

GREEN METRICS ANALYTICS: UMA NOVA ABORDAGEM EM REMEDIAÇÃO RESILIENTE E SUSTENTÁVEL

Juliana Aparecida Galhardi¹ (juliana.galhardi@arcadis.com), Aline Nayra da Silva Zampieri Martinho¹,
Fernanda Delfino¹, Samara Freire¹, Jessica Gattenby², Raoni Azevedo¹.

Resumo

A remediação resiliente e sustentável busca reduzir emissões de gases de efeito estufa e otimizar impactos ambientais, sociais e econômicos em projetos de restauração ambiental. Alinhada a esses princípios, a ferramenta *Green Metrics Analytics* (GMA) foi desenvolvida para quantificar e monitorar as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida de projetos, além de auxiliar na implementação de melhorias contínuas em sustentabilidade. Como parte da análise realizada, a ferramenta correlaciona métricas e boas práticas de campo com os indicadores de sustentabilidade do guia *Sustainable Remediation Forum – UK*, alinhando-os aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU atingidos pelos projetos. No Brasil, a ausência de diretrizes específicas para incorporar plenamente a sustentabilidade ao gerenciamento de áreas contaminadas reforça a importância da GMA, que promove decisões mais informadas,

fortalece a resiliência climática e impulsiona práticas sustentáveis na restauração ambiental.

Palavras-chave: Sustentabilidade, gerenciamento de áreas contaminadas, gases do efeito estufa, Protocolo GHG, Power Bi.

Abstract

Sustainable and resilient remediation seeks to reduce greenhouse gas emissions and optimize environmental, social, and economic impacts in environmental restoration projects. Aligned with these principles, the Green Metrics Analytics (GMA) tool was developed to quantify and monitor carbon emissions throughout the lifecycle of projects, while assisting in the continuous implementation of sustainability improvements. As part of the analysis performed, the tool correlates field metrics and best practices with sustainability indicators from the Sustainable Remediation Forum – UK guide, aligning them with the United Nations Sustain-

1. Arcadis, São Paulo, Brasil.

2. Arcadis, Estados Unidos.

nable Development Goals achieved by the projects. In Brazil, the absence of specific guidelines to fully incorporate sustainability into contaminated site management highlights the importance of GMA, which facilitates more informed decision-making, strengthens climate resilience, and drives sustainable practices in environmental restoration.

Keywords: Sustainability, contaminated site management, greenhouse gas emissions, GHG Protocol, Power BI.

1. Introdução

As mudanças climáticas e a crise ambiental têm se consolidado como questões centrais no cenário global contemporâneo, influenciando profundamente as prioridades econômicas, sociais e políticas em escala mundial (ZANDALINAS *et al.*, 2021). A intensificação de eventos climáticos extremos não apenas afeta diretamente populações e ecossistemas, mas compromete a biodiversidade, esgota recursos naturais e gera desequilíbrios socioeconômicos que se refletem diretamente na economia de países, incluindo setores estratégicos, como mineração e energia. Nesse contexto, a contaminação de solos e águas se agrava, exigindo soluções inovadoras de gerenciamento de áreas contaminadas (GAC) alinhadas aos princípios da sustentabilidade (MACO *et al.*, 2018; KUMAR e REDDY, 2020).

A Remediação Resiliente e Sustentável (*Sustainable Resilient Remediation - SRR*) emerge como uma prática transformadora nesse contexto, integrando sistematicamente desafios climáticos e aspectos sociais e econômicos no gerenciamento de áreas contaminadas (HOU e

O'CONNOR, 2020). Através de abordagens integradas, a SRR busca minimizar a emissão de carbono nos projetos de restauração ambiental, promovendo soluções que equilibram benefícios ambientais, sociais e econômicos – os três pilares fundamentais da sustentabilidade (Figura 1).

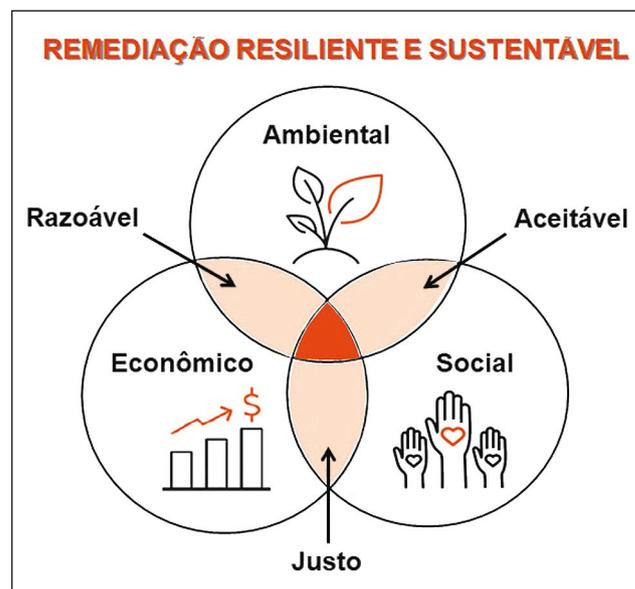


Figura 1 – Pilares fundamentais da remediação resiliente e sustentável. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por meio de inovações tecnológicas e processos colaborativos, a implementação da SRR traduz-se em uma estratégia robusta para adaptação às mudanças climáticas e gestão responsável dos recursos naturais, permitindo que empresas e governos mitiguem os impactos climáticos, reduzam custos da remediação e fortaleçam o compromisso com uma sociedade mais resiliente (MACO *et al.*, 2018). Essa abordagem busca ainda equilibrar a recuperação ambiental com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030 (HOU e O'CONNOR, 2020).

Apesar do crescente interesse global pela SRR, diversos desafios ainda dificultam sua ampla adoção

(HOU e AL-TABBAA, 2014). Por exemplo, ainda há uma falta de consenso entre os profissionais de remediação sobre o que define práticas sustentáveis, especialmente nos âmbitos sociais e econômicos. Além disso, as estratégias mais eficazes para promover a remediação sustentável estão intrinsecamente ligadas às particularidades sociais, geográficas e econômicas de cada região, bem como à capacidade técnica e operacional das organizações envolvidas. Essas lacunas dificultam a adoção generalizada de abordagens mais sustentáveis e resilientes em projetos de restauração ambiental.

Nesse cenário, este artigo analisa como a incorporação de práticas sustentáveis em projetos de restauração ambiental pode gerar impactos positivos nos âmbitos socioambiental e econômico, contribuindo para enfrentar os desafios das mudanças climáticas globais. Como objetivos específicos, o artigo visa analisar a abrangência de aspectos de SRR no arcabouço legal do Brasil, bem como destacar a relevância da mensuração de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em projetos de restauração ambiental no contexto da crise climática global. Para isso, apresenta-se a ferramenta *Green*

Metrics Analytics (GMA), uma solução digital inovadora baseada nos princípios de SRR que monitora as emissões de carbono ao longo das etapas do GAC, conectando métricas de campo a indicadores de sustentabilidade e ODS. Ao identificar lacunas e áreas de melhoria em projetos de restauração ambiental, a GMA contribui para a otimização do processo de tomada de decisões focando em práticas mais sustentáveis e resilientes.

2. Remediação Resiliente e Sustentável como solução à crise climática global

As práticas de remediação encontram-se em constante evolução (Figura 2). Historicamente, as abordagens priorizavam custos e prazos, negligenciando os impactos a longo prazo. Durante os anos 1960, o descarte de resíduos sem critérios ambientais frequentemente agravava os danos aos solos e recursos hídricos. Nos anos 1990, técnicas intensivas, como escavação e incineração, marcaram uma transição para métodos mais avançados. A partir dos anos 2000, a sustentabilidade ganhou destaque com os princípios dos 3R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar). Mais recentemente, em 2020, o conceito

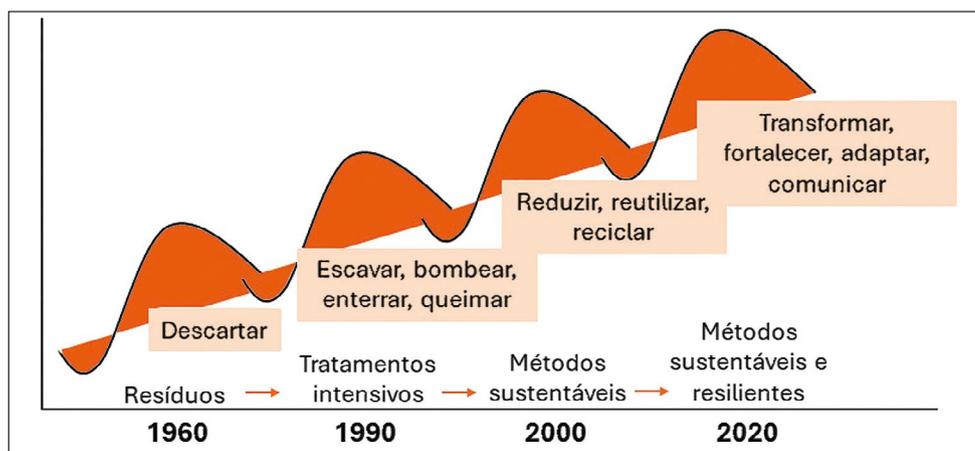


Figura 2: Evolução do entendimento sobre remediação ambiental.
Fonte: Adaptado de ELLIS e HADLEY (2009).

de resiliência foi incorporado à remediação, com foco na adaptação às mudanças climáticas, prevenção de impactos futuros e recuperação de ecossistemas e comunidades (ELLIS e HADLEY, 2009).

Sustentabilidade é definida como a capacidade de atender às necessidades presentes sem comprometer as gerações futuras, equilibrando os pilares econômico, social e ambiental (ONU, 2018). Resiliência, por sua vez, refere-se à capacidade de sistemas, comunidades ou indivíduos se adaptarem, resistirem e se recuperarem diante de adversidades, como mudanças climáticas e desastres naturais, assegurando a continuidade de suas funções essenciais (WALKER, 2020). A integração desses dois conceitos é fundamental para implementar estratégias de gerenciamento de áreas contaminadas que sejam adequadas aos desafios impostos pelas mudanças climáticas globais.

A intensificação de eventos climáticos extremos, como secas, inundações e incêndios florestais, tem impactado diretamente a eficácia dos planos de remediação ambiental em escala global. Estes eventos não apenas alteram a toxicidade dos contaminantes e a exposição dos organismos, mas também afetam o destino e o transporte dos poluentes, dificultando a gestão de áreas contaminadas a longo prazo. Diante desses desafios, as mudanças climáticas têm começado a orientar a escolha de tecnologias de remediação. Métodos convencionais, como escavação e remoção ou bombeamento e tratamento (*pump-and-treat*), muitas vezes ignoram os impactos ambientais secundários e os efeitos socioeconômicos, podendo, em alguns casos, ser mais prejudiciais do que a ausência de intervenção (HOU e O'CONNOR, 2020).

Por outro lado, tecnologias passivas, embora mais sustentáveis, podem prolongar a permanência de contaminantes no subsolo, exigindo análises de risco detalhadas que considerem os efeitos das mudanças climáticas ao longo do ciclo de vida dos projetos (O'CONNELL e HOU, 2015).

De forma geral, considera-se que tecnologias de remediação mais sustentáveis, como biorremediação e novas formas de tratamento químico *in-situ* podem reduzir as emissões de GEE em cerca de 50 a 80% quando comparadas aos métodos convencionais (MACO *et al.*, 2018). Em todos os casos, a eficácia dos projetos de remediação pode ser prejudicada se os impactos climáticos não forem considerados desde as etapas iniciais de concepção, tanto na forma como as mudanças afetam a remediação quanto em como as técnicas de remediação são impactadas pelas mudanças climáticas.

Segundo o ITRC (2011), os locais a serem remediados devem passar por uma avaliação de vulnerabilidade climática para identificar riscos potenciais. Essa avaliação deve considerar mudanças nas condições do local, como hidrogeologia, transporte de contaminantes, permanência dos poluentes no ambiente, eficácia dos sistemas de remediação, emissões de GEE e gestão de riscos. Esses aspectos devem ser incorporados ao modelo conceitual do projeto, e medidas de adaptação precisam ser implementadas para aumentar a resiliência e a eficácia das intervenções (ITRC, 2011). Essa adaptação de modelos tradicionais de remediação é essencial para incorporar resiliência e sustentabilidade como elementos centrais. Isso requer um processo dinâmico e flexível, com reavaliações periódicas da vulnerabilidade dos sistemas, monitoramento con-

tínuo das ações implementadas e análise de seus impactos no ambiente e na biota (MACO *et al.*, 2018). As emissões de GEE geradas por atividades de remediação devem ser um critério central de avaliação, destacando a necessidade de priorizar soluções mais eficientes e de baixo carbono diante da crise climática global (MACO *et al.*, 2018).

Nesse âmbito, a implementação de políticas públicas e marcos regulatórios sólidos são fundamentais para impulsionar soluções inovadoras e garantir a consolidação de práticas de remediação que sejam eficazes, resilientes e sustentáveis a longo prazo.

3. Marcos regulatórios em sustentabilidade no gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com a contaminação do solo e das águas naturais, agravada pelas crises ambientais e climáticas globais, impulsionou a criação de estratégias de remediação ambiental mais sustentáveis em diversas partes do mundo. Essas iniciativas, embora frequentemente tenham resultado em documentos de orientação em vez de leis específicas, visam promover práticas de SRR em projetos de gerenciamento de áreas contaminadas. Nos Estados Unidos, por exemplo, a remediação ambiental ganhou uma ênfase crescente com a introdução do conceito de *green remediation* pela EPA (EPA, 2008; HOU e AI-TABBAA, 2014), que incorpora práticas para reduzir os impactos ambientais dos processos de remediação por meio de abordagens que consideram a minimização do consumo de energia e da emissão de GEE (EPA, 2008).

No Brasil, apesar de não haver diretrizes oficiais e legais que fazem menção direta à sus-

tabilidade e resiliência em restauração ambiental, o movimento inicial em direção a um critério mais rigoroso na gestão de áreas contaminadas se consolidou com a criação de regulamentações específicas a partir dos anos 2000, como as Resoluções nº 273/2000 e nº 420/2009 do CONAMA, que trouxeram importantes ferramentas de controle e monitoramento, como a definição de padrões de qualidade do solo. Outros marcos legais relacionados ao gerenciamento de áreas contaminadas estão ilustrados na Figura 3, que apresenta os principais arcabouços normativos aplicáveis no Brasil e, de forma adicional, no Estado de São Paulo, pelas publicações realizadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Embora haja avanços regulatórios, como o §2º do artigo 71 do Decreto nº 59.263/2013, que prevê a priorização de técnicas sustentáveis na remediação de áreas contaminadas, ainda se observa uma ausência de diretrizes mais específicas e operacionais que integrem de forma sistemática a sustentabilidade como princípio orientador das políticas e práticas de remediação no país. Como uma forma de fortalecer a resiliência e a sustentabilidade nos projetos, estratégias como a análise de vulnerabilidade climática e a avaliação das emissões de GEE poderiam ser padronizadas para todas as fases da restauração ambiental. De fato, a avaliação dos impactos ambientais em projetos de restauração tem como um dos objetivos reduzir emissões de GEE, alinhando-se à tendência global de integrar resiliência e sustentabilidade em soluções adaptáveis às mudanças climáticas globais (O'CONNELL e HOU, 2015; PANZARELLA *et al.*, 2024).

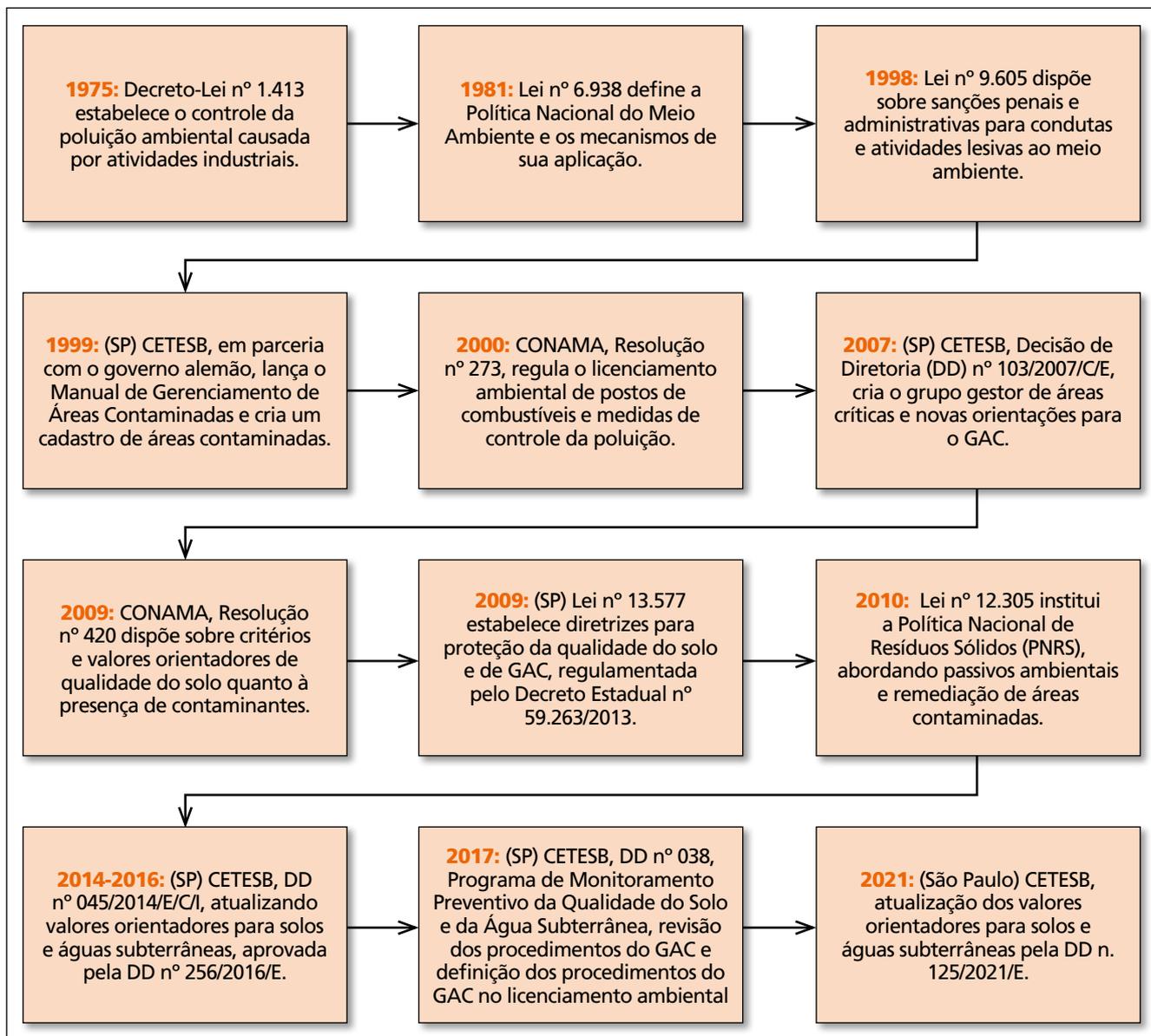


Figura 3: Marcos legais e técnicos do gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil.
 Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, espera-se que as políticas e diretrizes brasileiras evoluam para se alinhar às melhores práticas internacionais, promovendo uma adaptação resiliente, eficaz e sustentável aos desafios globais exacerbados pela crise climática e ambiental, especialmente considerando a diversidade de biomas, a extensão das áreas contaminadas e as desigualdades socioeconômicas no Brasil. Isso exigirá das partes envolvidas uma abordagem integrada que considere as

especificidades locais, além de adotar soluções inovadoras e tecnologias de baixo carbono que respondam de forma mais eficiente às pressões ambientais, sociais e econômicas.

4. GMA aplicada em projetos de GAC

A ferramenta GMA foi projetada para quantificar as emissões de GEE em diferentes fases de projetos de restauração ambiental, incluindo investigações e monitoramento de dife-

rentes matrizes e a etapa de remediação ativa. A ferramenta enfatiza a identificação de lacunas e pontos críticos de emissão de carbono visando apoiar a melhoria contínua de indicadores de sustentabilidade nos projetos avaliados.

Fundamentada em padrões internacionalmente reconhecidos, a GMA adota uma metodologia sistemática para calcular emissões de GEE dos Escopos 2 e 3 do Protocolo GHG (FGV, 2022). O Escopo 2 do Protocolo GHG abrange as emissões indiretas associadas à compra de eletricidade consumida pela organização. Um exemplo de atividade categorizada neste escopo inclui o consumo de energia elétrica (geração convencional ou renovável) para operar os sistemas de remediação. Já o Escopo 3 do Protocolo GHG engloba todas as emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor da organização, mas que não estão incluídas no Escopo 2, divididas em 15 categorias. A GMA reporta, portanto, as emissões de carbono geradas indiretamente pela organização durante as atividades de GAC realizadas por terceiros. Exemplos de emissões do Escopo 3 avaliadas pela ferramenta incluem aquelas advindas da logística de materiais, amostras e do transporte de pessoas, destinação final de resíduos gerados e o ciclo de vida de insumos utilizados.

A análise do ciclo de vida (ACV) dos insumos, incluindo combustíveis (fósseis ou biogênicos) e materiais utilizados na construção e instalação de poços (como PVC e bentonita), proporciona uma visão detalhada das emissões de carbono associadas a cada fase do processo, desde a extração das matérias-primas para fabricação dos materiais até o descarte ou reciclagem

final. Esse processo engloba todas as etapas intermediárias, como transporte, processamento, distribuição e uso dos insumos, possibilitando uma estimativa mais precisa das emissões de carbono geradas em cada fase do projeto.

Todos os fatores de emissão utilizados pela ferramenta GMA são provenientes do Protocolo GHG, salvo materiais e processos específicos para os quais o documento não dispõe de fatores de emissão. Para isso, emprega-se base contendo dados internacionalmente reconhecidos por sua eficiência na ACV de materiais e processos. Devido à sua característica de adaptar-se às especificidades de cada processo e material avaliado, a ferramenta GMA apresenta alta flexibilidade e personalização, possibilitando sua aplicação em uma gama de escopos de projetos.

O processo de avaliação, ilustrado na Figura 4, tem início com encontros entre os clientes e as equipes internas para definir o escopo técnico do projeto e alinhar as estratégias e objetivos de sustentabilidade. Dados operacionais, como consumo de combustíveis fósseis e biogênicos (volume por tipo de combustível utilizado), logística de transporte (modalidades de transporte – aéreo, terrestre ou aquático, e quilometragem percorrida por cada um), materiais utilizados ao longo do ciclo de vida do projeto (tais como materiais para construção de poços), volume de efluentes e resíduos gerados (quantidade e tipo de descarte), consumo de energia elétrica (como potência de equipamento, número de horas em funcionamento) são coletados em campo e registrados na plataforma digital GMA.

Todos os dados são integrados a uma interface digital avançada conectada ao Power BI,

que converte essas informações em indicadores quantitativos para avaliar o desempenho das atividades de sustentabilidade, incluindo avaliações temporais. Dentre os indicadores avaliados incluem-se, por exemplo, o volume de efluentes gerados e direcionados a sistemas de tratamento ou reinjeção nos sistemas de remediação, e o volume de resíduos sólidos gerados destinados para reciclagem, incineração ou coprocessamento. A plataforma também automatiza os cálculos de emissões de GEE para as atividades dos Escopos 2 e 3 do Protocolo GHG.

Além de métricas quantitativas, por meio do preenchimento de um questionário de melhores práticas em SRR, a GMA permite avaliar aspectos qualitativos relacionados à sustentabilidade em projetos de GAC. Esses aspectos incluem equidade de gênero nas equipes, participação da comunidade local, realização de treinamentos em saúde e segu-

rança operacional, entre outros. Essa integração de dados quantitativos e qualitativos permite a avaliação de indicadores robustos, baseados em dados concretos e alinhados aos ODS.

Para a ferramenta GMA, a aplicação de indicadores é dinâmica, sendo ajustada de acordo com o escopo dos projetos avaliados. Como base, a ferramenta integra indicadores provenientes de arcabouços amplamente e internacionalmente reconhecidos, como o SURF-UK (*Sustainable Remediation Forum – UK – SURF*, 2014) e os ODS da ONU, além das diretrizes para boas práticas em SRR da *United State Environmental Protection Agency* (EPA, 2008) e do *Interstate Technology & Regulatory Council* (ITRC, 2021). Esse arcabouço técnico, traduzido em indicadores, orienta as recomendações de sustentabilidade por meio da ferramenta GMA. Além disso, a integração entre métricas quantitativas e boas práticas de campo é essen-



Figura 4: Fluxograma de trabalho da ferramenta GMA. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

cial para a avaliação da sustentabilidade de forma criteriosa, conferindo maior rigor às análises. Por exemplo, o impacto social positivo de uma ação de remediação pode ser demonstrado por indicadores como a redução das emissões de GEE, uma vez que a diminuição do carbono na atmosfera melhora a qualidade do ar e beneficia diretamente a saúde da população local. Da mesma forma, o volume de recursos reciclados reflete a eficiência no reaproveitamento de materiais, reduzindo a demanda por novos recursos naturais, minimizando a geração de resíduos em aterros e potencialmente impulsionando a criação de empregos na cadeia de reciclagem. Essa associação fortalece a análise ao fundamentá-la em dados técnicos mensuráveis, promovendo uma abordagem equilibrada que integra ciência e prática na análise da sustentabilidade.

Após a análise técnica, os resultados são reportados aos usuários, incluindo GEE emitidos por etapa do projeto e por categoria do Protocolo-

lo GHG, indicadores ambientais, sociais e econômicos do guia do SURF-UK que foram atendidos e respectivos ODS associados. Recomendações acompanham os relatórios, visando ampliação dos aspectos de SRR nas etapas subsequentes dos projetos de restauração ambiental. O acompanhamento com as equipes técnicas e de campo é realizado ao longo de todo o projeto, o que permite identificar oportunidades de melhorias constantes e em tempo real.

A Figura 5 apresenta as etapas do processo de GAC em que a ferramenta GMA é aplicada, destacando as categorias do Escopo 3 do Protocolo GHG nas quais as emissões de GEE são contabilizadas. A figura também evidencia os ODS atendidos em cada etapa, com base em uma avaliação criteriosa das melhores práticas em campo e dos indicadores do SURF-UK atendidos. A Figura 6 ilustra exemplos de aplicação da ferramenta GMA e de resultados reportados para projetos de diferentes escopos.

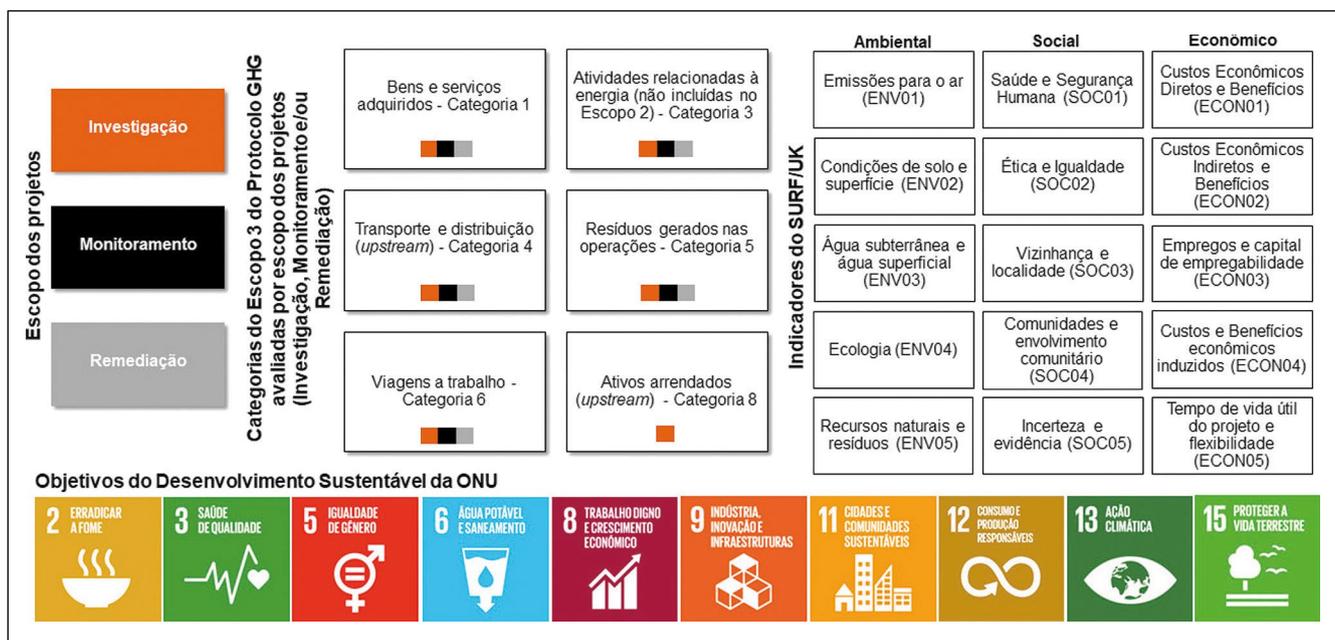


Figura 5: Etapas do processo de gerenciamento de áreas contaminadas onde ocorre a contabilização das emissões de GEE pela ferramenta GMA por categoria do Escopo 3 do Protocolo GHG e respectivos indicadores do guia do SURF-UK e ODS da ONU atendidos pelos projetos. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

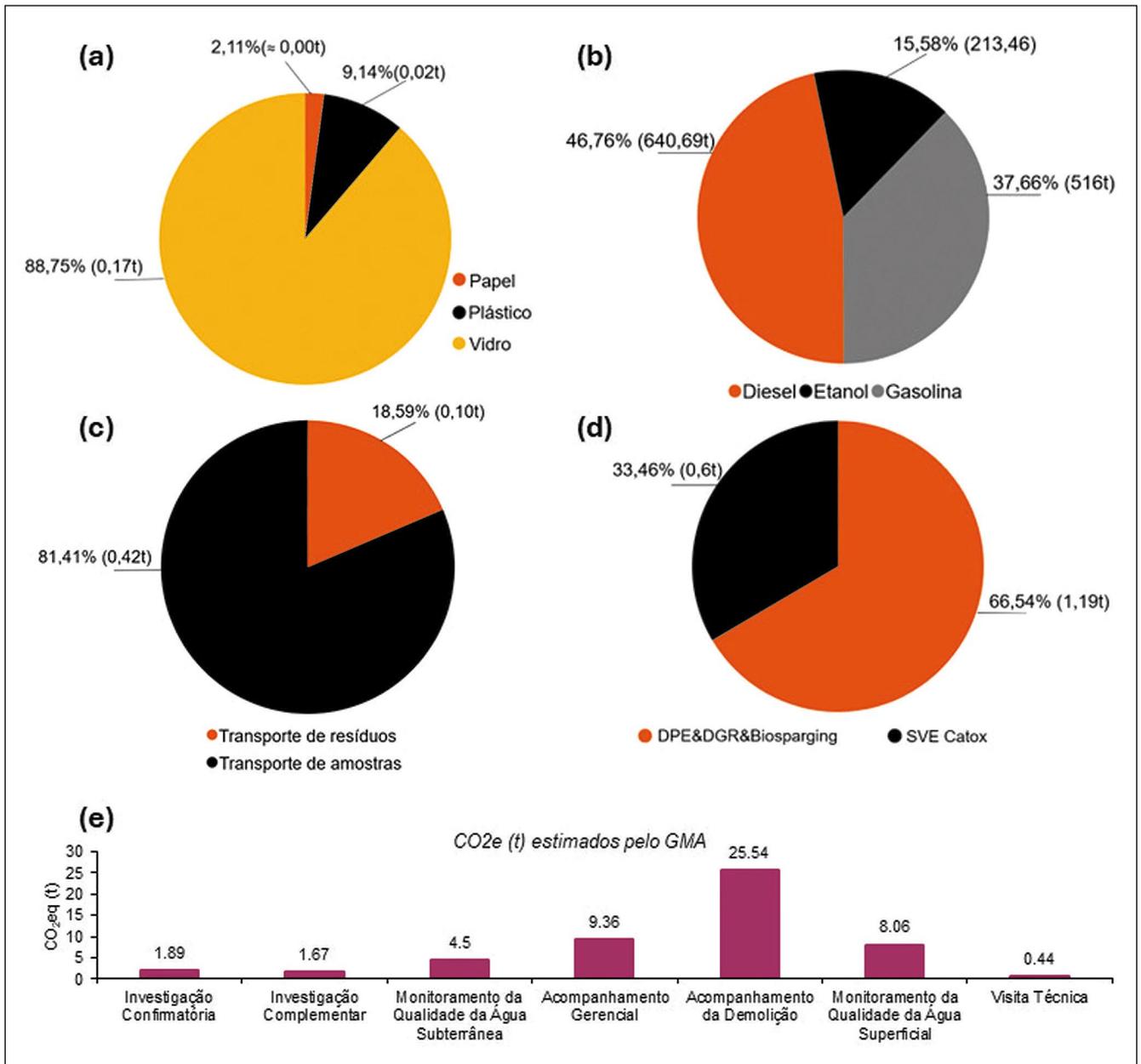


Figura 6: Exemplo de emissões (CO₂e t) reportadas para diferentes fases de projetos. (a) Ciclo de vida de insumos (Categoria 1, Escopo 3), (b) Ciclo de vida de combustíveis (Categoria 3, Escopo 3), (c) Logística de resíduos e amostras (Categoria 4, Escopo 3), (d) Sistemas operados em campo (Escopo 2), e (e) CO₂e por etapa de projeto, incluindo investigação confirmatória, investigação complementar e monitoramento ambiental, além de etapas como deslocamento de equipes para acompanhamento gerencial, acompanhamento de demolição e visitas técnicas, ligadas principalmente com a logística de pessoal e ciclo de vida de combustíveis. Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A GMA também é utilizada para simular as emissões de carbono associadas a diferentes tecnologias de tratamento de resíduos e sistemas de remediação. Em um cenário de destinação de 100 toneladas de resíduos, por exemplo, estima-se que a incineração geraria 2.577,88 toneladas de CO₂e, enquanto o coprocessamento resultaria em ape-

nas 1,79 toneladas de CO₂e. Dessa forma, a GMA orienta a escolha das técnicas com menor impacto de carbono no gerenciamento de resíduos. Como outro exemplo aplicado, a ferramenta simulou as emissões de GEE de um sistema termal proposto para um projeto de remediação, em contrapartida com as emissões que seriam geradas por dois ou-

tros sistemas propostos (DPE - *Dual Phase Extraction* e DGR - *Dynamic Groundwater Recirculation*). Os resultados mostraram que, para as condições operantes específicas, o sistema termal consumiria aproximadamente 21 vezes mais energia elétrica e emitiria cerca de 23 vezes mais CO₂e do que os sistemas DPE e DGR, o que foi considerado para a discussão em sustentabilidade do projeto.

A Tabela 1 traz os indicadores do SURF-UK e ODS da ONU reportados pela GMA nos projetos até o momento, além de algumas das principais abordagens técnicas praticadas em campo.

A análise das ações implementadas em campo e dos parâmetros calculados permitiu à GMA identificar o cumprimento de diversos indicadores ambientais estabelecidos no guia do SURF-UK. Além disso, a ferramenta desempenha um papel importante na avaliação do engajamento das equipes junto às comunidades, bem como na saúde

e segurança dos colaboradores, convertendo essas iniciativas em indicadores sociais mensuráveis atendidos pelos projetos. No aspecto econômico, a sustentabilidade financeira dos projetos é analisada a partir da adoção de práticas sustentáveis que agregam valor tanto para clientes quanto para as comunidades. Essas abordagens não apenas fortalecem a capacidade de adaptação às mudanças ambientais, mas também contribuem significativamente para metas de desenvolvimento estabelecidas pela ONU a serem atingidas até 2030, como o ODS 13, reforçando o compromisso com as melhores práticas em SRR. Além disso, ao monitorar as emissões de GEE ao longo dos projetos e avaliar boas práticas em sustentabilidade, a ferramenta GMA torna-se essencial para conectar a implementação de soluções sustentáveis à governança socioambiental e ao fortalecimento da resiliência climática em projetos de restauração ambiental.

Tabela 1– Relação entre Indicadores do Guia do SURF e ODS atendidos pelos projetos de gerenciamento de áreas contaminadas e exemplos de respectivas abordagens em SRR.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	Categoria do SuRF-UK	Abordagens em remediação resiliente e sustentável
ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima	Emissões para o ar (ENV01)	Utilização de etanol como combustível, otimização dos deslocamentos, implementação de análise de amostras <i>in situ</i> por meio de laboratório móvel, uso de telemetria, digitalização de relatórios, realização de reuniões virtuais, utilização de iluminação LED em sistemas, otimização do consumo energético e menor geração de resíduos.
ODS 2: Fome Zero e Agricultura Sustentável	Condições de solo e superfície (ENV02)	Melhoria das funções do solo por meio da recuperação da qualidade e funcionalidade dos ecossistemas terrestres.
ODS 6: Água Potável e Saneamento	Água subterrânea e água superficial (ENV03)	Aplicação de amostragem discreta para reduzir impactos ambientais e proteger recursos hídricos.
ODS 15: Vida Terrestre	Ecologia (ENV04)	Promoção de impactos positivos nos serviços ecossistêmicos, como a recuperação de sítios degradados e a preservação da fauna e flora.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	Categoria do SuRF-UK	Abordagens em remediação resiliente e sustentável
ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis	Recursos naturais e resíduos (ENV05)	Implementação da segregação e destinação ambientalmente adequada de resíduos, otimização do uso de insumos, aplicação de técnicas de amostragem mais sustentáveis, realização do tratamento de efluentes, reaproveitamento de equipamentos e insumos de sistemas, dimensionamento e otimização do sistema para maior eficiência energética, reutilização de solo limpo para preenchimento de cavas e utilização de painéis solares para suprimento energético.
ODS 3: Saúde e Bem-Estar	Saúde e Segurança Humana (SOC01)	Promoção de treinamentos de segurança, realização de diálogos diários de segurança, fornecimento de EPIs para todos os colaboradores, implementação de protocolos de segurança e adoção de tecnologias para monitoramento remoto, contribuindo para a redução de acidentes e a melhoria das condições de trabalho. Além disso, é fundamental considerar a proteção e a comunicação com os receptores externos – como comunidades vizinhas e usuários de áreas impactadas – que não estão diretamente ligados às empresas responsáveis pelas atividades de GAC, garantindo que também estejam informados e seguros durante todo o processo.
ODS 5: Igualdade de Gênero	Ética e Igualdade (SOC02)	Promoção da equidade de gênero nas equipes, incentivando a contratação e desenvolvimento profissional de mulheres em posições técnicas e gerenciais, além da implementação de políticas que garantam ambientes de trabalho inclusivos e igualitários.
ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis	Vizinhança e localidade (SOC03)	Minimização da emissão de ruídos e poeira nas áreas circunvizinhas aos sítios de remediação e otimização de processos para reduzir o impacto ambiental em áreas urbanas e comunidades próximas.
ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura	Comunidades e envolvimento comunitário (SOC04)	Adoção de comunicação efetiva e inclusiva, garantindo transparência e ampliando a participação comunitária nos projetos.
ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura	Incerteza e evidência (SOC05)	Utilização de telemetria para otimização de dados e recursos, implementação de laboratórios móveis, aplicação de inovação tecnológica e uso de ferramentas de investigação de alta resolução para aprimorar a qualidade e confiabilidade dos dados coletados.
ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Custos Econômicos Diretos e Benefícios (ECON01)	Reaproveitamento de equipamentos, otimização na coleta de dados, aumento da assertividade e agilidade na tomada de decisões e redução do desperdício de materiais, resultando em maior eficiência operacional e ampliando benefícios econômicos.
ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Custos Econômicos Indiretos e Benefícios (ECON02)	Implementação de protocolos de integridade, normas anticorrupção e diretrizes para governança corporativa, promovendo transparência, conformidade legal e uso responsável dos recursos.
ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Empregos e capital de empregabilidade (ECON03)	Priorização da contratação de fornecedores e prestadores de serviços locais, incentivando a economia regional e promovendo oportunidades de desenvolvimento profissional para a comunidade.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	Categoria do SuRF-UK	Abordagens em remediação resiliente e sustentável
ODS 8: Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Custos e Benefícios econômicos induzidos (ECON04)	Aplicação de abordagens de remediação que garantam novas funcionalidades ao sítio, possibilitando novos investimentos e desenvolvimentos específicos.
ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura	Tempo de vida útil do projeto e flexibilidade (ECON05)	Desenvolvimento de soluções resilientes e flexíveis, assegurando a qualidade e confiabilidade das evidências científicas geradas.

5. Considerações finais

Os projetos de restauração ambiental demandam uma evolução contínua para abordagens mais sustentáveis, que não apenas mitiguem os impactos ambientais, mas que também promovam benefícios integrados à saúde pública, resiliência climática e desenvolvimento socioeconômico. A incorporação de soluções tecnológicas inovadoras, como a ferramenta GMA, desempenha um papel essencial nesse processo, pois permite o monitoramento contínuo das emissões de carbono e facilita a implementação de estratégias de otimização ao longo do ciclo de vida dos projetos. Ao oferecer dados baseados em evidências, a GMA facilita ainda a tomada de decisões informadas e uma gestão mais eficiente, maximizando os ganhos em sustentabilidade.

A integração de indicadores em SRR desde o início dos projetos de restauração é essencial para garantir que as ações sejam alinhadas tanto com as metas globais de sustentabilidade, como os ODS estabelecidos pela ONU, quanto com os objetivos específicos dos órgãos reguladores. Ao integrar esses indicadores e métricas ao longo de todo o processo, torna-se viável uma avaliação

contínua dos impactos ambientais, sociais e econômicos das intervenções, possibilitando ajustes em tempo real e aprimorando a eficácia das iniciativas. Além disso, essa abordagem assegura maior precisão na quantificação dos impactos ao final do projeto, fortalecendo a conexão entre ações locais e compromissos globais e promovendo a sustentabilidade de forma holística e integrada.

Não obstante, embora as práticas de SRR tenham avançado consideravelmente nos últimos anos em nível global, é imprescindível que os órgãos reguladores brasileiros intensifiquem a implementação da sustentabilidade como um pilar fundamental nas políticas de gerenciamento de áreas contaminadas. A adoção de políticas que integrem plenamente a sustentabilidade em todas as fases dos projetos de restauração é crucial para a mitigação dos riscos ambientais e também para a promoção de benefícios duradouros às comunidades locais e aos ecossistemas impactados. Esse movimento não só contribui para a criação de um modelo de desenvolvimento mais sustentável, como também fortalece a resiliência frente aos desafios climáticos globais, promovendo um futuro mais equilibrado e positivo.

6. Referências bibliográficas

ELLIS, D.; HADLEY, P. Sustainable remediation white paper integrating sustainable principles, practices, and metrics into remediation projects.

Remediation, v. 19, n. 3, p. 5-114, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/rem.20210>.

EPA – Environmental Protection Agency. **Green remediation: incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites**. EPA/542/R-08/002, 2008.

FGV – Fundação Getúlio Vargas. **Programa Brasileiro GHG Protocol**, 2022.

HOU, D.; AL-TABBAA, A. Sustainability: A new imperative in contaminated land remediation. **Environmental Science & Policy**, v. 39, p. 25-34, 2014.

HOU, D.; O'CONNOR, D. Green and sustainable remediation: concepts, principles, and pertaining research. In: **Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater**. Butterworth-Heinemann, 2020, p. 1-17.

INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND REGULATORY COUNCIL (ITRC). **Technical/Regulatory Guidance: Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework**. [S.l.]: ITRC, 2011. Disponível em: <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/09/GSR-2.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ITRC – Interstate Technology & Regulatory Council. **Sustainable Resilient Remediation SRR-1**. Washington, D.C.: ITRC, 2021. Disponível em: <https://srr-1.itrcweb.org/importance-and-value-of-sustainable-resilient-remediation/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

KUMAR, G.; REDDY, K. R. Addressing climate change impacts and resiliency in contaminated site remediation. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 24, n. 4, p. 04020026, 2020.

MACO, B.; BARDOS, P.; COULON, F.; ERICKSON-MULANAX, E.; HANSEN, L.J.; HARCLERODE, M.; HOU, D.; MIELBRECHT, E.; WAINWRIGHT, H.M.; YASUTAKA, T.; WICK, W.D. Resilient remediation: addressing extreme weather and climate change, creating community value. **Remediation Journal**, v. 29, n. 1, p. 7-18, 2018.

O'CONNELL, S.; HOU, D. Resilience: a new consideration for environmental remediation in an era of climate change. **Remediation Journal**, v. 26, n. 1, p. 57-67, 2015.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, 2018.

PANZARELLA, F.; CAPPUYNS, V.; ABELSHAUSEN, B.; TURCANU, C. Sustainable environmental remediation: an application of the community capitals framework. **Environment, Development and Sustainability**, 2024, p. 1–23.

SURF-UK – Sustainable Remediation Forum UK. **Sustainable management practices for management of land contamination**. Claire, 2014. Disponível em: https://claire.co.uk/phocadownload/SuRF-UK%20Framework%20Annex%201%20-%20FINAL_web.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

WALKER, B. Resilience: what it is and is not. **Ecology and Society**, v. 25, n. 2, p. 11, 2020.

ZANDALINAS, S. I.; FRITSCHI, F. B.; MITTLER, R. Global warming, climate change, and environmental pollution: recipe for a multifactorial stress combination disaster. **Trends in Plant Science**, v. 26, n. 6, p. 588-599, 2021.