



Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Tecnologia e Sociedade

LÓGICA FUZZY PARA SUPORTE A REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL EM ÁREAS CONTAMINADAS

CARLOS ALBERTO FERREIRA DANTAS JÚNIOR

Mossoró, RN
Março/2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

FC284 Ferreira Dantas Júnior, Carlos Alberto.
Carlo LÓGICA FUZZY PARA SUPORTE A REMEDIAÇÃO
s SUSTENTÁVEL EM ÁREAS CONTAMINADAS / Carlos
Alber Alberto Ferreira Dantas Júnior. - 2023.
to 70 f. : il.
Ferre
ira
Danta Orientadora: Daniel Valadão Silva Silva.
s Coorientadora: Aan Beatriz Rocha de Jesus
JÃ°ni Passos Rocha.
orl Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2023.

1. IA. 2. Sítios Contaminados. 3. GAC. 4. Lógica
Difusa. 5. Modelagem Python. I. Silva, Daniel
Valadão Silva, orient. II. Rocha, Aan Beatriz
Rocha de Jesus Passos, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CARLOS ALBERTO FERREIRA DANTAS JÚNIOR

**LÓGICA FUZZY PARA SUPORTE A REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL EM
ÁREAS CONTAMINADAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido – UFERSA, Campus de
Mossoró, como parte das exigências
para a obtenção do título de Mestre
em Ambiente, Tecnologia e
Sociedade.

Orientador: Prof. Dr Daniel Valadão
Silva – UFERSA

Co-orientadora: Prof. Dr Ana Beatriz
Rocha de Jesus Passos

Defendida em: 20/03/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Valadão Silva (UFERSA)
Presidente da banca e orientador

Profa. Dra. Walter Martins Rodrigues (UFERSA)
Membro interno a instituição

Profa. Dra. Francisco Milton Mendes Neto (UFERSA)
Membro interno a instituição

Profa. Dra. Welka Preston Leite Batista da Costa (UERN)
Membro externo a instituição



Assinado de forma digital por
CARLOS ALBERTO
FERREIRA DANTAS JÚNIOR:
09871642440
Dados: 2024.03.20 16:10:48

Carlos Alberto Ferreira Dantas Júnior
Discente – UFERSA

Dedico esse trabalho a toda minha família, especialmente minha mãe que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Quitéria Rodrigues de Sousa, que sempre trabalhou para dar educação aos seus três filhos, sem você eu não teria e não seria nada.

A minha esposa, Camila Brilhante Reinaldo, que esteve comigo durante essa jornada, obrigado por me apoiar.

A minha filha, Maria Alice Brilhante Reinaldo Dantas, que mesmo pequenina me fortalece todos os dias com o seu sorriso.

A meu orientador Daniel Valadão Silva, que me orienta com muita paciência, muito obrigado por me orientar.

A meu Professor Walter Martins que sempre me acolhe em sua sala, e que me aconselha e direciona minhas ações acadêmicas, obrigado.

A minha irmã Emanuelle, obrigado pela ajuda de sempre.

A meu irmão Pablo, que apesar de ter nos deixado precocemente, sempre torceu pelo meu sucesso, obrigado.

Aos meus sobrinhos, que tanto amo, Felipe, Letícia e Haven.

Aos meus colegas de turma Hilgarde Ferreira e Debora Marcelino que sempre conversaram comigo.

LÓGICA FUZZY PARA SUPORTE A REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL EM ÁREAS CONTAMINADAS

RESUMO:

Esta pesquisa propõe um algoritmo de apoio baseado em Inteligência Artificial com aplicação da lógica Fuzzy para selecionar técnicas de remediação sustentável em áreas contaminadas. Utilizando pesquisa bibliográfica, um banco de dados foi construído e 16 variáveis antecedentes e 15 consequentes foram cuidadosamente selecionadas, assim como as 1260 regras de inferência integram a código escrito em Python para a escolha das técnicas mais adequadas. O algoritmo demonstrou eficiência na validação de dois estudos de caso, considerando as 16 variáveis de entrada aprovadas aos pilares da sustentabilidade para a escolha criteriosa das técnicas. Por meio de uma classificação baseada em amostras coletadas de estudos de casos anteriores, o algoritmo foi validado, selecionou as técnicas mais adequadas para processos de remediação sustentável. No entanto, melhorias são possíveis, como aprimorar do código com inteligência artificial e expandir o banco de dados para fortalecer o processo de aprendizagem de máquina. Esta pesquisa não apenas contribui para o desenvolvimento sustentável ao alinhar as variáveis aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mas também visa a criação de um aplicativo web para profissionais, aprimorando a seleção precisa e ágil de técnicas de remediação para cada contexto de áreas contaminadas.

Palavras-chave: IA; Sítios Contaminados; GAC; Lógica Difusa, Modelagem Python.

FUZZY LOGIC TO SUPPORT SUSTAINABLE REMEDIATION IN CONTAMINATED AREAS

ABSTRACT

This research proposes a support algorithm based on Artificial Intelligence with the application of Fuzzy logic to select sustainable remediation techniques in contaminated areas. Using bibliographical research, a database was built and 16 antecedent and 15 consequent variables were carefully selected, as well as the 1260 inference rules integrated into code written in Python to choose the most appropriate techniques. The algorithm demonstrated efficiency in validating two case studies, considering the 16 input variables approved for the pillars of sustainability for the careful choice of techniques. Through a classification based on samples collected from previous case studies, the algorithm was validated, selecting the most suitable techniques for sustainable remediation processes. However, improvements are possible, such as enhancing the code with artificial intelligence and expanding the database to strengthen the machine learning process. This research not only contributes to sustainable development by aligning variables with the Sustainable Development Goals (SDGs), but also aims to create a web application for professionals, improving the precise and agile selection of remediation techniques for each context of contaminated areas.

Keywords: AI; Contaminated Sites; GAC; Fuzzy Logic, Python Modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sítio contaminado por petróleo cru	16
Figura 2 – Modelo de remediação sustentável	20
Figura 3 – Modelo de neurônio não linear	24
Figura 4 – Modelo de Rede Feedforward com uma única camada de neurônio	24
Figura 5 – Modelo gráfico de lógica fuzzy	25
Figura 6 – Fluxograma do processo de seleção de técnica de remediação	26
Figura 07 – Modelo em bloco da Lógica Fuzzy	48
Figura 08 – Código de classificação da umidade	49
Figura 09 – Matriz permeabilidade padrão	50
Figura 10 – Modelo de seleção para tipo de solo	51
Figura 11 – Sítio contaminado por petróleo cru	51
Figura 12 – Matriz de seleção de técnicas de remediação	52
Figura 13 – Amostra representada em gráfico do antecedente umidade	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Características do sítio contaminado referente ao estudo de caso I.	54
Tabela 02 – Características do sítio contaminado referente ao estudo de caso II	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição do antecedente tipo de solo	31
Quadro 2 – Descrição do antecedente permeabilidade	32
Quadro 3 – Descrição do antecedente heterogeneidade	33
Quadro 4 – Descrição do antecedente umidade	34
Quadro 5 – Descrição do antecedente pH	35
Quadro 6 – Descrição do antecedente temperatura	36
Quadro 7 – Descrição do antecedente teor de matéria orgânica	37
Quadro 8 – Descrição do antecedente tipo de contaminante	38
Quadro 9 – Descrição do antecedente concentração	40
Quadro 10 – Descrição do antecedente profundidade	41
Quadro 11 – Descrição do antecedente metas de remediação	42
Quadro 12 – Descrição do antecedente tempo	43
Quadro 13 – Descrição do antecedente forma de tratamento	44
Quadro 14 – Descrição do antecedente potencial de investimento	45
Quadro 15 – Descrição do antecedente grau de reutilização	46
Quadro 16 – Descrição do antecedente distúrbio	47

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 – Seleção dos artigos pesquisados	28
Gráfico 2 – Classificação das principais técnicas de remediação	29
Gráfico 3 – Relação das técnicas de remediação com os ODS	30
Gráfico 4 – Relatório de seleção de técnicas de remediação I	54
Gráfico 5 – Relatório de comparação entre os modelos.	56
Gráfico 6 – Relatório de seleção de técnicas de remediação II	57

Sumário

RESUMO:	6
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos específicos	15
3. REFERENCIAL TEÓRICA	15
3.1 Áreas contaminadas	15
3.2 Legislação Brasileira aplicável ao gerenciamento de áreas contaminadas	17
3.3 Remediação sustentável	19
3.4 Inteligência Artificial aplicando lógica difusa ao processo de tomada de decisão	22
4. METODOLOGIA	25
4.1 Primeira etapa: inventário dos Consequentes	26
4.2 Segunda etapa: levantamento do Antecedentes	29
4.3 Terceira etapa: aplicação da lógica Fuzzy	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Construção do código para os antecedentes e consequentes	49
5.2 Construção da Regras da inferência do modelo Fuzzy	50
5.3 Seleção das técnicas de remediação	51
5.4 Estudo de caso I – vazamento de petróleo cru na bacia Potiguar	52
5.5 Resultados obtidos a partir do estudo de caso	53
6. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
ANEXO I – RESULTADOS ESTUDO DE CASO	64
APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVE	65

1. INTRODUÇÃO

A remediação sustentável de áreas contaminadas representa um desafio multidisciplinar crucial que visa reduzir os riscos associados à presença de contaminantes, preservar o ecossistema e mitigar os impactos na saúde humana (BARDOS et al., 2002; PETRUZZI, 2011). A tomada de decisão para selecionar técnicas de remediação torna-se um processo complexo e subjetivo devido à falta de critérios claros e objetivos (BRAUN, 2021). Nesse contexto, a utilização de métodos para apoio à decisão se destaca como uma abordagem fundamental para garantir a eficácia e a sustentabilidade dos processos de remediação (ZILL, 2016).

A modelagem matemática foi reconhecida como uma ferramenta eficaz para solucionar problemas de tomada de decisão e análise de dados em cenários complexos (ZILL, 2016). Considerando a crescente preocupação com a remediação sustentável, a aplicação de sistemas inteligentes em conjunto com a lógica difusa emerge como uma solução promissora para a seleção criteriosa das técnicas de remediação (ZILL, 2016).

A abordagem atual para a seleção de técnicas de remediação muitas vezes se baseia em critérios convencionais, como custo e disponibilidade, ignorando aspectos cruciais da sustentabilidade (HUYSEGOMS; CAPPUYNS, 2017). As técnicas tradicionais muitas vezes não levam em consideração os pilares ambientais, sociais e econômicos da sustentabilidade, podendo resultar em impactos indesejados (ANDERSON et al., 2018).

Diante dessas lacunas, é imperativo desenvolver um algoritmo de apoio à decisão para a seleção de técnicas de remediação. Este algoritmo, baseado em uma Inteligência Artificial com aplicação de lógica Fuzzy, visa a realização de tarefas específicas, incorporar critérios de sustentabilidade, reduzir a subjetividade na escolha das técnicas e fornecer uma análise multicritério objetiva (BARDOS et al., 2002; HOU et al., 2017).

A remediação sustentável requer uma avaliação holística que contemple os impactos primários, secundários e terciários das técnicas de remediação (ANDERSON et al., 2018). A introdução de uma IA com a lógica Fuzzy neste contexto visa oferecer uma estrutura sistemática e níveis de certeza para considerar diversos fatores simultaneamente, permitindo a atribuição de pesos com base em critérios de sustentabilidade e de regras que integram esses elementos para gerar um vetor solução para classificar e selecionar as técnicas mais adequadas às condições do sítio contaminado (HUYSEGOMS;

CAPPUYNS, 2017).

Esse método analítico proposto se baseia na previsão de que a avaliação da sustentabilidade deve ser integral, considerando aspectos ambientais, sociais e econômicos de forma equilibrada (O'CONNOR; HOU, 2018). A inclusão de um sistema de inteligência artificial automatiza o processo de tomada de decisão oferece uma oportunidade significativa para melhorar a eficiência e a eficácia das estratégias de remediação, atendendo aos requisitos da sustentabilidade (FORUM, 2009).

A aplicação desta abordagem em projetos de remediação sustentável visa não apenas à redução dos riscos de contaminação, mas também à promoção do desenvolvimento sustentável, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU (BRAUN et al., 2020b; ONU, 2021). Este método, portanto, contribui não apenas para a seleção de técnicas de remediação eficientes, mas também para a otimização do uso de recursos, minimizando os impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente (RIZZO et al., 2016).

Neste contexto, propomos um algoritmo de apoio à decisão, fundamentado em Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy, desenvolvido em Python, para a seleção criteriosa de técnicas de remediação. Essa abordagem objetiva permite a classificação das técnicas, baseada em critérios de sustentabilidade, reduzindo a subjetividade e fomentando a remediação ambiental sustentável.

Zill (2016) destaca a modelagem matemática como alternativa eficaz para resolver problemas de tomada de decisão e análise de sistemas complexos. Nesse contexto, sua aplicação torna-se fundamental na seleção de técnicas de remediação, dada a complexidade inerente à escolha dessas estratégias diante de uma ampla gama de critérios e considerações sustentáveis.

A utilização de algoritmos baseados em sistemas inteligentes artificiais como a lógica Fuzzy para a seleção de técnicas de remediação em solos contaminados oferece uma abordagem de análise de múltiplos critérios. Essa metodologia permite a atribuição de pesos aos critérios, identificando as técnicas com maior potencial de remediação, verificadas aos princípios da sustentabilidade. Além disso, através de uma análise matricial, são cruzadas variáveis do problema com os critérios desejados, resultando em uma matriz de solução que reflete a importância das variáveis em relação aos critérios (BARDOS et al., 2016).

2. OBJETIVOS

- Conceber um algoritmo de apoio à decisão, fundamentado em inteligência Artificiais usando Lógica Fuzzy, desenvolvido em Python, para a seleção criteriosa de técnicas de remediação sustentável.

2.1 Objetivos específicos

- Fazer uma descrição sobre áreas contaminadas;
- Descrever sobre as legislações aplicadas ao gerenciamento de áreas contaminadas;
- Fazer uma abordagem sobre remediação sustentável;
- Realizar uma abordagem teórica sobre Lógica Fuzzy aplicado a processos de tomada de decisão;
- Conceber um algoritmo em Python usando Lógica Fuzzy para a remediação sustentável.

3. REFERENCIAL TEÓRICA

3.1 Áreas contaminadas

O problema das áreas contaminadas é uma realidade que impacta não apenas o solo, mas também os recursos hídricos e a saúde pública (BARDOS et al., 2002). Historicamente, as discussões sobre poluição, focavam principalmente na água, mas crescentemente surgem abordagens abrangentes que contemplam a contaminação do solo, considerando um estágio crucial antes da eventual contaminação dos lençóis freáticos (BRAUN, 2022).

A definição de locais contaminados abrange duas nuances: os ambientalmente contaminados e aqueles com contaminação comprovada (BARDOS et al., 2002). A primeira denota áreas suspeitas de contaminação, enquanto a segunda confirma a presença de substâncias tóxicas em níveis prejudiciais à saúde humana e ao ecossistema (BARDOS et al., 2002). Nesse cenário, são identificados dois termos-chave: "sítios ambientais contaminados" e "sítios contaminados".

Figura 01 – Sítio contaminado por petróleo cru.



A identificação precoce de áreas potencialmente contaminadas é vital para a gestão ambiental (BRAUN, 2022). Contudo, a dificuldade reside na precisão da localização e quantificação desses locais (BRAUN, 2022), evidenciando a urgência de métodos claros de identificação para facilitar o processo de intervenção e gestão.

As dimensões globais dessa questão são notáveis: a Europa apresenta mais de 2,5 milhões de locais potencialmente contaminados, sendo que 14% cancelam o tratamento urgente (BRAUN, 2022). As projeções indicam um aumento de 50% na necessidade de ações corretivas até 2025, com um custo estimado em € 6 bilhões anuais (VAN LIEDEKERKE et al., 2014; HUYSEGOMS & CAPPUYNS, 2017). Da mesma forma, nos EUA, a Agência de Proteção Ambiental compreende que centenas de locais necessitam de remediação, com um custo projetado de US\$ 209 bilhões (USEPA, 2008).

Especificamente nos EUA, a Agência de Proteção Ambiental mapeia centenas de locais exigindo remediação, sendo 1.782 classificadas como prioridade nacional, com uma estimativa de custo para recuperação de US\$ 209 bilhões (USEPA, 2008). A situação na China também é alarmante, com aproximadamente 90% das águas subterrâneas contaminadas devido às atividades industriais (QIU, 2011). Enquanto isso, países como o Canadá, Reino Unido e Holanda registram números expressivos de locais contaminados (GOVERNO DO CANADÁ, VERSLUIJS et al., 2007).

O Brasil, por sua vez, apresenta um desafio significativo: apenas três instituições mantêm bancos de dados atualizados sobre locais contaminados, como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a Fundação Estadual do Meio Ambiente em Minas Gerais (FEAM), e o Instituto Estadual do Ambiente (INEA) no Rio de Janeiro, com um crescimento anual no cadastro dessas áreas (BRAUN et al., 2020). A ausência de uma política específica e a falta de recursos impactam diretamente a gestão desses

locais, tornando o tratamento dos sítios contaminados um desafio latente (BUENO et al., 2018).

A ausência de uma estrutura regulatória robusta direcionada a locais contaminados no Brasil é um ponto de destaque, contrastando com países como os EUA, Canadá e países europeus, que historicamente têm regulamentações mais condicionais em relação à manipulação ambiental (BUENO et al., 2018). No Brasil, a Resolução 420/2009 do CONAMA é o principal instrumento regulador, enquanto a gestão e intervenção em locais contaminados são orientadas por órgãos estaduais e instituições específicas, como a CETESB em São Paulo, a FEAM em Minas Gerais, o INEA no Rio de Janeiro e a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Essa lacuna regulatória e a escassez de recursos disponíveis para intervenção e controle atrasaram ações efetivas no tratamento de locais potencialmente contaminados no Brasil (BUENO et al., 2018). Isso ressalta a necessidade premente de métodos eficazes de identificação e quantificação de locais contaminados para planejamento urbano e intervenção adequada.

A identificação de locais potencialmente contaminados é crucial para o desenvolvimento de estratégias de remediação e prevenção de impactos adversos à saúde humana e ao meio ambiente (BRAUN et al., 2020). A diversidade de métodos disponíveis para essa identificação exige uma análise criteriosa, pois suas abordagens variadas podem dificultar a aplicação prática (BRAUN et al., 2020).

3.2 Legislação Brasileira aplicável ao gerenciamento de áreas contaminadas

A legislação brasileira relativa ao gerenciamento de áreas contaminadas é estabelecida por uma série de instrumentos legais, os quais possuem fundamentos em diferentes níveis hierárquicos do ordenamento jurídico. No ápice dessa estrutura encontra-se a Constituição Federal, a qual consagra princípios ambientais e diretrizes gerais. Em seguida, são hierarquizadas como leis federais, como a Política Nacional de Meio Ambiente e a Lei de Crimes Ambientais, que abordam as infrações e deliberações associadas à contaminação do solo e da água (CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988; LEI 6.938/81; LEI 9.605/ 98).

A Carta Magna, em seu Artigo 225, assegura a relevância da preservação ambiental ao respeitar o direito de todos a um ambiente ecologicamente equilibrado, indispensável à qualidade de vida presente e futuras das gerações (CONSTITUIÇÃO

FEDERAL, 1988). Este dispositivo impõe tanto ao poder público quanto à coletividade a responsabilidade de preservar e proteger o meio ambiente, exigindo a fiscalização e segurança contra atividades que possam ocasionar danos ambientais.

O Artigo 225, § 3º da Constituição Federal realça as obrigações do poder público e da sociedade em coibir práticas que coloquem em risco a saúde e o meio ambiente, incumbindo os responsáveis por danos ambientais a repará-los. Paralelamente, o Artigo 14, § 1º da Lei 6.938/81, referente à Política Nacional do Meio Ambiente, reforça a necessidade de ações preventivas para o uso racional dos recursos naturais e o fomento ao desenvolvimento sustentável (LEI 6.938/81).

Tais disposições legais ressaltam a relevância da preservação ambiental e da responsabilização por danos causados, mediante a aplicação de sanções penais e administrativas aos infratores, sem prejuízo da obrigação de reparar os danos.

No âmbito da Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605/98), seu Artigo 2º estabelece como infração ambiental qualquer ação que cause transferência ambiental, poluição ou danos aos recursos naturais, sujeitando tantas pessoas físicas quanto jurídicas a sanções legais, incluindo reclusão e multas (Lei 9.605/98).

As legislações estaduais e municipais também desempenham papel crucial, podendo estabelecer regulamentações específicas para áreas contaminadas em suas jurisdições, enquanto as agências ambientais em nível estadual e municipal exercem atuação ativa na fiscalização e regulamentação dessas áreas.

Destaca-se ainda a importância da Resolução CONAMA 420/2009, um instrumento regulador relevante no Brasil para o gerenciamento de áreas contaminadas. Essa resolução define critérios técnicos para identificação, avaliação e remediação dessas áreas, alterações à proteção da saúde humana e do meio ambiente (CONAMA 420/2009).

Essa resolução direciona a condução de monitoramento das áreas afetadas, estabelece a obrigação de comunicar áreas contaminadas aos órgãos ambientais e determina a elaboração de planos de intervenção. Além disso, reforça a responsabilidade do poluidor na remediação e recuperação dessas áreas, fomentando a gestão ambiental adequada e contribuindo para a prevenção e resolução dos problemas relacionados à contaminação do solo e das águas subterrâneas (CONAMA 420/2009).

Essas leis atuam em múltiplos aspectos, protegendo o meio ambiente, preservando a qualidade do solo e da água, bem como a diversidade biológica. Eles também protegem a saúde e a segurança da sociedade, prevenindo a exposição a substâncias tóxicas. Economicamente, promovem a responsabilidade ambiental das

empresas, estimulando a prevenção da contaminação e a recuperação de áreas degradadas, o que, por sua vez, pode reduzir os custos associados à limpeza e evitar prejuízos às propriedades adjacentes.

Assim, a disposição das leis brasileiras relacionadas ao gerenciamento de áreas contaminadas desempenha um papel vital na proteção do meio ambiente, na promoção da saúde pública e na sustentabilidade econômica do país (CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988; LEI 6.938/81; LEI 9.605/98; CONAMA 420/2009).

3.3 Remediação sustentável

A remediação de áreas contaminadas não é automaticamente sustentável, sendo essencial considerar os impactos ambientais, econômicos e sociais associados a esse processo (BARDOS et al., 20011). A remediação pode acarretar consequências próprias em diversas esferas, como o uso de recursos naturais, impactos sobre a água e o ar, previsões de negócios e riscos sociais, como a segurança dos trabalhadores do local e impactos no tráfego (BARDOS et al., 2011). Embora traga benefícios diretos, como a redução da carga poluente no meio ambiente e a proteção da saúde humana, também pode trazer benefícios mais amplos, como o aumento dos valores imobiliários na região e a criação de novos espaços públicos (BARDOS et al., 2002).

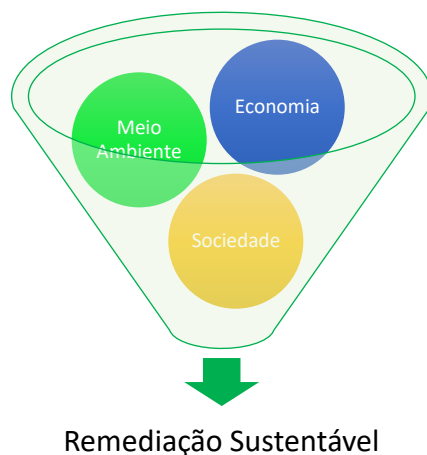
A gestão de áreas contaminadas e a aplicação de técnicas de remediação são decididas como úteis e benéficas para mitigar os impactos e riscos associados à contaminação, possibilitando a restauração das funções ecológicas da região (BARDOS et al., 2002). Entretanto, o próprio processo de remediação pode introduzir novos impactos locais, regionais e globais no meio ambiente, na sociedade e na economia, devido ao alto consumo de energia, materiais e emissões de gases ao longo de sua vida útil (SØNDERGAARD et al., 2017).

É importante considerar que os impactos ambientais, sociais e econômicos, conhecidos como primários, secundários e terciários, respectivamente, podem persistir após a aplicação das técnicas de remediação, principalmente na fase de encerramento do local, relacionados ao uso futuro da área e aos riscos residuais para seus futuros usuários (LESAGE et al., 2007; HOU et al., 2014a).

A fim de inserir os conceitos de sustentabilidade na gestão de áreas contaminadas, o enfoque da remediação sustentável buscar maximizar os benefícios e reduzir os impactos ambientais, econômicos e sociais das ações de remediação, visa

alcançar um benefício líquido global para garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente (HOU et al., 2014b; HADLEY E HARCLERODE, 2015; BARDOS et al., 2016). Nesse sentido a Figura 02 mostra o modelo de remediação sustentável contemplando os pilares da sustentabilidade.

Figura 02 – Modelo de remediação sustentável.



Fonte: Bardos (2016).

O termo “remediação sustentável” é relativamente recente, no entanto, tem se tornado um conceito amplamente utilizado entre entidades reguladoras e governamentais no setor de remediação (PETRUZZI, 2011; SMITH E KERRISON, 2013; HOU, 2016). Dessa forma, o Fórum de Remediação Sustentável (SuRF), criado em 2006 nos Estados Unidos, foi a primeira iniciativa para promover o conceito de remediação sustentável e atualmente possui grupos em diversos países, como Reino Unido, Brasil, Holanda, Nova Zelândia, Austrália, Itália, China, Japão e Colômbia (BARDOS et al., 2013; HADLEY E HARCLERODE, 2015; HOU et al., 2016; RIZZO et al., 2016; BARDOS et al., 2018; SONG et al., 2018).

Diversos grupos de trabalho semelhantes foram propostos, incluindo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), o Conselho Interestadual de Tecnologia e Regulamentação (ITRC), a Rede para Terras Industrialmente Contaminadas na Europa (NICOLE), a Instituição do Reino Unido sobre Terras Contaminadas: Aplicações em Ambientes Reais (CL:AIRE) e a Organização Internacional de Normalização (ISO). Essas agências e organizações estão focadas no desenvolvimento de diretrizes, ferramentas e padrões sobre remediação sustentável (BARDOS et al., 2013; HADLEY E HARCLERODE, 2015; HOU et al., 2016; RIZZO et al., 2016; BARDOS et al., 2018; SONG et al., 2018).

Os princípios e práticas de remediação sustentável podem ajudar a reduzir o impacto de um projeto específico e aumentar seu benefício líquido geral (SURF, 2009). Considerações de sustentabilidade são cada vez mais importantes na gestão de áreas contaminadas, garantindo a proteção dos aspectos ambientais e socioeconômicos associados aos processos de remediação, incluindo os efeitos sobre as pessoas que vivem nas localidades afetadas (SMITH E KERRISON, 2013; YASUTAKA et al., 2016).

Portanto, a avaliação do risco total em um contexto geográfico e temporal mais amplo dos processos de remediação, a garantia de que os impactos não superem os benefícios das técnicas aplicadas, além do equilíbrio entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos são fundamentais para a abordagem de gestão de áreas contaminadas com foco na sustentabilidade do projeto de remediação (DIAMOND et al., 1999; BARDOS et al., 2002; REINIKAINEN et al., 2016).

É evidente que o equilíbrio desses impactos é altamente específico para cada local e projeto, muitas vezes vinculado a objetivos empresariais que exigem remediação (BARDOS et al., 2011). Para melhorar a sustentabilidade da remediação, várias iniciativas internacionais desenvolvem ferramentas de avaliação e gestão, como os projetos financiados pela União Europeia HOMBRE e Groenlândia, focados na sinergia entre a regeneração de áreas degradadas e outros serviços ambientais (BARDOS et al., 2011).

Nessa perspectiva o Fórum de Remediação Sustentável no Reino Unido (SURF UK) desempenha um papel significativo nesse debate, fornecendo um arcabouço e ferramentas que se alinham às boas práticas existentes para avaliação e gestão de riscos, orientando a tomada de decisão (BARDOS et al., 2011). Esse fórum preconiza uma abordagem em camadas para avaliação da sustentabilidade, enfatizando a proporção do esforço decisório, priorizando abordagens simples que demonstrem resultados robustos (SURF UK, 2009).

A análise de custo-benefício (CBA) é uma ferramenta poderosa para a comparação direta de impactos diversos utilizando uma unidade comum - o dinheiro. No entanto, a CBA convencional tem limitações na monetização de indicadores de sustentabilidade, especialmente os sociais e alguns ambientais. Uma abordagem emergente defende a quantificação financeira de todos os impactos sociais, ambientais e econômicos, mesmo que em níveis elevados, o que significa compreender a sustentabilidade de um projeto de remediação em termos de valor criado ou destruído para as empresas envolvidas (BRAUN, 2022).

Neste sentido, a remediação sustentável representa uma abordagem integrada que busca melhorar os benefícios da remediação enquanto minimiza os impactos adversos sobre o meio ambiente, a sociedade e a economia, mantendo-se alinhado com os princípios de sustentabilidade para garantir o bem-estar humano e a preservação ambiental (BARDOS et al., 2016; HADLEY E HARCLERODE, 2015; REINIKAINEN et al., 2016; SONG et al.).

3.4 Inteligência Artificial aplicando lógica difusa ao processo de tomada de decisão

A aplicação da Inteligência Artificial (IA) em conjunto com a lógica difusa para o processo de tomada de decisão representa um avanço significativo na resolução de problemas complexos, especialmente em ambientes multifacetados e imprecisos. Uma IA é composta por estruturas computacionais inspiradas no cérebro humano, como o raciocínio, capazes de fazer recomendações específicas ao usuário a partir de conjuntos de dados fornecidos por um especialista (DAS et al., 2015). Por outro lado, a lógica difusa possibilita o tratamento da incerteza e imprecisão ao atribuir graus de pertinência às variáveis, contrastando com a abordagem binária da lógica booleana tradicional (ZADEH, 1965).

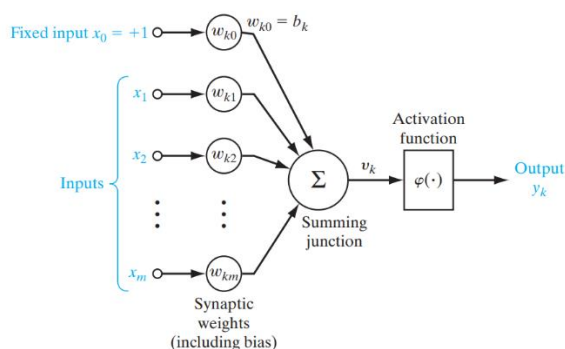
É notável a aplicabilidade da lógica difusa na tomada de decisões ambientais, como ilustrado na tese de Braun (2022), porém, há ressalvas quanto à subjetividade nos processos devido à aplicação de um modelo predominantemente booleano. A autora apresenta dados de entrada difusos, como a heterogeneidade do solo contaminado dividido em conjuntos "pequeno", "médio" e "alto", porém, a variação entre os profissionais acarreta resultados subjetivos. Além disso, a classificação das técnicas ainda segue premissas binárias ("Satisfaz", "Satisfaz parcialmente" ou "Não Satisfaz") que se assemelham a um vetor booleano (1, 0.5, 0), evidenciando a necessidade de transcender o modelo tradicional de tomada de decisão para incluir incertezas em conjuntos difusos (SCOTT et al., 2003).

A interseção da IA com a lógica difusa oferece novas perspectivas para a análise multicritério na tomada de decisão (ARSANJANI et al., 2013). Os métodos MCDA baseados em lógica difusa, conhecidos como IF-MCDA, operam de forma eficaz em ambientes incertos, permitindo uma análise mais ampla e um tratamento apropriado da incerteza nos dados (COX & O'HAGAN, 1998). No entanto, a escolha do método mais

confiável permanece um desafio devido à variabilidade nos resultados entre diferentes técnicas MCDA (MAT BUCKLAND, 2004).

Os métodos mais simples é a Rede Neural Artificial (RNA) que tem o intuito de imitar um neurônio humano. De acordo com (HAYKIN, 1994), um neurônio artificial é composto por três elementos principais: um conjunto de sinapses com pesos associados, um somador para a soma dos sinais de entrada ponderados e uma função de ativação para limitar a amplitude do sinal de saída do neurônio. Esses elementos são fundamentais para o processamento de informações em um RNA, onde os pesos sinápticos são ajustados durante o processo de aprendizagem, permitindo a adaptação da rede a diferentes tarefas, como mostra a Figura 03.

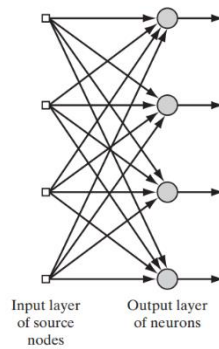
Figura 03 – Modelo de neurônio não linear.



Fonte: Haykin (1994).

Em geral, existem três classes fundamentalmente diferentes de arquiteturas de redes neurais. Uma delas é uma rede neural em camadas, na qual os neurônios são organizados em camadas. Na forma mais simples de uma rede em camadas, há uma camada de entrada de nós fonte que se conecta diretamente a uma camada de saída de neurônios, porém sem conexões de retorno (HAYKIN, 1994). Essa rede é prejudicial do tipo feedforward, como ilustrado na Figura 04 para o caso de quatro nós em ambas as camadas de entrada e saída. Essa configuração é conhecida como rede de camada única, sendo que a designação "camada única" se refere à camada de saída de nós de computação (HAYKIN, 1994). A camada de entrada não é contada, pois não realiza computação.

Figura 04 – Modelo de Rede Feedforward com uma única camada de neurônio.

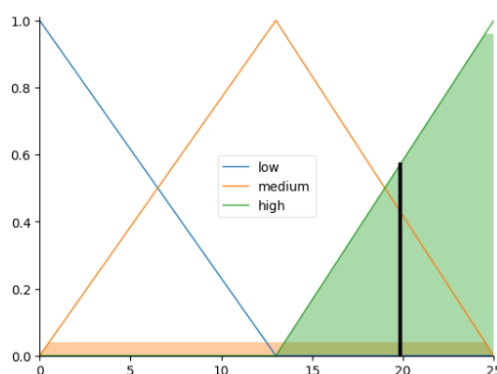


Fonte: Haykin (1994).

As Redes Feedforward de Camada Única (Redes de Alimentação Direta de Camada Única) são um tipo simples de arquitetura de rede neural, onde a informação flui em uma direção, da camada de entrada para a camada de saída, sem ciclos ou realimentações. Essa estrutura é útil para tarefas de classificação simples, onde a saída desejada pode ser linearmente separável (HAYKIN, 1994).

A lógica Fuzzy, também conhecida como lógica difusa, é um ramo da lógica multivalorada que lida com o raciocínio impreciso e incerto, lidando com conceitos que não podem ser facilmente definidos em termos de verdadeiro ou falso. Esta lógica difere da lógica booleana convencional para permitir que as variáveis possuíssem graus de pertinência, em vez de serem restrições binárias. Isso possibilita uma representação mais fiel de fatos do mundo real que são naturalmente ambíguos como mostra a figura 05.

Figura 05 – Modelo gráfico de lógica Fuzzy.



O exemplo da figura 05 mostra as variáveis de entrada, uma variável de saída e funções de pertinência para cada uma delas, assim, são definidas as regras Fuzzy e criado um sistema de controle Fuzzy. As funções de pertinência e regras são visualizadas graficamente, e por fim, o sistema é simulado com valores de entrada específicos, mostrando o resultado do valor. Esse modelo permite que a classificação tenha menor

subjetividade transformando o conjunto de valores incertos, como “pequeno”, “médio” e “alto” em um conjunto Fuzzy com níveis de incerteza abrangendo os modelos usados tradicionalmente booleanos.

A combinação dessas duas abordagens resulta em uma IA com operação difusa. Esses modelos de sistemas inteligentes são capazes de lidar com informações imprecisas ou incertas, tornando-se altamente relevantes em uma variedade de campos de aplicação do mundo real, como sistemas de controle inteligente, medicina e diagnóstico, processamento de linguagem natural, sistemas de recomendação e robótica autônoma.

Redes neurais com operação Fuzzy são usadas em sistemas de controle para ajustar automaticamente as saídas com base em entradas imprecisas. Por exemplo, em sistemas de controle de temperatura de edifícios, essas redes podem otimizar o uso de aquecimento e resfriamento, proporcionando visões climáticas imprevisíveis. Por outro lado, na área médica, essas redes são aplicadas em sistemas de apoio à decisão clínica. Eles podem ajudar os médicos a diagnosticarem doenças com base em sintomas vagos, considerando vários fatores de risco e incertezas, resultando em diagnósticos mais precisos.

Em aplicações de processamento de linguagem natural, as redes neurais com operação Fuzzy podem lidar com a ambiguidade e a incerteza inerentes à linguagem humana. Eles melhoraram a compreensão de contextos vagos, permitindo assistentes virtuais e chatbots aprimorados.

Em serviços de recomendação, como os usados por gigantes de streaming, essas redes podem considerar nuances nas preferências do usuário e fazer recomendações mais personalizadas, levando em conta elementos subjetivos. Já na robótica, a inteligência artificial é empregada para permitir que robôs tomem decisões em sistemas dinâmicos e incertos. Isso é especialmente útil em robótica móvel e automação industrial.

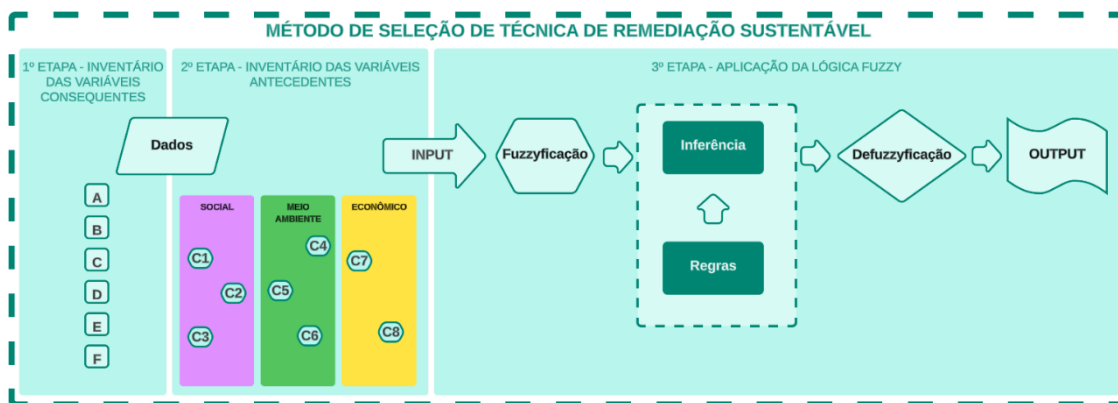
4. METODOLOGIA

É importante destacar que o foco deste trabalho está apenas na etapa de seleção das técnicas de remediação, ou seja, deve ser considerado que as etapas de investigação e identificação já foram concluídas. Logo, devemos supor que todos os dados de avaliação preliminar, confirmatória, detalhada e de risco foram encontrados.

Neste sentido o presente projeto irá analisar e avaliar as possíveis variáveis envolvidas em um processo de seleção de técnicas de remediação, assim como os critérios

desejados com base nos pilares de sustentabilidade de forma quantitativa. Dessa maneira, o objetivo desse projeto é fazer um cruzamento de diferentes técnicas de um processo de remediação sustentável com os critérios determinados utilizando IA e Lógica Fuzzy. Portanto, a metodologia desse projeto será realizada em três etapas como podemos acompanhar no fluxograma do processo metodológico (Figura 06).

Figura 06 – Fluxograma do processo de seleção de técnica de remediação.



A primeira etapa é fundamental para construir uma base de dados sólida, nesse sentido, foi realizado um inventário das principais técnicas de remediação aplicáveis em áreas contaminadas. A mesma proposta foi aplicada na segunda etapa que, embora seja outro processo, faz parte também do levantamento de dados, mas referente à determinação dos critérios levando em consideração os pilares da sustentabilidade. Esses dados levantados foram usados no processo de aprendizado da IA para que ela possa fazer as operações necessárias entre um amostras encontradas em local contaminado e uma base de dados padrão.

A terceira etapa é a construção de um código de IA usando Lógica Fuzzy que armazena os dados das etapas anteriores, cria-se regras e faz comparações entre as amostras e realiza o processo de defuzzificação para classificar as técnicas com base nos resultados encontradas nas amostras do solo. Essa etapa gera um conjunto de dados que podem ser comparados e expressos graficamente para auxiliar o usuário a tomar uma decisão com menor subjetividade.

4.1 Primeira etapa: inventário dos Consequentes

Inicialmente foi realizado um levantamento, seleção e filtragem das possíveis técnicas de remediação. Esta primeira etapa é uma pesquisa bibliográfica sistemática

totalmente via internet, especificamente usando os principais serviços de bancos de dados do campo científico como o Web of Science e Scopus.

Nesse sentido, foi realizada uma busca por artigos científicos revisados por pares em um período de um ano, iniciando no dia 01 de junho de 2022 e finalizado no dia 30 de julho de 2023. Nessa pesquisa seguiu-se a metodologia aplicada por Braun (2022), que usou a combinação de duas operações (AND e OR), utilizadas na álgebra booleana para realizar comparações. Logo, foi aplicada a combinação dentro dos títulos, resumos e palavras-chaves com as seguintes expressões: “remediation techniques or remediation technologies and contaminated soil”. Essa pesquisa retornou 483 trabalhos, que foram filtrados por ter acesso livre e categorizados em função dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, como mostra a Gráfico 01 (WEB OF SCIENCE, 2023).

Gráfico 01 – Seleção dos artigos pesquisados



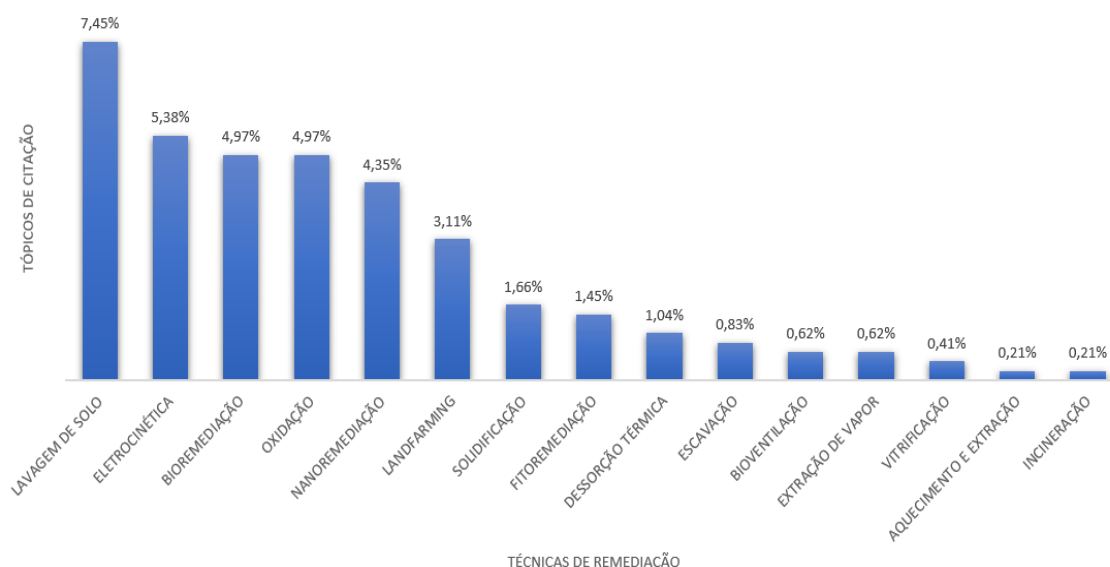
Fonte: Web of Science (2023)

Durante o período de pesquisa foi realizada uma classificação das principais técnicas de remediação levando em consideração as técnicas com maior porcentagem nos tópicos de citações da base de dados que retornou 86 diferentes técnicas e tecnologias citadas em trabalhos científicos.

As pesquisas via Web Of Science (2023) revelaram as principais tecnologias de remediação atualmente, entretanto, com o objetivo de criar um modelo realista essas técnicas não poderiam ser aplicadas, visto que a não disponibilidade no mercado de alguns dessas técnicas inviabilizam a utilização. Nesse sentido, foi realizada uma filtragem detalhada usando os critérios aplicados por Braun (2022), como: i) tratamentos

aplicados – biológico, físico-químico e térmico; ii) técnicas validadas e aplicadas em larga escala; iii) técnicas disponíveis no mercado. Logo, os resultados foram reduzidos para 15 técnicas de remediação possíveis de aplicação atendendo aos critérios determinados, como mostra o Gráfico 02.

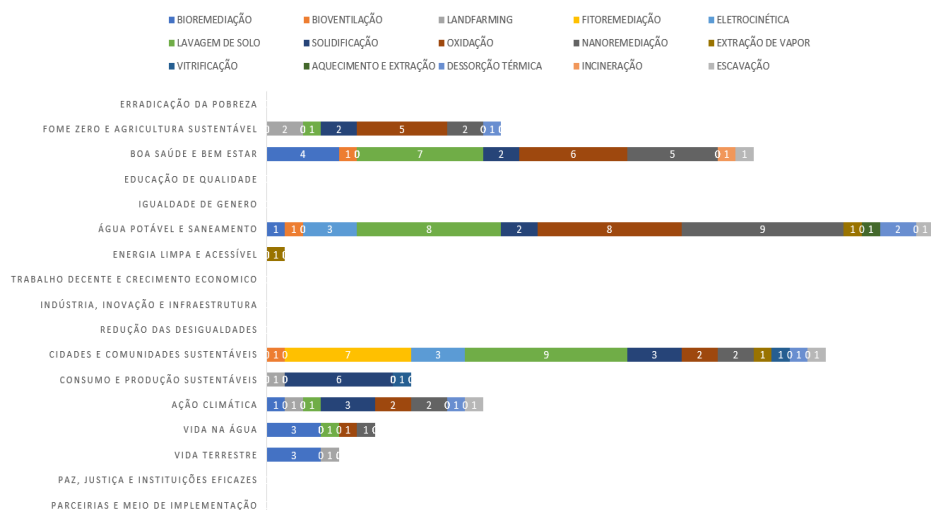
Gráfico 02 – Classificação das principais técnicas de remediação



Fonte: Web of Science (2023)

Os trabalhos foram relacionados com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentáveis – ODS, sendo possível identificar a importância do modelo de remediação de áreas contaminadas e qual o seu impacto para cada um dos objetivos. Essa relação foi feita via Web Of Science (2023) que classifica os artigos com base no número de trabalhos em função das 17 ODS. Logo, o Gráfico 03 demonstra essa relação entre os ODS e as técnicas de remediação de áreas contaminadas e foi considerado como um critério fundamental para selecionar os trabalhos.

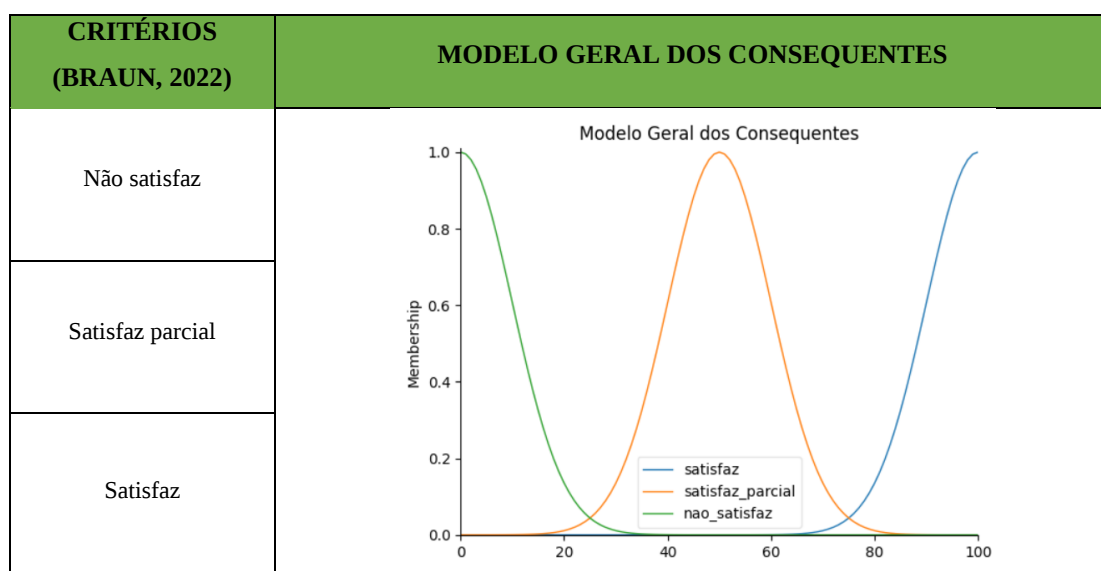
Gráfico 03 – Relação das técnicas de remediação com os ODS.



Fonte: Web of Science (2023)

Em posse das variáveis consequentes foi realizada a aplicação dentro do modelo de lógica difusa. Esse modelo foi construído com a função gaussiana para ter valores de saída entre 0-100%. Quando um valor estiver próximo de zero a remediação “não satisfaz” para as condições do site contaminado. Para satisfazer a remediação de forma parcial o valor de saída precisa estar próximo de 50%. Assim, para a remediação ser considerada satisfatória precisa atingir valores de 80-100%.

Quadro 01 – Descrição geral dos consequentes



Fonte: Braun (2022)

4.2 Segunda etapa: levantamento do Antecedentes

Esta etapa seguiu os mesmos passos da etapa anterior com relação ao levantamento da pesquisa, usando a mesma base de dados. Nesse sentido, foi realizado todo o levantamento, seleção e filtragem dos critérios de entrada do algoritmo com base nos pilares da sustentabilidade paralelamente a etapa descrita anteriormente.

Trabalhos com o objetivo de propor uma metodologia para seleção de técnicas de remediação já foram realizados anteriormente. O modelo proposto por Braun (2022) demonstra ser uma ferramenta que pode auxiliar os profissionais nesse processo, mas que é executado manualmente. Entretanto, possui uma excelente base de dados para realizar uma automatização.

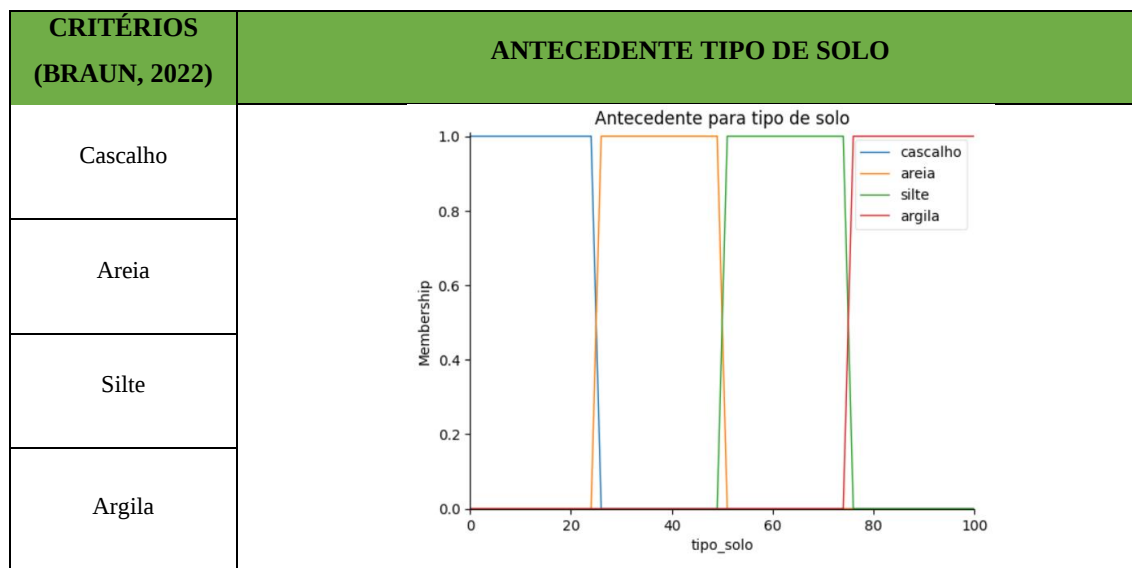
O trabalho de Braun (2022) fornece critérios direcionados para a remediação sustentável. Esses critérios foram categorizados com base na lista de indicadores de avaliação de sustentabilidade de processos de remediação sustentável (CL:AIRE, 2020). Assim, foi possível estabelecer critérios para este modelo referentes aos pilares de meio ambiente, social e econômico. Ademais, foi realizado um cruzamento dos critérios com base nos ODS para seguir a premissa aplicada na etapa anterior.

4.2.1 Descrição do tipo de solo

A seleção adequada das técnicas de remediação para áreas contaminadas é um desafio intrínseco à diversidade dos tipos de solo, as quais apresentam particularidades que exigem abordagens específicas (BRAUN, 2022). A eficácia da remediação está intimamente ligada a essas variações, visto que diferentes composições de solos implicam em desafios e oportunidades singulares no tratamento de contaminantes (BRAUN, 2022). Portanto, é fundamental que os modelos aplicados levem em consideração as variações de diferentes composições e combinações que o solo pode ter.

A relação entre o tipo de solo e o processo de remediação é complexa e multifacetada, variando de acordo com o contaminante em questão, diferentes porcentagens de cascalho, areia, silte e argila, assim como a extensão da contaminação e a legislação ambiental vigente (BRAUN, 2022). Em muitos casos, uma aplicação isolada de técnicas de remediação pode ser insuficiente, sendo necessária uma combinação de abordagens diversas para obter sucesso na redução da contaminação do solo (BRAUN, 2022).

Quadro 02 – Descrição do antecedente tipo de solo



Fonte: Braun (2022)

O modelo tradicional apresenta valores fixos para cada tipo de solo, ou seja, um sistema que desconsidera a realidade encontrada em áreas contaminadas (BRAUN, 2022). O sistema de IA aplicado, nesse caso a variável tipo de solo, considera valores em intervalos iguais de 25%, mas com graus de incerteza, permitindo a aplicação de diferentes porcentagens de solo. Nesse sentido o algoritmo identifica, por exemplo, o solo com composição de 5% de cascalho, 40% de areia, 15% de silte e 40% de argila, como encontrado naturalmente em ensaios de classificação de solos.

Além disso, é crucial considerar fatores adicionais, como o uso futuro da área, a presença de aquíferos próximos e a possível migração de contaminantes para outras áreas. A seleção da abordagem de remediação mais adequada depende da avaliação cuidadosa do tipo de solo, das condições locais e dos objetivos de restauração ambiental.

4.2.2. Descrição da permeabilidade no solo

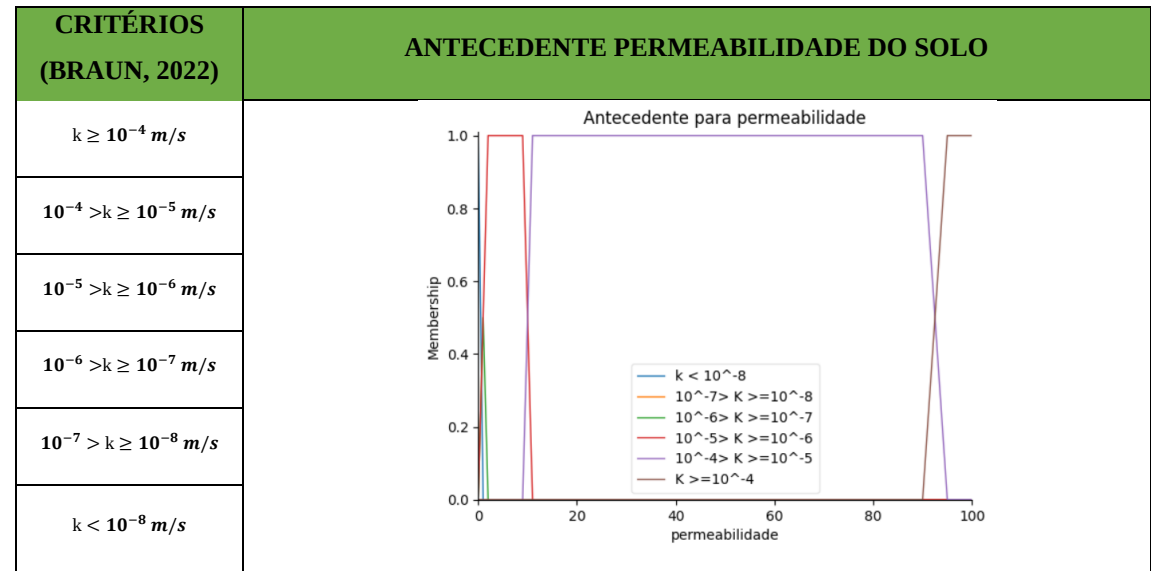
A permeabilidade do solo é uma variável a ser considerada no processo de remediação, pois influencia diretamente na eficiência das técnicas aplicadas (BRAUN, 2022). Nesse sentido o modelo booleano, quando uma técnica não é especificamente direcionada a um tipo de solo, a avaliação da permeabilidade pode viabilizar a remediação, mas na prática deixa uma subjetividade pois em casos reais existe uma composição que altera completamente a permeabilidade (BRAUN, 2022). Por exemplo, dentro de um modelo de sistema inteligente como a lógica difusa, se uma técnica opera

dentro das faixas ótimas de permeabilidade e outras variáveis relevantes, pode-se considerar satisfatória para aquele contexto específico por considerar diferentes níveis de incertezas (BRAUN, 2022).

A permeabilidade do solo é uma propriedade fundamental que também desempenha um papel crucial no processo de remediação de áreas contaminadas. Em processos de remediação de áreas contaminadas, a compreensão da permeabilidade do solo é essencial para a seleção e implementação adequada das técnicas de tratamento. As abordagens comuns incluem proteção de contaminantes por bombardeio, tratamentos in situ, injeção de agentes químicos ou biológicos ou até construção de barreiras impermeáveis para direcionar a migração de contaminantes (BRAUN, 2022).

A escolha da estratégia depende das características específicas do solo e do tipo de contaminação presente. Além disso, a permeabilidade do solo influencia o planejamento de longo prazo e o monitoramento da área remediada, uma vez que a eficácia das técnicas deve ser avaliada ao longo do tempo para garantir que a contaminação seja controlada e reduzida de acordo com padrões ambientais aceitáveis. Portanto, a compreensão da permeabilidade do solo é essencial para o sucesso da remediação de áreas contaminadas e da restauração da qualidade ambiental.

Quadro 02 – Descrição do antecedente permeabilidade



Fonte: Braun (2022)

Assim, a variável antecedente permeabilidade determinada para o modelo de lógica difusa foi classificada de acordo com os critérios de entrada do modelo de Braun (2022). Nesse sentido a classificação do modelo de IA varia de 0-100% levando em

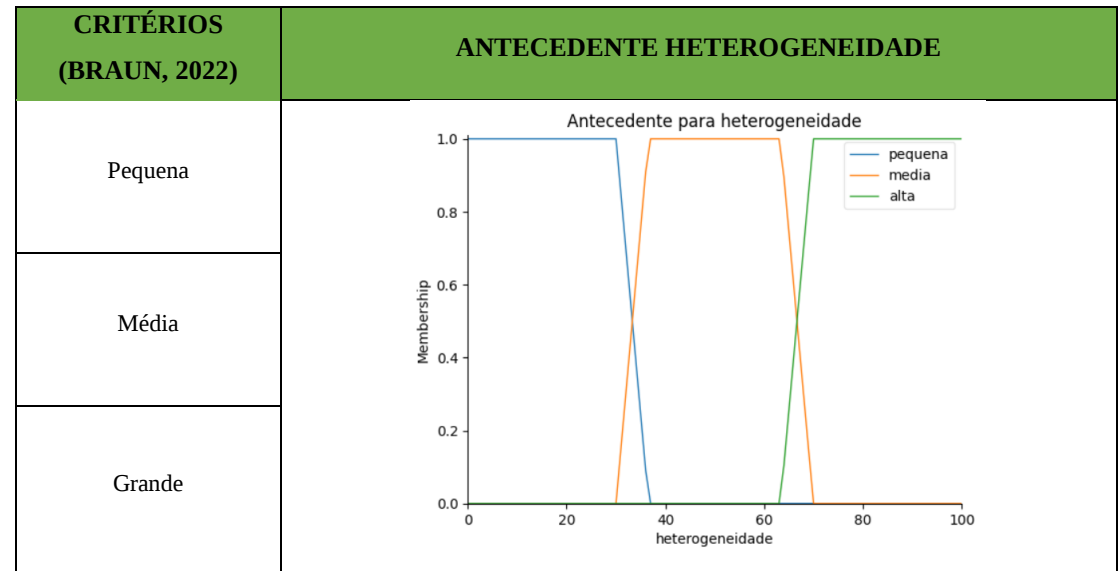
consideração a escala determinada por trabalhos anteriores com graus de incerteza diferente.

4.2.3. Descrição da heterogeneidade no solo

A heterogeneidade do solo, que se refere à variação das características do solo em uma determinada área, desempenha um papel fundamental no processo de remediação de áreas contaminadas (BRAUN, 2022). Cada pedaço de terra é único em termos de composição, textura, estrutura e permeabilidade do solo. Essa diversidade torna a remediação de áreas contaminadas um desafio complexo, pois a eficácia das técnicas de tratamento pode variar consideravelmente de um local para outro.

Devido a essa heterogeneidade do solo, os profissionais de remediação precisam de estudos planejados do local para determinar as características do solo e como elas ocorrem na distribuição e no comportamento dos contaminantes. Com base nessa compreensão, podem ser específicas estratégias de remediação, que podem incluir técnicas de remoção, tratamento in situ, injeção de agentes químicos ou biológicos, além de construção de barreiras impermeáveis.

Quadro 03 – Descrição do antecedente heterogeneidade



Fonte: Braun (2022)

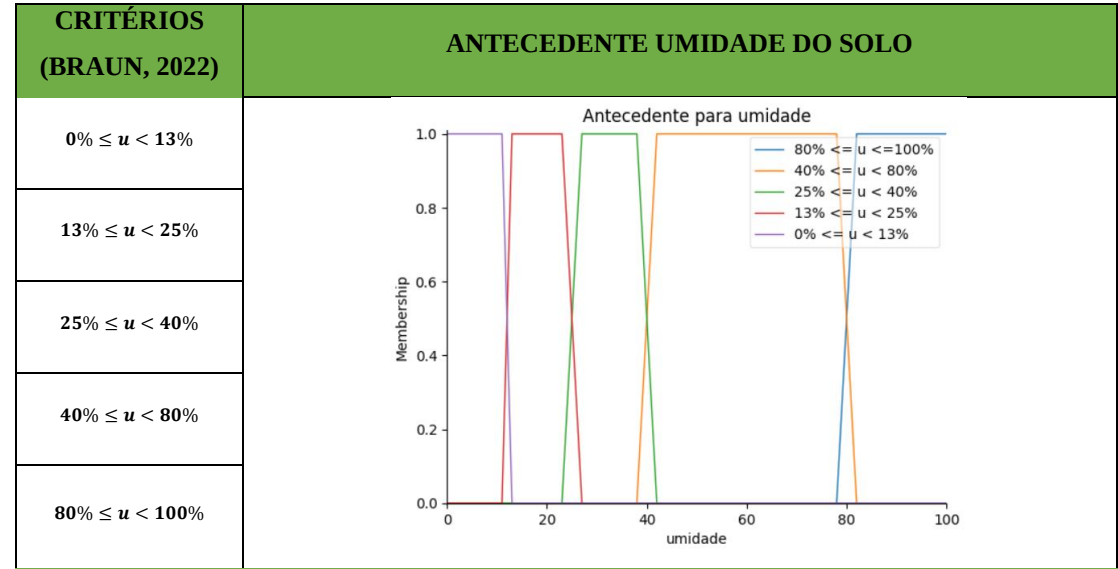
O processo pode ser agravado devido à baixa qualidade dos dados, no caso de vários profissionais terem diferente entendimentos do que é considerado permeabilidade

“alta” causando um erro que pode custar caro ao meio ambiente, a saúde humana e a economia das empresas. Dessa forma a IA pode dar suporte a esses profissionais usando a lógica nebulosa que no caso da alta heterogeneidade no modelo vai possuir um grau de incerteza que será considerado.

4.2.4. Descrição da umidade no solo

O teor de umidade afeta as propriedades físicas do solo, como a permeabilidade e a porosidade. Solos saturados podem ter uma permeabilidade reduzida, o que dificulta o transporte de água e contaminantes. Por outro lado, solos muito secos podem ter uma permeabilidade aumentada, permitindo uma maior mobilidade dos contaminantes.

Quadro 04 – Descrição do antecedente umidade



Fonte: Braun (2022)

Muitos processos de remediação envolvem a biodegradação de contaminantes por microrganismos presentes no solo. O teor de umidade desempenha um papel crítico nesse processo, pois a maioria dos microrganismos necessita de um nível de umidade adequado para sobreviver e metabolizar os contaminantes. Portanto, solos muito secos ou muito saturados podem limitar a atividade biológica e, conseqüentemente, a eficácia da biodegradação.

4.2.5. Descrição do pH no solo

O pH do solo influencia a mobilidade de contaminantes no subsolo. Em solos ácidos, os contaminantes metálicos, como o chumbo e o cádmio, tendem a ser mais solúveis e, portanto, mais móveis, podendo migrar para as águas subterrâneas. Em solos alcalinos, a solubilidade desses metais pode diminuir. Portanto, ajustar o pH do solo pode ser uma estratégia de remediação para controlar a migração de contaminantes.

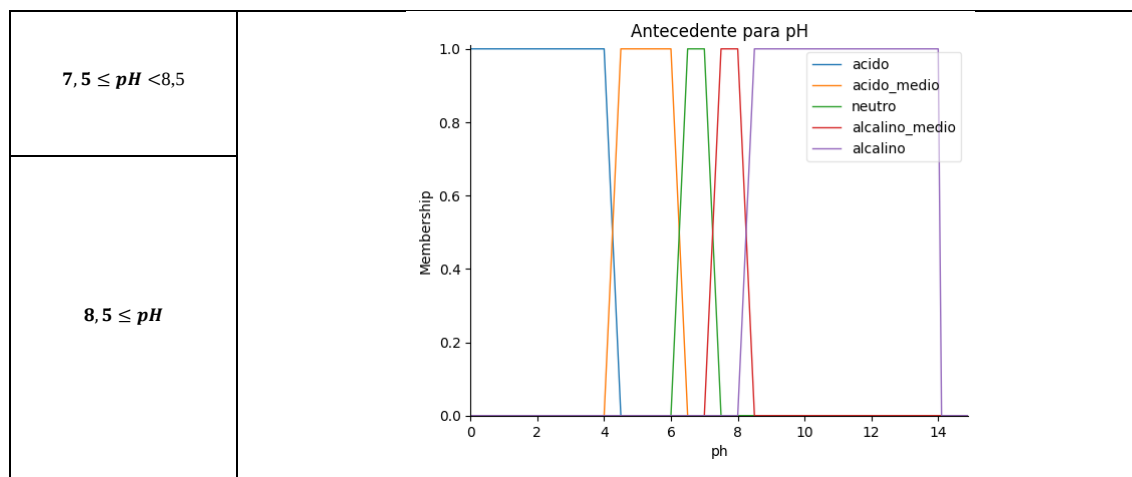
O pH também afeta a toxicidade de certos contaminantes no solo. Solos muito ácidos ou muito alcalinos podem tornar os contaminantes mais tóxicos para os organismos vivos, incluindo plantas, animais e microrganismos. Portanto, a correção do pH do solo pode ser necessária para reduzir a toxicidade e permitir a recuperação da área contaminada.

A atividade microbiana no solo, que desempenha um papel importante na biodegradação de contaminantes orgânicos, e esta é influenciada pelo pH do solo. Microrganismos possuem faixas de pH ótimas para seu funcionamento. Portanto, ajustar o pH do solo para uma faixa adequada pode estimular a biodegradação de contaminantes orgânicos.

O pH do solo também pode influenciar a escolha de técnicas de remediação. Em alguns casos, a adição de agentes alcalinos ou ácidos para ajustar o pH do solo é uma etapa importante na remediação. Além disso, a escolha das técnicas específicas, como a fitoestabilização, que utiliza plantas para remediar áreas contaminadas, pode depender do pH do solo e da capacidade das plantas em crescer em determinadas condições.

Quadro 05 – Descrição do antecedente pH

CRITÉRIOS (BRAUN, 2022)	ANTECEDENTE pH DO SOLO
$pH < 4,5$	
$4,5 \leq pH < 6,5$	
$6,5 \leq pH < 7,5$	



Fonte: Braun (2022)

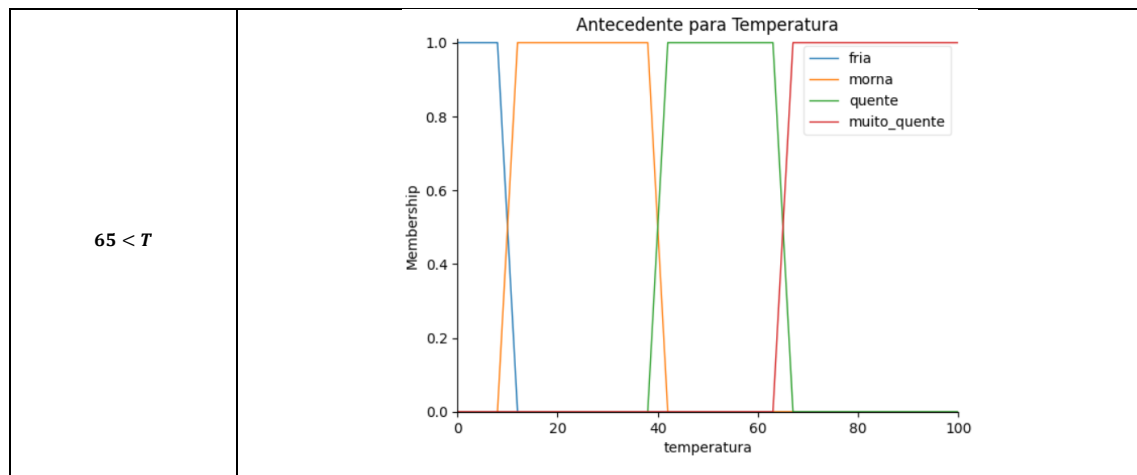
Pensando na importância desse antecedente para o processo de remediação foi ajustado a escala natural do pH, que varia de ácido a alcalino em escala de 0-14, foi modelado em uma escala de 0-100% com um coeficiente de 7,14 que pode ser automatizado no algoritmo usando as funções de controle.

4.2.6. Descrição da temperatura no solo

A temperatura afeta diretamente as reações químicas que ocorrem no solo. Em temperaturas mais elevadas, as reações químicas tendem a ocorrer mais rapidamente, o que pode ser benéfico para processos de eliminação de contaminantes. Por exemplo, reações de oxidação ou manipulação química de substâncias orgânicas geralmente são mais eficazes em temperaturas mais quentes. Portanto, o aumento da temperatura do solo pode acelerar a remediação de áreas contaminadas.

Quadro 06 – Descrição do antecedente temperatura

CRITÉRIOS (BRAUN, 2022)	ANTECEDENTE TEMPERATURA DO SOLO
$T < 10$	
$10 \leq T < 40$	
$40 \leq T < 65$	



Fonte: Braun (2022)

A temperatura do solo também desempenha um papel fundamental na atividade microbiana. A maioria dos microrganismos envolvidos na biodegradação de contaminantes orgânicos possui faixas de temperatura ideal para o crescimento e atividade. Em geral, a atividade microbiana aumenta em temperaturas mais elevadas. Dessa forma, em locais com temperaturas mais quentes, a biodegradação de contaminantes orgânicos pode ser mais eficiente.

Em algumas técnicas de remediação, como a remoção do vapor, a temperatura é controlada e aumentada para vaporizar contaminantes voláteis presentes no solo e nas águas subterrâneas. O vapor é então extraído e tratado, contribuindo para a remoção eficaz dos contaminantes.

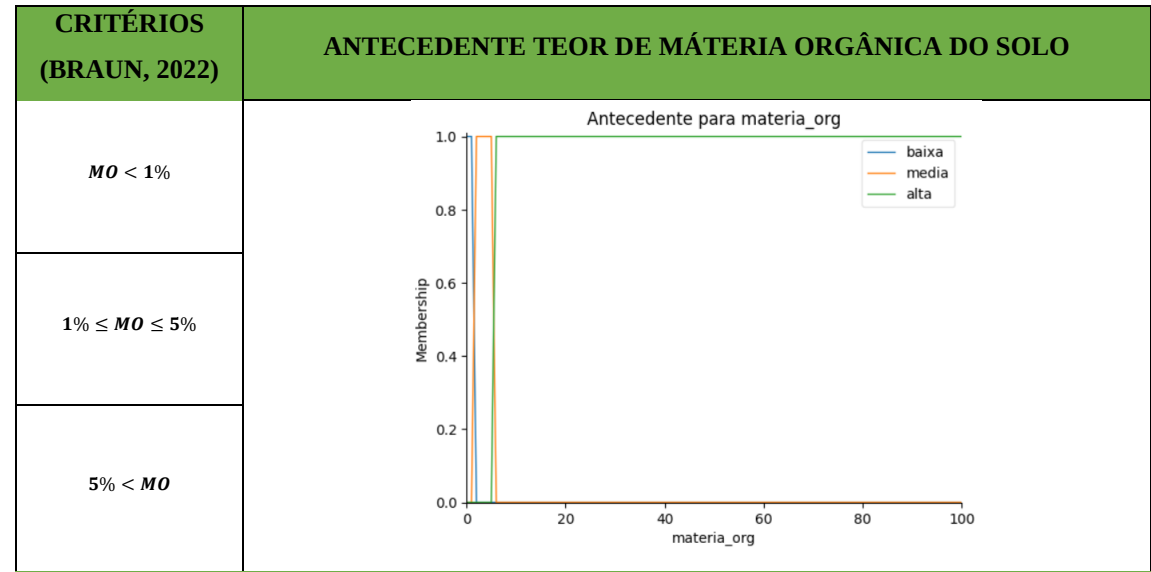
A temperatura também pode afetar a estabilidade química e física do solo. Variações de temperatura podem causar expansão e contração do solo, influenciando sua estrutura e permeabilidade. O ciclo de congelamento e descongelamento pode, por exemplo, alterar a estrutura do solo e sua capacidade de reter água e contaminantes.

Portanto, devido a sua grande contribuição para a remediação de solos contaminados criou-se valores de 0-100% que variam em intervalos que vai de um solo frio (0 a 10°C) a um solo muito quente (65 a 100°C), mas em seus limites de intervalos possuem níveis de incerteza. Dessa maneira um solo pode ser considerado 50% frio e 50% morno ou 55% frio e 45% morno, ou seja, com graus de incerteza diferentes.

4.2.7. Descrição da matéria orgânica presente no solo

O teor da matéria orgânica no solo é um fator fundamental na remediação de áreas contaminadas, afetando a retenção de contaminantes, a biodegradação, as estratégias de tratamento e o sucesso global do processo. A compreensão da dinâmica da matéria orgânica no solo é crucial para selecionar e implementar abordagens de remediação eficazes e de recuperação, resultando na restauração da qualidade do solo e na recuperação ambiental.

Quadro 07 – Descrição do antecedente teor de matéria orgânica



Fonte: Braun (2022)

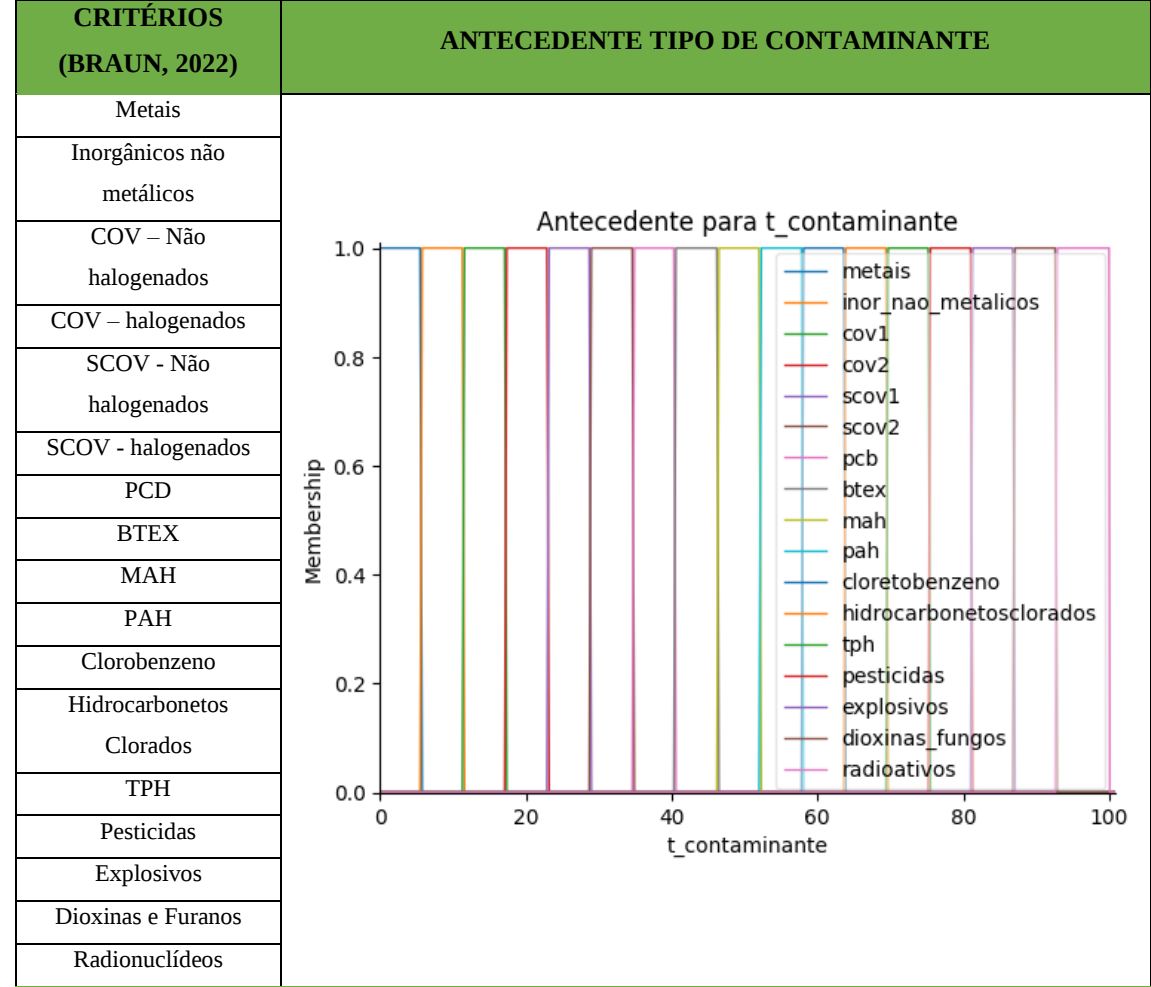
4.2.8. Descrição do tipo de contaminante presente no solo

A seleção de estratégias para remediação de áreas contaminadas é complexa e dependente da tipologia dos contaminantes presentes, sendo essencial avaliar essas substâncias poluentes (BRAUN, 2022). O diagnóstico dos contaminantes deve categorizá-los em grupos específicos, utilizando referências como as listas fornecidas no Apêndice B do trabalho de Braun (2022).

A avaliação da aplicabilidade das técnicas de remediação varia de acordo com a presença dos contaminantes em cada grupo identificado. Se a técnica demonstrar eficácia para todos os contaminantes de um grupo específico, é considerada satisfatória (S), caso contrário, pode ser limitada (SP) ou inviável (-) para algumas substâncias prejudiciais desse grupo. Em situações em que a aplicação para um contaminante específico não esteja

disponível, os dados do grupo de contaminantes devem ser considerados para a tomada de decisão (BRAUN, 2022).

Quadro 08 – Descrição do antecedente tipo de contaminante



Fonte: Braun (2022)

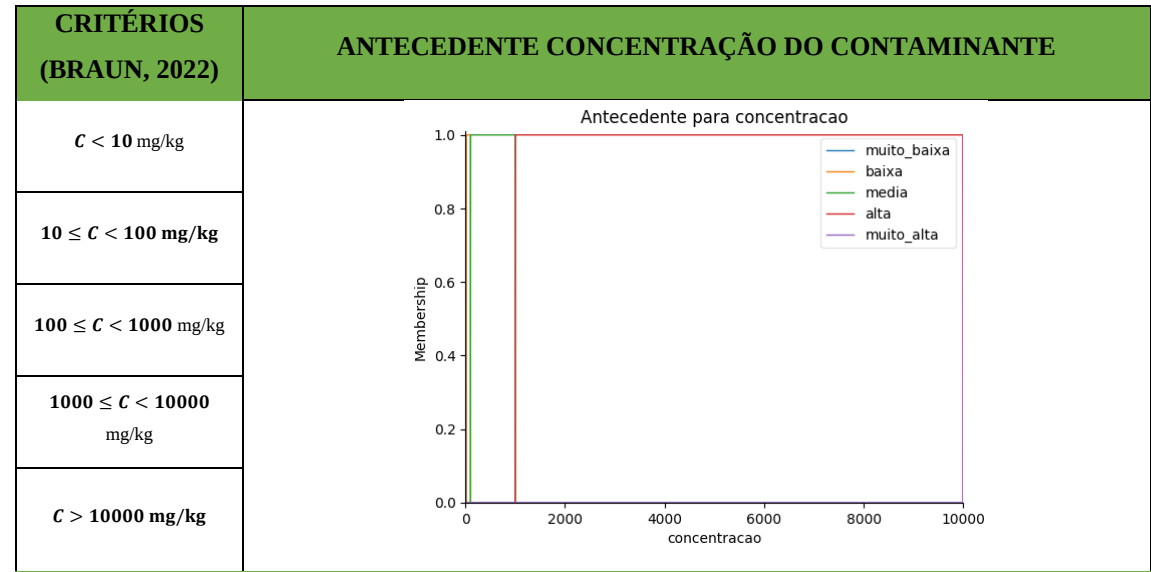
A escolha da estratégia de remediação depende do tipo de contaminante, das características do solo, da geologia local e do uso futuro da área. Frequentemente, são aplicadas técnicas combinadas, como a biorremediação (utilização de microrganismos para degradar contaminantes) em conjunto com a remoção a descartável ou a estabilização química para melhorar a eficácia da remediação.

Além disso, é essencial considerar a regulamentação ambiental aplicável e envolver especialistas multidisciplinares para garantir a seleção adequada e a implementação eficaz das estratégias de remediação. O objetivo final é restaurar o solo contaminado, minimizar os riscos à saúde e ao meio ambiente, e promover a sustentabilidade das áreas anteriormente contaminadas.

4.2.9. Descrição da concentração do contaminante presente no solo

A concentração de contaminantes influencia diretamente a escolha das técnicas de remediação. Em áreas com concentrações elevadas de poluentes, podem ser permitidas estratégias mais intensivas, como a proteção de contaminantes ou oxidação química. Em áreas com concentrações mais baixas, as técnicas de tratamento in situ, como a biorremediação, podem ser mais adequadas.

Quadro 09 – Descrição do antecedente concentração



Fonte: Braun (2022)

A concentração de contaminantes é um indicador-chave para avaliar os riscos à saúde humana, ao meio ambiente e aos ecossistemas. Quanto maior a concentração de contaminantes, maior é o potencial de impacto negativo. Portanto, a determinação precisa da concentração de contaminantes é essencial para avaliar os riscos e priorizar ações de remediação em áreas contaminadas.

Durante o processo de remediação, a concentração de contaminantes no solo é monitorada continuamente para avaliar a eficácia das técnicas de tratamento. O objetivo é reduzir as concentrações a níveis seguros e em conformidade com as leis ambientais. O monitoramento contínuo é essencial para determinar quando a remediação poderá ser concluída.

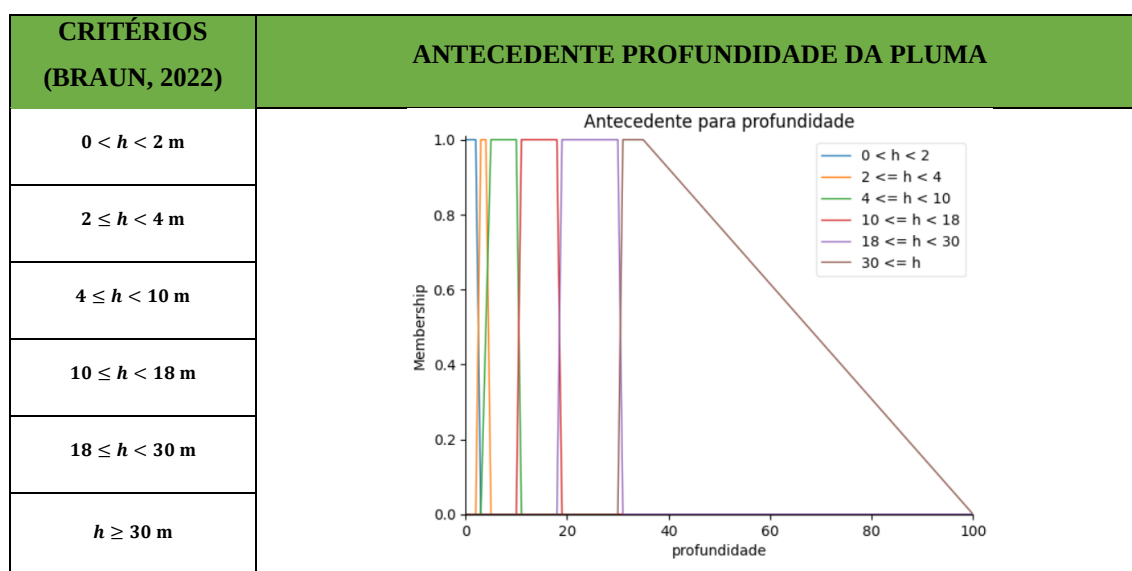
A concentração de contaminantes também afeta os custos e o tempo necessário para a remediação. Áreas com concentrações mais altas geralmente exigem mais recursos e um período de remediação mais longo. Portanto, a estimativa precisa da concentração de contaminantes é crucial para o planejamento de recursos e cronogramas.

Os objetivos específicos de remediação são geralmente definidos com base na concentração de contaminantes desejada apenas após a conclusão do processo. A concentração alvo varia de acordo com a regulamentação ambiental e os usos futuros da área. Portanto, a concentração de contaminantes não é apenas um parâmetro-chave para a definição desses objetivos.

4.2.10. Descrição da profundidade da pluma de contaminação

A determinação precisa da profundidade da pluma por meio da técnica de malha de VOC, ajuda a evitar tratamentos desnecessários, economizando recursos e tempo. Isso permite que a remediação seja direcionada com mais eficácia para áreas críticas.

Quadro 10 – Descrição do antecedente profundidade



Fonte: Braun (2022)

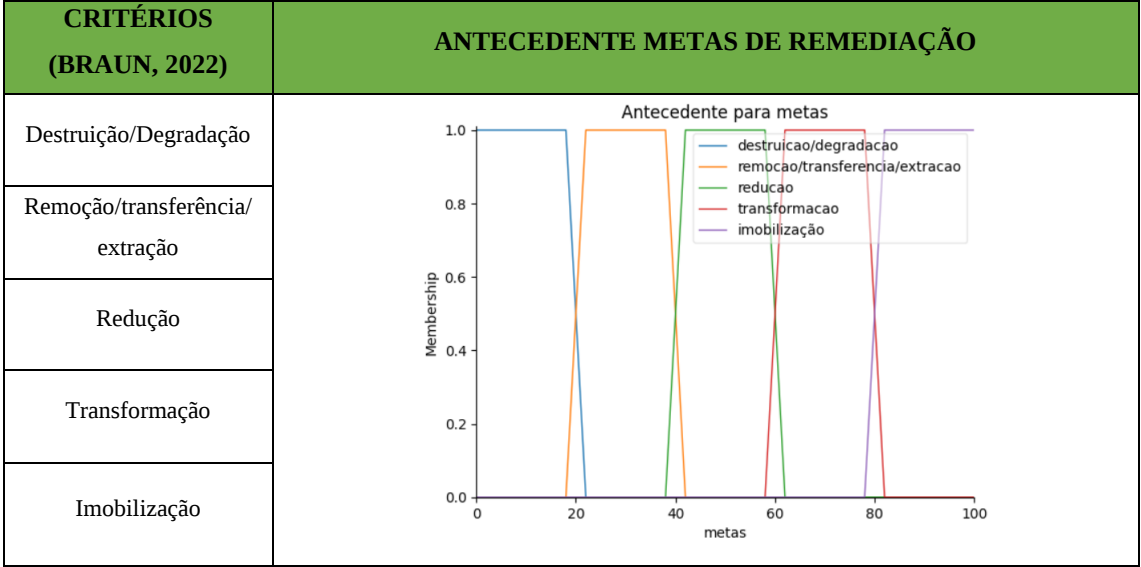
Portanto, a análise da profundidade da pluma de contaminação é uma etapa fundamental na gestão de áreas contaminadas, fornece informações essenciais para o planejamento e a implementação bem-sucedida da remediação ambiental voltada para a sustentabilidade.

4.2.11. Descrição das metas de remediação

A definição de metas claras para a remediação de áreas contaminadas é um aspecto essencial para orientar e direcionar efetivamente o processo de restauração. As metas

condicionais segundo Braun (2022) devem considerar uma série de fatores, como o uso pretendido da área e as limitações locais, assim como a concentração de contaminantes com base nos valores de referência de qualidade, que no caso do Estado do Rio Grande do Norte pode ser usado o estudo de Preston (2014)

Quadro 11 – Descrição do antecedente metas de remediação



Fonte: Braun (2022)

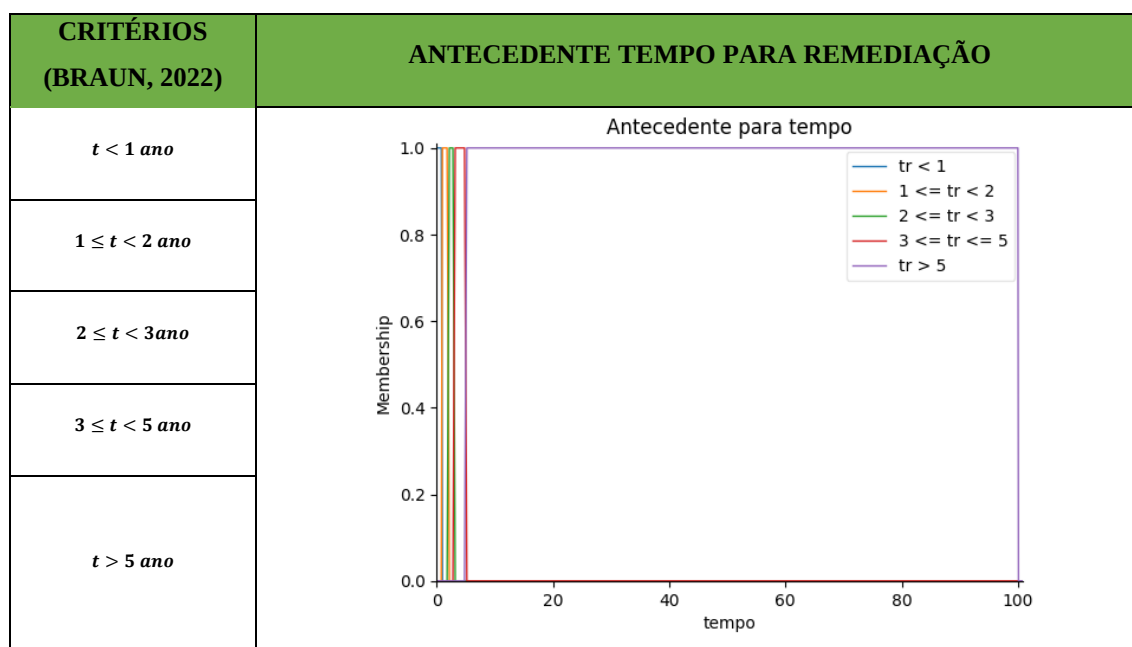
É recomendado que se utilize uma lista de valores orientadores, como os disponíveis Apêndice B no trabalho de Braun (2022), para verificar se as concentrações de contaminantes no solo estão dentro dos limites de referência para um determinado uso do solo. As metas de remediação podem variar de acordo com os níveis de contaminação. Para concentrações baixas, o monitoramento contínuo pode ser suficiente, enquanto os valores próximos às referências permitem metas menos restritivas. Por outro lado, concentrações elevadas, acima dos valores de referência, podem exigir uma eliminação completa do contaminante para proteger os receptores e possibilitar o uso futuro da área (BRAUN, 2022).

A definição minuciosa das metas de remediação serve como um ponto de referência crucial durante todo o processo de remediação. Essas metas não apenas orientam a escolha das técnicas mais abordadas, mas também permitem uma avaliação contínua da eficácia das ações tomadas. Caso necessário, as metas podem ser revisadas e ajustadas com base na evolução das condições e nos resultados obtidos ao longo do processo de remediação (BRAUN, 2022).

4.2.12. Descrição do tempo de remediação

O tempo de retorno influencia a escolha das técnicas de remediação a serem aplicadas. Se for necessário um tempo de retorno mais curto, técnicas mais intensivas, como a proteção contra vácuo, a oxidação química ou a remoção física, podem ser preferíveis. Em contrapartida, para prazos de retorno mais longos, técnicas menos invasivas, como a biorremediação, podem ser adequadas.

Quadro 12 – Descrição do antecedente tempo



Fonte: Braun (2022)

Durante o processo de remediação, o tempo de retorno é monitorado constantemente para avaliar o progresso e a eficácia das ações. À medida que o tempo de retorno se aproxima da meta estabelecida, as estratégias de remediação podem ser ajustadas, se necessário, para garantir que as metas sejam alcançadas no prazo estipulado.

O tempo de retorno tem implicações diretas nos custos associados ao processo de remediação. Um tempo de retorno mais curto pode exigir mais recursos financeiros e humanos para concluir as atividades em um prazo limitado. Isso exige um gerenciamento eficaz de recursos para manter o orçamento sob controle.

O cumprimento das regulamentações ambientais é um aspecto crucial no gerenciamento de áreas contaminadas. O tempo de devolução deve estar alinhado com os

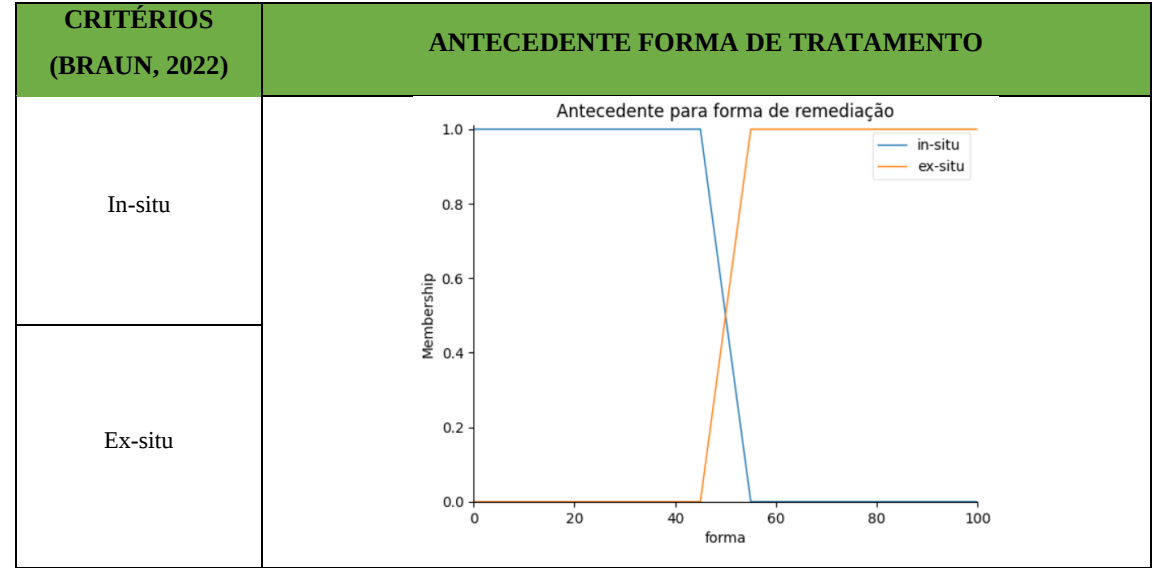
prazos e padrões estabelecidos pelas autoridades reguladoras para evitar prejuízos e garantir que uma área seja considerada segura e ambientalmente responsável.

4.2.13. Descrição da forma de tratamento para a remediação

O tratamento in situ é escolhido quando a remediação pode ser realizada eficazmente no local, sem a necessidade de escavação e transporte de solo ou água contaminada. É adequado para áreas onde o uso futuro da terra não é significativamente afetado pela presença de contaminantes residuais.

O tratamento ex situ é escolhido quando o tratamento in situ não é viável devido à natureza da contaminação ou a outros fatores, como restrições regulatórias ou de uso do solo. Embora possa ser mais caro e invasivo, é eficaz para áreas altamente contaminadas.

Quadro 13 – Descrição do antecedente forma de tratamento



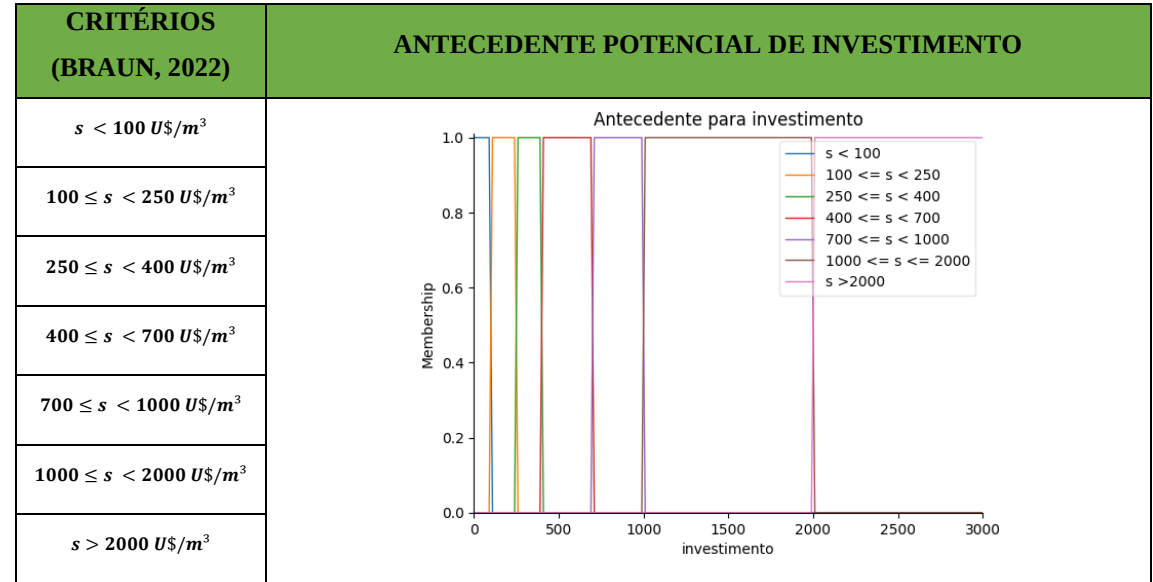
Fonte: Braun (2022)

A escolha entre tratamento in situ e ex situ depende das características específicas de contaminação e das metas de remediação. Esse processo de remediação ambiental envolve uma análise detalhada das condições locais, regulamentações ambientais e fatores econômicos para determinar a abordagem mais adequada. Muitas vezes, uma combinação de técnicas in situ e ex situ é utilizada para melhorar a eficácia da remediação e alcançar resultados sustentáveis.

4.2.14. Descrição do potencial de investimento para a remediação

A relação entre questões econômicas e o processo de remediação ambiental é direta. Um planejamento que leve em consideração os custos diretos e indiretos, juntamente com a disponibilidade de recursos, é fundamental para garantir que a remediação seja eficaz e viável do ponto de vista econômico. A otimização dos custos, o controle de prazos e o cumprimento das regulamentações são prioridades que podem ser alcançadas com uma abordagem econômica eficaz. É fundamental garantir que áreas contaminadas sejam restauradas de forma sustentável, protegendo o meio ambiente e a saúde pública.

Quadro 14 – Descrição do antecedente potencial de investimento



Fonte: Braun (2022)

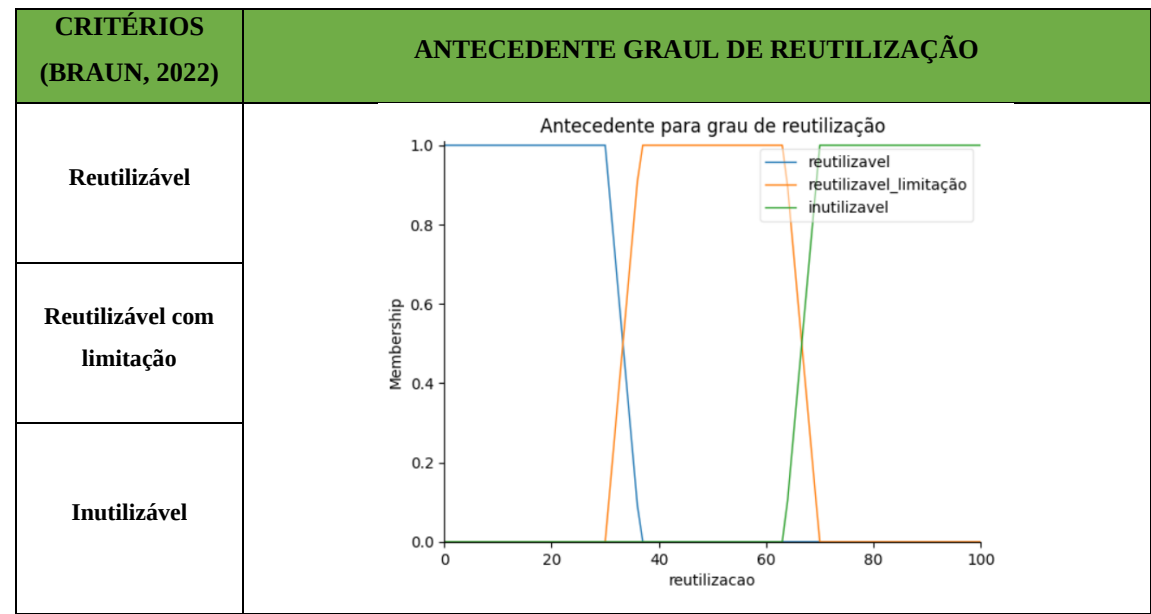
4.2.15. Descrição do grau de reutilização do solo

Antes de determinar o grau de reutilização, é essencial avaliar a contaminação residual após a remediação. Isso envolve a medição das concentrações remanescentes de contaminantes no solo e em comparação com os padrões ambientais aplicáveis para diferentes usos da terra.

Os padrões de qualidade do solo são determinantes na definição do grau de reutilização. Esses padrões variam de acordo com o uso pretendido, sendo mais rigorosos

para usos sensíveis, como residenciais e recreativos, e menos restritivos para usos industriais ou agrícolas

Quadro 15 – Descrição do antecedente grau de reutilização



Fonte: Braun (2022)

A remediação deve ser realizada de acordo com os critérios de qualidade do solo estabelecido para o uso futuro da terra. As técnicas de remediação devem visar alcançar essas metas específicas para garantir a segurança e a adequação do solo para o uso pretendido.

O sucesso da remediação é fundamental para determinar o grau de reutilização. Se uma remediação for bem-sucedida em reduzir as concentrações de contaminantes em níveis seguros e em conformidade com os padrões de qualidade, isso possibilitará maior grau de reutilização. Ademais, é necessário que as partes interessadas sejam informadas sobre o grau de reutilização proposto, os padrões de qualidade do solo e os benefícios da remediação, isso ajuda na compreensão das decisões tomadas durante o processo de remediação.

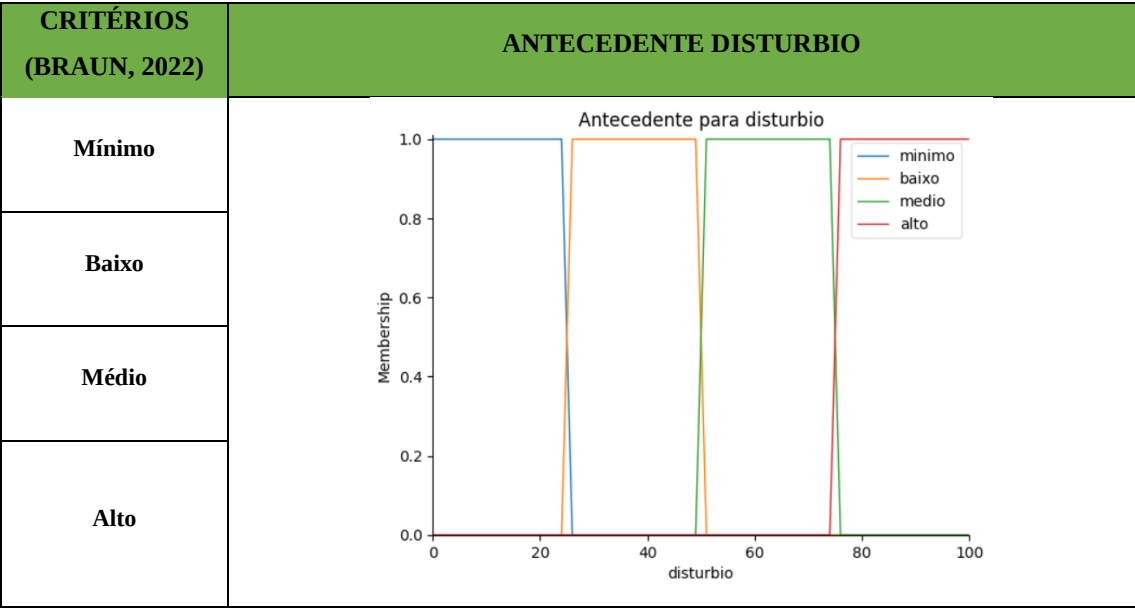
4.2.16. Descrição do distúrbio do solo

Antes de iniciar qualquer atividade de remediação, é fundamental realizar uma avaliação detalhada das propriedades do solo contaminado. Isso inclui a análise das concentrações e tipos de contaminantes, bem como a avaliação das características físicas,

químicas e biológicas do solo, como textura, permeabilidade, pH e teor de matéria orgânica.

Com base na avaliação inicial, o nível de distúrbio potencial nas propriedades do solo deve ser considerado ao selecionar as técnicas de remediação. Algumas técnicas podem ser menos invasivas e causar menor distúrbio, enquanto outras podem ser mais prejudiciais e impactar profundamente as características do solo.

Quadro 16 – Descrição do antecedente distúrbio



Fonte: Braun (2022)

Técnicas de escavação e remoção física de solo contaminado podem causar distúrbios graves, resultando na perda de solo saudável e na alteração da estrutura do solo. Técnicas como a biorremediação e a fitorremediação são menos invasivas, pois promovem a manipulação de contaminantes no local, minimizando o impacto nas propriedades do solo.

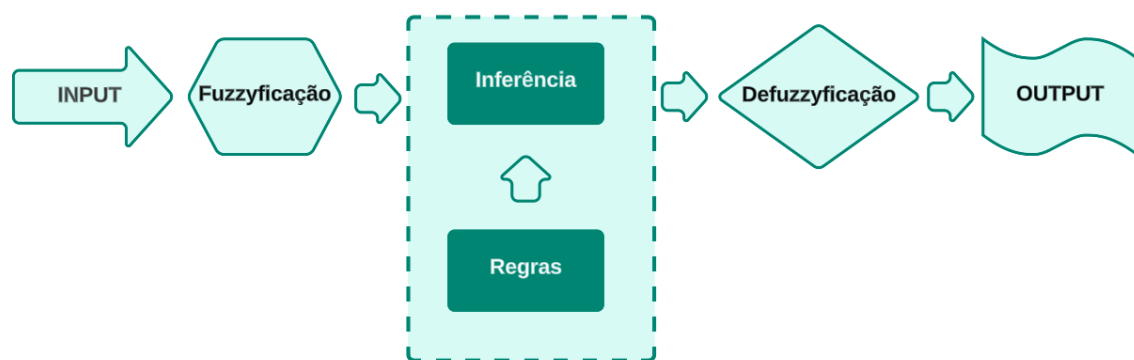
A escolha da técnica de remediação deve equilibrar a eficácia na redução das concentrações de contaminantes com a sustentabilidade a longo prazo das propriedades do solo. A restauração das características naturais do solo, como a qualidade da matéria orgânica e da estrutura, é importante para o retorno à saúde do ecossistema.

4.3 Terceira etapa: aplicação da lógica Fuzzy

Esta etapa corresponde a aplicação da metodologia usando o modelo de inteligência artificial lógica difusa. Nesse sentido, foi realizado a concepção de um modelo Fuzzy que realiza o processamento da base de dados comparando-as com as amostras encontradas nas áreas contaminadas usando linguagem de programação em Python.

Primeiramente é desenhado o modelo em blocos, começando com a escolha do objetivo, depois desenvolve o processo de fuzzyficação criando as variáveis antecedentes e consequentes, depois cria-se as regras de inferência, e aplicação da defuzzyficação Fuzzy para a seleção das alternativas com base nas amostras. Nesse sentido, o objetivo determinado foi a “Técnica de remediação” que possivelmente será utilizada.

Figura 07 – Modelo em bloco da Lógica Fuzzy



O modelo segue um padrão uniforme para todos os critérios, onde é criado os gráficos de comportamento padrão com base em cada classificação dos antecedentes e consequentes. Posteriormente, procede-se à construção das entradas correspondentes aos critérios estabelecidos por Braun (2022), utilizando a classificação numérica e linguística. Essas informações são então registradas em um padrão que pode ser determinada por um especialista, para uma aprendizagem supervisionada, ou o próprio modelo pode criar um padrão de aprendizagem não supervisionada. Nessa perspectiva, é criado regras para a inferência e posteriormente o processo de defuzzyficação, conforme demonstrado no algoritmo na Figura 07.

O algoritmo utiliza 16 variáveis antecedente no processe de fuzzyficação representando as características identificadas na área contaminada conforme tabela no Apêndice A. O programa usou as bibliotecas scikit-fuzzy, além da numpy e matplotlib. Cada variável antecedente possui uma função de pertinência que descreve sua

classificação conforme apresentado na seção anterior. Isso permite capturar a natureza contínua e complexa das características da área contaminada.

Foram definidas regras para que o algoritmo estabelecesse relações entre as variáveis de entrada (antecedentes) e as variáveis de saídas, que são as técnicas de remediação (consequentes). Dessa forma, foram estabelecidas 1260 regras que descrevem como as características da região contaminada influenciam no processo de seleção de uma técnica de remediação, permitindo que sejam feitas análises mais abrangentes e flexíveis, assim como uma tomada de decisão menos subjetiva.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo criado nesse trabalho executa rotinas de cálculos e apresenta como resultado um valor correspondente para cada uma das técnicas de remediação em função das características encontradas na área contaminada. Essas características são os antecedentes do modelo e as técnicas de remediação são os consequentes. Nesse sentido, é construído o modelo, ou seja, o usuário fornece os valores da amostra encontrada, e com base nesses valores o programa faz comparações calculando a inferência dos conjuntos com graus de incerteza.

5.1 Construção do código para os antecedentes e consequentes

O modelo precisa de um conjunto de dados para que ele possa comparar as informações que o usuário irá apresentar, ou seja, precisamos ensinar o modelo de IA. Nesse sentido, foram criados os consequentes dentro do Google Colab variando de 0 a 101, contanto em 1. Posteriormente, como mostra a Figura 08, é realizada a classificação usando o código “antecedente[‘classificação’] = fuzz.trapmf(antecedente.universo, [intervalo])” levando em consideração os critérios estabelecidos previamente (BRAUN, 2023). Ademais, essa base de dados fornecida por um especialista será consultada pela IA sempre que o usuário fornecer valores de entrada e se ajustar as condições encontradas em cada processo de remediação por meio de níveis de incerteza.

Figura 08 – Código de classificação da umidade

```
22 # 4 UMIDADE
23 umidade['80% <= u <=100%'] = fuzz.trapmf(umidade.universe,[78,82,100,100])
24 umidade['40% <= u < 80%'] = fuzz.trapmf(umidade.universe,[38,42,78,82])
25 umidade['25% <= u < 40%'] = fuzz.trapmf(umidade.universe,[23,27,38,42])
26 umidade['13% <= u < 25%'] = fuzz.trapmf(umidade.universe,[11,13,23,27])
27 umidade['0% <= u < 13%'] = fuzz.trapmf(umidade.universe,[0,0,11,13])
```

O conjunto padrão criado é formada a partir da classificação estabelecida por Braun (2022), onde o especialista vai construindo um conjunto de padrão atribuindo valores que variam de 0 a 100. Esses valores são referentes ao conjunto nebuloso, logo esses elementos representam uma classe da variável. Dessa forma cada limite apresenta um grau de incerteza que será ajustada sempre que for fornecido uma nova amostra. Portanto a classificação do antecedente “umidade”, apresentado na Figura 08, é escrito em cinco linhas de códigos: 0-13%, 13-25%, 25-40%, 40-80% e 80-100%, conforme apresentado no Quadro 04, assim, o especialista atribui os graus de incerteza para cada um dos intervalos.

O mesmo processo é realizado para a classificação dos consequentes, mas usando a função “fuzz.gaussmf”, como explicado anteriormente. Os consequentes, diferente dos antecedentes, receberam a mesma classificação e podem ser ajustados a qualquer momento como mostra a Figura 09.

Figura 09 – Matriz permeabilidade padrão

```

5  biorremediação['satisfaz'] = fuzz.gaussmf(biorremediação.universe, 100,10)
6  biorremediação['satisfaz_parcial'] = fuzz.gaussmf(biorremediação.universe, 50,10)
7  biorremediação['nao_satisfaz'] = fuzz.gaussmf(biorremediação.universe, 0,10)
8
9  bioventilação['satisfaz'] = fuzz.gaussmf(bioventilação.universe, 100,10)
10 bioventilação['satisfaz_parcial'] = fuzz.gaussmf(bioventilação.universe, 50,10)
11 bioventilação['nao_satisfaz'] = fuzz.gaussmf(bioventilação.universe, 0,10)
12
13 land_farming['satisfaz'] = fuzz.gaussmf(land_farming.universe, 100,10)
14 land_farming['satisfaz_parcial'] = fuzz.gaussmf(land_farming.universe, 50,10)
15 land_farming['nao_satisfaz'] = fuzz.gaussmf(land_farming.universe, 0,10)
16
17 fitorremediação['satisfaz'] = fuzz.gaussmf(fitorremediação.universe, 100,10)
18 fitorremediação['satisfaz_parcial'] = fuzz.gaussmf(fitorremediação.universe, 50,10)
19 fitorremediação['nao_satisfaz'] = fuzz.gaussmf(fitorremediação.universe, 0,10)

```

5.2 Construção da Regras da inferência do modelo Fuzzy

O processo de construção das regra é realizado usando o código “regra = ctrl.Rule(antecedente[‘classificação’], consequente[‘classificação’])”. Essas regras de inferência são aplicadas a cada uma das classes dos antecedentes em função de cada consequente servindo de intersecção entre os conjuntos (Figura 10). Nesse processo foram criadas 1260 regras baseadas na matriz de decisão do modelo criado por Braun (2022) que serão usadas no processo de defuzzificação.

Figura 10 – Modelo de seleção para tipo de solo

```

4 tip1 = ctrl.Rule(tipo_solo['cascalho'], biorremediação['satisfaz'] )
5 tip2 = ctrl.Rule(tipo_solo['areia'], biorremediação['satisfaz'] )
6 tip3 = ctrl.Rule(tipo_solo['silte'], biorremediação['satisfaz'] )
7 tip4 = ctrl.Rule(tipo_solo['argila'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
8
9 perm1 = ctrl.Rule(permeabilidade['K >=10^-4'], biorremediação['satisfaz'] )
10 perm2 = ctrl.Rule(permeabilidade['10^-4 > K >=10^-5'], biorremediação['satisfaz'] )
11 perm3 = ctrl.Rule(permeabilidade['10^-5 > K >=10^-6'], biorremediação['satisfaz'] )
12 perm4 = ctrl.Rule(permeabilidade['10^-6 > K >=10^-7'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
13 perm5 = ctrl.Rule(permeabilidade['10^-7 > K >=10^-8'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
14 perm6 = ctrl.Rule(permeabilidade['k < 10^-8'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
15
16 het1 = ctrl.Rule(heterogeneidade['pequena'], biorremediação['satisfaz'] )
17 het2 = ctrl.Rule(heterogeneidade['media'], biorremediação['satisfaz'] )
18 het3 = ctrl.Rule(heterogeneidade['alta'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
19
20 umid1 = ctrl.Rule(umidade['80% <= u <=100%'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
21 umid2 = ctrl.Rule(umidade['40% <= u < 80%'], biorremediação['satisfaz'] )
22 umid3 = ctrl.Rule(umidade['25% <= u < 40%'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
23 umid4 = ctrl.Rule(umidade['13% <= u < 25%'], biorremediação['nao_satisfaz'] )
24 umid5 = ctrl.Rule(umidade['0% <= u < 13%'], biorremediação['nao_satisfaz'] )

```

A IA inicia recebendo os valores de entrada fornecido pelo usuário, por exemplo, para o tipo de solo o usuário fornece as porcentagens de ‘cascalho’, ‘areia’, ‘silte’ e ‘argila’ formando um vetor com esses parâmetros. Usando a função “objetivo = Ctrl.ControlSystem ([vetor])” a IA cria um controlador Fuzzy para simular a intersecção dos conjuntos e regras que foi ensinado a máquina e representa-os em forma de gráfico.

5.3 Seleção das técnicas de remediação

A seleção das técnicas é executada levando em consideração o que foi ensinado a inteligência artificial. Essa seleção acontece usando a função “objetivo.compute()” que faz o processo de defuzzyficação do sistema. Depois é só criar uma variável aleatória que representa uma técnica de remediação fazendo uma média dos valores. A função usada para a o resultado é apresentado abaixo na Figura 11.

Figura 11 – Código usado para a seleção das técnicas.

```

84 tec_biorremediação = (rs1.output['biorremediação'] + rs2.output['biorremediação'] + rs3.output['biorremediação'] + rs4.output['biorremediação'] + rs5.output['biorremediação'])
85 tec_bioventilação = (rs1.output['bioventilação'] + rs2.output['bioventilação'] + rs3.output['bioventilação'] + rs4.output['bioventilação'] + rs5.output['bioventilação'])
86 tec_land_farming = (rs1.output['land_farming'] + rs2.output['land_farming'] + rs3.output['land_farming'] + rs4.output['land_farming'] + rs5.output['land_farming'])
87 tec_fitorremediação = (rs1.output['fitorremediação'] + rs2.output['fitorremediação'] + rs3.output['fitorremediação'] + rs4.output['fitorremediação'] + rs5.output['fitorremediação'])
88 tec_eletrocinetica = (rs1.output['eletrocinetica'] + rs2.output['eletrocinetica'] + rs3.output['eletrocinetica'] + rs4.output['eletrocinetica'] + rs5.output['eletrocinetica'])
89 tec_lavagem_solo = (rs1.output['lavagem_solo'] + rs2.output['lavagem_solo'] + rs3.output['lavagem_solo'] + rs4.output['lavagem_solo'] + rs5.output['lavagem_solo'])
90 tec_solidificacao = (rs1.output['solidificacao'] + rs2.output['solidificacao'] + rs3.output['solidificacao'] + rs4.output['solidificacao'] + rs5.output['solidificacao'])
91 tec_oxidação = (rs1.output['oxidação'] + rs2.output['oxidação'] + rs3.output['oxidação'] + rs4.output['oxidação'] + rs5.output['oxidação'] + rs6.output['oxidação'])
92 tec_nanorremediação = (rs1.output['nanorremediação'] + rs2.output['nanorremediação'] + rs3.output['nanorremediação'] + rs4.output['nanorremediação'] + rs5.output['nanorremediação'])
93 tec_extracao = (rs1.output['extracao'] + rs2.output['extracao'] + rs3.output['extracao'] + rs4.output['extracao'] + rs5.output['extracao'] + rs6.output['extracao'])
94 tec_vitrificacao = (rs1.output['vitrificacao'] + rs2.output['vitrificacao'] + rs3.output['vitrificacao'] + rs4.output['vitrificacao'] + rs5.output['vitrificacao'])
95 tec_aquecimento = (rs1.output['aquecimento'] + rs2.output['aquecimento'] + rs3.output['aquecimento'] + rs4.output['aquecimento'] + rs5.output['aquecimento'] + rs6.output['aquecimento'])
96 tec_dessorcao = (rs1.output['dessorcao'] + rs2.output['dessorcao'] + rs3.output['dessorcao'] + rs4.output['dessorcao'] + rs5.output['dessorcao'] + rs6.output['dessorcao'])
97 tec_incineracao = (rs1.output['incineracao'] + rs2.output['incineracao'] + rs3.output['incineracao'] + rs4.output['incineracao'] + rs5.output['incineracao'] + rs6.output['incineracao'])
98 tec_escavacao = (rs1.output['escavacao'] + rs2.output['escavacao'] + rs3.output['escavacao'] + rs4.output['escavacao'] + rs5.output['escavacao'] + rs6.output['escavacao'])

```

No código acima foi criado uma função “objetivo.output” chamada de remediação sustentável que classifica as técnicas de remediação do vetor de seleção. O código soma os pesos de cada técnica e representa em forma de índice de remediação sustentável que varia de 0 a 100% conforme o a classificação dos consequentes. Portanto, quanto maior for o valor do índice melhor será a remediação proporcionando uma avaliação mais detalhado e menos subjetiva.

5.4 Estudo de caso I – vazamento de petróleo cru na bacia Potiguar

A Figura 12 apresenta o estudo de caso em um sítio localizado no Brasil, no estado do Rio Grande do Norte, 279km da capital Natal, na região de produção de petróleo da cidade de Upanema, que foi contaminado devido a um vazamento no oleoduto atingindo uma área de 695m². O local possui uma geologia com depósitos de areia, cascalho e níveis de argila. A permeabilidade do solo tem variação média para alta, com $2,1 \times 10^{-5} m/s$ e heterogeneidade média, além umidade de 30% e pH de 4.9. A temperatura anual média da região fica entorno dos 28.1°C e teor de matéria orgânica de 3.8%.

Figura 12 – Sítio contaminado por petróleo cru.



A tabela 01 apresenta os valores correspondentes ao “input”, que são amostras da área contaminada. Esses resultados são obtidos na etapa de investigação e identificação que é realizado a análise preliminar e confirmatória das características da região contaminada. Analisando a lista de valores orientados obtido, observa-se que as concentrações de BTEX excedem os limites estabelecidos na resolução CONAMA 420.

Levando em conta que o solo em questão será reaproveitado com limitação em uma fábrica de cimento, e considerando os riscos associados, as metas de remediação devem visar a remoção ou redução das concentrações para valores inferiores aos estabelecidos para uso industrial. Os potenciais indivíduos expostos são exclusivamente os trabalhadores, dado que a área está distante de áreas residenciais e restrito acesso.

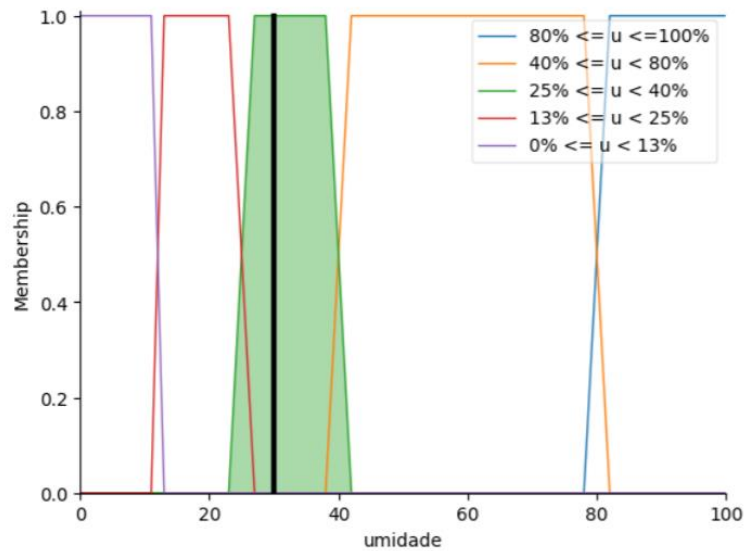
Tabela 01 – Características do sítio contaminado referente ao estudo de caso I.

Input	Valore da amostra
Cascalho (%)	3%
Areia (%)	21%
Silte (%)	10%
Argila (%)	66%
Permeabilidade	$2,1 \times 10^{-5} \text{m/s}$
Heterogeneidade	média
Umidade	30%
pH	4.9
Temperatura	28.1°C
Matéria Orgânica	1.8%
Contaminante	BTEX
Concentração	856 mg/Kg
Profundidade	3,5m
Meta	Remoção
Tempo	1 ano
Forma	In-situ
Potencial de investimento	500 U\$/m ³
Grau de reutilização	Reutilizável com limitação
Distúrbio	médio

5.4.1 Resultados obtidos a partir do estudo de caso I

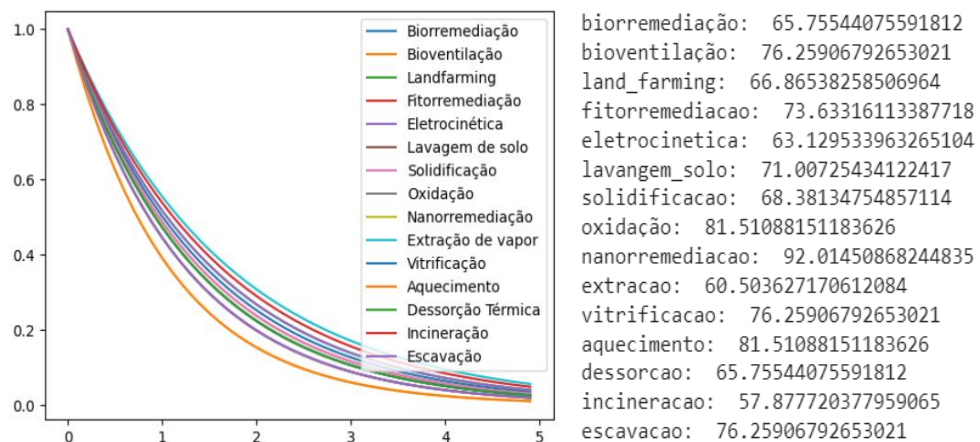
Fornecendo os dados de entrada da Tabela 1 para o algoritmo de seleção de técnicas de remediação que fez o processamento dos dados resultando em um conjunto de gráficos de seleção pode ser analisado no Anexo 01. Esse relatório é referente ao resultado da operação Fuzzy realizada, onde o algoritmo compara a amostra encontrada com o vetor padrão correspondente como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Amostra representada em gráfico do antecedente umidade



O relatório do algoritmo de seleção apresenta o vetor seleção com todos os índices representando as técnicas de remediação como base em cada gráfico dos antecedentes com mostra como mostrado anteriormente. Além do vetor de seleção o algoritmo faz uma demonstração gráfica da contaminação em função do tempo. Ademais, o comportamento da remediação mostra que a técnica de Nanorremediação está mais próxima do eixo zero em comparando com as demais técnicas com apresenta o Gráfico 04. Ou assim como o aquecimento do solo e a escavação que somando-as podem atingir uma curva de remediação sustentável perfeita conforme mostrado no Gráfico 04.

Gráfico 04 – Relatório de seleção de técnicas de remediação I



Esse resultado não foi aplicado no caso real, pois por desconhecimento da

metodologia de remediação sustentável optou-se por realizar apenas a escavação e recomposição do solo que resultou em um alto custo para esse processo de mitigação que poderia ter uma redução de 33% segundo os valores apresentados pela empresa e dessa forma realizar um projeto mais sustentável. Outro ponto que também deve ser considerado é a disponibilidade da técnica na região da contaminação, esse custo adicional junto ao desconhecimento da metodologia, bem como o desconhecimento da própria técnica de remediação pode ser uma barreira para a aceitação desse algoritmo, visto que ainda não é possível considerar esses fatores.

5.5 Estudo de caso II – contaminação de área situada nos Estados Unidos

Esse estudo de caso aborda uma área nos Estados Unidos, conforme descrito por Trentin et al. (2019) e replicado por Braun (2022). A área, localizada aproximadamente a 56 km a oeste de Chicago, Illinois, compreende 35,41 hectares. Originalmente utilizada para fins agrícolas desde 1874, foi convertida em uma usina de energia elétrica em 1969, operando por 35 anos e experimentando cinco derramamentos, incluindo óleo combustível, óleo lubrificante, óleo diesel e óleo mineral.

A geologia da área é composta principalmente por depósitos de argila, concreto e preenchimentos da atividade anterior do local, exibindo alta heterogeneidade. A condutividade hidráulica dos solos varia entre $1,26 \times 10^{-5}$ m/s e $3,17 \times 10^{-6}$ m/s, com o lençol freático localizado entre 0,90 e 3,65 metros abaixo do solo.

As investigações identificaram sete locais de risco (hot spots) contaminados com BTEX, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), bifenil policlorados (PCBs) e metais. Dessa forma, os demais dados obtidos nesse estudo de caso foram agrupados na Tabela 02.

Tabela 02 – Características do sítio contaminado referente ao estudo de caso II.

Input	Valore da amostra
Tipo de Solo	Argiloso
Permeabilidade	$1,26 \times 10^{-5}$ m/s
Heterogeneidade	Alta
Umidade	21%
pH	7
Temperatura	10°C

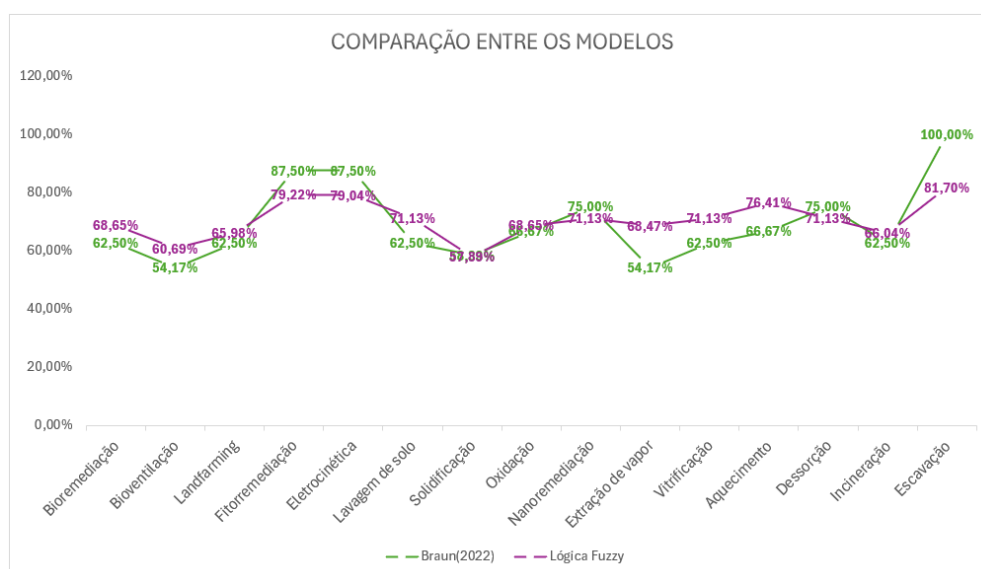
Matéria Orgânica	3%
Contaminante	BTEX
Concentração	100 mg/Kg
Profundidade	1,2 m
Meta	Redução
Tempo	1 ano
Forma	Ex-situ
Potencial de investimento	1000 U\$/m ³
Grau de reutilização	Reutilizável
Distúrbio	Baixo

Fonte: Adaptado de Braun (2022)

5.5.1 Resultados obtidos a partir do estudo de caso II

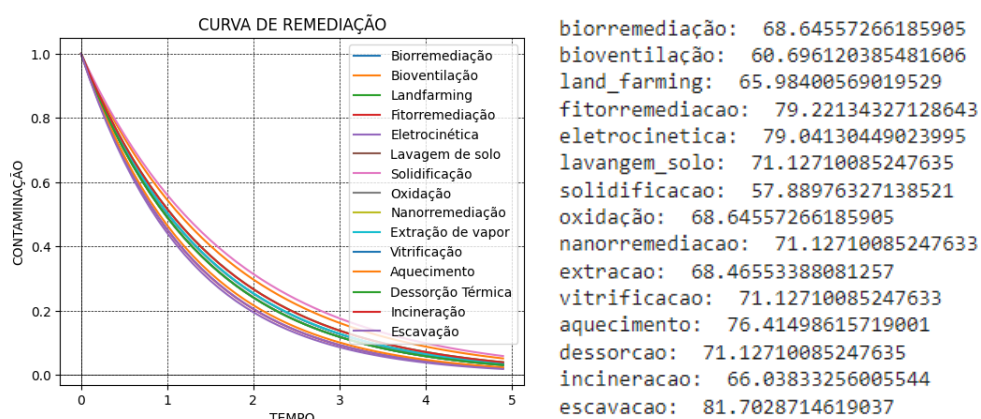
Os resultados desse estudo de caso foram usados por Trentin et al. (2019) e replicados por Braun (2022) que consequentemente validou os resultados. Nessa perspectiva, foram usados os mesmos resultados para a validação desse algoritmo de seleção. Nesse sentido, foram usados os mesmos dados de entrada do estudo de caso realizado por Braun (2022), que apesar da metodologia ser diferente, o relatório obtido após a comparar os modelos foi semelhante ao resultado apresentado pela autora, visto que não apresentou variações estatísticas entre os modelos, como podemos identificar no Gráfico 05.

Gráfico 05 – Relatório de comparação entre os modelos.



A autora classificou e selecionou as técnicas de Escavação, Fitorremediação e Eletrocinética que receberam as melhores avaliações. Dessa forma, o modelo de Braun (2022) determinou a pontuação das principais técnicas com 100% (escavação) e 87,5% (fitorremediação e eletrocinética). Assim como o modelo de Braun (2022), o algoritmo de seleção com lógica fuzzy classificou as mesmas técnicas, porém com índices diferentes 81,70%, 79,22% e 79,04 como mostra o Gráfico 06.

Gráfico 06 – Relatório de seleção de técnicas de remediação II



O algoritmo de apoio na seleção de técnicas de remediação segue uma metodologia diferente da proposta por Braun (2022). Esse código é um processo automatizado escrito em Python, diferente do processo manual realizado por trabalhos anteriores. Entretanto, ainda é necessário um aprimoramento do código para o aprendizado de máquinas de modo que a rede consiga evoluir cada vez mais e elimine a subjetividade do processo de seleção de técnicas de remediação.

6. CONCLUSÕES

A remediação eficaz de áreas contaminadas é um imperativo ambiental, exigindo estratégias que integrem um vasto banco de dados, fundamental para a seleção criteriosa das técnicas de remediação, especialmente em contextos de solos afetados. Este estudo propõe um algoritmo de apoio para seleção de técnicas de remediação, para que se tenha uma estrutura automatizada e padronizada. As informações compiladas e disponibilizadas sobre variáveis e técnicas são de suma importância, orientando os usuários na identificação e atenção das características cruciais para a seleção de técnicas de remediação.

A aplicação do algoritmo em estudos de caso demonstra uma eficiência estratégica na validação e verificação de sua ampla aplicabilidade. As variações entre características do solo, contaminação, operação e demais fatores são apresentadas de forma abrangente, permitindo avaliar a aplicabilidade das técnicas em contextos específicos de remediação. Ao analisar cada variável, torna-se evidente a variedade de técnicas disponíveis, enfatizando que a combinação e demonstração de diversas variáveis podem ampliar as oportunidades para determinadas técnicas.

Nos estudos de caso realizados, foram classificadas todas as técnicas de remediação para cada uma das amostras apresentadas possibilitando selecionar a que mais se ajusta as condições da área contaminada. No estudo de caso II, as técnicas foram classificadas em escavação/disposição, fitoremediação e eletrocinética e recomendada pelo lógica fuzzy como 81,7%, 79,22% e 79,04%. Já no estudo de caso I desse trabalho, as técnicas como, nanorremediação, aquecimento e escavação foram classificados e selecionados. Entretanto, ainda é necessário a inserção da técnica de aprendizado de máquinas.

Visando a objetividade nesse processo, além da melhoria com aprendizado de máquinas, sugere-se, para futuros estudos, a ampliação do banco de dados para criar uma rede neural artificial mais robusta, visto que quanto maior e mais refinado forem esses dados mais poderoso será o algoritmo de seleção de remediação sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por práticas sustentáveis na remediação de áreas contaminadas é um imperativo, impulsionado pela necessidade de integrar dados abrangentes para a seleção criteriosa das técnicas mais adequadas. Esse estudo propõe um algoritmo de suporte baseado em redes neurais artificiais com operação Fuzzy para facilitar a automatização e padronização desse processo. A compilação e disponibilização de informações sobre variáveis e técnicas são fundamentais para orientar os usuários na identificação e consciência de características cruciais para a seleção de técnicas de remediação sustentável.

A aplicação desse algoritmo em estudos de caso revela sua eficiência estratégica na validação e verificação de sua ampla aplicabilidade. As variações nas características do solo, níveis de contaminação, concentrações e outros fatores são tratados de maneira abrangente, permitindo avaliar a aplicabilidade das técnicas em contextos específicos de remediação. Uma análise detalhada de cada variável ressalta a diversidade de técnicas disponíveis, destacando que a combinação e a consideração de diversas variáveis podem ampliar as oportunidades para determinadas técnicas que serão empregadas com sucesso.

Buscando aprimorar a objetividade desse processo, além do refinamento por meio de inteligência artificial, sugere-se para estudos futuros a expansão e enriquecimento do banco de dados, evoluindo a criação de uma rede neural artificial mais robusta. Quanto maior e mais refinado forem esses dados, maior será a capacidade do algoritmo de seleção de técnicas de remediação sustentável. Contudo, é relevante considerar como limitações a atual base de dados limitada para o processo de aprendizado do algoritmo.

Essa pesquisa tem importância considerável para o desenvolvimento sustentável, uma vez que leva em consideração os pilares da sustentabilidade e alinhando as variáveis de entrada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O confronto de metodologias entre empresas e contratadas para a seleção das técnicas mais adequadas não apenas reduz custos, mas também minimiza impactos ambientais e na saúde humana.

Além disso, é fundamental considerar os próximos passos desta pesquisa, que incluem o aprimoramento com inteligência artificial e o desenvolvimento de um aplicativo web para apoiar profissionais no processo de seleção de técnicas de remediação sustentável. Este avanço representa uma evolução significativa na aplicação prática dessas metodologias, permitindo uma abordagem mais ágil e precisa na escolha das técnicas mais adequadas para cada cenário específico de remediação sustentável.

REFERÊNCIAS

- Anderson, R., Norrman, J., Voltar, P.E., Söderqvist, T., Rosen, L. 2018. What's the point? The contribution of a sustainability view in contaminated site remediation. *Sci. Total Environ.* 630, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.120>.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2013. ASTM E2876-13 - Standard Guide for Integrating Sustainable Objectives into Cleanup. ASTM Internacional: West Conshohocken, PA.
- Bardos, P.; Bone, B.; Boyle, R.; Ellis, D.; Evans, F.; Harries, N.D. & Smith, J.W.N. (2011). Applying sustainable development principles to contaminated land management using the SuRF-UK framework. *Remediation Journal*, 21(2):77-100.
- Bardos, P.; Bakker, L.; Darmendrail, D.; Harries, N.; Holland, K.; Mackay, S.; Pachon, C.; Slenders, H.; Smith, G.; Smith, J. & Wiltshire, L. (2013). Sustainable and green remediation - Global update. *Proc. 12th AquaConSoil: ThS E3 Sustainable use of the subsurface*, Barcelona.
- Bardos, P. (2014). Progress in sustainable remediation. *Remediation Journal*, 25(1):23-32.
- Bardos, R.P.; Cundy, A.B.; Smith, J.W.N. & Harries, N. (2016a). Sustainable remediation. *Journal of Environmental Management*, 184:1-3.
- Bardos, R.P.; Bone, B.D.; Boyle, R.; Evans, F.; Harries, N.D.; Howard, T. & Smith, J.W.N. (2016b). The rationale for simple approaches for sustainability assessment and management in contaminated land practice. *Science of the Total Environment*, 563-564:755-768.
- Bardos, R.P.; Thomas, H.F.; Smith, J.W.N.; Harries, N.D.; Evans, F.; Boyle, R.; Howard, T.; Lewis, R.; Thomas, A.O. & Haslam, A. (2018). The development and use of sustainability criteria in SuRF-UK's sustainable remediation framework. *Sustainability*, 10(6):1781-1803.
- BUENO, F.B., Günther, W.M.R., Philippi, A., 2018. Sustainable Management Analysis of a Contaminated Area on USP Capital Campus. In: Leal Filho, W., Frankenberger, F., Iglecias, P., Mülfarth, R. (eds), *Towards Green Campus Operations*, 885-901. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76885-4_58
- BRAUN, A. B.; TRENTIN, A. W. S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Proposal for an optimized method for sustainable remediation evaluation and application: implementation of a multicriteria process. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 35, p. 35996- 36006, 2019.
- BRAUN, A. B.; TRENTIN, A. W. S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Relevance of sustainable remediation to contaminated sites management in developed and developing countries: case of Brazil. *Land Use Policy*, v. 94, p. 104533, 2020a.
- BRAUN, A. B.; TRENTIN, A. W. S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Sustainable Remediation: a new environmentally sustainable paradigm in urbanization and

industrialization. Industry, Innovation and Infrastructure, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals, Springer, 2020b.

BRAUN, A. B. Método de apoio a tomada de decisão na remediação sustentável de áreas contaminadas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

Brasil. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988 292 p. (em português).

Brasil. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus objetivos e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ago. 1981.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e faz outros arranjos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ago. 2010.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Fornece critérios e valores norteadores de qualidade do solo para a presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o manejo ambiental de locais contaminados por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, número 249, pp.81-84, dez. 2009.

CL:AIRE. Supplementary Report 1 of the SuRF-UK Framework: A general approach to sustainability assessment for use in achieving sustainable remediation (SR1). Londres, Reino Unido: Boletim SuRF-UK 1. Disponível em: <http://www.claire.co.uk/surfuk> . Acesso em: 16 de out. 2023.

CL:AIRE. Supplementary Report 2 of the SuRF-UK Framework: Selection of indicators/criteria for use in sustainability assessment for achieving sustainable remediation, Anexo 01, The SuRF-UK indicator set for sustainable remediation assessment. Londres, Reino Unido: Boletim SuRF-UK 2. Disponível em: <http://www.claire.co.uk/surfuk> . Acesso em: 16 de out. 2023.

Diamond, M.L., Page, C.A., Campbell, M., McKenna, S., Lall, R., 1999. Life-cycle framework for assessment of site remediation options: method and generic survey. Environ. Toxic. Chemistry. 18 (4), 788–800. <https://doi.org/10.1002/etc.5620180427>.

Environmental company of São Paulo state (CETESB), 2001. Contaminated Sites Management Manual. Project CETESB - GTZ Technical Cooperation Brazil - Germany. 2. ed. São Paulo: CETESB. (in portuguese)

Environmental company of São Paulo state (CETESB), 2017. List of contaminated sites. 2017. Available in: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas/> (accessed 17 out 2023). (in portuguese)

Forum US, 2009. Sustainable remediation white paper: Integrating sustainable principles, practices, and metrics into remediation projects. Rem. J. 19 (3), 5–114. <https://doi.org/10.1002/rem.20210>.

Environment state institute of Rio de Janeiro (INEA), 2015. Evaluation of Contaminated Sites. Available in: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/LicenciamentoAmbiental/Licenciamento-saibamais/GestaodeRiscoAmbientaTec/AvaliacaodeAreasContaminadas/index.htm?lang=PTBR> (accessed 17 out 2023). (in portuguese)

Environment state foundation of the Minas Gerais (FEAM), 2018. Inventory of contaminated areas of the state of Minas Gerais. Belo Horizonte-MG: FEAM. (in portuguese)

HAYKIN, Simon. Redes Neurais e Máquinas de Aprendizagem. Pearson. ISBN-13: 978-0-13-147139-9. 3º Ed. McMaster, Canadar, 2008. p 27-74. Acesso em: 01 de out. 2023.

Hou, D., Qi, S., Zhao, B., Rigby, M., O'Connor, D. 2017. Incorporating life cycle assessment with health risk assessment to select the 'greenest' cleanup level for Pb contaminated soil. J. Clean. Prod. 162, 1157-1168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.135>.

Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P. 2014a. The adoption of sustainable remediation behaviour in the US and UK: A cross country comparison and determinant analysis. Sci. Total Environ. 490, 905-913. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.059.

Huysegoms, L. & Cappuyns, V. (2017). Critical review of decision support tools for sustainability assessment of site remediation options. Journal of Environmental Management, 196:278-296.

Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P., Hellings, J., Gu, Q. 2014b. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park. J. Clean. Product. 83, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.062>.

HADLEY, P. W.; HARCLERODE, M. Green Remediation or Sustainable Remediation: Moving from Dialogue to Common Practice. Remediation Journal, v. 25, n. 2, p. 95-115, 2015.

ISO. INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION. Soil Quality e Guidance on Sustainable Remediation, ISO/DIS 18504. Genebra, Suíça, 2017. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62688/f6f09e87a1e14eaa940f8991d0771841/ISO-18504-2017.pdf>. Acesso em: 17 de novembro. 2023.

Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). 2011. Green and Sustainable Remediation: State of the Science and Practice. Available in: www.itrcweb.org (accessed 17 out 2020).

Latin America network for soil and water management (NICOLE-Brazil), 2016. Intrusion of vapors in closed environments: basic concepts, evaluation and management of contaminated sites in Brazil. NICOLE Brazil: São Paulo, 88 p. (in portuguese)

Lesage, P., Deschênes, L., Samson, R., 2007. Evaluating holistic environmental consequences of brownfield management options using consequential life cycle assessment for different perspectives. Environ. Manage. 40, 323-337. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-005-0328-6>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. 2021. Sustainable Development Goals. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>. Acesso em: 15 de out. 2023.

O'Connor, D., Hou, D. 2018. Targeting cleanups towards a more sustainable future. *Environ Sci Process Impacts*. 20 (2), 266-269. <https://doi.org/10.1039/C7EM00518K>.

PETRUZZI, N. M. A Case Study on the Evaluation and Implementation of Green and Sustainable Remediation Principles and Practices During a RCRA Corrective Action Cleanup. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 31, n. 2, p. 63-71, 2011.

Reinikainen, J., Sorvari, J., Tikkanen, S., 2016. Finnish policy approach and measures for the promotion of sustainability in contaminated land management. *J. Environ. Manage.* 184, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.046>.

Rizzo, E., Bardos, P., Pizzol, L., Critto, A., Giubilato, E., Marcomini, A., Albano, C., Darmendrail, D., Döberl, G., Harclerode, M., Harries, N., Nathanail, P., Pachon, C., Rodriguez, A., Slenders, H., Smith, G. 2016. Comparison of international approaches to sustainable remediation. *J. Environ. Manage.* 184, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.062>.

Song, Y., Hou, D., Zhang, J., O'Connor, D., Li, G., Gu, Q., Li, S., Liu, P. 2018. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: a case study at a mega-site in china. *Sci. Total Environ.* 610-611, 391-401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.016>.

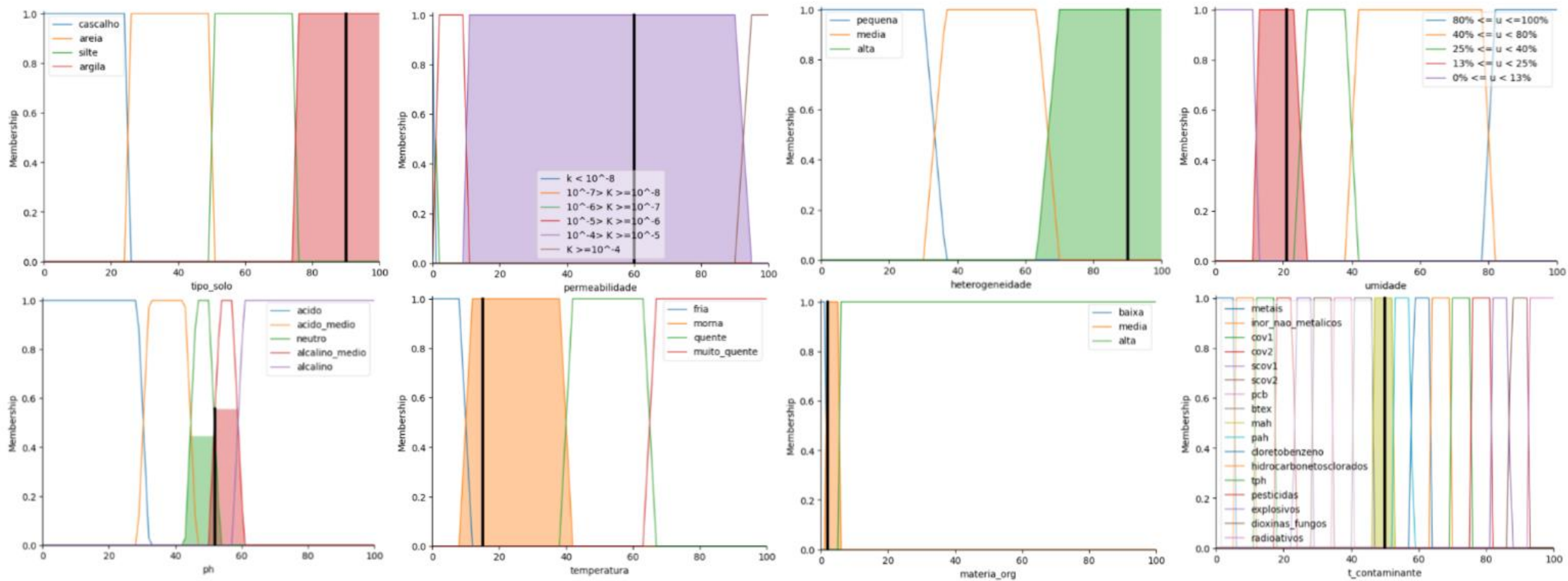
Smith, J.W.N. & Kerrison, G. (2013). Benchmarking of decision-support tools used for tiered sustainable remediation appraisal. *Water, Air & Soil Pollution*, 224(1706):1-11.

USEPA (2008). *Remediação Verde: Incorporando Práticas Ambientais Sustentáveis na Remediação de Locais Contaminados*. Agência de Proteção Ambiental dos EUA, Washington, DC, EUA, 56 p.

VAN LIEDEKERKE, M., PROKOP, G., RABL-BERGER, S., KIBBLEWHITE, M., LOUWAGIE, G. *Progresso na gestão de locais contaminados na Europa*. União Europeia, Luxemburgo, 2014.

ZILL, Dennis G. *Equações diferenciais com aplicações em modelagem*. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 431 p.

ANEXO 01 – RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO I



APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CRITÉRIOS (BRAUN, 2022)	CLASSIFICAÇÃO (BRAUN, 2022)	TIPO DE VARIÁVEL	ODS	METAS RELACIONADAS (CL:AIRE 2020)
TIDPO DE SOLO	Cascalho (%)	Numérico	2, 3, 6, 11, 12 e 15	• 2.4 Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres e que melhorem progressivamente a terra e o solo qualidade. • 3.9 Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo. • 6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente. • 11.6 Até 2030, reduzir o impacto ambiental adverso per capita das cidades, inclusive prestando atenção especial à qualidade do ar e à gestão de resíduos municipais e outros. • 12.4 Até 2020, alcançar a gestão ambientalmente correta dos produtos químicos e de todos os resíduos ao longo do seu ciclo de vida, de acordo com as estruturas internacionais acordadas, e reduzir significativamente a sua liberação para o ar, a água e o solo, a fim de minimizar os seus impactos adversos na saúde humana e no ambiente. • 15.3 Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo.
	Areia (%)			
	Silte (%)			
	Argila (%)			
PERMEABILIDADE	$k \geq 10^{-4} \text{ m/s}$	Numérico		
	$10^{-4} > k \geq 10^{-5} \text{ m/s}$			
	$10^{-5} > k \geq 10^{-6} \text{ m/s}$			
	$10^{-6} > k \geq 10^{-7} \text{ m/s}$			
	$10^{-7} > k \geq 10^{-8} \text{ m/s}$			
	$k < 10^{-8} \text{ m/s}$			
HETEROGENIEDADE	Pequena	Linguística		
	Média			
	Grande			
UMIDADE	$0\% \leq u < 13\%$	Numérico		
	$13\% \leq u < 25\%$			
	$250\% \leq u < 40\%$			
	$40\% \leq u < 80\%$			
	$80\% \leq u < 100\%$			
pH	$pH < 4,5$	Numérico	6, 7, 8, 12, 15	• 6.1 Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos. • 6.2 Até 2030, alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, e acabar com a defecação a céu aberto, com especial atenção para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situação de vulnerabilidade. • 7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação das energias renováveis no mix energético global.
	$4,5 \leq pH < 6,5$			
	$6,5 \leq pH < 7,5$			
	$7,5 \leq pH < 8,5$			

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

	$8,5 \leq pH$			
TEMPERATURA	$T < 10$	Numérico		• 8.4 Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança. • 11.6 Até 2030, reduzir o impacto ambiental adverso per capita das cidades, nomeadamente prestando especial atenção à qualidade do ar e à gestão de resíduos municipais e outros. • 12.4 Até 2020, alcançar a gestão ambientalmente correta dos produtos químicos e de todos os resíduos ao longo do seu ciclo de vida, de acordo com as estruturas internacionais acordadas, e reduzir significativamente a sua libertação para o ar, a água e o solo, a fim de minimizar os seus impactos adversos na saúde humana e no ambiente. • 12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos através da prevenção, redução, reciclagem e reutilização. • 15.1 Até 2020, garantir a conservação, restauração e uso sustentável dos ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em particular florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes de acordos internacionais. • 15.3 Até 2030, combater a desertificação, restaurar terras e solos degradados, incluindo terras afetadas pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação da terra. • 15.5 Tomar medidas urgentes e significativas para reduzir a degradação dos habitats naturais, travar a perda de biodiversidade e, até 2020, proteger e prevenir a extinção de espécies ameaçadas.
	$10 \leq T < 40$			
	$40 \leq T < 65$			
	$65 < T$			
MATÉRIA ORGANICA	$MO < 0,01$	Numérico		
	$0,01 \leq MO \leq 0,05$			
	$0,05 < MO$			
TIPO DE CONTAMINANTE	Metais	Linguístico	3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15 e 16	• 2.4 Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo. • 3.9 Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças causadas por produtos químicos perigosos e pela poluição e contaminação do ar, da água e do solo. • 6.1 Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos. • 6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente.
	Inorgânicos não Metálicos			
	COV – Não halogenados			
	COV – halogenados			
	SCOV - Não halogenados			
	SCOV - halogenados			
	PCD			

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

	BTEX		• 6.6 Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos. • 8.8 Proteger os direitos trabalhistas e promover ambientes de trabalho seguros e protegidos para todos os trabalhadores, incluindo os trabalhadores migrantes, em particular as mulheres migrantes, e pessoas em empregos precários. • 9.1 Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos. • 11.1 Até 2030, garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas. • 11.3 Até 2030, aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países. • 11.7 Até 2030, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência. • 12.4 Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente. • 12.8 Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza. • 15.1 Até 2020, assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em especial florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes dos acordos internacionais. • 15.3 Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo. • 15.4 Até 2030, assegurar a conservação dos ecossistemas de montanha, incluindo a sua biodiversidade, para melhorar a sua capacidade de proporcionar benefícios que são essenciais para o desenvolvimento sustentável. • 15.5 Tomar medidas urgentes e significativas para reduzir a degradação de habitat naturais, deter a perda de biodiversidade e, até 2020, proteger e evitar a extinção de espécies ameaçadas. • 16.7 Garantir a tomada de decisão responsiva, inclusiva, participativa e representativa em todos os níveis.
	MAH		
	PAH		
	Clorobenzeno		
	Hidrocarbonetos Clorados		
	TPH		
	Pesticidas		
	Explosivos		
	Dioxinas e Furanos		
	Radionuclídeos		
CONCENTRAÇÃO	$C < 10 \text{ mg/kg}$	Numérico	
	$10 \leq C < 100 \text{ mg/kg}$		
	$100 \leq C < 1000 \text{ mg/kg}$		
	$1000 \leq C < 10000 \text{ mg/kg}$		
	$C > 10000 \text{ mg/kg}$		
PROFUNDIDADE	$0 < h < 2 \text{ m}$	Numérico	
	$2 \leq h < 4 \text{ m}$		
	$4 \leq h < 10 \text{ m}$		
	$10 \leq h < 18 \text{ m}$		
	$18 \leq h < 30 \text{ m}$		
	$h \geq 30 \text{ m}$		

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

METAS DE REMEDIAÇÃO	Destruição/Degradação	Linguística	8, 9, 11, 12, 15 e 16	• 8.4 Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança. • 9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. • 11.3 Até 2030, aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países. • 11.7 Até 2030, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência. • 12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios. • 15.3 Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo. • 15.5 Tomar medidas urgentes e significativas para reduzir a degradação de habitat naturais, deter a perda de biodiversidade e, até 2020, proteger e evitar a extinção de espécies ameaçadas. • 16.7 Garantir a tomada de decisão responsiva, inclusiva, participativa e representativa em todos os níveis.
	Remoção/transferência/extração			
	Redução			
	Transformação			
	Imobilização			
TEMPO	$t < 1 \text{ ano}$	Numérico		
	$1 \leq t < 2 \text{ ano}$			
	$2 \leq t < 3 \text{ ano}$			
	$3 \leq t < 5 \text{ ano}$			
	$t > 5 \text{ ano}$			
FORMA DE TRATAMENTO	In-situ	Linguística	7, 8, 9, 11 e 12	• 7.3 Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética. • 8.3 Promover políticas orientadas para o desenvolvimento que apoiem as atividades produtivas, geração de emprego decente, empreendedorismo, criatividade e inovação, e incentivar a formalização e o crescimento das micro, pequenas e médias empresas, inclusive por meio do acesso a serviços financeiros. • 8.4 Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança.
	Ex-situ			

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

				• 8.8 Proteger os direitos trabalhistas e promover ambientes de trabalho seguros e protegidos para todos os trabalhadores, incluindo os trabalhadores migrantes, em particular as mulheres migrantes, e pessoas em empregos precários. • 9.1 Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos. • 11.7 Até 2030, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência. • 12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios.
POTENCIAL DE INVESTIMENTO	$s < 100 \text{ U\$/m}^3$	Numérico	4, 8, 9, 12 e 15	• 4.4 Até 2030, aumentar substancialmente o número de jovens e adultos que tenham habilidades relevantes, inclusive competências técnicas e profissionais, para emprego, trabalho decente e empreendedorismo. • 4.7 Até 2030, garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessárias para promover o desenvolvimento sustentável, inclusive, entre outros, por meio da educação para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentáveis, direitos humanos, igualdade de gênero, promoção de uma cultura de paz e não violência, cidadania global e valorização da diversidade cultural e da contribuição da cultura para o desenvolvimento sustentável. • 8.2 Atingir níveis mais elevados de produtividade das economias por meio da diversificação, modernização tecnológica e inovação, inclusive por meio de um foco em setores de alto valor agregado e dos setores intensivos em mão de obra. • 9.1 Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos. • 9.2 Promover a industrialização inclusiva e sustentável e, até 2030, aumentar significativamente a participação da indústria no setor de emprego e no PIB, de acordo com as circunstâncias nacionais, e dobrar sua participação nos países menos desenvolvidos. • 9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. • 9.5 Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento.
	$100 \leq s < 250 \text{ U\$/m}^3$			
	$250 \leq s < 400 \text{ U\$/m}^3$			
	$400 \leq s < 700 \text{ U\$/m}^3$			
	$700 \leq s < 1000 \text{ U\$/m}^3$			
	$1000 \leq s < 2000 \text{ U\$/m}^3$			
	$s > 2000 \text{ U\$/m}^3$			

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA COM OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

				• 12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios. • 15.A Mobilizar e aumentar significativamente, a partir de todas as fontes, os recursos financeiros para a conservação e o uso sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas.
GRAU DE REUTILIZAÇÃO	Reutilizável	Linguística	9, 12, 16	• 9.1 Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos. • 12.8 Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza. • 16.7 Garantir a tomada de decisão responsiva, inclusiva, participativa e representativa em todos os níveis. • 16.10 Assegurar o acesso público à informação e proteger as liberdades fundamentais, em conformidade com a legislação nacional e os acordos internacionais.
	Reutilizável com limitação			
	Inutilizável			
DISTÚRBIO	Mínimo	Linguística	11 e 16	• 11.1 Até 2030, garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas. • 16.7 Garantir a tomada de decisão responsiva, inclusiva, participativa e representativa em todos os níveis.
	Baixo			
	Médio			
	Alto			