



**UNIVERSIDADE
FEDERAL RURAL
DE PERNAMBUCO**



Rafaella Bezerra de Moura

Diagramas interativos para análise de risco de alagamentos na região urbana do Recife

Recife

Agosto de 2025

Rafaella Bezerra de Moura

Diagramas interativos para análise de risco de alagamentos na região urbana do Recife

Artigo apresentado ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Departamento de Estatística e Informática

Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientadora: Silvana Bocanegra

Recife

Agosto de 2025

Diagramas interativos para análise de risco de alagamentos na região urbana do Recife

[Rafaella Bezerra de Moura]¹, [Silvana Bocanegra]¹, [Jones Albuquerque]¹

¹Departamento de Estatística e Informática – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n – CEP: 52171-900 – Recife – PE – Brasil

rafaella.bezerra@ufrpe.br

Resumo. Neste trabalho é apresentado um modelo geométrico para avaliar a evolução de risco de alagamentos em áreas da região metropolitana do Recife. A metodologia emprega uma adaptação dos diagramas de risco, desenvolvidos pelo IRRD (Instituto para Redução de Riscos e Desastres de Pernambuco) em parceria com a UPC (Universidade Politécnica da Catalunha) para avaliar a propagação da COVID-19 durante a crise pandêmica. Aqui, são utilizados dados pluviométricos e de altura de maré para estimar os índices usados na construção dos diagramas. Para validação, o modelo foi aplicado em maio de 2025. Como resultado prático, foi desenvolvida e publicada uma aplicação web interativa que automatiza a análise e a geração dos diagramas de risco. Este protótipo inicial representa um avanço na forma de comunicar o risco, ao implementar com sucesso funcionalidades como a interatividade e a automação, e tem potencial para se tornar uma ferramenta prática para gestão de risco e conscientização da população.

Abstract. This work presents a geometric model to evaluate the evolution of flood risk in areas of the metropolitan region of Recife. The methodology employs an adaptation of the risk diagrams, developed by the IRRD (Institute for Risk and Disaster Reduction of Pernambuco) in partnership with UPC (Polytechnic University of Catalonia) to evaluate the spread of COVID-19 during the pandemic crisis. Here, rainfall and tidal height data are used to estimate the indices used in the construction of the diagrams. For validation, the model was applied in May 2025. As a practical result, an interactive web application was developed and published that automates the analysis and generation of risk diagrams. This initial prototype represents an advance in the way of communicating risk, by successfully implementing features such as interactivity and automation, and has the potential to become a practical tool for risk management and risk awareness.

1. Introdução

As consequências do aquecimento global já afetam todas as regiões do planeta, provocando eventos climáticos extremos cada vez mais frequentes. O aumento da temperatura média global tem impactos que vão além das ondas de calor, contribuindo para a perda da biodiversidade, a intensificação de incêndios e inundações, além da elevação do nível do mar. De acordo com o relatório de 2023 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023], é

esperado que a interação crescente entre riscos climáticos e não climáticos sejam cada vez mais frequentes e causem danos em cascata que serão difíceis de controlar. Portanto, é urgente que, além de rastrear estes eventos visando controlar e reduzir impactos, a população possa ter acesso a ferramentas que auxiliem na tomada de decisão.

No ano de 2024, o Brasil enfrentou um dos eventos climáticos hidrológicos mais catastróficos dos últimos anos [Collischonn et al. 2025]. Na região sul do país, 2,4 milhões de pessoas em 478 cidades foram afetadas pelas enchentes ocorridas em abril e maio. De acordo com a [ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO 2025], as chuvas intensas do primeiro semestre de 2024 provocaram enchentes sem precedentes em rios como o Guaíba, Taquari e Jacuí, registrando vazões que se aproximaram ou até superaram os limites previstos nos projetos de barragens e usinas hidrelétricas. A combinação de fatores de mudança climática induzida pelos seres humanos duplicou a probabilidade de chuvas e aumentou em até 9% a chance de maiores precipitações nesta área [World Weather Attribution 2024].

Também marcado por um histórico de grandes enchentes (Figura 1), o estado de Pernambuco contabiliza milhares de vítimas dessas tragédias nem sempre anunciadas. Especificamente, a cidade do Recife, caracterizada por sua localização costeira e grande malha hidrográfica de rios como o Capibaribe e Beberibe e canais, é anualmente impactada por elevados volumes de chuva. Este fenômeno recorrente gera sérios transtornos para a população e para a infraestrutura urbana, resultando em prejuízos econômicos, proliferação de doenças e, em casos extremos, na perda de vidas humanas.

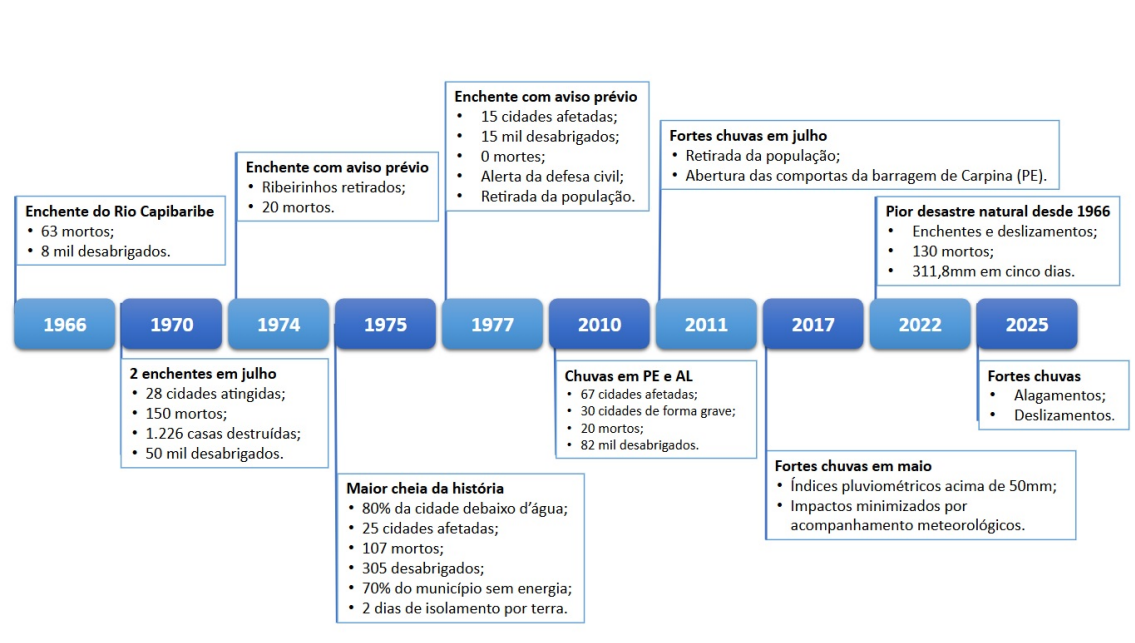


Figura 1. Histórico de grandes enchentes em Pernambuco (PE) de 1966 até 2025 com destaque para as consequências dos eventos.
Fonte: linha do tempo criada pela autora com dados extraídos de <https://www.defesacivil.pe.gov.br/institucional/historico>.

Apesar das enchentes recorrentes entre 1966 e 1977 em Pernambuco, episódios como o de 1977 mostraram que a retirada preventiva da população pode reduzir significativamente o número de vítimas. O monitoramento dos dados de previsão meteorológica também se mostrou eficiente nas enchentes ocorridas nos anos 2000. Apesar destes eventos serem mais frequentes e intensos nas últimas décadas, o aprimoramento dos sistemas de alerta e das estratégias de gestão de risco tem contribuído para mitigar os impactos sobre a população, sobretudo quando há articulação entre órgãos públicos e comunidades locais.

A vulnerabilidade da região metropolitana do Recife frente a esses eventos hidrometeorológicos é evidenciada por seu histórico de grandes inundações, alagamentos e múltiplos deslizamentos. São exemplos marcantes de cenários complexos que são afetados por fatores climáticos como alto índice pluviométrico e a altura da maré, mas também por fatores não climáticos como o crescimento urbanístico desordenado e a insuficiência da rede de drenagem que contribuem significativamente para a intensidade desses eventos adversos. Neste contexto, urge a necessidade de ferramentas que auxiliem a população e os gestores na tomada de decisões para prevenção e mitigação destes desastres.

Buscando soluções robustas para a análise de cenários complexos, a utilização de diagramas de risco baseados em análises geométricas é uma metodologia que tem se mostrado eficiente em avaliar os riscos de um sistema [Català et al. 2021]; [Cordeiro et al. 2021]. Diagramas de risco são uma ferramenta de visualização de análises estatísticas e geométricas combinadas, que demonstram de forma dinâmica o nível de risco que determinada área está. Esta metodologia foi utilizada pelo IRRD para avaliar a evolução do risco da propagação da COVID-19 durante a crise pandêmica. O IRRD-PE (Instituto para Redução de Riscos e Desastres de Pernambuco), é uma iniciativa formada pela parceria entre o GEOSERE-UFRPE (Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto da Universidade Federal Rural de Pernambuco) e o LIKA-UFPE (Laboratório de Imunopatologia Keizo Asami da Universidade Federal de Pernambuco) com o intuito de auxiliar na prevenção de desastres de variados temas como epidemias, desastres naturais, clima, trânsito, entre outros.

A concepção dos diagramas de risco deste trabalho fundamenta-se na adaptação de modelos preexistentes, posicionando esta pesquisa como uma evolução natural dos esforços anteriores. A principal base teórica é o modelo de cálculo de risco para a propagação da COVID-19, proposto em [Català et al. 2021]. [Gomes 2022], utilizou esta metodologia e propôs uma adaptação do modelo epidemiológico para o contexto climatológico de alagamentos no Recife. A proposta consistiu em estabelecer uma analogia, entre as variáveis da doença por dados de chuva da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) e de altura das marés com objetivo de avaliar a aplicabilidade do modelo para este novo cenário. O modelo se mostrou eficaz para os testes iniciais. No entanto, a entrada dos dados, os cálculos e a execução do script que cria os diagramas de risco foram realizados manualmente, dificultando a escalabilidade da aplicação.

Neste trabalho serão implementadas algumas melhorias propostas como trabalhos futuros em [Gomes 2022]. Será desenvolvido um protótipo de ferramenta para avaliar o risco de enchentes e alagamentos na região metropolitana do Recife. São utilizados dados pluviométricos e de altura de maré para mensurar o risco que uma determinada área está em um dado período de tempo. O objetivo é criar uma ferramenta visual, intuitiva e

interativa que sirva como apoio à tomada de decisão, contribuindo para a prevenção de desastres. Para isso, serão realizadas:

- A automação do processamento de dados e aplicação do modelo;
- A geração de diagramas interativos para visualização da evolução do risco ao longo do tempo;
- A publicação do protótipo inicial como uma aplicação web acessível, construída com Streamlit.

2. Trabalhos Relacionados

Estudos sobre mapeamento de riscos para eventos hidrológicos estão tendo crescente relevância, especialmente em áreas urbanas vulneráveis. Nesse contexto, [Lima et al. 2025], realizaram uma pesquisa significativa que abordou a identificação de áreas suscetíveis a inundações na cidade de Recife (PE). Utilizando o Processo Analítico Hierárquico (AHP) junto ao software QGIS, considerando variáveis como pluviometria, declividade, hipsometria e uso do solo para a modelagem das zonas de maior risco. Os resultados indicaram que regiões urbanas com baixa declividade apresentam maior chance de inundações, ressaltando a importância do planejamento urbano voltado à mitigação de desastres. Apesar de não ter foco em regiões com baixa declividade, os resultados dos diagramas de risco desenvolvidos aqui, também corroboram com a importância do planejamento urbano destacado por [Lima et al. 2025].

O desenvolvimento de ferramentas e metodologias que ampliam a compreensão dos impactos de fenômenos climáticos extremos é fundamental para a análise de riscos associados a eventos de inundação. Conforme relatório da [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 2025], a agência expandiu seus serviços de mapeamento de inundação para cobrir 60% da população dos Estados Unidos, destacando a relevância de soluções experimentais que aprimoram a comunicação de riscos para gestores públicos e a sociedade.

Um trabalho importante sobre a temática de inundações urbanas e gestão hídrica é o ensaio de [Peixoto et al. 2019], que discute a problemática das inundações nas cidades sob a perspectiva da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH). Os autores destacam a necessidade de metodologias que considerem os perigos naturais, a vulnerabilidade socioambiental e os impactos das ocupações urbanas na dinâmica hidrológica. O estudo enfatiza que tanto as inundações ribeirinhas quanto as causadas pela impermeabilização do solo urbano devem ser abordadas considerando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, evidenciando a integração entre políticas de uso do solo e gestão hídrica. Além disso, o texto destaca a importância da participação social e da articulação institucional para uma gestão eficaz dos riscos de inundação, o que também é sugerido por [Gomes 2022] e aqui neste trabalho. A pesquisa de [Peixoto et al. 2019] também revisa modelos de controle urbano das inundações, destacando a evolução de estratégias estruturais para modelos sustentáveis e integrados, que priorizam medidas não estruturais e o planejamento urbano adequado para minimizar prejuízos materiais e sociais.

De forma complementar, o estudo de [Araújo et al. 2011] destaca a influência dos fluxos de maré no manguezal do Pina, em Recife, evidenciando a importância ecológica dessas áreas para a mitigação das enchentes, assim como foi trabalhado neste estudo de diagramas de risco. Os autores concentraram-se nos padrões de fluxo de água e nos efeitos

nos sedimentos, ressaltando o papel do manguezal como uma “bacia de amortecimento de enchentes” [Araújo et al. 2011]. A metodologia baseada na análise hidrodinâmica e geo-espacial para mapear a distribuição espacial de velocidades atende bem ao enfoque deste trabalho, que também utiliza visualização geométrica para analisar riscos e suscetibilidade a alagamentos e inundações urbanas. Essa complementaridade reforça a necessidade de considerar tanto os aspectos hidrológicos naturais, como o papel dos manguezais, quanto a gestão integrada e a ocupação do solo para um controle mais efetivo das inundações, assim como recomendado aqui em trabalhos futuros.

O impacto da dinâmica oceânica na área de estudo é fundamental. [Marengo et al. 2023] abordam o papel da maré como um fator que amplificou a magnitude da inundação no evento crítico de 28 de maio de 2022 em Recife. O estudo identifica a contribuição de dois fenômenos de maré que ocorreram simultaneamente às chuvas mais fortes: 1) Maré Astronômica de Sízígia (Maré de Primavera), em que a tábua de marés indicava uma amplitude elevada para o dia 28 de maio, em proximidade com a lua nova. As alturas da maré no Porto de Recife atingiram até 2,2 metros, representando um nível do mar já elevado, dificultando o escoamento. 2) Maré Meteorológica Positiva, foi constatado que os fortes ventos de sudeste na costa provocaram um “empilhamento” de água na zona litorânea. Esse fenômeno elevou ainda mais o nível do mar, somando-se à maré astronômica e agindo como uma barreira que retarda o fluxo da água da chuva para o oceano, o que aumenta a área e a duração da inundação em terra. O entendimento destes mecanismos complexos de maré, detalhados no artigo de [Marengo et al. 2023] contribuem empiricamente para a modelagem proposta, em que tais evidências reforçam a premissa de que o Índice de Altura da Maré é um componente indispensável na análise do risco de alagamento no Recife.

O trabalho de [Oliveira et al. 2024] teve como objetivo desenvolver um dashboard interativo para o monitoramento de focos de calor no Brasil. A pesquisa utilizou a linguagem Python e o framework Streamlit, também utilizados neste trabalho de diagramas de risco, e escolhidos por sua rápida curva de aprendizado e por facilitarem o desenvolvimento de aplicações. Os dados de focos de calor, obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cobriram o período de 2003 a 2024 e foram processados com bibliotecas como Pandas, Numpy e Plotly. O estudo conclui que a ferramenta é um recurso eficiente e acessível para a gestão ambiental, democratizando o acesso aos dados e auxiliando na tomada de decisões por autoridades e pesquisadores.

3. Materiais e Métodos

3.1. Modelo base

[Català et al. 2021] propôs um modelo empírico para o monitoramento da pandemia da Covid-19 para entender a situação real de cada localidade e auxiliar os gestores na criação de políticas públicas. O modelo é baseado em três índices empíricos, ρ_7 , A_{14} e EPG , que são utilizados para analisar a situação real da epidemia, através de um rastreamento diário em vários países e também para prever cenários futuros. O índice ρ_7 quantifica a velocidade com que a epidemia está se espalhando e é construído baseado na média móvel do raio de propagação dos últimos 7 dias; o índice A_{14} , quantifica o número de novos casos nos últimos 14 dias e é usado para estimar casos ativos, ou seja, é um indicador das pessoas contagiosas que podem espalhar o vírus na velocidade ρ_7 . O EPG avalia

o crescimento potencial da epidemia a curto prazo e é definido como o produto de ρ_7 e A_{14} . Com estes índices foram construídos diagramas de risco para visualizar a evolução de cada localidade estudada em um determinado período de tempo. A velocidade ρ_7 no eixo x , A_{14} no eixo y e EPG como cor de fundo.

3.2. Adaptação do modelo

[Gomes 2022] utilizou uma adaptação deste modelo para o contexto climatológico o que exigiu modificações no cálculo dos índices utilizados na criação dos diagramas de risco para visualizar potenciais alagamentos na cidade do Recife. Quando utilizado para o contexto de saúde, o modelo mede o risco de propagação da doença combinando a **velocidade** do contágio com a **vulnerabilidade** da população em relação ao número de pessoas infecciosas [Català et al. 2021]. A adaptação realizada estabeleceu uma analogia direta para o contexto climatológico considerando o **Índice de Volume Pluviométrico** e o **Índice de Altura da Maré**. Os índices foram calculados para cada hora do dia.

1. Velocidade de Propagação (ρ_7) $\rightarrow$ Índice de Volume Pluviométrico (VP): A velocidade em que a epidemia se propaga foi substituída pelo **Índice de Volume Pluviométrico (VP)**, que foi calculado pela soma do volume pluviométrico em 2 horas de chuva, adicionado ao volume de chuva prevista para hora de acesso, calculado pelo volume de chuva nos últimos 15 minutos dividido por 0.25 (1/4 de hora).

$$VP = \frac{V_{15\text{Minutos}}}{0.25} + V_{2\text{Horas}}.$$

2. Taxa de ataque acumulada (A_{14}) $\rightarrow$ Índice de Altura da Maré (AM): A obtenção do **índice de Altura da Maré** foi dada pelo cálculo da diferença entre dois picos de maré (I_1 - I_2) dividido por seis mais o valor da primeira maré do dia (I_1), tendo assim uma estimativa para a altura da maré para todos os horários do dia em questão.

$$AM = \frac{I_1 - I_2}{6} + I_1.$$

3. **O Crescimento Potencial Efetivo (EPG) $\rightarrow$ Índice de Risco de Alagamento (RA):** É um índice de risco que avalia o potencial crescimento epidêmico no curto prazo, foi substituído pelo **Índice de Risco de Alagamento (RA)** que é calculado como o produto da força do evento pela vulnerabilidade do sistema:

$$RA = VP \times AM.$$

Para classificação do risco, foi estabelecida uma estratificação dos valores de RA com base nos níveis de alerta da Apac, descrito na Figura 2.

Risco Baixo: $RA < 30$

Risco Moderado: $30 < RA < 50$

Risco Moderado Alto: $50 < RA < 100$

Risco Alto: $RA > 100$

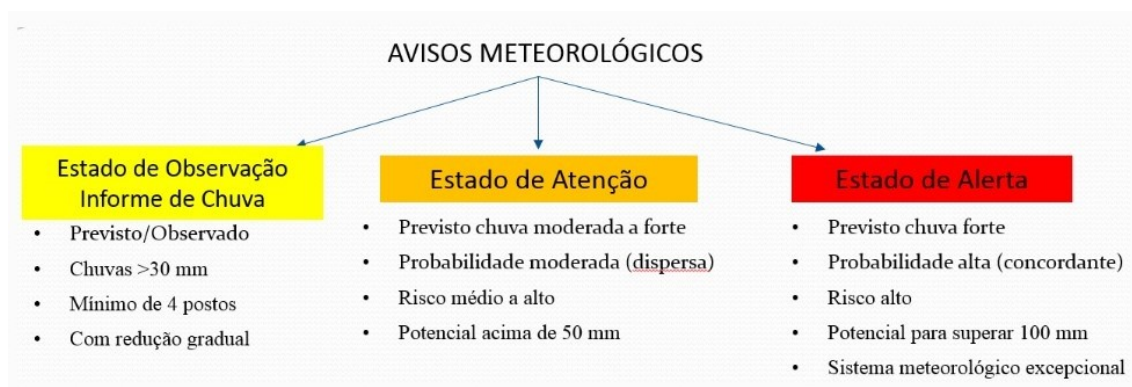


Figura 2. Níveis de alerta para riscos meteorológicos da APAC. Fonte: <https://www.apac.pe.gov.br/113-sobre-meteorologia/617-niveis-de-avisos>

3.3. Coleta, Tratamento, Análise e Visualização interativa dos Dados

Foram utilizadas duas fontes de dados primárias: a rede de monitoramento do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas a Desastres Naturais (CEMADEN)¹, para coletar os dados pluviométricos; e a tábua de marés da Marinha do Brasil², para coletar os dados de maré do Porto de Recife. Na primeira etapa deste estudo, a interface da plataforma do CEMADEN impedia a coleta de dados automática devido ao sistema de segurança CAPTCHA. Para contornar essa limitação, foi obtido acesso à API do CEMADEN, o que permite a obtenção dos dados de chuva em tempo real para toda região estudada.

O acesso à API é realizado por meio de endpoints, que são os endereços digitais específicos (URLs) que marcam o ponto de comunicação e permitem a troca de informações entre sistemas. Por exemplo, o endpoint: /pcds-cadastro/estacoes, é utilizado para requisitar os dados cadastrais das estações de monitoramento. O acesso a esses endpoints exige o envio de um token de autenticação a cada requisição. Este token possui uma validade de quatro horas, sendo necessário gerenciar sua renovação no script de coleta para garantir a continuidade da obtenção de dados. Além disso, a API impõe um limite de taxa, permitindo um máximo de 12 solicitações por minuto. Após uma solicitação bem-sucedida, os dados são retornados nos formatos JSON, CSV, XML ou CUSTOMIZADO (padrão de dados definido pelo CEMADEN, semelhante ao CSV, porém possui cabeçalho, outro separador de colunas e de casas decimais, dentre outras diferenças, sendo esse o motivo de ser nomeado como CUSTOMIZADO).

A coleta dos dados de maré, originalmente disponibilizados em formato PDF pela tábua da Marinha do Brasil, demandou uma etapa preliminar de conversão para o formato CSV. Essa transformação foi crucial para viabilizar o processamento e a padronização temporal dos picos de maré. Os instantes originais de ocorrência dos picos (preamar e baixa-mar) apresentavam variações, para assegurar a consistência exigida pelo modelo proposto, que adota um intervalo fixo de 6 horas entre picos sucessivos, foi implementado o arredondamento do horário do primeiro pico de janeiro para um horário próximo cheio

¹<https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#>

²<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>

(04h51 para 5h), a partir desse horário, foram calculados os outros picos com intervalos de 6h, abrangendo toda a série de dados de janeiro a dezembro de 2025, conforme detalhado na Seção 3.4, garantindo a validade do Índice de Altura da Maré (AM).

A arquitetura do sistema e o fluxo de dados são detalhados na Figura3, que ilustra as etapas de coleta de dados, processamento e visualização dos resultados, ilustrando as etapas desde a coleta das fontes primárias até a geração do painel de análise.

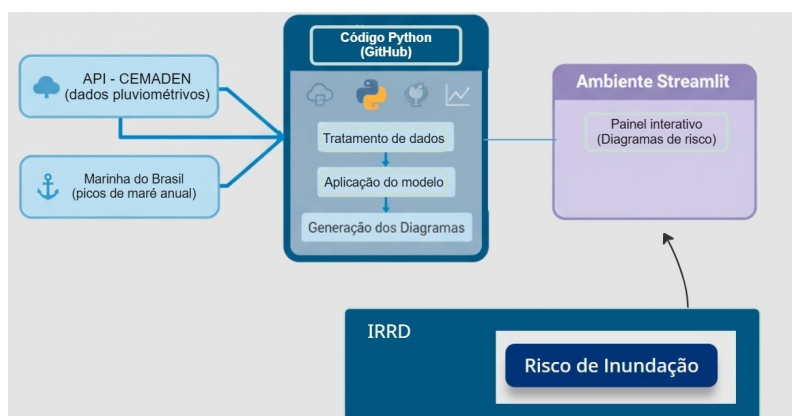


Figura 3. Fluxograma da metodologia de análise de risco, desde a coleta dos dados até a visualização final. Fonte: própria autora.

A aplicação da metodologia de análise de risco para alagamentos e enchentes foi desenvolvida em Python, uma linguagem de programação de alto nível. O ambiente de desenvolvimento utilizado foi o VS Code (Visual Studio Code), um editor de código-fonte que se mostrou ideal para a manipulação de scripts. O Jupyter Notebook foi a ferramenta central para a fase exploratória e de prototipagem, permitindo a criação de documentos que combinam código, visualizações e texto explicativo em uma única interface. Isso facilitou a documentação do processo de análise e a reprodutibilidade dos resultados.

A análise e manipulação dos dados foram realizadas com as seguintes bibliotecas: Pandas, essencial para o carregamento, limpeza e manipulação dos dados; Matplotlib e Seaborn: utilizadas para a geração de gráficos estáticos de alta qualidade. O Matplotlib é a biblioteca base de visualização, enquanto o Seaborn permite uma interface mais intuitiva e melhor designs para a criação de gráficos estatísticos mais complexos; Plotly: escolhida especificamente para a criação de gráficos interativos, permitindo que o usuário explore os dados diretamente nas visualizações, com recursos de zoom, seleção e informações exibidas ao passar o mouse.

A seleção das estações de monitoramento pluviométrico foi uma etapa importante para este estudo, e a decisão foi baseada em três critérios principais: proximidade a corpos hídricos, onde as estações próximas a rios ou grandes canais de escoamento foram priorizadas, pois essas áreas são mais suscetíveis a alagamentos sob a influência da maré, o que compromete os sistemas de drenagem e aumenta a probabilidade de eventos adversos relacionados às chuvas, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5 ; maior captação de dados, focando nas estações que registraram os maiores volumes de chuva ao longo dos meses analisados; e situação ativa, considerando apenas as estações que estavam operantes durante o período de coleta de dados.

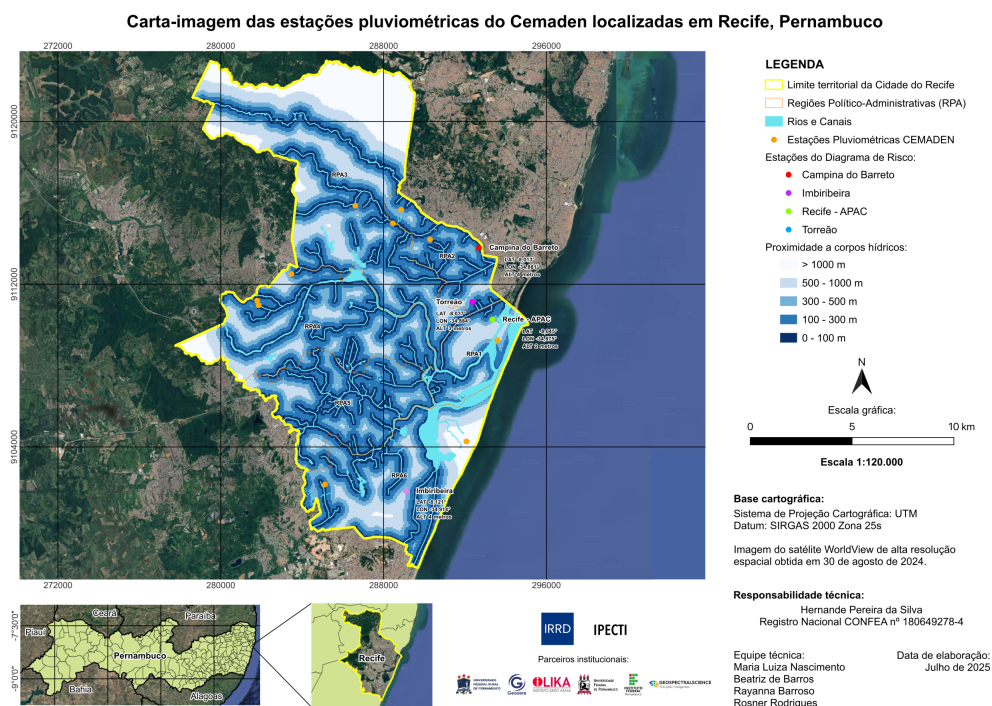


Figura 4. Localização das estações pluviométricas do CEMADEN próximas a corpos hídricos. Fonte: IRRD <https://www.irrd.org/mapasflood/>

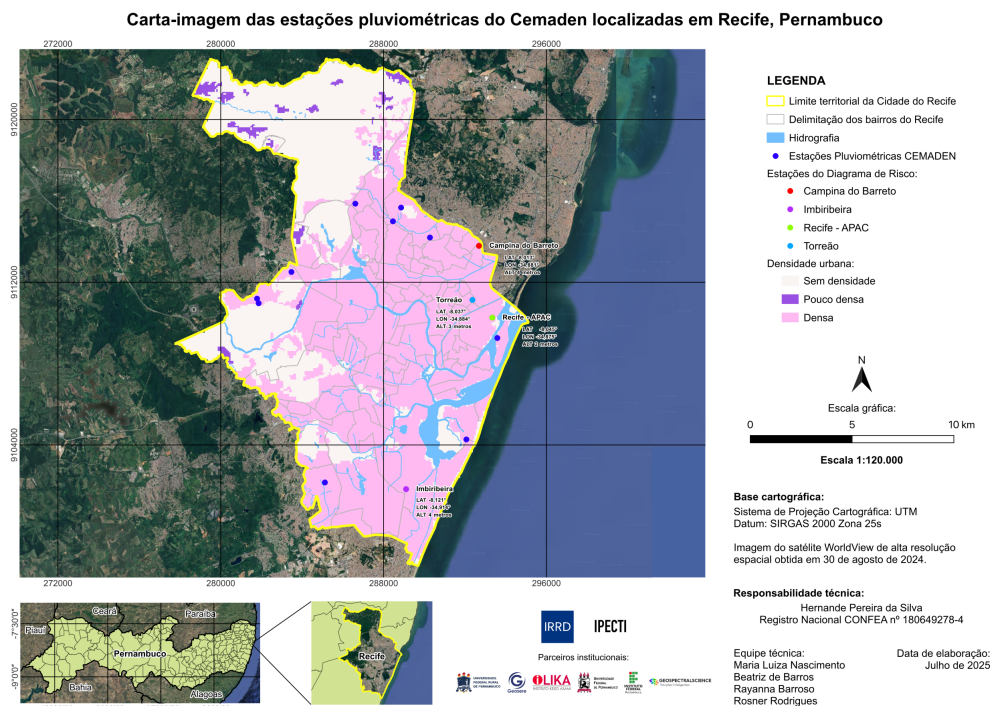


Figura 5. Localização das estações pluviométricas do CEMADEN. Fonte: IRRD <https://www.irrd.org/mapasflood/>

Na Figura 4 é possível perceber a relação de proximidade dos corpos hídricos (des-

tacados em azul) e das estações pluviométricas do CEMADEN que foram selecionadas para este trabalho. São elas: "Campina do Barreto"(ponto em vermelho), "Torreão"(ponto em azul), "RECIFE - APAC"(ponto em verde) e "Imbiribeira"(ponto em lilás). Os dados das estações selecionadas foram utilizados para gerar os diagramas de risco (Seção 3), ilustrando a aplicação do modelo proposto. A estação "Dois Irmãos" também foi incluída no estudo, mas apenas como ponto de monitoramento referencial, pois interrompeu sua transmissão de dados via API em Março, permanecendo inativa até o momento da escrita deste estudo. Na Figura 5 a densidade urbana nas proximidades destas mesmas estações são ilustradas. Sendo considerada densa toda a área em rosa claro, sugerindo que são áreas que concentram grandes ações antrópicas e possivelmente sofrem com drenagem e saneamento básico insuficientes.

A análise inicial dos dados de chuva revelou que fevereiro e agosto foram meses com alguns dias de grande precipitação de chuva. Entretanto, maio foi o mês com o maior acúmulo de precipitação, por isso foi escolhido para medição do risco de alagamento em relação aos outros meses, como ilustra a Figura 6.

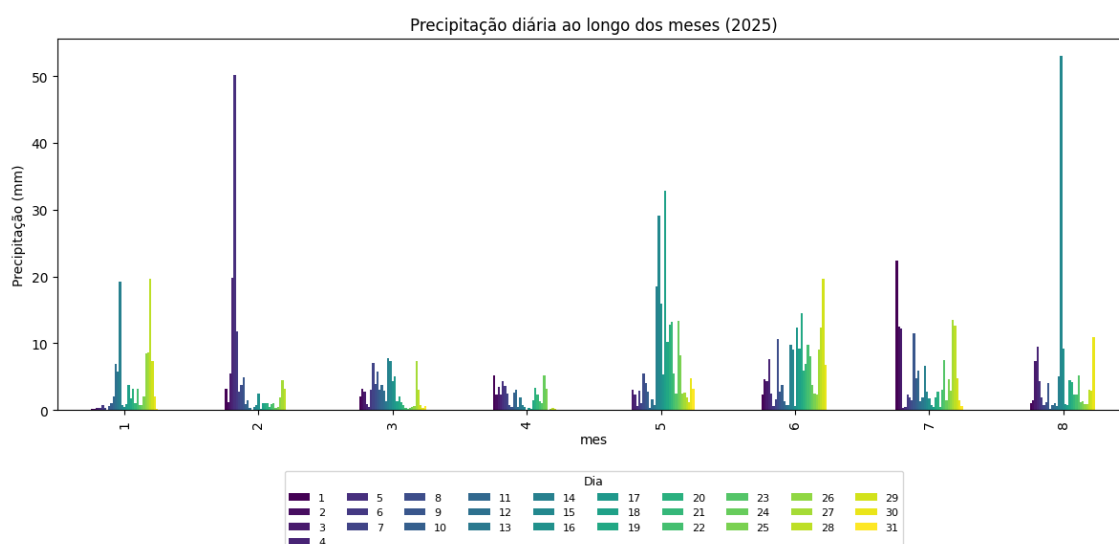


Figura 6. Precipitação diária de janeiro a agosto. Fonte: própria autora.

As principais etapas de processamento e análise exploratória foram: identificação de variáveis, onde as colunas principais foram identificadas, incluindo município, codEstacao, nomeEstacao, latitude, longitude, datahora e valorMedida; tratamento de dados temporais, onde a coluna datahora foi convertida para o tipo datetime, o que permitiu extrair informações temporais como ano, mês e dia; e análise exploratória, onde a distribuição da precipitação foi investigada com a identificação e tratamento de valores nulos, além do mapeamento das estações ativas no período.

Com base na metodologia descrita nesta seção, foram identificados os dias de maior volume de chuva, dentro período analisado (maio), e os locais mais próximos a corpos hídricos que puderam ilustrar com maior clareza o funcionamento do modelo proposto neste estudo.

O framework Streamlit foi usado para desenvolver e publicar o protótipo inicial como uma aplicação web interativa. O deploy, etapa técnica de migrar o código da aplicação de um ambiente de desenvolvimento local para um ambiente de produção, onde a aplicação pode ser executada e acessada por usuários, foi estabelecido no Streamlit Community Cloud (serviço de hospedagem) com conexão direta com o Github, isso garante que as atualizações de código posteriores sejam refletidas automaticamente. As principais vantagens foram: o acesso irrestrito por meio de uma URL dedicada e integração contínua, a plataforma mantém uma conexão direta e automática com o repositório do projeto no Github. Para otimizar o desempenho e a experiência do usuário, foi utilizada a funcionalidade de cache do Streamlit `@st.cache_data`. Essa ferramenta armazena em memória os dados brutos de chuva e maré carregados pela função `carregar_dados_brutos_por_mes` do script desenvolvido para este estudo. Com isso, quando um usuário interage com o painel e seleciona novamente um período já visualizado, o Streamlit não precisa recarregar os dados. Ele recupera o resultado diretamente do cache. Isso torna a navegação entre os meses mais eficiente, evitando o reprocessamento desnecessário de informações.

3.4. Da Epidemiologia à Climatologia

A metodologia desenvolvida neste trabalho é uma continuação da adaptação realizada pelo IRRD com base no modelo aplicado pela Universidade Politécnica da Catalunya para monitoramento da propagação da COVID-19. Conforme mencionado anteriormente, a adaptação para o contexto climatológico exigiu modificações dos índices analisados, mas manteve a criação de diagramas de risco, que agora são utilizados para visualizar potenciais alagamentos na cidade do Recife. Como forma de teste, neste trabalho substituímos a janela de 15 minutos utilizada por [Gomes 2022], e adotamos uma janela de 10 minutos que se alinha à frequência dos dados do CEMADEN, fonte de dados primários, durante eventos de chuva com o volume acumulado nas últimas 2 horas. Tornando o cálculo do **Índice de Volume Pluviométrico (VP)** para este trabalho:

$$VP = V_{10\text{min}} \times \underbrace{6}_{\text{fator para } 60/10} + V_{2\text{Horas}},$$

sendo, o $V_{10\text{min}}$ o valor associado a um intervalo de chuva de 10 minutos, multiplicado por 6 e somado ao valor $V_{2\text{Horas}}$, que é a medida associada ao acumulado de 2 horas de chuva.

Índice de Altura da Maré (AM), para obter um valor dinâmico, o índice AM foi calculado para cada intervalo de tempo entre picos de maré consecutivos, usando a altura do início (I_1) e do fim (I_2) do intervalo, dividido por 6 que representa o intervalo de preamar e baixa-mar e somado ao valor da altura (I_1), dessa forma se tem o valor de altura de maré para cada hora do dia, como pode ser visto na Figura 7 em que cada ponto representa uma altura referente àquela hora.

$$AM = \frac{I_1 - I_2}{6} + I_1.$$

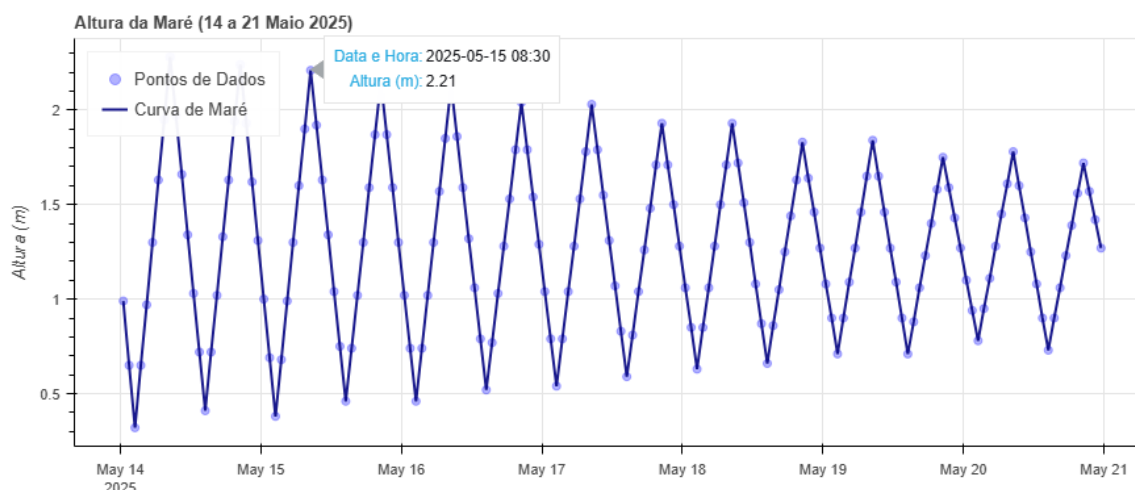


Figura 7. Gráfico com alturas de maré para cada hora do dia. Fonte: própria autora.

Índice de Risco de Alagamento (RA) que é calculado como o produto da força do evento pela vulnerabilidade do sistema:

$$RA = VP \times AM.$$

4. Resultados (Estudo de Caso)

Todos os códigos gerados estão atualmente armazenados no repositório do Github³. Foi desenvolvido um painel interativo (dashboard apresentado nas Figuras 9 e 10), com acesso online no site do IRRD⁴ por meio do botão 'Risco de Inundação'. Como mostra a Figura 8, o dashboard permite a visualização e exploração dos diagramas de risco para as estações selecionadas (Campina do Barreto, Torreão, Recife - APAC, Imbiribeira e Dois Irmãos) e a possibilidade de escolha para o período desejado. Esta seção apresenta os principais resultados obtidos, a forma de interpretar os diagramas gerados e as conclusões extraídas da análise.

³<https://github.com/RafaellaB/Painel-Diagrama-de-Risco>

⁴www.irrd.org/flood

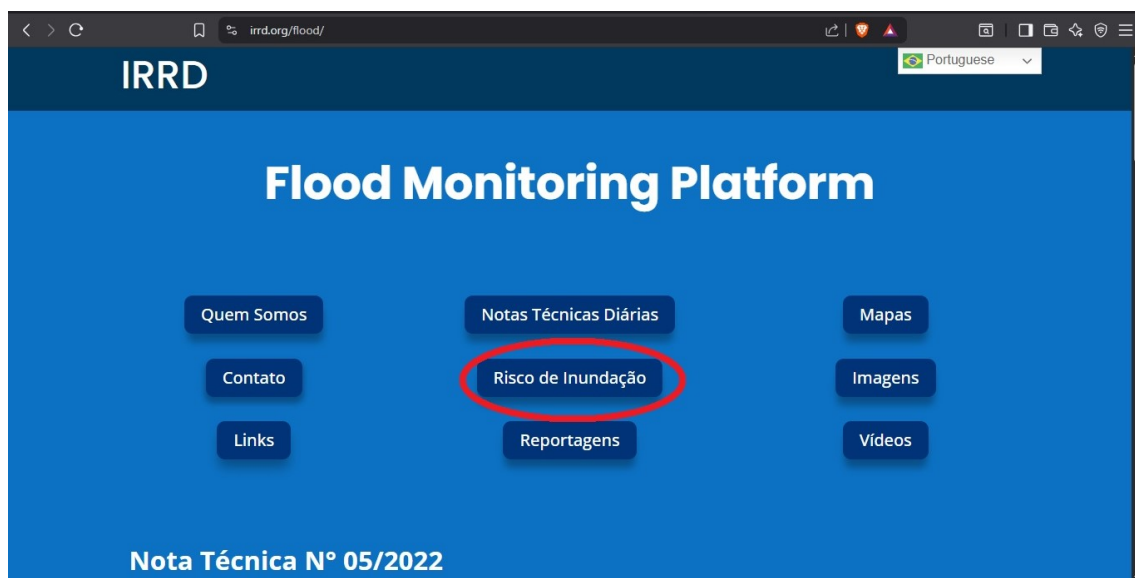


Figura 8. Painel interativo para monitoramento de alagamentos.

4.1. Apresentação dos diagramas gerados

O painel de análise foi publicado na web através da plataforma Streamlit Community Cloud, garantindo acesso público e contínuo aos resultados. A interface permite que o usuário selecione as estações de interesse, o período desejado e execute a análise que gera os relatórios e os diagramas de risco individuais para cada dia e estação selecionadas, como apresentado nas Figuras 9 e 10.

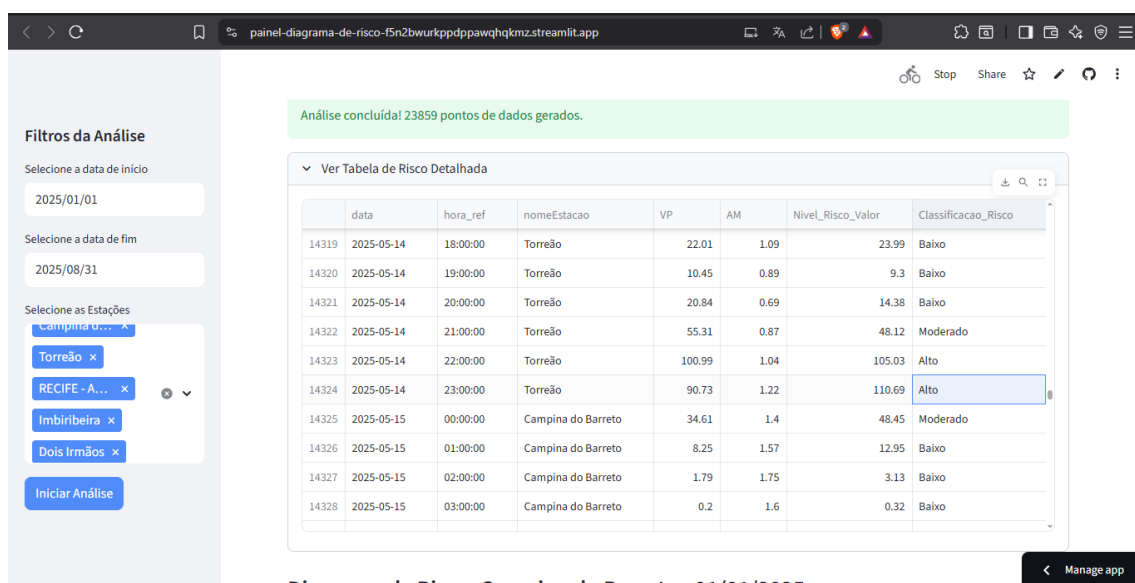


Figura 9. Opções para seleção das estações e período. Fonte: própria autora.

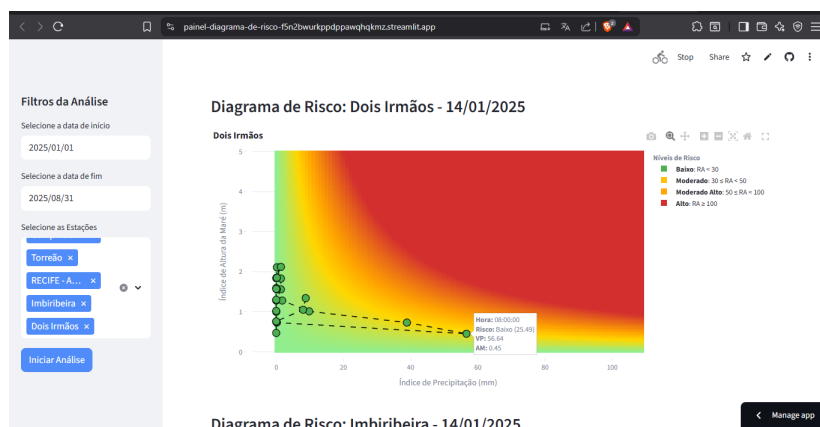


Figura 10. Diagrama de risco para Dois Irmãos - dia 14/01/225. Fonte: própria autora.

4.2. Como Interpretar os Diagramas de Risco

Para que a população e os gestores possam utilizar esta ferramenta, é fundamental entender como ler os diagramas. Cada gráfico é um "raio-x" do risco de alagamento para uma estação em um dia específico.

- **Eixos do Gráfico:** O eixo horizontal (X) é representado pelo Índice de Volume Pluviométrico (VP), e o eixo vertical (Y) é representado pelo Índice de Altura da Maré (AM). Quanto mais à direita e para cima um ponto estiver, maior o risco de alagamento. Os índices VP e AM podem ser vistos respectivamente como velocidade e aceleração dos risco de alagamento.
- **Fundo Colorido:** As cores de fundo indicam a zona de risco. Verde é seguro (Risco Baixo), Amarelo é um alerta (Risco Moderado), Laranja é perigoso (Risco Moderado Alto) e Vermelho é crítico (Risco Alto).
- **Trajetória do Risco:** A linha preta tracejada mostra a evolução do risco hora a hora ao longo do dia. Cada ponto na linha é uma medição horária, e sua cor indica o nível de risco naquele momento específico.
- **Interatividade:** Ao passar o mouse sobre qualquer ponto, uma caixa de texto aparece com os valores exatos da hora, do Índice do Volume Pluviométrico (VP), do Índice de Altura da Maré (AM) e do Risco de Alagamento (RA) calculado.

4.3. Análise dos Níveis de Risco Encontrados

A análise do período de janeiro a agosto de 2025 revelou padrões distintos de risco, que foram classificados e detalhados a seguir.

Nível de Risco Alto ($RA \geq 100$): Foram identificados os eventos mais críticos, concentrados principalmente no final da noite dos dias 14, 16 e 25 de maio. Por exemplo, na estação Torreão, no dia 14/05 às 22h, foi registrado um Risco de Alagamento (RA) de 91.66. (Figura 11). Uma observação crucial é que, para todos os pontos de risco Alto, o valor do índice de altura da maré (AM) estava acima de 1.0. Isso confirma que a combinação do VP significativo com uma maré alta foi o principal fator para a geração de cenários de risco extremo.

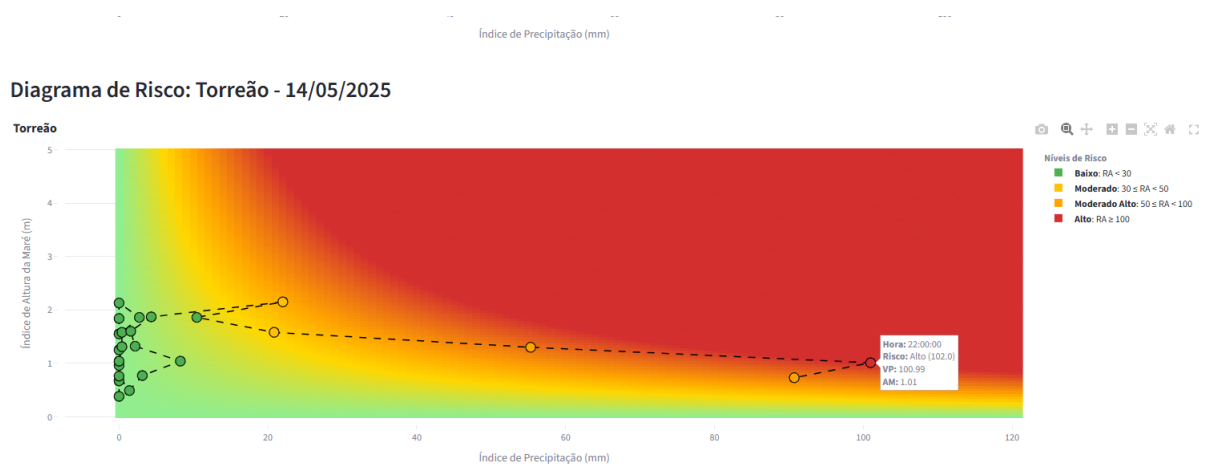


Figura 11. Diagrama de risco para Estação Torreão - dia 14/05/2025. Fonte: própria autora.

Nível de Risco Moderado Alto ($50 \leq RA < 100$): Nesta categoria, os eventos também se concentraram nos dias de chuva mais intensa. Um exemplo é o da estação Campina do Barreto em 16/05 às 15h, com um RA de 59.21 (Figura 12). Nestes casos, a maré continuava com valores altos ($AM = 1.34$), e mesmo com um VP ligeiramente menor que o dos eventos de Risco Alto, a maré elevada foi suficiente para amplificar o impacto da chuva, elevando o risco para esta categoria de alerta.

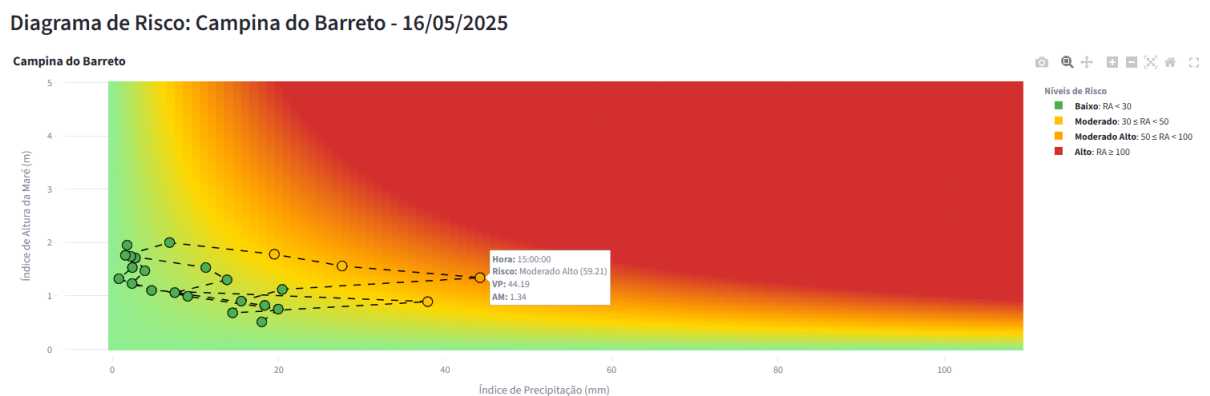


Figura 12. Diagrama de risco para Estação Campina do Barreto - dia 16/05/2025. Fonte: própria autora.

Nível de Risco Moderado ($30 \leq RA < 50$): Esta categoria demonstrou a complexa interação entre os dois fatores. Foram observados dois tipos de cenários:

- Maré Alta com Chuva Moderada: Como em Recife - APAC em 14/05 às 18h, onde um AM de 2.15 combinado com um VP de 14.56 resultou em um RA de 31.3 (Figura 13).

Diagrama de Risco: RECIFE - APAC - 14/05/2025

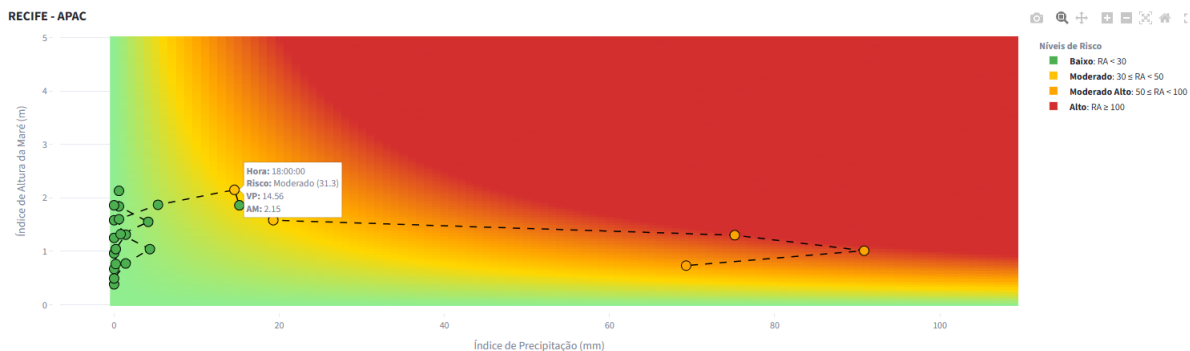


Figura 13. Diagrama de risco para Recife - APAC - dia 14/05/2025. Fonte: própria autora.

- Chuva Alta com Maré Baixa: Como em Campina do Barreto 16/05 às 11h, onde um VP de 37.9 foi combinado com um AM baixo de 0.89, mantendo o risco na faixa moderada (RA = 33.73) (Figura 14). Isso ilustra como a maré baixa pode ajudar a mitigar o efeito de uma chuva mais forte.

Diagrama de Risco: Campina do Barreto - 16/05/2025

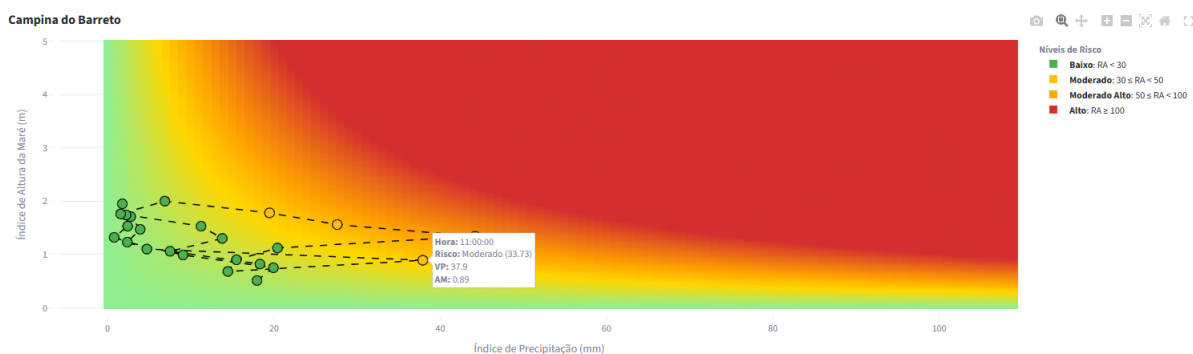


Figura 14. Diagrama de risco para Estação Campina do Barreto - dia 16/05/2025. Fonte: própria autora.

Nível de Risco Baixo ($RA < 30$): Como esperado, a maioria dos pontos de dados se enquadram nesta categoria. É interessante notar que, mesmo em momentos de maré

alta, se não houver chuva ($VP = 0$), o risco de alagamento é nulo. Da mesma forma, chuvas de baixo volume com maré alta (ex: $VP = 8.82$ e $AM = 2.41$) também resultam em um risco baixo. O risco é elevado quando há uma combinação relevante dos dois fatores. (Figura 15).

Diagrama de Risco: Imbiribeira - 24/05/2025

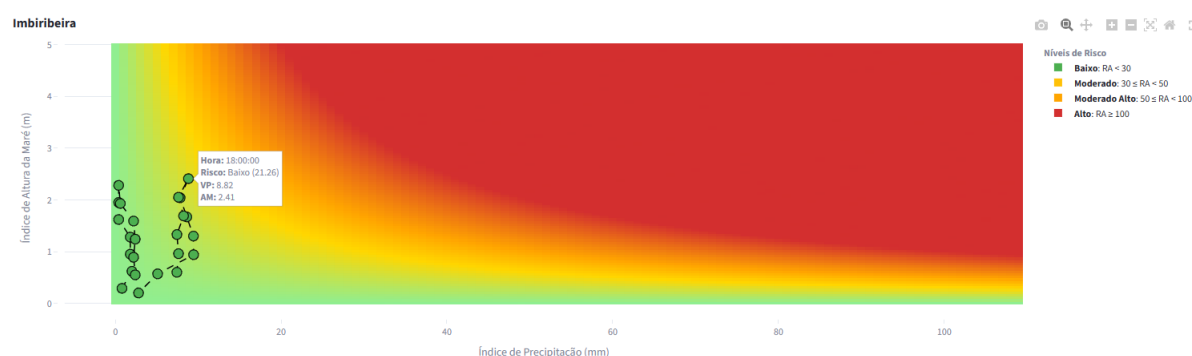


Figura 15. Diagrama de risco baixo para Estação Imbiribeira - dia 24/05/2025.
Fonte: própria autora.

5. Discussões e Trabalhos Futuros

No dia 14 de maio de 2025, um período marcado por chuvas intensas na Região Metropolitana do Recife (RMR), a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho, resultou na classificação de Risco Alto para diversas estações de monitoramento, especialmente no período noturno. Os diagramas de risco gerados indicaram que a combinação dos fatores ambientais atingiu um limiar crítico. Para o mesmo período, o alerta oficial emitido pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) para a RMR era de Risco Moderado.

Contudo, como pode ser visto na Figura 16, os eventos que se seguiram, com múltiplos pontos de alagamento intransitáveis e deslizamentos de barreiras em diversas áreas da cidade, demonstraram um impacto severo, com consequências mais condizentes com um cenário de risco elevado. Há aparente discrepância entre o alerta oficial Moderado e o resultado do modelo proposto Alto — que se alinham mais com as consequências reais observadas.



Figura 16. Manchetes com alerta de chuva

A análise sugere que, no dia 14 de maio, (Figuras 17 e 18) a precipitação embora classificada como moderada, ocorreu durante um intervalo de maré alta. Esta condição reduziu a capacidade de escoamento da cidade, potencializando drasticamente o impacto da chuva e elevando o risco agregado para um nível alto.

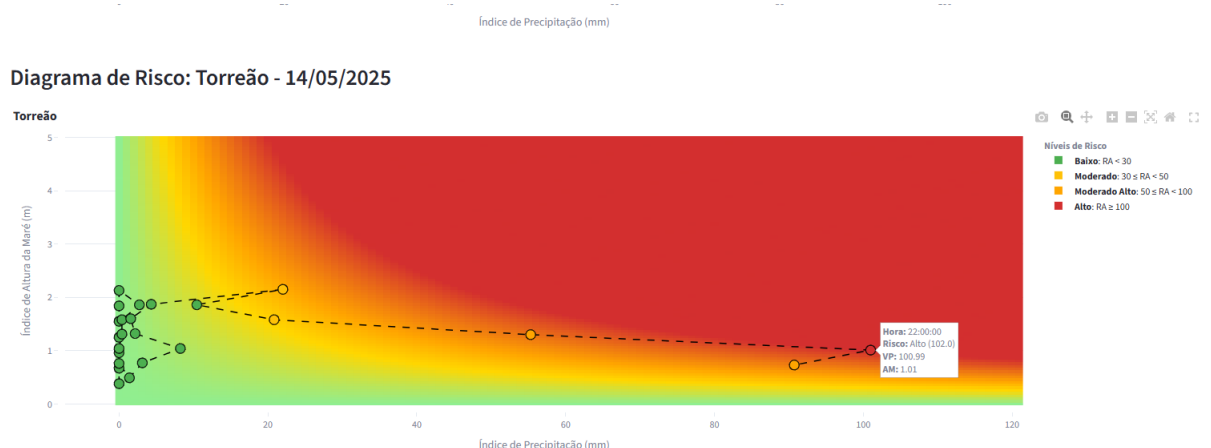


Figura 17. Alto risco de alagamentos. Estação: Torreão - noite do dia 14 de maio. Fonte: própria autora.

Diagrama de Risco: RECIFE - APAC - 14/05/2025

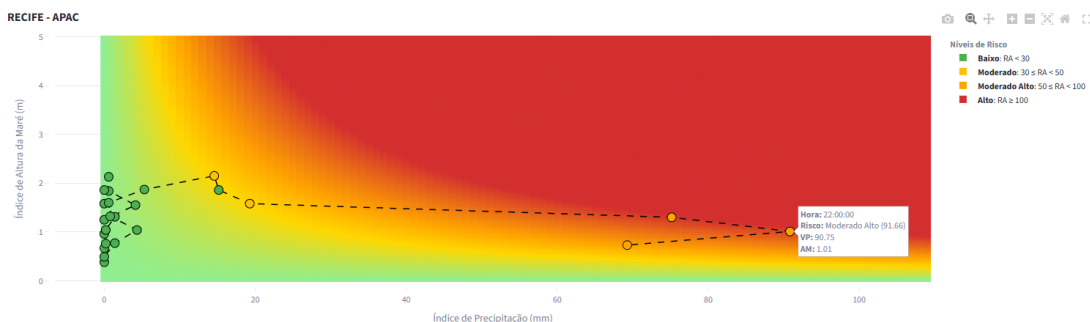


Figura 18. Risco Moderado Alto de alagamentos. Estação: RECIFE-APAC - noite do dia 14 de maio. Fonte: própria autora.

Este caso ilustra a importância de se integrar a dinâmica das marés em modelos de previsão de alagamentos para cidades costeiras como o Recife. Mesmo estando em fase de teste, a análise demonstra que o modelo proposto neste trabalho tem potencial para servir como uma ferramenta complementar valiosa aos sistemas de alerta existentes, oferecendo uma camada adicional de sensibilidade ao identificar cenários onde a combinação de chuva e maré pode gerar impactos mais severos.

Este é um modelo inicial para o cálculo do risco de alagamentos e inundações. Como trabalhos futuros os índices usados para calcular o risco podem ser aprimorados com informações obtidas a partir de imagens de satélites, dados meteorológicos, além da expansão da área de cobertura para outras regiões costeiras. Assim, os mapas gerados serão atualizados a cada hora do dia e em cada localidade. Com isso será possível obter uma informação dinâmica do risco associado a cada localidade e assim utilizar os diagramas como uma ferramenta de apoio a tomada de decisão, como por exemplo: auxiliar a população para decidir o melhor trajeto para deslocamentos na cidade em dias de chuva evitando pontos de alagamentos, auxiliar gestores na necessidade de intervenções imediatas em determinadas regiões, entre outras.

Referências

- [ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO 2025] ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2025). *As enchentes no Rio Grande do Sul: lições, desafios e caminhos para um futuro resiliente*. ANA, Brasília. 57 p. il. ISBN 978-65-88101-73-5.
- [Araújo et al. 2011] Araújo, A. M., Mineiro, A. L. B., and Cantalice, J. R. d. B. (2011). Estimativa do potencial de sedimentação e erosão: caso manguezal do pina, recife (pe). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 16(2):133–140.
- [Català et al. 2021] Català, Marchena, Conesa, and Palacios (2021). Monitoring and analysis of covid-19 pandemic: The need for an empirical approach. *Front. Public Health*.

[Català 2020] Català, M. e. a. (2020). Metodologia para monitoramento da covid-19: Biocom-sc. <https://drive.google.com/file/d/1Orwg6iwcClSNU4a8SXoqwKNpvdbW-dgj/view>. Acesso em: 05 mai. 2025.

[Collischonn et al. 2025] Collischonn, W., Fernando Mainardi Fan, I. P., Dornelles, F., Paiva, R., Medeiros, M. S., Michel, G. P., Filho, F. J. C. M., Moraes, S. R., Marcuzzo, F. F. N., Michel, R. D. L., Beskow, T. L. C., Beskow, S., Fernandes, E. H. L., Leonardo Laipelt dos Santos, A. R., Kobiyama, M., Collares, G. L., Buffon, F., Duarte, E., Lima, S., Meirelles, F. S. C., and Piccilli, D. G. A. (2025). The exceptional hydrological disaster of april-may 2024 in southern brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, 30:e1. Acesso em: 01 ago. 2025.

[Cordeiro et al. 2021] Cordeiro, G. M., Albuquerque, J. O., Nobrega, F., Souza, D., Dantas, A., Lopez-Codina, D., and de Lima Filho, J. L. (2021). Covid-19 in south america-why geometrical risks must be combined with statistical analysis to improve emergency response. In *Latest updates on SARS-CoV-2 (Corona Virus)*, volume 1, chapter 6, pages 48–56.

[DEFESA CIVIL DE PERNAMBUCO 2025] DEFESA CIVIL DE PERNAMBUCO (2025). Histórico institucional. <https://www.defesacivil.pe.gov.br/institucional/historico>. Acesso em: 21 jun. 2025.

[G1 2025] G1 (2025). Chuvas causaram alagamentos e deslizamento de barreira em cidades do grande recife; confira antes e depois. <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2025/05/15/chuvas-causaram-alagamentos-e-deslizamento-de-barreira-em-cidades-do-ghtml>. Acesso em: 21 jun. 2025.

[Gomes 2022] Gomes, I. d. M. L. (2022). Alagamentos e inundações: uso de visualização geométrica para análise de risco associados ao volume de chuva e altura das marés na cidade do recife.

[Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

[IRRDR – Instituto de Risco e Resposta a Desastres 2020] IRRDR – Instituto de Risco e Resposta a Desastres (2020). Metodologia de análise da covid-19. <https://drive.google.com/file/d/1Orwg6iwcClSNU4a8SXoqwKNpvdbW-dgj/view>. Acesso em: 05 mai. 2025.

[JC Online 2016] JC Online (2016). Trágica cheia de 1966 no recife está completando 50 anos. <https://jc.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2016/05/30/tragica-cheia-de-1966-no-recife-esta-completando-50-anos-237926.php>. Acesso em: 21 jun. 2025.

[Lima et al. 2025] Lima, L. D. d. B., Silva, C. E. M. d., Oliveira, C. M. E. d., Junior, J. C. R., and Gomes, D. P. P. (2025). Mapeamento de áreas suscetíveis a inundações na cidade do recife-pe/brasil. *Espaço em Revista*, 27(1):21–44.

- [Marengo et al. 2023] Marengo, Alcantara, Cunha, Seluchi, Nobre, Dolif, Goncalves, Assis, Dias, Cuartas, Bender, Ramos, Mantovani, Alvalá, and Moraes (2023). Flash floods and landslides in the city of Recife, northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90:103594. Acesso em: 20 mai. 2025.
- [National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 2025] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2025). NOAA's transformative Flood Inundation Mapping expands to 60% of U.S. <https://www.noaa.gov/news-release/noaas-transformative-flood-inundation-mapping-expands-to-60-of-us>. Acesso em: 08 set. 2025.
- [Oliveira et al. 2024] Oliveira, N. S., Mattos, E. V., and Reboita, M. S. (2024). DASH-BOARD INTERATIVO DE DADOS DE QUEIMADAS UTILIZANDO O FRAMEWORK STREAMLIT DO PYTHON. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, page 319955. Iniciação Científica - Pôster.
- [Peixoto et al. 2019] Peixoto, F. d. S., Rodrigues, J. P. B., and Albuquerque, P. I. d. M. (2019). Gestão integrada dos recursos hídricos e a problemática das inundações urbanas. *Geografia (Londrina)*, 28(1):187–206.
- [World Weather Attribution 2024] World Weather Attribution (2024). Climate change made the floods in southern Brazil twice as likely. <https://www.worldweatherattribution.org/climate-change-made-the-floods-in-southern-brazil-twice-as-likely/>. Acesso em: 30 jul. 2025.