UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

DÉBORA MAYRA SANTOS FREITAS

PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE CARIRIAÇU - CE

ARARUNA – PB
2025

DÉBORA MAYRA SANTOS FREITAS

PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE CARIRIAÇU - CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Igor Souza Ogata.

ARARUNA – PB

2025

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F866p Freitas, Debora Mayra Santos.
Proposta de implantação de aterro sanitário para o município de Caririaçu - CE [manuscrito] / Debora Mayra Santos Freitas. - 2025.
72 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. Igor Souza Ogata, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS".

1. Resíduos sólidos. 2. Engenharia sanitária. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Sustentabilidade ambiental. I. Título

21. ed. CDD 363.728

Elaborada por Tiago José da Silva Pereira - CRB - 15/450 BSC8

DÉBORA MAYRA SANTOS FREITAS

PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE CARIRIAÇU - CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil

Aprovada em: 06/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Igor Souza Ogata** (***.994.524-**), em **26/06/2025 19:53:41** com chave **67e0a4f252e011f0a98706adb0a3afce**.
- **Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro** (***.449.194-**), em **26/06/2025 20:42:08** com chave **2c8d4b3852e711f0a6ba1a7cc27eb1f9**.
- **Phillipy Johny Lindolfo da Silva** (***.366.614-**), em **26/06/2025 21:58:11** com chave **cc73bed452f111f0b5b21a1c3150b54b**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.
Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final
Data da Emissão: 27/06/2025
Código de Autenticação: 0810d0

A minha mãe, Vera, cujo amor virou tinta nestas páginas. E a vovó Gerusia (*in memoriam*) minha primeira engenheira de esperanças. Esta conquista é a nossa assinatura compartilhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha mãe, Vera Alves, minha melhor amiga, minha base e meu exemplo de força. Por cada sonho adiado em nome dos meus, por cada "você consegue" nos momentos de dúvidas, e por ser prova viva que amor incondicional transforma vidas. Se hoje chego aqui, é porque você sempre carregou a tocha quando meus braços cansavam. Nós conseguimos, mainha, obrigada por ser o meu porto seguro.

Ao meu pai, Rinaldo, pelo suor transformado em oportunidades, por me ensinar que persistência não é uma virtude, mas uma necessidade e que nenhum obstáculo é grande demais quando se tem determinação.

Aos meus irmãos, Luana, Pedro Eduardo, Rosa, Isamara, João Daniel, João e Jade, obrigada por serem meu elo constante com o que realmente importa. E aos meus sobrinhos, que transformam meus dias tristes em risadas altas.

A vovó Gerusia (*in memoriam*), minha primeira fã. Você me chamou de "engenheira" antes mesmo de eu saber o peso e a beleza desse título. Hoje carrego seu orgulho em cada passo e em cada projeto que tiver meu nome. Espero ter te deixado orgulhosa aí de cima.

Aos que já partiram, Mãe Eulina, Pai Otaviano, Vovô Raimundo e Padrinho Zé, cujas ausências são presenças constantes na coragem que me sustenta e no caráter que construo a cada dia.

A minha dupla e melhor amigo, João Manoel, por nunca ter soltado a minha mão, por ter tornado o processo mais leve e a vida mais engraçada. Obrigada por transformar o que parecia impossível em "a gente consegue". Nenhuma palavra é suficiente para descrever sua importância nessa jornada.

Ao meu parceiro de terapia, Pedro Arthur, por todos os dias de conversa, pelos conselhos, risadas e silêncios compartilhados. Você é daqueles raros amigos que transformam os dias cinzas em algo mais leve. Obrigada por existir.

A minha segunda família, Luiza, Ana, Talita, Gisely, Romário, Alex, Ingrid e Anderson. Vocês foram responsáveis por transformar a solidão da graduação em cumplicidade. Obrigada por cada abraço no momento certo e por cada palavra de incentivo.

Aos guerreiros da pandemia, Lucas Castro, Alberto, Michel e Johan, que fizeram da tela fria um espaço de calor humano. Vocês são prova de que a amizade não precisa de proximidade física para ser real.

Aos amigos cearenses – Jonatan, Leo, Bel, Vitorinha, Andson, Douglas e Beatriz, obrigada por me mostrarem que, por mais longe que eu fosse, sempre teria um lugar para voltar.

A Edson, parceiro de cálculos e desesperos matemáticos – você tornou o estresse em boas memórias, e sempre esteve lá quando mais precisei. Essa conquista também é sua.

A padrinho Isac, por ser meu incentivo profissional e por sempre confiar em mim mais do que eu confiei. Obrigada por sempre estar presente na minha vida e na minha jornada profissional.

A minha família, vovó Maria, vovô Vicente, Madrinha Mariza, Madrinha Mirian, Madrinha Cícera e aos meus tios, tias e primos, que me deram a certeza de que, por mais difícil que fosse o caminho, eu nunca estaria sozinho. Vocês são meu alicerce emocional.

Aos meus professores, que se dedicaram não apenas a transmitir conhecimento, mas a formar profissionais éticos e capazes de transformar o mundo. Em especial, agradeço aos professores Phillipy, Lays, Adriana, Leonardo e Igor – que foram inspirações e mentores que contribuíram imensamente para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

A Lucas Martins, da empresa LUMA, pela oportunidade de aprender com você e pela forma calorosa que me recebeu na empresa. Suas lições e apoio foram verdadeiramente valiosos.

Professor Alan, seu comprometimento foi peça fundamental para o sucesso deste trabalho. Obrigada por dedicar tempo e paciência para que meu projeto alcançasse seu melhor potencial.

A minha banca examinadora, escolhida a dedo não apenas por seu abrilhantamento acadêmico, mas por representar o tipo de profissional que aspiro me tornar. A presença de vocês coroa não apenas este trabalho, mas toda a trajetória de aprendizado.

Por fim, ao meu orientador, Professor Igor Ogata, por ter aceitado o desafio de guiar essa jornada. Sua orientação foi a bússola que me manteve no caminho certo, mesmo quando as dúvidas tentaram me desviar. Muito obrigada por sua paciência, disponibilidade e, principalmente, por acreditar que eu era capaz – mesmo quando eu hesitava.

“A terra não pertence ao homem: é o homem que pertence à terra. Todas as coisas estão interligadas, como o sangue que une uma família.”

Cacique Seatle, 1854

RESUMO

Os aterros sanitários são essenciais para a gestão sustentável de resíduos, uma vez que unem a proteção ambiental e a saúde pública a soluções técnicas apropriadas. Sendo assim, este estudo sugere um plano de aterro sanitário para a cidade de Caririaçu-CE, com base nisso o projeto tem como o objetivo de mitigar a disposição imprópria dos resíduos sólidos urbanos. A pesquisa iniciou com uma avaliação crítica da situação atual do município, sendo verificado que os detritos são armazenados em condições impróprias, causando danos ambientais e perigos para a saúde pública. Desse modo, o processo metodológico incluiu a avaliação da produção de resíduos pelo município; a seleção de local com base em critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos; o dimensionamento das células de disposição; elaboração dos sistemas de impermeabilização, drenagem pluvial de chorume e de gases, tratamento de efluentes e gases; e monitoramento ambiental. O aterro sanitário projetado para o município apresenta capacidade para operar por 20 anos, com 20 células, sendo uma para cada ano, seguido de 1 ano para encerramento e 30 anos de monitoramento pós fechamento. O sistema inclui impermeabilização com geomembrana e argila compactada, drenagem e tratamento de chorume e captação de biogás. Esta proposta de aterro poderá diminuir os efeitos ambientais presentes; preservar os recursos hídricos e o solo; melhorar a qualidade de vida da população; gerar emprego para a população; e atender integralmente às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Após o encerramento das operações, o aterro passará por um período de estabilização, no qual serão monitorados os processos físicos, químicos e biológicos da massa de resíduos, garantindo que não haja impactos ambientais posteriores.

Palavras-Chave: Engenharia sanitária; Gestão de resíduos sólidos; Resíduos sólidos urbanos; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Sanitary landfills are essential for sustainable waste management, since they combine environmental protection and public health with appropriate technical solutions. Therefore, this study suggests a sanitary landfill plan for the city of Caririaçu-CE, with the aim of solving the issue of improper disposal of urban solid waste. The research began with a critical assessment of the current situation of the municipality, and it was found that the waste is stored in inappropriate conditions, causing environmental damage and public health hazards. Thus, the methodological process included the assessment of waste production by the municipality; site selection based on technical, environmental and socioeconomic criteria; sizing of disposal cells; development of waterproofing systems, rainwater drainage of leachate and gases, treatment of effluents and gases; and environmental monitoring. The sanitary landfill designed for the municipality has the capacity to operate for 20 years, with 20 cells, one for each year, followed by 1 year for closure and 30 years of post-closure monitoring. The system includes waterproofing with geomembrane and compacted clay, drainage and treatment of leachate and capture of biogas. This landfill proposal will reduce the current environmental impacts; preserve water resources and soil; improve the quality of life of the population; generate employment for the population; and fully comply with the National Solid Waste Policy. After the end of operations, there will be a period of stabilization.

Keywords: Sanitary engineering; Solid waste management; Urban solid waste; Environmental sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da infraestrutura mínima de um aterro sanitário----------19
Figura 2 - Etapas de encerramento do aterro sanitário ----------28
Figura 3 - Localização do município de Caririaçu – CE ----------38
Figura 4 - Aplicação do método multicritério através de malhas no software QGIS ----------52
Figura 5 - Área preliminar 1 ---------- 53
Figura 6 - Área preliminar 2 ---------- 53
Figura 7 - Área preliminar 3 ---------- 54
Figura 8 - Geometria das células---------- 57
Figura 9 - Representação do sistema de drenagem do chorume em cada célula ----------58
Figura 10 - Representação do sistema de drenagem do chorume em cada célula----------58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios técnicos para seleção de áreas para implantação de aterro sanitário------ 42
Tabela 2 - Critérios econômico-financeiro e político-social para seleção da área do aterro -- 43
Tabela 3 - Hierarquização dos critérios de seleção de áreas para implantação de aterros sanitários municipais ---------- 44
Tabela 4 - Pesos dos critérios e dos tipos de atendimentos estabelecidos para a análise das áreas investigadas ---------- 44
Tabela 5 - Escolha da área do empreendimento considerando as características das áreas pré-selecionadas ---------- 55
Tabela 6-Estimativa de Resíduos Sólidos Urbanos ao longo dos anos ---------- 56
Tabela 7 –Infraestrutura de apoio do aterro sanitário ---------- 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
SIABI	Sistema Integrado de Automação de Bibliotecas
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
NIR	Near Infrared
DAF	Dissolved Air Flotation
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MBR	Membrance Bioreactor Reactor
IoT	Internet of Things
MMA	Ministério do Meio Ambiente
IPCC	Intergovernamental Panel on Climate Change
EEA	Empresa de Engenharia Ambiental
MPCE	Ministério Público do Estado do Ceará
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ---------- 12

1.1. Objetivo geral ---------- 13

1.2. Objetivos específicos ---------- 14

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ---------- 15

2.2. Definição e funcionamento de aterros sanitários ---------- 18

2.1.1. Seleção e preparação do local ---------- 19

2.1.2. Sistema de drenagem e tratamento do chorume ---------- 21

2.1.3. Disposição e compactação dos resíduos ---------- 22

2.1.4. Impermeabilização do solo ---------- 23

2.1.5. Sistema de drenagem e tratamento de gases ---------- 24

2.1.6. Sistema de drenagem pluvial ---------- 25

2.1.7. Infraestrutura complementar ---------- 25

2.1.8. Monitoramento e manutenção ---------- 27

2.1.9. Encerramento e recuperação ambiental ---------- 27

2.2. Impactos socioambientais e à saúde pública dos aterros sanitários ---------- 29

2.3. Impactos à saúde pública ---------- 31

2.4. Legislação ambiental associada aos aterros sanitários ---------- 32

2.5. Alternativas emergentes aos aterros sanitários ---------- 33

2.6. Tecnologias de tratamento térmico ---------- 34

2.7. Tecnologias biológicas ---------- 34

2.8. Reciclagem e reutilização ---------- 35

2.9. Tecnologias químicas ---------- 37

3. METODOLOGIA ---------- 38

3.1. Caracterização da pesquisa ---------- 38

3.2. Local do estudo ---------- 38

3.3. Seleção da área ---------- 40

3.4. Estimativa da quantidade de resíduos sólidos urbanos e determinação das células do aterro ---------- 45

3.5. Revestimento de fundo ---------- 45

3.6. Drenagem do chorume ---------- 46

3.7. Drenagem dos gases ---------- 47

3.8. Drenagem pluvial ---------- 47

3.9. Dimensionamento da lagoa anaeróbia ---------- 48

3.10. Dimensionamento da lagoa facultativa ---------- 49

3.11. Infraestrutura de apoio ---------- 50

4. RESULTADOS ---------- 52

4.1. Área selecionada para o aterro ---------- 52

4.2. Estimativa de resíduos ---------- 56

4.3. Dimensionamento das células ---------- 57

4.4. Revestimento de fundo ---------- 57

4.5. Drenagem do chorume ---------- 58

4.6. Drenagem dos gases ---------- 58

4.7. Drenagem pluvial ---------- 59

4.8. Lagoas anaeróbia e facultativa ---------- 59

4.9. Infraestrutura de apoio do aterro sanitário ---------- 60

5. DISCUSSÃO ---------- 61

6. CONCLUSÃO ---------- 62

REFERÊNCIAS ---------- 64

APÊNDICE A – Plantas baixa ---------- 66

APÊNDICE B – Planta baixa e detalhe ---------- 67

---------- 67

APÊNDICE C – Planta baixa, cortes e localização ---------- 68

---------- 68

1. INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um dos principais desafios ambientais e urbanísticos que os municípios brasileiros enfrentam. Segundo a ABRELPE (2023), o Brasil gera anualmente cerca de 82 milhões de toneladas de RSU, sendo que aproximadamente 40% ainda são descartados de maneira inadequada em vazadouros a céu aberto ou aterros controlados.

Os efeitos de uma disposição imprópria de RSU se manifestam em três aspectos principais:

- Ambiental: poluição de solos e recursos hídricos por chorume, liberação de gases de efeito estufa (sobretudo o metano, que possui potencial 25 vezes superior ao CO2) e deterioração de ecossistemas (IPEA, 2020);
- Social: diminuição da qualidade de vida nas regiões próximas a depósitos de resíduos sólidos, marginalização dos catadores e disseminação de enfermidades como dengue e leptospirose (ABRELPE, 2023);
- Econômica: elevados custos com tratamento de doenças e remediação ambiental, causados principalmente pela má gestão dos resíduos, somam cerca de R$ 1,5 bilhão por ano, especialmente em locais com disposição inadequada (MMA, 2019).

Dentre as opções técnicas existentes, os aterros sanitários se sobressaem como a opção mais apropriada quando se observa a realidade brasileira, marcada por desigualdade socioeconômicas e deficiências na gestão de resíduos sólidos. Os projetos desses empreendimentos, que incluem impermeabilização, drenagem de resíduos e coleta de biogás, podem diminuir em até 90% os impactos ambientais em comparação com os lixões (IPEA, 2020). Curitiba (PR) é um caso de sucesso que, a partir de 2010, implementou um aterro sanitário em conjunto com programas de reciclagem, atingindo uma taxa de 70% de destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos. No entanto, para potencializar as vantagens, é necessário adicionar a essa solução políticas de redução na origem, coleta seletiva e educação ambiental, formando um sistema integrado de gerenciamento de resíduos.

Instituída pela Lei nº 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes essenciais para a gestão integrada e o gerenciamento ambiental adequado dos resíduos sólidos no Brasil. Entretanto, informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA, 2022) indicam que 41,6% das cidades brasileiras ainda encaminham seus resíduos para lixões ou aterros controlados, o que constitui uma séria infração

às orientações da PNRS. O cenário se agrava nas regiões Nordeste e Norte, onde, respectivamente, 58,3% e 68,1% das cidades recorrem a vazadouros ilegais (ABRELPE, 2023).

No Ceará, em particular, a situação não é diferente: de acordo com o IBGE (2021), 43% dos resíduos urbanos recebem um destino impróprio, havendo pelo menos 70 lixões em funcionamento em todo o estado. Esse cenário representa sérios riscos ambientais e sanitários para a população. Embora haja avanços após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei nº 12.305 (2010), muitos municípios cearenses, principalmente os de pequeno porte, enfrentam dificuldades financeiras e estruturais para implementar sistemas adequados de destinação final, coleta seletiva e reciclagem.

Visando enfrentar esse problema, o Governo do Estado do Ceará elaborou o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS-CE), que propõe a criação de 21 sistemas regionais de aterros sanitários, de forma a atender os 184 municípios cearenses. A estratégia busca promover uma gestão consorciada, otimizar recursos e viabilizar economicamente a implantação de infraestrutura adequada, além de fomentar a inclusão social dos catadores através da formalização de cooperativas (SEMA, 2020).

Localizado no estado do Ceará, o município de Caririaçu também enfrenta desafios significativos na gestão dos RSU, pois a falta de uma estrutura adequada para a disposição final do resíduo sólido causa problemas ambientais, sociais e ambientais graves. Sendo assim medidas eficazes para a solução dessa questão são necessárias, em especial, a implantação de um aterro sanitário licenciado e operando conforme as normativas vigentes, a fim de contribuir para a solução de problemas como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além dos riscos à saúde pública e da presença de pessoas e animais nos espaços de descarte inadequado de resíduos.

Em síntese, a escolha deste tema é justificada pela urgência de oferecer uma solução sustentável e eficaz para a gestão dos RSU em Caririaçu-CE, e assim ajudar na preservação do ambiente e na melhoria da qualidade de vida da população. Desse modo, este trabalho apresenta uma proposta de implantação de um aterro sanitário no município, representando um passo importante na direção de um futuro mais sustentável e resiliente para os seus habitantes.

1.1. Objetivo geral

Propor a implantação de um aterro sanitário para o município de Caririaçu – CE, visando a disposição final dos RSU de forma sustentável a fim de reduzir os impactos ambientais, sociais e econômicos.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar um estudo de viabilidade técnica e ambiental para a implantação de um aterro sanitário no território do município de Caririaçu - CE;
- Analisar a legislação ambiental pertinente e os requisitos para o licenciamento do aterro;
- Elaborar um modelo de aterro sanitário, com horizonte de projeto de 20 anos, para disposição dos resíduos sólidos de Caririaçu – CE.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O lixo, tecnicamente conhecidos como resíduos sólidos são definidos pela ABNT NBR 10.004/2004, como todo:

> "Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, 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'agua, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível" (Brasil, 2010).

Esses resíduos vêm sendo produzido em escala cada vez maior ao crescimento populacional e ao desenvolvimento industrial acelerado tornando necessária a gestão eficaz, pois o aumento descontrolado da geração de resíduos sólidos urbanos provoca impactos ambientais críticos, como a contaminação do solo, de corpos hídricos e a emissão de poluentes atmosféricos, além de representar um desperdício de recursos naturais não renováveis. Esses efeitos comprometem diretamente a qualidade de vida das populações, gerando riscos à saúde pública, incluindo a proliferação de doenças vinculadas à má gestão de resíduos (ABRELPE, 2023).

Sendo assim, a gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos permite uma variedade de benefícios como:

- A diminuição da poluição e depleção de recursos naturais;
- O aprimoramento a eficácia no resíduo em termos de coleta, transporte e tratamento;
- O incentivo à economia circular e reciclagem de materiais;
- A redução dos problemas de saúde pública e da degradação ambiental;
- O incentivo à inovação tecnológica e ao desenvolvimento da indústria de beneficiamento de resíduos.

A cooperação entre *stakeholders* e o avanço constante das tecnologias são fundamentais para lidar com os desafios associados à gestão de resíduos sólidos de necessário inserir também políticas públicas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento (IPEA, 2020).

Nesse sentido a Política Nacional de Resíduos Sólidos alcançou progressos significativos, como a logística reversa, que responsabiliza fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes pelo ciclo de vida dos produtos, teve um avanço significativo, principalmente em áreas como eletroeletrônicos, embalagens e pesticidas (ABRELPE, 2022). Informações do SNIS indicam que a porcentagem de municípios brasileiros com coleta seletiva cresceu de 18% em 2010 para 40% em 2020, evidenciando um maior envolvimento na separação e reciclagem de materiais. Além disso, a PNRS promoveu o desenvolvimento de planos municipais de gestão integrada de resíduos, com mais de 60% das cidades implementando mecanismos para um destino ambientalmente correto (IPEA, 2020).

Inovações tecnológicas são fundamentais para reduzir o impacto ambiental e aumentar a recuperação de recursos naturais, sendo necessário empregar processos sustentáveis e eficientes durante o processo de coleta, transporte, tratamento e disposição final de resíduos (ABRELPE, 2023).

Dentre essas tecnologias, a mais amplamente utilizada para a disposição final dos resíduos sólidos ainda são os aterros sanitários, que, quando devidamente operados, reduzem os impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade, evitando a contaminação do solo e da água, a emissão de gases de efeito estufa e a propagação de doenças (IPEA, 2012; ABRELPE, 2023).

Contudo, essa não é a única, tampouco a mais sustentável forma de manejo. Atualmente, diversas tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em áreas como triagem e separação, tratamento, monitoramento e rastreamento, bem como em comunicação e engajamento social, possibilitando a reintegração dos resíduos ao ciclo produtivo e promovendo a economia circular (CEMPRE, 2022; PNRS, 2010).

Nesse contexto, os progressos em inteligência artificial e automação estão proporcionando níveis inéditos de eficácia na triagem de materiais recicláveis. Sensores de última geração hiperespectrais, que conseguem identificar a estrutura molecular dos resíduos, têm taxas de acerto superiores a 98%, o que praticamente elimina os erros humanos no processo de triagem (TOMRA, 2022).

Organizações de destaque como a TOMRA e a Pellenc ST desenvolvem sistemas automatizados completos que combinam visão computacional, espectroscopia e robótica. Esses sistemas têm a capacidade de tratar grandes volumes de resíduos – até 20 toneladas por hora em certas instalações industriais – com uma exatidão que revoluciona os padrões do setor (PELLENC ST, 2022). A consequência é uma considerável diminuição nos gastos operacionais e um notável incremento na qualidade dos materiais destinados à reciclagem.

Na área de tratamento térmico, a gaseificação por plasma se apresentou como uma das tecnologias mais promissoras para resíduos que não podem ser reciclados. Ao contrário da incineração tradicional, este procedimento funciona a temperaturas que superam os 5.000ºC, quebrando completamente os materiais em seus componentes fundamentais. Iniciativas inovadoras como a da *Plasco Energy* no Canadá, mostram que é viável transformar até 90% dos resíduos urbanos em gás sintético limpo e agregados verificados inertes, que podem ser aplicados na indústria da construção (PLASCO ENERGY, 2021).

Os progressos nos biodigestores anaeróbicos para resíduos orgânicos têm sido particularmente notáveis. Atualmente, os sistemas de membrana (MBR) de terceira geração são capazes de produzir biometano com pureza adequada para ser injetado diretamente na rede de gás natural, enquanto as tecnologias de pré-tratamento enzimático conseguem diminuir o tempo de processamento em até 60% (GERMAN BIOENERGY ASSOCIATION, 2022). Uma pesquisa realizada na Alemanha revelou que essas inovações têm potencial para incrementar a geração de energia em biodigestores municipais em até 40%.

A digitalização da indústria de resíduos está progredindo rapidamente com a instalação de redes de sensores IoT de grande porte. Cidades como Barcelona e Cingapura já implementaram sensores ultrassônicos em seus contêineres públicos para acompanhar em tempo real o nível de preenchimento, aprimorando os percursos de coleta (SMAT CITY EXPO, 2022). Sistemas que utilizam inteligência artificial examinam padrões passados de produção de resíduos, possibilitando uma previsão com precisão de até 85% sobre quando e onde os serviços de coleta serão mais necessários.

A tecnologia *blockchain* está promovendo uma transparência inédita na cadeia de reciclagem. Plataformas como a *Circularise* estabelecem registros digitais permanentes para cada conjunto de materiais reciclados, desde sua procedência até a obtenção do produto final. Isso não só combate o descarte desleal do meio ambiente, como também estabelece novos modelos de negócios fundamentados em créditos de reciclagem certificados (CIRCULARISE, 2023). Segundo um relatório recente da McKinsey, essas soluções têm potencial para gerar US$ 200 bilhões em valor econômico mundial até 2030.

No âmbito do envolvimento comunitário, os aplicativos para dispositivos móveis estão transformando a maneira como os cidadãos se relacionam com os sistemas de gerenciamento de resíduos. Plataformas como o *Recyclebank* nos Estados Unidos recompensam os utilizadores com descontos e vantagens por ações sustentáveis, elevando as taxas de envolvimento em programas de reciclagem em até 300% (RECYCLEBANK, 2022). As tecnologias de

gamificação convertem a triagem de resíduos em desafios sociais, gerando uma competição benéfica entre bairros e comunidades.

A aplicação da inteligência artificial na educação ambiental também está em andamento. *Chatbots* sofisticados, como o *EcoBot* da Unilever, são capazes de responder a milhares de perguntas ao mesmo tempo sobre a correta eliminação de resíduos, aprendendo e aprimorando a cada interação. Estudos indicam que essas ferramentas têm potencial para diminuir em até 45% os equívocos de separação em residências após apenas três meses de utilização (UNILEVER, 2023).

Avanços em embalagens inteligentes estão contribuindo para enfrentar um dos maiores obstáculos da reciclagem. Avanços recentes em marcadores químicos e códigos QR possibilitam que as máquinas de triagem detectem automaticamente o tipo de plástico e sua composição, mesmo em produtos com múltiplas camadas. Isso está permitindo índices de reciclagem para embalagens flexíveis que antes eram vistas como inalcançáveis - aumentando de menos de 5% para mais de 70% em certos casos (EUROPAN PLASTICS RECYCLERS, 2023).

A gestão de resíduos do futuro indica sistemas cada vez mais descentralizados e interligados. Estamos testando micro usinas de reciclagem modular, equipadas com tecnologias de compactação e pré-processamento, em condomínios e centros comerciais. Essas unidades têm a capacidade de diminuir em até 80% a quantidade de resíduos no local, reduzindo assim os gastos com o transporte (ELLEN MACARTHUR FOUDATION, 2023). Simultaneamente, as plataformas digitais estão estabelecendo mercados *peer-to-peer* para resíduos, permitindo que as empresas comercializem diretamente seus subprodutos para quem necessita deles como matéria-prima.

A fusão dessas tecnologias está estabelecendo um novo padrão na administração de resíduos - um modelo circular, inteligente e extremamente eficaz que converte o que antes era considerado lixo em recursos econômicos de grande valor. Com o aumento constante dos investimentos em tecnologias sustentáveis, estamos à beira de uma mudança drástica na maneira como as sociedades gerenciam seus resíduos, prevendo vantagens ambientais e econômicas inéditas (McKINSEY, 2023; ABRELPE, 2023).

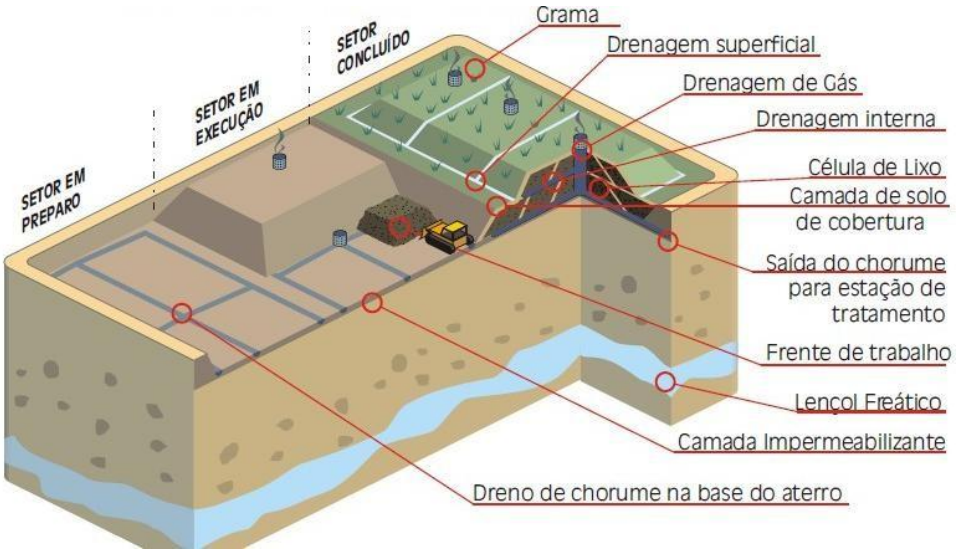
2.2. Definição e funcionamento de aterros sanitários

Os sistemas de disposição final de resíduos sólidos, conhecidos como aterros sanitários, são estruturas projetadas e tem um papel importante na gestão ambiental moderna

conforme estabelece a PNRS (Lei nº 12.305/2010). Em contraste aos vazadouros a céu aberto ou lixões, onde a disposição ocorre de forma desordenada, os aterros sanitários utilizam tecnologias como impermeabilização do solo, sistemas de drenagem e filtros de gases para mitigar impactos ambientais e proteger a saúde pública (ABRELPE, 2022; Cunha *et al*., 2021).

O desenvolvimento de aterros sanitários tem sua base legal e técnica em normas ambientais rigorosas, que estabelecem procedimentos mínimos para o seu funcionamento. Desse modo, é possível verificar na Figura 1 a infraestrutura mínima que um aterro sanitário deve possuir, sendo constituído por setores de preparo, execução e conclusão, drenagem superficial, drenagem de gás, drenagem interna, célula de lixo, camada de solo de cobertura e sistema de impermeabilização (ABNT, 1997).

Figura 1 - Esquema da infraestrutura mínima de um aterro sanitário



Fonte: CGC Concessões, p. 32 (2016).

2.1.1. Seleção e preparação do local

Além da infraestrutura mínima, o aterro sanitário necessita ser instalado em um local adequado, para evitar impactos ambientais, sociais e econômicos. Para selecionar esse local, é necessário realizar um estudo detalhado, considerando critérios técnicos, econômico-financeiros e político-sociais, conforme estabelecido nas diretrizes para a implantação de sistemas de disposição final de resíduos. O terreno é preparado após a escolha, o que envolve a construção de uma base impermeável para evitar a contaminação do lençol freático (CETESB, 2003).

Inicialmente, a escolha do ponto para a instalação de um aterro sanitário deve levar em conta critérios técnicos. Estes parâmetros abrangem a avaliação de elementos geográficos, geológicos, geotécnicos, topográficos e ambientais, tais como a proximidade de fontes de água potável, zonas de recarga de aquíferos, zonas de conservação ambiental e propriedades do solo. Esses elementos são cruciais para reduzir os perigos de contaminação da água subterrânea e assegurar a estabilidade estrutural do aterro (CETESB, 2003; ABNT, 1997).

Ademais, aspectos econômico-financeiros também precisam ser considerados. Isso engloba a avaliação da infraestrutura disponível nas proximidades do local, tais como vias de acesso, presença de redes de água, eletricidade e outros serviços públicos. Esses fatores impactam diretamente nos gastos com a construção, operação e manutenção do aterro, podendo facilitar ou complicar a sustentabilidade do projeto (IBGE, 2020).

Em última análise, os critérios político-sociais incluem a obediência à legislação ambiental em vigor e a observância do zoneamento urbano. O local selecionado precisa estar a uma distância apropriada de regiões habitadas, escolas, hospitais e outras estruturas sensíveis, a fim de prevenir conflitos sociais e perigos para a população. É igualmente crucial levar em conta os aspectos jurídicos ligados ao licenciamento ambiental e ao planejamento urbano (Brasil, 2010).

Outra etapa importante da instalação de um aterro sanitário é a preparação do local selecionado, que deve ser iniciado pelos estudos ambientais estimando o potencial impacto da instalação no meio ambiente e nas comunidades locais, sendo principalmente caracterizado pelo Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Planos de Gerenciamento Ambiental (PGA) exigidos conforme o porte do empreendimento e a legislação ambiental vigente (Brasil, 2011).

A preparação do terreno inclui a instalação de sistemas de drenagem, impermeabilização do solo, escavação e nivelamento do espaço destinado à deposição dos resíduos. Essas medidas têm como objetivo assegurar a estabilidade estrutural e evitar a poluição do solo, das águas subterrâneas e do ar. Sistemas de proteção ambiental são implementados, incluindo a drenagem de águas pluviais, a captura e o tratamento de gases, além da impermeabilização com geomembranas e camadas de solo compactado (CETESB, 2003).

Depois de estabelecer as estruturas, é crucial estabelecer sistemas de monitoramento e controle do meio ambiente. Estes sistemas monitoram o funcionamento do aterro sanitário, garantindo que as normas legais sejam cumpridas, particularmente no que se refere à segurança ambiental e à saúde pública (IBAMA, 2022).

Em seguida, são instaladas no local as estruturas de drenagem de gases e líquidos, sistemas de impermeabilização, escavação da área de disposição do resíduo e nivelamento do terreno a fim de garantir a estruturação adequada da célula de disposição e possibilitar o início da operação do aterro sanitário (CETESB, 2020).

A gestão de aterros sanitários requer sistemas de proteção ambiental integrados para reduzir os perigos de poluição do solo, águas subterrâneas e do ar. A infraestrutura inicial, que envolve a drenagem e o tratamento de águas pluviais e líquidos escoados, a captura e o tratamento de gases como o metano, além da impermeabilização com geomembranas e solo compactado, é uma etapa crucial da operação.

A supervisão constante é essencial para garantir a conformidade às normas ambientais, como as definidas pelo IBAMA (2022). Sensores e sistemas automatizados analisam variáveis como emissões de gases e vazamentos, garantindo a segurança das operações e a proteção da saúde pública. Adicionalmente, verificam-se periodicamente a efetividade das ações de contenção e tratamento.

A estruturação da célula de disposição, incluindo escavação, nivelamento e impermeabilização, precede o início das atividades (CETESB, 2020). É essencial preservar infraestruturas de segurança, barreiras e sistemas de escoamento, para evitar incidentes. Depois da conclusão do aterro, é necessário manter o monitoramento para prevenir a entrada não autorizada de pessoas ou animais, além de controlar possíveis danos ambientais remanescentes, como vazamentos ou assoreamento.

2.1.2. Sistema de drenagem e tratamento do chorume

O chorume é uma combinação complexa de substâncias químicas tóxicas e contaminantes, resultante da decomposição dos resíduos sólidos orgânicos e da dissolução de outros tipos de resíduos na água pluvial, e que, se não for adequadamente controlado e tratado, pode representar sérios riscos ambientais e à saúde pública (Souza *et al*., 2019). Desse modo, um sistema de drenagem e tratamento do chorume deve ser planejado em um aterro sanitário, a fim de evitar a contaminação do solo e de águas superficiais e subterrâneas e, eventualmente, o alcance à população. O chorume, resultante da decomposição dos resíduos sólidos orgânicos e da dissolução de outros tipos de resíduos na água pluvial, constitui uma mistura complexa de substâncias químicas tóxicas e contaminantes que, se não for adequadamente controlado e tratado, pode representar sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente (Souza *et al*., 2019).

Um sistema de drenagem e tratamento de chorume em aterros sanitários é essencial para prevenir a contaminação ambiental e garantir a segurança sanitária. De acordo com a NBR 13896:1997, esse sistema deve ser projetado de forma a permitir a coleta eficiente do chorume, desde sua origem até sua destinação final. O sistema é composto, em geral, por uma camada drenante, usualmente formada por brita ou areia grossa, posicionada sobre a base impermeabilizada do aterro. Nessa camada são instaladas tubulações perfuradas em polietileno de alta densidade (PEAD), que coletam o líquido percolado e o conduzem a caixas de inspeção ou sumidouros, permitindo seu transporte até o sistema de tratamento (ABNT, 1997). A drenagem pode ser do tipo gravimétrica ou por bombeamento, dependendo da declividade do terreno e do volume de chorume produzido. Segundo a NBR 8419:1992, o projeto deve incluir ainda os detalhes de dimensionamento, materiais utilizados e métodos de impermeabilização, de modo a evitar infiltrações no solo e contaminação das águas subterrâneas (ABNT, 1992). Após a coleta, o chorume pode ser submetido a tratamentos físico-químicos (como coagulação-floculação ou osmose reversa) ou biológicos (como lagoas anaeróbias ou reatores UASB), conforme suas características e a legislação ambiental vigente.

2.1.3. Disposição e compactação dos resíduos

A disposição dos resíduos em um aterro sanitário é realizada considerando aspectos como a capacidade de cada célula do aterro, a composição dos resíduos e os requisitos regulatórios. Previamente à deposição da próxima camada, os resíduos são descarregados e distribuídos uniformemente sobre o solo da célula, formando camadas sucessivas. Para evitar a contaminação do ambiente, materiais como resíduos perigosos são separados e manuseados de forma adequada (ABNT, 1997).

Além disso, os resíduos são compactados para maximizar o espaço e diminuir o volume nas células. Para mais, cada camada de resíduo é frequentemente coberta com um material inerte para evitar a exposição do resíduo, impedindo a proliferação de vetores de doenças e a geração de odores, bem como para amenizar a infiltração da água da chuva, diminuindo a geração de chorume (ABNT, 1997).

Para diminuir o volume e aumentar a densidade da massa de resíduos, estes são compactados mecanicamente a disposição de cada camada de resíduo ", seja com compactador de solo quando manual, ou com equipamentos como tratores de esteira, rolos compactadores ou o próprio caminhão de coleta quando mecanizado são utilizados nesse processo. A compactação é realizada por pressão direta, forçando a evasão de ar e de espaços vazios, o que

torna a massa mais uniforme e estável, conferindo maior estabilidade estrutural à célula do aterro NBR 13896 (1997).

Al-Eglabij (2018) afirmam que a compactação eficaz dos resíduos em aterros sanitários é fundamental para aumentar o espaço disponível, prolongar a vida útil da instalação e diminuir os gastos operacionais relacionados ao transporte e disposição de resíduos. O autor também destaca a relevância de selecionar dispositivos apropriados e aplicar técnicas de compactação que asseguram a estabilidade da massa de resíduos, prevenindo questões como subsidiação do solo e vazamentos de chorume.

Contudo, segundo estudos feitos por Othman (2015), ressalta-se a relevância da administração eficiente de resíduos em aterros sanitários para reduzir os impactos adversos na saúde dos habitantes e no meio ambiente. No entanto, apenas a disposição adequada não é suficiente para solucionar os problemas relacionados à vida útil dos aterros. Assim, é essencial implementar práticas de segregação e reciclagem dos resíduos ainda na origem, reduzindo a quantidade de materiais aproveitáveis destinados aos aterros sanitários. A disposição final deve ser reservada preferencialmente aos rejeitos, enquanto os demais resíduos devem retornar ao ciclo produtivo, contribuindo para prolongar a vida útil da instalação.

2.1.4. Impermeabilização do solo

A impermeabilização do solo é um passo crucial na instalação de aterros sanitários, com o propósito principal de prevenir a infiltração do chorume no subsolo e, consequentemente, a poluição dos aquíferos e mananciais. Este mecanismo funciona como um escudo de proteção entre os detritos acumulados e o ambiente natural.

Conforme a ABNT NBR 13896/1997, a impermeabilização deve ser realizada através de uma combinação de barreiras naturais e artificiais, tais como a compactação de solos argilosos com baixa permeabilidade ($k < 10^{-7}$ cm/s) e a aplicação de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), com uma espessura mínima de 1,5 milímetros. Estas camadas são sobrepostas para assegurar maior segurança e eficácia na contenção de resíduos e líquidos que escorrem.

A ABNT NBR 8488/1984 enfatiza a relevância de verificar a eficácia das camadas impermeabilizantes, sugerindo testes de percolação e controle de qualidade durante a aplicação. Essas ações garantem que as propriedades hidráulicas do sistema estejam em harmonia com os critérios de projeto.

Ademais, pesquisas recentes destacam que uma impermeabilização apropriada diminui consideravelmente os efeitos ambientais negativos ligados à infiltração de líquidos, favorecendo um controle mais efetivo dos processos geoquímicos e microbiológicos nas células do aterro (Silva *et al.*, 2020).

2.1.5. Sistema de drenagem e tratamento de gases

A decomposição dos resíduos orgânicos no aterro sanitário ocorre de forma anaeróbica, resultando na geração de gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), ambos gases de efeito estufa. O metano, além disso, é inflamável e pode representar riscos quando acumulado em grandes volumes (ABNT, 1992; Silva *et al*., 2021). Os sistemas de coleta e remoção desses gases não só reduzem riscos de explosões, como também os transformam em formas menos nocivas ao meio ambiente ou podem utilizá-los como fonte de energia.

Uma rede de poços de extração estrategicamente instalados na massa de resíduos constitui o sistema de coleta de gases em um aterro sanitário. Esses objetos estão vinculados às tubulações que conduzem os gases retirados para um centro de tratamento ou sistemas de queima controlada. Esse procedimento ocorre por meio da diferença de pressão ou por equipamento de sucção, de maneira que o metano e outros gases são retirados dos resíduos e dirigidos para os poços de extração para realizar a coleta de gases (Silva e Campos, 2017).

De acordo com um estudo realizado por Yan, é crucial que o sistema de coleta de gases seja eficiente para diminuir as emissões de metano e reduzir impactos ambientais. Para maximizar a captura de metano e garantir a conformidade com os padrões regulatórios, os autores enfatizam a necessidade de otimizar a distribuição de poços de extração e a taxa de extração de gases (Yan *et al.* 2019).

Diversas abordagens de tratamento podem ser aplicadas aos gases coletados do sistema de coleta de um aterro sanitário, conforme as características do local e as normas regulatórias. A queima controlada do metano, que consiste na sua oxidação em dióxido de carbono e vapor d'água por meio de processos de combustão, é uma técnica amplamente adotada por reduzir significativamente o potencial de aquecimento global desse gás, já que o metano possui um poder de aquecimento cerca de 25 vezes maior que o do dióxido de carbono (IPCC, 2014; ABNT, 1992).

A queima controlada de metano em aterros sanitários pode resultar em benefícios significativos para o meio ambiente, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a geração de energia renovável, de acordo com um estudo de *Schuurbiers*. A importância de

políticas e incentivos para promover a implementação de tecnologias sustentáveis e eficientes de tratamento de gases em aterros sanitários é destacada pelos autores (Schuurbiers *et al*, 2019).

2.1.6. Sistema de drenagem pluvial

O sistema de drenagem pluvial em aterros sanitários é crucial para a gestão e direcionamento correto das águas pluviais, prevenindo que elas entrem diretamente em contato com os resíduos depositados, o que poderia resultar em um aumento do volume de chorume e acelerar a poluição do solo e das águas subterrâneas. A drenagem deve ser planejada levando em conta o ciclo de chuvas da área, utilizando mecanismos como calhas, valas de escoamento, canais, sarjetas e bacias de retenção (ABNT, 2004).

A norma NBR 13896 define diretrizes para o sistema de drenagem superficial, estipulando que ele deve possibilitar a drenagem da água da chuva sem causar erosão ou transporte de detritos. O dimensionamento adequado das estruturas de drenagem previne o acúmulo de água no fundo do aterro e diminui a possibilidade de instabilidade geotécnica das camadas de detritos.

A execução adequada da drenagem pluvial também deve incluir a impermeabilização das superfícies de cobertura e taludes do aterro, com o objetivo de minimizar a infiltração da água da chuva nos detritos. Esta ação não apenas ajuda a regular a quantidade de lixiviados, mas também ajuda a estabilizar a massa de detritos, evitando deslizamentos e defeitos estruturais. De acordo com a NBR 8419/1992, a drenagem superficial precisa estar em conformidade com o sistema de impermeabilização, para prevenir o excesso de água nas barreiras de proteção do solo.

Além da drenagem superficial, é crucial estabelecer sistemas para coletar e direcionar as águas pluviais oriundas das áreas de acesso, pátios de estacionamento e áreas administrativas, assegurando que essas águas não se misturem com líquidos percolados ou fluxos contaminados. É aconselhável a utilização de equipamentos como caixas de areia e separadores de óleo e água em áreas de manutenção de veículos para prevenir a poluição da rede de drenagem.

2.1.7. Infraestrutura complementar

Um aterro sanitário, além das estruturas fundamentais para o armazenamento e gerenciamento dos resíduos, precisa de uma infraestrutura adicional apropriada para assegurar o funcionamento constante e seguro da instalação. Componentes como o sistema elétrico, a

comunicação e o fornecimento de água potável são essenciais para o funcionamento dos aparelhos e a satisfação das demandas dos colaboradores.

É necessário prever sistemas de drenagem sanitária, sinalização interna e externa, bem como o isolamento da área através de cercas ou muros, garantindo o controle de acesso e a segurança. É sugerida a formação de um cinturão verde com vegetação ao redor do aterro para minimizar os efeitos visuais e regular a dispersão de odores e poeiras (IBAMA, 2008).

Dentre os elementos fundamentais, a balança rodoviária é crucial para o controle e anotação do volume de resíduos recolhidos, de acordo com a norma ABNT NBR 14653 (2001), e um posto de controle é fundamental para o monitoramento da movimentação de veículos. A infraestrutura também deve abranger estruturas de suporte como banheiros, vestiários, refeitórios e escritórios administrativos, cumprindo as normas da NR-24 em relação às condições de higiene e conforto nos ambientes de trabalho. O projeto do sistema viário interno é crucial, pois deve possibilitar a movimentação segura de caminhões de lixo, tratores e outros equipamentos de grande porte. O bom funcionamento de bombas de recalque, esteiras transportadoras, sistemas de iluminação e equipamentos administrativos depende da infraestrutura elétrica.

É essencial a instalação de sistemas eficazes para a comunicação entre os vários setores, especialmente em emergências como vazamentos ou incêndios, que podem englobar rádios, telefonia e internet. A disponibilidade de água potável deve satisfazer as necessidades dos trabalhadores e as tarefas de limpeza, enquanto o sistema de esgoto deve estar ligado à rede pública ou possuir tratamento próprio, conforme estabelecido na Resolução CONAMA no 430 (2011). Esta infraestrutura adicional é vital não só para auxiliar nas atividades cotidianas, mas também para cumprir as normas de segurança, saúde no trabalho e sustentabilidade ambiental, assegurando a operação correta do aterro sanitário em todas as suas fases.

A sinalização deve estar em conformidade com as orientações da NBR 9735, assegurando a orientação e a segurança no tráfego de veículos e pedestres dentro do aterro. Além de regular o acesso, o isolamento perimetral diminui as chances de invasões, acidentes e a presença de animais.

A instalação de um cinturão verde, composto por espécies vegetais locais, auxilia na regulação dos ventos, reduz o impacto visual do projeto e aprimora a qualidade do ar. Finalmente, a área de suporte aos empregados deve proporcionar um ambiente de trabalho digno, com banheiros, vestiários, espaço para descanso e alimentação, de acordo com a NR 24 - Condições Sanitárias e de Conforto nos Ambientes de Trabalho.

2.1.8. Monitoramento e manutenção

Ao longo da vida útil de um aterro sanitário e após seu encerramento, é necessário realizar o monitoramento e a manutenção da infraestrutura instalada, avaliando a eficácia operacional, a segurança ambiental e a conformidade regulatória (IBAMA, 2012). A finalidade dessas práticas é identificar de forma antecipada quaisquer anomalias ou desvios das condições operacionais ideais, contribuindo para a ampliação da vida útil da instalação e para a prevenção de riscos ambientais e à saúde pública. Além disso, o monitoramento contínuo é essencial para avaliar o desempenho ambiental do aterro sanitário, garantindo que ele opere conforme os parâmetros legais e técnicos estabelecidos, minimizando os impactos negativos sobre o meio ambiente e a população do entorno (ABNT, 2004).

O monitoramento ambiental de um aterro sanitário abrange diversas variáveis essenciais, como a qualidade do ar, das águas superficiais e subterrâneas, a composição dos gases gerados e a estabilidade geotécnica da estrutura. Essas medições são realizadas de forma periódica por meio de uma rede de sensores e equipamentos instalados tanto no interior do aterro quanto em suas áreas adjacentes. Por exemplo, sensores atmosféricos são utilizados para detectar a presença de poluentes como dióxido de carbono e metano, enquanto a verificação da qualidade das águas subterrâneas - particularmente no que se refere à presença de chorume - é feita por meio de poços de monitoramento estrategicamente distribuídos (Brasil, 2019).

2.1.9. Encerramento e recuperação ambiental

Mesmo após o encerramento da vida útil de um aterro sanitário, torna-se imprescindível a adoção de medidas para prevenir impactos ambientais e riscos à saúde pública. Tais ações compõem o processo de recuperação ambiental do aterro, que envolve etapas fundamentais para mitigar os efeitos causados durante sua operação e assegurar que a área seja reabilitada para um uso futuro seguro e sustentável. Esse processo inclui uma série de atividades planejadas e executadas com rigor técnico, visando à estabilidade estrutural do aterro, ao controle de emissões de gases e líquidos, e à proteção das comunidades no entorno. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o encerramento e a recuperação ambiental são fases críticas do gerenciamento de aterros e devem seguir normas técnicas específicas para garantir a eficácia ambiental da instalação (Brasil, 2019). Na Figura 1 é apresentada um esquema gráfico das etapas de encerramento e recuperação ambiental em um aterro sanitário.

Figura 2 - Etapas de encerramento do aterro sanitário

Fonte: Autoral (2025).

O encerramento e a recuperação ambiental de um aterro sanitário envolvem uma série de etapas fundamentais que visam mitigar os impactos ambientais após o fim da sua operação ativa (ABRELPE, 2023). A fase de encerramento operacional compreende o término das atividades de disposição de resíduos, seguido pelo selamento da célula do aterro com cobertura final adequada para evitar infiltrações de água e emissão de gases (CETESB, 2020). A desativação dos sistemas operacionais, como o de drenagem de chorume e captação de biogás, é realizada gradualmente, conforme o declínio das atividades (NBR 13896, 1997).

Em seguida, inicia-se o monitoramento pós-encerramento, que consiste na vigilância contínua de parâmetros ambientais, como qualidade da água subterrânea, emissões gasosas e estabilidade do solo, garantindo que o local continue seguro. A etapa de remediação e restauração inclui ações corretivas para solucionar eventuais contaminações e promover a recuperação do ecossistema local. Já o uso futuro da área considera possibilidades como a implantação de áreas verdes, parques ou instalações comunitárias, sempre com foco na sustentabilidade (ABRELPE, 2023).

Por fim, o monitoramento a longo prazo assegura que as condições ambientais permaneçam sob controle, protegendo tanto a saúde pública quanto o meio ambiente. Cada uma

dessas etapas é essencial para garantir o encerramento seguro do aterro e sua integração harmoniosa com o entorno (CETESB, 2022).

2.2. Impactos socioambientais e à saúde pública dos aterros sanitários

Os aterros sanitários desempenham um papel fundamental na gestão de resíduos sólidos urbanos, entretanto, seu funcionamento pode ocasionar impactos socioambientais relevantes e riscos à saúde pública. Esses efeitos decorrem, principalmente, da geração de poluentes atmosféricos, da produção de chorume e biogás, bem como da disposição inadequada de resíduos e da localização próxima a áreas habitadas (MMA, 2021). A presença desses empreendimentos em regiões urbanas pode comprometer a qualidade do ar, do solo e da água, além de afetar negativamente o bem-estar das comunidades vizinhas (ABRELPE, 2023).

As águas subterrâneas e o solo estão entre os compartimentos ambientais mais suscetíveis à contaminação proveniente de aterros sanitários, principalmente pela infiltração do chorume. O chorume é um efluente líquido altamente poluente, resultante da decomposição da matéria orgânica e da percolação da água da chuva pelos resíduos dispostos. Sua composição é complexa e variável, contendo elevadas concentrações de matéria orgânica, metais pesados (como chumbo, cádmio e mercúrio), nutrientes (como amônia e nitrogênio), patógenos e compostos orgânicos tóxicos (Dias *et al*., 2019). A infiltração desse efluente no solo pode comprometer a estrutura e a fertilidade do solo, além de atingir o lençol freático, colocando em risco a qualidade da água subterrânea utilizada para consumo humano, irrigação e outros fins. Os efeitos podem ser de longo prazo, e a remediação dessas contaminações é complexa e onerosa, exigindo ações preventivas e sistemas eficazes de impermeabilização e drenagem nos aterros (Silva; Mendes, 2020).

O aquecimento global e as mudanças climáticas são notadamente influenciados pelas emissões geradas durante a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos dispostos em aterros sanitários, processo no qual se formam grandes volumes de gases como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). O metano é particularmente preocupante, pois possui um potencial de aquecimento global cerca de 25 vezes superior ao do CO_2 em um horizonte de 100 anos, sendo altamente inflamável e capaz de causar explosões em determinadas concentrações. O dióxido de carbono, embora menos potente, contribui de forma significativa para o efeito estufa pela sua abundância e permanência prolongada na atmosfera (IPCC, 2021).

Contudo, a atmosfera também é significativamente impactada por outros gases liberados nesse processo, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), e compostos

orgânicos voláteis (COVs), que são tóxicos e podem representar riscos à saúde humana e ambiental. O sulfeto de hidrogênio, por exemplo, é altamente tóxico e pode causar danos ao sistema nervoso central em altas concentrações, enquanto os COVs estão associados a efeitos cancerígenos e mutagênicos (Silva *et al.*, 2018).

Além disso, a liberação desses gases está diretamente relacionada à geração de odores desagradáveis, um dos principais problemas ambientais e sociais de aterros sanitários. O mau cheiro decorrente da decomposição dos resíduos orgânicos não apenas compromete a qualidade de vida das comunidades vizinhas, mas também configura uma forma de poluição atmosférica, classificada como incômoda e potencialmente prejudicial à saúde (Oliveira; Pereira, 2020).

A apropriação de vastas áreas para a instalação de aterros sanitários pode provocar graves impactos ambientais e socioculturais, especialmente quando localizados próximos a ecossistemas sensíveis ou em regiões de relevante biodiversidade. A substituição de ambientes naturais por áreas de disposição de resíduos leva à fragmentação de habitats, perda de cobertura vegetal nativa e diminuição da fauna local, contribuindo diretamente para a redução da biodiversidade. Segundo o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, aproximadamente 60% dos aterros em países em desenvolvimento estão situados em áreas ambientalmente vulneráveis, resultando em perda significativa de ecossistemas e de serviços ambientais como polinização, regulação do clima e purificação da água (PNUMA, 2019).

Além disso, a instalação de aterros sanitários pode interferir em áreas de valor cultural, histórico ou espiritual para comunidades tradicionais e povos originários. A construção de empreendimentos desse tipo em locais considerados sagrados ou historicamente relevantes pode levar à descaracterização de territórios, perda de patrimônio cultural e enfraquecimento da identidade comunitária (Souza; Lima, 2020). Em alguns casos, populações locais relatam não terem sido adequadamente consultadas durante o processo de licenciamento, o que fere o princípio da consulta prévia, livre e informada, estabelecido pela Convenção 169 da OIT (Organização Internacional do Trabalho, 1989).

Portanto, além dos impactos ambientais diretos, os aterros sanitários podem desencadear conflitos socioambientais e processos de injustiça ambiental, sobretudo quando implantados em áreas habitadas por comunidades marginalizadas que têm pouca capacidade de influenciar decisões políticas e ambientais (Acselrad, 2010).

2.3. Impactos à saúde pública

As emissões de gases e odores provenientes dos aterros sanitários podem afetar a saúde das comunidades vizinhas, provocar problemas respiratórios, irritações nas vias aéreas e agravar condições pré-existentes como asma e bronquite. O surgimento de alimentos cultivados proximamente pode ser afetado por contaminação do solo e das águas subterrâneas por meio de aterros sanitários, possibilitando riscos para a saúde humana devido à ingestão de as emissões de gases e odores provenientes dos aterros sanitários representam sérios riscos à saúde das comunidades vizinhas. A liberação de gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e compostos orgânicos voláteis (COVs) pode provocar problemas respiratórios, irritações nas vias aéreas superiores e agravar condições pré-existentes, como asma e bronquite. O sulfeto de hidrogênio, por exemplo, mesmo em baixas concentrações, causa náuseas, dor de cabeça, irritação ocular e, em níveis mais elevados, pode ser fatal (WHO, 2016). Já a exposição prolongada aos COVs está associada a efeitos neurotóxicos, hepatotóxicos e até carcinogênicos (Silva; Mendes, 2021).

Em relação aos impactos à saúde pública, é importante destacar que a exposição contínua a esses gases, especialmente em áreas com baixa ventilação e alta densidade populacional próxima aos aterros, aumenta significativamente o risco de doenças respiratórias e cardiovasculares, comprometendo a qualidade de vida da população local (CETESB, 2022).

Também vale ressaltar os riscos à segurança alimentar. O cultivo de alimentos em áreas próximas a aterros sanitários pode ser afetado pela contaminação do solo e das águas subterrâneas pelo chorume. Esse líquido percolado contém uma variedade de metais pesados, como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), arsênio (As) e cromo (Cr), que podem ser absorvidos pelas plantas e acumulados em seus tecidos (ANVISA, 2019). A ingestão de alimentos contaminados por esses metais pode causar danos neurológicos, distúrbios renais, alterações hormonais, efeitos mutagênicos e até câncer, especialmente com a exposição crônica (Ferreira *et al*., 2020).

A presença de aterros sanitários nas proximidades de comunidades pode comprometer significativamente a qualidade de vida dos moradores locais. Entre os principais impactos estão o desconforto provocado pelos odores desagradáveis, a presença de vetores de doenças (como moscas, roedores e mosquitos), o aumento do tráfego de veículos pesados, a emissão de material particulado e níveis elevados de ruído (CETESB, 2021. Esses aspectos podem causar transtornos respiratórios, cefaleia, distúrbios do sono, náuseas e irritações oculares (WHO, 2016).

Outro risco importante é a proximidade dos aterros às áreas habitadas, uma vez que há potencial para a degradação ambiental e social. O odor contínuo, por exemplo, além de gerar incômodo físico, pode desencadear problemas psicológicos como estresse, ansiedade, irritabilidade e até depressão, associados ao medo da contaminação ambiental e ao sentimento de abandono pelas autoridades (Souza; Lima, 2020).

Além disso, a literatura aponta que comunidades expostas por longos períodos a aterros sanitários mal gerenciados relatam sentimento de insegurança, estigmatização e queda na autoestima coletiva (Acselrad, 2010). Esses fatores impactam negativamente na coesão social e no bem-estar geral da população (Fiorillo, 2019).

2.4. Legislação ambiental associada aos aterros sanitários

A Resolução CONAMA nº 404, de 11 de novembro de 2008, estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterros sanitários de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Consideram-se aterros de pequeno porte aqueles com disposição diária de até 20 toneladas de resíduos sólidos urbanos. A resolução visa simplificar o processo de licenciamento para esses empreendimentos, levando em conta as dificuldades enfrentadas por municípios de pequeno porte na implantação e operação de aterros sanitários. Entre as diretrizes estabelecidas, destacam-se:

- A necessidade de apresentação de projeto executivo contendo informações sobre a localização, capacidade e vida útil do aterro;
- A implementação de sistemas de impermeabilização, drenagem de líquidos percolados (chorume) e gases, além de medidas de controle ambiental;
- A realização de monitoramento ambiental periódico para avaliar possíveis impactos ao meio ambiente e à saúde pública.

Essas medidas visam assegurar que a disposição final dos resíduos ocorra de forma ambientalmente adequada, minimizando riscos e impactos negativos.

A PNRS determina que:

- A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deve ser realizada em aterros sanitários licenciados, observando normas operacionais específicas para evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, além de minimizar impactos ambientais adversos;

- Somente os rejeitos, ou seja, resíduos sólidos que não apresentam possibilidade de reutilização, reciclagem ou outra forma de destinação ambientalmente adequada, devem ser encaminhados para aterros sanitários;
- Os responsáveis pela gestão dos aterros devem implementar planos de monitoramento e controle ambiental, garantindo a mitigação de impactos e a conformidade com a legislação vigente.

Por sua vez, a ABNT apresenta as NBR 13896/1997 que trata dos procedimentos para a elaboração e apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, incluindo critérios de localização, dimensionamento e operação. A NBR 8419/1992 que estabelece diretrizes para a apresentação de projetos de sistemas de tratamento de resíduos sólidos urbanos, incluindo aterros sanitários. E a NBR 10157/2019 que define os critérios para a construção e operação de aterros de resíduos não perigosos, visando à proteção ambiental e à saúde pública.

2.5. Alternativas emergentes aos aterros sanitários

Um dos principais desafios ambientais enfrentados pelas sociedades contemporâneas é a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos. Apesar dos aterros sanitários serem considerados, conforme a PNRS, uma forma de disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, essa não é uma solução sustentável a longo prazo. Isso se deve ao fato de que essas áreas permanecem inutilizáveis por décadas para qualquer outro fim que não seja paisagístico ou restritamente controlado, devido à presença de gases, chorume e ao risco de instabilidade do solo (MMA, 2010). Segundo Silva, mesmo após o encerramento do aterro, a área deve passar por monitoramento ambiental contínuo por pelo menos 20 a 30 anos, o que limita severamente o reaproveitamento do solo para usos urbanos ou agrícolas.

Devido à necessidade de grandes áreas para instalação de aterros sanitários, esse tipo de solução torna-se inviável em países como o Japão, que possui um território montanhoso e densamente povoado, com apenas 1% de área plana disponível para este fim (Ministério do Meio Ambiente do Japão, 2018). Por isso, o país adotou a incineração como principal método de tratamento de resíduos, processando cerca de 80% de seus resíduos municipais (Nippon.com, 2018). Contudo, estima-se que os aterros ainda disponíveis no Japão possam atingir sua capacidade máxima em aproximadamente 20 anos, mantidos os atuais níveis de geração de resíduos (Ministério do Meio Ambiente do Japão, 2018).

Outro exemplo é a Alemanha, onde a legislação ambiental proíbe, desde 2005, o envio de resíduos urbanos com mais de 3% de matéria orgânica para aterros. Com isso, o país passou a destinar apenas 1% dos seus resíduos urbanos para aterros, utilizando alternativas como reciclagem, compostagem e recuperação energética (EEA, 2020).

No Brasil, o município de Parintins-AM, localizado em uma ilha na região amazônica, enfrenta limitações semelhantes. O transporte de resíduos é feito por vias fluviais, o que torna inviável o envio de rejeitos para outros locais. Além disso, não há aterros licenciados na cidade para resíduos infecciosos, gerando riscos ambientais significativos (Rezende, 2023).

Além da ocupação e impossibilidade de uso das áreas de um aterro sanitário, essa técnica ainda apresenta riscos de contaminação do solo, das águas subterrâneas e da atmosfera (CETESB, 2021). Portanto, tecnologias emergentes vêm sendo desenvolvidas para diminuir a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários e, consequentemente, mitigar seus impactos ambientais. Entre essas tecnologias estão o aproveitamento energético de resíduos, compostagem e processos de reciclagem mais eficazes.

2.6. Tecnologias de tratamento térmico

A incineração de resíduos com recuperação de energia é uma das alternativas emergentes mais promissoras, conhecida como *Waste-to-Energy* (WtE) e este procedimento produz energia térmica ou elétrica e reduz significativamente o volume de resíduos. Segundo a Agência Internacional de Energia as plantas de *WtE* podem reduzir o volume dos resíduos em até 90%, além de produzir eletricidade e calor utilizáveis (IEA, 2019).

Conforme Moran, a pirólise é uma tecnologia térmica que decompõe resíduos na ausência de oxigênio, apresentando-se como uma alternativa viável para a gestão de resíduos em áreas urbanas. O gás sintético pode ser empregado para gerar energia elétrica ou térmica, enquanto o bio-óleo pode ser utilizado como combustível alternativo ou matéria-prima para a produção de produtos químicos. Já o carvão vegetal, que é distinto do carvão mineral (de origem fóssil), é um subproduto sólido com alto poder calorífico, podendo ser usado como biocombustível ou como material adsorvente em processos industriais e ambientais.

2.7. Tecnologias biológicas

De acordo com a FAO, a compostagem é um processo que transforma resíduos orgânicos em composto, um material rico em nutrientes, utilizado como adubo na agricultura

sustentável. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. Essa técnica não só reduz a quantidade de resíduos que vai para os aterros, mas também melhora a qualidade do solo e reduz a necessidade de fertilizantes químicos (FAO, 2020).

O composto orgânico proveniente da compostagem é extremamente benéfico para o solo, pois melhora suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Ele aumenta a capacidade de retenção de água, favorece a atividade microbiana benéfica, melhora a estrutura do solo e fornece nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio. Por isso, seu uso na agricultura e jardinagem tem sido cada vez mais incentivado, promovendo práticas agrícolas sustentáveis. Além disso, como cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil são compostos por matéria orgânica, a compostagem representa uma alternativa eficaz para reduzir significativamente o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, promovendo a reciclagem de nutrientes e o retorno de materiais úteis à cadeia produtiva (ABRELPE, 2023).

Outra forma de utilizar os resíduos orgânicos é por meio da produção de biogás, um combustível renovável gerado a partir da digestão anaeróbica — um processo biológico no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio. O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de outros gases. Pode ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica, como combustível veicular (quando purificado para biometano) ou mesmo como fonte de calor em processos industriais e agrícolas. A tecnologia de digestão anaeróbica é aplicada em estações de tratamento de esgoto, granjas, aterros sanitários e centrais de resíduos orgânicos urbanos. Além de contribuir para a redução dos gases de efeito estufa, o biogás é uma alternativa viável principalmente em regiões com grande produção de resíduos orgânicos, como áreas urbanas densas e zonas rurais com atividades agroindustriais. Conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2020), o Brasil possui potencial técnico para produzir cerca de 84 milhões de m^3 de biogás por dia, o que equivale a quase 25% da demanda nacional de energia elétrica. Assim, a produção de biogás representa uma solução ambientalmente sustentável e economicamente atrativa para o tratamento de resíduos orgânicos.

2.8. Reciclagem e reutilização

A reciclagem é uma das táticas mais famosas na administração sustentável de resíduos, no entanto, enfrenta vários obstáculos técnicos, econômicos e sociais globalmente. De acordo com o relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, apenas 9% dos resíduos plásticos produzidos no mundo são reciclados de maneira eficaz. Um dos maiores

desafios reside no fato de que nem todos os materiais podem ser reciclados: muitos plásticos contêm uma combinação de polímeros, aditivos ou contaminantes que tornam a sua reciclagem inviável. Também não é possível reaproveitar papel e papelão contaminados com alimentos ou gordura, como embalagens de *fast food*. Em relação ao vidro, as diversas composições químicas e temperaturas de fusão tornam a reciclagem conjunta um desafio - por exemplo, o vidro de garrafas e o de janelas não devem ser combinados. Apesar do grande potencial de reaproveitamento dos metais, a coleta seletiva insuficiente e a poluição por resíduos orgânicos ainda representam barreiras consideráveis.

Além das restrições técnicas, a reciclagem requer uma infraestrutura especializada, sistemas de triagem eficientes e a participação ativa da população, algo que nem sempre acontece, principalmente em nações em desenvolvimento. Segundo o Banco Mundial (2020), mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos urbanos são produzidas anualmente globalmente, sendo que aproximadamente 30% não são tratados ou destinados de maneira apropriada. Esses dados indicam que, apesar da reciclagem ser um instrumento crucial, ela não é suficiente para solucionar o desafio da gestão de resíduos. Portanto, é crucial incorporá-la a outras soluções, tais como diminuição do consumo, reaproveitamento de materiais, compostagem, biodigestão e tecnologias de conversão de energia, com o objetivo de alcançar um sistema verdadeiramente sustentável e circular.

A reutilização de materiais e produtos é outra prática crucial na gestão sustentável de resíduos, que envolve ampliar ao máximo a durabilidade de um produto antes que ele se transforme em lixo. Esta estratégia é fortemente apoiada por políticas e ações de economia circular, que buscam separar o desenvolvimento econômico da exploração de recursos naturais, incentivando a permanência dos materiais no ciclo de produção pelo maior período possível. Segundo o Relatório Global de Economia Circular 2023, divulgado pela *Circle Economy*, apenas 7,2% da economia global é realmente circular, indicando um grande potencial para o crescimento dessas práticas.

A reutilização também promove a reformulação de produtos, tornando-os mais resistentes, reparáveis e passíveis de reciclagem. Setores como o de eletrônicos, embalagens e moda estão implementando ações nesse sentido, como a implementação de sistemas de devolução, remanufatura e reutilização de peças. Por exemplo, a União Europeia definiu objetivos ambiciosos para 2030, demandando que todos os produtos disponíveis no mercado sejam concebidos para serem reutilizados ou reciclados de maneira econômica (Comissão Europeia, 2020). No aspecto ambiental, a reutilização tem o potencial de diminuir em até 50% a produção de resíduos, além de reduzir consideravelmente o uso de energia e as emissões

ligadas à criação de novos produtos, segundo projeções do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2022).

2.9. Tecnologias químicas

Tecnologias químicas podem ser utilizadas para tratar resíduos sólidos, realizando processos como a gasificação e a pirólise, que convertem os resíduos em produtos com valor energético ou químico. Um desses processos é a gasificação, uma técnica térmica que transforma resíduos orgânicos em gás de síntese (syngas) por meio da aplicação de altas temperaturas em um ambiente com pouco oxigênio. O syngas tem várias aplicações, como a geração de energia, a produção de hidrogênio ou sua conversão em combustíveis líquidos. Citando Arena, “a gasificação é uma tecnologia promissora que pode contribuir significativamente para a gestão sustentável de resíduos sólidos”.

Embora a pirólise e a gasificação sejam processos semelhantes por operarem em altas temperaturas e envolverem a decomposição térmica de resíduos, a principal diferença está na presença de oxigênio: a pirólise ocorre na completa ausência de oxigênio, enquanto a gasificação utiliza uma quantidade controlada (subestequiométrica). Como resultado, a pirólise gera produtos como bio-óleo, carvão vegetal e gás, enquanto a gasificação foca na produção de syngas com maior potencial energético e industrial (Moran, 2018).

3. METODOLOGIA

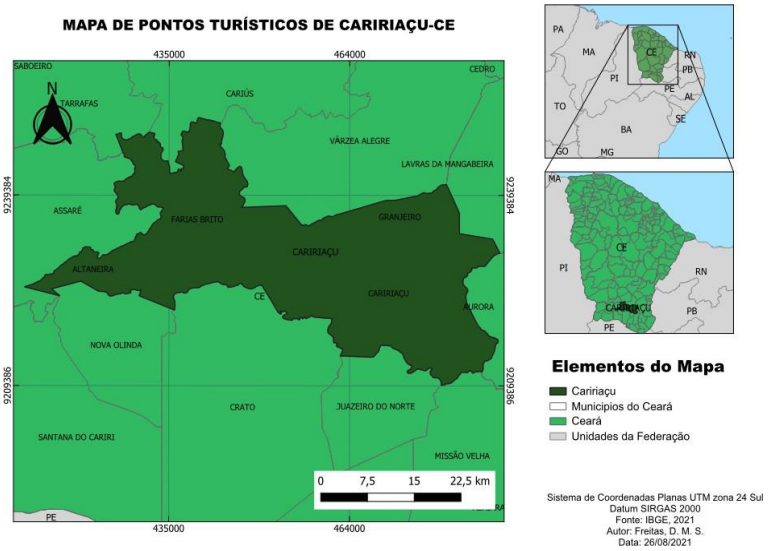
3.1. Caracterização da pesquisa

Este projeto, categorizado como um estudo de caso aplicado de natureza descritiva e abordagem quantitativa (Prodanov; Freitas, 2013), visa desenvolver um modelo integrado de aterro sanitário para Caririaçu-CE, a partir de três etapas: diagnóstico da situação atual da gestão de resíduos sólidos na cidade; desenvolvimento do projeto técnico de acordo com a NBR 13.896/1997, ajustado às condições locais de solo, clima e infraestrutura; e avaliação da viabilidade técnica e ambiental.

3.2. Local do estudo

Este estudo tem como foco o município de Caririaçu, localizado na região do Cariri, no estado do Ceará, distante cerca de 480 km da capital Fortaleza, o município está a uma altitude média de 713 metros e coordenadas geográficas aproximadamente de 7º02’31” S e 39º17’02” O (Figura 3). Segundo dados do IBGE (2022), o município possui uma população de 26.320 habitantes e uma área de 623,00 km². Faz divisa com os municípios de Juazeiro do Norte, Granjeiro, Lavras da mangabeira, Aurora, Crato e Farias Brito. A economia local concentra-se majoritariamente na agricultura, comércio e serviços, havendo uma demanda crescente por soluções apropriadas para a administração de RSU.

Figura 3 - Localização do município de Caririaçu – CE



Fonte: IBGE (2021)

No que diz respeito ao saneamento básico, o município possui deficiências consideráveis, principalmente em relação à destinação final adequada dos RSU. O atual cenário do município conta com uma disposição final no Centro de Tratamento de Resíduos Cariri, criado a partir de uma parceria entre a Secretaria das Cidades do Estado do Ceará, a Caixa Econômica Federal e as prefeituras municipais, localizado no município de Juazeiro do Norte à 27km de distância, e possui financiamento do Fundo de Apoio à Gestão Compartilhada.

Caririaçu está situado em uma área de topografia predominantemente montanhosa, o que requer cuidado especial na escolha do local mais apropriado para a construção de um aterro sanitário, levando em consideração critérios de estabilidade geotécnica e escoamento superficial. Portanto, a implementação de um sistema de descarte final ambientalmente correto é crucial para assegurar a sustentabilidade e a saúde urbana na cidade.

O município lida com desafios consideráveis na administração dos RSU devido ao descarte inadequado em um vazadouro a céu aberto provocando a poluição do solo e dos recursos de água, bem como perigos para a saúde pública. Informações da prefeitura indicam que 92% dos resíduos eram descartados de maneira inadequada até 2020, impactando três nascentes próximas e provocando complicações respiratórias em 78% da população adjacente. Esta situação requer ações imediatas, como a construção de um aterro apropriado, a recuperação de áreas danificadas e a implementação de programas de educação ambiental, em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Em resposta a essa questão, o Ministério Público do Ceará (MPCE) propôs uma Ação Civil Pública, resultando na decisão judicial de que, em abril de 2022, o município teria dois anos para restaurar a área afetada pelo lixão. Ao mesmo tempo, Caririaçu se juntou a um consórcio intermunicipal com o objetivo de construir um aterro sanitário regional, comprometendo-se, através de um Termo de Ajuste de Conduta (TAC), a executar medidas para a correta gestão dos resíduos sólidos.

Em dezembro de 2022, o consórcio formado pela Aegea Saneamento e a ENGEP Ambiental ganhou a licitação pública organizada pelo Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Cariri (CGIRS-CARIRI) para a administração dos resíduos sólidos urbanos em nove municípios da região, incluindo Caririaçu. O acordo prevê um investimento de mais de R$ 110 milhões em 30 anos, incluindo a construção de um aterro sanitário e a correta destinação ambiental dos resíduos, possibilitando o encerramento dos lixões em operação.

Embora o Consórcio Público de Resíduos Sólidos do Cariri tenha sido estabelecido em 2018, com investimentos de R$ 110 milhões destinados à construção de um aterro sanitário regional e à eliminação dos lixões nos nove municípios membros, incluindo Caririaçu, a

execução concreta das medidas ainda não tenha acontecido. Até fevereiro de 2025, a área contava com 22 aterros sanitários em funcionamento, demonstrando a ineficácia do acordo. No município, a situação é ainda mais delicada: além de continuar contribuindo financeiramente para o consórcio sem ver resultados concretos, a cidade tem que suportar despesas extras para transportar seus resíduos por uma distância aproximada de 40 km até o Centro de Tratamento de Resíduos do Cariri, localizado em Juazeiro do Norte. Essa dupla despesa, juntamente com a continuidade dos efeitos ambientais e sanitários do antigo lixão local, enfatiza a urgência de investir em um aterro sanitário próprio. Isso proporcionaria maior controle operacional, diminuição de despesas a longo prazo e uma resolução definitiva para o problema dos resíduos na cidade.

3.3. Seleção da área

A seleção do local para a instalação do aterro sanitário em Caririaçu - CE considera critérios técnicos, legais e ambientais, com o objetivo de garantir a sustentabilidade do projeto e a redução dos efeitos no meio ambiente e na comunidade. Conforme a NBR 13896, a seleção do local deve levar em conta fatores como a geologia, a hidrologia, a topografia, o clima e a distância de áreas urbanas, cursos de água e áreas de preservação (ABNT, 1997).

Além disso, foram seguidas as orientações definidas pela Resolução CONAMA Nº 404/2008, que estabelece padrões para a localização e funcionamento de aterros sanitários, e pela Lei Nº 12.305/2010, que estabelece a PNRS.

Ao longo do processo, empregaram-se critérios de exclusão e aptidão para eliminar áreas tecnicamente inviáveis, como áreas com declives acentuados, próximas a corpos de água ou espaços em Áreas de Preservação Permanente (APPs). O uso do programa de georreferenciamento QGIS e dados cartográficos do IBGE, foram ferramentas essenciais na análise, com a aplicação de malhas para identificar as zonas urbanas, extrair áreas próximas a corpos de água. Além de extrair essas áreas com o programa, foi possível analisar inclinações com a tecnologia 3D e conhecimento prévio das possíveis áreas. Com base nesses dados, foi possível identificar uma região com potencial para a instalação de um aterro sanitário. Essa região deve passar por estudos específicos, incluindo sondagens do solo, análises hidrogeológicas e, se necessário, um Estudo de Impacto Ambiental e um Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), de acordo com as exigências dos órgãos ambientais pertinentes.

A escolha da área apropriada para a instalação do aterro sanitário em Caririaçu-CE foi realizada de acordo com os critérios técnicos definidos pela NBR 13.896 da ABNT (1997),

seguindo as orientações apresentadas nas Tabelas 1 e 2 deste estudo. A abordagem utilizada seguiu um processo rigoroso de seleção e avaliação multicritério.

Primeiramente, foi feita uma extensa avaliação territorial que excluiu todas as regiões com restrições ambientais ou técnicas relevantes. Esta fase inicial diminuiu consideravelmente as alternativas disponíveis no âmbito municipal. Das áreas restantes, três locais potenciais foram selecionados para avaliação detalhada. Cada um deles foi submetido a uma análise técnica abrangente, considerando critérios técnicos, ambientais e operacionais.

Tabela 1 - Critérios técnicos para seleção de áreas para implantação de aterro sanitário

CRITÉRIOS TÉCNICOS		
ITEM	CRITÉRIOS	OBSERVAÇÕES
1	Uso do solo	As áreas têm que se localizar numa região onde o uso do solo seja rural (agrícola) ou industrial e fora de qualquer Unidade de Conservação Ambiental.
2	Proximidades aos cursos d'água	As áreas não podem se situar a menos de 200 metros de corpos d'água relevantes, tais como, rios, lagos, lagoas e oceanos. Também não poderão estar a menos de 50 metros de qualquer corpo d'água, inclusive valas de drenagem que pertençam ao sistema de drenagem municipal ou estadual.
3	Proximidade aos núcleos residenciais	As áreas não devem se situar a menos de mil metros de núcleos residenciais urbanos que abriguem 200 ou mais habitantes.
4	Proximidade aos aeroportos	As áreas não podem se situar próximas a aeroportos ou aeródromos e devem respeitar a legislação em vigor.
5	Distância do lençol freático	Para aterros com impermeabilização inferior através de manta plástica sintética, a distância do lençol freático a manta não poderá ser inferior a 1,5 metros. Para aterros com impermeabilização inferior através de camada de argila, a distância do lençol freático a camada impermeabilizante não poderá ser inferior a 2,5 metros e a camada impermeabilizante deverá ter um coeficiente de permeabilidade menor que 10¬6 cm/s.
6	Vida útil mínima	É desejável que as novas áreas de aterro sanitário tenham, no mínimo, cinco anos de vida util.
7	Permeabilidade do solo natural	É desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, com vistas a reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. As áreas selecionadas devem ter características argilosas e jamais deverão ser arenosas.
8	Extensão da bacia de drenagem	A bacia de drenagem das águas pluviais deve ser pequena, de modo a evitar o ingresso de grandes volumes de água de chuva na área do aterro.
9	Facilidade de acesso para veículos pesados	O acesso ao terreno deve ter pavimentação de boa qualidade, sem rampas íngremes e sem curvas acentuadas, de forma a minimizar o desgaste dos veículos coletores e permitir seu livre acesso ao local de vazamento mesmo na época de chuvas muito intensas.
10	Topografia	Preferencialmente, o terreno deve possuir ou se situar próximo a jazida de material de cobertura, de modo a assegurar a permanente cobertura do lixo a baixo custo.

Fonte: Monteiro et al (2001)

Tabela 2 - Critérios econômico-financeiro e político-social para seleção da área do aterro

CRITÉRIOS ECONÔMICO-FINANCEIROS		
ITEM	CRITÉRIOS	OBSERVAÇÕES
1	Distância do centro geométrico de coleta	É desejável que o percurso de ida (ou de volta) que os veículos de coleta fazem até o aterro, através das ruas e estradas existentes, sejam o menor possível, com vistas a reduzir o seu desgaste e o custo transporte do lixo.
2	Custo de aquisição do terreno	Se o terreno não for d propriedade da prefeitura, deverá estar, presencialmente, em área rural, uma vez que o seu custo de aquisição será menor do que o de terrenos situados em áreas industriais.
3	Custo de investimento em construção e infraestrutura	É importante que áreas escolhidas disponha de infraestrutura completa, reduzindo os gastos de investimento em abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos, drenagem de águas pluviais, distribuição de energia elétrica e telefonia.
4	Custos com a manutenção do sistema de drenagem	A área escolhida deve ter um relevo suave, de modo a minimizar a erosão do solo e reduzir os gastos com limpeza e manutenção dos componentes do sistema de drenagem.
CRITÉRIOS POLÍTICO-SOCIAIS		
1	Distância de núcleos urbanos de baixa renda	Aterros são locais que atraem pessoas desempregadas, de baixa renda ou sem outra qualificação profissional, que buscam a catação do lixo como forma de sobrevivência e que passam a viver desse tipo de trabalho em condições insalubres, gerando, para a prefeitura, uma serie de responsabilidade sociais e políticas. Por isso, caso a nova área se localize próxima a núcleos urbanos de baixa renda, deverão ser criados mecanismos alternativos de geração de emprego e/ou renda que minimizem as pressões sobre a administração do aterro em busca da oportunidade de catação. Entre tais mecanismos poderão estar iniciativas de incentivos formação de cooperativas de catadores, que podem trabalhar em instalações de reciclagem dentro do próprio aterro ou mesmo nas ruas da cidade, de forma organizada, fiscalizada e incentivada pela prefeitura.
2	Acesso a área através de vias com baixa densidade de ocupação	O tráfego de veículos transportando lixo é um transtorno para os moradores das ruas por onde estes veículos passam, sendo desejável que o acesso a área do aterro passe por locais de baixa densidade demográfica.
3	Inexistência de problemas com a comunidade local	É desejável que, nas proximidades da área selecionada, não tenha havido nenhum tipo de problemas da prefeitura com a comunidade local, com organizações não-governamentais (ONG`s) e com a mídia, pois esta indisposição com o poder público irá gerar reações negativas a instalação do aterro.

Fonte: Monteiro et al (2001)

A escolha do local para a instalação do aterro sanitário obedeceu aos critérios técnicos estabelecidos por Monteiro *et al.* (2001), que levou em conta três graus de cumprimento dos requisitos, sendo eles cumprimento total (100%), cumprimento parcial/com demanda por obras (50%) e ausência de cumprimento (0%). Esta metodologia sistemática possibilitou uma escolha baseada em critérios objetivos, assegurando a seleção da localização mais apropriada em termos técnicos, ambientais e operacionais, como evidenciado nas Tabelas 3 e 4 desta pesquisa.

Tabela 3 - Hierarquização dos critérios de seleção de áreas para implantação de aterros sanitários municipais

CRITÉRIOS	PRIORIDADE
Atendimento ao SLAP* e à legislação ambiental em vigor	1
Atendimento aos condicionantes político-sociais	2
Atendimento aos principais condicionantes econômicos	3
Atendimento aos principais condicionantes técnicos	4
Atendimento aos demais condicionantes econômicos	5
Atendimento aos demais condicionantes técnicos	6

Fonte: Monteiro et al (2001)

Tabela 4 - Pesos dos critérios e dos tipos de atendimentos estabelecidos para a análise das áreas investigadas

Pesos dos critérios e do tipo de atendimento	
PRIORIDADE DOS CRITÉRIOS	PESO
1	10
2	6
3	4
4	3
5	2
6	1
TIPO DE ATENDIMENTO	PESO
Total	100/%
Parcial ou com obras	50%
Não atendido	0%

Fonte: Monteiro et al (2001)

3.4. Estimativa da quantidade de resíduos sólidos urbanos e determinação das células do aterro

O dimensionamento do aterro sanitário de Caririaçu-CE foi realizado com base na estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) para um período de 20 anos. Para a projeção populacional utilizou-se o método decrescente de crescimento com base nos dados históricos do IBGE. Para a estimativa de geração de RSU, considerou-se taxa de crescimento de geração de resíduos. Já para o dimensionamento das células, o cálculo do volume necessário considerou a densidade dos resíduos compactados no aterro, altura máxima das camadas de cobertura diária e final, e o fator de redução de volume ao longo do tempo.

As células do aterro sanitário são unidades técnicas criadas para a disposição ordenada de resíduos urbanos sólidos, projetadas de maneira escalonada para assegurar a operação, a proteção ambiental e a utilização eficiente do espaço disponível. Cada célula simboliza uma fase construtiva e operacional do aterro, devendo ser implementadas e empregadas de forma sequencial, de acordo com a capacidade de armazenamento de resíduos e a progressão da produção ao longo do tempo.

3.5. Revestimento de fundo

A abordagem para o revestimento do fundo das células do aterro sanitário foi definida de acordo com as diretrizes da NBR 13.886/1997, utilizando um sistema de barreira dupla. O processo envolve a preparação do subleito através da regularização e compactação inicial, a aplicação de três camadas de argila compactada, cada uma com 20 cm de espessura, com o uso de equipamentos adequados para alcançar a umidade ideal e a permeabilidade requerida; e a instalação de geomembrana de PEAD com espessura mínima de 1,5 mm, incluindo processos de soldagem supervisionada e testes de vedação.

O método garante a qualidade através de monitoramento sistemático da compactação da argila por meio de testes de permeabilidade in situ; verificação da continuidade da geomembrana por meio de testes não destrutivos; e aplicação de uma camada de proteção sobre a membrana sintética. O mínimo de 2% de inclinação será garantido por meio de um sistema de nivelamento preciso, com o objetivo de drenar corretamente os líquidos que escoam. Todos os procedimentos serão registrados em relatórios técnicos particulares.

3.6. Drenagem do chorume

Para o dimensionamento do sistema de drenagem do chorume é necessário estimar a vazão de chorume que será gerado pelos RSU. Portanto, foi utilizado para dimensionamento o método suíço (Equação 1).

$$Qcho = \frac{\mathrm{PAK}}{\mathrm{t}} \tag{1}$$

Qcho = Vazão do chorume (L/s);

P = Precipitação (mm);

A = área da célula (m²);

t = tempo de medição (s);

K = coeficiente de dependência do grau de compactação dos RSU (adotado 0,15).

A partir do cálculo de vazão do chorume, calcula-se as dimensões das canaletas e tubulações de drenagem, essa etapa tem a função de garantir a coleta eficiente do chorume gerado e direcionar até os pontos de tratamento. Foram utilizadas as Equações 2 e 3 para o cálculo do espaçamento entre os drenos principais.

$$Qcho = \mathrm{KiA} \tag{2}$$

$$L = 2\mathrm{y}\sqrt{\frac{K}{Qcho}} \tag{3}$$

Qcho = vazão de chorume;

K = condutividade hidráulica do meio drenante;

i = declividade;

A = área do dreno;

L = espaço máximo entre drenos principais;

y = altura máxima do chorume (< 0,3 m).

3.7. Drenagem dos gases

O sistema de drenagem consiste em poços verticais ligados a drenos horizontais, que levam o biogás até um local de queima ou utilização energética. A localização dos poços é determinada com base na geometria da célula do aterro e na sua sobreposição à rede de drenagem de chorume. Cada dreno precisa ser posicionado de maneira a assegurar que nenhuma parte da célula esteja fora do alcance da cobertura, normalmente adotando um raio de influência de 30 metros. Se forem descobertas áreas, devem ser instalados drenos adicionais até que toda a célula esteja coberta.

O processo de captação pode ser passivo, devido à diferença de pressão, ou ativo, utilizando bombas de sucção. A seleção do sistema é determinada pela etapa de funcionamento do aterro e pela quantidade de gás produzido. Ademais, a drenagem de gases precisa estar em harmonia com os demais sistemas do aterro, particularmente o de chorume, para prevenir conflitos entre os condutos e assegurar a segurança e eficiência do conjunto.

3.8. Drenagem pluvial

Para elaborar o sistema de drenagem de uma célula de aterro, é crucial estimar a quantidade de chuva que cairá sobre sua superfície. Adotou-se o método racional conforme demonstrado na Equação 4.

$$Qmáx = 0{,}278CiA \tag{4}$$

$Qmáx$ = vazão de cheia (m^3/s);
C = coeficiente de escoamento superficial;
i = intensidade de precipitação para o sertão oriental nordestino (mm/h);
A = área da bacia (km^2);

Para estabelecer essa vazão, é preciso entender as propriedades da superfície da célula do aterro. Neste cenário, o coeficiente de escoamento superficial é adotado. A estimativa desse coeficiente pode ser de 0,3. Este valor leva em conta o estado da célula após o seu fechamento, quando estará coberta por uma camada de argila e, posteriormente, por solo com vegetação (CETESB, 2023); NBR 13896, 1997).

Um outro fator crucial para o cálculo é a intensidade da precipitação crítica, determinada através da Equação 5, que corresponde à equação de intensidade-duração-frequência (IDF), adotada para a região de estudo, conforme dados disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006). Esta fórmula, ilustra a intensidade da chuva para o sertão oriental do Nordeste. A seleção desta equação é justificada pela falta de informações específicas sobre a intensidade da chuva para a cidade de Caririaçu-CE e áreas adjacentes. O método considera um período de retorno de 20 anos, compatível com a expectativa de vida útil da célula do aterro.

$$i = \frac{3609.11Tr^{0,12}}{(\mathrm{tc} + 30)^{0,95}} \tag{5}$$

Onde:

i = intensidade de precipitação para o sertão oriental nordestino (mm/h);

Tr = tempo de retorno (anos);

tc = tempo de concentração (min).

3.9. Dimensionamento da lagoa anaeróbia

O dimensionamento da lagoa anaeróbia segue as diretrizes de Jordão (2014), levando em conta que este tipo de unidade é apropriado para a fase inicial do tratamento do chorume, devido à elevada carga orgânica e à reduzida biodegradabilidade inerente a este efluente. A lagoa promove a digestão anaeróbia de compostos orgânicos, diminuindo consideravelmente a quantidade de DBO e DQO antes das fases seguintes.

O dimensionamento deve ser realizado seguindo etapas iniciais com a carga orgânica afluente, a vazão e a taxa de aplicação superficial, todos esses dados compõe o cálculo da área superficial dada na equação 6.

$$A = \frac{C}{TAS} \tag{6}$$

Onde:

A = Área superficial;

C = Carga orgânica afluente;

TAS = Taxa de aplicação superficial.

Sendo assim, pode-se determinar o volume útil da lagoa dada pela Equação 7.

$$V = A * h \quad (7)$$

Onde:

V = Volume útil;

A = Área superficial;

h = profundidade adotada.

Em seguida calcula-se o tempo de detenção, dada pela Equação 8.

$$td = \frac{V}{Q} \quad (8)$$

Onde:

Td = Tempo de detenção;

V = volume da lagoa (m^3);

Q = contribuição do efluente utilizado.

Estima-se para este dimensionamento uma redução de 50-60% da DBO, Redução de 40-50% da DQO e uma remoção da 0,25 m^3/kgDBO produzida. Além disso, recomendasse limpeza anual do lodo sedimentado, monitoramento trimestral de DBO/DQO e instalação de sistema de captação de biogás.

3.10. Dimensionamento da lagoa facultativa

A lagoa facultativa é uma unidade de tratamento biológico que mescla métodos aeróbios e anaeróbios, sendo comumente empregada como etapa final em sistemas que utilizam lagoa anaeróbia ou para o tratamento inicial de efluentes com carga orgânica moderada. O seu dimensionamento tem como objetivo assegurar a remoção eficaz de matéria orgânica e a

estabilização do efluente, considerando o tempo de retenção hidráulica, a temperatura local e a concentração de DBO do afluente.

O dimensionamento foi realizado com base no modelo de primeira ordem para remoção de DBO, conforme recomendado por Metcalf e Eddy (2016) e Von Sperling (2005). Inicialmente calcula-se o volume, conforme Equação 9 e eficiência de remoção dada pela equação 10.

$$V = \frac{Q * t}{1000} \tag{9}$$

$$DBOe = DBOa * e^{-k*t} \tag{10}$$

Onde:

V = Volume da lagoa (m^3);

Q = Vazão média do efluente (m^3/dia);

t = tempo de detenção hidráulico (dias);

DBOe = Concentração de DBO no efluente tratado (mg/L);

DBOa = Concentração de DBO no afluente (mg/L);

k = Constante da taxa de remoção da DBO (1/dia), dependendo da temperatura.

A profundidade da lagoa foi estabelecida entre 1,2 e 1,5 metros, um intervalo comum que possibilita a adequada absorção de oxigênio do ar e o desenvolvimento de algas fotossintetizantes, fundamentais para a oferta de oxigênio ao ambiente aeróbio superficial. O fundo da lagoa, que é mais profundo, mantém-se em condições anaeróbias, facilitando a decomposição de materiais sedimentados.

3.11. Infraestrutura de apoio

Segundo Jordão (2014), o projeto da infraestrutura de suporte deve ser integrado ao sistema do aterro, considerando os aspectos topográficos, operacionais e de segurança. As seguintes estruturas complementares estão previstas para o aterro sanitário sugerido para o município de Caririaçu:

- Portaria com guarita, cancela e balança rodoviária;

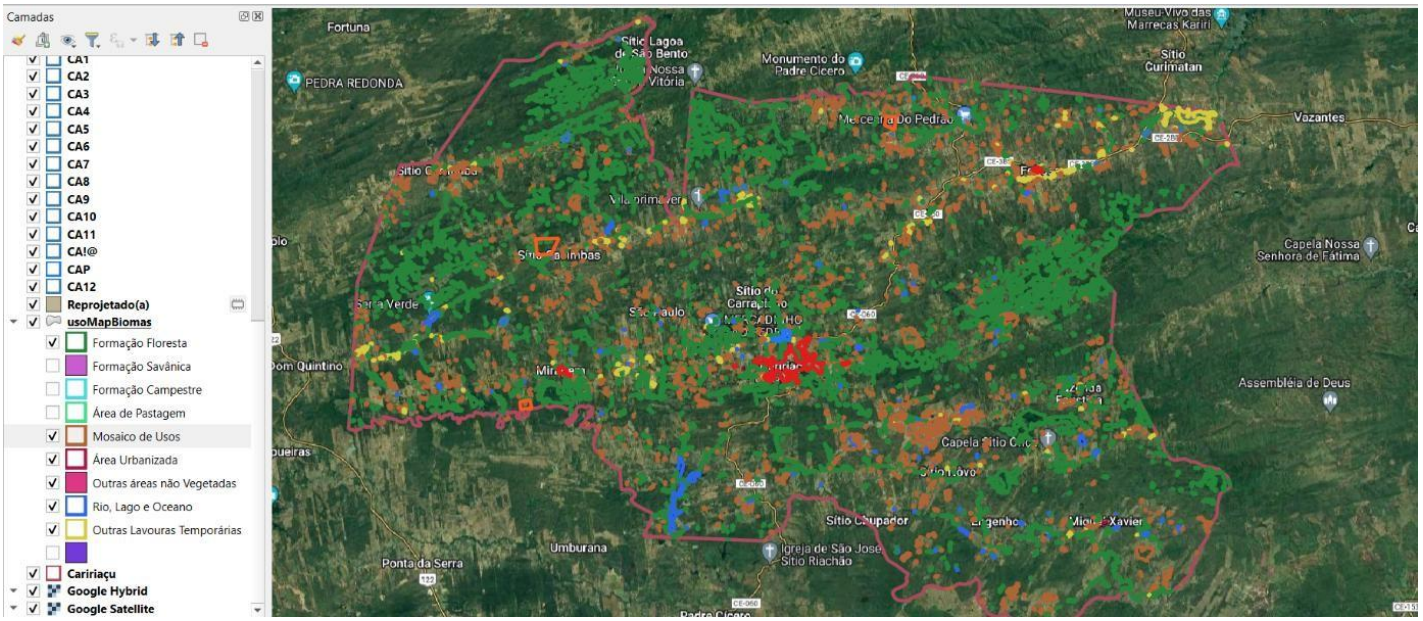
- Edifício administrativo com espaços de apoio operacional e técnico;
- Almoxarifado para armazenamento de equipamentos e materiais;
- Sistema viário interno interligando todas as áreas funcionais;
- Sistema de iluminação pública e segurança;
- Instalações sanitárias e ambientais;
- Cinturão verde no entorno da área.

4. RESULTADOS

4.1. Área selecionada para o aterro

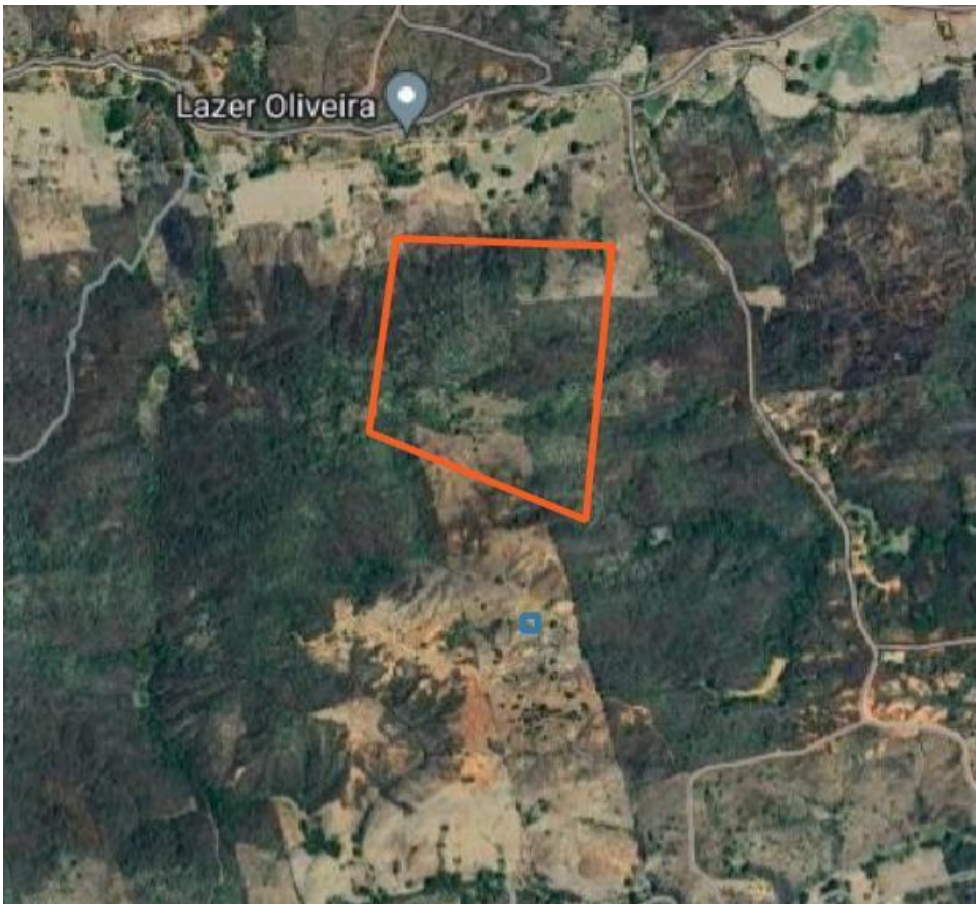
A escolha da área adequada para implantação do aterro sanitário no município de Caririaçu-CE foi realizada mediante pré-análise do município através do aplicativo QGIS, delimitando áreas através da aplicação do método de análise multicritério com inserção de malhas, conforme consta na metodologia e na Figura 4. Com isso foram identificadas a 3 áreas preliminares que atendem aos critérios estabelecidos, conforme Figuras 5, 6 e 7.

Figura 4 - Aplicação do método multicritério através de malhas no software QGIS



Fonte: Autoral (2025).

Figura 5 - Área preliminar 1



Fonte: Autoral (2025).

Figura 6 - Área preliminar 2

Fonte: Autoral (2025).

Figura 7 - Área preliminar 3

Fonte: Autoral (2025).

A área selecionada recebeu uma pontuação superior em comparação às demais, conforme demonstrado na Tabela 5. Portanto, é a opção mais adequada para a instalação do aterro sanitário, pois cumpre de maneira mais eficaz os critérios definidos na metodologia de avaliação multicritério. Dentre os elementos que favoreceram essa superioridade, destacam-se a baixa densidade populacional nas proximidades, a distância apropriada de corpos de água, a topografia propícia e a acessibilidade por vias já existentes em boas condições.

Tabela 5 - Escolha da área do empreendimento considerando as características das áreas pré-selecionadas

CRITÉRIOS	PRIORIDADES	PONTOS DE PRIORIDADE	ATENDIMENTO			PONTOS DO ATENDIMENTO			PONTUAÇÃO DAS ÁREAS		
			Área 1	Área 2	Área 3	Área 1 %	Área 2 %	Área 3 %	Área 1	Área 2	Área 3
Proximidade a cursos d'água	1	10	T	T	T	100	100	100	10	10	10
Proximidade a núcleos residenciais	1	10	P	T	T	50	100	100	5	10	10
Proximidade a aeroportos	1	10	T	T	T	100	100	100	10	10	10
Distância do lençol freático	1	10	T	T	T	100	100	100	10	10	10
Distância de núcleos de baixa renda	2	6	P	T	N	50	100	0	3	6	0
Vias de acesso com baixa ocupação	2	6	P	P	P	50	50	50	3	3	3
Problemas com a comunidade local	2	6	T	T	T	100	100	100	6	6	6
Aquisição do terreno	3	4	T	T	T	100	100	100	4	4	4
Investimento em infra-estrutura	3	4	P	T	P	50	100	50	2	4	2
Vida útil mínima	4	3	T	T	T	100	100	100	3	3	3
Uso do solo	4	3	P	P	P	50	50	50	1,5	1,5	1,5
Permeabilidade do solo natural	4	3	P	P	P	50	50	50	1,5	1,5	1,5
Extensão da bacia de drenagem	4	3	T	T	T	100	100	100	3	3	3
Acesso a veículos pesados	4	3	P	T	T	50	100	100	1,5	3	3
Material de cobertura	4	3	T	T	T	100	100	100	3	3	3
Manutenção do sistema de drenagem	5	2	T	T	T	100	100	100	2	2	2
Distância ao centro da coleta	6	1	T	T	T	100	100	100	1	1	1
Distância da rodovias	6	1	T	T	T	100	100	100	1	1	1
Proteção contra enchentes	4	3	T	T	T	100	100	100	3	3	3
Ventos	4	3	T	T	T	100	100	100	3	3	3
Declividade	4	3	P	T	T	50	100	100	1,5	3	3

TOTAL	78	81	73

Fonte: Autoral, (2025).

4.2. Estimativa de resíduos

A estimativa da quantidade de RSU produzidos na cidade é crucial para a definição do tamanho do aterro sanitário e para a elaboração do planejamento da gestão integrada de resíduos. Levando em conta a população atual de Caririaçu e a média de geração per capita típica de cidades de pequeno porte, foi possível estimar a produção diária e anual de resíduos sólidos na cidade. A Tabela 6 apresenta essa previsão, fundamentada na população estimada pelo IBGE e nos critérios utilizados para a produção de resíduos por pessoa.

Tabela 6-Estimativa de Resíduos Sólidos Urbanos ao longo dos anos

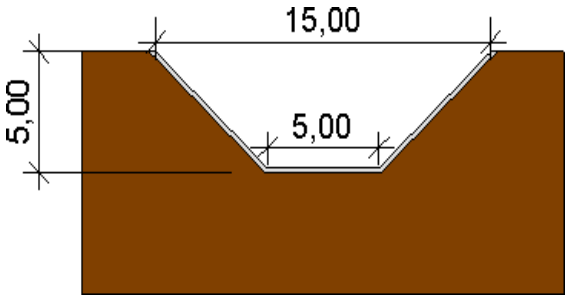
ESTIMATIVA AO LONGO DOS ANOS		
ANO	GERAÇÃO DE RS (Kg/hab.d)	GERAÇÃO ANUAL (ton)
2025	0,446852311	4293,345973
2026	0,510031213	4900,499137
2027	0,573210115	5507,65796
2028	0,636389016	6114,818978
2029	0,699567918	6721,979801
2030	0,762746819	7329,138836
2031	0,825925721	7936,295078
2032	0,889104623	8543,447948
2033	0,952283524	9150,59717
2034	1,015462426	9757,742682
2035	1,078641328	10364,88456
2036	1,141820229	10972,02299
2037	1,204999131	11579,15819
2038	1,268178032	12186,29044
2039	1,331356934	12793,41999
2040	1,394535836	13400,54713
2041	1,457714737	14007,67211
2042	1,520893639	14614,79519
2043	1,584072541	15221,91659
2044	1,647251442	15829,03652
2045	1,710430344	16436,15517
SOMA (ton)		217661,4225
MÉDIA ANUAL (ton)		10364,88456
MÉDIA DIÁRIA (ton)		28,39694401

Fonte: Autoral, (2025).

4.3. Dimensionamento das células

A configuração adotada dispõe de 20 células idênticas, com dimensões de 15m de comprimento, 5m de largura, 5m de altura e declividade lateral 1(V):3(H) para garantir estabilidade geométrica. A Figura 7 ilustra a seção transversal característica das células, demonstrando a relação entre suas dimensões principais e a inclinação dos taludes. Além disso, a planta baixa com a disposição das células é apresentada nos Apêndices A, B e C.

Figura 8 - Geometria das células



Fonte: Autoral, (2025).

4.4. Revestimento de fundo

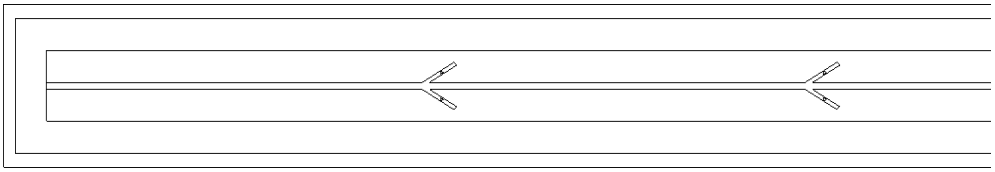
Para o município de Caririaçu, o sistema de revestimento do aterro sanitário considera as particularidades locais. Os estudos hidrológicos realizados no município apontaram um excedente hídrico anual de 1198 mm, valor significativamente superior ao limite máximo de 450 mm/ano estabelecido para dispensa do sistema de impermeabilização. Esta condição climática específica de Caririaçu, associada à predominância de solos com coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-3} mm/s (classificado como solo de absorção média), exigiu a adoção de solução técnica robusta.

O sistema proposto inclui uma camada dupla de proteção, formada por uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,5 mm de espessura sobre uma camada de argila compactada de 50 cm de profundidade. Esta configuração tem como objetivo reduzir o perigo de contaminação do solo e das águas subterrâneas, atuando como um obstáculo físico e químico para a migração de poluentes presentes no chorume. A inclinação mínima da base do sistema é de 2%, projetada para facilitar o escoamento e o encaminhamento correto do percolado até o sistema de drenagem, auxiliando no controle ambiental e na eficácia operacional do aterro.

4.5. Drenagem do chorume

Sendo assim, os dutos a serem instalados possuem configuração em "espinha de peixe" para otimizar o escoamento, possuindo 12 drenos principais de PVC corrugado com diâmetro de 150 mm e 24 drenos secundários com diâmetro de 150 mm interligados a 45°. Os dutos possuem espaçamento de 30 m (atendendo ao raio de influência de 15 m por dreno) e inclinação mínima de 2% para garantir autolimpeza como mostra a figura 8.

Figura 9 - Representação do sistema de drenagem do chorume em cada célula

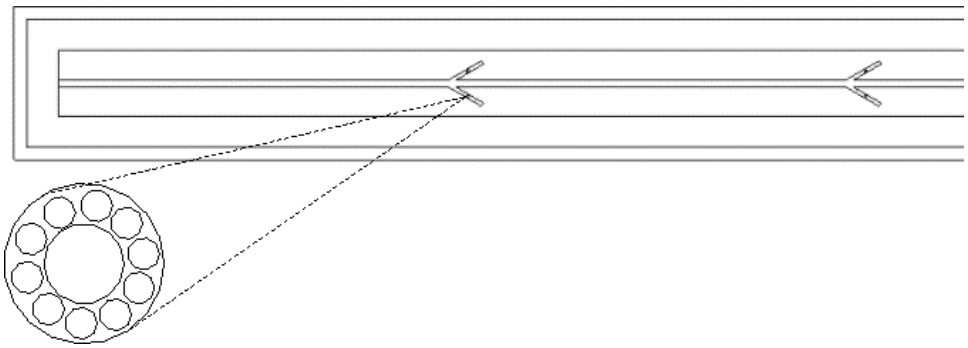


Fonte: Autoral, (2025).

4.6. Drenagem dos gases

Na drenagem dos gases, serão dispostos 24 drenos verticais circulares compostos por tubos. O diâmetro adotado para as tubulações perfuradas foi de 1,50 m e devem ser dispostas de maneira que haja um raio de influência de 30m. A drenagem dos gases deve ser unida a drenagem do chorume e revestida de tela com brita rachão de 4 mm.

Figura 10 - Representação do sistema de drenagem do chorume em cada célula



Fonte: Autoral, (2025).

4.7. Drenagem pluvial

Para assegurar o escoamento adequado das águas pluviais e prevenir sua infiltração na pilha de resíduos, foi feito um dimensionamento inicial do sistema de drenagem superficial do aterro sanitário. A previsão da taxa de escoamento superficial foi realizada utilizando a fórmula do método racional, levando em conta os parâmetros específicos da região do projeto e as condições climáticas locais.

Foi adotado um coeficiente de escoamento superficial de 0,9 para a área impermeabilizada do aterro, que é compatível com superfícies compactadas e revestidas com geomembrana. A quantidade de chuva levada em conta foi de 1.170,4 mm, o que corresponde a eventos de curta duração com retorno em 25 anos, como recomendado para projetos de drenagem em áreas semiáridas como Caririaçu – CE.

Com base nesses dados, estimou-se uma vazão de pico de cerca de 50 L/s, um valor que orienta o dimensionamento das canaletas perimetrais, valas de drenagem e outras estruturas hidráulicas do sistema. O fluxo deve ser encaminhado primeiramente para dispositivos de dissipação e, em seguida, para bacias de retenção ou áreas de infiltração segura, prevenindo processos erosivos e comprometendo a estabilidade do maciço do aterro.

4.8. Lagoas anaeróbia e facultativa

O aterro sanitário de Caririaçu inclui um sistema completo de purificação do chorume por meio de lagoas anaeróbia e facultativa, projetado para eficácia operacional e aderência às normas ambientais. A lagoa anaeróbia possui 54 m² de superfície e profundidade de 5 m, favorece a decomposição da matéria orgânica em um ambiente sem oxigênio, produzindo biogás e conseguindo eliminar aproximadamente 40% da DBO/DQO após 25 dias de detenção. A configuração da lagoa incorpora taludes com inclinação de 1:1,5 (horizontal:vertical), assegurando estabilidade e simplicidade na escavação.

A sua construção envolve a escavação no solo natural, a cobertura com 50 cm de argila compactada e a impermeabilização com manta de PEAD de 1,5 mm, requerendo pouca manutenção e proporcionando a possibilidade de futura utilização energética do biogás gerado.

Complementarmente, a lagoa facultativa com 736 m² de área e 2 m de profundidade, realiza o polimento final do efluente em 2 dias de detenção, a estabilização do remanescente de matéria orgânica ocorre através de processos biológicos aeróbios e facultativos, auxiliados pela

oxigenação natural da superfície. O padrão dos taludes é o mesmo da lagoa anterior (1:1,5), e o formato alongado das unidades favorece o fluxo constante e maximiza a eficiência hidráulica.

O sistema foi projetado para funcionar de maneira passiva, com custos de manutenção reduzidos e sem a exigência de recursos externos. A expectativa de eficiência global na eliminação de carga orgânica é de cerca de 85%, o que torna o sistema adequado para a operação em cidades de pequeno porte. A geração de biogás em uma lagoa anaeróbia representa um benefício extra, com potencial para futura captação e utilização de energia.

4.9. Infraestrutura de apoio do aterro sanitário

A estrutura do aterro sanitário possui uma infraestrutura de apoio completa, projetada para assegurar um funcionamento eficaz, proteção dos funcionários e aderência às normas ambientais. As instalações foram projetadas de acordo com as normas técnicas em vigor e levando em conta as demandas operacionais do projeto. A Tabela 5 lista os principais componentes e suas respectivas capacidades.

Tabela 7 –Infraestrutura de apoio do aterro sanitário

COMPONENTES	DESCRIÇÃO
Estacionamento	Com capacidade para 10 veiculos, sendo 4 destinadas a veiculos pesados.
Depósito	9,5 m²
Guarita	11 m², com banheiro
Cancela	Dimensões de 1,20x3,5 m
Galpão de triagem	70 m² com quatro divisorias
Cerca	2,00 m de altura e serão construídas com utilização de estacas pré-moldadas de concreto, tipo ponta virada de seção 10x10 cm, cravadas diretamente no solo, distanciadas a 3,00 m. o fechamento horizontal se dará por 11 fios paralelos de arame farpado galvanizado.
Cerca viva	Espécies nativas da área distanciadas em 2 m da espécie Juazeiro (Ziziphus joazeiro). E para a área de preservação ambiental eucalipito (Eucalyptus)
Balança	Balança tipo rodoviária, com capacidade mínima de 30 t, para o controle de entrada no terro de resíduos, terra e materiais em geral (areia, brita, etc.).
Escritorio	15,78 m² com banheiro
Refeitório	24,30 m², projetado para 20 funcionarios
Banheiro	18,72 m², projetado para 20 funcionarios
Vestiário	29,25 m², projetado para 20 funcionarios
Cozinha	15,98 m², completa
Sinalização	Placas com dimensões 20x10 e 24x12

Fonte: Autoral, (2025).

5. DISCUSSÃO

Apesar dos resultados da análise multicritério terem apontado uma área tecnicamente mais apropriada para a instalação do aterro sanitário em Caririaçu, é crucial enfatizar que essa decisão é apenas um passo inicial e não assegura a efetividade da gestão de resíduos sólidos na cidade.

O município de Caririaçu, assim como muitos outros de menor porte no Brasil, lida com graves problemas estruturais e institucionais na administração de resíduos, que incluem coleta seletiva insuficiente ou inexistente, índice reduzido de reciclagem, ausência de educação ambiental contínua e ausência de políticas públicas unificadas voltadas para a redução da produção de resíduos. A simples troca de aterros por lixões, sem um plano de gestão completo, tende a adiar os efeitos ambientais e sociais da destinação final dos resíduos.

Ademais, a sugestão de instalação do aterro precisa ser acrescida de um Plano de Operação, Encerramento e Acompanhamento Pós-Fechamento, conforme requerido pela legislação ambiental em vigor, como a Resolução CONAMA no 404/2008 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei no 12.305/2010). Sem essas ferramentas, o risco de futuros passivos ambientais permanece alto, mesmo ao optar por uma área tecnicamente apropriada.

É crucial entender que o aterro sanitário, apesar de ser a opção mais segura entre os métodos de eliminação final, não é uma solução final para o problema dos resíduos sólidos. Em vez disso, sua implementação evidencia a inabilidade do sistema vigente em reintegrar os resíduos ao processo produtivo. A verdadeira resposta reside na implementação de políticas que incentivem a não geração, diminuição, reaproveitamento e reciclagem de resíduos, em conformidade com a estrutura hierárquica de gestão de resíduos sugerida pela PNRS. É essencial priorizar investimentos em logística reversa, promoção da coleta seletiva com a participação de catadores, compostagem de resíduos orgânicos e educação ambiental.

Assim, a instalação do aterro em Caririaçu deve ser vista como um passo intermediário, e não como um ponto final. Sem uma estratégia integrada e preventiva, a cidade pode perpetuar um modelo de administração insustentável, que apenas repassa os efeitos ao longo do tempo e do espaço.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs a instalação de um aterro sanitário na cidade de Caririaçu-CE, com o objetivo de resolver a questão da destinação imprópria dos resíduos sólidos urbanos. O estudo revelou que o método do aterro sanitário, quando adequadamente planejado e implementado de acordo com as normas técnicas, é a opção mais apropriada para a situação local. O estudo indica que o modelo proposto cumpre completamente os requisitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei no 12.305/2010) e das normas da ABNT, assegurando a salvaguarda do meio ambiente e da saúde pública.

A sugestão engloba o dimensionamento das células de descarte para uma durabilidade prevista de 20 anos, incorporando componentes cruciais como a impermeabilização do solo, a drenagem de efluentes e gases, as lagoas de tratamento de chorume e um sistema de supervisão ambiental, crucial para assegurar a segurança operacional e ambiental ao longo do tempo. O projeto deve levar em conta particularidades locais, tais como a regularidade das precipitações e fazer um estudo do tipo de solo predominante, para guiar as escolhas de dimensionamento hidráulico e geológico.

Destarte, este trabalho oferece uma contribuição significativa para o saneamento básico na área do Cariri cearense. A abordagem empregada pode servir de modelo para outras cidades de pequeno porte que lidam com desafios parecidos. A execução da proposta demandará coordenação entre o governo, entidades ambientais e a comunidade local, contudo, os benefícios podem superar o investimento necessário.

Para viabilizar a implantação do aterro sanitário, é fundamental buscar recursos financeiros, técnicos e operacionais, uma vez que, em geral, não dispõem de capacidade financeira suficiente para arcar integralmente com esse tipo de empreendimento. Nesse sentido, é possível acessar recursos provenientes de programas federais e estaduais voltados ao desenvolvimento urbano e ambiental, como o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), o Fundo de Apoio ao Desenvolvimento Municipal (FUNDAM) ou financiamentos via Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Caixa Econômica Federal (CAIXA) e até organismos internacionais, como o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID).

Também é recomendável estabelecer convênios com universidades, ONGs ambientais e empresas privadas, por meio de parcerias público-privadas (PPPs), que podem fornecer tanto assistência técnica quanto parte dos investimentos necessários. A mobilização da sociedade

civil, através de campanhas de educação ambiental e participação em conselhos municipais, é igualmente essencial para garantir a sustentabilidade do projeto.

Apesar de não ter sido feita uma avaliação detalhada da viabilidade técnico-econômica, a sugestão oferece um fundamento conceitual sólido para o planejamento e a futura execução de um aterro sanitário em Caririaçu. A estratégia implementada pode ter um impacto significativo no progresso do saneamento básico no Cariri do Ceará, fornecendo um modelo aplicável a outras cidades de pequeno porte que lidam com desafios parecidos na administração de resíduos. A implementação da proposta necessitará de coordenação entre o governo, as entidades ambientais e a comunidade local. Se implementado com as devidas precauções técnicas e institucionais, o sistema pode ser um significativo progresso para uma administração mais sustentável e ecologicamente consciente dos resíduos sólidos urbanos na área.

Além disso, é crucial enfatizar que o projeto do aterro deve ser acrescido de um plano minucioso de operação, encerramento e supervisão após o uso, assegurando a persistência da proteção ambiental mesmo após o término de sua vida útil. Ademais, apesar dos aterros sanitários serem uma alternativa mais apropriada em comparação aos lixões, eles não resolvem a questão da produção de resíduos. Portanto, a execução de políticas focadas na redução, reutilização e reciclagem de resíduos deve seguir em paralelo, com o objetivo de, a longo prazo, passar para modelos mais circulares e sustentáveis de administração de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS**,** 1997. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, 1992. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESIDUOS, 2022. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022.

BRASIL, 2010. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2003. Diretrizes para elaboração de projetos de aterros sanitários de pequeno porte. São Paulo: CETESB.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2020. Gestão de resíduos sólidos no Brasil: desafios e oportunidades.

JORDÃO. Tratamento de esgotos domésticos. ABES, Rio de Janeiro, n. 7, p. 65-66, 2014.

ALVES, J. L. M.; COSTA, R. H. R. 2018. Gestão de resíduos sólidos urbanos: tecnologias e aplicações.

MONTEIRO, J. H. P. et al., 2001. Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.

FUNASA - FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE, 2006. Manual de saneamento para pequenas comunidades.

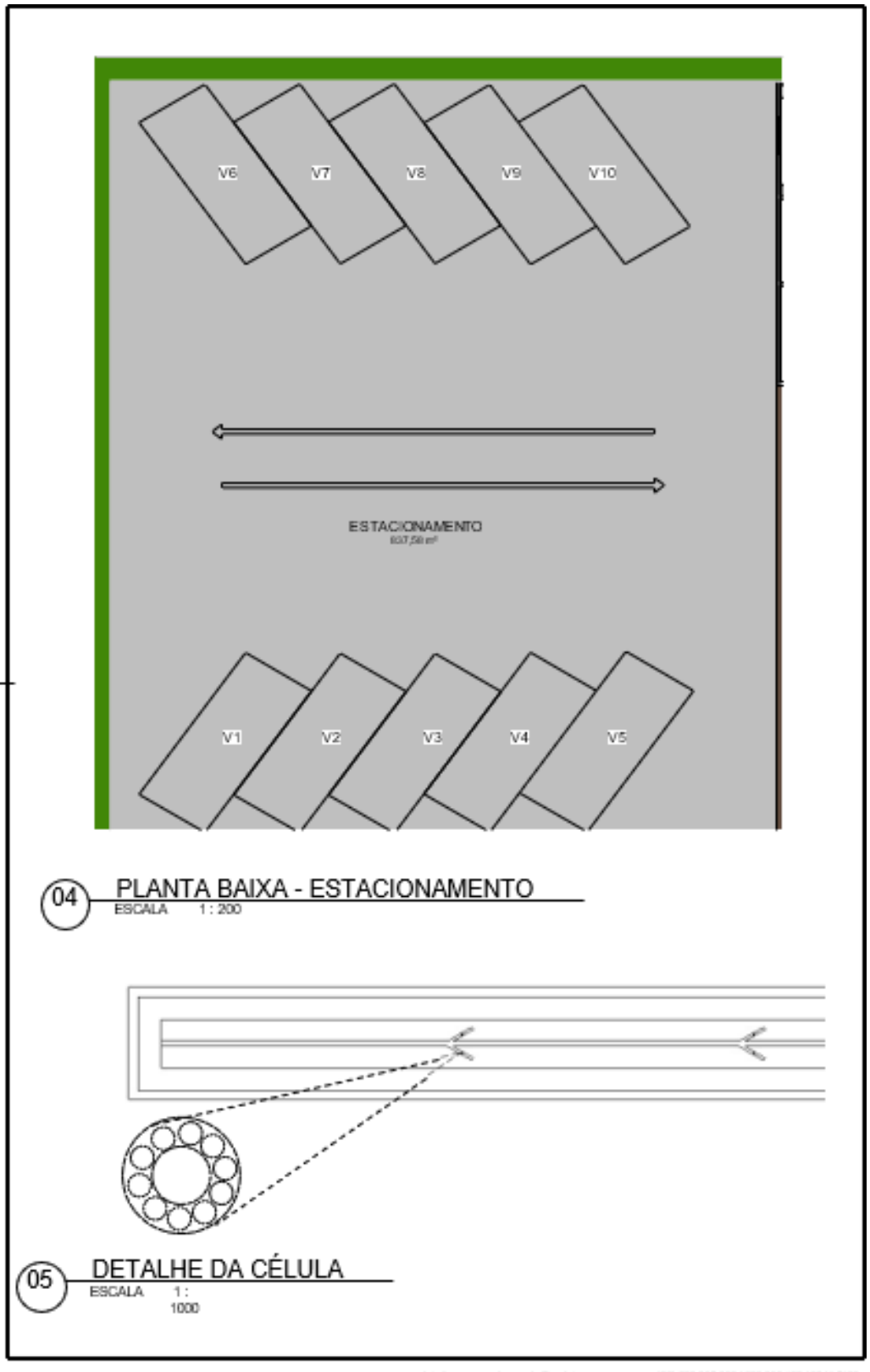
SINISA - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO, 2022. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2022.

SOUZA, C. F.; LIMA, J. R. B. (2020). Impactos ambientais de aterros sanitários: estudo de caso no Nordeste brasileiro.

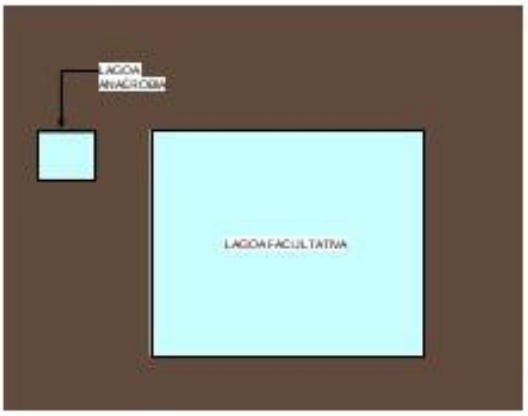
WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016. Guidelines for safe disposal of municipal solid waste. Geneva: WHO Press.

APÊNDICE A – Plantas baixa

APÊNDICE B – Planta baixa e detalhe

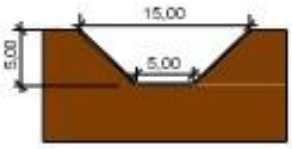


APÊNDICE C – Planta baixa, cortes e localização



06 PLANTA BAIXA - LAGOAS
ESCALA 1 : 500

07 LOCALIZAÇÃO
ESCALA



08 CORTE DA CÉLULA
ESCALA 1 : 500