. (2024). “Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities”. International Journal of Disaster Risk Reduction, v.110, p.104645.

BASTOS MOROZ, C.; THIEKEN, A. H. (2024). “Urban growth and spatial segregation increase disaster risk: Lessons learned from the 2023 disaster on the North Coast of São Paulo, Brazil”. Natural Hazards and Earth System Sciences, v.24, n.9, p.3299–3314.

CHOWA, S. S.; ALVI, R.; RAHMAN, S. S.; RAHMAN, M. A.; RAIAAN, M. A. K.; ISLAM, M. R.; HUSSAIN, M.; AZAM, S. (2026). “From language to action: A review of large language models as autonomous agents and tool users”. Artificial Intelligence Review, v.59, n.2, p.71.

GOMES JR., M. N.; DO LAGO, C. A. F.; RÁPALO, L. M. C.; OLIVEIRA, P. T. S.; GIACOMONI, M. H.; MENDIONDO, E. M. (2023). “HydroPol2D—Distributed hydrodynamic and water quality model: Challenges and opportunities in poorly-gauged catchments”. Journal of Hydrology, v.625, p.129982.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2008). Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. 6 ed. Geneva: WMO.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de doutorado e mestrado que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.