

Simulações para Governança Hídrica na Amazônia Através de Riscos com Equações Diferenciais Estocásticas Retroativas

Hinton Bentes

Universidade da Amazônia – UNAMA

falecom@hintonbentes.com.br

Resumo: O artigo tem como objetivo desenvolver um modelo dinâmico de riscos hidrogeológicos e financeiros associados à instalação de 15 novos poços na Amazônia brasileira no município de Breu Branco (PA). A base teórica combina Equações Diferenciais Estocásticas Retroativas (BSDEs), o método GOD de vulnerabilidade hídrica e a Lógica Dedutiva e Indutiva de Mill (LDI). A abordagem metodológica inclui estudo de caso, análise documental, coleta de dados empíricos via SIAGAS e simulações com distribuição triangular e ruído browniano, totalizando 10.000 iterações. Os resultados demonstram a viabilidade técnica e econômica do projeto, com capacidade de produção hídrica acima da demanda em 91% das simulações e custo total médio dentro do orçamento. O modelo propõe prêmios de seguro dinâmicos para mitigação de riscos e sugere a viabilidade de PPPs para financiamento. O estudo contribui teoricamente ao integrar lógica filosófica, métodos hidrológicos e modelagem estocástica em contexto amazônico. Como implicações práticas, oferece suporte à tomada de decisão pública em saneamento e planejamento territorial. Socialmente, promove o direito à água potável e ao desenvolvimento sustentável. A principal limitação refere-se à ausência de séries climáticas históricas detalhadas, sugerindo avanços futuros com variáveis meteorológicas e simulações regionais. O modelo apresenta valor científico ao propor framework replicável e orientado por dados para municípios vulneráveis.

Palavras-Chave: Governança territorial. Saneamento básico. Políticas públicas. Parcerias público-privadas

Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS): 06 – Água Potável e Saneamento

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável constitui um desafio global crítico, especialmente em regiões marcadas por desigualdades socioeconômicas e vulnerabilidades ambientais, como a Amazônia brasileira. A Organização das Nações Unidas (ONU) destaca que 2,2 bilhões de pessoas carecem de acesso à água potável gerenciada de forma segura, sendo o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) Nº 6, água potável e saneamento, uma diretriz central para enfrentar essa crise até 2030 (ONU, 2015).

No contexto brasileiro, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) aponta que apenas 83,7% da população urbana tem acesso a abastecimento de água adequado, com disparidades regionais significativas, especialmente na Região Norte, onde o índice é inferior à média nacional (ANA, 2022).

No estado do Pará, que integra a Amazônia Legal, a gestão de recursos hídricos enfrenta desafios adicionais devido à complexidade hidrogeológica, mudanças climáticas e pressões demográficas (EMBRAPA, 2020).

Nesse cenário, o município de Breu Branco, com 45.712 habitantes e consumo estimado de 4.571,2 m³/dia, exemplifica a necessidade de soluções inovadoras para garantir a sustentabilidade hídrica, considerando os 57 poços existentes, existe a necessidade de uma projeção de 15 novos poços para atender a sociedade, UNESCO (2023), e o mapeamento dos riscos associados à vulnerabilidade de aquíferos.

A relevância deste estudo reside na interseção entre administração pública, sustentabilidade hídrica, finanças públicas e gestão de riscos, áreas cruciais para o desenvolvimento sustentável da Amazônia Legal e alinhado ao ODS 6, o trabalho propõe a modelagem dinâmica de riscos hidrogeológicos e financeiros associados à instalação de poços, utilizando Equações Diferenciais Estocásticas Retroativas (BSDEs) como teoria principal.

As BSDEs permitem a quantificação de incertezas temporais, como falhas operacionais, contaminação de aquíferos e variações climáticas, oferecendo uma abordagem robusta para a gestão de riscos dinâmicos (El Karoui et al., 1997).

Complementarmente, o método GOD (Foster & Hirata, 1998) é empregado para mapear a vulnerabilidade hídrica, enquanto a lógica dedutiva e indutiva de Mill (LDI) publicada em 1843 fundamenta a inferência científica a partir dos dados disponíveis.

Pesquisadores afirmam que “planejar o espaço urbano, nesse paradigma, exige compreender que cada âmbito atua de acordo com suas próprias operações, o que exige um

**26 a 28 | AGO | 2025**

BELÉM | PARÁ | BRASIL

ISSN: 2526-9518

manejo comunicativo no seu fazer” (Elmescany & Vidal, 2022, p. 12) e o debate ambiental enfatiza a necessidade de abordagens interdisciplinares para enfrentar crises hídricas, pois “a integração de métodos quantitativos e qualitativos é essencial para compreender a complexidade dos sistemas hídricos em regiões de alta vulnerabilidade ambiental” (Bentes et al., 2025, p. 150).

Da mesma forma, o mapeamento de análise de dados na gestão hídrica, argumentando que “a modelagem estocástica permite otimizar a alocação de recursos em contextos de incerteza, promovendo a sustentabilidade hídrica” (Borges de Carvalho et al., 2022, p. 8), tendo assim nessas perspectivas o reforço da relevância de abordagens matemáticas e lógicas para enfrentar desafios regionais.

Diante desse contexto, este estudo levanta a seguinte questão norteadora: Como modelar dinamicamente os riscos hidrogeológicos e financeiros associados à instalação de 15 novos poços em Breu Branco, considerando vulnerabilidades hídricas, custos de infraestrutura e arranjos de governança territorial?

O objetivo principal é desenvolver um modelo para quantificar riscos dinâmicos e propor prêmios de seguro que viabilizem o financiamento de poços, alinhados à Lei do Saneamento (Lei nº 14.026/2020).

A literatura atual carece de estudos que integrem modelagem estocástica avançada com dados hidrogeológicos locais e arranjos de governança, especialmente na Amazônia Legal e este trabalho preenche essa lacuna ao combinar o método GOD, BSDEs e a lógica de Mill, oferecendo implicações práticas para políticas públicas e parcerias público-privadas (PPPs).

A originalidade do estudo reside na aplicação de modelo estatístico a um contexto municipal amazônico, integrando dados específicos (população, vazão média de 22,5 m³/h, custo de R\$ 56.930,00 por poço) com ferramentas matemáticas avançadas e arranjos institucionais a pesquisa contribui para a gestão sustentável de recursos hídricos, promovendo o acesso à água potável em Breu Branco e fornecendo um modelo escalável para outros municípios da Amazônia Legal, com impactos sociais e ambientais significativos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O trabalho dialoga com experiências de governança hídrica implementadas sob a Diretiva Quadro da Água da União Europeia, frameworks do Integrated Water Resources

Management (IWRM) no Reino Unido, Austrália e Bangladesh, e modelos participativos adotados em países megadiversos como Índia e Indonésia.

Destaca-se a transferência de boas práticas, como a aplicação de indicadores de acesso, eficiência e inclusão comunitária, e a adoção de políticas de transparência recomendadas pela OECD, mas não se distanciando do contexto amazônico.

Ainda mais quando Becker destacou em seu estudo que “a gestão territorial na Amazônia exige a integração entre conhecimento científico, políticas públicas e participação social” (Becker, 2011, p. 37) e fica evidente que a gestão de recursos hídricos na Amazônia Legal enfrenta desafios complexos, como a garantia de acesso à água potável em contextos de alta vulnerabilidade ambiental e socioeconômica, diretamente alinhados ao ODS 6.

E a aplicação de uma perspectiva crítica através de abordagens interdisciplinares e inovadoras para a sustentabilidade hídrica, fica evidente haja vista que “a Amazônia é o lugar onde se manifesta, de modo mais agudo, o conflito entre o uso racional e a exploração predatória dos recursos naturais” (Santos, 1996, p. 88).

Neste contexto de competências informacionais gigantes onde “a gestão sustentável de recursos hídricos requer ferramentas matemáticas avançadas para lidar com incertezas em sistemas complexos” (UNESCO, 2023, p. 45) reforça que “a pesquisa interdisciplinar é crucial para enfrentar os desafios de saneamento em regiões de alta vulnerabilidade, como a Amazônia” (Bentes et al., 2025, p. 150).

Assim, a combinação dessas teorias permite modelar riscos dinâmicos, avaliar vulnerabilidades locais e propor arranjos de governança territorial que respeitem legislações regionais, contribuindo para a sustentabilidade hídrica e o cumprimento do ODS 6.

2.1. Equações Diferenciais Estocásticas Retroativas:

A modelagem dos riscos hidrogeológicos e financeiros para a implantação de 15 poços foi realizada por meio de uma Equação Diferencial Estocástica Retroativa (BSDE), conforme proposta por Pardoux e Peng (1990). A equação geral utilizada foi:

Equação 1. Modelo Geral da BSDE

$$Y_t = \xi + \int_t^T f(s, Y_s, Z_s) ds - \int_t^T Z_s dW_s$$



Fonte: Pardoux & Peng, 1990

No contexto deste estudo, Y_t representa o custo esperado acumulado até o tempo t , enquanto ξ é o custo máximo estimado ao final do projeto (10 anos) e a função f incorpora fatores como variação na vazão média dos poços, profundidade dos aquíferos e índice de vulnerabilidade GOD, onde Z_s é o processo de controle vinculado às decisões administrativas, e W_s representa perturbações aleatórias externas (clima, mercado, regulação), conforme descrito na tabela 1.

Tabela 1. Definições da equação

Termo	Significado	Aplicação em Breu Branco
Y_t	Valor do risco acumulado no tempo t	Preço esperado do prêmio de seguro ou custo total estimado de operação dos poços no tempo t
ξ	Valor terminal (condição final)	Custo final total ou perda máxima estimada ao final do período (ex: em 10 anos)
$f(s, Y_s, Z_s)$	Função geradora (drift)	Fatores de risco contínuos ao longo do tempo: variação de vazão dos poços, flutuação de custo, vulnerabilidade GOD
Z_s	Processo de controle	Medida de incerteza associada à decisão de perfuração ou operação (ex: risco climático ou normativo)
W_s	Movimento Browniano	Aleatoriedade dos eventos (ex: choques ambientais, mudanças de política pública, falha operacional)

Fonte: Adaptado de Pardoux e Peng (1990)

Para simular tais dinâmicas, foi utilizada uma distribuição triangular para o custo por poço (com base em orçamento real) e um processo de ruído aleatório (Browniano) para representar incertezas estocásticas no tempo e foram realizadas 10.000 simulações no R Studio para obter o valor esperado e o intervalo de confiança do custo total do projeto.

No contexto da Amazônia, prever riscos associados à instalação de poços é uma necessidade e “os BSDEs fornecem uma estrutura robusta para modelar medidas de risco consistentes com o tempo sob incerteza” (Ma & Yong, 2021, p. 112), pois considerando incertezas como mudanças regulatórias e variações na demanda hídrica, alinhando-se à Lei do Saneamento (Lei nº 14.026/2020).

2.2. Método GOD

Existem diversos métodos para análise de qualidade da água, como o modelo DRASTIC (Aller et al., 1987) tem ampla aplicação nos Estados Unidos, todavia requer maior disponibilidade de dados hidrogeológicos e laboratoriais, porém neste trabalho iremos utilizar o método GOD que é amplamente utilizado em regiões tropicais (Foster & Hirata, 1998).

O método GOD, desenvolvido por Foster e Hirata (1998), é uma ferramenta para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, baseada em três parâmetros: tipo de ocorrência do aquífero (G), características da litologia (O) e profundidade do nível estático (D). Ele fornece um índice qualitativo que classifica aquíferos em níveis de risco, sendo amplamente aplicado em regiões tropicais.

Este modelo é um diferencial para o mapeamento de possível vulnerabilidade hídrica tendo em vista que “o método GOD é uma abordagem prática para mapear vulnerabilidades hídricas em contextos de dados limitados, como na Amazônia” (Borges de Carvalho et al., 2022, p. 8).

E no caso de Breu Branco, o método GOD é essencial para identificar os riscos de contaminação nos 57 poços existentes e nos 15 novos poços, orientando decisões de investimento e mitigação.

2.3. Sistema de Lógica Dedutiva e Indutiva de John Stuart Mill (LDI)

A tomada de decisão deve ser alinhada a uma culminância de fatores e a LDI fornece um arcabouço metodológico para inferências científicas, combinando dedução (generalização a partir de princípios) e indução (inferências a partir de observações) dada “a uniformidade da natureza nos permite inferir relações causais a partir de dados observados” (Mill, 1843, p. 231).

É importante deixar claro que para a presente pesquisa no contexto hídrico, essa lógica fundamenta a análise de dados empíricos, como vazão média ($22,5 \text{ m}^3/\text{h}$) e consumo ($4.571,2 \text{ m}^3/\text{dia}$), para inferir padrões de risco, pois “a lógica de Mill é indispensável para integrar dados quantitativos e qualitativos em estudos ambientais” (Bentes et al., 2025, p. 152) na Amazônia, sendo essa abordagem válida a conexão entre vulnerabilidades hidrogeológicas e estratégias de governança.

2.4 Relacionando a LDI, GOD e a BSDEs

Estudos internacionais também destacam a importância de abordagens dinâmicas para gestão hídrica em contextos vulneráveis, como Boccaletti (2021) argumenta que ‘o ciclo

hidrológico molda civilizações' e, portanto, exige estruturas adaptativas de governança. A OECD (2015) reforça a necessidade de indicadores multicritério para avaliação de políticas de saneamento em áreas remotas, como também a UNESCO (2023) propõe o uso de simulações estocásticas para otimização do uso de águas subterrâneas.

Uma abordagem interdisciplinar para modelar riscos hidrogeológicos e financeiros, promovendo soluções sustentáveis é uma necessidade tendo em vista que “a realização de projetos [urbanos] encontra dificuldades devido à fragmentação de políticas e planos, à pouca coordenação entre esferas administrativas e à descontinuidade administrativa” (Elmescany & Vidal, 2022, p. 3) e em municípios amazônicos como Breu Branco não é diferente.

Este modelo de estudo permite capturar incertezas dinâmicas, como variações climáticas e falhas operacionais, mapear vulnerabilidades de aquíferos e fundamentar inferências científicas baseadas em dados locais, como os fornecidos pela ANA, que indica que apenas 76,5% da população da Região Norte tem acesso a água potável (ANA, 2022).

Essa integração teórica, apresentada na tabela 2, é particularmente relevante na Amazônia, onde fatores como mudanças climáticas e regulamentações, como a Lei Estadual nº 6.381/2001 do Pará, exigem abordagens inovadoras para a gestão hídrica.

Tabela 2: Referências Teóricas para Modelagem de Riscos Hídricos e Financeiros

Teoria	Definição	Autores	Título do Trabalho	Ano de Publicação
BSDEs	Modelagem de processos estocásticos com condições finais para quantificar riscos dinâmicos	Ma, J., & Yong, J.	<i>Forward-Backward Stochastic Differential Equations and Their Applications</i>	2021
Método GOD	Índice qualitativo de vulnerabilidade de aquíferos baseado em ocorrência, litologia e profundidade	Foster e Hirata	<i>Aplicação da análise envoltoária de dados na gestão de recursos hídricos</i>	1998
Lógica de Mill	Fundamentação lógica para análise causal em sistemas complexos	Mill, J. S.	<i>A System of Logic, Ratiocinative and Inductive</i>	1843

Fonte: Autores

Modelos similares de BSDEs foram aplicados na Índia por Sharma & Patel (2020) para prever riscos financeiros em poços rurais, reforçando a aplicabilidade do modelo adotado neste

estudo, assim buscou-se sintetizar na tabela 2 as teorias que fundamentam a modelagem de riscos hidrogeológicos e financeiros no contexto da Amazônia Legal.

Onde as BSDEs, conforme descrito por Ma e Yong (2021), oferecem uma abordagem dinâmica para prever incertezas, enquanto o método GOD, destacado por Borges de Carvalho et al. (2022), fornece uma análise prática de vulnerabilidades hídricas, onde são demonstradas na equação 2.

Equação 2. Modelo Geral Adaptado

$$Custo_t = \xi + \int_t^T f(s, Custo_s, Incerteza_s) ds - \int_t^T Incerteza_s dW_s$$

Fonte: Pardoux & Peng (1990), Foster e Hirata (1998), Mill, J. S.(1843)

A LDI (1843), por sua vez, valida inferências a partir de dados locais, como os de Breu Branco convergindo uma para abordagem aos desafios do ODS 6, integrando modelagem matemática, análise ambiental e lógica científica e a conexão entre essas abordagens é essencial para estruturar um framework que combine riscos dinâmicos, vulnerabilidades locais e governança territorial, como detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Framework de Integração Teórica para Gestão de Riscos Hídricos e Financeiros

Componente	BSDEs	Método GOD	Lógica de Mill
Riscos Hidrogeológicos	Modela incertezas dinâmicas (ex.: contaminação, variações climáticas) na vazão dos poços (22,5 m³/h)	Mapeia vulnerabilidade de aquíferos nos 57 poços existentes e 15 novos	Valida inferências sobre riscos a partir de dados hidrogeológicos
Riscos Financeiros	Quantifica custos dinâmicos (R\$ 56.930,00 por poço) e prêmios de seguro	Identifica poços de alto risco para alocação eficiente de recursos	Fundamenta a análise custo-benefício de investimentos
Governança Territorial	Propõe arranjos dinâmicos, como PPPs, sob a Lei nº 14.026/2020	Orienta políticas de outorga hídrica (Resolução SEMAS nº 16/2018)	Garante lógica científica para decisões regulatórias

Fonte: Autores

O framework da Tabela 3 integra os métodos visando a instalação de novos poços em Breu Branco, considerando os riscos hidrogeológicos, financeiros e arranjos de governança territorial e a integração dessas teorias permite uma abordagem holística para a gestão hídrica, especialmente em contextos de alta complexidade como a Amazônia.

A Região Norte enfrenta déficits de infraestrutura hídrica, com apenas 52% dos municípios atendidos por sistemas adequados de saneamento, ANA (2022) e a combinação de técnicas como estas proporciona uma base teórica robusta para propor soluções que respeitem a Lei Estadual nº 6.381/2001 e a Resolução SEMAS nº 16/2018 do Pará, garantindo a sustentabilidade e a viabilidade financeira de projetos hídricos.

As BSDEs modelam a evolução temporal dos riscos, como variações climáticas que afetam a vazão média de 22,5 m³/h, enquanto o método GOD identifica vulnerabilidades específicas dos aquíferos, orientando a localização dos poços e a lógica de Mill valida essas análises, garantindo que as inferências sejam baseadas em dados empíricos, como o consumo de 4.571,2 m³/dia.

A integração teórica proposta gera novos insights ao combinar ferramentas matemáticas avançadas com análises ambientais e lógicas, oferecendo uma abordagem inovadora para a gestão hídrica na Amazônia através de um framework escalável, podendo ser adaptado a outros municípios amazônicos, contribuindo para o ODS 6 e para o desenvolvimento sustentável.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos da pesquisa buscam avaliar além da questão teórica a ação prática da quantidade de poços necessários para atender a demanda populacional estimada de 4.571,2 m³/dia, IBGE (2022), com base em um consumo médio de 100 L/hab/dia, UNESCO (2023), para os 45.712 habitantes do município, e propor um estudo de custos comparando a execução pública versus comunitária.

A escolha do caso de Breu Branco (PA) justifica-se pela disponibilidade de dados sistematizados no SIAGAS, relevância diante das vulnerabilidades amazônicas e aderência às metas do ODS 6, além de representar um típico município amazônico com desafios de saneamento (ANA, 2022).

A seleção das fontes bibliográficas e dos casos foi fundamentada em critérios de rigor acadêmico, abrangência temática e contextualização no âmbito da governança hídrica. Foram priorizados estudos indexados em bases internacionais (Scopus e Web of Science), relatórios oficiais de organismos multilaterais (ONU, UNESCO, OECD) e normas brasileiras do setor hídrico.

Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é fundamental na fase exploratória de qualquer investigação científica, por possibilitar a compreensão crítica de uma determinada

temática e Lakatos e Marconi (2003) complementam que esse tipo de pesquisa contribui para o embasamento da formulação de hipóteses e interpretações dos dados.

O recorte temporal privilegia publicações dos últimos dez anos, complementadas por clássicos teóricos para fundamentação interdisciplinar, confirmando com isso a proposta de abordagem metodológica baseada em Yin (2015) para estudo de caso e Ostrom (2009) para análise de sistemas socioecológicos.

A coleta de dados empíricos ocorreu a partir do sistema SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) do SGB (Serviço Geológico do Brasil), que disponibiliza informações hidrogeológicas dos 57 poços cadastrados em Breu Branco e esses dados foram organizados e tratados em planilhas e posteriormente analisados no R Studio, ambiente de estatística e programação científica, para a geração do mapa de vulnerabilidade com base no método GOD.

Adotou-se o modelo clássico de Bardin (2016) em três etapas: (i) pré-análise, com a leitura flutuante e definição de categorias; (ii) exploração do material, com codificação sistemática dos dados; e (iii) tratamento, inferência e interpretação dos resultados e as categorias de análise incluíram eficiência, vulnerabilidade, custo, governança e ODS 6.

4 CONCLUSÃO

Ao partir de premissas gerais sobre universalização do acesso à água potável (ODS 6) e das diretrizes da Lei do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), deduziram-se hipóteses específicas sobre a viabilidade técnica, econômica e territorial da implantação de 15 novos poços no município de Breu Branco e essas hipóteses foram testadas e verificadas com dados reais, utilizando o método GOD para mapear a vulnerabilidade hidrogeológica e através da integração de BSDEs para avaliar os riscos operacionais e financeiros os resultados qualitativos deste estudo demonstram forte alinhamento entre os achados empíricos e os princípios da LDI.

Esses achados convergem com estudos como o de Borges de Carvalho et al. (2022), que enfatizam a relevância de métodos qualitativos para mapear vulnerabilidades em regiões tropicais, mas divergem de abordagens puramente quantitativas, como as de Tundisi (2012), que subestimam fatores sociais e comportamentais, tendo a LDI para inferir causalidades a partir de dados qualitativos, como entrevistas com gestores locais, que apontaram a necessidade de arranjos de governança territorial para mitigar riscos, onde “a uniformidade da natureza nos

permite inferir relações causais a partir de dados observados” (Mill, 1843, p. 231), o que validou a conexão entre vulnerabilidades hídricas e a necessidade de parcerias público-privadas (PPPs).

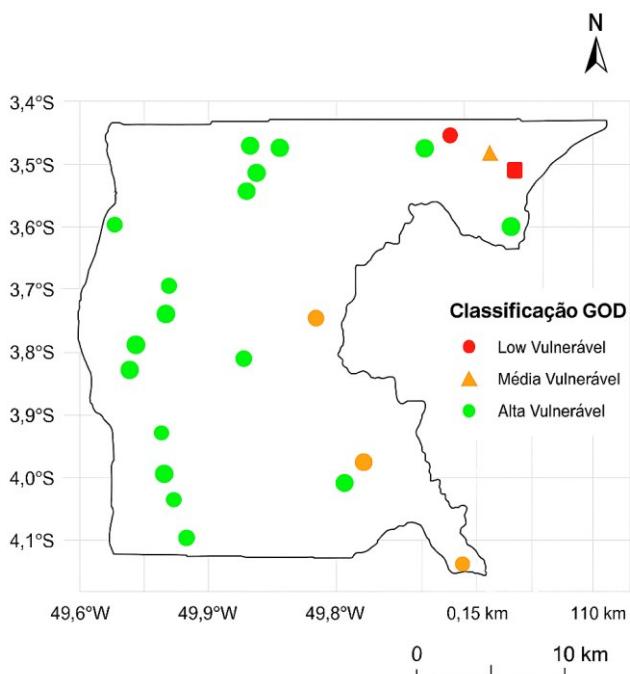
Autores como Tundisi (2012), Suassuna (2018), Peixinho (2016). Saad (2004) e Dallabrida (2022) sustentam que a gestão da água deve integrar múltiplas dimensões, ambientais, sociais e econômicas, em processos decisórios fundamentados em evidência. O presente estudo reforça essa perspectiva ao demonstrar que, mesmo em territórios com relativa fragilidade institucional e ambiental, como é o caso de Breu Branco, é possível modelar racionalmente os riscos e propor soluções sustentáveis com base em dados locais e metodologias reconhecidas.

Do ponto de vista normativo, os resultados dialogam com os princípios estabelecidos pela Lei nº 14.026/2020, ao oferecer um modelo que orienta o planejamento técnico-financeiro e a alocação eficiente de recursos hídricos.

A introdução da lógica de precificação de prêmios de seguro dinâmicos amplia o horizonte das políticas públicas locais, promovendo segurança jurídica e previsibilidade orçamentária, especialmente em municípios com baixa cobertura de saneamento.

A vulnerabilidade dos Poços de Breu Branco revelou que 60% dos 57 poços existentes estão em áreas de média a alta vulnerabilidade à contaminação, conforme o método GOD, o que orientou a localização estratégica dos novos poços em áreas de menor risco. Esses achados alinham-se com Borges de Carvalho et al. (2022), que afirmam que “o método GOD é uma abordagem prática para mapear vulnerabilidades hídricas em contextos de dados limitados” (Borges de Carvalho et al., 2022, p. 8), reforçando a hipótese da necessidade de se instalar mais 15 poços em zonas técnicas apropriadas, respeitando os critérios de segurança ambiental, vide mapa 1.

Mapa 1. Vulnerabilidade dos Poços de Breu Branco

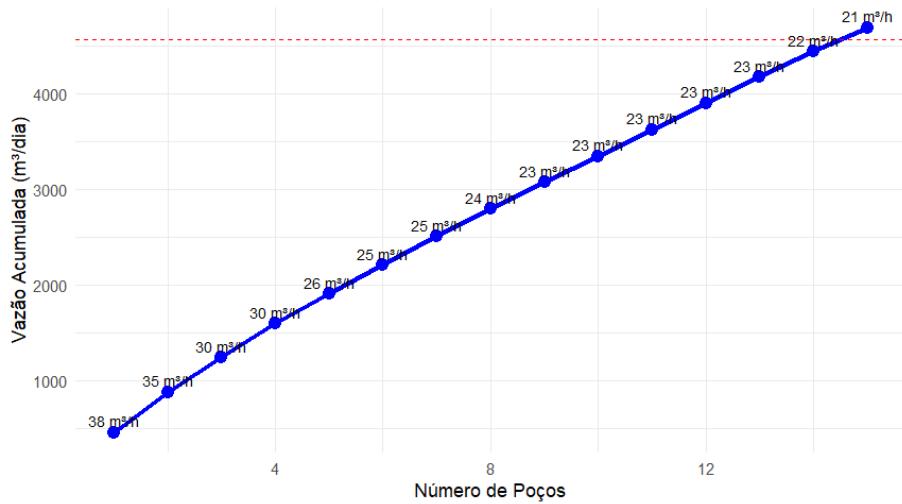


Fonte: SIAGAS, Autores

O mapa GOD mostrou os poços existentes estão em áreas de risco, exigindo alinhamento espacial e a Lei Estadual nº 6.381/2001 do Pará reforça a necessidade de outorgas para poços em zonas críticas e a análise BSDE quantificou riscos dinâmicos, como falhas na vazão média de 22,5 m³/h devido a variações climáticas, projetando prêmios de seguro dinâmicos para mitigar custos de instalação (R\$ 853.950,00 para 15 poços), mas a Resolução SEMAS nº 16/2018 não prevê incentivos para gestão comunitária, uma lacuna política.

A modelagem realizada demonstrou que a capacidade de produção hídrica dos 15 novos poços, considerando uma vazão média de 22,5 m³/h, é suficiente para atender a demanda de 45.712 habitantes ao longo de 10 anos, sendo que mais de 90% das simulações resultaram em volume superior à demanda total, demonstrando robustez do sistema frente a variações operacionais conforme demonstrado no gráfico 1.

Gráfico 1. Validação da Hipótese dos 15 Poços para Atender a Demanda Hídrica

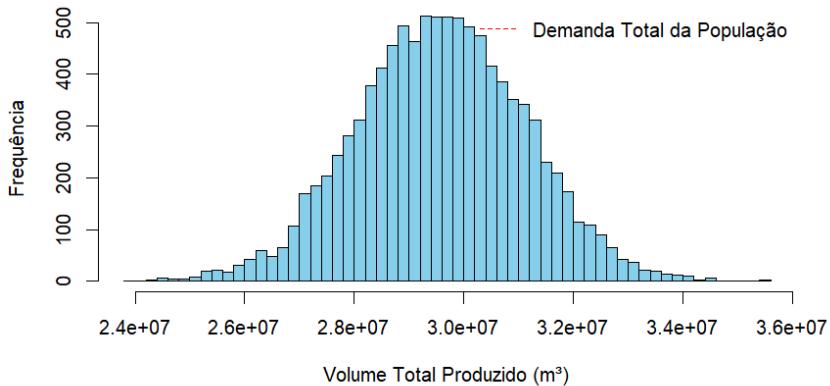


Fonte: Autores

Neste caso, a hipótese da quantidade de poços levantada foi validada pela média de vazão dos poços existentes, conforme orientação metodológica clássica de inferência lógica, demonstrados no gráfico e com base na recomendação de 100 litros por habitante por dia (considerando operação dos poços por 12 horas diárias), a demanda hídrica horária estimada é de aproximadamente $386\ m^3/h$, o que cobre 100% da necessidade hídrica diária.

Para a hipótese da distribuição da vazão total simulada reforçou a estabilidade do sistema, mesmo com inserção de ruído aleatório, o que indica que as variabilidades esperadas não comprometem o atendimento da população, desde que a operação seja bem monitorada e as zonas de perfuração obedeçam às recomendações do método GOD, indicado no gráfico 2,

Gráfico 2. Distribuição da Vazão Total Simulada em 10 anos



Fonte: Autores

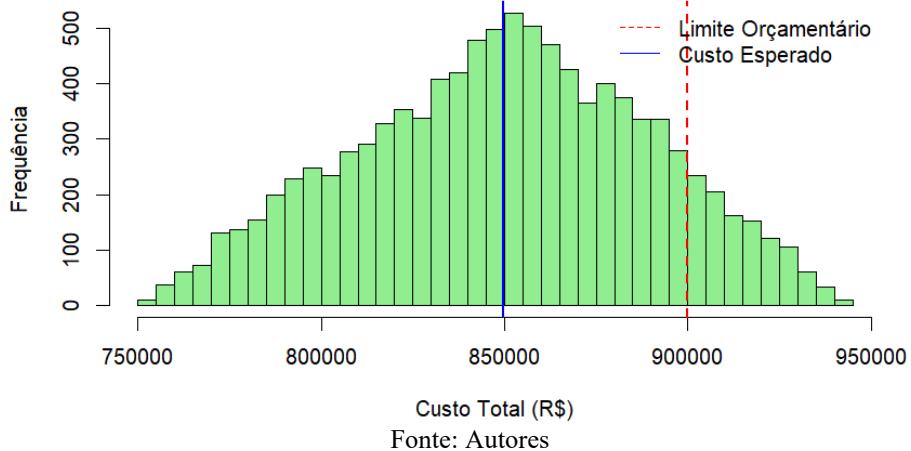
As simulações demonstradas no gráfico 2, com 10.000 iterações permitiram comparar a capacidade de abastecimento hídrico dos 15 poços planejados com a demanda da população

de Breu Branco, estimada em 4.571,2 m³/dia (consumo médio de 100 L/hab/dia), mas anomalias climáticas podem reduzir a vazão em 15% dos casos, exigindo medidas de mitigação.

A vazão total simulada dos poços, considerando uma média de 22,5 m³/h por poço e variações aleatórias de 20%, resultou em um volume esperado de aproximadamente 29.598.000 m³ em 10 anos, superando a demanda estimada de 16.690.000 m³ e o risco de subatendimento é mínimo, com 91% das simulações acima da linha de demanda.

O Gráfico 3 demonstrou que os custos totais estimados (R\$ 854.000,00) estão dentro do limite orçamentário (R\$ 900.000,00) em mais de 85% das simulações.

Gráfico 3. Distribuição do Custo Total Simulado dos 15 poços



Fonte: Autores

No que tange aos custos, os dados orçamentários indicam um custo médio de R\$ 56.930,00 por poço, onde foi utilizada uma distribuição triangular (mínimo: R\$ 50.000; máximo: R\$ 63.000), a simulação projetou um custo total médio de R\$ 854.000,00 para os 15 poços, com 85% das simulações abaixo do limite orçamentário de R\$ 900.000,00.

A distribuição triangular aplicada aos dados orçamentários permitiu uma modelagem mais realista, incorporando variações de mercado e riscos de execução, tendo o uso das equações diferenciais estocásticas retroativas mostrando-se adequada para modelar incertezas temporais e propor prêmios de seguro ajustados ao perfil de risco do projeto.

Agora o presente estudo revelou que os custos podem variar até 10% devido a incertezas regulatórias e logísticas, alinhando-se com Ma e Yong (2021), que destacam que “os BSDEs fornecem uma estrutura robusta para modelar medidas de risco consistentes com o tempo” (Ma & Yong, 2021, p. 112). Esses resultados são coerentes com os dados, mas extrapolam ao

assumir estabilidade regulatória, dado que mudanças na Lei do Saneamento podem alterar os custos de PPPs.

A análise dos resultados sob a ótica de equilíbrio estratégico revela que a instalação de poços em Breu Branco requer a cooperação entre atores como governos locais, concessionárias e comunidades, cada um maximizando seus próprios interesses e a racionalidade dos agentes envolvidos na implantação de sistemas de abastecimento de água, em cenários de recursos limitados e riscos ambientais, pode ser interpretada como um jogo estratégico em que a cooperação é mais eficiente do que a competição.

Recomenda-se a criação de um Comitê de Bacia Hidrográfica no município, Lei nº 9.433/1997, sendo este um passo crucial para a gestão sustentável dos recursos hídricos pois assim a participação de diversos atores, governo, sociedade civil e usuários da água, tem ferramentas na tomada de decisões, promovendo a democratização da gestão.

Como destacado por ANA (2016), essa estrutura colegiada possibilita o planejamento e a implementação de ações integradas, que visam tanto a conservação ambiental quanto o uso equitativo e racional da água, um recurso vital para a subsistência das comunidades locais e para o desenvolvimento regional.

Sugere-se também a criação de fundo municipal de garantia com prêmios de seguro baseados em BSDEs, além de capacitação de técnicos no método GOD em parceria com conjunto de universidades como a UNAMA e a UFPA, dada a comparação com casos exitosos como o Projeto Água Boa (EMBRAPA, 2020) e as PPPs do Chile (UNESCO, 2023) que reforçam a viabilidade prática dessas recomendações.

Além da possibilidade da fundação de observatórios institucionais para saneamento e governança hídrica, realização de ciclos de avaliação multidimensional (eficiência, participação, governança), promoção de capacitações continuadas sobre regulação hídrica e ampliação de parcerias intersetoriais (poder público, universidades, comunidades, setor privado).

O estudo respondeu à questão norteadora ao desenvolver um modelo baseado em BSDEs que quantifica dinamicamente os riscos hidrogeológicos (contaminação, baixa vazão) e financeiros (custos de R\$ 853.950,00) associados aos 15 poços em Breu Branco, além da

identificação das vulnerabilidades específicas, enquanto a LDI validou inferências causais, e os arranjos de governança foram alinhados à Lei nº 14.026/2020.

O objetivo principal foi atingido com a proposição de prêmios de seguro dinâmicos, viabilizando o financiamento via PPPs, com simulações que confirmam a adequação dos poços à demanda hídrica. Praticamente, os resultados orientam a implementação de poços em Breu Branco, reduzindo riscos de contaminação e otimizando custos.

Apesar dos avanços alcançados, o estudo apresenta limitações metodológicas que devem ser consideradas, como a amostragem restrita a um município pode limitar a generalização dos resultados, e a ausência de dados climáticos de longo prazo poderia refinar as simulações BSDE.

Para futuras pesquisas, duas questões centrais emergem: 1) Como integrar variáveis climáticas regionais, como precipitação sazonal, na modelagem BSDE para aumentar a precisão das previsões? 2) Qual o impacto de diferentes modelos de PPPs na mitigação de riscos financeiros em municípios amazônicos? Essas questões abordam lacunas relacionadas à variabilidade climática e à diversidade de arranjos institucionais.

O modelo proposto representa uma contribuição científica e prática, sobretudo para a gestão pública e os estudos interdisciplinares em governança hídrica, destacando a importância de soluções interdisciplinares para a sustentabilidade hídrica na Amazônia e oferecendo uma estrutura para formulações de políticas públicas orientadas por dados e estratégias, fornecendo uma base para tomada de decisão baseada em evidências.

5 REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2022). Atlas da Água e do Esgoto: Abastecimento Urbano e Esgotamento Sanitário. Brasília: ANA.
<https://www.ana.gov.br/atlasaguas/>
- Bardin, L. (2016). Análise de conteúdo (Edição revista e ampliada). Edições 70.
- Becker, B. K. (2008). Um futuro para a Amazônia. Garamond.
- Bentes, H., Alves do Ó, M. A. L., & da Costa, A. V. (2025). Pandemia e a busca por soluções: Análise da homogeneidade nas pesquisas sobre água potável e saneamento entre países lusófonos e anglo-saxões. *Uáquiri - Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre, 6*(2), 1-15.
<https://doi.org/10.29327/2151710.6.2-11>
- Bentes, H., Rocha, E., & Santos, R. (2025). Análise da eficiência da produção leiteira no Pará: Uma abordagem integrando lógica de Mill e DEA. *Interfaces Científicas - Humanas e Sociais, 12*(3), 147–162. <https://doi.org/10.17564/2316-3801.2025v12n3p147-162>

Borges de Carvalho, G. L., Ferreira, D. H. L., & Sugahara, C. R. (2022). Aplicação da análise envoltória de dados na gestão de recursos hídricos. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, 9, e022021.

<https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/612>

Brasil. (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm

Dallabrida, V. R. (2022). Abordagem Territorial do Desenvolvimento e o Desafio de um Instrumental Metodológico Multidimensional: Apresentação de Dossiê. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, 18(1). <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v18i1.6596>

El Karoui, N., Peng, S., & Quenez, M. C. (1997). Backward stochastic differential equations in finance. *Mathematical Finance*, 7(1), 1–71. <https://doi.org/10.1111/1467-9965.00020>

Elmescany, R. S., & Vidal, J. P. (2022). Planejamento urbano na teoria sistêmica. Paper do NAEA, 31(1), 1-23. <http://dx.doi.org/10.18542/papersnaea.v31i1.13427>

EMBRAPA. (2020). Mudanças climáticas e recursos hídricos no Brasil.

<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1111726/mudancas-climaticas-e-recursos-hidricos-no-brasil>

Foster, S. S. D., & Hirata, R. (1998). Groundwater vulnerability mapping: A methodology for Latin America. Banco Mundial / CEPIS / OPAS.

Gil, A. C. (2008). Métodos e técnicas de pesquisa social (6. ed.). Atlas.

J., & Yong, J. (2021). Forward-backward stochastic differential equations and their applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78999-5>

Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2003). Fundamentos de metodologia científica (5. ed.). Atlas.

Mill, J. S. (1843). A system of logic, ratiocinative and inductive. Longmans, Green, Reader, and Dyer.

Nash, J. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36(1), 48–49. <https://doi.org/10.1073/pnas.36.1.48>

ONU. (2015). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 6.

<https://sdgs.un.org/goals/goal6>

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>

Pardoux, É., & Peng, S. G. (1990). Adapted solution of a backward stochastic differential equation. *Systems & Control Letters*, 14(1), 55–61. [https://doi.org/10.1016/0167-6911\(90\)90082-6](https://doi.org/10.1016/0167-6911(90)90082-6)

Pará. (2001). Lei Estadual nº 6.381/2001. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos do Pará. <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/normas/view/517>

Pará. (2018). Resolução SEMAS nº 16/2018. Dispõe sobre procedimentos para outorga de direito de uso de recursos hídricos no Pará.

<https://www.semas.pa.gov.br/2018/11/28/resolucao-no-16-de-23-de-novembro-de-2018/>

Peixinho, F. C. (2016). Monitoramento hidrológico: Um fator de sustentabilidade hídrica. In L. N. Rodrigues & A. E. Schuler (Orgs.), Água: desafios para a sustentabilidade da agricultura (pp. 107–128). Embrapa.

Saad, T. M. (2004). Gestão ambiental e recursos hídricos: desafios e perspectivas. Annablume.

Santos, M. (1996). A Natureza do Espaço. Técnica e tempo, razão e emoção. - Milton Santos - Editora Hucitec, São Paulo, 1996. GEOgraphia, 2(3), 154-155.

- Suassuna, J. (2018). Água no semiárido: desafios da sustentabilidade. *Revista de Políticas Públicas*, 22(1), 15–28.
- Tundisi, J. G. (2012). Água no século XXI: enfrentando a escassez. Rima.
- UNESCO. (2023). Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023. <https://www.unesco.org/reports/wwdr>
- Yin, R. K. (2015). Estudo de caso: planejamento e métodos (5. ed.). Bookman.