



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS

Gabriela Dutra Teixeira

**Valoração econômica de danos ambientais por disposições irregulares de
resíduos sólidos urbanos: método VADIR**

Florianópolis

2024

Gabriela Dutra Teixeira

**Valoração econômica de danos ambientais por disposições irregulares de
resíduos sólidos urbanos: método VADIR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Perícias Criminais Ambientais.

Orientadora: Profa. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dra.

Florianópolis

2024

Teixeira, Gabriela Dutra

Valoração econômica de danos ambientais por disposições irregulares de resíduos sólidos urbanos : método VADIR / Gabriela Dutra Teixeira ; orientadora, Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, 2024.

121 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Perícias Criminais Ambientais. 2. Valoração de Danos Ambientais. 3. Resíduos Sólidos. 4. Dano Intercorrente. 5. Gases de Efeito Estufa. I. Pinto, Cátia Regina Silva de Carvalho. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais. III. Título.

Gabriela Dutra Teixeira

Valoração econômica de danos ambientais por disposições irregulares de resíduos sólidos urbanos: método VADIR

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 09 de setembro de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Kleber Isaac Silva de Souza, Dr.
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

Profa. Marina de Medeiros Machado, Dra.
Universidade Federal de Ouro Preto

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Perícias Criminais Ambientais.



Documento assinado digitalmente
Carlos Henrique Lemos Soares
Data: 06/12/2024 14:52:44-0300
CPF: ***.353.388-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Carlos Henrique Lemos Soares, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
Catia Regina Silva de Carvalho Pinto
Data: 06/12/2024 10:47:24-0300
CPF: ***.754.829-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profa. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao Henrique, meu parceiro de vida, agradeço pelo apoio, carinho, suporte e escuta dedicados a mim desde o processo seletivo até a finalização do mestrado. Além de assumir todas as tarefas da casa e da Cusca nos últimos meses de elaboração desse trabalho, ainda participou ativamente dessa dissertação exercendo um papel essencial de coorientação. Agradeço por todas as contribuições e sugestões valiosas, sem a sua ajuda esse trabalho não teria sido concluído. Minha admiração e amor por você crescem todos os dias, é um privilégio viver a vida ao seu lado.

Aos meus pais, Lusmarina e José, meus maiores incentivadores, agradeço por todo o cuidado, amor e dedicação. Vocês são a minha base e meus maiores exemplos.

A Cusca, alegria da minha vida, agradeço por me permitir viver o amor mais puro.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais agradeço por oferecerem um ensino público, gratuito e de qualidade. Espero que um dia a oportunidade de cursar uma universidade pública seja a realidade de todos os brasileiros que assim desejarem.

À professora Cátia, por ter aceitado a orientação desta pesquisa e por responder prontamente a todos os meus pedidos, agradeço pelos direcionamentos e pela revisão deste trabalho.

Aos professores e colegas do MPPA, agradeço pela troca de experiências e aprendizados que levarei comigo durante minha trajetória profissional e acadêmica.

RESUMO

Disposições inadequadas de resíduos sólidos afetam os meios físico, biótico e antrópico influenciando negativamente a qualidade ambiental e a saúde humana. Esse tipo de disposição no solo foi proibido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos desde 2014, entretanto o prazo para extinção dessas destinações foi estendido pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico e se esgotou entre os anos de 2020 e 2024. A inobservância dessas vedações legais sujeita os infratores a sanções administrativas e penais, além da obrigatoriedade de reparação dos danos ambientais, o que torna o assunto objeto de interesse de ações civis e criminais e, portanto, objeto de perícias. Dada a necessidade de valoração de danos ambientais no âmbito dos processos legais, torna-se indispensável o desenvolvimento de metodologias adaptadas à realidade pericial que demanda rápida execução e aceitabilidade jurídica. A literatura é escassa em métodos de valoração de danos ambientais específicos para disposições inadequadas de resíduos sólidos. Dessa forma, geralmente, são utilizados métodos desenvolvidos para um amplo espectro de danos ambientais como o método elaborado pelo Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais (DEPRN) e o método do Valor Estimado de Referência para a Degradação Ambiental (VERD). Neste trabalho, foi desenvolvido o método de Valoração de Danos Ambientais por Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos Urbanos (VADIR), composto pela soma de duas parcelas que representam: os custos de controle, dado pelos gastos com manejo adequado de resíduos sólidos urbanos; e o dano intercorrente associado a emissões atmosféricas, dado a partir da modelagem de emissões de gases de efeito estufa ao longo do funcionamento do sistema de disposição de resíduos e os preços de comercialização de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa. O método VADIR foi aplicado em um estudo de caso em uma área de disposição irregular de resíduos sólidos urbanos no sul de Santa Catarina e comparado com outros cinco métodos de valoração: custo de reposição, VERD, DEPRN e de publicações de orientação técnica do Ministério Público dos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Como resultado, obteve-se uma valoração econômica do dano ambiental 9,3% inferior à resultante da aplicação do método VERD, 22,2% superior à resultante da aplicação do método sugerido pelo MPMS e mais de três vezes superior à valoração resultante dos demais métodos. O método VADIR apresenta viabilidade técnica e financeira, replicabilidade e rápida execução, utilizando-se de dados primários de fácil levantamento em perícias ambientais e dados secundários públicos e disponíveis, sem a necessidade de estimar um custo de reposição. Por ser um método principalmente quantitativo, apresenta baixa subjetividade e possui robustez para aplicação em perícias civis e criminais. A opção pelo uso de custos municipais com manejo de RSU e valores de comercialização de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa buscou conferir perenidade ao método, uma vez que permite captar oscilações nos custos adjacentes e na disposição a pagar da sociedade por esses serviços.

Palavras-chave: valoração econômica de danos ambientais; resíduos sólidos; dano intercorrente; gases de efeito estufa; custos de controle; perícia ambiental.

ABSTRACT

Inadequate disposal of solid waste affect physical, biotic and anthropic means negatively influencing environmental quality and human health. This type of land disposal was prohibited by the National Solid Waste Policy since 2014, however the deadline for extinction of these destinations was extended by the New Legal Framework of Basic Sanitation which ended between the years 2020 and 2024. Failure to comply with these legal disposals subject offenders to administrative and criminal sanctions, in addition to the obligation to repair environmental damage, which makes the subject object of interest of civil and criminal actions and, therefore, object of investigation. Given the need for valuation of environmental damage in the legal process, it becomes indispensable the development of methodologies adapted to the expert reality that demands rapid execution and legal acceptability. The literature is scarce in specific environmental damage valuation methods for inadequate solid waste disposals. Thus, methods developed for a broad spectrum of environmental damage such as DEPRN and VERD methods are generally used. In this work, the method of Valuation of Environmental Damage by Irregular Disposals of Urban Solid Waste (VADIR) was developed, composed of the sum of two plots that represent: The control costs, given by the expenses with adequate management of urban solid waste; and the intercurrent damage associated with atmospheric emissions, given from the modeling of greenhouse gas emissions throughout the operation of the waste disposal system and the marketing prices of greenhouse gas emission reduction certificates. The VADIR method was applied in a case study in an area of irregular disposal of urban solid waste in southern Santa Catarina and compared with five other methods of valuation: cost of replacement, DEPRN, VERD and technical guidance publications of the Public Prosecutor's Office of the states of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul. As a result, an economic valuation of the environmental damage was obtained 9.3% lower than the one resulting from the application of the VERD method, 22.2% higher than the resulting from the application of the method suggested by the MPMS and more than three times higher than the valuation resulting from the other methods. The VADIR method presents technical and financial viability, replicability and rapid execution, using primary data that is easy to survey in environmental expertise and public and available secondary data, without the need to estimate a replacement cost. Because it is a mainly quantitative method, it presents low subjectivity and has robustness for application in civil and criminal expertise. The option for the use of municipal costs with management of solid waste and marketing values of greenhouse gas emission reduction certificates sought to give continuity to the method, since it allows to capture fluctuations in adjacent costs and in the willingness to pay of the society for these services.

Keywords: economic valuation of environmental damage; solid waste; intercurrent damage; greenhouse gases; control costs; environmental expertise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Massa de RSU por tipo de disposição final e por região do Brasil para o ano de 2021 em milhões de toneladas por ano.....	25
Figura 2 – Massa de RSU em milhões de toneladas disposta de forma inadequada em 2021 por região do Brasil.	26
Figura 3 – Número de municípios conforme o tipo de disposição final adotada por região do Brasil para o ano de 2021.....	27
Figura 4 – Fases de decomposição de matéria orgânica em sistemas de disposição de RSU.....	31
Figura 5 – Representação do dano intercorrente quando há restauração integral (a) e quando há recuperação ambiental (b).	38
Figura 6 – Modelo conceitual da metodologia proposta.	58
Figura 7 – Esquema ilustrativo do total de gases de efeito estufa emitido pela decomposição da matéria orgânica em disposições de resíduos sólidos em função do tempo.....	66
Figura 8 – Esquema ilustrativo dos gases de efeito estufa emitidos pela decomposição da matéria orgânica em função do tempo e das emissões evitadas (cinza claro) quando ocorre a regularização do passivo ambiental.	67
Figura 9 – Esquema ilustrativo dos gases de efeito estufa emitidos pela decomposição da matéria orgânica em função do tempo a partir do ano de emissões máximas ($t'=0$).	68
Figura 10 – Comparação dos resultados da valoração econômica do dano ambiental de acordo com o método aplicado.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantificadores das variáveis intangíveis.	47
Quadro 2 – Determinação das variáveis intangíveis.	48
Quadro 3 – Descrição e qualificação dos agravos de acordo com o aspecto ambiental e tipo de dano.....	49
Quadro 4 – Valores intangíveis para o estudo de caso.....	85
Quadro 5 – Aplicação do método DEPRN ao estudo de caso.	86
Quadro 6 – Comparação qualitativa entre os diferentes métodos aplicados.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Municípios com cobrança pelo manejo de RSU por região e despesa média com manejo de RSU.	29
Tabela 2 – Intervalos dos índices de qualificação dos agravos e respectivo fator multiplicador	51
Tabela 3 – Estimativa de massa específica média de RSU conforme grau de compactação dos materiais.....	62
Tabela 4 – Valores para os parâmetros k e $L0$ conforme literatura.....	77
Tabela 5 – Fator multiplicador de acordo com o índice de qualificação dos agravos.	87
Tabela 6 – Resultados da valoração econômica do dano ambiental para a área objeto do estudo de caso.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BCB	Banco Central do Brasil
DEPRN	Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais
EEX	<i>European Energy Exchange</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LCA	Lei de Crimes Ambientais
MPMT	Ministério Público do Estado de Mato Grosso
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRAD	Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
VADIR	Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de RSU
VE	Valor de existência
VERA	Valor econômico do recurso ambiental
VERD	Valor estimado de referência para a degradação ambiental
VET	Valor econômico total
VNU	Valor de não-uso
VO	Valor de opção
VU	Valor de uso
VUD	Valor de uso direto
VUI	Valor de uso indireto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.1	Objetivos Específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	18
2.1.1	Disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos	19
2.1.2	Custos com serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos	27
2.1.3	Emissões de gases de efeito estufa.....	30
2.2	DANO AMBIENTAL	34
2.2.1	Reparação do Dano Ambiental	36
2.3	VALORAÇÃO ECONÔMICA DO DANO AMBIENTAL.....	40
2.3.1	Métodos de Valoração Ambiental.....	43
2.3.1.1	<i>Métodos de Mercado de Bens Substitutos.....</i>	<i>43</i>
2.3.1.2	<i>Método VERD – Valor Estimado de Referência para a Degradação Ambiental</i>	<i>46</i>
2.3.1.3	<i>Método DEPRN – Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais</i>	<i>48</i>
2.3.1.4	<i>Método do MPMS – Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul.....</i>	<i>51</i>
2.3.1.5	<i>Método do MPMT – Ministério Público do Estado de Mato Grosso</i>	<i>53</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DO MÉTODO DE VALORAÇÃO AMBIENTAL DE DISPOSIÇÕES IRREGULARES DE RESÍDUOS SÓLIDOS (VADIR)	57
3.1.1	Valoração dos Custos de Controle (CC).....	58
3.1.2	Valoração do Dano Intercorrente por Emissões Atmosféricas (VDIEA)	62
3.1.2.1	<i>Estimativa de volume de gases emitidos</i>	<i>63</i>
3.1.2.2	<i>Emissões totais (ET) em equivalentes a CO_{2e}.....</i>	<i>64</i>
3.1.2.3	<i>Emissões evitadas (Eev)</i>	<i>65</i>
3.1.2.4	<i>Emissões resultantes (ER).....</i>	<i>70</i>

3.1.2.5	<i>Abordagem financeira para os gases de efeito estufa emitidos</i>	71
3.1.3	Método de Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (VADIR)	72
3.2	ESTUDO DE CASO – VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS DANOS AMBIENTAIS EM UMA ÁREA DE DISPOSIÇÃO IRREGULAR DE RSU ..	73
3.2.1	Descrição da área de aplicação do estudo de caso	74
4	RESULTADOS	76
4.1	MÉTODO VADIR UTILIZANDO DADOS EMPÍRICOS PARA O BRASIL ...	76
4.2	ESTUDO DE CASO	79
4.2.1	Aplicação do Método VADIR em uma área de disposição irregular de RSU	79
4.2.1.1	<i>Valoração dos Custos de Controle (CC)</i>	79
4.2.1.2	<i>Valoração do Dano Intercorrente por Emissões Atmosféricas (VDIEA)</i>	80
4.2.1.3	<i>Cálculo do VADIR</i>	82
4.2.2	Aplicação de outros métodos de valoração ao estudo de caso	83
4.2.2.1	<i>Método do Custo de Reposição</i>	83
4.2.2.2	<i>Método VERD</i>	83
4.2.2.3	<i>Método DEPRN</i>	85
4.2.2.4	<i>Método do MPMS</i>	87
4.2.2.5	<i>Método do MPMT</i>	89
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
4.3.1	Comparação dos métodos utilizados	89
4.3.2	Quanto ao Método VADIR	95
5	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS	104
	ANEXO A – DPRN: CRITÉRIOS DE QUALIFICAÇÃO DE AGRAVOS ..	114

1 INTRODUÇÃO

O Brasil gera, anualmente, cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) (ABRELPE, 2022). Um aumento expressivo na geração de RSU tem sido observado na última década, associado ao crescimento das cidades brasileiras e ao consumo de produtos industrializados e descartáveis (BRASIL, 2022b).

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final ambientalmente adequada é definida como a distribuição de rejeito em aterros sanitários, observando normas a fim de minimizar os impactos ambientais e evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança (BRASIL, 2010b). Essa legislação proibiu expressamente a destinação de resíduos para lixões ou aterros controlados e definiu um prazo máximo de quatro anos após sua publicação em 2010 para extinção dessas formas de disposição inadequada (BRASIL, 2010b).

Segundo Zanta et al. (2003), os lixões são disposições desordenadas de resíduos sólidos a céu aberto, sem os controles ambientais sobre os resíduos e seus efluentes necessários para evitar riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Por sua vez, os aterros controlados são outra forma de disposição inadequada de resíduos, tendo como diferença em relação aos lixões alguns controles ambientais, como a cobertura periódica dos resíduos com uma camada de solo, se caracterizando como uma instalação intermediária entre os lixões e os aterros sanitários.

A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, instituiu a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) e definiu os conceitos de degradação ambiental, sendo a “alteração adversa das características do meio ambiente”, e de poluição: “degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos” (BRASIL, 1981, art. 3º, II e III). Sabendo dos impactos ambientais gerados pela disposição inadequada de resíduos sólidos pode-se considerar essa uma atividade poluidora que causa a degradação ambiental, conforme os conceitos apresentados pela Política Nacional de Meio Ambiente.

Diante disto, entende-se que a disposição inadequada de resíduos é considerada uma atividade poluidora mesmo antes da publicação da PNRS em 2010. Ainda, segundo a PNMA (1981) a responsabilidade civil por dano ambiental é objetiva, ou seja, o poluidor é obrigado a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, independentemente da existência de culpa.

De acordo com a Lei de Crimes Ambientais, considera-se crime causar “poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora” (BRASIL, 1998, art. 54). Portanto, após a publicação dessa lei o responsável por atividades de disposição inadequada de resíduos sólidos pode responder criminalmente pelos danos causados.

No entanto, depois de transcorrido o prazo para extinção de lixões e aterros controlados fixado pela PNRS, a disposição final inadequada ainda é uma realidade no Brasil, presente em todas as regiões, principalmente norte e nordeste e em municípios de pequeno porte. O Brasil ainda contabiliza mais de 2.170 unidades de disposição irregulares de RSU, entre lixões e aterros controlados, mesmo com a obrigatoriedade legal de assegurar a disposição final adequada (BRASIL, 2023a).

Ainda que existam dispositivos legais e a proibição expressa de destinação de resíduos a lixões e aterros controlados, pouco se avançou até o presente momento em termos de destinação final de resíduos sólidos, com um índice anual médio de redução da disposição inadequada de 0,72% (ABRELPE, 2020). Além disso, mesmo após o encerramento da atividade, os impactos ambientais causados pela disposição de resíduos permanecem por décadas, comprometendo o uso futuro da área (SISINNO e OLIVEIRA, 2006).

Por isso, o tema volta a ser contemplado pela Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, que instituiu o Novo Marco Legal do Saneamento Básico (BRASIL, 2010b, art. 54, alterado por BRASIL, 2020a), ao definir novos prazos, escalonados em função do número de habitantes, para que os municípios assegurem a disposição ambientalmente adequada aos resíduos sólidos, tendo como prazo limite o ano 2024.

Considerando a ilegalidade das disposições inadequadas de RSU e seus impactos negativos, essas podem ser enquadradas como infrações ambientais e, portanto, o infrator está sujeito à tríplice responsabilidade: penal, administrativa e civil, independente da obrigação de reparar os danos causados (BRASIL, 1988, art. 225, § 3º).

A reparação do dano ambiental está prevista na Constituição Federal (BRASIL, 1988), tamanha sua importância. No entanto, o restabelecimento da condição ambiental inicial é uma tarefa árdua, por vezes impossível. Contudo, a irreversibilidade de um dano ambiental não invalida a necessidade de reparação sob o ponto de vista jurídico (MIRRA, 2002). Quando a restauração ambiental não for possível, pode-se buscar sua substituição por outra solução equivalente ou subsidiária, como: recuperação, compensação in natura e compensação financeira ou indenização, respeitada essa ordem de ação (LEITE, 2003).

Dentre os meios produtores de prova na esfera judicial, a perícia ambiental se destaca como forma de apurar determinado fato relacionado a litígios ambientais. O laudo produzido pela perícia deverá apurar os ilícitos, tendo como objetivo descrever, quantificar, caracterizar e, se necessário, valorar economicamente o dano ambiental (CORDIOLI, 2013).

As metodologias de valoração econômica ambiental podem auxiliar a estabelecer um valor indenizatório nos casos de dano ambiental. Na esfera civil, a valoração do dano para compensação indenizatória pode ser usada nos casos em que for impossível a restauração ou recuperação, para compensar os lucros cessantes e como indenização por dano coletivo extrapatrimonial (ALVARENGA e BARREIRO, 2011). Na esfera penal, a valoração ambiental se mostra útil já que a perícia deverá, sempre que possível, fixar os prejuízos causados para efeitos de fiança e cálculo de multa (BRASIL, 1998).

Apesar da importância da valoração ambiental, há uma dificuldade quanto à sua aplicabilidade em processos judiciais por se tratar de um assunto complexo, com diferentes abordagens (MAGLIANO, 2013). Soma-se a isso o fato de a legislação brasileira não definir critérios e procedimentos a serem adotados quando necessária a valoração econômica ambiental (CORDIOLI, 2013). Diante disso, fica a critério do perito, mediante clara descrição do procedimento, a seleção do método mais apropriado para cada análise (FREITAS, 2011). No entanto, mesmo com as limitações metodológicas, a valoração do dano ambiental em processos judiciais é essencial, pois assume um caráter preventivo, de forma a desencorajar condutas ilícitas futuras, além do caráter repressivo (ALVARENGA e BARREIRO, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

A disposição inadequada de resíduos sólidos é uma realidade no Brasil, onde 50,74% dos municípios destinam seus resíduos sólidos urbanos (RSU) para lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2022), correspondendo a 39% da massa de RSU coletada no país, mesmo que essa prática tenha sido proibida diretamente pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b), pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (BRASIL, 2020a) e, indiretamente, pela Lei de Crimes Ambientais (BRASIL, 1998).

Como forma de assegurar o cumprimento a esses dispositivos legais, ações na esfera civil e penal têm sido propostas para garantir a responsabilização pelo dano ambiental causado por disposição inadequada de RSU. Com a finalização dos prazos estabelecidos pela Lei Federal nº 14.026, de 2020, para os municípios destinarem seus resíduos de forma adequada (BRASIL, 2020a), pode-se esperar um aumento de ações no âmbito jurídico para responsabilização daqueles que não cumprirem os prazos legais. Nesse contexto, um dos elementos disponíveis para prova material em ações judiciais é a perícia ambiental, sendo a valoração econômica do dano cada vez mais exigida em laudos periciais (CORRÊA et al., 2013).

A valoração ambiental é uma atividade complexa, com muitas incertezas e que envolve conhecimentos multidisciplinares (ALVARENGA e BARREIRO, 2011). Quando a precificação do dano ambiental está inserida no âmbito jurídico, soma-se às dificuldades o cumprimento de prazos legais e a escassez de recursos. Com isso, o desenvolvimento de pesquisas sobre métodos de valoração ambiental especialmente elaborados para área pericial torna-se relevante, de forma que esses internalizem a necessidade de rápida execução, praticidade e simplicidade requeridas (MAGLIANO, 2013).

Diante desse contexto e considerando a escassez de estudos relacionando as temáticas valoração econômica ambiental e resíduos sólidos, entende-se relevante o desenvolvimento de uma metodologia capaz de atribuir valor aos danos causados por disposições inadequadas de RSU aplicável à realidade das perícias no âmbito judicial.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa foi desenvolver um método de valoração econômica de danos ambientais para mensuração dos danos causados por disposições inadequadas de resíduos sólidos urbanos com viabilidade técnica e financeira, replicabilidade e rápida execução, de forma que possa subsidiar perícias ambientais.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- a) validar o método por meio de um estudo de caso em uma área de disposição inadequada de RSU;
- b) aplicar diferentes métodos existentes de valoração econômica de dano ambiental à área de disposição inadequada de RSU do estudo de caso;
- c) comparar e avaliar o método desenvolvido e os outros métodos de valoração econômica de danos ambientais aplicados em relação ao seu uso para casos de disposições inadequadas de RSU.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e dispõe sobre a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Trata-se de um marco regulatório para os resíduos sólidos que os reconhece como bem econômico e de valor social e propõe a visão sistêmica para sua gestão considerando variáveis ambientais, sociais e econômicas (BRASIL, 2010b, art. 6º, III e VIII). Além disso, internaliza os princípios da prevenção e da precaução, do poluidor-pagador e protetor-recebedor, da razoabilidade e proporcionalidade (BRASIL, 2010b, art. 6º, I, II e XI).

A PNRS define resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010b, art. 3º, XVI)

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto à periculosidade, podendo ser: perigosos - classe I; não perigosos não-inertes - classe II A; e não perigosos inertes - classe II B. Os resíduos perigosos podem ser assim considerados devido a sua fonte, por conterem substâncias que conferem periculosidade aos resíduos ou por possuírem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Os resíduos não perigosos são aqueles não enquadrados como classe I, podendo ser: inertes - classe II B, caso não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores às aquelas determinadas pela NBR 10.004 (ABNT, 2004); ou não-inertes, classe II A, quando não se enquadram como resíduos classe I ou classe II B.

A PNRS também classifica os resíduos sólidos quanto à origem, podendo ser divididos em onze categorias de acordo com a atividade geradora (BRASIL, 2010b, art. 13), sendo elas:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

O manejo de resíduos sólidos urbanos é o conjunto de procedimentos inerente a todas as etapas do gerenciamento dessa tipologia de resíduos e inclui:

A coleta, o transbordo e transporte, a triagem, o reaproveitamento, o reuso, a reciclagem, o tratamento e a disposição final de resíduos sólidos urbanos; a varrição, a limpeza, a capina e poda de árvores em vias e logradouros públicos e outros serviços pertinentes à limpeza urbana, exceto quando referentes aos resíduos cujo manejo seja de responsabilidade do gerador (BRASIL, 2023c).

Quando todas as possibilidades de tratamento e recuperação dos resíduos sólidos são esgotadas e a única possibilidade viável é a disposição final ambientalmente adequada, esses são definidos como rejeitos (BRASIL, 2010b, art. 3º, XV).

2.1.1 Disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos

O Decreto Federal nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, regulamentou a PNRS e determinou que a gestão dos resíduos sólidos deve observar a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, nessa ordem de prioridade (BRASIL, 2022a,

art. 30). A destinação final adequada dos resíduos sólidos deve observar normas operacionais, evitar danos ou riscos à saúde e segurança, além de minimizar os impactos ambientais negativos. São formas de destinação final: a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético e a disposição final (BRASIL, 2010b, art. 3º, VII). A disposição final deveria ser utilizada apenas quando as outras formas de destinação não são possíveis, ou seja, é uma solução para distribuição ordenada de rejeitos (BRASIL, 2010b, art. 3º, VIII).

O aterro sanitário é a forma de destinação ambientalmente adequada mais utilizada no Brasil e a única forma de disposição final admitida pela PNRS. De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), trata-se de uma instalação para disposição de RSU no solo na forma de camadas que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos na menor área e volume possíveis, cobrindo-os com uma camada de terra, sem causar danos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais. O projeto do aterro sanitário deve atender critérios previstos na NBR 13.896 (ABNT, 1997) quanto à localização, ao zoneamento ambiental e urbano, às características topográficas e geológicas, à segregação e análise de resíduos, ao monitoramento, à inspeção e ao encerramento. Ainda, devem estar previstos diversos controles ambientais, como: monitoramento das águas subterrâneas, impermeabilização de base, sistema de drenagem das águas superficiais, drenagem e tratamento do líquido percolado, captação e tratamento das emissões gasosas (ABNT, 1992, 1997).

Outras duas formas de disposição final de RSU existentes no Brasil são os aterros controlados e os lixões, ambos em desacordo com a legislação ambiental brasileira e, portanto, considerados disposições irregulares de RSU. No aterro controlado existe algum controle ambiental, seja sobre os resíduos ou sobre seus efluentes, sendo o mais comum a cobertura periódica dos resíduos com uma camada de solo com o objetivo de reduzir a proliferação de vetores de doenças (ZANTA et al., 2003). Pode-se dizer que o aterro controlado é um estágio intermediário entre o lixão e o aterro sanitário. Os lixões são locais onde a disposição dos resíduos de diferentes origens e naturezas são dispostos diretamente no solo sem qualquer controle socioambiental sobre essa área e sobre os efluentes líquidos e gasosos gerados (BRASIL, 2023c), além de ocorrerem a céu aberto, de forma desordenada, sem compactação ou cobertura (ZANTA et al., 2003).

Os impactos resultantes das disposições inadequadas de resíduos sólidos afetam os meios físico, biótico e antrópico influenciando negativamente a qualidade

ambiental e a saúde humana em áreas sob sua influência (SISINNO e MOREIRA, 1996). Essa forma de disposição pode causar poluição atmosférica por gases tóxicos e de efeito estufa, poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado gerado na decomposição da matéria orgânica, redução da biota do solo, proliferação de vetores transmissores de doenças, incêndios, desvalorização das propriedades do entorno, mau cheiro e poluição visual (SISINNO e MOREIRA, 1996; MUCELIN e BELLINI, 2008). Esses impactos ocorrem enquanto lixões e aterros controlados estão em operação, mas também após a sua desativação, uma vez que a matéria orgânica continua se degradando, comprometendo o uso futuro da área (GOUVEIA, 2012).

A PNRS estabelece que a União deverá elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos com horizonte de planejamento de vinte anos. Entre os conteúdos obrigatórios do Plano destaca-se: a proposição de metas para eliminação e recuperação de lixões, as metas para aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final e as normas para disposição final de rejeitos e, quando couber, de resíduos (BRASIL, 2010b, art. 15).

A previsão de zonas favoráveis para a localização de unidades de tratamento de resíduos sólidos ou de disposição final de rejeito e as áreas degradadas pela disposição inadequada de resíduos sólidos a serem recuperadas são conteúdos obrigatórios dos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b, art. 17, XI). Nesse mesmo sentido, os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos devem identificar os passivos e áreas contaminadas relacionados aos resíduos sólidos e as respectivas medidas saneadoras (BRASIL, 2010b, art. 19, XVIII).

De forma indireta, a disposição final de resíduos sólidos de forma inadequada já era vedada pela Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, também conhecida como Lei de Crimes Ambientais (LCA). É considerado infração penal “causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”, sujeitando o infrator à pena de reclusão de um a quatro e anos, e multa, caso seja considerado crime doloso, e detenção de seis meses a um ano, e multa, nos casos de crimes culposos (BRASIL 1998, art. 54).

Ainda, se a poluição “ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos”, o infrator está sujeito à pena de reclusão de

um a cinco anos (BRASIL 1998, art. 54, V). As penas dos crimes dolosos citados anteriormente ainda serão aumentadas de um sexto a um terço, se resultar em dano irreversível à flora ou ao meio ambiente em geral (BRASIL 1998, art. 58, I).

A PNRS proibiu diretamente o lançamento de resíduos sólidos ou rejeitos *in natura* a céu aberto, com exceção dos resíduos de mineração, e definiu um prazo máximo de quatro anos após a sua publicação para extinção dessa forma de disposição inadequada, esse prazo se encerrou em 2014 (BRASIL, 2010b, art. 47,II).

Transcorridos seis anos do prazo final definido pela PNRS para que os resíduos sólidos deixassem de ser encaminhados para formas de disposição irregular, a Lei Federal nº 14.026, de 2020, foi publicada. Essa Lei atualizou o marco legal do saneamento básico e alterou a Lei Federal nº 12.305, de 2010, fixando novos prazos para os Municípios implantarem a disposição final ambientalmente adequada dos seus rejeitos. O prazo final para adequação dos Municípios varia entre 2020 e 2024 e beneficia aqueles que elaboraram Plano Intermunicipal de Resíduos Sólidos ou Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, que disponham de mecanismos de cobrança e que possuam menor população, conforme dispõe o art. 54 (BRASIL, 2010b, alterado por BRASIL, 2020a):

Art. 54. A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada até 31 de dezembro de 2020, exceto para os Municípios que até essa data tenham elaborado plano intermunicipal de resíduos sólidos ou plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e que disponham de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira, nos termos do art. 29 da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 , para os quais ficam definidos os seguintes prazos:

I - até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;

II - até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes;

III - até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e

IV - até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

A inobservância dos preceitos previstos na PNRS, seja por ação ou omissão de pessoas físicas ou jurídicas, pode sujeitar os infratores às sanções previstas na Lei nº 9.605, de 1998, além da obrigação de reparar os danos causados (BRASIL, 2010b, art. 51). De acordo com Wessler (2022), em uma análise dos autos de infração

ambiental (AIAs) relacionados à poluição lavrados no estado de Santa Catarina dos anos de 2014 a 2019, a maior parte dos AIAs com fatos tipificados no art. 62 do Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008 (BRASIL, 2008), são relacionados com disposições irregulares de resíduos sólidos.

A dimensão do problema da disposição inadequada de resíduos sólidos pode ser melhor visualizada ao analisar os dados relacionados à gestão de resíduos no Brasil divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Desde 1995, o SNIS era o principal sistema que reunia informações sobre a prestação de serviço dos quatro componentes do saneamento básico (BRASIL, 2024a). A partir de 2024, essa atribuição foi transferida para o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA).

O SINISA, criado pela Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, tem como principais objetivos a coleta e sistematização de dados relativos às condições da prestação dos serviços públicos de saneamento básico, disponibilização de estatísticas e informações relevantes para a caracterização da demanda e da oferta de serviços públicos de saneamento básico, além de permitir e facilitar o monitoramento e avaliação da eficiência e da eficácia da prestação desses serviços (BRASIL, 2007, art. 53, I, II e III). Conforme o Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010, que regulamenta essa Lei, o SINISA ainda deverá ser implementado de forma articulada ao Sistema Nacional de Informações em Recursos Hídricos - SNIRH, e ao Sistema Nacional de Informações em Meio Ambiente - SINIMA (BRASIL, 2010a, art. 66, § 2º).

O módulo de resíduos sólidos do SNIS coleta dados da prestação de serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos junto aos municípios e prestadores de serviços de saneamento básico anualmente desde 2002. Os dados obtidos através do preenchimento de formulários eletrônicos são consolidados e sua análise é apresentada nos Diagnósticos Temáticos e Painéis de Informação, cujo acesso é público e gratuito (BRASIL, 2023a).

O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) é um instrumento da PNRS articulado com o SINISA e reúne as informações sobre resíduos sólidos disponibilizadas pelos Estados, Distrito Federal e Municípios. Esses dados são publicamente disponibilizados e possibilitam a avaliação dos resultados e cumprimento das metas dos planos de gestão de resíduos sólidos, além de serem utilizados pelo próprio SINIR para promover o diagnóstico da situação

dos resíduos sólidos no Brasil e disponibilizar estatísticas e indicadores sobre esse tema.

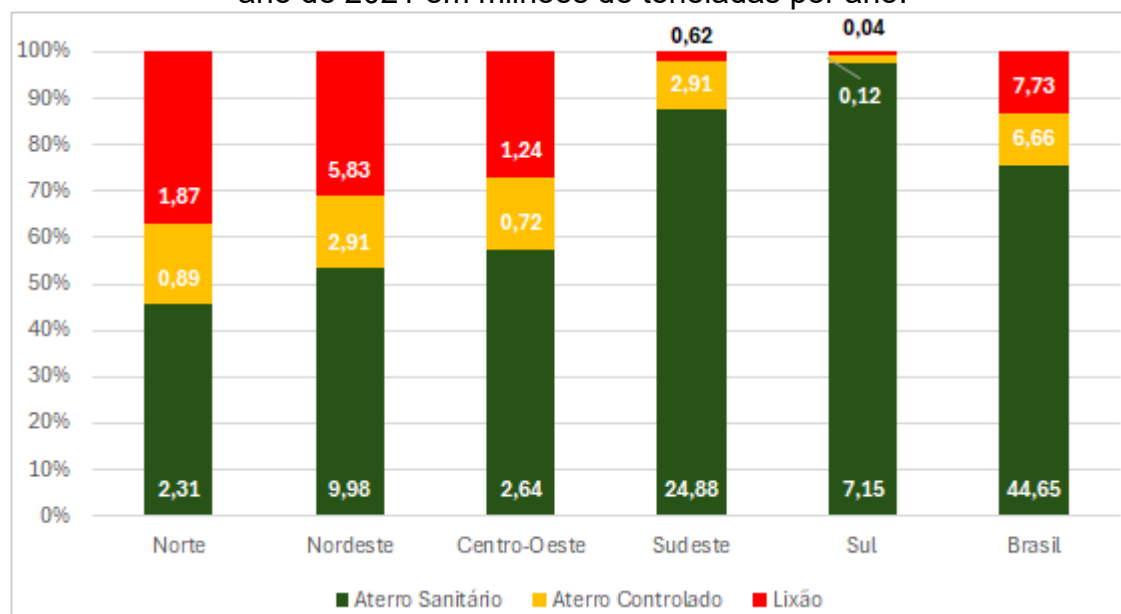
De acordo com dados do SNIS referentes a 2021, a cobertura de coleta de resíduos domiciliares (RDO) atendeu 98,3% da população urbana e 89,9% da população total, correspondendo à soma da população urbana e rural, nos 4.900 municípios da amostra. A estimativa é que 22 milhões de habitantes não tiveram acesso à coleta de RDO, sendo 3 milhões residentes em áreas urbanas e 19 milhões em áreas rurais (BRASIL, 2022b).

Segundo dados do SNIS, a massa de RSU coletada no Brasil foi estimada em 65,63 milhões de toneladas em 2021. Desse montante, apenas 1,12 milhões de toneladas de resíduos secos e 0,40 milhões de toneladas de resíduos orgânicos foram recuperados por unidades de triagem e de compostagem, respectivamente. O restante, 64,11 milhões de toneladas, foram enviadas para unidades de disposição final no solo, sendo 73,2% desse montante para aterros sanitários, 15% para lixões e 11,8% para aterros controlados (BRASIL, 2022b).

Das 5.530 unidades de processamento de RSU em operação no Brasil em 2021, 2.836 são unidades de disposição no solo, sendo: 1.572 lixões, 669 aterros sanitários e 595 aterros controlados (BRASIL, 2022b). Apesar das unidades de disposição inadequadas de RSU serem mais numerosas, representando 76,41% do total de unidades de disposição no solo em operação, quando avaliado em termos de massa disposta, 73,2% da massa de RSU coletada é destinada para aterros sanitários. Essa inversão pode ser justificada em função da maior parte dos municípios de grande porte e, portanto, maiores geradores de RSU, destinarem corretamente seus resíduos.

A situação da disposição final de resíduos varia bruscamente em termos regionais. Enquanto na região Sul e Sudeste, 2,2% e 12,4% da massa de RSU é disposta de maneira inadequada, respectivamente, na região norte a disposição irregular alcança 54,5% da massa de RSU, realidade semelhante às regiões nordeste e centro-oeste (BRASIL, 2022b), conforme pode ser observado no gráfico da Figura 1.

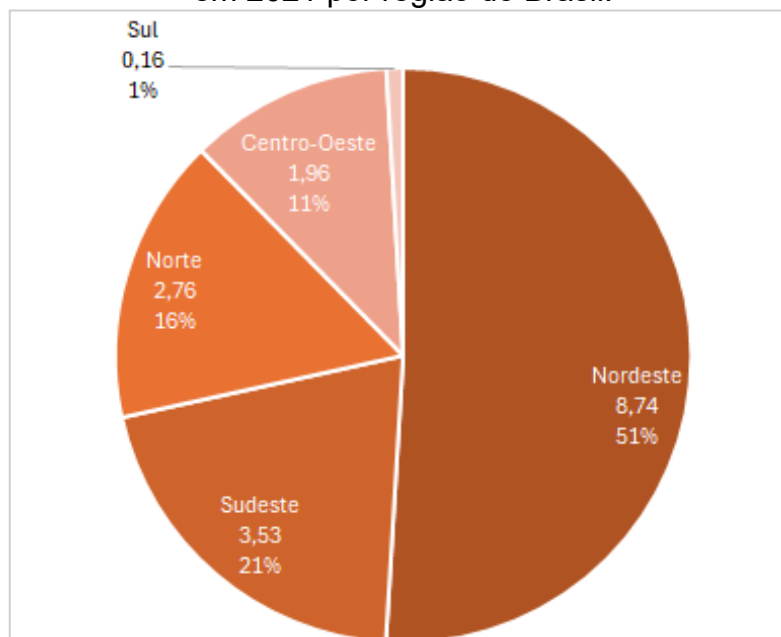
Figura 1 – Massa de RSU por tipo de disposição final e por região do Brasil para o ano de 2021 em milhões de toneladas por ano.



Fonte: adaptado de SNIS (BRASIL, 2022b).

Em valores absolutos a região nordeste é a que dispõe a maior quantidade de RSU de forma inadequada, alcançando surpreendentes 8,74 milhões de toneladas, ou seja, 51 % da massa total de RSU disposta inadequadamente no Brasil (BRASIL, 2022b). Ainda, é importante destacar que apesar da região sudeste apresentar percentualmente o segundo melhor índice de disposições finais adequadas, quando avaliado em termos de massa de RSU disposta irregularmente é a região que tem a segunda maior contribuição, conforme demonstrado no gráfico da Figura 2.

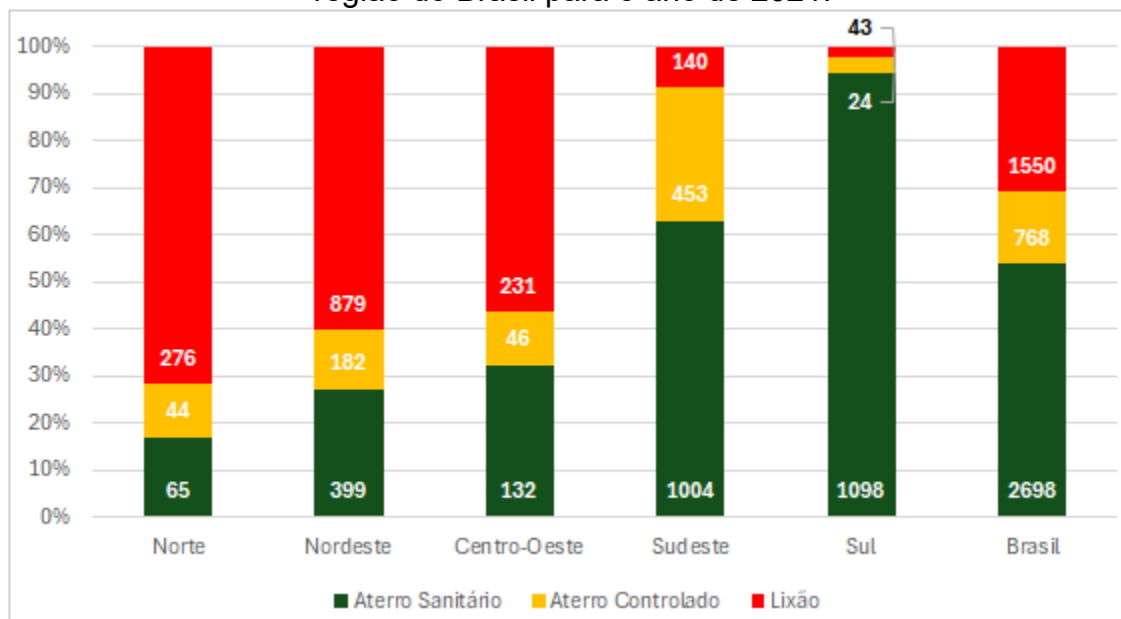
Figura 2 – Massa de RSU em milhões de toneladas disposta de forma inadequada em 2021 por região do Brasil.



Fonte: adaptado de SNIS (BRASIL, 2022b).

Em relação aos municípios, em 2021, 2.698 destinaram seus resíduos sólidos urbanos para aterros sanitários, 1.550 para lixões e 768 para aterros controlados (BRASIL, 2022b). Conforme demonstrado pela Figura 3, a maior parte dos municípios que dispõe seus resíduos de forma irregular se concentra nas regiões norte, nordeste e centro-oeste, enquanto no sul e sudeste do país o oposto acontece, com destaque para Santa Catarina, onde a disposição irregular foi praticamente extinta nos seus municípios.

Figura 3 – Número de municípios conforme o tipo de disposição final adotada por região do Brasil para o ano de 2021.



Fonte: adaptado de SNIS (BRASIL, 2022b).

Conforme demonstrado, mesmo após a proibição legal das disposições inadequadas de RSU, esse tipo de destinação ainda é numerosa e existe em todas as regiões do Brasil. Ainda que o número de unidades de disposição inadequada em operação ao longo dos anos diminua, cresce o número de unidades que deixaram de receber resíduos, mas não necessariamente passaram pelo processo de desativação e recuperação da área degradada. Isso alerta para a necessidade de estratégias e programas voltados para a recuperação desse passivo ambiental, incluindo a responsabilização civil e penal quando cabível.

2.1.2 Custos com serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos

Nem todo município que destina seus resíduos para disposição final possui esse tipo de unidade em seu território. Em 2021, o compartilhamento de unidades de processamento ocorreu entre 2.740 municípios brasileiros, podendo ter recebido resíduos sólidos de outros municípios ou destinado seus resíduos sólidos a unidades em outros municípios (BRASIL, 2022b). A adoção de consórcio ou de outras formas de cooperação entre entes federados é incentivada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b, art. 8º, XIX). Além de diminuir os custos e

viabilizarem a prestação dos serviços públicos que envolvam resíduos sólidos, os Municípios que optem por soluções consorciadas intermunicipais para a gestão de resíduos sólidos têm prioridade na obtenção dos incentivos instituídos pelo Governo Federal (BRASIL, 2010b, art. 45, *caput*).

O consórcio intermunicipal é a forma de associação mais comum no desenvolvimento de soluções de compartilhamento relacionadas à gestão dos RSU, inclusive, na implantação e operação de instalações mais complexas de manejo, como: aterros sanitários, unidades de transbordo e incineradores (BRASIL, 2023c). Nesses consórcios, dois ou mais municípios com metas comuns previamente estabelecidas aportam recursos financeiros, humanos e materiais proporcionais à sua participação nos benefícios comum.

Um dos objetivos da PNRS é a sustentabilidade operacional e financeira dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos através da recuperação dos seus custos a partir da adoção de mecanismos gerenciais e de cobrança. O Novo Marco Legal do Saneamento também determina a cobrança pelo uso dos serviços públicos de saneamento básico, incluindo os de limpeza urbana (BRASIL, 2007, art. 29, alterado por BRASIL, 2020a):

Os serviços públicos de saneamento básico terão a sustentabilidade econômico-financeira assegurada por meio de remuneração pela cobrança dos serviços, e, quando necessário, por outras formas adicionais, como subsídios ou subvenções, vedada a cobrança em duplicidade de custos administrativos ou gerenciais a serem pagos pelo usuário, nos seguintes serviços:

(...)

II - de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, na forma de taxas, tarifas e outros preços públicos, conforme o regime de prestação do serviço ou das suas atividades;

A atualização do marco legal do saneamento também determina que a não proposição de instrumento de cobrança pelo titular do serviço até julho de 2021 configura renúncia de receita (BRASIL, 2007, art. 35, § 2º, alterado por BRASIL, 2020a) e exige a comprovação de atendimento dos critérios estabelecidos pela Lei Complementar nº 101, de 2000 (BRASIL, 2000a, art. 14º), para concessão de benefícios que decorra de renúncia, sujeitando o titular do serviço às penalidades previstas nessa Lei em caso de descumprimento.

Entre os municípios respondentes ao SNIS em 2022, 2.226 (44%) cobraram por serviços de coleta, transbordo, tratamento e disposição final dos resíduos, sendo

164 municípios a mais do que no ano anterior. Esse aumento pode estar relacionado com a atualização do marco legal do saneamento básico quanto à renúncia de receita nos casos de não proposição de instrumentos de cobrança pelo titular do serviço até julho de 2021 (BRASIL, 2023a).

Em 2021, a cobrança por serviços de manejo de RSU foi feita por 2.062 municípios dos 4.900 que responderam ao SNIS nesse ano. A diferença regional é acentuada, enquanto na região sul do Brasil 85,8% dos municípios instituíram algum tipo de cobrança, na região nordeste apenas 8,5% aplicaram esse instrumento (BRASIL, 2022b). O indicador da autossuficiência financeira calculado para os 2.062 municípios com dados disponíveis demonstra que a receita arrecadada cobre, em média, 55% das despesas totais com manejo adequado dos resíduos. Com isso, o custo dos serviços relacionados a resíduos sólidos no meio urbano em 2021 foi estimado em R\$ 147,44 por habitante por ano (BRASIL, 2022b). Esse valor apresenta variações regionais, sendo o menor valor na região Norte e a maior na região Sudeste, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Municípios com cobrança pelo manejo de RSU por região e despesa média com manejo de RSU.

Região	Municípios que cobram pelo manejo de RSU	Despesa média com o manejo de RSU (R\$/habitante.ano)
Centro-Oeste	30,4% (123 municípios)	132,26
Nordeste	8,5% (122 municípios)	142,19
Norte	19,4% (74 municípios)	115,68
Sudeste	49,5% (767 municípios)	164,05
Sul	85,8% (976 municípios)	127,13
Brasil	37,0% (2.062 municípios)	147,44

Fonte: adaptado de SNIS (BRASIL, 2022b).

A existência de mecanismos de cobrança que garantam a sustentabilidade econômico-financeira da gestão de resíduos é um dos critérios para que os municípios possam se beneficiar da extensão de prazo para assegurar a disposição final adequada prevista pelo Novo Marco Legal do Saneamento. Nesse sentido, há uma relação entre a gestão adequada de RSU e a cobrança pela prestação dos serviços,

já que nos municípios onde foram implantados sistemas de recuperação de custos os índices de destinação inadequada dos RSU são menores (BRASIL, 2022b).

2.1.3 Emissões de gases de efeito estufa

Os resíduos dispostos em lixões, aterros controlados ou em aterros sanitários têm sua matéria orgânica decomposta a partir da atividade microbiológica. Essa decomposição apresenta como subprodutos componentes gasosos, tipicamente gás carbônico e metano, e componentes líquidos, conhecidos como chorume.

Obras de engenharia como aterro sanitários apresentam estruturas com a finalidade de captar e tratar tais subprodutos, mitigando os impactos negativos ao meio ambiente. Nessas obras são instalados drenos que visam conduzir o gás gerado a queimadores (“*flares*”), responsáveis pela oxidação do metano e liberação de gás carbônico; enquanto para os subprodutos líquidos são realizadas obras de impermeabilização do solo onde o resíduo é disposto e a condução dos efluentes líquidos a sistemas de tratamento de efluentes (BRASIL, 2023c).

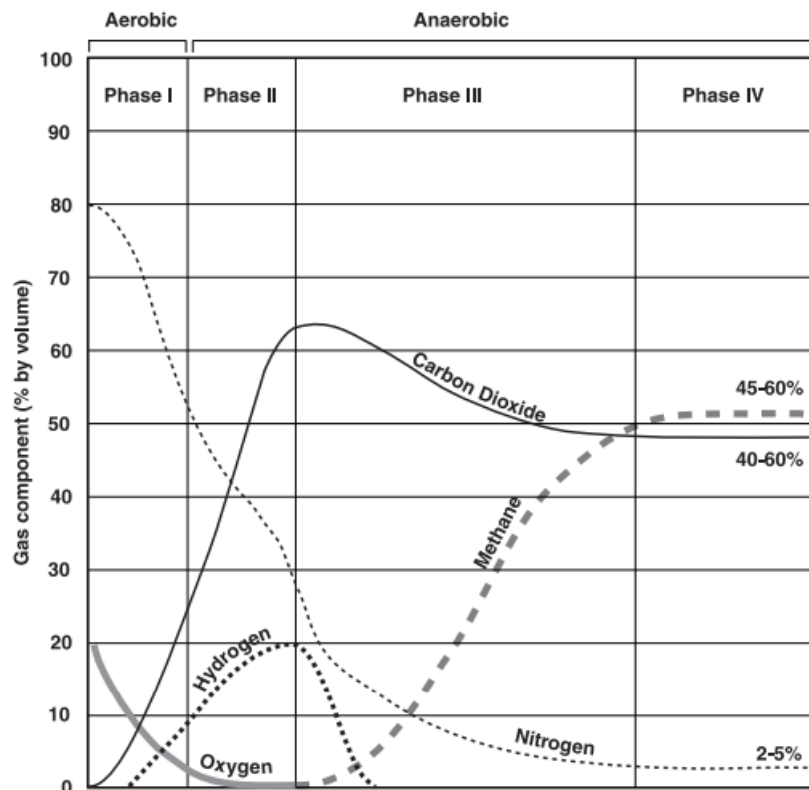
Por outro lado, quando os resíduos são dispostos em lixões e outras formas de disposições irregulares, comumente não são previstas tais medidas mitigadoras. Dessa forma, a decomposição da matéria orgânica ocorre naturalmente e seus subprodutos gasosos são lançados diretamente na atmosfera, enquanto seus subprodutos líquidos são percolados pelo solo, eventualmente atingindo corpos hídricos.

Com relação à poluição atmosférica, a decomposição da matéria orgânica pode ocorrer de forma aeróbia, quando ocorre majoritariamente a emissão de gás carbônico; ou de forma anaeróbia, quando ocorre majoritariamente a liberação de metano. A decomposição aeróbia da matéria orgânica em disposições de resíduos ocorre principalmente quando há disponibilidade de oxigênio, portanto tende a ocorrer em camadas mais próximas à superfície e quando não há muita compactação. Durante a decomposição aeróbia ocorre grande parte de liberação de gás carbônico (BERGER et al., 2001).

À medida que a disponibilidade de oxigênio é reduzida, iniciam-se as fases anaeróbias de decomposição da matéria orgânica. Inicialmente com a formação de um ambiente ácido, com a solubilização de nutrientes e liberação de gás carbônico; seguindo para um ambiente neutro em que os ácidos são consumidos por bactérias

anaeróbias metanogênicas e é iniciada a liberação de metano, conforme demonstrado na Figura 4 (BERGER et al., 2001).

Figura 4 – Fases de decomposição de matéria orgânica em sistemas de disposição de RSU.



Fonte: EPA (1997 apud BERGER, 2001).

A composição de gases produzidos a partir da decomposição da matéria orgânica em depósitos de resíduos sólidos urbanos apresenta uma proporção entre 45% e 60% de metano e entre 40% e 60% de gás carbônico, seguidos de outros gases em menores proporções como nitrogênio, oxigênio e monóxido de carbono, conforme (SILVA, 2017).

De acordo com Berger et al. (2001), a proporção de gases produzidos depende de fatores como: (i) a composição dos resíduos, pois quanto maior a concentração de matéria orgânica no resíduo depositado, maior será a concentração de metano e gás carbônico entre os gases liberados pela decomposição dos resíduos. Por outro lado, quanto menor a proporção de matéria orgânica no resíduo depositado, maior será a presença de outros gases em detrimento de metano e gás carbônico; (ii) a profundidade da coluna de resíduos, pois quanto maior, mais propícia a formação de ambiente anaeróbico e maior a proporção de metano em relação aos demais gases;

(iii) a temperatura, visto que uma maior temperatura ambiente propicia maior atividade bacteriana, aumentando a taxa de conversão de matéria orgânica em gases.

É possível notar que os principais gases gerados a partir da decomposição da matéria orgânica em depósitos de resíduos consistem em dois dos principais gases de efeito estufa (CETESB, 2024). Dentre eles, o metano tem especial relevância, uma vez que seu potencial de aquecimento global (GWP) é 28 vezes superior ao do gás carbônico (IPCC, 2014).

As primeiras observações em relação à capacidade de gases em reter calor remontam à primeira metade do século XIX, com Joseph Fourier e, posteriormente, John Tyndall. Este ainda observou em laboratório que alguns gases constituintes da atmosfera apresentavam a capacidade de reter o calor de raios solares, como gás carbônico (CO₂) e vapor d'água (WEART, 2008). A partir da década de 1950, entre grupos científicos internacionais responsáveis por estudos de previsões de tempo, começou a emergir a preocupação com a possibilidade de que o clima mundial passasse por um aquecimento. Essas preocupações somadas com negociações internacionais culminaram na criação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) em 1988, pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e pela Organização Meteorológica Mundial (BRASIL, 2021a; WEART, 2008).

A temática ambiental ganhou maior notoriedade internacional a partir de 1992, com o evento da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, que ficou conhecida como Eco-92 ou Rio-92. Como resultado da Conferência, foi assinado por 179 países um programa de ação, denominado Agenda 21, em cujo Capítulo 9 destacavam-se aspectos relativos à proteção da atmosfera, de forma mais específica, da camada de ozônio. No documento já eram mencionados termos como “*gases de efeito estufa*”, “*mudança do clima*” e “*variabilidade climática*”, como se destaca a seguir:

Cooperar na pesquisa voltada para o desenvolvimento de metodologias e identificar níveis fronteiriços de poluentes atmosféricos, bem como níveis atmosféricos de concentração de gases de efeito estufa, que provocariam perigosas interferências antrópicas no sistema climático e no meio ambiente como um todo, bem como os ritmos de mudanças que não permitiram aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente (CNUMAD, 1992).

A Rio-92 ainda foi responsável por trazer o assunto à atenção mundial e abrir espaço para novas discussões sobre o tema, como o Protocolo de Kyoto, assinado durante a 3ª Conferência das Partes (COP3) da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 1997 (AGÊNCIA SENADO, 2024). O Protocolo de Kyoto

consistiu no primeiro tratado internacional com o objetivo de controle de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, de forma que os países desenvolvidos reduziram em pelo menos 5,2% suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990.

O Protocolo de Kyoto ainda trouxe como contribuição o estabelecimento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), marco regulatório que permite a precificação dos gases regulados pelo Protocolo e a transação de certificados de redução entre as partes signatárias. Dessa forma, um país que tenha emissões superiores às suas metas pode adquirir créditos certificados de reduções de emissões de outros países (FRANGETTO, VEIGA e LUEDEMANN, 2018). Dentre os critérios exigidos para a certificação de um projeto MDL, há a necessidade de que o projeto se enquadre em um rol de setores que envolvem: geração de energia, transporte, gestão e tratamento de resíduos, agricultura, entre outros.

Nas últimas três décadas vem sendo discutida ao longo da Conferência das Partes uma série de modificações nos mecanismos de comercialização de créditos certificados de reduções de emissões e de formas de certificação e controle de tais créditos. Como marco importante, a partir da COP21 (conhecida como Acordo de Paris, de 2015) tem sido construída uma reformulação dos MDL para Mecanismos de Desenvolvimento Sustentável (MDS) que permitiriam a adoção de metas voluntárias entre os países, flexibilizariam as negociações de certificados de reduções de emissões, possibilitando a participação de países não signatários e de organizações privadas. Paralelamente, surgem outros mecanismos de comercialização de créditos de carbono em condições diferentes das previstas nos tratados internacionais (FRANGETTO, VEIGA e LUEDEMANN, 2018; LOUREIRO, 2019).

Em 2024 os mercados de comercialização de créditos de carbono ainda não são completamente estabelecidos e padronizados. Na União Europeia, onde estão concentrados os maiores volumes de comercialização de créditos de carbono (SEBRAE, 2023), foram comercializados 523,3 milhões de créditos de carbono em 2023, transacionando cerca de 40 bilhões de euros naquele ano (EEX, 2024a). Nessas negociações o preço do crédito de carbono é definido por leilão.

2.2 DANO AMBIENTAL

A Lei Federal 6.938, de 1981, definiu meio ambiente como o “conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas” (BRASIL, 1981, art. 3º, I). A Constituição Federal de 1988 recepcionou diversos conceitos previstos nessa Lei, passando a considerar o meio ambiente ecologicamente equilibrado um direito fundamental intergeracional, cuja preservação é dever do Poder Público e da coletividade (BRASIL, 1988, art. 225, *caput*). Trata-se, portanto, de um bem de uso comum, indisponível, dada sua titularidade difusa, e inalienável.

Importantes princípios norteadores do direito foram inseridos na legislação ambiental brasileira. Os princípios da precaução e da prevenção estão previstos de forma implícita na Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988, art. 225, §1º, IV e V) e na Política Nacional de Meio Ambiente (BRASIL, 1981, art. 9º, III, IV e V) atuando na antecipação ao dano ambiental e na responsabilização *ex ante* (STEIGLEDER, 2003).

O princípio da precaução preconiza que, diante da possibilidade de ocorrência de danos ambientais, a incerteza científica não pode ser usada como razão para realização de ações cujas consequências são desconhecidas (STEIGLEDER, 2003). Esse princípio “alicerça preferência da preservação à restauração” (BRASIL, 2021c,d) e a previsão da inversão do ônus da prova em ações de degradação ambiental (BRASIL, 2018a), ficando sob a responsabilidade do poluidor demonstrar a ausência de riscos ou a possibilidade de mitigação dos danos da sua atividade (SOUZA, 2021). Diferentemente, o princípio da prevenção se refere a riscos já conhecidos de uma determinada atividade e, portanto, atua no sentido de inibir o risco do dano que essa atividade possa vir a produzir (STEIGLEDER, 2003).

Ambos os princípios são os alicerces do licenciamento ambiental e da exigência de estudos que levantem os riscos de uma determinada atividade, além de prever medidas preventivas, mitigadoras e compensatórias dos impactos socioambientais dessa atividade (STEIGLER, 2003).

Os princípios da prevenção e da precaução se destinam a evitar o dano ambiental e, quando não adotados, surge a necessidade de reparação. O conceito de dano ambiental não é definido pela legislação brasileira, tampouco é unânime na doutrina. Segundo Leite (1999):

O dano ambiental constitui uma expressão ambivalente, que designa, certas vezes, alterações nocivas ao meio ambiente e outras, ainda, os efeitos que tal alteração provoca na saúde das pessoas e em seus interesses. Dano ambiental significa, em uma primeira acepção, uma alteração indesejável ao conjunto de elementos chamados meio ambiente (...); seria, assim, a lesão ao direito fundamental que todos têm de gozar e aproveitar do meio ambiente apropriado. Contudo, em sua segunda conceituação, dano ambiental engloba os efeitos que esta modificação gera na saúde das pessoas e em seus interesses.

Embora não tenha conceituado dano ambiental, a Política Nacional de Meio Ambiente, define os conceitos de degradação ambiental e poluição que com ele se relacionam (BRASIL, 1981, art. 3º):

II - degradação da qualidade ambiental, a alteração adversa das características do meio ambiente;

III - poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

A Constituição Federal de 1988 estabeleceu a tríplice responsabilização na tutela do meio ambiente, sujeitando os infratores, sejam pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativa, além da obrigação de reparar os danos causados, (BRASIL, 1988, art. 225, § 3º), sem prejuízo da cumulatividade das sanções.

Nesse sentido, a Lei de Crimes Ambientais define as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e, portanto, os atos tipificados por ela sujeitam o infrator a penas privativas de liberdade, restritiva de direitos ou a multas (BRASIL, 1998). A infração ambiental é regrada, entre outros dispositivos legais, pelo Decreto Federal nº 6.514, de 2008, e apurada pelos órgãos integrantes do SISNAMA e pela Capitania dos Portos, sujeitando os autores a sanções administrativas, como multa, suspensão das atividades e apreensão (BRASIL, 2008).

A PNMA estabelece a responsabilidade civil objetiva por danos ambientais, ou seja, a obrigação de reparação é independente da existência de culpa e da existência de ilícito legal. Ainda, o Superior Tribunal de Justiça sumulou entendimento de que a condenação à obrigação de fazer ou a de não fazer pode ser cumulada com a de indenizar (BRASIL, 2018c) e que as obrigações ambientais possuem natureza

propter rem, podendo ser cobradas do proprietário ou possuidor atual e/ou dos anteriores, à escolha do credor (BRASIL, 2018b). Além disso, o Supremo Tribunal Federal fixou a tese de repercussão geral (Tema 999) de que a pretensão de reparação civil de dano ambiental é imprescritível (BRASIL, 2020b).

Uma função da responsabilidade civil é a internalização das externalidades ambientais negativas de forma a impor às atividades poluidoras a incorporação dos custos com a prevenção, controle e reparação de impactos, evitando a socialização dos prejuízos para enriquecimento privado (STEIGLEDER, 2003). Com esse pensamento, emerge o princípio do poluidor-pagador, sendo inclusive elencado como um dos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente prevendo a “imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização de recursos ambientais com fins econômicos” (BRASIL, 1981, art. 4º, VII). O princípio do poluidor-pagador possui finalidade preventiva, sendo atribuídos ao poluidor os custos e ônus com medidas para evitar a poluição de forma antecipada à possibilidade de ocorrência do dano (LEITE, 1999).

2.2.1 Reparação do Dano Ambiental

A Constituição Federal consagra a reparação integral do dano ambiental, não estabelecendo qualquer limitação à responsabilização. Dessa forma, há uma imposição ao poluidor de obrigações com objetivo de prevenir novos danos, de restaurar os danos reversíveis e à indenização de danos extrapatrimoniais e de danos materiais irreversíveis (STEIGLEDER, 2003). O dano ambiental, causado por ação ou omissão, deve ser reparado independente da licitude da conduta ou atividade (FREITAS, 2011). Ou seja, em função da teoria do risco integral, mesmo atividades lícitas e licenciadas, ao causarem dano ambiental são obrigadas a repará-lo integralmente, independentemente da existência de culpa. A reparação integral do dano ambiental inclui a reparação dos danos materiais presentes e futuros, incluídos os danos emergentes e lucros cessantes (FREITAS, 2011).

A Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), foi a primeira legislação brasileira a diferenciar os termos restauração, “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original” (BRASIL, 2000b, art. 2º,

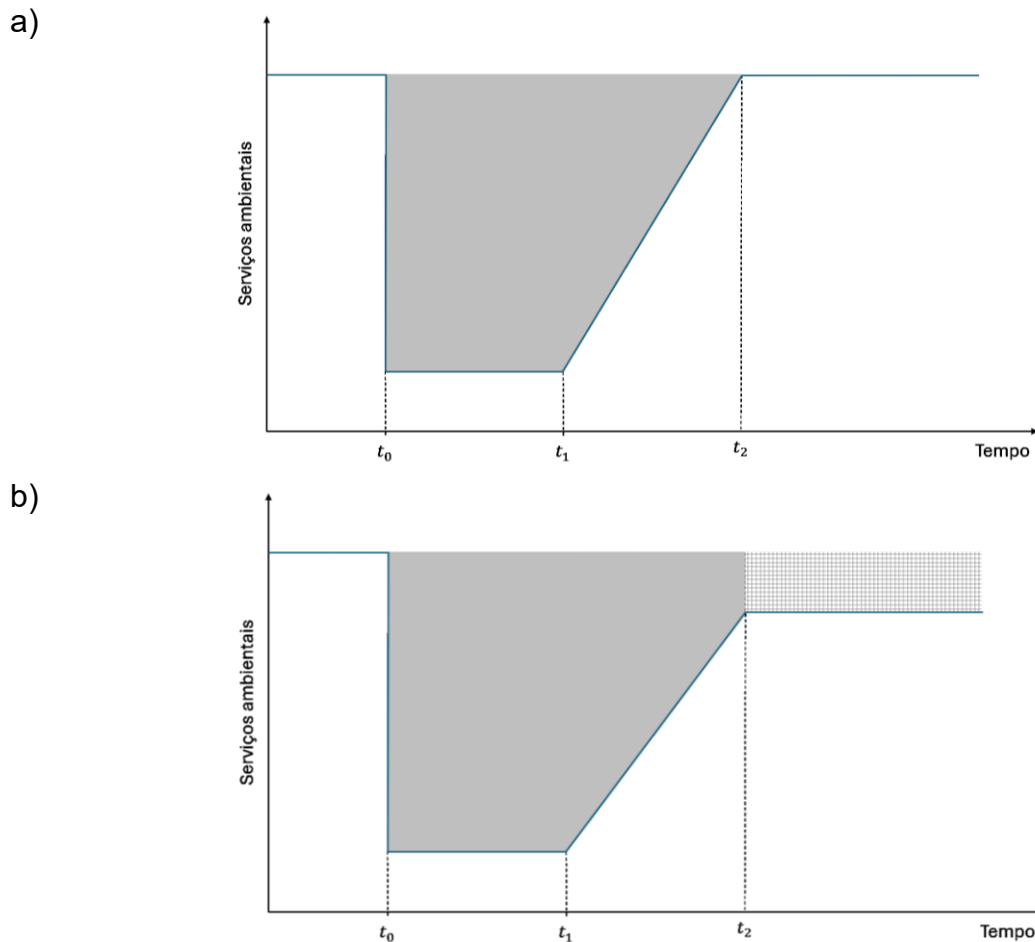
XIV), e recuperação, “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original” (BRASIL, 2000b, art. 2º, XIII), até então utilizados como sinônimos.

O STJ diferencia ao menos três espécies de danos ambientais em relação ao tempo: i) o dano propriamente dito, reparável preferencialmente pela restauração do ambiente ao seu estado anterior; ii) o dano remanescente (residual, permanente), quando mesmo após a recuperação *in natura* permanece existindo ao longo do tempo e, por isso, é em regra indenizável; e iii) o dano intercorrente, ou interino, que ocorre entre o dano em si e a reparação integral, havendo ou não dano remanescente (BRASIL, 2023d).

O dano intercorrente se caracteriza pela diminuição temporária do bem ambiental e sua reparação pode ser entendida como uma compensação pelo período que a sociedade deixou de gozar dos seus recursos e serviços. Fica evidente que, independentemente da existência de dano residual, dificilmente não ocorrerá o dano intercorrente, visto que, em geral, a reparação não será imediata e, nesse ínterim, o dano permanece existindo (BRASIL, 2023d). Ou seja, a reparação integral do dano ambiental, seja *in natura* ou por pecúnia, não afasta a obrigação de indenizar os danos ambientais interinos. É uma forma de compensação pelos custos dos serviços e recursos ambientais usurpados pelo particular.

A Figura 5 (a) representa o conceito de dano intercorrente quando a restauração integral é possível. A linha azul representa os serviços ambientais fornecidos por uma determinada área. No tempo t_0 , ocorre o dano que reduz os serviços ambientais prestados. No tempo t_1 são iniciadas as medidas de recuperação ambiental até que o ambiente retorne a sua condição inicial em um tempo t_2 . Dessa forma, o dano ambiental intercorrente é aquele existente entre o evento degradante (t_0) e o término das atividades de recuperação ambiental (t_2), representado pela área cinza do gráfico.

Figura 5 – Representação do dano intercorrente quando há restauração integral (a) e quando há recuperação ambiental (b).



Fonte: adaptado de Pereira et al.(2019).

Quando a reparação ambiental se dá na forma de recuperação, ou seja, quando a restauração integral não for possível, adiciona-se ao dano intercorrente o dano permanente, uma vez que o ecossistema não retornará à situação anterior (PEREIRA et al., 2019). A Figura 5 (b) apresenta o caso de recuperação ambiental. Da mesma forma, a linha azul representa os serviços ambientais prestados por uma determinada área que sofreu um dano no tempo t_0 . As medidas de recuperação são iniciadas no tempo t_1 e são encerradas no tempo t_2 . Logo, o dano intercorrente também ocorre do tempo t_0 a t_2 , representado pela área cinza do gráfico. No entanto, os serviços ecossistêmicos em t_2 são inferiores à condição inicial, restando um dano remanescente após a recuperação da área degradada, ilustrado pela área quadriculada do gráfico.

A restauração deve ser a opção preferencial na responsabilização civil por danos ambientais, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988 quando

incumbe ao Poder Público “preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais” (BRASIL, 1988, art. 225, § 1º, I) e pela PNMA quando define como um dos seus princípios a recuperação de áreas degradadas além de visar “à preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente” (BRASIL, 1981, arts. 2º, VIII e 4º, VI).

De acordo com Leite (1999), em muitos casos, o meio ambiente lesado é impossível de ser recuperado ou retornar ao *statu quo ante*, já que do ponto de vista ecológico não será verdadeiramente restabelecido. No entanto, a inviabilidade da restituição do bem lesado não pode resultar na irreparabilidade do dano, já que os mecanismos jurisdicionais de reparação devem ser utilizados para garantir o ressarcimento da lesão ambiental.

Caso a reparação total do ambiente degradado não seja possível, admite-se o uso de medidas compensatórias pela parcela não reparada (FREITAS, 2011). Apenas quando não for possível a reparação do ambiente degradado, admite-se a sua substituição por outro equivalente ou a aplicação de sanção monetária (LEITE, 1999).

De acordo com Freitas (2011), a compensação é uma forma de reparar o dano ambiental pela reconstituição de outro bem ambiental similar ao degradado, preferencialmente na mesma bacia hidrográfica da área afetada, ou seja, há a substituição do bem ambiental afetado por outro equivalente buscando a reparação do equilíbrio ecológico. Deve ser utilizada apenas quando a reparação *in natura* e *in situ* for impossível ou como medida anterior à indenização. As medidas de reparação complementares ou compensatórias devem priorizar medidas de equivalência recurso-recurso ou serviço-serviço.

A indenização é uma forma indireta de reparação do dano ambiental, prevista somente quando a reparação *in situ* ou a compensação não forem possíveis. A reparação econômica possui como ponto favorável a certeza da sanção civil. O ressarcimento do bem ambiental é um instrumento necessário que amplia a proteção ao meio ambiente, inibindo e prevenindo o dano, de forma similar à ameaça penal que desestimula o delito (LEITE, 1999).

Leite (1999) destaca que uma dificuldade da reparação pecuniária é a conversão monetária para fins de cálculo da indenização, já que questionamentos como “quanto vale monetariamente uma espécie em extinção?” possuem respostas

em que não há certezas. Nesses casos, será necessária a valoração econômica para estabelecimento de um valor indenizatório pelo dano ambiental (STEIGLEDER, 2011).

De acordo com Freitas (2011), no âmbito jurídico a necessidade de valorar monetariamente um dano ambiental se apresenta quando a restauração total ou parcial e a recuperação não forem possíveis, nos casos que se configurar o dano ambiental intercorrente e quando tratar-se de dano ambiental extrapatrimonial.

Em outros casos envolvendo a resolução de processos jurídicos por meio de termos de ajustamento de conduta e de transações penais, a valoração econômica dos danos ambientais também assume importância já que muitas vezes a sua conclusão ocorre por meio de sanções pecuniárias. A valoração dos danos ambientais também subsidia a sentença penal, uma vez que sempre que possível será fixado o valor mínimo para reparação dos danos e a perícia fixará o montante do prejuízo causado para efeitos de prestação de fiança e cálculo de multa (BRASIL, 1998, arts. 19 e 20).

Nos crimes que deixam vestígios, como é o caso do dano ao meio ambiente, a realização do exame de corpo de delito é obrigatória (BRASIL, 1941, art. 158). A prova pericial consiste em exame, vistoria ou avaliação, realizada por profissional com conhecimento técnico ou científico (BRASIL, 2015, art. 464º). A perícia realizada no inquérito civil ou no juízo cível pode ser utilizada no processo penal, desde que instaurado o contraditório (BRASIL, 1998, art. 19º). Portanto, em ação judicial cível ou criminal em casos de dano ambiental a perícia será indispensável para estimar sua extensão e valoração monetária (MAGLIANO, 2019).

2.3 VALORAÇÃO ECONÔMICA DO DANO AMBIENTAL

O valor econômico de um recurso ambiental pode ou não estar associado ao seu uso. Existem recursos ambientais em que os fluxos de bens e serviços ambientais a eles associados definem seus atributos de consumo, enquanto em outros o consumo está associado à sua existência, independente dos bens e serviços gerados na forma de uso (MOTTA, 1997). Dessa forma o valor econômico do recurso ambiental (VERA) pode ser dividido em seu valor de uso (VU) e valor de não-uso (VNU), conforme Equação 1.

$$VERA = VU + VNU$$

Equação 1

Segundo Motta (1997), o valor de uso direto (VUD) é aquele atribuído a um recurso quando utilizado diretamente, por exemplo, na forma de extração, visitação, alimentação, recreação ou outra atividade de consumo direto. Já o valor de uso indireto (VUI) se caracteriza quando o benefício do recurso é derivado das suas funções ecossistêmicas, como no caso da proteção do solo e estabilidade climática em consequência da preservação das florestas, ou nos casos de fornecimento de suporte para atividades econômicas e de bem-estar, como a proteção dos recursos hídricos e estocagem de resíduos. O valor de opção (VO) se refere ao valor em usos direto e indireto que poderão ser optados no futuro, como é o caso dos fármacos com propriedades ainda não descobertas que poderão ser desenvolvidos a partir de produtos provenientes de florestas preservadas.

O valor de não-uso representa a parcela referente ao valor de existência de um recurso e é decorrente de uma postura ética e moral em relação ao direito de existência de espécies não-humanas e de ecossistemas preservados, mesmo que estes não representem uso, nem mesmo no futuro, para o indivíduo. Um exemplo desse valor é o apelo para preservação de espécies em extinção em locais onde a maioria das pessoas sequer visitarão ou terão algum benefício de uso (MOTTA, 1997).

O somatório do valor de uso direto (VUD), valor de uso indireto (VUI) e valor de opção (VO) representa os valores de uso do VERA, enquanto o valor de existência (VE) representa os valores de não-uso. Com isso, o VERA pode ser expresso pela Equação 2.

$$VERA = VUD + VUI + VO + VE \quad \text{Equação 2}$$

Esses valores são difíceis de serem quantificados devido à complexidade do tema, por se tratarem de um bem indispensável à vida humana e pela inter-relações existentes nos ecossistemas (MONTEIRO, 2021). Por isso, é seguro afirmar que independente da metodologia utilizada para estimar o VERA, não é possível alcançar um valor real dos recursos ambientais. Ainda assim, a valoração se faz necessária por ser uma importante ferramenta de gestão ambiental, fundamental para a tomada de decisões, além de ser um instrumento importante na responsabilização pecuniária quando utilizada para valoração de dano ambiental.

A parcela VUD do VERA pode ser estabelecida de forma direta por uma avaliação de preços de produtos, para estimar as demais parcelas será necessário aplicar um método de valoração (MONTEIRO, 2021). As parcelas VO e VE exigem

métodos complexos para sua mensuração, por isso são muitas vezes desconsideradas nos cálculos de valoração em perícias ambientais (MAGLIANO, 2013). É importante que essa subestimação do VERA seja elucidada pelo perito e que, portanto, a valoração resultante se trata de um valor mínimo do recurso ou do dano ambiental.

Os métodos de valoração econômica ambiental medem as preferências de indivíduos por um recurso ou serviço ambiental, ou seja, o valor não é atribuído ao meio ou recurso em si. Cada método irá cumprir esse objetivo à medida que for capaz de mensurar as parcelas do VERA (MOTTA, 1997). Qualquer método de valoração ambiental apresenta limitações, a escolha do mais apropriado dependerá do objetivo a ser alcançado, das hipóteses assumidas, da disponibilidade de dados e do conhecimento da dinâmica ecológica do bem a valorar (ABNT, 2009). Dessa forma, nenhum método é genérico a ponto de ser utilizado em qualquer situação que requeira valoração (MAGLIANO, 2019).

Segundo a ABNT (2009), os métodos de valoração econômica ambiental podem ser classificados em diretos e indiretos. Os métodos diretos se baseiam em funções de demanda e assumem que a variação da disponibilidade do recurso modifica a disposição a pagar ou aceitar dos agentes econômicos. Esses métodos estimam diretamente preços-sombras dos recursos ambientais com base na sua demanda a partir de mercados de bens ou serviços complementares ou por mercados hipotéticos construídos para o recurso que se deseja valorar (MOTTA, 1997).

Os métodos diretos são complexos, onerosos, requerem ampla disponibilidade de dados e possuem maior tempo de execução (ABNT, 2009), devido a isso, possuem menor aplicabilidade na área pericial. Por outro lado, podem ser capazes de captar o valor de opção e valor de existência do VERA.

De acordo com a ABNT (2009), os métodos indiretos utilizam estimativas dos custos associados aos danos, ou seja, se baseiam na aproximação da dimensão econômica que o dano causa, sem medirem diretamente a disposição a pagar ou a receber dos indivíduos em função das mudanças na qualidade ambiental. Por se basearem nos custos para evitar o dano ou para recompor a qualidade ambiental eles podem incorporar os valores de uso e de não-uso. Na prática, são mais adaptados ao cotidiano da perícia criminal ambiental.

Os métodos indiretos são amplamente utilizados por se basearem em técnicas mais simples fundamentadas na função de produção. O valor do recurso

ambiental é observado pela sua contribuição como insumo ou fator na produção de outro produto, ou seja, o uso do recurso causa impacto em uma atividade econômica (MOTTA, 1997). Portanto, é possível estimar a variação no valor de um produto devido à variação da quantidade de bens e serviços oferecidos pelo recurso ambiental. Esses métodos podem ser aplicados quando for possível obter preços de mercado para a variação do produto ou seus insumos.

Apesar da numerosa opção de métodos de valoração, muitos deles não se adequam à realidade dos órgãos de perícia oficial do país, tornando-se inviáveis por exigirem levantamentos de campo aprofundados, a aplicação de questionários, longos períodos para execução e recursos financeiros incompatíveis com o serviço público (VIEIRA, 2013). Nesse caso, não haverá um único método ideal, podendo ser utilizados mais de um, inclusive em conjunto, e dependerão caso a caso. De qualquer forma, é importante a consciência de que independente do método empregado, estaremos diante de uma sub-estimativa (FREITAS, 2011), já que sob o ponto de vista ecológico todos os danos são irreversíveis, restando uma reparação jurídica buscando uma indenização que contemple a maior parte dos valores associados ao dano (STEIGLEDER, 2011).

A seguir são descritos métodos de mercado de bens substitutos para valoração de recursos ambientais utilizados em perícias ambientais. São descritos também métodos indiretos que se utilizam do Método do Custo de Reposição de forma adaptada para cálculo do VERA, sendo eles: o Método do Valor Estimado de Referência para a Degradação Ambiental (VERD) e o método elaborado pelo Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais (DEPRN). Além deles, são apresentados dois métodos específicos para valoração de dano por disposições irregulares de resíduos sólidos propostos por publicações de orientação técnica do Ministério Público dos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

2.3.1 Métodos de Valoração Ambiental

2.3.1.1 *Métodos de Mercado de Bens Substitutos*

Segundo Motta (1997), esses métodos são utilizados quando a variação da produção afetada por um recurso ambiental não oferece preços de mercado. Embora

o recurso natural seja gratuito, sua perda ou escassez pode induzir ao consumo de outros bens para substituí-los, ou seja, há um aumento de demanda por substitutos perfeitos. Assim, para manter a produção que dependa de um recurso será necessário um substituto para compensá-lo, podendo valorar a variação do recurso pelo preço do substituto observável no mercado.

Por se tratar de métodos cuja aplicação é facilitada pela rápida execução e pela necessidade de dados de entrada de fácil obtenção, critérios essenciais para uso em perícias ambientais, são os mais utilizados nesse contexto (MAGLIANO 2013; ALMEIDA, 2010). Ainda, possuem boa aceitação jurídica (STEIGLEDER, 2011), o que os torna atrativos para uso neste âmbito.

Por outro lado, pela sua simplicidade, são métodos que não captam as complexidades ambientais e não incorporam o valor dos serviços ecossistêmicos (MAIA, 2002) e, portanto, não valoram todas as parcelas do VERA. Logo, a valoração obtida por esses métodos é subestimada.

São exemplos de métodos baseados em mercados de bens substitutos amplamente utilizados e de fácil aplicação:

Custos de Reposição

Nesse caso, o custo do substituto representa os gastos dos usuários em bens substitutos para garantir o nível desejado do produto ou do recurso ambiental. São exemplos de aplicação desse método: custos de reflorestar áreas para garantir a produção de madeira; custos de fertilizantes necessários para reposição de nutrientes em solos degradados para manter a atividade agrícola (MOTTA, 1997).

Existem diversas metodologias que adaptam o método dos custos de reposição de forma a contornar, ainda que parcialmente, a subestimação da valoração econômica do dano ambiental. Vieira (2013) propõe uma metodologia para valoração dos danos ambientais para casos de supressão de vegetação em ecossistemas florestais a partir da adaptação do método do custo de reposição utilizando fatores de correção embasados na análise dos serviços ambientais afetados e nas características específicas da área, como: estágio de sucessão da vegetação, tipo de uso do solo e existência de restrições legais para a ocupação. Almeida (2010) também propõe fatores de correção para o método dos custos de reposição, de acordo com o macrozoneamento da área, como sua inserção em áreas protegidas por alguma UC ou em APP, além da aplicação de lucro cessante. Os métodos DEPRN e VERD

também são adaptações ao método dos custos de reposição e são explicados mais adiante nesse trabalho.

Gastos Defensivos ou Custos Evitados

De acordo com Motta (2006), o custo do substituto representa os gastos necessários em bens substitutos para manter a produção que depende de um recurso ambiental.

São exemplos de custos evitados: gastos em compra de água tratada devido à perda de qualidade dos recursos hídricos em função de fontes de poluição; gastos com medicamentos necessários para remediar efeitos adversos à saúde causados pela poluição.

Custos de Controle

O custo do substituto representa os custos de controle necessários para evitar a variação ou perda do recurso ambiental. Podem ser considerados valores preventivos, ou seja, são investimentos necessários para evitar a diminuição da qualidade e quantidade de um recurso ambiental (MOTTA, 2006) e devem contemplar os custos de implantação, operação e manutenção das medidas para evitar a degradação ambiental.

Wang e Santini (1995) sugerem que os custos de controle necessários para atender padrões de qualidade ambiental impostos pela legislação revelam o valor que a sociedade atribui ao controle da poluição, podendo esse ser considerado um método de preferência revelada.

De acordo com Landmann, Ribeiro e Deák (2007), no método dos custos de controle é o Estado quem determina os índices máximos de concentrações de poluentes que devem ser alcançados, estabelecendo um patamar de custos que deverão ser alocados para redução da poluição. Nesse sentido, a valoração ocorre sob a ótica do planejamento, o que é uma abordagem coerente ao se tratar de recursos ambientais.

São exemplos de custos de controle: os gastos em tratamento de efluentes para evitar a perda de qualidade dos recursos hídricos; gastos com a disposição adequada de resíduos industriais para evitar a degradação do solo e água subterrânea.

Custos de Oportunidade

O custo do substituto representa a perda de renda em função das restrições na produção devido às ações para conservar ou preservar um recurso. Portanto, o método valora o custo econômico para manter um determinado recurso em função da renda sacrificada. Esse método é usado principalmente para estimar as perdas econômicas em função das restrições de determinada atividade por instrumentos de proteção ambiental (MOTTA, 1997).

São exemplos de custo de oportunidade: a produção sacrificada de energia para manter uma área florestal ao não instalar um empreendimento hidrelétrico que inundaria essa área; a renda sacrificada pela produção agrícola ao criar uma unidade de conservação na área que poderia ser utilizada por essa atividade econômica.

2.3.1.2 *Método VERD – Valor Estimado de Referência para a Degradação Ambiental*

O método VERD proposto por Cardoso (2003) pode ser utilizado para valoração econômica do dano ambiental a partir de duas variáveis: quantificáveis (q) e intangíveis (i).

As variáveis quantificáveis são aquelas mensuráveis economicamente e diretamente associadas aos danos ambientais. São exemplos de valores econômicos que podem ser usados como variáveis quantificáveis: investimentos necessários para prevenir o dano não efetuados pelo poluidor; custos para recuperação da área degradada; custos de licenciamento ambiental não efetuados.

As variáveis intangíveis são aquelas em que não é possível associar um valor econômico e representam danos efetivos ou potenciais aos meios físico, biótico e antrópico. São exemplos de variáveis intangíveis: incômodos à saúde, danos ao patrimônio histórico e cultural, poluição visual e danos aos representantes de diferentes reinos animais. A variável *i* é composta por um quantificador que varia de 0 a 4, conforme a duração e intensidade do impacto causado sobre o meio. Os impactos de curto prazo são aqueles com duração de dias e variam de 0 a 3 de acordo com a sua intensidade, enquanto os impactos de longo prazo são aqueles com duração de meses e anos e recebem o valor 4, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Quantificadores das variáveis intangíveis.

Duração do impacto	Nível do Impacto	Quantificador
Curto prazo (dias)	Sem	0
	Baixo	1
	Médio	2
	Alto	3
Longo prazo (meses/anos)	-	4

Fonte: adaptado de Cardoso (2003).

O método VERD é representado pela multiplicação do somatório dos quantificadores atribuídos às variáveis intangíveis e o valor total das variáveis quantificáveis, conforme Equação 3.

$$VERD = \sum_{n=1}^{\alpha} q_n \cdot \sum_{n=1}^{\alpha} i_n \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

VERD: valor econômico de referência do dano ambiental;

Σq_n : somatório dos valores correspondentes às variáveis economicamente quantificáveis;

Σi_n : somatório dos valores entre 0 e 4 correspondentes às variáveis economicamente intangíveis;

n: variáveis consideradas no cálculo, variando de 1 até α ;

α : número de variáveis consideradas.

Cardoso (2003) divide o ambiente em físico, biótico e antrópico e propõe representantes para cada um deles para determinação das variáveis intangíveis. O Quadro 2 é proposto pelo autor para facilitar a determinação dos componentes representantes das variáveis intangíveis e seu respectivo quantificador.

Quadro 2 – Determinação das variáveis intangíveis.

Ambiente	Variáveis intangíveis	Impacto					
		Curto Prazo*					Médio/ Longo Prazo**
		i	0 Sem	1 Baixo	2 Médio	3 Alto	4
Físico	Ar	i1					
	Água	i2					
	Solo/sedimentos	i3					
Biótico: Reino Monera	Bactérias e cianobactérias	i4					
Reino Protista	Protozoários	i5					
Reino Fungi	Cogumelos	i6					
Reino Animal	Invertebrados	i7					
	Vertebrados	i8					
Reino das Plantas	Estrato arbóreo	i9					
	Estrato arbustivo	i10					
	Estrato herbáceo	i11					
Antrópico	Social	i12					
	Paisagístico	i13					
	Perdas econômicas intangíveis	i14					
	Bem-estar	i15					
TOTAL							

Fonte: adaptado de Cardoso (2003).

2.3.1.3 Método DEPRN – Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais

Essa metodologia foi desenvolvida pelo extinto Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais (DEPRN) do Estado de São Paulo. A metodologia propõe uma avaliação quali-quantitativa dos danos a diferentes aspectos ambientais e a transformação dessa análise em fatores que multiplicarão o valor de uso direto do recurso ou o custo para recuperação do dano.

São considerados seis aspectos ambientais: atmosfera, água solo/subsolo, fauna, flora e paisagem. Para cada aspecto ambiental podem ser definidos dois tipos

de danos com peso 1 ou 1,5 e, para cada tipo de dano são propostos agravos. A seleção dos aspectos ambientais impactados, tipo de danos e qualificação dos agravos pode ser realizada com auxílio do Quadro 3 e dependem das características do dano ambiental que se pretende valorar. A qualificação dos agravos deve ser realizada conforme critérios do Anexo A. O resultado dessa avaliação inicial é um índice numérico para cada aspecto ambiental correspondente à soma da qualificação dos agravos multiplicado pelo peso do tipo de dano ocorrido, conforme Eq. 4.

Quadro 3 – Descrição e qualificação dos agravos de acordo com o aspecto ambiental e tipo de dano.

Aspecto	Tipo de dano (A)	Descrição e qualificação dos agravos	Qualificação de agravos (B)	Índice de qualificação de agravos (C = A x $\sum$ B)
Atmosfera	Impacto causado pela emissão de gases, partículas, agentes biológicos, energia (1,0)	Toxicidade da emissão		
		Proximidade de centros urbanos		
		Áreas Protegidas		
		Comprometimento do aquífero		
		Morte ou dano à Fauna		
		Morte ou dano à Flora		
		Dano ao Patrimônio ou Monumento Natural		
	Dinâmica Atmosférica (1,5)	Morte ou dano à Fauna		
		Morte ou dano à Flora		
		Alteração da qualidade do ar		
		Previsão do reequilíbrio		
Água	Impacto causado por compostos químicos, físicos, biológicos, energia (1,0)	Toxicidade da emissão		
		Comprometimento do aquífero		
		Áreas protegidas		
		Danos ao Solo e ou subsolo		
		Morte ou dano à Fauna		
		Morte ou dano à Flora		
		Dano ao Patrimônio ou Monumento Natural		
	Impactos na hidrodinâmica (1,5)	Morte ou dano à Fauna		
		Morte ou dano à Flora		
		Alteração da Classe do corpo hídrico		
		Alteração da vazão/ volume de água		
		Previsão de reequilíbrio		
Solo	Impacto causado por compostos químicos, físicos, biológicos, energia (1,0)	Toxicidade da emissão		
		Comprometimento do aquífero		
		Áreas protegidas		
		Assoreamento de corpo hídrico		
		Morte ou dano à fauna		
		Morte ou dano à flora		
		Dano ao Patrimônio ou Monumento Natural		
	Impactos na dinâmica solo/subsolo (1,5)	Morte ou dano à Fauna		
		Morte ou dano à Flora		
		Alteração na capacidade de uso da terra		
		Dano ao relevo		
		Previsão de reequilíbrio		
Fauna	Danos aos indivíduos (1,0)	Áreas protegidas		
		Espécies ameaçadas de extinção		
		Espécies endêmicas		
		Fêmeas		
		Objetivando comercialização		
	Impacto na dinâmica da comunidade	Importância relativa		
		Morte ou dano à flora		

Aspecto	Tipo de dano (A)	Descrição e qualificação dos agravos	Qualificação de agravos (B)	Índice de qualificação de agravos (C = A x ΣB)
	(1,5)	Alteração dos nichos ecológicos		
		Previsão de reequilíbrio		
Flora	Danos aos indivíduos (1,0)	Áreas protegidas		
		Espécies ameaçadas de extinção		
		Espécies endêmicas		
		Favorecimento da erosão		
		Dano ao patrimônio ou monumento natural		
		Objetivando comercialização		
	Impacto na dinâmica da comunidade (1,5)	Morte ou dano à Fauna		
		Importância relativa		
		Alteração dos nichos ecológicos		
		Previsão de reequilíbrio		
Paisagem	Dano à paisagem (1,0)	Áreas ou municípios protegidos		
		Proximidade de centros urbanos		
		Reversão do dano		
		Comprometimento do aquífero		
		Comprometimento do Solo ou subsolo		
		Morte ou dano à fauna		
		Morte ou dano à flora		
	Dano ao patrimônio cultural, histórico, turístico, arquit. e artístico (1,5)	Proximidade de centros urbanos		
		Reversão do dano		
		Comprometimento do aquífero		
		Comprometimento do solo-subsolo		
		Morte ou dano à fauna		
		Morte ou dano à Flora		
TOTAL				

Fonte: Galli (1996).

$$\text{Índice numérico do aspecto} = [\sum(\text{qualificação dos agravos})] \cdot \text{tipo de dano} \quad \text{Eq. 4}$$

A próxima etapa para aplicação do método é a definição do fator que multiplicará o valor de uso direto do recurso ou o custo para recuperação do dano. A partir do índice numérico obtido pela qualificação dos agravos seleciona-se o fator multiplicador referente a cada aspecto ambiental afetado de acordo com os intervalos previstos na Tabela 2.

Tabela 2 – Intervalos dos índices de qualificação dos agravos e respectivo fator multiplicador

Aspecto	Intervalo do índice de qualificação dos agravos				
Atmosfera	≤ 6,8	≤ 13,6	≤ 20,4	≤ 27,2	≤ 34,0
Água	≤ 7,2	≤ 14,4	≤ 21,6	≤ 28,8	≤ 36,0
Solo-Subsolo	≤ 7,5	≤ 15,0	≤ 22,5	≤ 30,0	≤ 37,5
Fauna	≤ 6,4	≤ 12,7	≤ 19,2	≤ 25,6	≤ 32,0
Flora	≤ 6,6	≤ 13,2	≤ 19,8	≤ 26,4	≤ 33,0
Paisagem	≤ 8,0	≤ 16,8	≤ 24,0	≤ 32,0	≤ 40,0
Fator multiplicador	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6

Fonte: Galli (1992).

Por fim, o valor do dano ambiental é obtido pelo produto entre o somatório dos fatores multiplicadores e o valor de uso direto do recurso ou o custo para recuperação do dano, conforme Eq. 5.

$$Valor\ do\ dano = [\Sigma Fator\ multiplicador] \cdot Custo\ de\ Recuperação \quad Eq. 5$$

ou

$$Valor\ do\ dano = [\Sigma Fator\ multiplicador] \cdot VUD$$

2.3.1.4 Método do MPMS – Ministério Público do Estado de Mato Grosso do Sul

A Nota Técnica de Valoração de Dano Ambiental do MPMS foi desenvolvida para fundamentar a atuação dos Procuradores de Justiça de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso do Sul. Nela são reunidas orientações para valoração de diversos danos ambientais, incluindo os causados por resíduos sólidos.

Dentre os métodos sugeridos, a nota apresenta duas possíveis abordagens para valoração de danos causados por disposições de resíduos sólidos: o método de custos de controle e o método de custo de reposição.

A valoração pelo método de custo de controle se baseia nos gastos para construção e operação de um aterro sanitário. Tais custos são deflacionados para a

data de início do dano e capitalizados até a data de análise (MATO GROSSO DO SUL, 2021), conforme Equação 6.

$$VT = (VP + \sum VPM) \cdot F_p \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

VT: valor total do dano ambiental;

VP: valor presente dos custos de controle;

$\sum VPM$: somatório do valor presente do custo de operação/manutenção da ação de controle ao longo do período em que a atividade poluidora permaneceu sem as medidas de controle mínimas para atendimento da legislação;

F_p : fator de participação municipal (relação entre o valor estimado do orçamento do município causador do dano ambiental e o orçamento estimado total dos municípios consorciados).

As parcelas VP e VPM são dadas pela Equação 7 e Equação 8, respectivamente.

$$VP = \frac{VC}{(1+i)^t} \cdot (1+m)^t \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

VC: valor de construção do sistema de controle estimado para o ano mais atual;

$(1+i)^t$: fator de deflação com base no IPCA acumulado, a partir do ano em que se iniciou a atividade poluidora até o ano “t” de fim do dano ou data de análise;

$(1+m)^t$: índice de capitalização do custo de oportunidade para calcular o valor presente do custo de controle, com base em aplicação em caderneta de poupança.

$$VPM_t = \frac{VM}{(1+i_{t-1})^{t-1}} \cdot (1+i)^t \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

VM: valor de manutenção do sistema de controle estimado no ano mais atual;

$(1+i_{t-1})^{t-1}$: fator de deflação com base no IPCA acumulado, a partir do ano em que se iniciou a atividade poluidora até o ano “t” de fim do dano ou data de análise;

$(1 + i)^t$: índice de capitalização do custo de oportunidade para calcular o valor presente do custo de manutenção/operação, com base em aplicação em poupança.

2.3.1.5 *Método do MPMT – Ministério Público do Estado de Mato Grosso*

O Material de Orientação Técnica para Valoração de Danos Ambientais foi desenvolvido para fundamentar a atuação dos Procuradores de Justiça de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso. Nele são reunidas orientações para valoração de diversos danos ambientais, incluindo os causados por resíduos sólidos.

A orientação apresenta parâmetros para a composição civil de dano ambiental referente a casos de disposição irregular de resíduos sólidos, em áreas protegidas ou em áreas passíveis de autorização (MATO GROSSO, 2016).

A valoração se baseia nos custos para recuperação da área, representado pelos valores de compensação ambiental (VCP), e para retirar o resíduo disposto irregularmente, representado pelos custos para retirada da terra. O valor de compensação ambiental em reais é calculado pela Equação 9.

$$VCP = p1 + p2 + p3 + p4 + p5 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

p1: valor da muda. O valor atribuído é de R\$ 1,12 por metro quadrado;

p2: abertura de covas. O valor atribuído é de R\$ 0,31 por metro quadrado;

p3: correção e adubação de solo durante cinco anos. O valor atribuído é de R\$ 0,61 por metro quadrado;

p4: tratos culturais durante dois anos. O valor atribuído é de R\$ 7,83 por metro quadrado;

p5: impacto ecossistêmico, representado pelo valor fixo de compensação ambiental pelo tamanho da área afetada (U\$ 0,32) multiplicado pelo tempo estimado para a consolidação de uma área florestada (5 anos). O valor atribuído é de R\$ 8,27 por metro quadrado, considerando a cotação do dólar de R\$ 5,17 em abril de 2024.

Portanto, o VCP com valores atualizados para o ano de 2024 é de:

$$VCP = 1,12 + 0,31 + 0,61 + 7,83 + 8,27$$

$$VCP = 18,14 \text{ R\$} \cdot \text{m}^{-2}$$

Os valores de p1 a p4 foram atualizados utilizando-se como índice de correção o Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA/IBGE (BCB, 2024a). O valor de p5 foi atualizado pela cotação do dólar em abril de 2024 (BCB, 2024b).

Os custos para remoção dos resíduos são calculados a partir dos custos para retirada de terra com carregamento mecanizado que são de U\$ 11,78 por tonelada, convertendo para cotação atual do dólar (R\$ 5,17) (BCB, 2024b), tem-se:

$$\text{Remoção de resíduos sólidos} = 60,90 \text{ R\$} \cdot \text{ton}^{-1} \text{ ou } 73,08 \text{ R\$} \cdot \text{m}^{-2}$$

Assim, nos casos em que o lançamento irregular de resíduos ocorra em áreas protegidas, soma-se o VCP com os custos para remoção dos resíduos sólidos:

$$\text{Indenização em áreas protegidas} = 91,22 \text{ R\$} \cdot \text{m}^{-2}$$

Nos casos de depósito irregular fora de áreas protegidas, aplica-se somente o custo de remoção dos resíduos sólidos:

$$\text{Indenização fora de áreas protegidas} = 73,08 \text{ R\$} \cdot \text{m}^{-2}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo visa contribuir de forma prática na valoração econômica de danos ambientais causados por disposições inadequadas de RSU, servindo como ferramenta para uso pericial no âmbito jurisdicional, sendo caracterizado como uma pesquisa de natureza aplicada (BOAVENTURA, 2009). Referente à abordagem do problema, esta pesquisa se classifica como quantitativa, dado que a elaboração desta metodologia de valoração se deu majoritariamente a partir de fatores numéricos. Quanto aos procedimentos, classifica-se como levantamento bibliográfico, pesquisa documental e estudo de caso (GIL, 2002).

Para atender ao objetivo geral deste trabalho, buscou-se desenvolver um método de valoração econômica de danos ambientais a partir da composição de parcelas que considerem os custos de controle para evitar a degradação ambiental e o dano intercorrente decorrentes de disposições irregulares de resíduos sólidos urbanos e que possam ser obtidas de forma objetiva, a partir de dados do levantamento pericial, com menor dependência de ponderações do usuário.

Considerando que os métodos indiretos de valoração de danos ambientais possuem maior aplicabilidade para fins periciais, a metodologia proposta utiliza-se de métodos de mercado de bens substitutos para mensuração do dano. Tal escolha se justifica por possuírem características de rápida execução, praticidade e necessidade de dados de entrada de fácil obtenção, o que os torna atrativos para serem usados nesse contexto.

Na metodologia proposta, optou-se por utilizar custos de controle que representam valores preventivos necessários para evitar o dano ambiental por disposições de RSU e, portanto, são custos para evitar a poluição que não foram investidos pelo infrator ao realizar a disposição irregular de RSU. Esses custos podem ser estimados pelos gastos necessários para realizar o manejo adequado de RSU.

Sabendo das características do dano de longo prazo gerado por disposições irregulares de RSU, entende-se importante considerar o cálculo do dano intercorrente no método proposto. Os principais impactos ambientais ao longo do tempo associados a tais intervenções consistem em alteração da qualidade dos recursos hídricos, do solo, do ar e impactos sobre a saúde humana. Impactos ao solo, à água e à saúde humana podem ou não ocorrer e sua magnitude varia em função de características específicas do local onde os resíduos foram dispostos. Por outro lado, impactos em

relação à qualidade do ar em função de disposições inadequadas de RSU decorrem em grande medida das emissões de gases gerados pela degradação da matéria orgânica e são sempre esperados.

Por isso, a metodologia proposta foi desenvolvida a partir da quantificação do dano intercorrente limitado às emissões atmosféricas, especificamente em relação aos gases de efeito estufa. O dano associado aos demais compartimentos socioambientais também foi desconsiderado por demandar estudos específicos e dados mais complexos que potencialmente limitariam a aplicabilidade da metodologia considerando o contexto das perícias ambientais.

O cálculo do dano intercorrente por emissões de gases de efeito estufa foi fundamentado em uma modelagem da quantidade de gases de efeito estufa emitidos ao longo do tempo por disposições irregulares de RSU e sua conversão em valores monetários em função de preços de comercialização de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Para atingir o objetivo de desenvolver um método com viabilidade técnica e financeira, replicabilidade e rápida execução, de forma que possa subsidiar perícias ambientais, optou-se por utilizar dados de entrada de fácil obtenção para cálculo do dano: sejam dados primários das características da disposição irregular de RSU que podem ser levantados durante a realização da perícia, como massa ou volume de resíduos dispostos; ou dados secundários públicos e disponíveis, como custos médios com manejo adequado RSU e valores de negociação de certificados de redução de emissões. Além disso, foram desconsideradas as parcelas de valor de opção e valor de existência do VERA, por demandarem tempo e recurso para sua mensuração, aumentando a aplicabilidade da metodologia proposta em usos periciais.

A metodologia proposta para valoração econômica de danos ambientais causados por disposições inadequadas de resíduos sólidos urbanos e o desenvolvimento das respectivas equações são apresentados e detalhados na seção 3.1.

Uma área de disposição irregular de RSU foi selecionada para aplicação do método proposto e de outros métodos de valoração econômica de dano ambiental no formato de um estudo de caso para atendimento dos objetivos específicos “a” e “b”, conforme procedimentos explicados na seção 3.2.

Por fim, a partir dos resultados obtidos no estudo de caso, o método desenvolvido e os outros métodos de valoração econômica de dano ambiental

selecionados foram comparados e avaliados em relação a sua aplicação aos casos de disposições irregulares de RSU de forma a atender ao objetivo específico “c”.

3.1 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DO MÉTODO DE VALORAÇÃO AMBIENTAL DE DISPOSIÇÕES IRREGULARES DE RESÍDUOS SÓLIDOS (VADIR)

A metodologia proposta é conceitualmente explicada pela Equação 10, que terá suas parcelas de custos de controle (CC) e valoração do dano intercorrente por emissões atmosféricas (VDI_{EA}) detalhadas nesse capítulo. Na seção 3.1.1 será apresentada a metodologia referente à parcela dos custos de controle (CC), enquanto na seção 3.1.2 é detalhada a metodologia referente à parcela de valoração do dano intercorrente por emissões atmosféricas (VDI_{EA}).

$$VADIR = CC + VDI_{EA} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

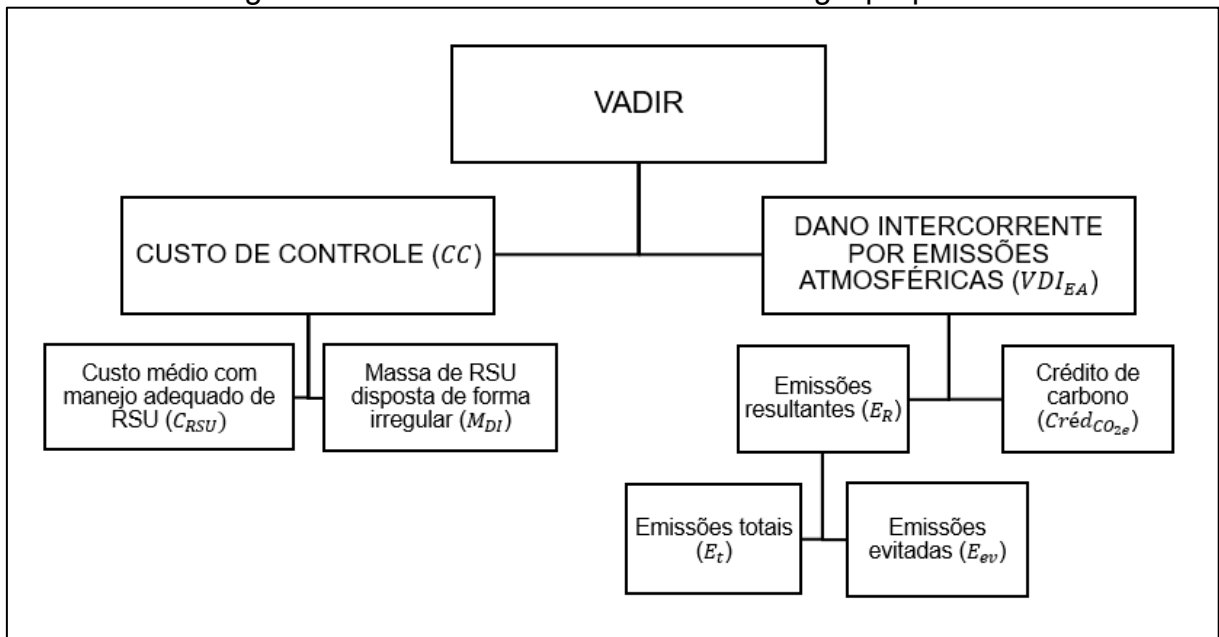
$VADIR$: Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (R\$);

CC : Custos de Controle (R\$);

VDI_{EA} : Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas (R\$).

De forma esquemática a metodologia proposta pode ser conceitualmente representada pela Figura 6.

Figura 6 – Modelo conceitual da metodologia proposta.



Fonte: elaborado pela autora.

3.1.1 Valoração dos Custos de Controle (CC)

Os custos com serviços de manejo de RSU no meio urbano contemplam as despesas municipais relacionados a todos os procedimentos inerentes a essa atividade, incluindo a coleta, o transporte e a destinação final adequada desses resíduos. Essas despesas podem ser consideradas investimentos necessários para evitar a perda de qualidade ou quantidade de um recurso, ou seja, seriam correspondentes aos custos de controle para evitar a degradação ambiental em função do manejo de RSU. A valoração econômica a partir de custos de controle se ancora também no princípio do poluidor-pagador, já que representa os gastos que o poluidor lucrou ao deixar de arcar com os ônus para evitar ou reduzir a poluição gerada pela atividade.

Dessa forma, o dano ambiental causado por disposições inadequadas de RSU pode ser valorado em função dos custos de controle necessários para evitar a degradação ambiental. Esses custos podem ser representados pelos gastos necessários para realizar o manejo adequado de RSU.

Ao multiplicar o custo médio com manejo de RSU por tonelada pela massa de resíduos disposta de forma irregular é possível obter os custos que seriam necessários para gerir essa massa de resíduos de forma adequada. Portanto, o

resultado da Equação 11 representa os custos de controle que foram economizados ao dispor os resíduos de forma irregular, ou seja, é o lucro obtido pela pessoa física ou jurídica ao causar o dano ambiental por disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos.

$$CC = C_{RSU} \cdot M_{DI} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo,

CC : Custos de Controle (R\$)

C_{RSU} : custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada (R\$.Mg⁻¹);

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg).

Dividindo o custo médio nacional por habitante por ano com serviços de manejo de RSU pela massa coletada per capita média de RSU por dia obtém-se o valor do custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada, conforme demonstrado na Equação 12. Dessa forma, C_{RSU} representa as despesas necessárias para realizar uma gestão adequada dos resíduos sólidos.

$$C_{RSU} = \frac{C_{PH}}{M_{PC} \cdot 365} \cdot 1000 \quad \text{Equação 12}$$

Sendo,

C_{RSU} : custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada (R\$. Mg⁻¹);

C_{PH} : custo de manejo de RSU por habitante por ano (R\$.hab⁻¹.ano⁻¹);

M_{PC} : massa coletada de RSU per capita (kg.hab⁻¹.dia⁻¹).

O SNIS (ou SINISA, quando este estiver implementado em substituição ao SNIS) divulga anualmente o custo médio nacional por habitante com os serviços de manejo de RSU, bem como os valores médios por regiões e por faixa populacional. Esses custos são declarados ao SNIS pelos municípios e prestadores de serviços de saneamento básico a partir do preenchimento de formulários eletrônicos, com posterior consolidação dos dados e apresentação na forma do documento intitulado “Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos” para o ano de referência em questão, cujo acesso é público e gratuito.

As despesas per capita com manejo de RSU de um município são representadas no SNIS pelo indicador “IN006” e se referem ao total de despesas em relação à população urbana estimada pelo IBGE para um determinado ano. A soma dessas despesas em relação à população urbana dos municípios que responderam ao SNIS representa um valor médio nacional para os custos de manejo de RSU por habitante por ano, ou seja, esse valor disponibilizado anualmente pelo SNIS pode ser substituído na Equação 12 correspondendo ao C_{PH} .

Outro dado divulgado anualmente pelo SNIS é a massa coletada de RSU per capita média por dia. Essa massa é calculada pela soma da quantidade de RSU coletada por agentes públicos, privados, associações, cooperativas e demais agentes executores em um determinado ano em relação à população urbana estimada pelo IBGE. Esse valor pode ser substituído na Equação 12 correspondendo à M_{PC} .

Há uma variação nos quantitativos e indicadores relacionados a resíduos sólidos apresentados pelo SNIS e SINIR. No entanto, para cálculo dos custos de controle recomenda-se o uso dos dados fornecidos pelo SNIS já que possui um número maior de municípios respondentes e mais clareza nos dados informados e métodos de cálculos utilizados.

Sabe-se que os custos municipais com manejo de RSU podem variar, principalmente, de acordo a região do Brasil e o número de habitantes do município. Portanto, caso o município onde tenha ocorrido o dano ambiental por disposição irregular de RSU que se pretende valorar declare os custos com manejo de RSU, pode-se utilizar esse valor para cálculo dos custos de controle, no lugar da média nacional. No entanto, recomenda-se uma etapa de consolidação de dados de forma a garantir que todos os gastos com manejo de RSU estejam sendo considerados e que os custos sejam coerentes com os valores de outros municípios da mesma região com características semelhantes. Caso contrário, é preferível utilizar o valor médio nacional divulgado pelo SNIS.

Importante destacar que, com exceção da massa de RSU disposta de forma irregular (M_{DI}), todos os dados necessários para o cálculo dos custos de controle podem ser consultados no SNIS. A massa de RSU disposta de forma irregular pode ser estimada de diferentes maneiras:

- a) a partir de registros da quantidade de RSU disposta no local de interesse quando disponíveis;
- b) utilizando a Equação 13:

$$M_{DI} = M_{PC} \cdot N \cdot P \cdot \frac{365}{1.000} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

P : população que destinou seu resíduo para disposição irregular de RSU (habitantes);

N : número de anos em que a área de disposição irregular recebeu RSU (anos);

M_{PC} : massa coletada de RSU per capita (kg.hab⁻¹.dia⁻¹).

Pode-se usar os valores divulgados pelo SNIS para compor M_{PC} . Quanto à população: caso todo o resíduo do município seja destinado para a área de disposição valorada, considera-se a população do município; caso mais de um município destine seus resíduos para a área de disposição a ser valorada, considera-se a soma da população desses municípios e, posteriormente, o valor do dano sob responsabilidade de cada município será proporcional à sua população.

- c) a partir do volume da disposição irregular de RSU e posterior conversão em massa. O volume pode ser estimado a partir da área e altura ocupada pela massa de resíduos mediante trabalho de campo e uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto. A massa de resíduos disposta pode ser calculada a partir do seu volume estimado multiplicado pela massa específica de RSU, conforme grau de compactação, o que pode ser obtido a partir da Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de massa específica média de RSU conforme grau de compactação dos materiais.

Massa específica	Referência
0,9 Mg.m ⁻³	ABETRE, 2007
0,7 Mg.m ⁻³	CEMPRE, 2018
0,22 a 0,91 Mg.m ⁻³	MARQUES, 2001 (pouco compactado)
0,48 a 0,95 Mg.m ⁻³	MARQUES, 2001 (mediamente compactado)
0,55 a 1,65 Mg.m ⁻³	MARQUES, 2001 (bem compactado)

3.1.2 Valoração do Dano Intercorrente por Emissões Atmosféricas (VDI_{EA})

Inicialmente é importante destacar que na presente abordagem foram desconsiderados os danos ambientais diretos oriundos de disposições irregulares de resíduos sólidos associados aos compartimentos de solo, águas superficiais, águas subterrâneas e sociedade. De forma que essa abordagem se limita a precificar o dano intercorrente relativo às emissões atmosféricas, mais especificamente quanto a emissões de gases de efeito estufa.

Com relação à estimativa de produção de gases de efeito estufa, conforme Berger et al. (2001) e EPA (2023), seria razoável considerar para fins de modelagem, que os gases emitidos pela decomposição da matéria orgânica em disposições de resíduos apresentem uma composição de 50% de metano e 50% de gás carbônico. Esses dois gases são considerados gases de efeito estufa, tendo o primeiro um potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao segundo (IPCC, 2014).

Uma vez estimado o volume de metano e gás carbônico emitidos ao longo da operação de uma disposição de resíduos sólidos, é possível calcular suas respectivas massas e expressá-las em termos de massa de gás carbônico equivalente, de forma a se obter um equivalente monetário em termos de créditos de carbono, conforme Equação 14. Ao longo dessa seção serão apresentados pormenorizadamente os componentes da referida equação.

$$VDI_{EA} = E_R \cdot Créd_{CO_2} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

VDI_{EA} : Valor do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas (R\$);

E_R : emissões resultantes em massa de gás carbônico equivalente (tCO_{2e} ou $MgCO_{2e}$);

$Créd_{CO_2}$: valor do crédito de carbono ($R\$.MgCO_{2e}^{-1}$).

3.1.2.1 *Estimativa de volume de gases emitidos*

Alguns dos modelos para estimativa de geração de gases em disposições de resíduos utilizam equações de decaimento de primeira ordem (IPCC, 1997; IPCC, 2000; EPA, 2023). Em linhas gerais, os modelos consistem em adaptações a uma regra geral de um modelo de decaimento de primeira ordem, em que o volume de metano produzido depende da quantidade de massa de matéria orgânica disponível, a qual decai com o tempo, conforme é consumida, sendo convertida em gases. Um modelo de decaimento de primeira ordem que relaciona o volume de metano gerado em função do consumo de matéria orgânica é representado pela Equação 15.

$$Q_{CH_4,i} = k \cdot M_{DI} \cdot L_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$Q_{CH_4,i}$: geração anual de metano no ano de cálculo ($m^3 \cdot \text{ano}^{-1}$);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

L_0 : potencial de geração de metano ($m^3 \cdot Mg^{-1}$);

M_{DI} : massa de RSU disposta (Mg).

Na Equação 15, k consiste na constante de decaimento da geração de metano em função da meia-vida da matéria orgânica disposta. Enquanto L_0 representa o potencial de geração de metano, como uma forma de potencial conversibilidade da massa de matéria orgânica disposta em volume de metano emitido, o que é proporcional à quantidade de matéria orgânica no resíduo.

Importante notar que a Equação 15 expressa uma estimativa do volume de metano produzido em dado ano a partir de uma disposição de uma massa M de

resíduos. Entretanto, na prática, as disposições de resíduos em lixões e aterros controlados ocorrem de forma contínua ao longo de um período de anos.

Quando aplicada a Equação 15 para um tempo tendendo a infinito, é possível estimar o total acumulado de emissões de metano, conforme demonstrado abaixo.

$$Q_{Total\ CH_4} = \int_1^{\infty} k \cdot M_{DI} \cdot L_0 \cdot e^{-k \cdot t} dt$$

Portanto, é possível aproximar a emissão acumulada de metano de uma disposição de resíduos ao longo de um tempo suficiente para que toda matéria orgânica seja consumida pela Equação 16.

$$Q_{Total\ CH_4} = \frac{L_0 \cdot M_{DI}}{e^k} \quad \text{Equação 16}$$

3.1.2.2 Emissões totais (E_T) em equivalentes a CO_{2e}

Considerando a premissa de que os gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica em disposições de resíduos apresentem uma composição de 50% de metano e 50% de gás carbônico, o volume acumulado de gás carbônico produzido em um sistema de disposição de resíduos ao longo de um tempo suficiente para que toda matéria orgânica seja consumida é definido pela Equação 17.

$$Q_{Total\ CO_2} = Q_{Total\ CH_4} = \frac{L_0 \cdot M_{DI}}{e^k} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

M_{DI} : total de massa de RSU disposta (Mg).

Com o objetivo de expressar os volumes de metano e gás carbônico obtidos pela Equação 16 e Equação 17 em massa, deve-se utilizar a massa específica de cada um dos gases. Utilizando-se a equação de Clapeyron, ou equação de estado dos gases, foi obtida uma massa específica de $0,7165\text{ kg.m}^{-3}$ para o metano e uma massa específica de $1,9660\text{ kg.m}^{-3}$ para o gás carbônico.

Considerando que o metano tem um potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao gás carbônico (IPCC, 2014), a massa total de emissões de gases

de efeito estufa em toneladas de gás carbônico equivalente (E_T) pode ser definida pela Equação 18.1, obtida a partir da Equação 18.

$$E_T = 28 \cdot Q_{Total\ CH_4} \cdot \mu_{CH_4} + Q_{Total\ CO_2} \cdot \mu_{CO_2} \quad \text{Equação 18}$$

$$E_T = (28 \cdot \mu_{CH_4} + \mu_{CO_2}) \cdot Q_{Total\ CH_4}$$

$$E_T = 22,0285 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{Total\ CH_4}$$

$$E_T = 2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0 \cdot M_{DI}}{e^k} \quad \text{Equação 18.1}$$

Onde:

E_T : massa total de gás carbônico equivalente emitida pela decomposição de toda matéria orgânica ($MgCO_{2e}$);

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

L_0 : potencial de geração de metano ($m^3 \cdot Mg^{-1}$);

μ_{CH_4} : massa específica do metano ($0,7165\ kg \cdot m^{-3}$);

μ_{CO_2} : massa específica do gás carbônico ($1,9660\ kg \cdot m^{-3}$).

3.1.2.3 Emissões evitadas (E_{ev})

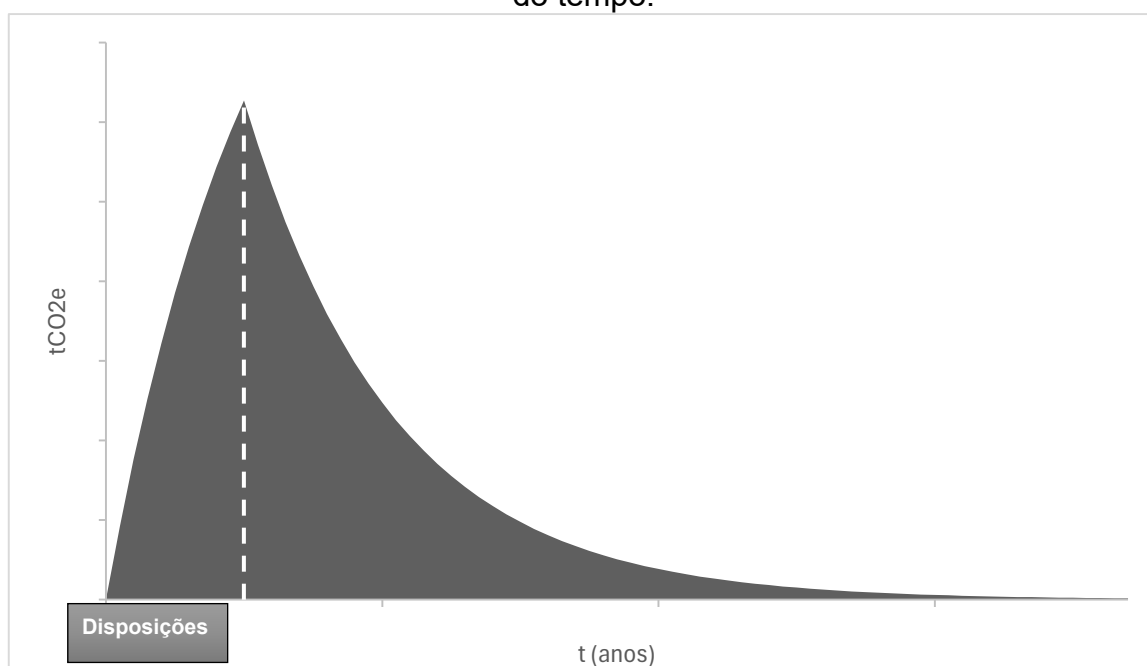
A Equação 18.1 descreve a emissão total acumulada de gases de efeito estufa em termos de equivalência a gás carbônico quando considerada a disposição de uma massa total de resíduos sólidos (M_{DI}) e que esses resíduos permaneçam até que sua matéria orgânica seja totalmente decomposta.

Entretanto, pode haver casos em que após encerradas as disposições de resíduos, a área degradada passe por uma recuperação ambiental ou regularização do sistema de disposição, sendo transformado em um aterro sanitário, por exemplo. Portanto, é possível que o objetivo da valoração ambiental consista em valorar os danos ambientais até a data de regularização do passivo ambiental. Nesses casos, se faz necessário subtrair da Equação 18.1 uma parcela correspondente às emissões de gases que seriam realizadas após a data de regularização do passivo ambiental, as quais serão denominadas emissões evitadas.

As emissões de gases de efeito estufa, em termos de toneladas equivalentes de gás carbônico em função do tempo, são esquematizadas na Figura 7. Essa figura representa uma simulação em que as massas de resíduos dispostas a cada ano foram constantes e a linha tracejada representa o último ano em que houve um novo aporte de resíduos. A linha de contorno é dada pelas emissões equivalentes de gás carbônico por ano; e sua área, ou seja, o total de emissões equivalentes de gás carbônico acumuladas, pode ser calculada pela Equação 18.1.

É possível notar na Figura 7 que o máximo de emissões, conforme EPA (2023), ocorre logo após o fim das disposições. A partir desse momento, as emissões anuais decaem de forma exponencial em função do tempo, se as massas dispostas por ano tiverem sido razoavelmente constantes.

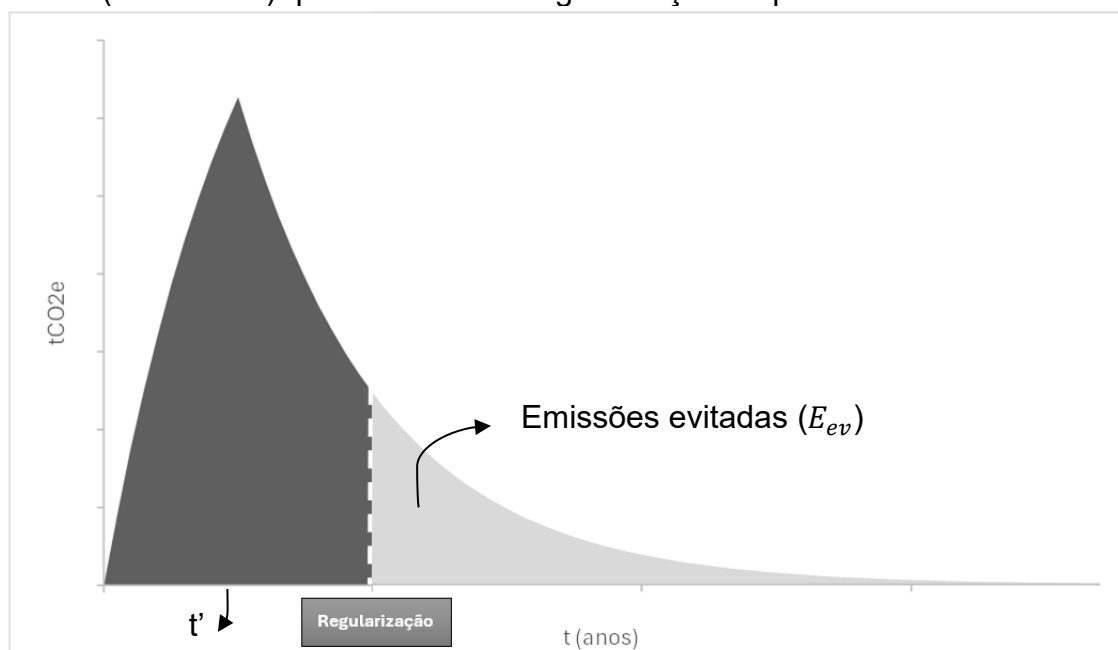
Figura 7 – Esquema ilustrativo do total de gases de efeito estufa emitido pela decomposição da matéria orgânica em disposições de resíduos sólidos em função do tempo.



Fonte: elaborado pela autora.

Em uma hipótese em que a área degradada passe por uma regularização ambiental é necessário calcular um total de emissões evitadas a contar da data de regularização do passivo ambiental, conforme Figura 8.

Figura 8 – Esquema ilustrativo dos gases de efeito estufa emitidos pela decomposição da matéria orgânica em função do tempo e das emissões evitadas (cinza claro) quando ocorre a regularização do passivo ambiental.



Fonte: elaborado pela autora.

Nos casos em que ocorra a regularização do passivo ambiental, a valoração de danos ambientais deverá considerar apenas o total de emissões de gases de efeito estufa até a data da regularização, ou seja, as emissões resultantes (E_R) da subtração entre o total de emissões (E_T), calculado pela Equação 18.1, e as emissões evitadas a partir da regularização do passivo ambiental (E_{ev}), obtendo-se a Equação 19.

$$E_R = E_T - E_{ev} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

E_R : emissões resultantes (MgCO_{2e});

E_T : emissões totais (MgCO_{2e});

E_{ev} : emissões evitadas (MgCO_{2e}).

Respeitada a premissa de que as massas dispostas de forma inadequada a cada ano foram constantes, a curva de decaimento se inicia no ano em que as emissões atingem o máximo, que coincide com o ano em que foram findadas as disposições de resíduos. A partir desse momento as emissões anuais decaem em uma trajetória descrita por uma equação exponencial em função de k e t' . Portanto, a

trajetória de decaimento das emissões anuais, considerando $t' = 0$ na data em que ocorrem as emissões máximas é dada pela Equação 20 e ilustrada na Figura 9.

$$E_{t'} = E_{máx} \cdot e^{-k \cdot t'} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

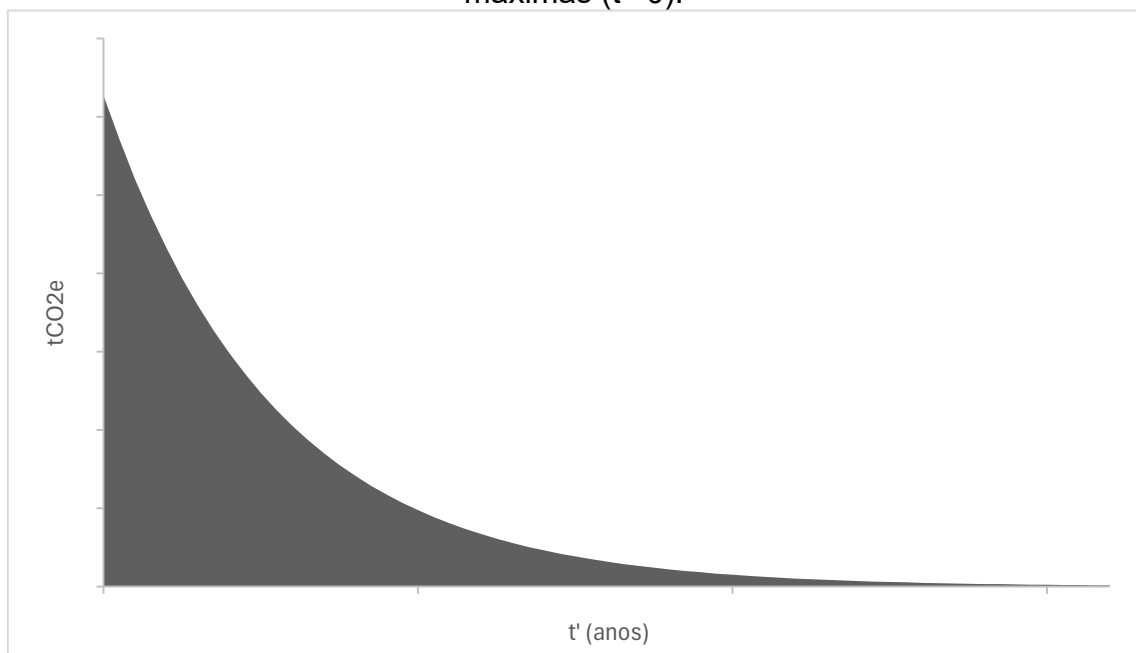
$E_{t'}$: massa de CO_{2e} emitidas em um ano t' ($MgCO_{2e}$);

$E_{máx}$: emissões máximas anuais, que ocorrem no último ano das disposições, quando $t'=0$ ($MgCO_{2e}$);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

t' : eixo de tempo deslocado, tendo seu zero no ano em que se inicia a trajetória de decaimento exponencial das emissões, visto que não ocorrem mais disposições de resíduos no sistema (ano).

Figura 9 – Esquema ilustrativo dos gases de efeito estufa emitidos pela decomposição da matéria orgânica em função do tempo a partir do ano de emissões máximas ($t'=0$).



Fonte: elaborado pela autora.

O acumulado de emissões evitadas é dado pela integral da Equação 20, limitada a partir do momento em que ocorra a regularização do passivo ambiental. Dessa forma, o total de emissões evitadas em uma área de disposição irregular de

resíduos sólidos que tenha seu passivo ambiental regularizado em um tempo T_f é definido pela Equação 21.

$$E_{ev} = \int_{T_f}^{\infty} E_{m\acute{a}x} \cdot e^{-k \cdot t'} dt' = \frac{E_{m\acute{a}x}}{k} \cdot e^{-k \cdot T_f} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

E_{ev} : emissões evitadas a partir da regularização do passivo ambiental (MgCO_{2e});

$E_{m\acute{a}x}$: emissões no ano de emissões máximas, que ocorrem no último ano das disposições, quando $t'=0$ (MgCO_{2e});

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

t' : tempo em que se inicia a trajetória de decaimento exponencial das emissões, visto que não ocorrem mais disposições de resíduos no sistema (ano);

T_f : tempo de fechamento do sistema de disposições irregulares, ou intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos).

Como exemplo, em um caso hipotético em que tenha havido disposições de resíduos sólidos em uma área entre 2000 e 2011. O ano de 2011 seria definido como $t'=0$ para a Equação 20 e Equação 21 e para a Figura 9. Se posteriormente viesse a ocorrer a regularização do passivo ambiental dessa área em 2021, o T_f seria igual a 10 nesse exemplo (2021 menos 2011). Por outro lado, em casos em que após um período de aportes de resíduos sólidos, uma área de disposição irregular tenha sido abandonada e seu passivo não tenha sido recuperado, o T_f deve ser considerado igual a infinito, o que resultaria na inexistência de emissões evitadas ($E_{ev} = 0$).

Para que seja possível estimar o total de emissões evitadas no caso de hipotética regularização de passivo ambiental, ainda se faz necessária a definição das emissões no ano de emissões máximas ($E_{m\acute{a}x}$). Com a finalidade de se obter uma equação que represente $E_{m\acute{a}x}$, foi utilizado o modelo do programa LandGEM 3.1 (EPA, 2023) que se fundamenta na mesma curva de decaimento da Equação 15. Trata-se de uma aplicação via *software* Excel® desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos que visa estimar, de forma discreta, a emissão de gases de depósitos de resíduos, a partir de dados empíricos de disposições de resíduos naquele país (ALEXANDER, BURKLIN e SINGLETON, 2005).

Foram realizadas simulações no modelo LandGEM 3.1, variando-se o número de anos de disposições de resíduos e a massa depositada em cada ano. Dessa forma obteve-se via regressão, com R^2 igual a 0,9963, a Equação 22 representando as emissões máximas ($E_{m\acute{a}x}$) em função de N e M_{DI} .

$$E_{m\acute{a}x} \cong M_{DI} \cdot 0,2039 \cdot e^{-0,035 \cdot N} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$E_{m\acute{a}x}$: emissões no ano de emissões máximas, que ocorrem após o fim das disposições, quando $t'=0$ (MgCO_{2e});

N : número de anos em que ocorreram disposições de resíduos no sistema de disposição irregular (anos);

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg).

Dessa forma, o total de emissões evitadas em um cenário hipotético de regularização de passivo ambiental é dado pela Equação 23, obtida a partir da substituição da Equação 22 na Equação 21.

$$E_{ev} \cong \frac{M_{DI} \cdot 0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

E_{ev} : emissões evitadas a partir da regularização do passivo ambiental (MgCO_{2e});

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

N : número de anos em que ocorreram disposições de resíduos no lixão (anos);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

T_f : intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos).

3.1.2.4 Emissões resultantes (E_R)

Dessa forma, o total de emissões resultantes de gases de efeito estufa em toneladas equivalentes de gás carbônico será dado partindo-se da Equação 19, aplicando-se o valor de E_T , obtido da Equação 18.1, e de E_{ev} da Equação 23, obtendo-se a Equação 24.

$$E_R = E_T - E_{ev}$$

$$E_R \cong 2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0 \cdot M_{DI}}{e^k} - \frac{M_{DI} \cdot 0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}}$$

$$E_R \cong M_{DI} \cdot \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0}{e^k} - \frac{0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \right) \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

E_R : emissões resultantes em massa de gás carbônico equivalente (MgCO_{2e});

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

N : período em que ocorreu a disposição de resíduos no lixão (anos);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

L_0 : potencial de geração de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$);

T_f : intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos).

3.1.2.5 Abordagem financeira para os gases de efeito estufa emitidos

Uma vez obtida a massa de gases de efeito estufa equivalentes a gás carbônico resultantes da operação de disposições irregulares de resíduos sólidos, a sua conversão para valores monetários pode ser dada a partir da avaliação de disposição a pagar pela compensação de tais externalidades negativas ou da disposição a receber pelo desenvolvimento de projetos que realizem a captura de carbono. Com o desenvolvimento de um mercado de comercialização de créditos de carbono, seus valores de negociação tendem a refletir uma melhor aproximação da interseção entre a disposição a pagar e disposição a receber em um dado momento.

De maneira geral a parcela da Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas é explicada pela Equação 25.

$$VDI_{EA} = E_R \cdot Créd_{CO_2} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

VDI_{EA} : Valor do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas (R\$);

E_R : emissões resultantes em massa de gás carbônico equivalente (MgCO_{2e});

$Créd_{CO_2}$: valor do crédito de carbono ($R\$.MgCO_{2e}^{-1}$).

3.1.3 Método de Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (VADIR)

Por fim, a metodologia de Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (VADIR) pode ser expressa conceitualmente pela Equação 10 e matematicamente pela Equação 26.

$$VADIR = CC + VDI_{EA} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$VADIR$: Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos;

CC : Custos de Controle;

VDI_{EA} : Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas.

A partir da Equação 10 e conforme detalhamento da metodologia proposta, chegou-se à expressão geral da Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (VADIR), em função de N , M_{DI} , C_{RSU} , L_0 , k , T_f e $Créd_{CO_2}$, dada pela Equação 26.

$$VADIR = M_{DI} \cdot \left\{ C_{RSU} + \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0}{e^k} - \frac{0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \right) \cdot Créd_{CO_2} \right\} \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

$VADIR$: Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos;

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

C_{RSU} : custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada ($R\$.Mg^{-1}$);

L_0 : potencial de geração de metano ($m^3.Mg^{-1}$);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano^{-1});

N : período em que ocorreu a disposição de resíduos no lixão (anos);

T_f : intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos);

$Créd_{CO_2}$: valor do crédito de carbono ($R\$.MgCO_{2e}^{-1}$).

3.2 ESTUDO DE CASO – VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS DANOS AMBIENTAIS EM UMA ÁREA DE DISPOSIÇÃO IRREGULAR DE RSU

Com a finalidade de avaliar o Método VADIR e suas limitações, foi realizado um estudo de caso que consistiu na aplicação da metodologia proposta em uma área de disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos.

Além disso, foram selecionados cinco métodos de valoração a serem aplicados na área do estudo de caso para comparação com os resultados obtidos pelo Método VADIR, sendo eles: DEPRN - Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais (GALLI, 1996); VERD - Valor Estimado de Referência para a Degradação Ambiental (CARDOSO, 2003); método proposto por publicação de orientação técnica do MPMS (MATO GROSSO DO SUL, 2021); método proposto por publicação de orientação técnica do MPMT (MATO GROSSO, 2016); além do método do custo de reposição.

Esses métodos foram selecionados para comparação por se basearem na valoração a partir de mercado de bens substitutos, mais especificamente em custos de reposição, sendo esses os mais utilizados no âmbito pericial (MAGLIANO, 2013). No caso dos métodos propostos pelas publicações de orientação técnica dos Ministérios Públicos estaduais, suas seleções se deram por se tratarem de metodologias específicas para valoração de danos causados por disposições irregulares de resíduos sólidos e para utilização em perícias ambientais, exatamente o mesmo uso proposto para VADIR.

Para a definição da área a ser objeto do estudo de caso, foi solicitado ao órgão ambiental estadual de Santa Catarina acesso aos estudos ambientais relativos a processos de recuperação de áreas degradadas de oito disposições irregulares de resíduos sólidos, podendo ser lixões ou aterros controlados.

Como premissas para a seleção da área a ser utilizada como estudo de caso foi definido que somente seriam selecionados processos administrativos e estudos ambientais correspondentes que indicassem, ou que fornecessem dados que permitissem estimar, os dados de entrada para a aplicação do Método VADIR e metodologias comparativas: VERD, DEPRN, MPMS, MPMT e custo de reposição.

Sendo assim, os parâmetros de entrada necessários para a aplicação da metodologia proposta (VADIR) são: número de anos em que houve disposição de resíduos sólidos no lixão (N), massa de resíduos sólidos disposta (M_{DI}) e tempo para

a reparação do dano ambiental (T_f), além do custo médio com manejo adequado de RSU (C_{RSU}) e Valor do Crédito de Carbono ($Créd_{CO_2}$), que são obtidos a partir de dados secundários. Os parâmetros de entrada necessários para a aplicação das metodologias comparativas são: custo de reposição ou reparação, área de intervenção e localização da área de interesse.

Considerando o universo de oito processos administrativos analisados, foi selecionado o único que apresentava informações suficientes para a aplicação das seis metodologias.

3.2.1 Descrição da área de aplicação do estudo de caso

A área selecionada como estudo de caso está localizada no sul de Santa Catarina e trata-se de um lixão objeto de um projeto de recuperação de áreas degradadas (PRAD), que apresenta todos os dados de entrada necessários para a aplicação da metodologia proposta, bem como aplicação das metodologias comparativas. Acrescenta-se que o acesso aos dados e estudos ambientais foi autorizado pelo órgão ambiental, bem como são dados de interesse público, conforme estabelece a Lei Federal nº 10.650, de 16 de abril de 2003.

O PRAD descreve que o lixão fora instalado em um local anteriormente utilizado como depósito de rejeito da mineração de carvão mineral, portanto, tratava-se de uma área degradada e desprovida de vegetação lenhosa, mesmo antes da instalação do lixão. O local recebeu resíduos sólidos urbanos de uma população aproximada de 10.000 habitantes ao longo de três anos, com geração de resíduos de aproximadamente 8,4 toneladas diárias, dispostos em uma área de aproximadamente 15.500m². Pelo diagnóstico dos elementos naturais do entorno, foi possível constatar que a área de estudo não está inserida em Área de Preservação Permanente ou outras áreas protegidas.

O estudo não informa quais foram os anos de operação do empreendimento, mas sabendo que o projeto é datado de 2003, foi considerado que a disposição de resíduos ocorreu de 2000 até 2002. Também não foi informado o ano de execução do PRAD, sendo que a informação disponível no processo consultado consiste em um requerimento, datado de 2017, de Licença Ambiental de Operação Corretiva para o PRAD. De acordo com as informações descritas anteriormente e considerando a

vegetação existente sobre a área, foi estimado que a execução do PRAD tenha ocorrido no ano de 2005.

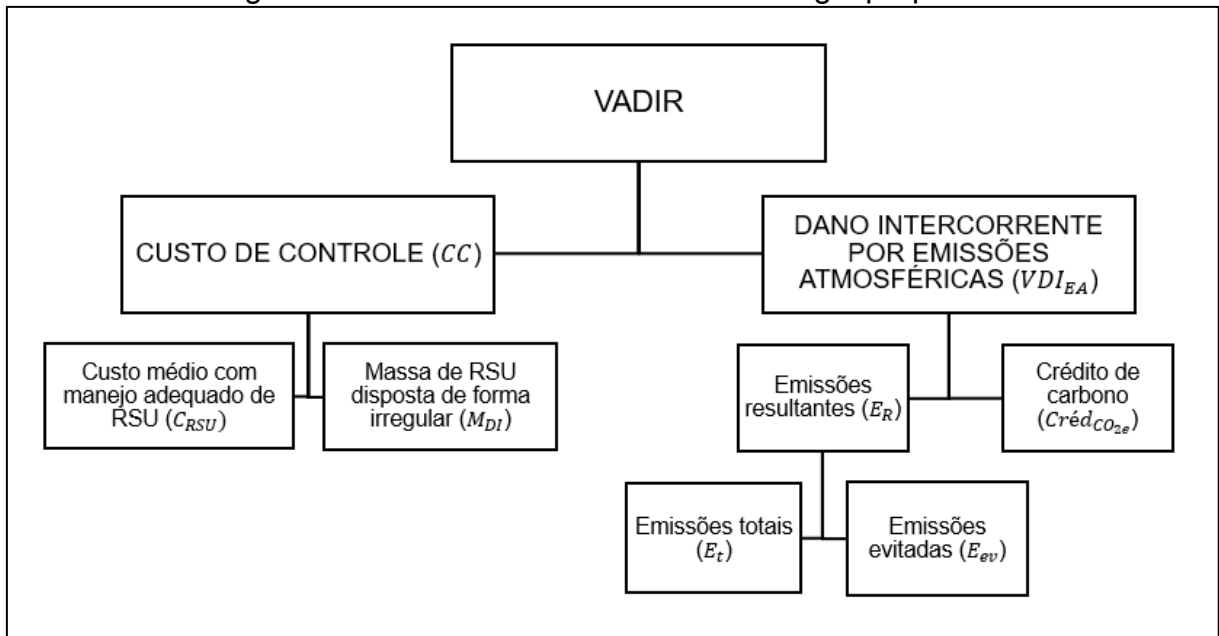
O PRAD proposto contemplava o fechamento do local, a drenagem de líquidos percolados, unidades de tratamento dos líquidos percolados, captação e queima de gases, drenagem de águas pluviais, impermeabilização da área, monitoramento e recobrimento vegetal da área, não tendo sido prevista a retirada dos resíduos depositados. Essas intervenções para a recuperação do passivo ambiental foram orçadas em R\$ 69.895,32 em julho de 2003. Tal valor foi corrigido para a data de março de 2024, utilizando-se como índice de correção o Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA/IBGE (BCB, 2024a), sendo obtido o custo de R\$ 220.725,74.

4 RESULTADOS

4.1 MÉTODO VADIR UTILIZANDO DADOS EMPÍRICOS PARA O BRASIL

Inicialmente, apresenta-se a síntese do modelo conceitual do método VADIR e seus principais componentes, detalhados no capítulo 3 Materiais e Métodos, para facilitar a compreensão dos resultados. De forma conceitual, a metodologia proposta é esquematizada na Figura 6, reapresentada abaixo, e conforme Equações 10, 11, 12, 14, 24 e 26.

Figura 6 – Modelo conceitual da metodologia proposta.



Fonte: elaborado pela autora.

$$VADIR = CC + VDI_{EA} \quad \text{Equação 10}$$

$$CC = C_{RSU} \cdot M_{DI} \quad \text{Equação 11}$$

$$C_{RSU} = \frac{C_{PH}}{M_{PC} \cdot 365} \cdot 1000 \quad \text{Equação 12}$$

$$VDI_{EA} = E_R \cdot Créd_{CO_2} \quad \text{Equação 14}$$

$$E_R \cong M_{DI} \cdot \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0}{e^k} - \frac{0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \right) \quad \text{Equação 24}$$

Conforme apresentado na seção 3.1.3, a expressão geral da Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos (VADIR) é dada pela Equação 26 em função de N , M_{DI} , C_{RSU} , L_0 , k , T_f e $Créd_{CO_2}$.

$$VADIR = M_{DI} \cdot \left\{ C_{RSU} + \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0}{e^k} - \frac{0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \right) \cdot Créd_{CO_2} \right\} \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

$VADIR$: Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos;

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

C_{RSU} : custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada (R\$.Mg⁻¹);

L_0 : potencial de geração de metano (m³.Mg⁻¹);

k : constante de decaimento da geração de metano (ano⁻¹);

N : período em que ocorreu a disposição de resíduos no lixão (anos);

T_f : intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos);

$Créd_{CO_2}$: valor do crédito de carbono (R\$.MgCO_{2e}⁻¹).

Os parâmetros k e L_0 são dependentes de condições, como: composição de matéria orgânica nos resíduos, temperatura, umidade, pH, entre outros. A literatura sugere alguns valores para esses parâmetros, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para os parâmetros k e L_0 conforme literatura.

Referência	K - faixa	K - padrão	L ₀ - faixa	L ₀ - padrão	Detalhe
IPCC, 2006	0,06 a 0,20	0,17	(*)		Chapter 3: Solid Waste Disposal, Table 3.3. LandGEM v3.1 (EPA, 2023) e Guia LandGEM v3.02 (Alexander, Burklin e Singleton, 2005)
EPA, 2023	0,02 a 0,057	0,038	96 a 170	100	
SANTOS, ROMANEL E VAN ELK, 2017	0,08 a 0,102	0,093 (**)	84,1 a 140	114,25 (**)	Dados empíricos para o Brasil

(*) não fornece valores, expressa em função de outros parâmetros

(**) média da amostra

Os dados empíricos para os parâmetros k e L_0 observados no Brasil ($L_0=114,25$ e $k=0,093$) de acordo com Santos, Romanel e Van Elk (2017) estão contidos nas faixas indicadas pelo IPCC (2006) e tendem a refletir de forma mais próxima a realidade de composição de resíduos que chegam à disposição final no Brasil, bem como as condições ambientais como temperatura e precipitação brasileiras. Dessa forma, consistem em valores possíveis de serem utilizados na ausência de dados empíricos específicos do local de aplicação da metodologia.

Substituindo-se esses valores ($L_0=114,25$ e $k=0,093$) na Equação 26, obtém-se a Equação 27 que representa o método VADIR a partir de dados empíricos observados no Brasil, especialmente útil nos casos de disposições irregulares de RSU em que esses parâmetros sejam desconhecidos. Dessa forma, a Equação 27 sintetiza o método VADIR em função apenas das variáveis M_{DI} , N e T_f , que constituem os dados de entrada específicos para o caso concreto em que se pretenda aplicar o método proposto, e das variáveis C_{RSU} e $Créd_{CO_2}$, que são atualizadas ao longo do tempo.

$$VADIR = M_{DI} \cdot \left\{ C_{RSU} + \left(2,29325 - \frac{2,19247}{e^{(0,035 \cdot N + 0,093 \cdot T_f)}} \right) \cdot Créd_{CO_2} \right\} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

$VADIR$: Valoração Ambiental de Disposições Irregulares de Resíduos Sólidos;

M_{DI} : massa de RSU disposta de forma irregular (Mg);

C_{RSU} : custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada (R\$.Mg⁻¹);

N : período em que ocorreu a disposição de resíduos no lixão (anos);

T_f : intervalo de tempo entre o ano em que foram findadas as disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (anos);

$Créd_{CO_2}$: valor do crédito de carbono (R\$.MgCO_{2e}⁻¹).

As equações do método VADIR foram inseridas em uma planilha eletrônica¹ visando facilitar o seu uso mediante preenchimento dos dados de entrada N , M_{DI} , C_{RSU} , L_0 , k , T_f e $Créd_{CO_2}$.

¹ Disponível em: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1iUNCyr1uTyTOBh480loYl__grgpBH-dc9SffGy9s0uU/edit?usp=sharing

4.2 ESTUDO DE CASO

4.2.1 Aplicação do Método VADIR em uma área de disposição irregular de RSU

A seguir, apresenta-se os resultados da aplicação do método VADIR à área de disposição irregular de RSU descrita na seção 3.2.1 desse trabalho.

4.2.1.1 Valoração dos Custos de Controle (CC)

Partindo-se da Equação 11 e Equação 12, a parcela de custos de controle do método VADIR pode ser obtida a partir de dados primários e secundários.

O componente C_{RSU} , custo médio com manejo adequado de RSU por tonelada, foi obtido a partir de dados secundários disponíveis no SNIS. Considerando os dados do SNIS para o ano base de 2021, os custos de manejo de RSU foram calculados a partir de valores médios para o território nacional, sabendo que:

- a) o custo com manejo adequado de RSU por habitante por ano (C_{PH}) foi de R\$ 147,44 em 2021;
- b) a massa coletada de RSU per capita foi de $0,99 \text{ kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ (M_{PC}).

Substituindo os valores de C_{PH} e M_{PC} na Equação 12, tem-se:

$$C_{RSU} = \frac{C_{PH}}{M_{PC} \cdot 365} \cdot 1000$$

$$C_{RSU} = \frac{147,44}{0,99 \cdot 365} \cdot 1000 = 408,02 \text{ R\$} \cdot \text{Mg}^{-1} \text{ ou } 0,408 \text{ R\$} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Já o componente M_{DI} , massa de RSU disposta de forma irregular, foi obtida a partir do histórico de disposições de resíduos informado no respectivo PRAD, que informava que eram dispostas aproximadamente 8,4 toneladas diárias de RSU no referido lixão. Considerando-se 365 dias por ano e 3 anos de disposições, a massa de RSU disposta irregularmente (M_{DI}) é dada por:

$$M_{DI} = 8,4 \cdot 365 \cdot 3 = 9.198 \text{ Mg}$$

Dessa forma, a parcela dos custos de controle (CC) do método VADIR foi calculada pela Equação 11:

$$CC = C_{RSU} \cdot M_{DI}$$

$$CC = 408,02 \cdot 9.198$$

$$CC = R\$ 3.752.967,96$$

O valor calculado de 3.752.967,96 reais representa os custos de controle que o infrator deixou de gastar com o manejo correto da massa total de RSU disposta no lixão, considerando os valores médios nacionais publicados pelo SNIS para o ano de 2021.

4.2.1.2 Valoração do Dano Intercorrente por Emissões Atmosféricas (VDI_{EA})

Partindo-se da Equação 14 e Equação 24, a parcela de dano intercorrente por emissões atmosféricas do método VADIR também é obtida a partir de dados primários e secundários.

Para o cálculo da parcela relativa ao dano intercorrente por emissões atmosféricas (VDI_{EA}) são necessários os seguintes parâmetros: massa de RSU disposta irregularmente (M_{DI}), número de anos de funcionamento do sistema de disposições irregulares de resíduos (N), potencial de geração de metano (L_0), constante de decaimento da geração de metano (k), ano em que houve a regularização do passivo ambiental (T_f), a partir do ano em que foram findadas as disposições de resíduos, e valor do certificado de redução de emissões de gases de efeito estufa ($Créd_{CO_2}$).

A massa de RSU disposta irregularmente (M_{DI}) consiste no mesmo valor obtido no subitem anterior (9.198 Mg). O número de anos em que foram destinados resíduos à área de estudo (N) foi de três anos, conforme informações contidas no PRAD. Ao intervalo de tempo para a regularização do passivo ambiental (T_f), a partir do ano em que foram findadas as disposições de resíduos, foi atribuído o valor de três anos, conforme dados do histórico da disposição irregular de RSU, sendo suportado por outras fontes de informações como imagens históricas de sensoriamento remoto. Para os parâmetros k e L_0 foram utilizados dados empíricos observados no Brasil ($L_0 = 114,25$ e $k = 0,093$), de acordo com Santos, Romanel e Van Elk (2017).

Dessa forma, foram utilizados os seguintes dados de entrada para a composição do fator E_R :

$$M_{DI} = 9.198 \text{ Mg}$$

$$L_0 = 114,25 \text{ m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$$

$$k = 0,093 \text{ ano}^{-1}$$

$$N = 3 \text{ anos}$$

$$T_f = 3 \text{ anos}$$

Utilizando-se os dados de entrada na Equação 24, foi obtido um valor de E_R , representando o total de emissões resultantes de gases de efeito estufa decorrentes da disposição inadequada de resíduos sólidos desde o início de suas disposições até a regularização do passivo ambiental, conforme demonstrado abaixo:

$$E_R \cong M_{DI} \cdot \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{L_0}{e^k} - \frac{0,2039}{k \cdot e^{(0,035 \cdot N + k \cdot T_f)}} \right)$$

$$E_R \cong 9198 \cdot \left(2,20285 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{114,25}{e^{0,093}} - \frac{0,2039}{0,093 \cdot e^{(0,035 \cdot 3 + 0,093 \cdot 3)}} \right)$$

$$E_R \cong 7.357,38 \text{ MgCO}_{2e}$$

Já o componente $Créd_{CO_2}$, custo de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa, ou simplesmente créditos de carbono, foi obtido a partir de dados secundários baseado em mercados de comercialização de tais certificados.

No presente estudo de caso, para fins de precificação de gases de efeito estufa equivalentes a gás carbônico resultantes da operação do lixão, foi definido o valor de $Créd_{CO_2}$ a partir do valor do leilão do dia 30/04/2024 disponível em EEX (2024b), que consiste em 65,26 €/tCO_{2e} e representa R\$ 360,52 na mesma data (BCB, 2024b).

$$Créd_{CO_2} = 360,52 \text{ R\$} \cdot \text{MgCO}_{2e}^{-1}$$

Dessa forma, substituindo os valores de E_R e $Créd_{CO_2}$ na Equação 14 foi obtido o valor da parcela da Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas VDI_{EA} :

$$VDI_{EA} = E_R \cdot Créd_{CO_2}$$

$$VDI_{EA} = 7.357,38 \text{ MgCO}_{2e} \cdot 360,52 \text{ R\$} \cdot \text{MgCO}_{2e}^{-1}$$

$$VDI_{EA} = \text{R\$ } 2.652.501,10$$

Portanto, o valor de 2.652.501,10 reais representa a parcela referente ao dano intercorrente por emissões atmosféricas que o infrator causou enquanto o lixão esteve em funcionamento até a sua recuperação por meio da execução do PRAD.

4.2.1.3 Cálculo do VADIR

Obtidas as parcelas de Custo de Controle (CC) e Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas (VDI_{EA}), o cálculo do VADIR se dá pela aplicação da Equação 10, ou seja, pela simples adição das duas parcelas.

$$VADIR = CC + VDI_{EA}$$

$$VADIR = 3.752.967,96 + 2.652.501,10$$

$$VADIR = \text{R\$ } 6.405.469,06$$

Optou-se por apresentar a aplicação do método VADIR a partir das equações que representam as parcelas de Custo de Controle (CC) e Valoração do Dano Intercorrente por emissões atmosféricas (VDI_{EA}) para fins didáticos e para posterior discussão dos resultados. No entanto, o mesmo resultado teria sido obtido partindo-se diretamente da Equação 27, que sintetiza o método VADIR, e utilizando as variáveis de entrada para a aplicação do método proposto: massa de RSU disposta irregularmente (M_{DI}), custo médio com manejo adequado de RSU (C_{RSU}), número de anos de funcionamento do sistema de disposições irregulares de resíduos (N), intervalo entre o término das disposições de resíduos e a regularização do passivo ambiental (T_f), e valor do certificado de redução de emissões de gases de efeito estufa ($Créd_{CO_2}$).

$$VADIR = M_{DI} \cdot \left\{ C_{RSU} + \left(2,29325 - \frac{2,19247}{e^{(0,035 \cdot N + 0,093 \cdot T_f)}} \right) \cdot Créd_{CO_2} \right\}$$

$$VADIR = 9.198 \cdot \left\{ 408,02 + \left(2,29325 - \frac{2,19247}{e^{(0,035 \cdot 3 + 0,093 \cdot 3)}} \right) \cdot 360,52 \right\}$$

$$VADIR = R\$ 6.405.469,06$$

Logo, a valoração dos danos ambientais por disposições irregulares de RSU para o lixão objeto do estudo de caso através da aplicação do método VADIR, considerando a massa de resíduos total depositada ao longo de três anos e um intervalo de mais três anos até a recuperação da área, resultou em R\$ 6.405.469,06.

4.2.2 Aplicação de outros métodos de valoração ao estudo de caso

Buscando-se comparar os resultados obtidos a partir da metodologia proposta (VADIR) com outros métodos de valoração, foram aplicados à mesma área de disposição irregular de RSU, descrita na seção 3.2.1, os métodos: custos de reposição, VERD e DEPRN, além dos métodos propostos por publicações de orientação técnica do MPMS e MPMT, todos detalhados na seção 2.3.1 desse trabalho.

4.2.2.1 Método do Custo de Reposição

O PRAD apresentado no requerimento de licença ambiental corretiva para reparação dos danos ambientais do lixão objeto do presente estudo de caso continha um orçamento para a recuperação do passivo ambiental. Esse valor foi corrigido para a data de março de 2024, utilizando-se como índice de correção o Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA/IBGE (BCB, 2024a), sendo obtido o custo de reposição de R\$ 220.725,74.

4.2.2.2 Método VERD

Os valores intangíveis atribuídos ao estudo de caso para aplicação do método VERD (CARDOSO, 2003) são apresentados no Quadro 4.

Sabendo que a área do estudo de caso se tratava de uma antiga cava de mineração, considerou-se que o meio biótico teria sido impactado pela atividade

anterior à disposição irregular de resíduos sólidos urbanos. Dessa forma, foram atribuídos níveis baixos ou inexistentes aos impactos aos estratos vegetais. Também poderia ser considerado que a disposição irregular de resíduos impediu a regeneração natural da vegetação, algo condizente com o art. 48 da Lei de Crimes Ambientais, bem como o restabelecimento dos reinos monera, protista, fungi e animal, mas não fica claro se essa seria uma abordagem possível e preferiu-se não a adotar.

O custo de recuperação para o estudo de caso é igual a R\$ 220.725,74 (q_n) e o somatório dos valores intangíveis (i_n) é de 32, logo, conforme Equação 3:

$$VERD = \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} i_n$$

$$VERD = 220.725,74 \cdot 32$$

$$VERD = R\$ 7.063.223,68$$

Portanto, a valoração econômica dos danos ambientais por disposições irregulares de RSU calculada pelo método VERD para o estudo de caso foi de R\$ 7.063.223,68.

Quadro 4 – Valores intangíveis para o estudo de caso.

Ambiente	Variáveis intangíveis	Impacto					
		Curto Prazo*					Médio/Longo Prazo**
		in	0 Sem	1 Baixo	2 Médio	3 Alto	4
Físico	Ar	i1				x	
	Água	i2					x
	Solo/sedimentos	i3					x
Biótico: Reino Monera	Bactérias e cianobactérias	i4		X			
Reino Protista	Protozoários	i5		X			
Reino Fungi	Cogumelos	i6		X			
Reino Animal	Invertebrados	i7		X			
	Vertebrados	i8		X			
Reino das Plantas	Estrato arbóreo	i9	X				
	Estrato arbustivo	i10		X			
	Estrato herbáceo	i11		X			
Antrópico	Social	i12				X	
	Paisagístico	i13					X
	Perdas econômicas intangíveis	i14				X	
	Bem-estar	i15					X
TOTAL		32					

*duração de dias

**duração de meses a anos

Fonte: adaptado de Cardoso (2003).

4.2.2.3 Método DEPRN

Segundo Oliveira (2019), a partir de um estudo de caso em três locais de disposição desordenada de resíduos sólidos, os principais impactos ambientais associados a tais intervenções consistem em alteração da qualidade de recursos hídricos, do solo, do ar e impactos sobre a saúde humana. Sob essa ótica os aspectos ambientais impactados selecionados para compor o cálculo de valoração foram: atmosfera, água, solo e paisagem. Por se tratar de uma área que era previamente utilizada para disposição de rejeito de mineração, sem cobertura de vegetação, os aspectos fauna e flora não foram selecionados.

Para cada um dos aspectos foram selecionados os agravos e o tipo de dano pertinentes ao estudo de caso. A qualificação dos agravos foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos no Anexo A. Os valores atribuídos aos agravos, o tipo de dano e o índice de qualificação dos agravos são apresentados na Quadro 5.

Quadro 5 – Aplicação do método DEPRN ao estudo de caso.

Quadro 6 – Aplicação do método DEL-RN ao estudo de caso.						
Aspecto	Tipo de dano (A)	Descrição e qualificação dos agravos	Qualificação de agravos (B)	Índice de qualificação dos agravos (C = A x ΣB)		
Atmosfera	Impacto causado pela emissão de gases, partículas, agentes biológicos, energia (x1,0)	Toxicidade da emissão	2	2		
Água	Impacto causado por compostos químicos, físicos, biológicos, energia (x1,0)	Toxicidade da emissão	2	4		
		Comprometimento do aquífero	2			
Solo	Impacto causado por compostos químicos, físicos, biológicos, energia (x1,0)	Toxicidade da emissão	2	4	13	
		Comprometimento do aquífero	2			
	Impactos na dinâmica solo/subsolo (x1,5)	Alteração na capacidade de uso da terra	1	9		
		Dano ao relevo	3			
		Previsão de reequilíbrio	2			
Paisagem	Dano à paisagem (x1,0)	Proximidade de centros urbanos	1	4		
		Reversão do dano	2			
		Comprometimento do Solo ou subsolo	1			

Fonte: adaptado de Galli (1996).

A partir do valor do índice de qualificação dos agravos, identificou-se o fator multiplicador dos aspectos considerado na valoração, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Fator multiplicador de acordo com o índice de qualificação dos agravos.

Aspecto	Intervalo do índice de qualificação dos agravos				
Atmosfera	$\leq 6,8$	$\leq 13,6$	$\leq 20,4$	$\leq 27,2$	$\leq 34,0$
Água	$\leq 7,2$	$\leq 14,4$	$\leq 21,6$	$\leq 28,8$	$\leq 36,0$
Solo	$\leq 7,5$	$\leq 15,0$	$\leq 22,5$	$\leq 30,0$	$\leq 37,5$
Paisagem	$\leq 8,0$	$\leq 16,8$	$\leq 24,0$	$\leq 32,0$	$\leq 40,0$
Fator multiplicador	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6

Fonte: adaptado de Galli (1996).

Logo, os fatores multiplicadores considerados para cada aspecto ambiental foram:

- a) Fator multiplicador da atmosfera = 1,6; pois $\Sigma_{atmosfera} = 2$
- b) Fator multiplicador da água = 1,6; pois $\Sigma_{água} = 4$
- c) Fator multiplicador do solo = 3,2; pois $\Sigma_{solo} = 13$
- d) Fator multiplicador da paisagem = 1,6; pois $\Sigma_{paisagem} = 4$

O somatório dos fatores de cada agravo foi multiplicado pelo valor de recuperação, conforme Eq. 5. Considerando o valor de recuperação igual a R\$ 220.725,74, tem-se para o estudo de caso:

$$DEPRN = [\Sigma(\text{fator de multiplicação})] \cdot \text{valor de recuperação}$$

$$DEPRN = (1,6 + 1,6 + 3,2 + 1,6) \cdot 220.725,74$$

$$DEPRN = \text{R\$ } 1.765.805,92$$

A valoração econômica dos danos ambientais por disposições irregulares de RSU calculada pelo método DEPRN para o estudo de caso foi de R\$ 1.765.805,92.

4.2.2.4 Método do MPMS

O método do MPMS, diferentemente dos dois primeiros, utiliza como dados de entrada os custos de construção e operação de uma solução alternativa legalmente aceita para a disposição de resíduos sólidos, ou seja, considera os custos de construção e operação de aterros sanitários.

Para aplicação do método proposto pela publicação de orientação técnica do MPMS são necessários como dados de entrada: (i) custos de construção de aterros sanitários; (ii) custos de operação de aterros sanitários e (iii) fatores de correção monetária por inflação e custo de oportunidade (MATO GROSSO DO SUL, 2021).

Para definição dos custos de construção e de manutenção de aterros sanitários foram utilizados os valores estimados pelo BNDES (2014), em função da geração de resíduos diária. Para a aplicação do método de forma conservadora e buscando-se uma melhor eficiência em função do ganho de escala, foi considerado que a geração de 8,4 toneladas diárias seria parte de uma solução consorciada hipotética de grande porte que processasse 2.000 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos. Ou seja, com essa consideração, o município com geração de 8,4 toneladas diárias teria uma participação (F_p) de 0,42% nos custos de construção e manutenção da solução consorciada. Dessa forma, os custos de construção (VC) e manutenção/operação (VM) considerados para a área do estudo de caso foram:

$VC = R\$ 34.760.000,00$ com ano-base 2014 e considerando o consórcio hipotético com capacidade de 2.000 toneladas diárias;

$VM = R\$ 115.373.513,00$ com ano-base 2007 e considerando um quarto do custo de operação de uma célula de 4 anos do consórcio hipotético com capacidade de 2.000 toneladas diárias.

Conforme indicado na metodologia, os custos de construção e operação foram deflacionados pelo IPCA até o ano 2000, considerado como ano de início da disposição de resíduos; e posteriormente capitalizados a valor presente pelo custo de oportunidade, considerando-se a remuneração da caderneta de poupança. Para as correções monetárias foram considerados os índices obtidos da Calculadora do Cidadão (BCB, 2024a).

A aplicação da metodologia resultou em um valor total do dano ambiental (VT) de R\$ 5.240.277,95.

4.2.2.5 Método do MPMT

O método do MPMT utiliza como dados de entrada a área de intervenção e fatores multiplicadores fixos dependentes apenas se a intervenção está ou não inserida em áreas protegidas. A área do estudo de caso é de 15.500m² e as intervenções não estavam inseridas em área protegida.

$$MPMT = \text{Área Total} \cdot 73,08 + \text{Área Protegida} \cdot 18,14$$

$$MPMT = 15.500 \cdot 73,08 + 0 \cdot 18,14$$

Logo, a valoração econômica dos danos ambientais por disposições irregulares de RSU calculada pelo método do MPMT para o estudo de caso foi de R\$ 1.132.740,00.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

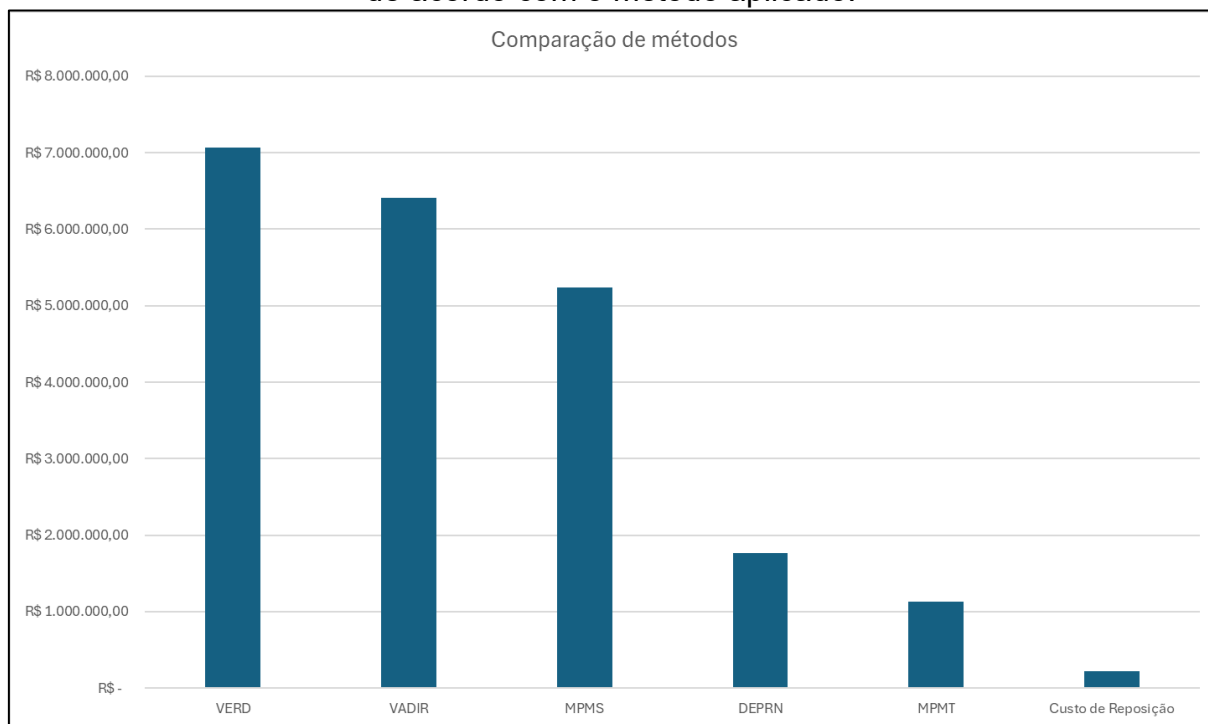
4.3.1 Comparação dos métodos utilizados

Os resultados da valoração econômica do dano ambiental para a área objeto do estudo de caso obtidos pelas diferentes metodologias aplicadas, bem como sua estatística descritiva, são demonstradas na Tabela 6 e Figura 10.

Tabela 6 – Resultados da valoração econômica do dano ambiental para a área objeto do estudo de caso.

Método	Valoração do dano (R\$)	Desvio absoluto (R\$)	Desvio relativo (%)
VADIR	6.405.469,06	2.767.428,69	76,1
Custo de Reposição	220.725,74	3.417.314,64	93,9
DEPRN	1.765.805,90	1.872.234,48	51,5
VERD	7.063.223,59	3.425.183,21	94,1
MPMS	5.240.277,95	1.602.237,58	44,0
MPMT	1.132.740,00	2.505.300,37	68,9
Média	3.638.040,37		
Mediana	3.503.041,93		
Desvio padrão	2.946.779,19		
Desvio absoluto médio		2.598.283,16	
Coeficiente de variação	71,4%		

Figura 10 – Comparação dos resultados da valoração econômica do dano ambiental de acordo com o método aplicado.



Fonte: elaborado pela autora.

O valor da mediana dos resultados obtidos foi de R\$ 3.503.041,93, média de R\$ 3.638.040,37, desvio padrão de R\$ 2.946.779,19 e coeficiente de variação de 71,4%. O elevado coeficiente de variação indica uma alta variabilidade entre os resultados obtidos quando da aplicação dos diferentes métodos.

Observa-se que métodos mais simplificados, que aplicam diretamente os custos de recuperação da área (custo de reposição e material de orientação técnica do MPMT) apresentaram valores próximos a um desvio padrão abaixo da média do conjunto de métodos utilizados. O método indicado pelo MPMS apresentou menor desvio absoluto em relação à média, no entanto, considera apenas os custos de controle. O método VADIR, por considerar parte do dano intercorrente adicionado aos custos de controle apresentou resultado superior ao da aplicação do método proposto pelo MPMS, como esperado.

Apesar da valoração do dano ambiental utilizando apenas os custos de reposição ter ampla utilização em perícias oficiais (MAGLIANO, 2013), foi também a que apresentou o menor valor entre os métodos aplicados. Isso pode indicar que o uso de qualquer um dos outros métodos utilizados no estudo de caso é preferível para evitar subestimar o dano, já que nenhum deles considera todas as parcelas do VERA.

Os impactos causados por disposições irregulares de resíduos sólidos dependem das condições específicas do local e do seu entorno. Diversos problemas podem estar associados a essa atividade poluidora, como: instabilidade do maciço, contaminação do solo e da água subterrânea, poluição das águas superficiais pelo lixiviado lançado sem tratamento, poluição do ar, limitações ao uso futuro da área e do entorno, entre outros impactos (BRASIL, 2022c).

Logo, as medidas necessárias para recuperação dessa área variam de acordo com os impactos identificados e as características específicas do local e podem incluir atividades como: isolamento da área, recobrimento da massa de resíduos e plantio de gramíneas, conformação do maciço de resíduos, implantação de sistema drenagem superficial, tratamento do lixiviado e das emissões atmosféricas, avaliação ambiental preliminar e investigação confirmatória para identificação de contaminação, análise de risco à saúde humana, implantação de medidas de remediação da contaminação quando necessárias e plano de monitoramento ambiental (BRASIL, 2021b; BRASIL, 2022c).

A proposição de um plano de recuperação é uma tarefa complexa, demanda tempo e exige o envolvimento de profissionais qualificados e experientes na elaboração de diagnósticos precisos e definição das alternativas mais adequadas. As despesas relacionadas com todas as etapas para elaboração e execução do plano de recuperação compõem os custos de reposição e, quando são desconhecidos, é necessário estimá-los para usá-los em métodos de valoração que deles dependam. Essa estimativa pode ser incompatível com a realidade pericial que exige métodos de rápida execução e baixo orçamento.

Segundo Raupp (2013), a perícia muitas vezes realiza apenas uma campanha amostral em casos de crime de poluição, o que poderia trazer resultados que superestime, subestime ou até mesmo não identifique o dano real. Essa prática seria insuficiente para propor um valor fidedigno aos custos de reposição necessários para recuperação de uma área degradada por disposição de resíduos sólidos.

Para a área do estudo de caso os custos de reposição eram conhecidos, mas isso nem sempre é a realidade que se apresenta. Além disso, o PRAD proposto não considera ações importantes para recuperação de áreas degradadas por disposições de resíduos descritas anteriormente, embora esse plano tenha sido aprovado pelo órgão ambiental competente, de forma corretiva, quando já executado. Logo, pode-se dizer que os custos de reposição estão subdimensionados, o que impacta nos

resultados da valoração do dano ambiental calculada pelos métodos dos custos de reposição, VERD e DEPRN.

Notou-se uma dificuldade em usar métodos como VERD e DEPRN, pois, apesar da simplicidade, exigem experiência do usuário e conhecimento dos impactos nos meios bióticos, físico e social para uma correta escolha dos fatores multiplicadores e parâmetros de forma a evitar o super ou subdimensionamento da valoração. Além da escolha dos fatores multiplicadores ser complexa, muitas vezes pode não contemplar a realidade de um caso prático.

Em relação ao método VERD, Cordioli (2013) relatou a dificuldade em utilizá-lo por prever apenas um quantificador para impactos de longo prazo. Dessa forma, não há uma diferença entre um impacto que pode durar por décadas, como comumente acontece em casos de lixões e aterros controlados, daqueles que ocorrem por alguns meses. Exige-se também um conhecimento amplo dos meios físico, biótico e antrópico para selecionar os impactos às variáveis intangíveis, o que seria melhor avaliado por uma equipe multidisciplinar, diferente do que ocorre em perícias oficiais muitas vezes realizadas por um único profissional.

Ficou evidente que a valoração realizada pelos métodos VERD e DEPRN apresenta maior sensibilidade às escolhas do usuário, logo, os resultados obtidos para um mesmo caso podem ser diferentes a depender de quem esteja aplicando o método, já que os critérios nem sempre são claros ou podem não ser aplicáveis a um caso prático.

Cotrim (2012) descreveu a dificuldade em relacionar o dano ao aspecto ao aplicar o método DEPRN. No caso do dano “comprometimento do aquífero” poderia estar relacionado tanto à contaminação do solo quanto à contaminação da água. Nesse caso, tanto para o aspecto água quanto para o aspecto solo os valores de critérios de qualificação dos agravos são os mesmos e, segundo o autor, os resultados não estariam errados caso fosse considerado um em detrimento do outro, mas esta análise só estaria correta se a fonte poluidora ou o impacto calculado fossem os mesmos. A mesma dificuldade relatada pelo autor foi encontrada ao aplicar o método DEPRN para o caso de disposição irregular de resíduos sólidos.

Outro ponto destacado por Cotrim (2012) é que os métodos VERD e DEPRN utilizam o valor de recuperação do ambiente afetado e, portanto, o cálculo da valoração pode não considerar os danos não mensurados pelos valores de recuperação. Apontadas as dificuldades, pode-se dizer que o verdadeiro limitador

desses dois métodos é o conhecimento dos custos de recuperação, já que sem eles sua aplicação é inviabilizada. Dito isso, as outras dificuldades podem ser contornadas pela experiência do usuário quanto às características do dano a ser valorado e dos seus impactos nos diferentes aspectos ambientais, podendo ser utilizado para os casos de disposição inadequada de resíduos sólidos.

O método proposto pelo Material de Orientação Técnica para Valoração de Danos Ambientais do MPMT considera a soma dos valores de compensação ambiental e os custos para retirada dos resíduos dispostos irregularmente. Sabendo que o lixão objeto do estudo de caso não está inserido em áreas protegidas, a valoração por esse método se limitou ao cálculo dos custos para remoção dos resíduos e, por isso, teve o segundo menor valor para o dano da disposição irregular de RSU entre as metodologias aplicadas.

De forma similar ao método VADIR, a Nota Técnica de Valoração de Dano Ambiental do MPMS propõe a valoração dos danos causados por disposições irregulares de RSU baseada nos custos de controle. No entanto, o primeiro considera os custos com manejo adequado de RSU enquanto o segundo considera os custos necessários para construção e operação de um aterro sanitário estimados pelo BNDES.

Aplicando o método proposto na Nota Técnica de Valoração de Dano Ambiental do MPMS para a área objeto do estudo de caso, obteve-se o valor de R\$ 5.240.277,95 calculado a partir dos custos necessários para construção e operação de um aterro sanitário estimados pelo BNDES. Considerando apenas a parcela dos custos de controle do método VADIR, ou seja, os custos com manejo de RSU por tonelada, o valor calculado seria de R\$ 3.752.967,96 para a mesma área. Logo, a valoração a partir dos custos de controle proposta pelo MPMS foi superior à parcela correspondente do método VADIR.

No entanto, diferente do método VADIR, a valoração proposta pelo MPMS não considera o dano intercorrente entre o início da disposição irregular de resíduos e a recuperação da área. Isso faz com que a soma das parcelas do método VADIR referente aos custos de controle e dano intercorrente tenha alcançado valor superior ao calculado conforme a Nota Técnica do MPMS para a área objeto do estudo de caso.

Pode-se dizer que seria possível substituir os custos de manejo de RSU pelos custos necessários para construção e operação de um aterro sanitário estimados pelo

BNDES na parcela referente aos custos de controle do método VADIR. Quanto a isso, faz-se alguns adendos:

- (i) essa substituição é mais coerente em casos de grandes geradores, como municípios que destinam seus resíduos a lixões e aterros controlados. Nesse caso, é necessário avaliar o porte do aterro sanitário para o qual o município destinaria seus resíduos. Dessa forma, recomenda-se considerar o custo por tonelada do aterro de maior porte e, por consequência, de menor custo, por se tratar de uma abordagem mais conservadora e menos passível de questionamentos em ações judiciais;
- (ii) a substituição faz menos sentido quando o dano for causado por pequenos geradores, já que a construção de um aterro sanitário não seria uma solução adotada nesse caso. Ao utilizar os custos com manejo de RSU como custos de controle, abrange-se outros tipos de infratores além das autoridades municipais responsáveis pelos serviços públicos de gestão de resíduos sólidos;
- (iii) a atualização dos custos de controle do método proposto pelo MPMS é realizada por meio de um índice de correção monetária que não necessariamente capta as variações ao longo do tempo das despesas para instalação e operação de um aterro sanitário. Esses custos podem variar em função de outros fatores não contemplados apenas por um índice de correção monetária, como a futura escassez de áreas para esse tipo de atividade. Dessa forma, entende-se que os custos com manejo de RSU por tonelada têm maior probabilidade de se manterem atualizados ao longo do tempo por serem informados pelos municípios anualmente ao SNIS/SINISA.

Para o estudo de caso, o método VADIR mostrou-se de fácil aplicação, principalmente por não depender de um diagnóstico aprofundado da área, e, ainda assim, apresentou o segundo maior valor para o dano, ficando abaixo apenas da valoração realizada pelo método VERD.

A escolha do método de valoração a ser utilizado depende do caso concreto. Diante da diversidade de métodos disponíveis, fica a critério do perito a seleção daquele mais adequado para a análise pretendida e que disponha de todos os dados necessários para sua aplicação, devendo especificar no laudo pericial “a indicação do método utilizado, esclarecendo-o e demonstrando ser predominantemente aceito

pelos especialistas da área do conhecimento da qual se originou” (BRASIL, 2015, art. 473, III), conforme determina o Código de Processo Civil, de 2015, aplicado subsidiariamente a outras áreas do direito na ausência de normas que as regulem (BRASIL, 2015, art. 15).

Sabendo disso e considerando que os métodos aplicados ao estudo de caso se mostraram adequados para mensurar o dano ambiental causado por disposições irregulares de RSU, elaborou-se o Quadro 6 que resume as vantagens e limitações desses métodos, observadas e discutidas nessa seção, de forma a auxiliar na escolha daquele que melhor se adequa ao objeto da valoração, ao seu objetivo, às informações disponíveis e ao conhecimento do usuário.

Quadro 6 – Comparação qualitativa entre os diferentes métodos aplicados.

	VADIR	Custo de Reposição	VERD	DEPRN	MPMS	MPMT
Considera os valores de existência e de opção?	Não	Não	Não	Não	Não	Não
É específico para danos por disposições de resíduos sólidos?	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim
Considera o dano intercorrente?	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Capacidade de se manter atualizado monetariamente?	Sim	Depende de correção monetária	Depende de correção monetária	Depende de correção monetária	Depende de correção monetária	Depende de correção monetária
Depende de dispor de custo de reposição?	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Dependência de ponderações do usuário	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: elaborado pela autora.

4.3.2 Quanto ao Método VADIR

Landmann, Ribeiro e Deák (2007) propuseram um método para valoração monetária da poluição do ar baseado em custos de controle das emissões veiculares. Segundo eles, os métodos tradicionais utilizados nas análises de viabilidade de projetos de transportes se baseiam em custos de saúde e envolvem várias etapas de

cálculo e imprecisões, sendo considerados complexos e onerosos. Ao optar pelo uso dos custos de controle no método VADIR, pode-se observar os mesmos benefícios em relação à facilidade de aplicação observados por esses autores, substituindo análises mais dispendiosas.

Em seu livro sobre economia ambiental, Motta (2006) discute propostas de instrumentos econômicos ambientais para redução do lixo urbano e o aproveitamento de sucatas no Brasil. Segundo o autor, o benefício líquido social do aproveitamento pode ser definido, entre outras variáveis, em termos dos gastos atuais e efetivos de coleta, transporte e disposição final (GCD) e dos danos ambientais da má coleta e disposição dos resíduos urbanos (CA). O primeiro, poderia ser estimado com base em informações de empresas de limpeza pública, enquanto o segundo:

Para calcular CA, por outro lado, não existem informações disponíveis que permitam uma estimativa consistente dos impactos ambientais. Entretanto, uma estimativa pode ser calculada com base no quanto ainda se precisaria gastar para implementar um sistema ideal de coleta e disposição ideal de lixo que minimizasse estes impactos. Isso significa encontrar um valor que reflita exatamente o montante de gastos públicos exigidos por um sistema ideal de resíduos sólidos para se evitar qualquer dano ambiental (MOTTA, 2006).

Ao adotar os custos nacionais com manejo adequado de RSU por tonelada divulgados pelo SNIS/SINISA como custos de controle do método VADIR buscou-se refletir o “montante de gastos públicos exigidos por um sistema ideal de resíduos sólidos para se evitar danos ambientais”, em consonância com os conceitos apresentados por Motta (2006).

No Brasil ainda não existe um mercado regulado de negociação de créditos de carbono, até o momento existe apenas um mercado voluntário com um baixo volume de negociações frente ao seu potencial (BANCO DO BRASIL, 2023). Ao redor do mundo existem diferentes mercados de carbono, tanto voluntários como sistemas de comércio de emissões regulados. Dentre os sistemas de comércio de emissões regulados destacam-se em volumes de negociação o da União Europeia e da Califórnia e Québec (FGV, 2024).

Entre os diversos mercados de carbono existem importantes diferenças de precificação dos créditos de carbono. Como exemplo, cita-se que no sistema de comércio de emissões do mercado europeu tais créditos eram comercializados ao preço médio de US\$ 87,19 em 2022, ao passo que no mercado norte americano eram comercializados ao preço médio de US\$ 30,00 no mesmo período. Enquanto isso, no

mesmo ano, na América Latina e Caribe o valor médio de negociação de créditos de carbono nos mercados voluntários foi de US\$ 7,00.

É importante destacar que atualmente não se pode falar em um preço universal para as reduções de emissões, pois tais valores dependem do local, das normas vigentes no período, dos compromissos assumidos pelos países e organizações, bem como da oferta e demanda de tais créditos. Contudo, é notável que na maioria dos mercados os créditos de carbono apresentaram uma tendência de valorização a partir de 2016 (FGV, 2024), o que se atribui às expectativas resultantes da 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, de Paris.

Diante da inexistência de um valor de referência absoluto para os preços de comercialização de créditos de carbono, no presente trabalho foi selecionado como referência de preço de comercialização aquele do sistema de comércio de emissões da União Europeia, dada a disponibilidade de dados e relevância em termos de volumes negociadas. Convém destacar que a opção por diferentes fontes de valores de precificação de créditos de carbono poderia resultar em uma valoração dos danos intercorrentes por emissões atmosféricas (VDI_{EA}) materialmente diferente quando da aplicação do método proposto.

Ando e Khanna (2004) destacam que os métodos de valoração simplificados e de baixo custo podem desempenhar um papel pertinente na redução dos custos sociais associados aos danos aos recursos ambientais, tornando-se ferramentas importantes à disposição quando não há condições ou motivos para aplicar métodos dispendiosos. Diante disso, os autores propõem diretrizes para o desenvolvimento e avaliação de métodos de baixo custo. Vieira (2013) utilizou alguns desses critérios para avaliar a sua adaptação do método do custo de reposição desenvolvido para uso na perícia criminal ambiental. Os critérios propostos por Ando e Khanna (2004) são:

- Simplicidade: o método deve ser barato, fácil de entender e rápido de aplicar. Idealmente, não deveria exigir experiência para sua utilização, já que muitas vezes os órgãos públicos não dispõem de técnicos especializados que possam aplicar métodos mais sofisticados, como o de equivalência de habitat;
- Transparência: o conceito deve ser claro e a escolha dos parâmetros utilizados deve ser especificada;

- Proporcionalidade: a estimativa da valoração deve variar proporcionalmente de acordo com a magnitude do dano;
- Reconhecimento legal: a efetividade do método será aumentada quando reconhecido legalmente na esfera estadual ou federal;
- Valor presente líquido calculado adequadamente: considerando que os danos aos recursos ambientais podem se estender por longos períodos de tempo, a atualização monetária deve ser considerada e calculada corretamente;
- Valores de uso e de não-uso: as estimativas devem refletir os valores de uso e de não-uso dos recursos. A não contabilização dessas duas parcelas poderá levar à subestimação da valoração do dano;
- Características socioeconômicas da população afetada: a estimativa do dano deve variar entre áreas, dependendo do tamanho da população afetada e das suas preferências e disposição a pagar pelos recursos nessas áreas.

Considerou-se pertinente avaliar o método VADIR conforme os critérios propostos por Ando e Khanna (2004) por se tratar de um método simplificado e de baixo custo. O método proposto objetiva a simplicidade, tornando-o passível de utilização em perícias judiciais. Os dados primários necessários para sua aplicação podem ser obtidos a partir de levantamento de campo e documental, compatíveis com a rotina pericial, enquanto os dados secundários são gratuitos e de fácil acesso, o que o torna de rápida aplicação e de baixo custo. Além disso, não necessita de avaliações ambientais complexas e a definição de parâmetros a serem considerados, como ocorre nos métodos DEPRN e VERD. Ou seja, dispensa análises qualitativas e conhecimento multidisciplinar, tornando-o de fácil entendimento e simples utilização.

Os conceitos que embasam o método são claros e objetivos. O uso de custos de controle para valoração de danos ambientais encontra suporte na literatura científica, e é embasado em preços de mercado. O dano intercorrente é baseado em um conceito jurídico e necessário ao analisar danos de longa duração. Os dados secundários utilizados são abertos e de ampla divulgação. Portanto, pode-se dizer que o método é transparente.

A mensuração do dano a partir do método proposto é proporcional à massa de RSU disposta incorretamente e ao tempo em que ocorreu o aporte de resíduos e

em que a massa de resíduos emitiu gases de efeito estufa. Logo, quanto maior a massa e o tempo transcorrido, maior a magnitude do dano e maior o valor obtido por VADIR. Portanto, a estimativa da valoração varia proporcionalmente de acordo com a magnitude do dano.

A valoração econômica a partir de custos de controle se ancora também no princípio do poluidor-pagador, já que representa um benefício econômico auferido pelo poluidor ao deixar de arcar com os ônus para evitar ou reduzir a poluição gerada pela atividade; e no princípio da prevenção a partir de investimentos em medidas de controle, infraestrutura e tecnologia que não foram realizados para prevenir riscos concretos. Considerando se tratar de um método congruente com os princípios norteadores do direito ambiental, pode-se esperar sua aceitação no âmbito jurídico. O uso dos custos de controle e do dano intercorrente também se justifica por seu caráter objetivo e de fácil compreensão, o que torna o método acessível ao entendimento dos operadores do direito, independentemente de conhecimentos ambientais específicos.

Os dados secundários necessários para aplicação do método são atualizados naturalmente ao longo do tempo, dispensando índices de correção monetária. Os custos com manejo adequado de RSU devem ser recuperados pela cobrança pelo uso dos serviços públicos desde 2021, conforme determinado pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (BRASIL, 2007, art. 29, alterado por BRASIL, 2020a). O sistema de cálculo dos custos relacionados com os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e a respectiva forma de cobrança é um dos conteúdos obrigatórios dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b, art. 19, XIII), além de ser um instrumento de gestão importante, citado como meta e indicador no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) (BRASIL, 2022d), o que significa que terá importância e divulgação nos próximos anos. Em função disso, pode-se esperar que o cálculo dos custos relacionados com os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos tenda a ser mais preciso à medida que cada vez mais municípios iniciem a cobrança desse tributo e o declarem ao SNIS/SINISA. Também é esperado que, à medida que os custos com manejo de resíduos aumentem, a cobrança por esse serviço também aumente, o que atualizaria os custos de controle do método VADIR, conforme a realidade praticada.

Quanto aos valores de negociação de certificados de redução de emissões, por serem negociados em leilões, tendem a refletir a intersecção da disposição a pagar e da disposição a receber por projetos de redução de emissões de gases de

efeito estufa e, com o passar do tempo, expressarão a oscilação dos custos necessários para implantação desses projetos, bem como, refletirão a variação do valor atribuído da sociedade por esses serviços ambientais disponibilizados. Dessa forma, a parcela referente aos danos intercorrentes por emissões atmosféricas do Método VADIR se manterá atualizada monetariamente.

Segundo Motta (1997), devido a possibilidade de esgotamento, o valor dos recursos ambientais tende a crescer no tempo e há uma complexidade em estimar a escassez futura de um recurso ambiental e traduzi-la em um valor monetário. Ao optar pelo uso dos custos municipais com coleta, transporte e destinação final de RSU e pelo uso dos valores de comercialização de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa espera-se que os valores sejam atualizados ao longo do tempo à medida que haja oscilações nos seus custos adjacentes e na disposição a pagar da sociedade em relação a esses serviços. Dessa forma, é possível captar a escassez de recursos ambientais e o aumento de custos para utilizá-los, bem como a percepção de valor da sociedade associada a eles.

O método VADIR não é capaz de estimar os valores de não-uso dos recursos devido à dificuldade em definir o valor de existência e, ainda assim, se manter convergente com a realidade pericial. Dessa forma, os valores obtidos pelo método podem ser considerados valores iniciais do dano ambiental. É importante salientar que a metodologia proposta pode ser conjugada a outros métodos de valoração para mensurar parcelas não consideradas do VERA, bem como danos não valorados pelo método VADIR.

Ainda que o método considere indiretamente o tamanho da população afetada, já que a massa de resíduos disposta incorretamente é dependente do tamanho da população que teve seus resíduos destinados para essa área, é somente parcialmente capaz de captar preferências e disposição a pagar pelos recursos. De forma ampla, pode-se dizer que os custos com manejo de RSU, refletidos no tributo correspondente à taxa de lixo, podem demonstrar a disposição a pagar da população por esses serviços. Enquanto, os preços de comercialização de créditos de carbono podem refletir a disposição a pagar pela compensação das emissões de gases de efeito estufa ou da disposição a receber pelo desenvolvimento de projetos que realizem a captura de carbono. No entanto, de forma local as preferências não são reveladas.

5 CONCLUSÃO

O método VADIR foi desenvolvido especialmente para valorar economicamente os danos ambientais causados por disposições inadequadas de RSU e, ainda, apresentar características de fácil aplicação, baixo custo, rápida execução e não exigir vasto conhecimento ambiental para sua utilização, buscando respeitar as limitações do uso da valoração econômica ambiental no âmbito judicial.

Os métodos VADIR, VERD, DEPRN, de custos de reposição e aqueles propostos pelos materiais de orientação técnica do MPMS e MPMT foram aplicados para valorar monetariamente o dano ambiental em uma área que abrigava um lixão desativado. O método VADIR apresentou o segundo maior valor para o dano ambiental pela disposição irregular de RSU, sendo inferior apenas à valoração realizada pelo método VERD. Com relação aos demais métodos, apresentou resultado 22,2% superior ao valor obtido pelo método sugerido pelo MPMS e mais de três vezes superior à valoração resultante dos métodos DEPRN, MPMT e custos de reposição.

O método dos custos de reposição, comumente utilizado em periciais ambientais, foi o que apresentou a menor valoração monetária quando aplicado à área do estudo de caso. Isso pode demonstrar que os outros métodos selecionados são preferíveis para valorar os danos causados por disposições inadequadas de resíduos sólidos de forma a evitar subestimar a valoração, especialmente pelo fato de que todos os métodos utilizados desconsideram os valores de opção e de existência do VERA e, portanto, já apresentam valores mínimos para o dano ambiental.

Ao contrário da maior parte dos métodos de valoração utilizados no âmbito pericial, o método VADIR não se baseia no custo de reposição e, portanto, se apresenta como uma alternativa quando esse valor não é conhecido ou é de difícil mensuração. Nesse sentido, o método proposto pode ser aplicado em qualquer caso de disposição irregular de RSU, não depende de dados de entrada que exijam profundo conhecimento das características da área e do dano a ser valorado, tornando-se uma alternativa metodológica aos métodos baseados em custos de reposição e, ainda assim, adaptado à realidade pericial de baixo orçamento, alta demanda e prazos legais exíguos.

Uma das vantagens de aplicação do Método VADIR são os dados necessários para sua utilização serem de fácil obtenção. Os dados primários das características

da disposição irregular de RSU podem ser levantados durante a realização da perícia. Enquanto os dados secundários referentes aos custos médios com manejo adequado de RSU são divulgados anualmente pelo SNIS e os valores de negociação de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa são de acesso público.

Diferente dos métodos que utilizam fatores multiplicadores, como os métodos VERD e DEPRN, o método VADIR não depende de ponderações e julgamentos pessoais. Por se tratar de um método objetivo, apresenta pouca dependência de avaliações qualitativas do perito ou usuário e demonstra de forma clara como foi realizado o cálculo do valor econômico do dano ambiental. Dessa forma, pode ser considerado um método transparente, o que reduz as possibilidades de questionamentos quanto a sua validade e, portanto, ideal para ser usado no âmbito judicial.

Apesar de ser um método específico, por se destinar a valorar um único tipo de dano, o Método VADIR pode ser considerado abrangente, já que pode ser usado em condições ambientais variadas. Além disso, pode ser usado em conjunto com outros métodos, caso seja necessário mensurar danos não valorados por VADIR.

O método proposto valora economicamente o dano intercorrente, essencial para casos em que a degradação da qualidade ambiental se perdura por longo período. Considerando que mesmo após deixarem de receber novas contribuições, as disposições irregulares de resíduos continuam sendo uma fonte de poluição atmosférica, a parcela referente ao dano intercorrente foi valorada sob a ótica das emissões atmosféricas em termos de gases efeito estufa. Portanto, nota-se uma possibilidade de ampliação do método, ao considerar também os danos intercorrentes a outros compartimentos ambientais, como: solo e água subterrânea, comumente impactados por disposições irregulares de resíduos.

Importante destacar que a metodologia se limita a valorar os danos causados por disposições irregulares de resíduos sólidos urbanos, dessa forma, se aplica apenas a resíduos com essa característica. Portanto, a sua utilização não é recomendada para valorar danos por disposições de resíduos com outras classificações, especialmente aqueles considerados perigosos, já que o método não contempla as características específicas desses resíduos.

Além disso, o Método VADIR não se destina a calcular todas as parcelas do VERA devido à dificuldade em definir os valores de opção e de existência e, ainda assim, se manter convergente com a realidade pericial. Dessa forma, os valores

obtidos pelo método podem ser considerados valores iniciais e que podem, inclusive, ser somados a valores atribuídos a outros tipos de dano não abarcados pela metodologia, conforme a especificidade do caso exigir.

Por fim, busca-se que o método VADIR seja uma ferramenta de subsídio a tomada de decisões dos aplicadores do direito, inclusive para definição dos valores de multas, transações penais, indenizações, termos de ajustamento de conduta, entre outras sanções. Dessa forma, espera-se que o método contribua a inibir a disposição irregular de resíduos sólidos e que viabilize a cobrança aos municípios para que cumpram as determinações e prazos previstos pela PNRS e pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico quanto à adequação da destinação final.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, Amy; BURKLIN, Clint; SINGLETON, Amanda. **LANDFILL Gas Emissions Model (LANDGEM) Version 3.02 User's Guide**. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 2005. EPA/600/R-05/047 (NTIS PB2006-102386).
- ALMEIDA, Rodrigo. **Avaliação de Danos Causados ao Meio Ambiente**. In: TOCCHETTO, D. (Org.). *Perícia Ambiental Criminal*. 1. ed. Campinas: Millennium, 2010, p. 211-230.
- ALVARENGA, Luciano José; BARREIRO, Tereza Cristina Santos. In: MARQUES José Roberto *et al.* **Bases Normativas e Funcionalidades Jurídicas para a Avaliação Econômica de Danos Ambientais in A Valoração de Serviços e Danos Ambientais**. MPMG Jurídico, Belo Horizonte, Edição especial, p.64-69, 2011.
- ANDO, Amy W.; KHANNA, Madhu. Natural resource damage assessment methods: lessons in simplicity from state trustees. **Contemporary Economic Policy**, v. 22, n. 4, p. 504-519, 2004. DOI: 10.1093/cep/byh037.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- _____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Estudo sobre os Aspectos Econômicos e Financeiros da Implantação e Operação de Aterros Sanitários**. Rio de Janeiro: ABETRE, 2007. Disponível em: <https://abetre.org.br/wp-content/uploads/2019/11/FGV-Aterros-Sanitarios-Estudo.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. **NBR 10.004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- _____. **NBR 13.896: aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- _____. **NBR 14.653-6: avaliação de bens – Parte 6: recursos ambientais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Calculadora do Cidadão**. Brasília: BCB, 2024a. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/meubc/calculadoradocidadao>. Acesso em: 20 abr. 2024.

_____. **Conversão**. Brasília: BCB, 2024b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 04 mai. 2024.

BANCO DO BRASIL. **Como funciona o mercado de crédito de carbono no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://investalk.bb.com.br/noticia/como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono-no-brasil>. Acesso em: 25 mai. 2024.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). INGOUVILLE, M.; PINTO, M. A. C.; VITAL, M. H. F. Estimativa de investimentos em aterros sanitários para atendimento de metas estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos entre 2015 e 2019. **BNDES Setorial** 40. 2014. p. 43-92.

BERGER, Sherri *et al.* **Landfill Gas Basics**. In **Landfill Gas Primer: An Overview for Environmental Health Professionals**. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2001. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas#methane>. Acesso em: 04 abr. 2024.

BOAVENTURA, E M. **Metodologia da Pesquisa**: Monografia; Dissertação; Tese. São Paulo, Atlas, 2009.

BRANDÃO, Pedro Rodrigo Cavalcante. Responsabilidade ambiental: análise dos fundamentos e instrumentos jurídicos para coibir lesões ao meio ambiente. **Revista Acadêmica Escola Superior do Ministério Público do Ceará**, v. 11, n. 2, p. 177-194, 2019.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil (1988). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 5 out. 1988.

_____. Decreto Federal nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2022a.

_____. Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2008.

_____. Decreto Federal nº 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2010a.

_____. Decreto-Lei nº 3.689, de 03 de outubro de 1941. Código de Processo Penal. **Diário Oficial [da] República dos Estados Unidos do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 1941.

_____. Lei Complementar nº 101, de 4 de maio de 2000. Estabelece normas de finanças públicas voltadas para a responsabilidade na gestão fiscal e dá outras

providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2000a.

_____. Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2005.

_____. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2007.

_____. 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 outras disposições. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2010b.

_____. Lei nº 13.105, de 16 de março de 2015. Código de Processo Civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2015.

_____. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2020a.

_____. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 1981.

_____. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 1998.

_____. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 2000b.

_____. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/painel-intergovernamental-sobre-mudanca-do-clima-ipcc>. 2021a. Acesso em: 06 mai. 2024.

_____. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: Visão Geral** ano de referência 2021. 2022b. 72 p.

_____. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: Visão Geral** ano de referência 2022. 2023a. 140 p.

_____. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Glossário de Indicadores – Resíduos Sólidos 2022**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>. Acesso em: 08 fev. 2024.

_____. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Glossário de Informações – Resíduos Sólidos 2022**. 2023c. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>. Acesso em: 08 fev. 2024.

_____. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Coleta de Dados SINISA 2024**. 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/area-do-prestador-e-municipios>. Acesso em: 05 abr. 2024.

_____. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Cooperação para Proteção do Clima na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (org.). **Estudo de caso: encerramento do lixão em Itacaré – Bahia**. ProteGEEr, 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer>. Acesso em: 04 mai. 2024.

_____. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Cooperação para Proteção do Clima na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (org.). **Roteiro para encerramento de lixões: apoio para tomada de decisões**. ProteGEEr, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer>. Acesso em: 04 mai. 2024.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2022d.

_____. SENADO FEDERAL. Agência Senado. **Protocolo de Kyoto**. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>. 2024b. Acesso em: 06 fev. 2024.

_____. SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA (2. Turma). Recurso Especial 1845200-SC. Lei Federal 13.105/2015. Dano intercorrente (interino, transitório, temporário, intermediário, provisório). Indenização pecuniária. Possibilidade. Espécie de dano distinta do dano residual (permanente, definitivo, perene). Vício de fundamentação. Reenvio do feito à origem. Relator: Min. Og Fernandes, 16 de agosto de 2022. **Lex: jurisprudência do Superior Tribunal de Justiça**, Brasília, Edição Extraordinária nº 8, Direito Público, 2023. 2023d.

_____. SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA. Súmula nº 618. A inversão do ônus da prova aplica-se às ações de degradação ambiental. Corte Especial, julgado em 24/10/2018. 2018a. DJe 30/10/2018.

_____. SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA. Súmula nº 623. As obrigações ambientais possuem natureza *propter rem*, sendo admissível cobrá-las do

proprietário ou possuidor atual e/ou dos anteriores, à escolha do credor. Primeira Seção, julgado em 12/12/2018. 2018b. DJe 17/12/2018.

_____. SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTIÇA. Súmula nº 629. Quanto ao dano ambiental, é admitida a condenação do réu à obrigação de fazer ou à de não fazer cumulada com a de indenizar. Primeira Seção, julgado em 12/12/2018. 2018c. DJe 17/12/2018.

_____. SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL (Tribunal Pleno). Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental 747-DF. Afronta ao Art. 225 da Constituição da República. Resolução CONAMA n.º 500/2020. Revogação das Resoluções n.ºs 84/2001, 302/2002 e 303/2002. Licenciamento de empreendimentos de irrigação. Parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente de reservatórios artificiais e regime de uso do entorno. Parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente em geral. Supressão de marcos regulatórios ambientais. Retrocesso socioambiental. Procedência. Relator: Min. Rosa Weber, 14 de dezembro de 2021. 2021c. **Lex: jurisprudência do Supremo Tribunal Federal**, Brasília, Disponível em: <https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=TP&docID=755586023>. Acesso em: 11 jun. 2024.

_____. SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL (Tribunal Pleno). Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental 749-DF. Afronta ao Art. 225 da Constituição da República. Resolução CONAMA n.º 500/2020. Revogação das Resoluções n.ºs 84/2001, 302/2002 e 303/2002. Licenciamento de empreendimentos de irrigação. Parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente de reservatórios artificiais e regime de uso do entorno. Parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente em geral. Supressão de marcos regulatórios ambientais. Retrocesso socioambiental. Procedência. Resolução Conama n.º 499/2020. Coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Compatibilidade constitucional com os parâmetros normativos. Improcedência. Relator: Min. Rosa Weber, 14 de dezembro de 2021. 2021d. **Lex: jurisprudência do Supremo Tribunal Federal**, Brasília, Disponível em: <https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=TP&docID=758847588>. Acesso em: 11 jun. 2024.

_____. SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL (Tribunal Pleno). Recurso Extraordinário 654833-AC. Repercussão Geral. Tema 999. Constitucional. Dano Ambiental. Reparação. Imprescritibilidade. Relator: Min. Alexandre De Moraes, 20 de abril de 2020. 2020b. **Lex: jurisprudência do Supremo Tribunal Federal**, Brasília, Disponível em: <https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=TP&docID=753077366>. Acesso em: 11 jun. 2024.

CARDOSO, Artur Renato Albeche. **A Degradação Ambiental e seus Valores Econômicos Associados**. Porto Alegre: Sérgio Antonio Fabris Editor, 2003, 96 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Gases de Efeito Estufa**. CETESB, 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 07/04/2024.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM E INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lixo municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018.

CORDIOLI, Maria Luiza Apolinário. **Aplicação de Diferentes Métodos de Valoração Econômica do Dano Ambiental em um Estudo de caso da Perícia Criminal do Estado de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 154 p.

CORRÊA, Rodrigo Studart.; DE SOUZA, Álvaro Nogueira. Valoração de danos indiretos em perícias ambientais. **Revista Brasileira de Criminalística**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 7-15, 2013.

COTRIM, Julio. **Modelos de Valoração Econômica de Danos ambientais a partir de um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do Setor de Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 152 p.

EUROPEAN ENERGY EXCHANGE (EEX). **Emission Spot Primary Market Auction Report 2023**. EEX, 2024a. Disponível em: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download>. Acesso em: 20 abr. 2024.

EUROPEAN ENERGY EXCHANGE (EEX). **Emission Spot Primary Market Auction Report 2024**. EEX, 2024b. Disponível em: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download>. Acesso em: 08 mai. 2024.

FRANGETTO, Flavia Witkowski; VEIGA, Ana Paula Beber; LUEDEMANN, Gustavo. **Legado do MDL: impactos e lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil**. Brasília: IPEA, 2018. 426 p.

FREITAS, Cristina Godoy de Araújo. *In*: MARQUES José Roberto *et al.* **Valoração do dano ambiental: algumas premissas**. MPMG Jurídico, Belo Horizonte, Edição especial, 2011. p.10-17.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Dashboard Precificação de Carbono**. [2024?]. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNTZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTetYWQxY2M0YzdjMGM0IiwidCI6ImRINGNIMThjLTUyMTQtNDNA2OS04MTg4LTFiOGZiNDJIM2NjZSJ9&pageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008>. Acesso em: 25 mai. 2024.

GALLI, Fuma. **Valoração de danos ambientais: subsídio para ação civil**. Série Divulgação e Informação, 193, Companhia Energética de São Paulo, CESP, São Paulo, 1996.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & saúde coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, p. 1503 - 1510, 2012. DOI: 10.1590/S1413-81232012000600014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. v. 1, v. 2, v. 3. Paris: IPCC, 1997.

_____. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IPCC, 2000.

_____. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japão: IPCC, 2006.

_____. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Genebra: IPCC, 2014.

LANDMANN, Marcelo Camilli; RIBEIRO, Helena; DEÁK, Csaba. Uma proposta metodológica para estimar o custo da poluição do ar nas análises de viabilidade de sistemas de transportes urbanos. **Transportes**, v. 15, n. 1, 2007.

LEITE, José Rubens Morato. **Dano ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Pós-Graduação em Direito, Florianópolis, 1999. 350 p.

LEITE, José Rubens Morato. Dano ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial. **Revista dos Tribunais**. 2. ed. São Paulo, 2003. 218 p.

LOUREIRO, Saulo Machado. **Mitigação das Emissões dos Gases de Efeito Estufa pela Implementação de Políticas Públicas de Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas no Brasil e no Estado e na Cidade do Rio De Janeiro**. 2019. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. 259 p.

MAGLIANO, Mauro Mendonça. **Valoração econômica em laudos periciais de crimes contra o meio ambiente**. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 115 p.

MAIA, Alexandre Gori. **Valoração de Recursos Ambientais**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002. 183 p.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi. **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. 267 p.

MATO GROSSO. Ministério Público do Estado de Mato Grosso. **Valoração do Dano Ambiental: Casos Aplicados ao Estado de Mato Grosso**. MPMT, 2016. Disponível

em: <https://pjedaou.mpmt.mp.br/valoracao-do-dano-ambiental/>. Acesso em: 03 ago. 2023.

MATO GROSSO DO SUL. **Nota Técnica**: Orientações para Valoração de Dano Ambiental em Procedimentos do Ministério Público de Mato Grosso do Sul, v. 3, 2021. Disponível em: <https://www.mpms.mp.br/noticias/2022/04/caoma-apresenta-nota-tecnica-de-valoracao-de-dano-ambiental-volume-iii>. Acesso: 26 mai. 2023.

MIRRA, Álvaro Luiz Valery. **Ação civil pública e a reparação do dano ao meio ambiente**. São Paulo, 2002. 416 p.

MONTEIRO, Patrícia Cardoso. **VESEAPP - Valoração Econômica dos Serviços Ecosistêmicos em Área de Preservação Permanente de Curso D'água: Subsídio para Avaliação de Danos, Impactos e Compensações Ambientais**. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

MOTTA, Ronaldo Seroa da. **Economia Ambiental**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006. 228 p.

_____. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. IPEA/MMA/PNUD/CNPq. Rio de Janeiro, 1997. 254 p.

MUCELIN, Carlos Alberto; BELLINI, Marta. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Revista Sociedade & natureza**, v. 20, p. 111-124, 2008. DOI: 10.1590/S1982-45132008000100008.

OLIVEIRA, Ananda Ferreira; MIRANDA, Rafael Abreu; SOARES, Laís Alves. Impactos Ambientais em Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos em Santa Helena de Goiás. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 688-706, jul/set. 2019. DOI: 10.19177/rgsa.v8e32019688-706.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Proteção da atmosfera. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro, 1992.

PEREIRA, Cristiane de Carvalho *et al.* **Diretriz Técnica**. MPRJ - Grupo de Apoio Técnico Especializado, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.cnmp.mp.br/portal/images/CMA/valoracao/MPRJ_diretriz_tecnica_0012019_1.pdf. Acesso em: 20 mai. 2024.

SANTOS, Mauro Meirelles; ROMANEL, Celso; VAN ELK, Ana Ghislane Henrique Pereira. **Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros**. 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522017156311.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Como funciona a comercialização de crédito de carbono?** SEBRAE, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/como-funciona-a-comercializacao-de-credito-de-carbono,88dbbc6d15757810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SILVA, Renato de Sousa. **Emissões de gases de efeito estufa de um aterro na amazônia: simulação das emissões de metano no aterro do Aurá – Região Metropolitana de Belém, PA**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Belém, 2017. 56 p.

SOUZA, Kleber Isaac Silva de. **Direito ambiental aplicado a perícias**. Florianópolis: UFSC, 2021. 468 slides, colorido, 28 cm x 21 cm. Notas de aula da disciplina PCA310018, do Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais do Centro de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Santa Catarina. Versão: 2021.12.04.

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; MOREIRA, Josino Costa. Avaliação da Contaminação e Poluição Ambiental na Área de Influência do Aterro Controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Cadernos De Saúde Pública**, v. 12(4), p. 515–523. 1996. DOI: 10.1590/S0102-311X1996000400010.

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA, Rosália Maria de. **Resíduos sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro, 2008. ISBN: 85-85676-80-9. 138 p.

STEIGLEDER, Annelise Monteiro. **As Dimensões do Dano Ambiental no Direito Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

STEIGLEDER, Annelise Monteiro. In: MARQUES José Roberto et al. **Valoração de Danos Ambientais Irreversíveis**. MPMG Jurídico, Belo Horizonte, Edição especial, p.24-30, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY. **LandGEM – Landfill Gas Emissions Model**. LandGEM versão 3.1 de dezembro de 2023. EPA, 2023. Disponível: <https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software>. Acesso em: 07 abr.2024.

VIEIRA, João Pedro Pinheiro. **Valoração de Danos Ambientais em Ecossistemas Florestais: Adaptação do Método do Custo de Reposição com Vistas à sua Aplicação na Perícia Criminal Ambiental**. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

WANG, Michael Q.; SANTINI, Danilo J. Monetary values of air pollutant emissions in various US regions. **Transportation Research Record**, n. 1475, p. 33-41. 1995.

WEART, Spencer R. **The Discovery of Global Warming**. 2nd ed. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2008. 240 p.

WESSLER, Lara Possamai. **Diagnóstico dos Autos de Infração Ambiental Relacionados à Poluição no Estado de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado Profissional em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

ZANTA, Viviana Maria; FERREIRA, Cynthia Fantoni Alves. *In*: CASTILHO JR, Armando Borges de (coord). **Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Carlos, SP: Rima Artes e Textos, 2003.

ANEXO A – DPRN: critérios de qualificação de agravos

1) AR

Os agravos descritos na linha Impacto na dinâmica atmosférica do Quadro 3, têm os seus valores multiplicados por 1,5.

- Toxicidade da emissão (baseada em literatura científica):
 - Comprovada = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposta = 1
- Proximidade de centros urbanos (baseado em censo demográfico):
 - Centro urbano (população $\geq$ 60.000 hab) distante até 10km = 2
 - Centro urbano (população $\geq$ 60.000 hab) distante até 25km = 1
- Localização em relação a áreas protegidas (Unidades de Conservação):
 - Dentro da área = 2
 - Sob influência = 1
- Comprometimento do aquífero, decorrente do dano ao ar (estudar o aspecto água):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Morte ou dano à fauna, decorrente do dano ao ar (estudar o aspecto fauna):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Morte ou dano à flora, decorrente do dano ao ar (estudar o aspecto flora):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico, arquitetônico e turístico e/ou monumentos naturais, decorrente do dano ao ar (estudar o aspecto paisagem):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Alteração da qualidade do ar:
 - Estado de emergência = 3
 - Estado de Alerta = 2
 - Estado de Atenção ou péssimo = 1

- Previsão de reequilíbrio (caso não haja possibilidade de previsão de prazo, utilizar o critériocusto de recuperação ou dos equipamentos preventivos: baixo custo = 1; médio custo = 2; alto custo = 3):

- Curto prazo = 1
- Médio prazo = 2
- Longo prazo = 3

2) ÁGUA

Os agravos descritos na linha Impacto na hidrodinâmica (alteração do fluxo e/ou vazão) do Quadro 3, têm seus valores multiplicados por 1,5.

- Toxicidade da emissão (baseada em literatura científica):
 - Comprovada = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposta = 1
- Comprometimento do aquífero:
 - Comprovado = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposto = 1
- Localização em relação as áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente definidas em legislação):
 - Dentro = 3
 - Na mesma bacia hidrográfica à montante = 2
 - Na mesma bacia hidrográfica à jusante = 1
- Dano ao complexo solo/subsolo, decorrente do dano à água (estudar o aspecto solo/subsolo):
 - Comprovado = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposto = 1
- Morte ou dano à fauna, decorrente do dano à água:
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Morte ou dano à flora, decorrente do dano à água (estudar o aspecto flora):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1

- Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico, arquitetônico e turístico e/ou monumentos naturais, decorrente do dano à água (estudar o aspecto paisagem):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Alteração da classe do corpo hídrico (baseado na Resolução CONAMA nº 20 de 18/06/86):
 - Comprovada = 3
- Alteração na vazão / volume de água:
 - Significativa = 2
 - Não significativa = 1
- Previsão de reequilíbrio na condição natural (caso não haja possibilidade de previsão de prazo, utilizar o critério custo de recuperação ou dos equipamentos preventivos: baixo custo = 1; médio custo = 2; alto custo = 3)
 - Curto prazo = 1
 - Médio prazo = 2
 - Longo prazo = 3

3) SOLO E SUBSOLO

Os agravos descritos na linha Impacto na dinâmica do complexo solo-subsolo (movimentação de solo, corte ou aterro) do Quadro 3, têm seus valores multiplicados por 1,5.

- Toxicidade da emissão (baseada em literatura científica):
 - Comprovada = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposta = 1
- Comprometimento do aquífero, decorrente do dano ao complexo solo/subsolo (estudar o aspecto água):
 - Comprovado = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposto = 1
- Localização em relação às áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente definidas em legislação):
 - Totalmente inserido = 2
 - Parcialmente inserido = 1

- Assoreamento de corpos hídricos (estudar o aspecto água):
 - Grande intensidade = 3
 - Média intensidade = 2
 - Pequena intensidade = 1
- Morte ou dano à fauna, decorrente do dano ao complexo solo/subsolo (estudar o aspecto fauna):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Morte ou dano à flora, decorrente do dano ao solo/subsolo (estudar o aspecto flora):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico, arquitetônico e turístico e/ou a monumentos naturais, decorrentes do dano ao complexo solo/subsolo (estudar o aspecto paisagem):
 - Comprovado = 2
 - Suposto = 1
- Objetivando a comercialização:
 - Atividade principal ou secundária = 1
- Alteração na capacidade de uso da terra:
 - Em mais de uma classe (por ex: classe 1 para 3) = 3
 - Em uma classe (por ex: classe 1 para 2) = 2
 - Na mesma classe de uso (subclasses) = 1
- Danos ao relevo (alterações da declividade, desmoronamentos, etc.) (estudar o aspecto paisagem):
 - Ocorrido = 3
 - Grande risco = 2
 - Pequeno risco = 1
- Previsão de reequilíbrio na condição natural (caso não haja possibilidade de previsão do prazo, utilizar os critérios de custo de recuperação: baixo custo (menor que o da exploração) = 1; médio custo (equivalente ao da exploração) = 2; alto custo (maior que da recuperação) = 3):
 - Curto prazo = 1
 - Médio prazo = 2
 - Longo prazo = 3

4) FAUNA

Os agravos descritos na linha de Impacto na dinâmica da comunidade do Quadro 3 têm seus valores multiplicados por 1,5.

- Localização em relação às áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente definidas por legislação):
 - Dentro = 3
 - No raio de ação do animal = 2
- Ocorrência de espécies ameaçadas de extinção (Baseada na Portaria do IBAMA Nº 1.522 de 19/12/89):
 - Comprovada = 3
 - Suposta = 2
- Ocorrência de espécies endêmicas (baseada em literatura científica):
 - Comprovada = 2
 - Suposta = 1
- Ocorrência de Fêmeas:
 - Prenhas ou ovadas = 3
 - Comprovada = 2
 - Suposta = 1
- Objetivando comercialização:
 - Atividade principal = 3
 - Atividade secundária = 2
- Importância relativa:
 - Espécie que não se reproduz em cativeiro = 3
 - Espécie que se reproduz em cativeiro = 2
 - Espécie criada comercialmente = 1
- Morte ou dano à flora decorrente do dano à fauna (estudar aspecto flora):
 - Comprovado = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposto = 1
- Alteração nos nichos ecológicos:
 - Comprovada = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposta = 1

- Previsão de reequilíbrio (natural) (caso não haja possibilidade de previsão de prazo, utilizar como critério: outras espécies = 1; espécies endêmicas = 2; espécies ameaçadas = 3):

- Longo prazo = 3
- Médio prazo = 2
- Curto prazo = 1

5) FLORA

Os agravos descritos na linha Impacto na dinâmica da comunidade do Quadro 3, têm seus valores multiplicados por 1,5. Para maciços maiores que 0,1ha, deve-se analisar os danos aos indivíduos e a comunidade.

- Localização em relação às áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente definidas por Lei):

- Totalmente inserido = 3
- Parcialmente inserido = 2

- Ocorrências de espécies ameaçadas de extinção (Portaria IBAMA No 1522 de 19/12/89):

- Comprovada = 3
- Suposta = 2

- Ocorrência de espécies endêmicas (baseado em literatura científica):

- Real ocorrência = 2
- Suposta ocorrência = 1

- Favorecimento à erosão (estudar solo e subsolo):

- Comprovada = 3
- Fortes indícios = 2
- Suposta = 1

- Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico, arqueológico e turístico e ao monumento cultural, decorrente do dano à flora (estudar o aspecto paisagem):

- Comprovado = 2
- Suposto = 1

- Objetivando a comercialização:

- Atividade principal = 2
- Atividade secundária = 1

- Morte ou dano à fauna, decorrente do dano à flora (estudar o aspecto fauna):

- Comprovada = 3
- Fortes indícios = 2
- Suposto = 1
- Importância relativa. Possibilidade de ocorrência na região de parcela similar qualitativamente e quantitativamente à área degradada (estudar o aspecto paisagem):
 - Área maior que 30 vezes a área degradada = 3
 - Área entre 10 e 30 vezes a área degradada = 2
 - Área até 10 vezes maior que a área degradada = 3
- Alteração nos nichos ecológicos:
 - Comprovada = 3
 - Fortes indícios = 2
 - Suposta = 1
- Previsão de reequilíbrio (natural) (caso não haja possibilidade de previsão de prazo, analisar o estágio de regeneração: inicial = 1; médio = 2; avançado = 3)
 - Longo prazo = 3
 - Médio prazo = 2
 - Curto prazo = 1

6) PAISAGEM

Os agravos descritos na linha Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico e turístico (legalmente constituído, tombado pelo CONDEPHAAT ou SPHAN), do Quadro 3 têm seus valores multiplicados por 1,5.

- Localização em relação a área e/ou municípios protegidos (Unidade de Conservação e Áreas de Preservação Permanente definidas pela Legislação):
 - Dentro = 3
- Proximidade de centros urbanos
 - Centro urbano (população $\geq$ a 60.000 hab) distante até 10km = 3
 - Centro urbano (população $\geq$ a 60.000 hab) distante até 25km = 2
 - Centro urbano (população $\geq$ a 60.000 hab) distante até 50km = 1
- Reversão do dano:
 - Alto custo = 3
 - Médio custo = 2
 - Baixo custo = 1
- Comprometimento do aquífero (estudar o aspecto água):

- Diretamente relacionado = 2
- Não diretamente relacionado = 1
- Comprometimento do complexo solo / subsolo (estudar o aspecto solo/subsolo)
 - Diretamente relacionado = 2
 - Não diretamente relacionado = 1
- Morte ou dano à fauna (estudar o aspecto fauna):
 - Diretamente relacionado = 2
 - Não diretamente relacionado = 1
- Morte ou dano à flora (estudar o aspecto flora):
 - Diretamente relacionado = 2
 - Não diretamente relacionado = 1
- Dano ao patrimônio cultural, histórico, artístico, arqueológico e turístico, e/ou cultural
 - Tombado pelo CONDEPHAAT ou SPHAM = 2
 - Não tombado = 1