

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE RISCO EM RECURSOS HÍDRICOS USANDO LLM: ESTUDO DE CASO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO BANABUIÚ - CEARÁ

*Jorgiane Pires Bezerra¹ ; Tatiane Lima Batista², Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins³,
Francisco de Assis de Souza Filho⁴*

Abstract: In the context of water resources management, risk analysis is especially important in regions with water and climate vulnerabilities, such as the Brazilian Northeast (NEB). This study explored the use of artificial intelligence to assess the risks of water supply shortages in a river basin using LLM and risk analysis techniques, based on the watershed plan of the Banabuiú River Basin. The LLM used was GPT-4o, through the Prompt Engineering technique known as RAG (Retrieval-Augmented Generation). The three methods applied (Check-list, FMEA, and What-if) identified water shortage risks in the Banabuiú Basin related not only to climate factors but also to management, monitoring, and environmental degradation. Each method contributed complementary perspectives. The LLM demonstrated the ability to coherently extract the main risks from the water resources plan, reinforcing its potential as a support tool for water management.

Resumo: No contexto da gestão de recursos hídricos, a análise de risco é especialmente importante em áreas com vulnerabilidades hídricas e climáticas como o Nordeste Brasileiro (NEB). Este trabalho abordou o uso inteligência artificial com o objetivo de avaliar os riscos de desabastecimento hídrico em uma bacia hidrográfica usando LLM e técnicas de análise de risco a partir do plano de bacia hidrográfica da Região Hidrográfica do Banabuiú. O LLM usado foi o GPT-4o a partir da técnica de Engenharia de Prompt RAG (Retrieval-Augmented Generation). Os três métodos aplicados (Checklist, FMEA e What-if) identificaram riscos de desabastecimento hídrico na Bacia do Banabuiú relacionados não apenas ao clima, mas também à gestão, monitoramento e degradação ambiental. Cada método contribuiu com perspectivas complementares. O LLM demonstrou capacidade de extrair, de forma coerente, os principais riscos a partir do plano de recursos hídricos, reforçando seu potencial como ferramenta de apoio à gestão hídrica.

Palavras-Chave – Checklist de riscos, FMEA, What-if

INTRODUÇÃO

O Nordeste Brasileiro (NEB) é uma região que historicamente lida com eventos de secas recorrentes e prolongadas. O estado do Ceará, particularmente, possui área predominantemente semiárida com alta variabilidade pluviométrica, altas taxas de evaporação e solos cristalinos em

1) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: jorgianepires@alu.ufc.br

2) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400-900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: tatiane@crateus.ufc.br

3) FUNCEME. Avenida Rui Barbosa, 1246. Aldeota, Fortaleza, Ceará, Brasil. CEP: 60115-221. (85) 31011088. espr.martins@funceme.br

4) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: assis@ufc.br

Na gestão de recursos hídricos em regiões com vulnerabilidade hídrica e climática, o aprimoramento e a modernização das ferramentas de análise de riscos são muito bem-vindos. O objetivo da análise de riscos é caracterizar e propor estratégias para lidar com as incertezas e possíveis eventos adversos. No contexto da gestão de recursos hídricos, diversas técnicas de análise de risco são usadas e têm sido desenvolvidas na última década (Mpindou *et al.*, 2022).

Recentemente também, os Modelos Largos de Linguagem (LLMs) têm se mostrado ferramentas promissoras em diversas tarefas na área de recursos hídricos por possuírem alta capacidade de análise da linguagem natural. Exemplos incluem desenvolvimento de especialistas virtuais em hidrologia (Ren *et al.*, 2024) e modelagem de sistemas de distribuição de água e tomada de decisão (Goldshtein *et al.*, 2025), oferecendo suporte para comunicação de riscos e elaboração de políticas públicas (Ray, 2023).

Diante desse contexto, este trabalho busca incorporar o uso dos LLMs na análise de risco em recursos hídricos a partir de um estudo de caso em uma região hidrográfica no estado do Ceará. O objetivo é, portanto, avaliar os riscos de desabastecimento hídrico em uma bacia hidrográfica usando LLM e técnicas de análise de risco a partir do plano de bacia hidrográfica da região. Como objetivos específicos, pretende-se: a) avaliar se a partir do documento do plano de bacia é possível identificar os principais riscos de desabastecimento hídrico b) avaliar o uso do modelo de LLM utilizado e c) comparar os métodos de avaliação de risco, identificando aspectos de complementaridade.

Este trabalho justifica-se diante da importância de um planejamento eficiente para gestão de bacias hidrográficas em regiões semiáridas, onde a seca é um fenômeno recorrente. A proposta se destaca ao explorar o potencial dos LLMs como ferramentas inovadoras para dar suporte a essas análises. Além disso, o estudo busca avaliar comparativamente diferentes métodos, evidenciando suas vantagens, limitações e potencial de complementaridade. Dessa forma, a pesquisa visa contribuir para análise de risco em recursos hídricos especialmente em contextos de maior vulnerabilidade climática e hídrica.

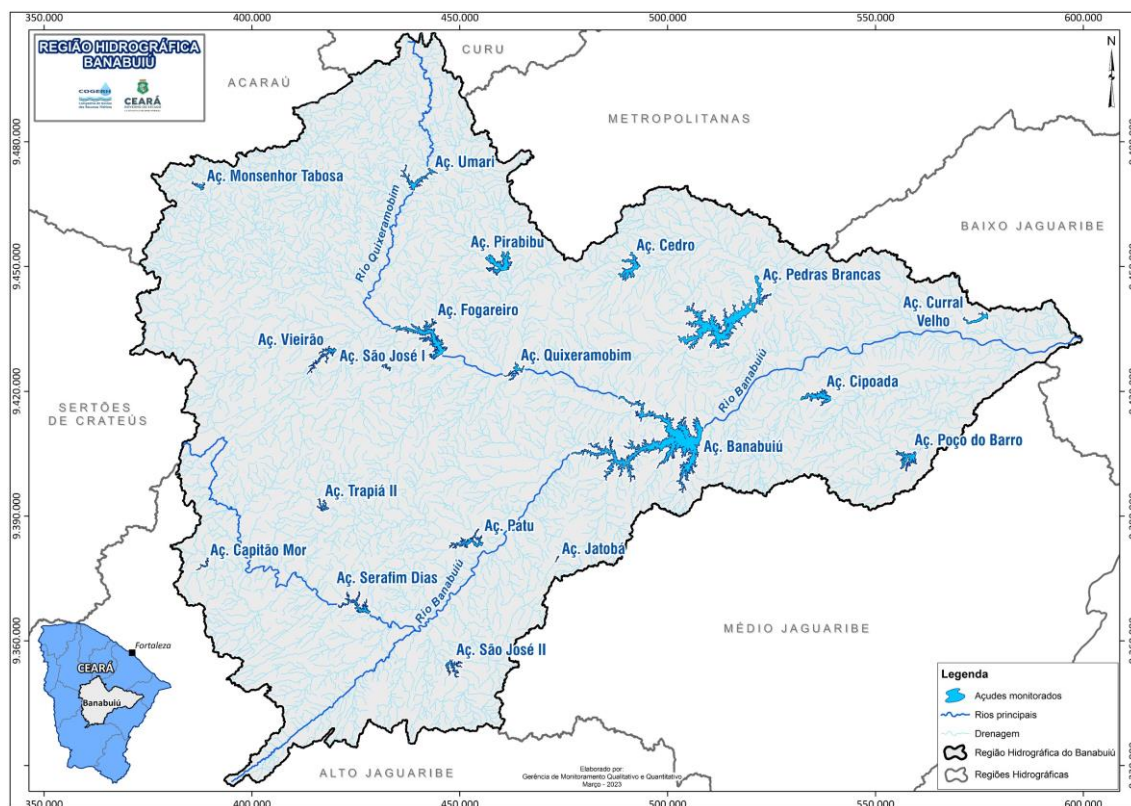
MÉTODO

A área de estudo da pesquisa foi a Região Hidrográfica do Banabuiú (RHB) que se situa na porção central do estado do Ceará (Figura 1), entre as latitudes 4°28'03" S - 6°6'19" S e longitudes 38°06'02" W - 40°10'19" W. A região possui 19 açudes, sendo 5 de grande porte, 10 de médio porte e 4 de pequeno porte gerenciados pela COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. O maior é o açude Banabuiú, construído em 1966 que barra o rio Banabuiú (COGERH, 2022).

O delineamento da pesquisa (Figura 2) conta com 3 etapas principais: levantamento dos dados (inputs), aplicação do modelo de LLM e análise dos resultados (outputs).

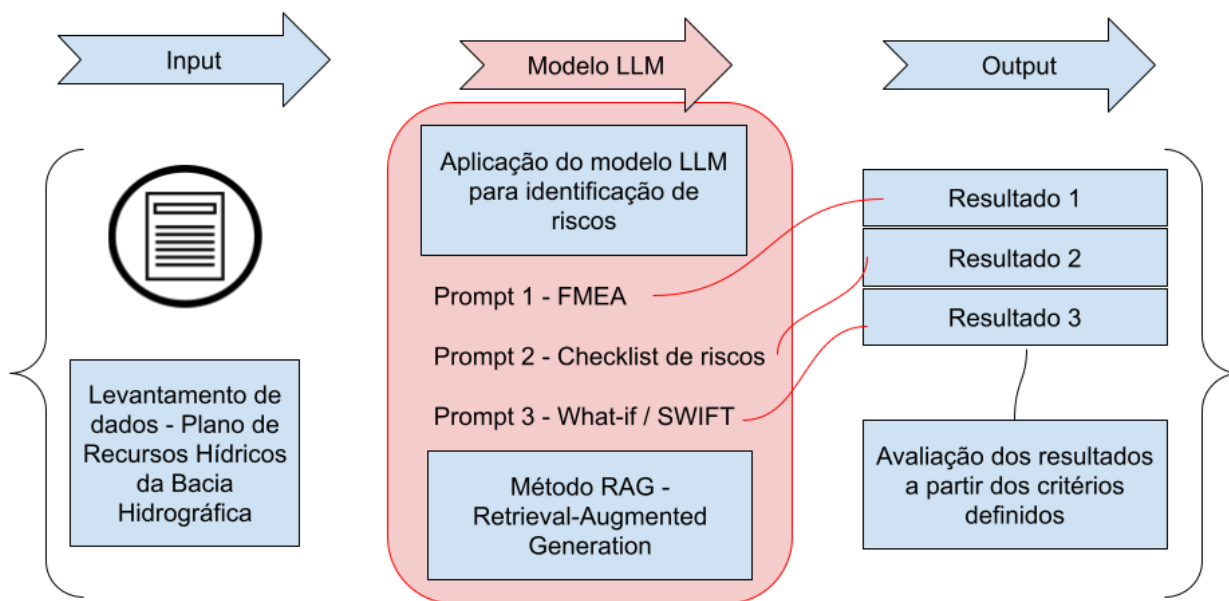
O documento usado como entrada no LLM foi o Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Banabuiú, disponível publicamente no site da COGERH1. Foi utilizado o documento intitulado Síntese do plano da região hidrográfica do Banabuiú com 135 páginas.

Figura 1 – Região Hidrográfica do Banabuiú



Fonte: COGERH (2018)

Figura 2 – Delineamento da pesquisa



O LLM usado foi o GPT-4o a partir da técnica de Engenharia de Prompt RAG (*Retrieval-Augmented Generation*) que combina recuperação de informações externas com geração de texto, fazendo com que as respostas finais do modelo sejam mais precisas e baseada em um conjunto de documentos relevantes para o problema (Goldshtein *et al.*, 2025). No caso, o documento externo que foi fornecido ao modelo foi o Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica. Foram aplicadas diferentes metodologias de identificação e avaliação de riscos (Quadro 1), cada uma estruturada de acordo com seus respectivos procedimentos analíticos.

O FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) é um método que identifica potenciais falhas em sistemas ou processos, analisa seus efeitos e causas e propõe ações para lidar com os riscos (IEC 60812, 2018). Os riscos são classificados a partir de uma pontuação considerando critérios de severidade, ocorrência e detecção, gerando o RPN, Número de Prioridade de Risco.

O Checklist de riscos é um método que utiliza uma lista base de riscos para identificar os riscos existentes em um processo ou sistema (ABNT, 2012).

O What-if/SWIFT é uma técnica baseada na construção de perguntas hipotéticas do tipo “E se...?” para analisar possíveis situações de risco e seus impactos. (ABNT, 2012)

Em seguida, os resultados foram analisados a partir das seguintes questões: a) o Plano de Recursos Hídricos da bacia permite identificar os principais riscos de desabastecimento hídrico? b) o LLM conseguiu fornecer respostas pertinentes e alinhadas ao contexto apresentado? e c) os métodos produziram respostas semelhantes?

Quadro 1 – Métodos de Análise de Riscos com Suporte de IA Generativa

Prompt 1 - Método FMEA	Prompt 2 - Checklist de Riscos	Prompt 3 - Método What-if / SWIF
Foi aplicada a metodologia FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) para identificar modos de falha, suas causas, efeitos e avaliar a criticidade dos riscos relacionados ao risco de desabastecimento na Bacia Hidrográfica do Banabuiú. A análise foi realizada com base no conteúdo do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Banabuiú, combinando interpretação explícita e inferência técnica. Os modos de falha foram priorizados pelo cálculo do RPN (Risk Priority Number).	Foi aplicado um Checklist de Riscos estruturado para verificar a presença, ausência ou menção implícita de categorias relevantes de risco no sistema analisado, conforme descrito no Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Banabuiú. A análise confrontou uma lista pré-definida de categorias de risco com o conteúdo do documento, permitindo interpretação crítica e identificação de lacunas ou riscos adicionais.	Foi utilizado o método What-if / SWIFT para antecipar cenários de risco plausíveis para o sistema hídrico da Bacia do Banabuiú. Cenários hipotéticos foram formulados com base em palavras-gatilho e perguntas do tipo “E se...?”, com avaliação das possíveis consequências, criticidade e identificação de respostas ou controles previstos no documento. A abordagem foi baseada em lógica funcional e contexto técnico, mesmo quando os cenários não estavam explicitamente descritos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise estão sistematizados em três quadros. O Quadro 2 apresenta a aplicação do método FMEA, identificando modos de falha, causas, efeitos e respectivas priorizações de risco (RPN), com base nas evidências técnicas extraídas do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Banabuiú. O Quadro 3 sintetiza a verificação da presença, ausência ou menção implícita das categorias de risco definidas no Checklist de Riscos, detalhando as evidências documentais associadas a cada situação identificada. O Quadro 4 compila os cenários hipotéticos derivados da aplicação do método What-if / SWIFT, estruturados em função de palavras-gatilho e articulados com a avaliação de consequências potenciais, criticidade e existência (ou não) de medidas mitigadoras no documento analisado.

Quadro 2 – FMEA

Modo de Falha	Causa	Efeito	Severidade	Ocorrência	Deteção	RP N	Trecho do documento que fundamenta a identificação (Evidência Técnica)
Redução crítica nos volumes dos reservatórios	Prolongadas estiagens e irregularidade na recarga dos mananciais	Comprometimento do abastecimento humano e produtivo	9	8	5	360	“A irregularidade das chuvas, associada ao aumento da demanda, compromete a disponibilidade e hídrica para diversos usos”
Conflito entre irrigação e consumo humano	Uso desordenado da água em períodos de escassez	Redução da oferta para abastecimento humano em municípios dependentes	8	7	6	336	“O uso para irrigação apresenta conflitos com o abastecimento humano, especialmente em anos críticos”
Governança e gestão fragmentada	Falta de coordenação entre usuários e instituições	Ineficiência nas ações preventivas e resposta a crises hídricas	7	6	6	252	“Há carência de articulação institucional e ausência de um sistema contínuo de governança”
Déficit de monitoramento e dados em tempo real	Limitações técnicas nos sistemas de medição e acompanhamento	Falta de previsão e resposta rápida a eventos de escassez hídrica	6	5	7	210	“A falta de dados em tempo real limita a eficiência da gestão e a tomada de decisão”
Degradação ambiental e cobertura vegetal insuficiente	Uso do solo inadequado e desmatamento	Redução da infiltração e recarga, aumento da erosão e assoreamento	7	6	4	168	“Áreas degradadas reduzem a capacidade de recarga dos mananciais e ampliam riscos de assoreamento”

Quadro 3 – Checklist de riscos

Evidência / Situação Identificada	Categorias de Risco	Classificação	Trecho / Evidência Documental
Assoreamento e perda da capacidade de reservatórios	Falha estrutural, Riscos ambientais e climáticos	Explícito / Implícito	“Problemas como o assoreamento dos corpos hídricos e perda de capacidade de acumulação dos reservatórios”.
Falta de controle sobre captações e uso da água, inclusive não outorgadas	Falha operacional, Vulnerabilidades institucionais	Explícito	“Falta de controle sobre as captações e usos da água... dificuldade de coordenação entre os usuários e ausência de instrumentos eficazes”.
Estiagens prolongadas e irregularidade climática	Riscos ambientais e climáticos	Explícito	“Eventos críticos como estiagens prolongadas... impacto sobre os volumes disponíveis nos açudes”.
Fragilidade institucional e ausência de articulação entre órgãos gestores e usuários	Vulnerabilidades institucionais, Falha operacional	Explícito	“Fragilidade institucional local e falta de articulação entre usuários e entes da gestão hídrica”.
Ausência de monitoramento contínuo e sistemas de alerta	Comunicação de risco e alerta, Falha operacional	Explícito	“Ausência de sistemas de monitoramento em tempo real... dificulta a atuação preventiva diante de eventos críticos”.
Crescimento da demanda sem proporcional aumento na oferta	Riscos ambientais e climáticos, Falha operacional	Implícito	“Tendência de crescimento da demanda... pode pressionar ainda mais os recursos hídricos disponíveis”.
Conflito entre usos (irrigação x abastecimento humano), especialmente em contextos de escassez	Falha operacional, Vulnerabilidades sociais	Explícito	“A irrigação aparece como a segunda maior demanda e, em períodos de estiagem, entra em conflito com o consumo humano prioritário”.
Inexistência de referência a marcos legais, normas técnicas ou conformidade com legislação vigente	Conformidade legal ou regulatória	Ausente	O plano não menciona nenhum dispositivo legal, norma técnica ou exigência regulatória explícita no conteúdo analisado.

Quadro 4 - Cenários Hipotéticos – Risco de Desabastecimento (Método What-if / SWIFT)

Palavra-gatilho	Cenário Hipotético	Consequências Potenciais	Criticidade	Resposta ou Medida Mitigadora no Documento
Falha	Falha na infraestrutura de captação ou degradação por assoreamento.	Redução da capacidade de armazenamento e distribuição hídrica.	Alta	O documento aponta “assoreamento dos corpos hídricos e perda de capacidade de acumulação dos reservatórios”.
Interrupção	Interrupção do fornecimento em comunidades isoladas devido à seca prolongada.	Risco sanitário, colapso de serviços básicos e insegurança hídrica grave.	Alta	A seca é mencionada como “evento crítico e recorrente”, mas não há plano específico para atendimento emergencial.
Sobrecarga	Sobrecarga de demanda nos períodos críticos por irrigação e crescimento urbano.	Exaustão dos volumes reservados e restrição ao uso prioritário humano.	Alta	Menciona o “aumento da demanda” e “conflitos entre usos”, mas sem definir limites operacionais ou prioridades quantitativas.
Ausência de controle	Captações irregulares e não fiscalizadas comprometem o planejamento da alocação.	Uso ineficiente, redução da água disponível para usos prioritários e conflitos entre usuários.	Alta	O plano aponta “falta de controle sobre captações difusas e não outorgadas” como vulnerabilidade grave.
Evento extremo	Seca multianual sem medidas de adaptação implementadas.	Desabastecimento generalizado, colapso de usos múltiplos e impactos sociais intensificados.	Alta	O plano reconhece o cenário, mas não detalha medidas robustas além de sugestões como “uso racional” e “reuso”.
Demanda excessiva	Crescimento desordenado da demanda por irrigação e expansão urbana.	Redução da oferta para abastecimento humano e riscos de insustentabilidade do sistema.	Alta	O documento afirma que “há tendência de crescimento da demanda hídrica”, porém não apresenta estratégias quantitativas de controle.
Falta de comunicação	Ausência de sistemas de alerta e comunicação preventiva em caso de crise hídrica.	Falha na mobilização comunitária, ações reativas e aumento de perdas socioeconômicas.	Média	Reconhece “ausência de sistemas de monitoramento em tempo real e dificuldade de comunicação com usuários”.

Os resultados obtidos a partir da aplicação dos três métodos evidenciaram diferentes dimensões do risco de desabastecimento hídrico na Bacia do Banabuiú. Embora a variabilidade climática constitua um fator relevante, as análises indicaram que a exposição ao risco decorre também de falhas institucionais e operacionais persistentes.

O FMEA (Quadro 2) indicou que as falhas mais críticas se concentram na redução dos volumes armazenados, no conflito entre usos em aspectos de gestão, especialmente relativos a ações preventivas e de resposta rápida às crises hídricas. A dependência de sistemas de armazenamento em um contexto de secas recorrentes e irregularidade da afluência aos reservatórios, expõe a bacia a uma condição estruturalmente vulnerável. O déficit de monitoramento em tempo real compromete a capacidade de antecipação e resposta, aumentando o risco de falhas na operação do sistema em situações de variabilidade climática acentuada. A degradação ambiental, ainda que avaliada com menor criticidade no RPN, contribui para a redução da infiltração e aumento do assoreamento,

agravando as limitações de armazenamento.

O Checklist de Riscos (Quadro 3) identificou que a Bacia do Banabuiú apresenta vulnerabilidades relevantes que ampliam o risco de desabastecimento em cenários de escassez hídrica. A presença de conflitos entre usos da água, o assoreamento e a ausência de sistemas de monitoramento contínuo configuram um conjunto de fragilidades que coincidem com o que foi identificado no método anterior. O método identificou, adicionalmente, risco relacionado à ausência de controle sobre as retiradas, crescimento da demanda. Além disso, sugeriu um risco que está ausente no documento, a inexistência de referência a marcos legais.

O método What-if / SWIFT (Quadro 4) apresentou cenários hipotéticos de falhas e as consequências potenciais. Cenários de seca multianual, sobrecarga de demanda e retirada de água sem controle foram associados a riscos elevados de desabastecimento. A inexistência de sistemas eficazes de alerta e comunicação, aliada à ausência de mecanismos de controle sobre as retiradas, aumenta a probabilidade de colapso em situações de pressão acentuada sobre os recursos hídricos. Os cenários analisados estão bem alinhados aos riscos apresentados anteriormente pelos outros métodos.

Por fim, a análise integrada dos três métodos indicou que o risco de desabastecimento na Bacia do Banabuiú não se restringe à variabilidade climática. Os riscos podem estar associados à gestão, ausência de monitoramento adequado, controle insuficiente sobre as retiradas e a degradação ambiental atuam de forma combinada na redução da resiliência da bacia em situações de crise. De modo geral, os três métodos empregados permitiram identificar situações de risco similares, embora com abordagens e ênfases distintas.

O método do Check-list oferece uma visão panorâmica dos riscos a partir de categorias previamente estabelecidas, sem a preocupação de hierarquizá-los. Ele mostra-se, portanto, mais adequado para uma análise inicial. Complementarmente, o método FMEA, elenca as falhas e seus efeitos em ordem de gravidade, destacando os riscos que demandam maior atenção. Já o método What-if, apresenta a possibilidade de imaginar situações hipotéticas e suas prováveis consequências diante do contexto e do problema analisado, podendo complementar a análise trazendo uma característica mais operacional e concreta para a gestão. Assim, embora baseados na identificação de riscos comuns, os três métodos apresentam características complementares no contexto da análise de risco e demonstram um potencial interessante quando aplicados de forma integrada.

O documento Plano de Recursos Hídricos da Região, mesmo em sua síntese, conseguiu contemplar bem os principais riscos associados à falha no abastecimento hídrico da região se configurando como um instrumento de muita importância para os gestores e para a comunidade.

O modelo de LLM mostrou-se eficaz ao capturar do documento, a partir das instruções dadas, de forma adequada os principais riscos relacionados ao desabastecimento hídrico na região, evidenciando o potencial do uso de ferramentas baseadas em inteligência artificial como apoio à gestão dos recursos hídricos. É importante mencionar que a qualidade das respostas nesse tipo de análise depende da qualidade do documento utilizado como entrada para o modelo e que a interpretação dos resultados requer validação crítica de especialistas, sobretudo para captar nuances locais e evitar extrapolações indevidas.

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou os riscos de desabastecimento hídrico em uma bacia hidrográfica usando LLM e técnicas de análise de risco a partir do plano de bacia hidrográfica da região. A partir do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Banabuiú, o LLM empregado foi capaz de identificar de maneira

consistente os principais fatores de risco para o desabastecimento hídricos, destacando a variabilidade climática, fragilidades institucionais, necessidade de aprimoramento no monitoramento, especialmente para respostas rápidas e preventivas à seca, além de degradação ambiental e uso não controlado de água. Além disso, vinculou esses fatores a trechos específicos do documento, oferecendo insumos textuais estruturados que facilitam a aplicação dos métodos empregados subsequentemente e a interpretação dos resultados.

A comparação dos três métodos evidenciou que: o Checklist fornece uma triagem inicial ampla, útil na etapa de organização preliminar dos riscos; O FMEA agrega valor ao priorizar falhas segundo sua criticidade, orientando a locação de recursos para mitigação e o What-if acrescenta um nível operacional, permitindo a exploração de cenários hipotéticos e a antecipação de consequências. Assim, o uso articulado dessas técnicas, apoiado por LLM mostra-se capaz de produzir uma avaliação de risco mais robusta.

Os resultados demonstraram que LLMs podem ser incorporados, de forma eficaz, ao arcabouço tradicional de análise de riscos em recursos hídricos, ampliando a capacidade de síntese e comunicação dos resultados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO/IEC 31010:2012 – Gestão de riscos – Técnicas de avaliação de riscos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- COGERH – COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. *Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica do Banabuiú*. Fortaleza: COGERH, 2021a.
- GOLDSHTEIN, Y.; PERELMAN, G.; SCHUSTER, A.; OSTFELD, A. Large Language Models for Water Distribution Systems Modeling and Decision-Making. 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2503.16191>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. *IEC 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*. 3rd ed. Geneva: IEC, 2018.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- MPINDOU, G. O. M. K.; BUENO, I. E.; RAMÓN, E. C. Risk analysis methods of water supply systems: comprehensive review from source to tap. *Applied Water Science*, v. 12, n. 4, p. 1–20, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-022-01586-7>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- RAY, P. P. Leveraging Deep Learning and Language Models in Revolutionizing Water Resource Management, Research, and Policy Making: a case for chatgpt. *ACS ES&T Water*, v. 3, n. 8, p. 1984–1986, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsestwater.3c00264>. Acesso em: 7 jun. 2025.

REN, Y. et al. WaterGPT: training a large language model to become a hydrology expert. *Water*, v. 16, n. 21, p. 3075, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/w16213075>. Acesso em: 7 jun. 2025.