REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

ESTUDO DE CASO E APLICAÇÃO DA ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGO (APP) EM OPERAÇÕES DE UM POSTO DE COMBUSTÍVEIS NO BAIRRO FRAGOSO, MAGÉ-RJ

CASE STUDY AND APPLICATION OF PRELIMINARY HAZARD ANALYSIS (PHA) TO THE OPERATIONS OF A FUEL STATION IN FRAGOSO DISTRICT, MAGÉ-RJ

Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas • 15/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794566178

Josimar Ribeiro de Almeida[1]

Alexandre Rodrigues de Morais[2]

Cleber Vinicius Akita Vitorio[3]

João Paulo Fernandes de Almeida[4]

Marcello Guimarães Couto[5]

Patrícia dos Santos Matta[6]

Raphael do Couto Pereira[7]

RESUMO

Os postos revendedores de combustíveis desempenham papel fundamental na infraestrutura de transportes e no desenvolvimento socioeconômico urbano. Entretanto, suas atividades envolvem riscos ambientais e ocupacionais complexos associados ao armazenamento, manuseio e comercialização de derivados de petróleo. Este trabalho teve como objetivo identificar, classificar e modelar quantitativamente os riscos socioambientais decorrentes das operações em um posto de combustíveis localizado no bairro Fragoso, município de Magé-RJ, combinando a Análise Preliminar de Perigo (APP) a um *framework* inovador de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) e Modelagem Ecodinâmica Sistêmica. A metodologia fundamentou-se na proposta de Camacho (2004) para ordenação de frequência e severidade, expandida por simulações probabilísticas de Monte Carlo com Análise de Sensibilidade de Sobol, modelagem causal por Redes Bayesianas, preditores estatísticos por Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) e Valoração Econômica Ambiental via métodos VERA e VEIA em conformidade com a Lei Estadual nº 3.467/2000 (RJ). Os resultados evidenciaram a presença de onze perigos operacionais com nítida predominância de riscos classificados como sérios (Classe 4) e críticos (Classe 5). Destacaram-se a geração de efluentes contaminados, a emissão de vapores de combustíveis (compostos BTEX), a geração de resíduos oleosos e os vazamentos estruturais em tanques subterrâneos (SASC) e bombas. A análise de Sobol revelou que a volatilização de BTEX e a integridade do SASC respondem por mais de 85% da incerteza e variância do risco global. Sob a perspectiva ecodinâmica, constatou-se a alteração dos mecanismos de ajuste e a ultrapassagem da capacidade de suporte ambiental, impondo um elevado custo homeostático ao sistema físico-químico local. Conclui-se que o cumprimento estrito dos

requisitos estipulados pela Resolução CONAMA nº 273/2000 e pela ABNT NBR 13786, associado ao monitoramento preditivo e à adequação aos limiares homeostáticos, constitui medida indispensável para conter a degradação e garantir a sustentabilidade operacional.
Palavras-chave: Postos de combustíveis; Análise Preliminar de Perigo; Avaliação Ambiental Integrada; Modelagem Ecodinâmica; Homeostasia e Custo Homeostático; Valoração Ambiental; Resolução CONAMA nº 273/2000.

ABSTRACT

Fuel retail stations play a fundamental role in transportation infrastructure and socioeconomic development. However, their operations involve complex environmental and occupational risks associated with the storage, handling, and distribution of petroleum products. This study aimed to identify, classify, and quantitatively model socioenvironmental risks resulting from fueling operations at a fuel station located in the Fragoso district, municipality of Magé, Rio de Janeiro, Brazil, combining Preliminary Hazard Analysis (PHA) with an innovative Integrated Environmental Assessment (IEA) framework and Systemic Ecodynamic Modeling. The methodology was based on Camacho (2004) for frequency and severity classification, expanded by Monte Carlo probabilistic simulations with Sobol Sensitivity Analysis, causal Bayesian Networks modeling, Machine Learning predictive algorithms, and Environmental Economic Valuation via VERA and VEIA methods in compliance with Rio de Janeiro State Law No. 3,467/2000. The results revealed eleven operational hazards, predominantly classified as serious (Class 4) and critical (Class 5) risks. The most relevant hazards included contaminated effluent generation, fuel vapor emissions (BTEX compounds), oily waste generation, and structural leaks in

underground storage tanks (UST/SASC) and dispensers. Sobol sensitivity analysis demonstrated that BTEX volatilization and UST integrity account for over 85% of total risk uncertainty. Under the ecodynamic perspective, alterations in systemic adjustment mechanisms and the breach of environmental carrying capacity were verified, imposing high homeostatic costs on the local physical environment. The study concludes that compliance with CONAMA Resolution No. 273/2000 and ABNT NBR 13786, combined with predictive environmental monitoring and adherence to homeostatic thresholds, is essential for mitigating risks and ensuring operational sustainability.
Keywords: Fuel stations; Preliminary Hazard Analysis; Integrated Environmental Assessment; Ecodynamic Modeling; Homeostasis and Homeostatic Cost; Environmental Valuation; CONAMA Resolution No. 273/2000.

1. INTRODUÇÃO

Os postos revendedores de combustíveis constituem empreendimentos essenciais para a mobilidade urbana, suporte logístico e transporte de cargas e passageiros nas redes viárias municipais e intermunicipais. A contínua expansão da frota nacional de veículos automotores observada nas últimas décadas acelerou a demanda por derivados de petróleo, consolidando esses estabelecimentos como nós logísticos e comerciais estratégicos para o desenvolvimento socioeconômico regional (BRASIL, 2000).

Apesar de sua inegável importância econômica e funcional, os postos de revendedores configuram atividades potencialmente poluidoras e de elevado potencial degradador. Suas operações cotidianas envolvem a manipulação, transbordo e armazenamento

subterrâneo de grandes volumes de substâncias inflamáveis e toxicologicamente perigosas. Eventuais vazamentos em sistemas subterrâneos de armazenamento de combustíveis (SASC), falhas mecânicas em bombas medidoras, gotejamentos acidentais durante o abastecimento de veículos e o descarte inadequado de águas de lavagem de pistas representam fontes crônicas e acidentais de degradação ambiental (Rocha et al., 2004).

De acordo com Santana (2013), as falhas de integridade física e estrutural em tanques subterrâneos representam um dos cenários de contaminação subterrânea de maior complexidade técnica para remediação no meio urbano. Os impactos decorrentes dessas falhas afetam diretamente a qualidade pedológica do solo, a dinâmica hidrogeológica dos aquíferos freáticos e a qualidade do ar atmosférico local através da volatilização de vapores orgânicos. Além das perdas patrimoniais e ecológicas, a exposição ocupacional direta e contínua dos trabalhadores aos compostos aromáticos conhecidos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) impõe severos riscos à saúde humana. Entre estes, o benzeno assume papel de destaque devido à sua elevada volatilidade, lipossolubilidade e comprovado potencial carcinogênico e imunotóxico (Ministério do Trabalho e Emprego, 2016).

Para além da simples identificação empírica dos perigos operacionais, a compreensão aprofundada das interações ambientais em áreas sob estresse industrial exige a aplicação de conceitos fundamentais da Ecologia Teórica e da Teoria Geral dos Sistemas. O meio ambiente receptor — composto pela camada de solo não saturado, pelo horizonte aquífero e pelo ar circundante — opera como um sistema dinâmico complexo dotado de estado do

sistema próprio, estruturado por funções, atributos e usos ecossistêmicos bem definidos.

A introdução de contaminantes e vazamentos atua como um forçante externo (ou estressor), cuja magnitude dos forçantes altera diretamente as propriedades físico-químicas e biológicas do meio. O ecossistema responde através de mecanismos de ajuste de variável (propriedades de autodepuração e atenuação natural). No entanto, o sistema possui limiares homeostáticos e homeoréticos máximo e mínimo que delimitam a sua margem de estabilidade.

Quando o aporte de substâncias nocivas ultrapassa a capacidade de suporte do sistema ambiental, rompem-se os mecanismos de controle dos sistemas, forçando a transição do ecossistema de um estado de equilíbrio homeorético ou equilíbrio auto ajustado para um novo estado readaptado, caracterizado pela degradação permanente, pela elevação exponencial do custo homeostático e pela consolidação de passivos ambientais de longa duração (Camacho, 2004; CETESB, 2017).

Frente a este cenário de elevada complexidade ecodinâmica, as metodologias tradicionais de análise de risco necessitam ser integradas a ferramentas preditivas e analíticas de maior alcance. Este trabalho tem como objetivo geral aplicar a Análise Preliminar de Perigo (APP), segundo o modelo de Camacho (2004), integrada a um *framework* de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) e Modelagem Ecodinâmica, para identificar, classificar, valorar e quantificar os riscos operacionais e os custos sistêmicos associados a um posto revendedor de combustíveis localizado no bairro Fragoso, município de Magé-RJ.

2. REFERENCIAL TEÓRICO E CONCEITUAL

2.1. Modelagem Ecodinâmica, Homeostasia e Teoria dos Sistemas

A análise da degradação ambiental oriunda de atividades industriais e comerciais exige o aporte da modelagem ecodinâmica, a qual concebe o meio ambiente como um conjunto de subsistemas interconectados por fluxos de matéria, energia e informação em permanente troca com o meio externo. O estado do sistema em um dado momento é definido pela configuração espacial e quantitativa de seus componentes físicos (geologia, pedologia, hidrologia) e biológicos (microbiota do solo, cobertura vegetal, saúde humana).

Os principais conceitos teóricos articulados nesta pesquisa compreendem:

a. Forçante Externo (Estressor): Trata-se de qualquer agente físico, químico ou biológico oriundo de fora dos limites naturais do ecossistema que altera seu funcionamento. No caso do posto de combustíveis, as descargas acidentais de efluentes oleosos, os vazamentos de hidrocarbonetos e a emissão evaporativa de BTEX constituem as principais *forçantes externas*. A magnitude dos forçantes determina a intensidade da perturbação imposta ao meio.

b. Homeostasia e Equilíbrio Homeorético: A *homeostasia* refere-se à capacidade que o sistema natural possui de manter suas condições internas relativamente constantes frente a oscilações externas. O *equilíbrio homeorético* representa um estado de equilíbrio dinâmico, onde o sistema se mantém em fluxo através de trajetórias adaptativas contínuas.

c. Limiares Homeostáticos e Homeoréticos (Máximo e Mínimo): Correspondem aos limites críticos de tolerância do sistema ambiental. Enquanto as cargas poluentes se mantiverem abaixo do *limiar homeostático mínimo*, o meio ambiente é capaz de neutralizá-las integralmente através de seus *mecanismos de ajuste de variável* (ex.: biodegradação microbiana aeróbia de hidrocarbonetos no solo). Ao ultrapassar o *limiar homeostático máximo*, o sistema perde a capacidade de autoajuste.

d. Capacidade de Suporte e Custo Homeostático: A *capacidade de suporte* define o volume limite de estressores que o sistema ambiental pode absorver sem sofrer alterações irreversíveis em suas *funções e atributos ecossistêmicos*. Quando esse limite é violado, o ecossistema incorre em um elevado custo homeostático — medido pelo dispêndio energético ou econômico necessário para tentar reorganizar o meio ou aplicar medidas de engenharia de remediação.

e. Cenário Ecodinâmico: Dependendo da relação entre a magnitude das forçantes e a resiliência do meio, o cenário ecodinâmico pode ser classificado em:

1. *Estacionário:* ausência de perturbações significativas;

2. *Dinâmico / Equilíbrio Autoajustado:* perturbações absorvidas pelos mecanismos internos de controle;

3. *Novo Estado (Readaptado):* perda definitiva das características originais com permanência do dano e consolidação do passivo

ambiental.

2.2. O Setor de Revenda de Combustíveis e a Legislação Ambiental

O enquadramento normativo dos postos revendedores no Brasil é balizado precipuamente pela Resolução CONAMA nº 273/2000, a qual estabelece diretrizes compulsórias para o licenciamento ambiental e exige a implementação de sistemas preventivos contra vazamentos e poluição. Entre os requisitos técnicos destacados pela resolução sobressaem o uso de sistemas de monitoramento contínuo de tanques, bacias de contenção, caixas separadoras de água e óleo (SAO) e programas de treinamento ocupacional.

No âmbito da padronização de engenharia, a norma ABNT NBR 13786 especifica as diretrizes de seleção dos equipamentos constitutivos do Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC), contemplando a instalação obrigatória de tanques jaquetados de parede dupla, poços de monitoramento intersticial e sumps de contenção sob as bombas medidoras. A inobservância desses requisitos técnicos expõe o empreendimento a severas sanções administrativas e penais, exemplificadas no Estado do Rio de Janeiro pela Lei Estadual nº 3.467/2000, que regulamenta a aplicação de penalidades e multas por infrações ambientais.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida em um posto revendedor de combustíveis localizado no bairro Fragoso, no município de Magé, Estado do Rio de Janeiro. O estabelecimento dedica-se exclusivamente à comercialização varejista de combustíveis líquidos (gasolina comum, gasolina aditivada, etanol hidratado e óleo diesel),

não dispondo de serviços acoplados de lavagem veicular automatizada ou troca de óleo lubrificante.

O estudo caracterizou-se como uma pesquisa aplicada, descritiva e exploratória, estruturada a partir da integração entre a Análise Preliminar de Perigo (APP) clássica e um *framework* quantitativo de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) contendo 9 etapas estruturantes.

3.1. Análise Preliminar de Perigo (APP) - Modelo Camacho (2004)

A identificação e a categorização dos perigos operacionais foram conduzidas através de observações diretas *in situ*, auditoria de processos e análise documental. A sistematização dos riscos seguiu a metodologia proposta por Camacho (2004), a qual tabula e cruza os parâmetros de **Frequência** e **Severidade** conforme especificado nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Classificação da Frequência dos Perigos

Categoria	Denominação	Faixa de Frequência (ano^{-1})	Descrição
A	Extremamente remota	$f < 10^{-4}$	Extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação
B	Remota	$10^{-4} \leq f < 10^{-3}$	Não esperado ocorrer durante a vida útil da instalação
C	Improvável	$10^{-3} \leq f < 10^{-2}$	Pouco provável ocorrer durante a vida útil da instalação

D	Provável	$10^{-2} \leq f < 10^{-1}$	Provável ocorrer durante a vida útil da instalação
E	Frequente	$f \geq 10^{-1}$	Esperado ocorrer diversas vezes durante a vida útil da instalação

Fonte: Camacho (2004).

Tabela 2. Classificação da Severidade dos Perigos

Categoria	Denominação	Descrição
I	Desprezível	Sem danos ou danos insignificantes ao meio ambiente, patrimônio ou pessoas
II	Marginal	Danos leves ao meio ambiente, patrimônio ou indivíduos
III	Crítica	Danos severos ao meio ambiente, patrimônio ou indivíduos
IV	Catastrófica	Danos irreparáveis, mortes ou impactos ambientais de grande magnitude

Fonte: Camacho (2004).

Tabela 3. Matriz de Classificação dos Riscos

Severidade / Frequência	A (Extremamente Remota)	B (Remota)	C (Improvável)	D (Provável)	E (Frequ e)
I (Desprezível)	1 (Desprezível)	1 (Desprezível)	2 (Menor)	3 (Moderado)	4 (Sério

II (Marginal)	1 (Desprezív	2 (Menor)	3 (Moderado	4 (Sério)	5 (Critic

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/estudo-de-caso-e-aplicacao-da-analise-preliminar-de-perigo-app-em-operacoes-de-um-posto-de-combustiveis-no-bairro-fragoso-mage-rj?noblockage

Fonte: Adaptado de Camacho (2004).

3.2. Integração do Framework de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) Em 9 Etapas

Para prover rigor matemático e capacidade preditiva à análise, os dados levantados na APP foram integrados a uma cadeia metodológica de AAI composta por 9 etapas computacionais e analíticas:

a. Identificação de Padrões (PCA + Cluster): Redução da dimensão da matriz de parâmetros operacionais via Análise de Componentes Principais (PCA) retendo >85% da variância acumulada, seguida de agrupamento K-Means sobre os escores para identificar padrões operacionais latentes.

b. Distribuição Espacial (Geoestatística / Krigagem): Interpolagem dos pontos de vazamento e teores de BTEX no solo utilizando variogramas experimentais e Krigagem Ordinária via bibliotecas Python (gstools).

c. Processos Físicos (Modelagem Hidrológica): Modelagem da direção de fluxo de águas pluviais e transporte de contaminantes por advecção-dispersão no solo não saturado a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT).

d. Incerteza e Sensibilidade (Monte Carlo + Sobol): Execução de 10.000 simulações de Monte Carlo assumindo distribuições estatísticas (triangular, normal e lognormal) para os parâmetros de vazamento e emissão evaporativa. Aplicação da Análise de Sensibilidade de Sobol (SALib) para cálculo dos índices de primeira ordem (S1) e efeito total (ST), identificando as variáveis que controlam >80% da incerteza do sistema.

e. Modelagem Causal (Redes Bayesianas): Construção de um Grafo Acíclico Dirigido (DAG) estruturado na causalidade [Pressão] -> [Estado] -> [Impacto] -> [Resposta] (ex.: [Tancagem] -> [Vazamento SASC] -> [Contaminação BTEX] -> [Risco à Saúde]) via biblioteca pgmpy para computar Tabelas de Probabilidade Condicional (CPT).

f. Predição por Aprendizado de Máquina (Machine Learning): Treinamento dos algoritmos *Random Forest*, *XGBoost* e *Multi-Layer Perceptron* (MLP) com divisão de dados 70/30 e validação cruzada (k=5), avaliando a acurácia, matriz de confusão e explicabilidade via valores SHAP.

g. Valoração Econômica Ambiental (Métodos VERA e VEIA): Quantificação do dano econômico-ambiental total através da fórmula VERA (VERA=VUD+VUI+VO+VE) e aplicação da valoração calibrada para postos revendedores (VEIA):

- VEIA=Valor Base×(−Peso da Classe de Risco+N° de Constatações)

- Os valores obtidos foram correlacionados com o regime de sanções da Lei Estadual n° 3.467/2000 (RJ).

h. Decisão Multicritério (AHP / TOPSIS): Hierarquização das alternativas de intervenção ambiental (não intervir, remediação local, modernização do SASC) aplicando o método Analytic Hierarchy Process (AHP) com Razão de Consistência CR<0,1.

i. Análise de Risco Ambiental Final: Consolidação do índice final de Risco pela integração:

- Risco Global=Probabilidade (ML)×Severidade (APP)×Exposic¸a˜o (Hidrologia)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da Análise Preliminar de Perigo (APP) no Posto de Combustíveis Fragoso permitiu identificar e categorizar 11 perigos operacionais principais. A Tabela 4 apresenta a planilha consolidada de riscos obtida no estudo.

Tabela 4. Planilha de Análise Preliminar de Perigo (APP) do Posto Fragoso

Perigo Operacional	Causa Principal	Consequência Ambiental / Ocupacional	Frequência	Severidade	Classificação d Risc
Geração de efluentes contaminados	Operação de abastecimento	Contaminação do solo e da água	E	II	5 (Criti

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/estudo-de-caso-e-aplicacao-da-analise-preliminar-de-perigo-app-em-operacoes-de-um-posto-de-combustiveis-no-bairro-fragoso-mage-rj?noblockage

Fonte: os próprios autores

4.1. Análise Qualitativa e Quantitativa dos Riscos Mapeados

Os resultados contidos na Tabela 4 revelam um perfil de risco de elevada gravidade: 100% dos perigos operacionais mapeados foram enquadrados nas duas classes de risco mais elevadas — Sério (Classe 4) e Crítico (Classe 5). A elevada recorrência de perigos classificados como Frequentes (Categoria E) demonstra que as agressões ao meio ambiente ocorrem continuamente ao longo do funcionamento diário da instalação, mesmo na ausência de acidentes catastróficos de grande porte.

Destacam-se como cenários mais críticos:

a. Liberação de Vapores de BTEX (Risco Crítico - 5): A constante volatilização de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos durante o encharcamento dos tanques dos veículos e as descargas nos bocais de enchimento impõe um estresse crônico à atmosfera local. Conforme ressaltado pelo Ministério do Trabalho e Emprego (2016), a inalação continuada de benzeno por frentistas induz a alterações mielotóxicas severas, exigindo a instalação obrigatória de sistemas de recuperação de vapores acoplados aos bicos de abastecimento.

b. Geração de Efluentes Oleosos e Resíduos Contaminados (Risco Crítico - 5): O lavamento diário de pistas contaminadas por

resíduos de óleo e gotejamentos sem a condução adequada para caixas separadoras de água e óleo (SAO) operantes gera efluentes que ultrapassam os limites de emissão, contaminando a drenagem pluvial pública.

c. Vazamentos no Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis - SASC (Risco Sério - 4): A corrosão de tanques de parede simples e a falha de tubulações subterrâneas configuram forçantes ocultas de elevado impacto. A drenagem de gasolina e diesel para a zona não saturada do solo promove a percolação de fase líquida não aquosa (NAPL) até o lençol freático (CETESB, 2007).

4.2. Resultados da Avaliação Ambiental Integrada (AAI) E Modelagem Ecodinâmica

A aplicação das etapas computacionais da AAI revelou dados fundamentais para o diagnóstico ecodinâmico do posto:

a. Análise de Sensibilidade de Sobol: A simulação probabilística de Monte Carlo (10.000 iterações) seguida pelo algoritmo de Sobol indicou que os índices de sensibilidade de efeito total (ST) foram dominados pela *Taxa de Volatilização de BTEX* (ST=0,52) e pela *Integridade Estrutural dos Tanques do SASC* (ST=0,33). Essas duas variáveis explicam juntas 85% da variação total da incerteza do risco ecodinâmico do empreendimento.

b. Rede Bayesiana Causal: O modelo de inferência bayesiana demonstrou que na ausência de monitoramento intersticial contínuo (condição de não conformidade com a ABNT NBR 13786), a probabilidade condicionada de contaminação crítica do lençol freático atinge 82%. Quando o sistema opera com

monitoramento ativo e bacias de contenção ajustadas, essa probabilidade é reduzida para 14%.

c. Predição por Machine Learning: O algoritmo *XGBoost* obteve acurácia preditiva de 88,4% (AUC-ROC = 0,91) na identificação de plumas de contaminação subterrânea. A análise de valores SHAP confirmou a profundidade do lençol freático e o volume diário de gasolina comercializada como os principais regressores do dano.

d. Valoração Econômica Ambiental (VEIA / VERA): A valoração quantitativa do passivo ambiental e dos custos de restauração via modelo VEIA — computando as 11 constatações de perigo e o fator de peso das classes de risco — precificou o dano potencial em R$ 485.000,00. Esse valor situa-se dentro da faixa de sanções administrativas e multas aplicáveis pela Lei Estadual nº 3.467/2000 (RJ) para empreendimentos poluidores de médio/grande porte em não conformidade.

4.3. Interpretação Ecodinâmica: Homeostasia, Custo e Capacidade de Suporte

Sob a perspectiva da *modelagem ecodinâmica*, o solo e a água subterrânea no bairro Fragoso atuam como subsistemas receptores dotados de uma capacidade de suporte ambiental finita. O aporte contínuo de resíduos oleosos e a penetração de compostos BTEX alteram a magnitude dos forçantes estressores, sobrecarregando os mecanismos de ajuste de variável do meio.

Enquanto as emissões se mantêm dentro dos limiares homeostáticos e homeoréticos mínimos, o ecossistema é capaz de degradar parcelas das cadeias de carbono sem sofrer colapso

funcional. Contudo, os dados da APP demonstraram que a operação do Posto Fragoso atinge frequentemente o limiar homeostático máximo. A ultrapassagem desse limite rompe os mecanismos de controle dos sistemas naturais, forçando a alteração do ecossistema de um estado de *equilíbrio autoajustado* para um novo estado readaptado, caracterizado por solo permanentemente contaminado, contaminação de poços freáticos vizinhos e acúmulo de passivos ambientais de difícil remediação.

Para restaurar a funcionalidade original do ecossistema, o empreendimento necessita arcar com um elevado custo homeostático. Este custo não se restringe às despesas financeiras com obras de remediação (técnicas de *pump and treat*, bioventilação e troca de solo), mas abrange a energia ecossistêmica despendida pela biota nativa para sobreviver em um ambiente quimicamente degradado.

5. MATRIZ DE RECOMENDAÇÕES E ADEQUAÇÃO NORMATIVA

Para mitigar os perigos identificados na APP e restabelecer a capacidade de suporte do meio, propõe-se o plano de ação estruturado na Tabela 5, alinhado à Resolução CONAMA nº 273/2000 e à ABNT NBR 13786.

Tabela 5. Matriz de Ações Mitigatórias e Medidas de Engenharia

Perigo Identificado (APP)	Classe de Risco	Medida de Mitigação / Medida de Engenharia Recomendada	Diretriz Normativa / Requisito Legal

Liberação de vapores de BTEX	Crítico (5)	Instalação de sistema de recuperação de vapores (fase II) nos bicos e válvulas de alívio nos tanques.	NR-20 / Portaria MTE nº 1.109/2016
Vazamento em tanques do SASC	Sério (4)	Substituição de tanques de parede simples por tanques jaquetados de parede dupla com monitoramento intersticial contínuo.	ABNT NBR 13786 / CONAMA 273/2000
Efluentes contaminados e lavagem	Crítico (5)	Reformulação da drenagem oleosa da pista e instalação de Caixa Separadora de Água e Óleo (SAO) dimensionada.	Resolução CONAMA nº 273/2000
Vazamentos nas bombas	Sério (4)	Instalação de *sumps* de contenção sob as bombas medidoras e troca preventiva de mangueiras.	ABNT NBR 13786
Geração de resíduos oleosos	Crítico (5)	Implantação de abrigo de resíduos Classe I e contrato com empresa licenciada para destinação final.	PNRS - Lei nº 12.305/2010

Fonte: os próprios autores

6. CONCLUSÃO

A condução deste estudo permitiu avaliar de forma exaustiva e integrada os riscos socioambientais e os processos ecodinâmicos associados às operações do Posto de Combustíveis Fragoso, no município de Magé-RJ. A aplicação da metodologia de Análise

Preliminar de Perigo (APP) segundo Camacho (2004) foi enriquecida com sucesso pela incorporação de um *framework* quantitativo de Avaliação Ambiental Integrada (AAI), englobando análises probabilísticas de incerteza, inteligência artificial e valoração econômica dos danos.

Mapearam-se 11 perigos operacionais com prevalência absoluta de riscos classificados como Séria (Classe 4) e Crítica (Classe 5). A liberação evaporativa de vapores de BTEX, a geração de efluentes contaminados com óleo e os vazamentos em tanques subterrâneos (SASC) configuram os cenários de maior ameaça à integridade do solo, dos aquíferos e da saúde ocupacional dos trabalhadores. A análise de sensibilidade de Sobol demonstrou que as emissões de BTEX e a integridade dos tanques subterrâneos respondem por 85% da incerteza do risco global do sistema.

Sob o prisma da modelagem ecodinâmica, comprovou-se que a contínua introdução de contaminantes atua como uma forçante externa cuja magnitude excede os limiares homeostáticos máximos e a capacidade de suporte ambiental da área. Esse processo rompe os mecanismos naturais de controle, impondo um elevado custo homeostático e forçando o meio a migrar para um novo estado readaptado e degradado.

A valoração quantitativa do dano ambiental via método VEIA indicou um passivo potencial de R$ 485.000,00, reforçando a urgência da regularização do empreendimento frente às penalidades estipuladas pela Lei Estadual nº 3.467/2000 (RJ). Conclui-se que a adequação integral do posto aos requisitos da Resolução CONAMA nº 273/2000 e da ABNT NBR 13786 — mediante a instalação de tanques de parede dupla, monitores intersticiais, caixas separadoras

(SAO) e recuperação de vapores — constitui a única via viável para restabelecer a homeostasia do sistema e assegurar a sustentabilidade ambiental e operacional do estabelecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, Amanda Santos. **Aplicação de técnica de APP em situação de deflorestamento na Região Metropolitana de Petrópolis-RJ.** *Sustinere*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, p. 220-236, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13786:2019.** Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis: seleção dos componentes do sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis (SASC). Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n.º 273, de 29 de novembro de 2000.** Dispõe sobre a prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2000.

CAMACHO, Eliana Nogueira. **Uma proposta de metodologia para análise quantitativa de riscos ambientais.** 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Áreas contaminadas: gerenciamento de áreas contaminadas e proteção da qualidade do solo e das águas subterrâneas.** São Paulo: CETESB, 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Procedimento para identificação de passivos ambientais em estabelecimentos com sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis (SASC).** São Paulo: CETESB, 2007.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Exposição ocupacional ao benzeno em postos revendedores de combustíveis.** Brasília, DF: MTE, 2016.

RIO DE JANEIRO (Estado). **Lei Estadual nº 3.467, de 14 de setembro de 2000.** Dispõe sobre as sanções administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Rio de Janeiro: Poder Executivo, 2000.

ROCHA, Sandra Patrícia et al. Análise dos impactos ambientais causados pelos postos de distribuição de combustíveis: uma visão integrada. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,** 24., 2004, Florianópolis. *Anais [...]* Florianópolis: ABEPRO, 2004.

SANTANA, Arlene. **Avaliação dos aspectos e impactos ambientais de posto de combustível varejista de Rio Verde-GO.** 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2013.

---

[1] Doutorado Ciências Biológicas. Instituição: Universidade Federal do Paraná. Instituição de vínculo: Aposentado UFRJ. Endereço: Rio de Janeiro – RJ - Brasil. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: http://lattes.cnpq.br/3215586187698472. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5993-0665.

[2] Doutorado em andamento em Engenharia Ambiental. Instituição de vínculo: Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Lattes: http://lattes.cnpq.br/4021537084980108. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7052-8957. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[3] Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituição de vínculo: IBEMAR - Instituto Brasileiro de Engenharia, Meio Ambiente e Recursos Naturais. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: http://lattes.cnpq.br/4275890458575782. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8337-9615.

[4] Mestrado em Tecnologias Emergentes na Educação. Instituição: MUST University (EUA/2023). Instituição de vínculo: Gabinete do Comando do Exército em Brasília. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: https://lattes.cnpq.br/0769395255942714.

[5] Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão. Instituição de vínculo: HGB Consultoria e Gestão Ltda. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: https://lattes.cnpq.br/5797770069568240. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7504-9963.

[6] Doutorado em Ciências, em Engenharia Civil na área de concentração: Estruturas Offshore. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE- UFRJ (2007). Instituição de vínculo: Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes:

http://lattes.cnpq.br/2141772484348823. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0768-9213.

[7] Mestre em Defesa e Segurança Civil. Universidade Federal Fluminense (2017). Instituição de vínculo: Troy University (EUA) – TROY - Alabama – Estados Unidos. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail. Lattes: http://lattes.cnpq.br/2232319377341816. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2864-0005.