



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

MARIA ANDRESSA XIMENES DE SABOIA

**SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS - CE COM USO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

CRATEÚS - CE

2025

MARIA ANDRESSA XIMENES DE SABOIA

SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS - CE COM USO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva.

CRATEÚS - CE
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S122s Saboia, Maria Andressa Ximenes de.
Seleção de áreas para implantação de um aterro sanitário no município de Crateús- CE com uso da análise multicritério / Maria Andressa Ximenes de Saboia. – 2025.
69 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva.
1. Aterro sanitário. 2. Análise multicritério. 3. Resíduos sólidos. I. Título.

CDD 628

MARIA ANDRESSA XIMENES DE SABOIA

SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE CRATEÚS - CE USANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em: _30_/_08_/_2025_.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Luana Viana Costa e Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Me. Amanda de Sousa Pino
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beauvoir.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, que mesmo diante das adversidades, nunca mediram esforços para me ajudar a chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

De início gostaria de agradecer a Deus por ter me concedido força e paciência para alcançar meus objetivos e chegar até aqui. Também gostaria de agradecer a mim mesma, por ter persistido e nunca ter desistido da caminhada árdua que é a graduação.

Aos meus pais, João Vicente e Francisca, por serem exemplo de força, persistência e amor, por sempre demonstrarem que é possível vencer todas as dificuldades que encontramos pelo caminho, tudo que conquistei até aqui foi graças a eles. Agradeço por tudo.

Aos meus irmãos, Gutemberg e Gutierre, que com suas presenças constantes, todo o apoio e conselhos dados, contribuíram para a minha realização pessoal. As minhas sobrinhas, Maria Clara, Nicolý e Lunna, que são minha fonte de alegria.

Ao meu amado, Emanuel Martins, que sempre me incentivou e encorajou a enfrentar de cabeça erguida as dificuldades acadêmicas, por fornecer amor e apoio nos dias mais difíceis e sempre acreditar tanto em mim. Obrigada por tudo.

Aos meus amigos, João Victor, Eduarda, Yasser, Diego, Nayra, Gabriel, Letícia, Vitória e Sávio, que fizeram essa caminhada ser mais leve. Agradeço especialmente a minha amiga Beatriz Nobre, que tornou-se fundamental na minha jornada, obrigada pelo apoio e incentivo durante esses anos de amizade.

A minha amiga de infância, Rafaela Mota, que sempre se fez presente na minha vida e me impulsionou a ter coragem e ser uma pessoa melhor, é uma fonte de inspiração profissional e pessoal.

A minha tia, Noélia Saboia, que me recebeu em sua casa de portas e coração aberto, e me ajudou a chegar até aqui. Obrigada por tudo.

Ao meu orientador, Prof Drº Thiago Fernandes, que dedicou seu tempo no decorrer desse ano a me orientar e ajudar da melhor forma possível, e servir como inspiração profissional.

A todos os professores e funcionários que de certa forma contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

A destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos tem se tornado um problema crescente para a administração pública, impactando negativamente o meio ambiente e a saúde pública. Nesse contexto, os aterros sanitários surgem como uma solução viável, minimizando os impactos ambientais e promovendo uma disposição final segura dos resíduos. Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnico-ambiental de áreas para a instalação de um aterro sanitário na Região do Consórcio de Manejo de Resíduos Sólidos da região dos Sertões de Crateús 2, com base em uma análise multicritérios. A pesquisa considera diversos critérios técnicos, ambientais e sociais, conforme estabelecido por normas e legislações vigentes, como a NBR 13.896. Para isso, foi utilizada a análise multicritério com o apoio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e do método Analytic Hierarchy Process (AHP), considerando critérios técnicos, ambientais e sociais. Foram selecionadas três áreas para análise de campo e coleta de solo. A área 1 apresentou solo de uma areia mal graduada, e coeficiente de permeabilidade de $1,61 \times 10^{-7}$ m/s; a área 2, uma areia mal graduada com permeabilidade de $6,51 \times 10^{-7}$ m/s; e a área 3, solo arenoso-argiloso com valor de $1,72 \times 10^{-7}$ m/s. Os resultados demonstraram que a área 1 possui menor permeabilidade e menor capacidade de retenção, a área 3 obteve a maior pontuação no percentual final, chegando a 81,48% de adequabilidade. Conclui-se que a integração de ferramentas como SIG, análise multicritério e ensaios laboratoriais fornece suporte técnico confiável para a escolha de locais para aterros sanitários, promovendo a gestão sustentável dos resíduos sólidos na região.

Palavras-chave: Aterro Sanitário; Análise Multicritérios; Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

The concentrated disposal of urban solid waste has become a growing problem for public administration, impacting the environment and public health. In this context, sanitary landfills emerge as a viable solution, minimizing environmental impacts and promoting safe final disposal of waste. This study aims to analyze the technical and environmental forecast of areas for the installation of a sanitary landfill in the Solid Waste Management Consortium of the Sertões de Crateús 2 region, based on a multi-criteria analysis. The research considers various technical, environmental, and social criteria, as established by current standards and legislation, such as NBR 13.896. To this end, a multi-criteria analysis was used with the support of Geographic Information Systems (GIS) and the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, considering technical, environmental, and social criteria. Three areas were selected for field analysis and soil collection. Area 1 presented poorly graded sand soil with a permeability coefficient of 1.61×10^{-7} m/s; area 2, poorly graded sand with a permeability of 6.51×10^{-7} m/s; and area 3, sandy-clayey soil with a permeability of 1.72×10^{-7} m/s. The results showed that area 1 has lower permeability and retention capacity, while area 3 obtained the highest score in the final percentage, reaching 81.48% suitability. It is concluded that the integration of tools such as GIS, multicriteria analysis, and laboratory testing provides reliable technical support for selecting landfill sites, promoting sustainable solid waste management in the region.

Keywords: Sanitary Landfill; Multicriteria Analysis; Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Mapa de localização dos municípios consorciados.....	20
Figura 02 - Cortes das etapas de um aterro sanitário.....	23
Figura 03 - Método construtivo trincheira.....	24
Figura 04 - Método construtivo rampa.....	24
Figura 05 - Método construtivo área.....	24
Figura 06 - Fluxograma metodológico das etapas da pesquisa.....	33
Figura 07 - Mapa de aptidão de áreas aptas para instalação de um aterro em Crateús.....	36
Figura 14 - (a) Ensaio de granulometria por sedimentação e (b) Ensaio de massa específica de grãos.....	40
Figura 15 - (a) Solo (área 3) utilizado para o ensaio de compactação , (b) Limites de Liquidez e (c) Limites de Plasticidade.....	41
Figura 16 - (a) Preparação do solo para compactação no cilindro, (b) Inserção de britas no solo compactado e (c) Permeâmetro.....	41
Figura 08 - Coleta de solo - Área 1.....	44
Figura 09 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 1.....	45
Figura 10 - Coleta de solo - Área 2.....	45
Figura 11 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 2.....	46
Figura 12 - Coleta de solo - Área 3.....	46
Figura 13 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 3.....	47
Figura 17 - Estimativa populacional dos Municípios.....	47
Figura 18 - Mapa com as áreas selecionadas.....	48
Figura 19 - Estimativa do volume em m ³ dos cinco municípios no decorrer dos 20 anos.....	49
Figura 20 - Curvas granulométricas.....	51
Figura 21 - Limites de Liquidez.....	52
Figura 22 - Curvas de compactação.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Resultados das Análises granulométricas, Limites de LL e LP, Classificação SUCS.....	50
Tabela 02 - Umidade ótima, Massa específica seca e Peso específico seco.....	53
Tabela 03 - Permeabilidade das áreas 1, 2 e 3.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Características dos Consórcios Públicos para Gestão de RSU no Ceará. Adaptado de Santos (2023).....	18
Quadro 02 - População dos Municípios consorciados.....	20
Quadro 03 - Critérios estabelecidos pela NBR 13.896 (ABNT, 1997).....	22
Quadro 04 - Critérios para a seleção de locais (Baseado na NBR 8.491).....	25
Quadro 05 - Quantidade de amostra para análise granulométrica (Retirado da NBR 6.457)...	27
Quadro 06 - Critérios e considerações técnicas estabelecidos pela NBR 13.896.....	30
Quadro 07 - Características dos municípios. (Informações retiradas do IPECE, 2017).....	35
Quadro 08 - Referência de área mínima recomendável.....	38
Quadro 09 - Hierarquização dos critérios.....	42
Quadro 10 - Relação Hierárquica dos critérios, prioridades e pesos.....	43
Quadro 11 - Critérios para avaliação das áreas (Retirado da NBR 13.896/97).....	55
Quadro 12 - Percentual de atendimento dos critérios.....	56
Quadro 13 - Percentual de atendimento dos critérios com a devida pontuação.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

APP's - Áreas de Preservação Permanente

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

CNM - Confederação Nacional de Municípios

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

NBR - Normas Brasileiras Regulamentadoras

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PRGIRS - Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para Os Municípios Da Bacia Do Parnaíba.

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

LL - Limites de Liquidez

LP - Limites de Plasticidade

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Conceitos.....	17
3.1.1 Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos e a Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	17
3.1.2 Aterro Sanitário.....	21
3.2 Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários.....	25
3.3 Análise do meio físico.....	26
3.3.1. Análise do Solo para ser utilizado como Jazida.....	26
3.3.2 Análise Granulométrica.....	27
3.3.2.1 Método do peneiramento.....	28
3.3.3 Permeabilidade.....	29
3.4 Análise multicritérios.....	29
4. METODOLOGIA.....	33
4.1. Descrição da área de estudo.....	33
4.1.1. Crateús.....	33
4.2. Mapa de Aptidão.....	35
4.3. Cálculo da área do aterro sanitário.....	36
4.3.1. Estimativa populacional.....	36
4.3.2. Dimensionamento da área do aterro.....	37
4.4. Seleção de áreas alvo de acordo com o mapa de aptidão - Mapa Pré-Campo.....	38
4.5. Reconhecimento das áreas.....	38
4.6. Coleta de amostras.....	39
4.7. Análise em Laboratório e Interpretação das informações obtidas pós-laboratório.....	39
4.7.1. Granulometria e Massa específica de grãos.....	40
4.7.2. Compactação e Limites de Liquidez e Limites de Plasticidade.....	40
4.7.3. Permeabilidade.....	41
4.8. Análise multicritério e Classificação das áreas.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1 Descrição das áreas selecionadas e justificativa de escolha.....	44
5.2. Dimensionamento da área do Aterro Sanitário.....	47
5.2.1 Geração de RSU's e Volume.....	48
5.3. Granulometria e Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP).....	49
5.4. Compactação.....	52
5.5. Permeabilidade.....	54
5.6. Análise comparativa das áreas selecionadas.....	54
6. CONCLUSÕES.....	59

REFERÊNCIAS.....	60
-------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A destinação de resíduos sólidos oriundos das atividades humanas, vêm se transformando em um grande problema para a administração pública. De acordo com Almeida *et al* (2022) os problemas ambientais decorrentes da geração de resíduos sólidos urbanos tem se agravado de forma acelerada devido ao crescimento das populações a cada ano, a consequente expansão territorial, o consumismo exacerbado, a cultura do descarte e a falta de políticas públicas eficientes. De acordo com o SNIS (2022), o Brasil gerou cerca de 63,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, e estima-se que apenas 73,7% receberam uma disposição adequada.

A implantação de um aterro sanitário obedece aos padrões estabelecidos por leis e normas, atenuando os impactos ambientais e sociais. A disposição de forma inadequada poderá gerar contaminação, do solo, água subterrâneas e superficiais, gases que causam o efeito estufa (CO_2 e CH_4), além de causar problemas sanitários e prejudiciais a saúde pública, como a atração de vetores transmissores de doenças.

Os aterros sanitários apresentam-se como a opção mais viável técnica e economicamente para a disposição final desse lixo gerado. Os mesmos buscam garantir uma solução viável ambientalmente para a grande produção de material pela sociedade. No entanto, alguns dos principais fatores limitantes para a instalação de um aterro sanitário incluem a escassez de áreas aptas próximas aos centros urbanos, onde a logística de transporte e descarga do material seria mais eficiente, também há a questão da disponibilidade de material de cobertura diária (Marques, 2002).

Os municípios consorciados também podem apresentar dificuldades em relação à escolha do local para a instalação de um aterro, visto que envolvem diferentes pontos de geração de resíduos. É essencial o desenvolvimento de metodologias que considerem critérios específicos para a análise do meio físico, uso e ocupação do solo, desenvolvimento econômico e social da região. Lino (2007) destaca que a utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) é fundamental para a análise e seleção de áreas aptas para um empreendimento deste tipo, onde facilita o desenvolvimento de estudos preliminares.

Diante do exposto, uma seleção adequada deve ser realizada através de critérios elencados do ponto de vista técnico, de acordo com a legislação vigente. Portanto, é necessária uma investigação detalhada e minuciosa dos locais com potencial para a instalação de um aterro sanitário. A gestão eficiente dessas atividades inicia-se com a seleção criteriosa de um local adequado, levando em consideração não apenas os aspectos técnicos, mas também os fatores sociais e ambientais (Barros *et al.* 2015, Ramirez e Vitor, 2011).

A escolha adequada de um aterro sanitário traz segurança operacional, ambiental e social para o local onde o mesmo será implantado. A análise de áreas através de critérios é uma das maneiras de viabilizar áreas para a construção de aterros, tudo de acordo com a legislação e normas vigentes. A NBR 13.896 (ABNT, 1997) fixa os critérios de implantação, projeto e operação para aterros sanitários, bem como a escolha desses locais, tendo em vista minimizar os impactos ambientais resultantes da instauração do projeto em determinada localidade, não haver influência ou perturbação às populações adjacentes, bem como assegurar condições de segurança do terreno para o exercício dos funcionários ligados diretamente ao empreendimento (Sousa, 2022).

A escolha de locais adequados para aterros sanitários, com base em critérios técnicos e sociais contribui para a mitigação da resistência das comunidades locais, que, na maioria das vezes, enfrentam impactos negativos, como a desvalorização imobiliária. Um aterro bem localizado e gerenciado também reduz problemas associados a lixões a céu aberto. A identificação dessas áreas ajuda na preservação de recursos naturais, uma vez que, irá minimizar o risco de contaminação de corpos hídricos e do solo, redução da emissão de gases do efeito estufa, reduz os impactos nos ecossistemas locais, contribui para o desenvolvimento de estratégias que alinhem a operação dos aterros com os princípios da redução, reutilização e reciclagem. Ademais, a pesquisa pode desenvolver ou aprimorar metodologias e tecnologias, como o uso do SIG e análises multicritérios, além do mais, visitas *in loco* são essenciais para que o estudo da área analisada seja mais aprofundado, e traga mais segurança a escolha do local para um projeto de aterro sanitário.

Neste contexto, a definição da área de implantação de um aterro sanitário tem se constituído como um desafio para os municípios consorciados. O município de Crateús faz parte do Consórcio de Manejo de Resíduos Sólidos da região dos Sertões de Crateús 2, onde é composto por cinco municípios, Ararendá, Crateús, Independência, Ipaporanga e Novo Oriente. Atualmente, o consórcio ainda não tem projetos para o desenvolvimento de um aterro sanitário, porém, com os centros de triagem em finalização, o consórcio tem como objetivo viabilizar um aterro sanitário no município de Crateús, pois todas as cidades que fazem parte do consórcio depositam seus resíduos em lixões.

A localização correta de um aterro sanitário pode promover benefícios integrados, contribuindo para a melhoria das condições de vida, preservação ambiental e avanço científico, além de apoiar a transição para práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos sólidos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnico-ambiental de áreas para a instalação de um aterro sanitário na Região do Consórcio de Manejo de Resíduos Sólidos da região dos Sertões de Crateús 2, com base em uma análise multicritérios.

2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar critérios técnicos, ambientais e sociais necessários para implantação de um aterro;
- Estabelecer um procedimento metodológico qualitativo multicritérios para análise de áreas para instalação de um aterro;
- Contribuir para o desenvolvimento de práticas sustentáveis e integrados a gestão dos resíduos sólidos;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos

3.1.1 Consórcio Público de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos e a Política Nacional de Resíduos Sólidos

Devido aos altos gastos de manutenção dos aterros sanitários, um empreendimento que seja planejado, elaborado e desenvolvido com recursos públicos de apenas um município pode, facilmente, no decorrer da operação transformar-se em um lixão. Esse fato pode ocorrer em virtude da falta de recursos para manutenção da operação diária e custeio dos funcionários, além da baixa capacidade técnica aplicada ao empreendimento em consequência da economia de recursos públicos. (Sousa, 2022)

A Lei Federal 12.305/2010 que instituiu seu marco regulatório em relação ao gerenciamento de resíduos sólidos, bem como a Lei Federal 11.445/2005 na qual estabeleceu diretrizes para o saneamento básico, ambas incentivam fortemente a criação de consórcios públicos entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios. Logo, são desenvolvidos os consórcios intermunicipais, onde os municípios formam arranjos, com objetivos em comum. (BRASIL, 2010. BRASIL, 2005)

Consórcios públicos podem ser definidos como:

“Pessoa jurídica formada exclusivamente por entes da Federação, na forma da Lei no 11.107/2005, para estabelecer relações de cooperação federativa, inclusive a realização de objetivos de interesse comum, constituída como associação pública, com personalidade jurídica de direito público e natureza autárquica, ou como pessoa jurídica de direito privado sem fins econômicos”.
(Henrichs, Lima e Cunha, 2020.)

Desta maneira, a ação conjunta e coordenada de vários entes políticos propicia um cenário favorável para o desenvolvimento saudável do gerenciamento de RSU nos municípios, com vantagens econômicas e ambientais para a prestação destes serviços públicos. (Suzuki e Gomes, 2009)

De acordo com o mapeamento realizado pela Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2023), a região Nordeste do Brasil possui 163 consórcios públicos sediados em seus estados, representando 22,5% do total nacional de 723 consórcios. No Ceará, todos os seus municípios participam de algum consórcio público, no entanto, existem apenas 8 consórcios relacionados a gestão de resíduos sólidos, e constata-se que a maioria dos consórcios do estado possuem lixões e aterros controlados, apenas 3 apresentam a disposição final para aterros sanitários, um deles é o Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região

Metropolitana de Sobral, na qual 18 municípios fazem parte, e seus resíduos são dispostos no aterro, mostrando-se como um exemplo de sucesso entre consórcios intermunicipais sobre gestão de resíduos sólidos, no Quadro 01 são apresentados consórcios públicos existentes no Ceará.

Quadro 01 - Características dos Consórcios Públicos para Gestão de RSU no Ceará. Adaptado de Santos (2023)

Nome do consórcio	Municípios consorciados (membros)	População atendida	RS Coletados (ton)	Disposição final dos RSU
Associação Pública Dos Municípios Do Maciço Do Baturité Para Saneamento Ambiental - Amsa	12	220.192	38.635	Lixão
Consórcio Intermunicipal De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos - Comares - Ucv	8	298.376	49.087,1	Lixão
Consórcio Municipal Para Aterro De Resíduos Sólidos - Unidade Crato - Comares - Uc	10	616.944	193.909,5	Lixão
Consórcio Municipal Para Aterros De Resíduos Sólidos - Unidade De Nova Russas	8	191.295	6.997,2	Lixão
Consórcio Público De Manejo De Resíduos Sólidos Da Região Do Litoral Norte	13	403.164	86.669,2	Aterro controlado e lixão
Consórcio De Desenvolvimento Da Região Central Do Sul CODESSUL	8	224.884	34.453	Aterro sanitário, Aterro controlado e lixão
Consórcio De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos - Vale Do Jaguaribe	14	372.400	46.515	Aterro sanitário e Aterro controlado

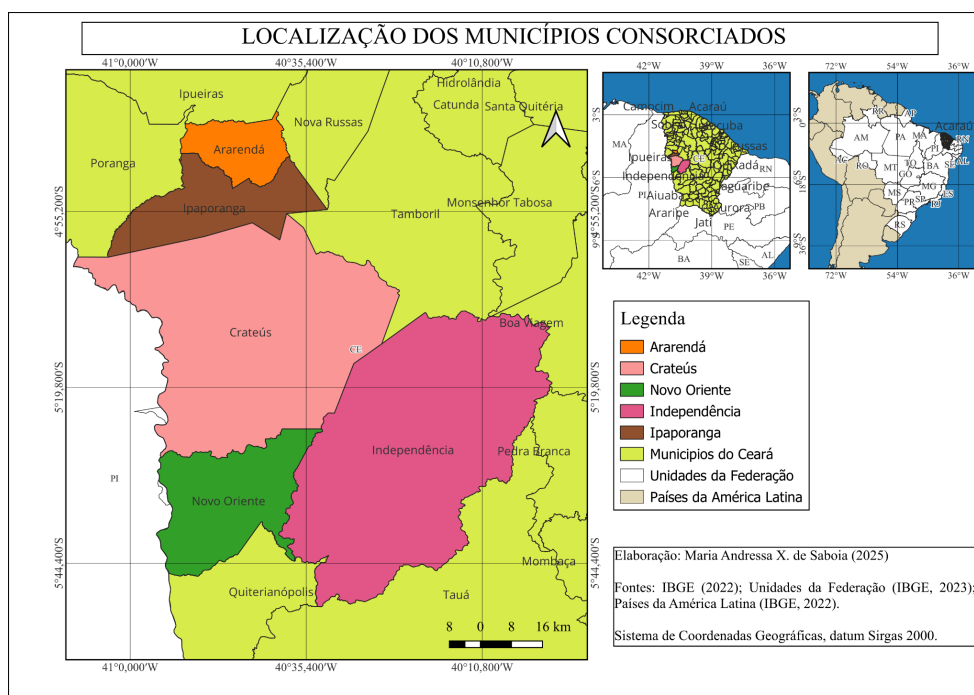
Consórcio De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos Da Região Metropolitana De Sobral - CGIRSRMS	18	497.515	205.835,6	Aterro sanitário e lixão
Consórcio De Manejo De Resíduos Sólidos Da Região Dos Sertões De Crateús 2 - Cpmrs-Rsc 2	5	150.630	-	Lixão

Fonte: Autora, 2025. Adaptado de Santos (2023)

Santos (2023) analisou que, nos 44 consórcios públicos existentes no Nordeste, há evidências de que os mesmos buscam cooperar na gestão ambiental de seus municípios. Essas iniciativas evidenciam o esforço das localidades em se adequarem à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promovendo a erradicação dos lixões e fortalecendo as ações de gerenciamento em cada região.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) o município de Crateús conta com uma população de 76.390 habitantes, em comparação às outras cidades que fazem parte do consórcio o mesmo apresenta-se como o mais populoso, de acordo com os dados coletados pelo Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para Os Municípios Da Bacia Do Parnaíba (PRGIRS, 2012), a cidade de Crateús apresenta uma geração per capita de 0,700 kg/hab*dia.

Figura 01 - Mapa de localização dos municípios consorciados



Fonte: Autora, 2025.

A Figura 01 apresenta a localização dos municípios consorciados. O Quadro 02 apresenta a população de cada município participante do consórcio de acordo com o último censo realizado pelo IBGE (2022).

Quadro 02 - População dos Municípios consorciados.

Municípios do Consórcio	População (hab)
Ararendá	11.096
Crateús	76.390
Independência	24.024
Ipaporanga	11.575
Novo Oriente	27.545
TOTAL	150.630

Fonte: IBGE (2022)

No município de Crateús foi desenvolvido um consórcio público de manejo de resíduos sólidos do local e outras regiões, o mesmo é composto por cinco cidades, Ararendá, Crateús, Independência, Ipaporanga e Novo Oriente, o consórcio tem como objetivo inicial a entrega de todos os centros de triagem de resíduos sólidos de cada município citado acima e seu respectivo funcionamento, e futuramente o desenvolvimento de projeto para viabilização

de um aterro sanitário em um dos municípios, para que o mesmo receba os rejeitos de todas as cidades que fazem parte do consórcio. No presente momento, o consórcio tem como objetivo a implementação dos centros de triagem em cada município, no qual já é o primeiro “passo” para um futuro estudo/desenvolvimento de um aterro sanitário na cidade de Crateús, objetivando abranger os outros municípios que fazem parte do consórcio.

3.1.2 Aterro Sanitário

Marques (2002) estabelece que um aterro sanitário é uma das formas mais viáveis economicamente para a disposição de resíduos sólidos, em função da sua solução mais sustentável, segurança sanitária e ambiental, sendo garantida diariamente na operação do aterro e sua vida útil.

De acordo com a NBR 8.419 (ABNT, 1992), um aterro sanitário pode ser definido como:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.”

Um aterro sanitário deve apresentar diversas características e componentes, através das quais se busca minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública, o mesmo deve apresentar os seguintes componentes necessários:

- Sistema de impermeabilização;
- Sistema de Drenagem de Lixiviado;
- Sistema de Tratamento de Lixiviado;
- Sistema de Drenagem de Gases;
- Sistema de Tratamento de Gases;
- Sistema de Drenagem Superficial;
- Jazidas de Terra;
- Camadas de disposição e compactação de resíduos;
- Sistema de detecção de vazamentos;
- Sistema de Monitoramento ambiental;
- Perímetro de segurança e cercamento;
- Sistema de recuperação de áreas;

- Plano de encerramento.

A norma citada no Quadro 03 estabelece critérios de implementação para o projeto de um aterro sanitário, como licenciamento e operação, sempre obedecendo os requisitos necessários para o desenvolvimento/implantação do projeto, como: localização, topografia, hidrogeologia, e geotecnia; monitoramento de águas subterrâneas; a queima e o aproveitamento energético dos gases gerados; sistema de tratamento do lixiviado; a impermeabilização do aterro, feita com argila compactada e geomembranas, assim como o fechamento do aterro (ABNT, 1997). O Quadro 03 apresenta os critérios exigidos pela norma.

Quadro 03 - Critérios estabelecidos pela NBR 13.896 (ABNT, 1997)

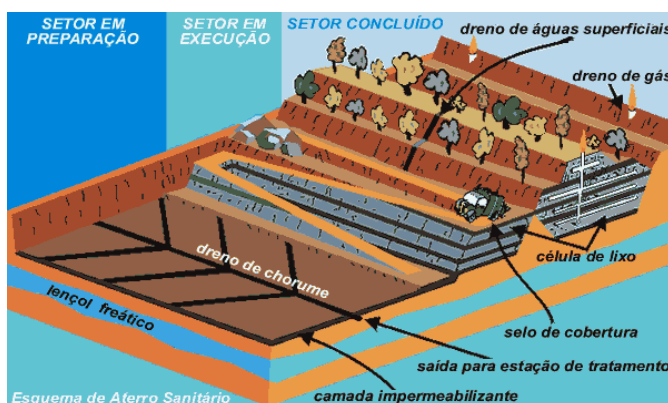
Topografia	Declividade superior a 1% e inferior a 30%
Geologia	Jazidas de terra - coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s - Zona não saturada superior a 3 m
Corpos Hídricos	Distância mínima de 200 m
Vegetação	Favorece na redução da erosão
Acessos	Fácil acesso
Vida útil	Mínimo de 10 anos
Distância de núcleos populacionais	Superior a 500 m
Regime Hidrológico	Não haver recorrência de inundações em um período de 100 anos

Fonte: ABNT, 1997.

Os aterros sanitários em municípios consorciados devem seguir práticas específicas que garantam uma gestão eficiente, sustentável e colaborativa dos resíduos sólidos. Quando vários municípios se unem para gerenciar os resíduos por meio de consórcios, a construção e operação de aterros sanitários precisam considerar uma série de aspectos técnicos, ambientais, legais e sociais para atender às demandas de todos os envolvidos.

Baseado na NBR 8.419 (ABNT, 1992), um aterro sanitário deve conter alguns elementos básicos em seu projeto, abaixo (Figura 2) é ilustrado um esquema de aterro sanitário. Adriano (2022) utilizou os critérios estabelecidos pela NBR 13.896 (ABNT, 1997) para elencar áreas aptas através do SIG, o mesmo realizou uma análise das áreas do seu local de pesquisa baseado nas diretrizes expostas pela norma. O mesmo destacou a importância da utilização da norma, pois a mesma também estabelece restrições em cada parâmetro, facilitando o descarte de áreas inviáveis.

Figura 02 - Cortes das etapas de um aterro sanitário



Fonte: ECOS, 2024

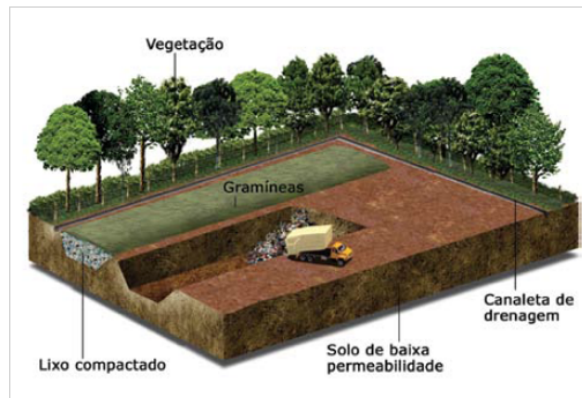
Existem três métodos diferentes para a construção de um aterro sanitário: método da trincheira, método da área e método da rampa. As figuras 02, 03 e 04 apresentam o funcionamento desses três métodos citados abaixo.

Meneses *et al* (2008) define que, o método da trincheira envolve a escavação de valas no solo, geralmente no formato de trincheiras, onde os resíduos são despejados, espalhados, compactados e, diariamente, cobertos com material inerte. Nesse processo, o material escavado pode ser reutilizado como cobertura para os resíduos sólidos, o que contribui para a redução dos custos de transporte de materiais.

Já no método da rampa, compreende-se a disposição final de resíduos sólidos em rampas que aproveitam o desnível natural do terreno. Nesse método, os resíduos são dispostos de forma a compor uma rampa ascendente sobre um talude natural (MENESES *et al.* 2008).

Baseado em Meneses *et al* (2008), pode-se definir o método da área da seguinte forma, o mesmo consiste na disposição final de resíduos sólidos em depressões naturais do relevo, minimizando a necessidade de escavações de células de resíduos sólidos. Neste método, os resíduos são dispostos no fundo regularizado da depressão natural de relevo, sendo o acesso de máquinas e equipamentos providos por rampas executadas nas margens dos taludes naturais. Contudo, este método requer o empréstimo sistemático de material inerte de cobertura para as células de resíduos sólidos, acarretando custos de transporte de materiais.

Figura 03 - Método construtivo trincheira



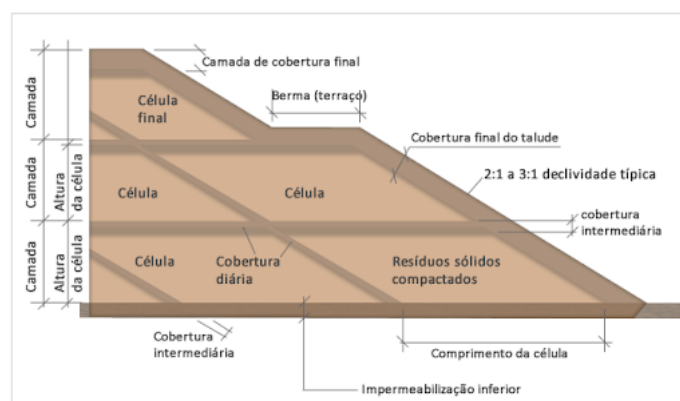
Fonte: Lanza, 2009.

Figura 04 - Método construtivo rampa



Fonte: Lanza, 2009.

Figura 05 - Método construtivo área



Fonte: IFSUL, 2010

Há várias restrições legais e ambientais para a localização e operação de um aterro sanitário, essas restrições são determinadas por leis e normas federais, estaduais e municipais,

com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), nas normas da ABNT e nas diretrizes de órgãos ambientais.

3.2 Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários

A seleção de áreas para a instalação de um aterro sanitário baseia-se em leis e normas, desenvolvidas com o objetivo de diminuir os impactos causados pelos resíduos sólidos, como também a construção do próprio aterro.

A Norma NBR 13.896 (ABNT, 1997), foi instituída e aplicada no Brasil com o objetivo de:

“Proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas” (ABNT, 1997)

A NBR 8.419 (ABNT, 1992) cita as condições mínimas para apresentação de um projeto de aterro sanitário, a mesma também estabelece critérios básicos para a seleção de áreas, onde devem ser consideradas os seguintes aspectos expostos no Quadro 04.

Quadro 04 - Critérios para a seleção de locais (Baseado na NBR 8.491)

Zoneamento Ambiental	Zoneamento Urbano	Acessos
Vizinhança	Economia de transporte	Titulação da área escolhida
Economia Operacional do aterro	Infra-estrutura urbana	Bacia e sub-bacia hidrográfica

Fonte: ABNT, 1992.

É necessário uma caracterização da área para que o projeto apresente segurança e sustentabilidade, tanto do ponto de vista ambiental quanto técnico e econômico. As Normas 8.419 (ABNT, 1992) e 13.896 (ABNT, 1997) citadas acima apresentam-se como importantes instrumentos para a análise e seleção desses locais, é um processo complexo, pois abrange aspectos do meio físico (abiótico), biótico e socioeconômico.

Para facilitar esse trabalho, pesquisadores e instituições têm desenvolvido, nas últimas décadas, métodos de seleção de áreas, impulsionados principalmente pelo uso de sistemas de informações geográficas (SIGs), que possibilitam a combinação de fatores complexos por meio de técnicas de geoestatística e geomatemática. (Lino, 2007)

3.3 Análise do meio físico

3.3.1. Análise do Solo para ser utilizado como Jazida.

A análise do solo é crucial para garantir a segurança ambiental e a eficiência operacional de aterros sanitários. Ela ajuda a identificar se o terreno possui as condições adequadas para evitar impactos ambientais, como a contaminação do lençol freático e a instabilidade estrutural do aterro.

A escolha adequada de técnicas de amostragem é fundamental para garantir que os dados obtidos sejam representativos e confiáveis, torna-se essencial para a formação de conclusões precisas sobre as condições do solo, principalmente quando analisa-se áreas para instalação de um aterro. Logo, de acordo com Filizola *et al.* (2006), amostras pontuais múltiplas em torno e próximas a um ponto, ajudam a minimizar erros, em que uma amostra simples, por exemplo, pode acabar induzindo. Essa técnica pode ser efetuada de forma determinística, aleatória ou em grade, depois que o ponto de coleta é definido, são necessárias a retirada de 3 a 5 subamostras ao redor desse ponto, onde as mesmas são misturadas e analisadas posteriormente como uma única amostra.

A NBR 7.182 (ABNT, 2016) estabelece os métodos necessários para a preparação de amostras de solos destinadas a ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. A mesma detalha procedimentos de diversos tipos de preparação de amostras, como por exemplo: Preparação de amostras para ensaios de compactação, onde irá incluir processos com secagem prévia até próximo da umidade higroscópica visando obter resultados consistentes nos ensaios de compactação; Preparação de amostras para ensaios de caracterização, são descritos os métodos para a realização de análises granulométricas, limites de consistência, e outros parâmetros físicos do solo; Determinação do teor de umidade, fornece orientações para analisar os limites de liquidez e plasticidade, como a quantidade de material necessária para ocorrer os ensaios e cálculo do teor de umidade.

A preparação de amostras para os ensaios de caracterização pode ser realizada em dois tipos de processos, um com secagem prévia e outro sem secagem prévia (da amostra). Ela também expõe critérios de amostras para análise granulométrica, como a quantidade mínima a ser utilizada para a realização desse ensaio, conforme mostra o Quadro 05.

Quadro 05 - Quantidade de amostra para análise granulométrica (Retirado da NBR 6.457)

Dimensões dos sólidos (grãos) maiores contidos na amostra, determinadas por observação visual	Quantidade mínima a ser utilizada
< 5 mm	1 kg
5 mm a 25 mm	4 kg
> 25 mm	8 kg

Fonte: ABNT, 2024.

A permeabilidade do solo apresenta-se como um dos principais indicadores para uma boa análise e caracterização geoambiental, é considerada um dos atributos físicos mais importantes para a indicação de qualidade do solo. Pode ser definida como a facilidade em que os solos têm para que ocorra a passagem de água, no caso, a percolação de um fluido através do maciço. Ela depende de diversos aspectos, como densidade, porosidade, macro e microporosidade. (Jesus, 2012)

De acordo com Jesus (2012), o coeficiente de permeabilidade pode ser definido através de diferentes formas, como:

- Ensaios Laboratoriais
- Ensaios de Campo

O mesmo ainda cita que, a realização de ensaios laboratoriais permite uma melhor obtenção de parâmetros, pois apresenta um controle rigoroso das condições de teste, o que possibilita a execução de uma série de simulações em ambientes controlados. Esse controle permite avaliar com precisão características específicas do solo, como a permeabilidade. Além disso, os ensaios laboratoriais oferecem maior reprodutibilidade dos resultados, auxiliando na previsão do comportamento do solo sob diferentes condições de carga e impacto ambiental. Essas análises são essenciais para garantir que o solo atenda aos requisitos técnicos para a instalação de aterros sanitários, permitindo ajustes e otimizações no projeto com base em dados confiáveis e consistentes (Jesus, 2012).

3.3.2 Análise Granulométrica

Na natureza é possível encontrar-se diversos tipos de depósitos de sedimentos, constituídos por tamanhos variados. Sua classificação é imprescindível, pois permite a compreensão das indicações de origem em que cada partícula está inserida, além disso, ajuda no entendimento do comportamento do solo em diferentes regiões, tanto seu comportamento

mecânico, como hidráulico, facilitando o desenvolvimento de projetos de engenharia, como por exemplo a instalação de um aterro sanitário (Dias, 2004).

A análise granulométrica envolve a determinação do tamanho das partículas na qual fazem parte de uma amostra, consideradas representativas nos sedimentos. De forma essencial, o processo consiste, inicialmente, em determinar as dimensões individuais das partículas por meio de técnicas específicas, como peneiramento mecânico para partículas maiores (areia e cascalho) ou a sedimentação em meio líquido para partículas finas (silte e argila). Em seguida, os dados obtidos são submetidos a um tratamento estatístico, que permite classificar e interpretar a distribuição granulométrica da amostra (Dias, 2004).

Atualmente não existe uma escala dimensional granulométrica universal, logo, diferentes áreas de estudo acabam adotando diferentes tamanhos de escala, de acordo com a necessidade das demandas solicitadas em projetos ou pesquisas. Assim, cada abordagem acaba selecionando o método de caracterização mais adequado a sua realidade de acordo com seus objetivos traçados, conforme destacado por Fernandes (2013).

3.3.2.1 Método do peneiramento

Um dos métodos mais conhecidos para análise granulométrica de uma amostra é o método do peneiramento, onde são utilizadas peneiras, as mesmas são compostas por material metálico e com malhas específicas (metal ou plástico). As peneiras são encaixadas uma acima da outra formando uma coluna, na qual permite a retenção do material com as dimensões de utilidade para determinada pesquisa ou projeto. A sequência de instalação das peneiras é de acordo com a abertura das malhas, em ordem decrescente, de cima para baixo.

As malhas das peneiras são definidas nas seguintes dimensões, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm, todas com a finalidade de classificar os tipos de sedimentos dos solos, desde cascalhos de areia onde apresentam frações granulométricas mais grosseiras, até o silte e argila que podem apresentar frações mais finas. A escolha de cada peneira para a análise granulométrica forma a parte essencial de qualquer trabalho desenvolvido dentro desse tipo de análise, pois a mesma auxilia na obtenção dos intervalos granulométricos. (Dias, 2004)

Após as peneiras serem empilhadas, elas podem ser agitadas de forma manual ou elétrica, caso a análise necessite de muitas peneiras, as mesmas poderão ser agitadas por um aparelho vibratório, bastante conhecido como “agitador de peneiras” (Dias, 2004).

3.3.3 Permeabilidade

A condutividade hidráulica é um dos indicadores de análise do solo, na qual esse parâmetro compreende de forma eficaz a condução da água pelo solo. Logo, essa análise é importante para verificação das diversas profundidades de perfis do solo, e como o mesmo comporta-se com a presença de água, principalmente quando o local será utilizado para desenvolvimento de projetos, como uma obra de engenharia.

A Lei de Darcy-Buckingham é comumente utilizada para descrever como o movimento da água comporta-se no solo. Ela estabelece que a velocidade média de um fluido de areia é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido, logo, a mesma apresenta-se como uma equação para quantificar a condutividade hidráulica do solo.

3.4 Análise multicritérios

Segundo Brollo (2001), na análise de seleção de áreas para a construção de um aterro sanitário, tratando-se de uma escala regional as informações a respeito do uso do solo é importante para a avaliação e identificação das funções de uso do solo atual, como o seu adensamento das áreas selecionadas. Ademais, as informações a respeito da legislação local são de suma relevância para considerações no mapeamento de uso do solo.

Em tese, Brollo (2001) cita que, para que um local seja considerado adequado para a disposição de resíduos sólidos, é essencial que o mesmo atenda a determinadas características do meio abiótico. Essas características incluem: baixo fluxo de água subterrânea nas proximidades, logo, reduzindo o risco de contaminação de aquíferos; baixa permeabilidade, na qual dificulta a infiltração de líquidos contaminantes; uma camada geológica de grande espessura e homogeneidade, capaz de atuar como uma barreira natural; alta capacidade de adsorção de compostos químicos, reduzindo sua mobilidade no solo; baixa solubilidade química dos materiais, minimizando a dissolução e dispersão de substâncias tóxicas; e baixa erodibilidade, o que minimiza o potencial de erosão e exposição dos resíduos sólidos.

Entretanto, para que seja garantida uma maior precisão e confiabilidade nessa análise, é indispensável que sejam definidos parâmetros, de preferência quantitativos, para cada um desses atributos. Essa abordagem irá reduzir a subjetividade nas avaliações e facilitar a comparação entre diferentes áreas selecionadas. Tais parâmetros podem incluir valores específicos de permeabilidade (em cm/s), taxas de fluxo subterrâneo (em m³/dia), espessura mínima da camada geológica (em metros), e os índices de erodibilidade, entre outros, conforme as condições do terreno e das normas aplicáveis.

De acordo com a NBR 13.896 (ABNT, 1997), as características gerais na qual um local destinado à implantação de um aterro sanitário deve apresentar são fundamentais para garantir sua viabilidade técnica, ambiental e social. Entre elas, ganha destaque a necessidade de minimizar o impacto ambiental gerado pela operação do aterro. Isso inclui o controle de emissões de gases, como o metano, a proteção dos recursos hídricos contra possíveis vazamentos de lixiviados e a preservação da biodiversidade existente no local.

Ademais, a norma também cita outro aspecto crucial, que é a aceitação pela população, que pode ser alcançada por meio de consultas públicas, transparência nos processos de licenciamento e a adoção de práticas sustentáveis que reduzem algumas problemáticas, como ruídos, odores e tráfego intenso de veículos. Além disso, o terreno deve estar dentro do zoneamento urbano e as diretrizes de uso do solo da região devem ser atendidas, evitando áreas residenciais ou de grande sensibilidade ambiental, como as zonas de proteção de mananciais ou áreas de preservação permanente (APP 's). Por fim, o local escolhido deve possuir uma área adequada que permita a vida útil do aterro, reduzindo a necessidade de novas intervenções em curto prazo. De preferência, o local deve demandar o mínimo de obras e adaptações para o início da operação do empreendimento, o que pode incluir uma topografia favorável, acesso rodoviário adequado, condições geológicas e hidrogeológicas compatíveis com os requisitos técnicos estabelecidos pela NBR 13.896 (ABNT, 1997).

O Quadro 06, na qual é baseado na NBR 13.896 (ABNT, 1997) sobre critérios e considerações técnicas a respeito da implantação de um aterro sanitário.

Quadro 06 - Critérios e considerações técnicas estabelecidos pela NBR 13.896

Critérios	Considerações técnicas
Topografia	É recomendado locais que apresentem declividade superior a 1% e inferior a 30%
Geologia e tipos de solos existentes	De preferência que exista um depósito natural extenso e homogêneo de materiais, com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s Uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 m.
Recursos Hídricos	O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso de água
Vegetação	Estudo macroscópico da vegetação, na qual pode atuar favoravelmente na escolha de uma área
Acessos	Existência de acessos fáceis e que podem ser utilizados durante toda a sua operação

Tamanho disponível e vida útil	Vida útil mínima de 10 anos
Custos	Elaboração de um cronograma físico-financeiro
Distância mínima a núcleos populacionais	Recomenda-se que a distância seja superior a 500 m.
Áreas sujeitas a inundações	Não é recomendável a execução do aterro em áreas sujeitas a inundações em períodos de recorrência de 100 anos.

Fonte: NBR 13.896 (ABNT, 1997)

Outro método de análise multicritérios bastante utilizado e recomendado pela EPA (*Environmental Protection Agency*), principalmente para a escolha de locais aptos a implantação de um aterro sanitário, é o Método AHP - *Analytic Hierarchy Process*. O mesmo consiste no desenvolvimento de uma hierarquia de decisões, onde o processo de análise é organizado de forma hierárquica, criando uma visão global das relações pertinentes aos processos. O método AHP elabora uma hierarquia do problema, e em seguida apresenta as alternativas possíveis comparadas entre si, logo, gerando matrizes de comparação, acarretando no alcance das prioridades das alternativas. (Marques, 2002)

Thomas L. Saaty foi o responsável por propor esse método de decisão multicritério, permitindo que uma decisão seja baseada de acordo com critérios qualitativos e quantitativos, levando em consideração perspectivas diferentes e contrárias. As categorias atribuídas a utilização do método são:

- Definição de prioridades;
- Criação de um conjunto de alternativas;
- Seleção do plano de ação mais eficiente;
- Identificação dos requisitos necessários;
- Distribuição estratégica de recursos;
- Previsão de resultados e análise de riscos;
- Avaliação do desempenho;
- Desenvolvimento de sistemas;
- Garantia da estabilidade dos sistemas implementados;
- Melhoria contínua e otimização;
- Elaboração de planejamentos estratégicos;
- Gestão e resolução de conflitos.

Para Marques (2002, apud Saaty, 1990a,b), a hierarquia auxilia o deliberador a avaliar de forma organizada as problemáticas em cada nível, logo, ajudando a colocá-las na mesma ordem de magnitude. O autor cita as vantagens da utilização do método AHP, bem como:

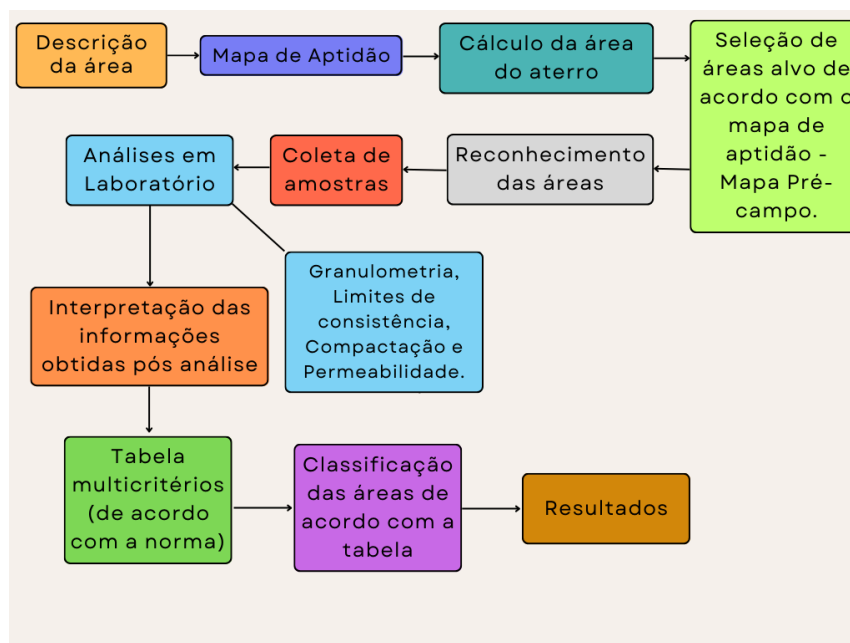
- Alterações de prioridades nos níveis superiores impactam as prioridades nos níveis inferiores, a hierarquia de um sistema permite ilustrar esse tipo de situação;
- Gera mais facilidade na obtenção de informações detalhadas sobre as funções e estruturas do sistema, em níveis baixos, oferecendo ao decisor uma visão mais geral e alinhada às suas perspectivas;
- A estruturação da forma hierárquica tende a ser mais eficiente do que aqueles onde são organizados de maneira geral.

Portanto, é importante a caracterização de áreas incluindo estudos topográficos, geológicos e geotécnicos, além da análise climatológica e de uso da água e solo, logo, a escolha do local também deve levar em consideração aspectos como acessibilidade, infraestrutura e economia operacional. A análise do solo, incluindo testes de permeabilidade, compactação e granulometria, são cruciais para garantir a segurança ambiental e a estabilidade do aterro. Métodos modernos, como o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), têm facilitado essa seleção ao integrar diversos fatores, além disso, técnicas como a análise multicritérios, incluindo o Método AHP (Analytic Hierarchy Process), têm sido empregadas para avaliar de forma sistemática as alternativas de localização. Essas abordagens asseguram que a escolha do local atenda aos requisitos técnicos, ambientais e sociais necessários para a operação sustentável de aterros sanitários.

4. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos deste trabalho podem ser observados na Figura 6, onde é possível sistematizar o processo de seleção e avaliação de áreas adequadas para a implantação de um aterro. O processo é dividido em diversas etapas, garantindo uma análise minuciosa baseada em critérios técnicos e ambientais, com objetivo de fornecer uma boa estruturação e organização no decorrer do estudo. O fluxograma traça todas as etapas que são necessárias para a seleção de áreas que apresentam adequada viabilidade para instalação de um aterro sanitário.

Figura 06 - Fluxograma metodológico das etapas da pesquisa



Fonte: Autora, 2025.

4.1. Descrição da área de estudo

4.1.1. Crateús

O município de Crateús situa-se na porção centro-oeste do estado do Ceará, distante 350 km da capital do estado. De acordo com o IBGE (2022) o município é habitado por 76.390 pessoas, com uma extensão territorial de 2.981,459 km².

Este município possui um clima caracterizado como Tropical Quente Semiárido, e pluviosidade média de 731 mm, concentrada principalmente nos meses de janeiro a abril. O município experimenta uma estação chuvosa quente, opressiva e de céu encoberto, enquanto a estação seca é escaldante, com ventos fortes e céu parcialmente encoberto. A temperatura raramente é inferior ou superior a 21°C e 38°C, respectivamente (IPECE, 2017).

A região apresenta diferentes tipos de solo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SIBCS), sendo os principais: Argissolos, Luvisolos, Latossolos, Neossolos e Planossolos. Estes solos variam em termos de profundidade, drenagem, textura e fertilidade natural. A vegetação predominante na área de estudo é a Caatinga, que inclui Caatinga Arbustiva Aberta, Carrasco, Floresta Caducifolia Espinhosa (caatinga arbórea) e Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial (mata seca) (IPECE, 2017). No que diz respeito aos recursos hídricos, o município de Crateús é cortado pelo Rio Poti, que é uma das principais sub-bacias do rio Parnaíba. Além do Rio Poti, existem outros rios e riachos na região, como o Rio Jatobá e os Riachos do Meio dos Patos, entre outros.

Em relação aos resíduos sólidos, o município de Crateús possui um sistema de limpeza urbana que realiza a coleta convencional dos resíduos domiciliares e comerciais. Há também a coleta seletiva, na qual materiais recicláveis são separados no Centro de Triagem da RECICRATIÚ e vendidos para as cidades vizinhas. Cerca de 30.000 toneladas de resíduos sólidos recicláveis são coletadas por mês no município. Existe um Protocolo de Intenções firmado em 2010 entre os municípios de Crateús, Independência, Ipaporanga e Novo Oriente, e agora com a presença do município de Ararendá, para a construção de um aterro sanitário em consórcio, visando uma destinação adequada aos resíduos sólidos (CRATEÚS, 2014). O Quadro 07 apresenta as características como clima, temperatura, tipo de solo e produção de RSU gerada, dos outros municípios que fazem parte do consórcio de resíduos sólidos.

Quadro 07 - Características dos municípios. (Informações retiradas do IPECE, 2017)

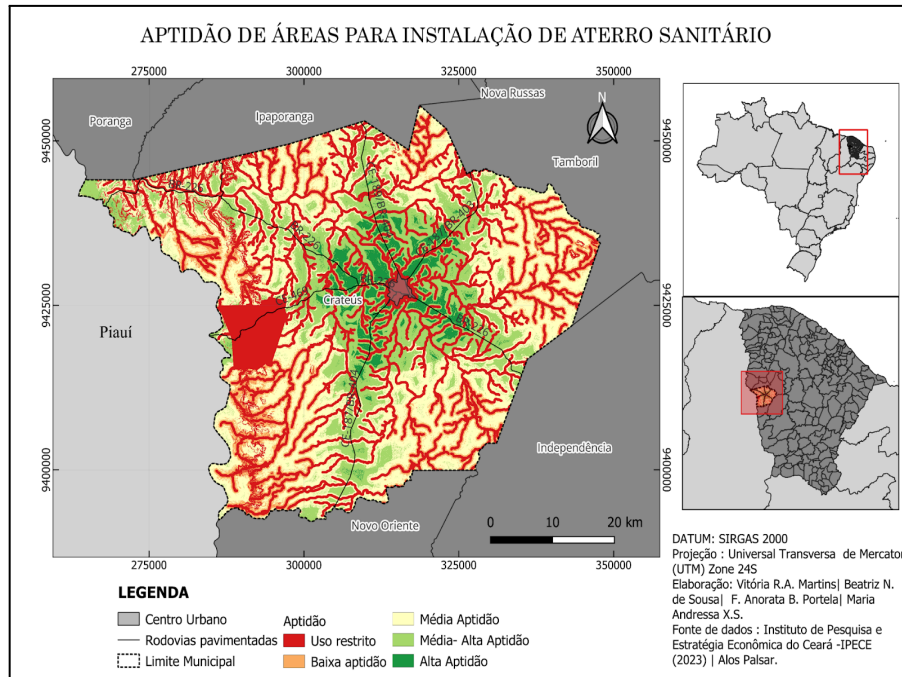
Município	Clima	Temperatura (°C)	Média Pluviométrica	Produção per capita adotada pelo PRIGRS (2012) (kg/hab*dia)	Solos
Ararendá	Tropical quente semiárido	24°C a 26°C	832	0,821	Areias Quartzosas Distróficas, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo
Independência	Tropical quente semiárido	23°C a 30°C	608,4	0,6	Bruno não Cálcico, Solos Litólicos, Planossolo Solódico e Podzólico Vermelho-Amarelo
Ipaporanga	Tropical quente semiárido	26°C a 28°C	1178,4	0,7	Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo e Areias Quartzosas Distróficas
Novo Oriente	Tropical quente semiárido	23°C a 38°C	609,5	0,65	Areias Quartzosas Distróficas, Latossolo Vermelho-Amarelo, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo

Fonte: Autora, 2025.

4.2. Mapa de Aptidão

Através do estudo realizado por Sousa *et al* (2023), foi possível identificar áreas no município de Crateús que apresentassem, alta aptidão, média alta-aptidão, média aptidão, baixa aptidão e uso restrito (Figura 07). A partir dessa análise realizada, a autora constatou que a maior viabilidade para a instalação do aterro localiza-se próximo ao centro do território municipal. Esse fato pode estar relacionado à proximidade das rodovias que facilitam a logística e às áreas próximas ao centro urbano, principal gerador de resíduos, destacadas pela coloração verde mais intensa no mapa (Sousa *et al* 2023). Não necessariamente, a projeção futura para a instalação do aterro deve ser próximo ao centro, pois nos arredores foram destacadas áreas com média-alta aptidão e média aptidão, na qual poderiam ser utilizadas para a construção do aterro.

Figura 07 - Mapa de aptidão de áreas aptas para instalação de um aterro em Crateús



Fonte: Sousa *et al* (2023)

Logo, o mapa de aptidão será utilizado como base para a presente pesquisa, com intuito de facilitar a escolha de áreas para análise, agora levando em conta aspectos técnicos, econômicos e sociais.

4.3. Cálculo da área do aterro sanitário

4.3.1. Estimativa populacional

Realizar a projeção exponencial da população e da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) para um horizonte de 20 anos (2025–2045) de acordo com os dados fornecidos pelo IBGE (2022), visando dimensionar adequadamente o aterro sanitário.

Para estimação populacional será utilizada a Equação 1.

$$P = P_0 * \exp^{k * (t - t_0)} \quad (1)$$

P = População no tempo t final (hab);

P₀ = População no tempo t₀ inicial (hab);

k = Taxa exponencial de crescimento;

t = Ano final

t₀ = Ano inicial

O valor da constante “k” será obtido através da equação que fornece a taxa exponencial de crescimento dos municípios envolvidos é utilizada a Equação 2.

$$k = (\ln(N/N_0))/t - t_0 \quad (2)$$

Com base na projeção populacional, será possível calcular a geração de resíduos gerados no decorrer do intervalo de 20 anos pelos municípios, a geração per capita será estimada de acordo com o valor do estado do Ceará. A geração de resíduos sólidos urbanos em ton/ano será calculada através da Equação 03, obtida por Adriano (2022, *apud* Barros, 2012).

$$GRSU_t = N * GPC * 365/1000 \quad (3)$$

GRSU_t = Massa gerada de resíduos sólidos urbanos no ano t, em ton/ano;

N = População no ano t;

GPC = Geração per capita de resíduos sólidos urbanos, em kg/hab/ano.

A disposição dos resíduos pode ser calculada de acordo com o volume que estes ocupam no aterro, logo, é essencial a conversão de massa para volume. Spinola *et al* (2017) destaca que o valor médio da massa específica dos resíduos sólidos após a compactação foi definido em 0,703 t/m³. Com isso, será possível calcular o valor do volume total de resíduos dispostos no aterro ao longo de 20 anos, através da Equação 04.

$$d = m/v \quad (4)$$

d = densidade do lixo compactado (0,703t/m³)

m = massa de resíduos produzida até o final da vida útil do aterro;

v = volume de resíduos produzido até o final da vida útil do aterro (m³).

4.3.2. Dimensionamento da área do aterro

Para o dimensionamento da área do aterro, inicialmente deve-se adotar uma área mínima recomendável, de acordo com o Ministérios das Cidades (BRASIL, 2011) é apresentada a extensão necessária para construção de um aterro, levando em conta o tamanho da população como mostra o Quadro 08.

Quadro 08 - Referência de área mínima recomendável

População urbana (habitantes)	Área mínima recomendável (ha)
até 2.000	1 ha
entre 2.001 e 5.000	2 ha
entre 5.001 e 10.000	4 ha
entre 10.001 e 20.000	6 ha
entre 20.001 e 50.000	10 ha
entre 50.001 e 100.000	20 ha
entre 100.001 e 150.000	25 ha
entre 150.001 e 250.000	35 ha
entre 250.001 e 500.000	55 ha
entre 500.001 e 750.000	95 ha

Fonte: BRASIL, 2011.

Adicionalmente a área do aterro também pode ser calculada através de equações, para a realização seria necessário adotar uma altura para cada talude do aterro, podendo chegar a 5m, logo, a área da seção é dada pela Equação 05, obtida por Adriano *apud* (Barros, 2012).

$$A = v/h \quad (5)$$

A = Área do aterro;

v = Volume total em m³;

h = altura adotada.

4.4. Seleção de áreas alvo de acordo com o mapa de aptidão - Mapa Pré-Campo

A seleção de áreas-alvo por meio de modelagem espacial é fundamental para orientar a pesquisa, assegurando maior precisão na localização e redução de riscos à população e ao meio ambiente. Essa escolha foi realizada através do mapa de aptidão (Figura 07) e apoiada pelo uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando dados de bancos nacionais e internacionais, facilitando a visita aos locais selecionados.

4.5. Reconhecimento das áreas

De acordo com Júnior *et al* (2022), é necessário o reconhecimento das áreas selecionadas *in loco* com objetivo de analisar de forma visual o entorno do terreno onde será utilizado para o estudo. É necessário a checagem do local de forma presencial, assim,

permitindo uma análise do tipo de vegetação presente, solos superficiais, presença de drenagens de pequeno porte e áreas alagáveis.

4.6. Coleta de amostras

Conforme Júnior et al (2022), a amostragem de solo requer furos de sondagem de até 0,5m e 2m de profundidade, dependendo do tipo de solo presente no local, com remoção da camada superficial (vegetação). Para este estudo, adotou-se:

As amostras serão coletadas da seguinte forma:

- Definição de um ponto de coleta;
- Profundidade: entre 20 a 50 cm;
- Trados manuais e saco de ráfia para armazenamento;
- Peso total da amostra a ser retirada de cada local analisado (até 20kg).

4.7. Análise em Laboratório e Interpretação das informações obtidas pós-laboratório

O ensaio de permeabilidade foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos no Campus do Pici, de acordo com a NBR 14.545 (ABNT, 2021) para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos. Já na análise granulométrica, será feita de acordo com a NBR 7.181 (ABNT, 2016), o ensaio de compactação de acordo com a NBR 7.182 (ABNT, 2016) e o ensaio de limite de liquidez de acordo com a NBR 6.459 (ABNT, 2016) e limite de plasticidade NBR 7.180 (ABNT, 2016)

As informações obtidas após a execução dos ensaios em laboratório serão um dos parâmetros para analisar a qualidade do solo de ambos os locais selecionados, onde os resultados obtidos serão criadas tabelas e gráficos específicos no *Excel* para cada área.

Já na permeabilidade, as informações geradas após análise, serão criadas tabelas no *Excel* para o cálculo do coeficiente de permeabilidade, será pela seguinte fórmula representada pela equação 06:

$$v = k_{20} * i \quad (6)$$

ou

$$q = k_{20} * i * a \quad (7)$$

Em que,

v = Velocidade de fluxo (cm/s);

q = quantidade de fluido por unidade de tempo (cm/s);

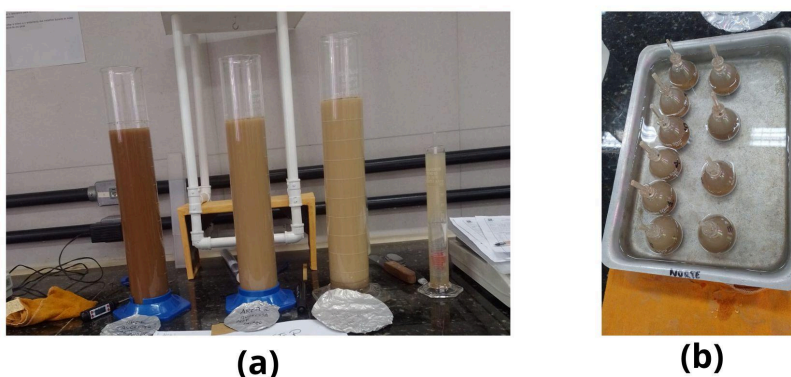
k₂₀ = Coeficiente de permeabilidade (unidade de velocidade);

i = Gradiente hidráulico = h / L;

4.7.1. Granulometria e Massa específica de grãos

O ensaio de análise granulométrica foi conduzido de acordo com a NBR 7181 (2016), o mesmo foi realizado através da combinação de sedimentação e peneiramento, onde foram utilizadas uma quantidade de 70g para cada área (1,2,3), onde foi-se adicionado 125 mL de Hexametáfosfato de sódio e deixado em repouso por dois dias para garantir a hidratação e completa dispersão das partículas. No ensaio de massa específica dos grãos, de acordo com a NBR 6.458 (ABNT, 2016) foram utilizados cinco picnômetros para cada área (1,2,3) com objetivo de garantir a autenticidade dos resultados. Em cada picnômetro foram adicionados 10g de solo dos respectivos locais para a realização do ensaio.

Figura 14 - (a) Ensaio de granulometria por sedimentação e (b) Ensaio de massa específica de grãos.



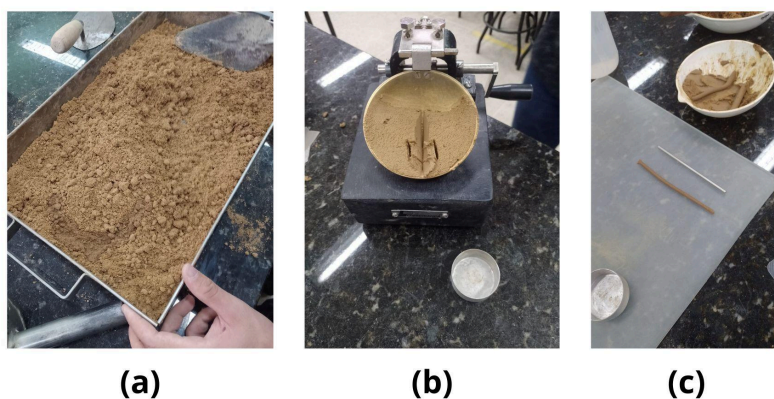
Fonte: Autora, 2025.

4.7.2. Compactação e Limites de Liquidez e Limites de Plasticidade

Para a realização do ensaio de compactação foram utilizados 2kg de solo de cada área (1,2,3), a escolha do cilindro foi orientada de acordo com o padrão estabelecido, optando pelo cilindro de tamanho pequeno, o soquete utilizado também foi o de tamanho pequeno, seguindo as especificações necessárias da norma.

Na realização do ensaio de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) foram utilizados 100g de solo de cada área (1, 2 e 3), para o LL foram realizados os cinco pontos de acordo com a norma, até chegar na umidade ótima de cada solo, utilizando o aparelho casagrande para determinação do limite de liquidez. Já para o LP foram moldados cinco corpos de prova para obtenção dos resultados finais do limite de consistência dos solos.

Figura 15 - (a) Solo (área 3) utilizado para o ensaio de compactação , (b) Limites de Liquidez e (c) Limites de Plasticidade.

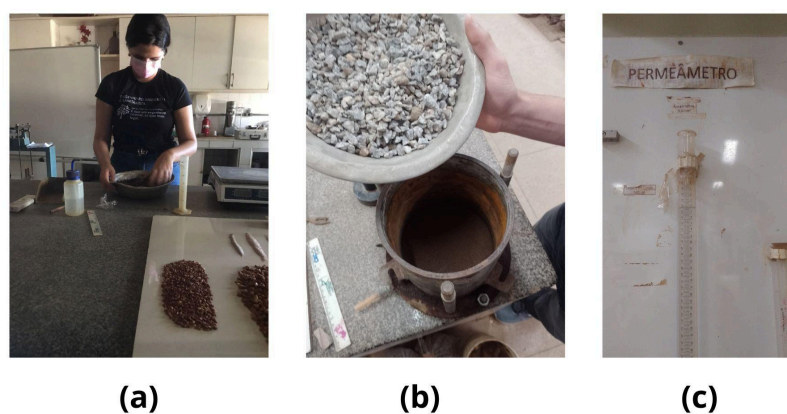


Fonte: Autora, 2025.

4.7.3. Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 14.545 (ABNT, 2021), utilizando-se um permeâmetro de carga variável, realizado em Fortaleza no Campus do Pici. Para a realização do ensaio adotou-se corpo de prova com altura de 3 cm. A saturação das amostras foi realizada por percolação ascendente, sob gradiente hidráulico constante, visando garantir a completa eliminação do ar aprisionado nos poros. A amostra da área 1 foi saturada no mesmo dia do ensaio, enquanto as amostras das áreas 2 e 3 necessitam de um período superior a 12 horas para atingir a saturação adequada, de forma a assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Figura 16 - (a) Preparação do solo para compactação no cilindro, (b) Inserção de britas no solo compactado e (c) Permeâmetro.



Fonte: Autora, 2025.

4.8. Análise multicritério e Classificação das áreas

A tabela de análise multicritérios foi elaborada com foco em priorizar as exigências mínimas impostas pela NBR 13.896 (ABNT, 1992), sendo essencial para análise de critérios técnicos, ambientais e sociais para a instalação de um aterro sanitário.

Com base no Método AHP será traçada uma hierarquização de critérios estabelecidos pela NBR 13.896 (ABNT, 1992), elegendo-se prioridades de 1 a 5 para os parâmetros analisados de cada área selecionada, para que haja a ponderação destes critérios e as áreas sejam elencadas de forma hierárquica, é necessário a fixação de pesos, tanto para as prioridades, como para os critérios estabelecidos pela norma citada acima, essa hierarquização é apresentada no Quadro 9.

Quadro 09 - Hierarquização dos critérios

Hierarquização dos critérios	Prioridades dos Critérios	Pesos dos critérios	Notas dos critérios		
			Atendimento total (100%)	Atendimento parcial (50%)	Não atendido (0%)
Legislação Ambiental	1	10	10	5	0
Condicionantes Político-Sociais	2	6	6	3	0
Condicionantes Econômicos	3	4	4	2	0
Condicionantes Técnicos	4	3	3	1,5	0
Demais Condicionantes Econômicos	5	2	2	1	0

Fonte: Adaptado de Monteiro (*et al* 2001)

De acordo com Marques (2022), é necessário adotar-se prioridades para que seja realizada a hierarquização seguindo o método AHP, onde para que seja feita a hierarquização das prioridades é necessária a definição de critérios (Quadro 9). Os critérios estabelecidos seguem as características do local que será analisado, logo, a presente pesquisa adotará os seguintes critérios, para que seja realizada a hierarquização das prioridades e seus respectivos pesos. Foi adotado a hierarquia de prioridades de acordo com Monteiro (*et al* 2001) que define a hierarquia de prioridade para o atendimento dos critérios técnicos, econômicos,

políticos e sociais, sendo possível a criação do Quadro 10 para o estabelecimento da relação hierárquica de cada critério adotado.

Quadro 10 - Relação Hierárquica dos critérios, prioridades e pesos.

Crítérios	Prioridade	Peso
Distância mínima dos cursos d'água	1	10
Distância mínima dos núcleos populacionais	1	10
Distância de aeroportos	1	10
Permeabilidade do solo natural	1	10
Granulometria do solo natural	1	10
Compactação do solo natural	1	10
Área de Proteção Permanente (APP)	1	10
Distância dos centros de coleta	2	6
Distância satisfatória de sistemas viários	2	6
Área do governo ou prefeitura	2	6
Área privada	3	4
Vida útil mínima	3	4
Textura do solo (material de cobertura e base do aterro)	3	4
Declividade	4	3
Uso do solo	4	3
Acesso a veículos pesados	5	2

Fonte: Adaptado de Monteiro (*et al* 2001)

A classificação das áreas será realizada com base nos critérios presentes no Quadro 10, garantindo uma análise detalhada e organizada. Esse processo permitirá um resultado mais preciso, destacando as áreas que obtiverem maior pontuação, conforme os pesos atribuídos a cada critério. Dessa forma, será possível priorizar as regiões mais adequadas ou críticas, facilitando a tomada de decisão e o planejamento estratégico. Além disso, essa abordagem contribui para uma gestão mais eficiente, promovendo uma análise comparativa entre as áreas

e possibilitando ajustes refinados nos critérios, caso necessário. Como o método AHP realiza uma hierarquização de prioridades de forma simples e eficiente, o Quadro 10 será utilizado como base para aplicação do método de hierarquização e posteriormente a seleção das áreas que apresentem adequada viabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Descrição das áreas selecionadas e justificativa de escolha

5.1.1. Área 1

O primeiro local selecionado está situado a cerca de 5 km do centro de Crateús, em direção a Ipaporanga, ao longo da BR-404/CE-189, com acesso por via secundária de 127 metros. A área, delimitada por geoprocessamento, possui aproximadamente 46 hectares, excedendo a estimativa inicial e se destacando em relação às demais opções. Foi realizada uma escavação de 41 cm para coleta de solo, evitando a camada superficial com possível presença de matéria orgânica. A seguir, apresentam-se as imagens da coleta na área 1.

Figura 08 - Coleta de solo - Área 1



Fonte: Autora, 2025.

O local tem acesso viário predominante pavimentado, garantindo eficiência no transporte e redução de custos. Uma pequena extensão não pavimentada pode ser asfaltada para melhorar o tráfego. Avaliação indica aptidão média a alta para a finalidade (Figura 18). A Figura 09 apresenta a imagem de satélite da área 1, sua coordenada geográfica é: -5.1324441,-40.6753742.

Figura 09 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 1.

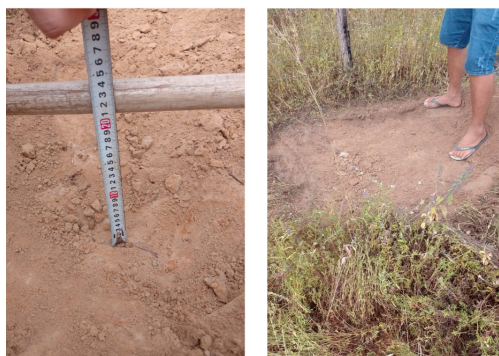


Fonte: Google Earth, 2025.

5.1.2. Área 2

O segundo local situa-se a 7,2 km do centro gerador de resíduos de Crateús, às margens da BR-226 (sentido Teresina-PI), a 3,5 km após o centro de triagem municipal – vantagem logística que reduz custos operacionais de transporte e permite otimização financeira entre municípios consorciados. Durante a caracterização do terreno, foi realizada uma escavação de 22 cm, evitando a camada superficial do solo.

Figura 10 - Coleta de solo - Área 2



Fonte: Autora, 2025.

O terreno possui acesso por via secundária não pavimentada (197m de extensão a partir da BR-226). A área, delimitada por geoprocessamento, apresenta 40 hectares de extensão. O entorno conta com infraestrutura viária predominantemente pavimentada, facilitando a circulação de veículos coletores. Conforme análise (Figura 18), o local apresenta aptidão média a alta para a implantação da infraestrutura proposta. A Figura 11 apresenta a imagem de satélite da área 2 sua coordenada geográfica é: -5.1731943,-40.7321911.

Figura 11 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 2



Fonte: Google Earth, 2025.

5.1.3. Área 3

Localizada a 9 km do centro gerador de resíduos de Crateús (sentido Independência), com acesso pela BR-226 (lado direito) e via secundária não pavimentada de 1,2 km. A área de 39 hectares foi delimitada por sensoriamento remoto e SIG, apta para implantação de aterro sanitário. Amostras de solo foram coletadas a 26 cm de profundidade, evitando a camada superficial com possível matéria orgânica. (Figura 12)

Figura 12 - Coleta de solo - Área 3



Fonte: Autora, 2025.

O entorno apresenta infraestrutura viária predominantemente pavimentada, assegurando tráfego eficiente de veículos coletores. A avaliação técnica (Figura 18) classificou o local com aptidão média a alta para o aterro sanitário, atendendo a todos os critérios técnicos e logísticos. A Figura 11 apresenta a imagem de satélite da área 2 sua

coordenada geográfica é: -5.2334090,-40.5730247.

Figura 13 - Imagem de satélite - Poligonal - Área 3.

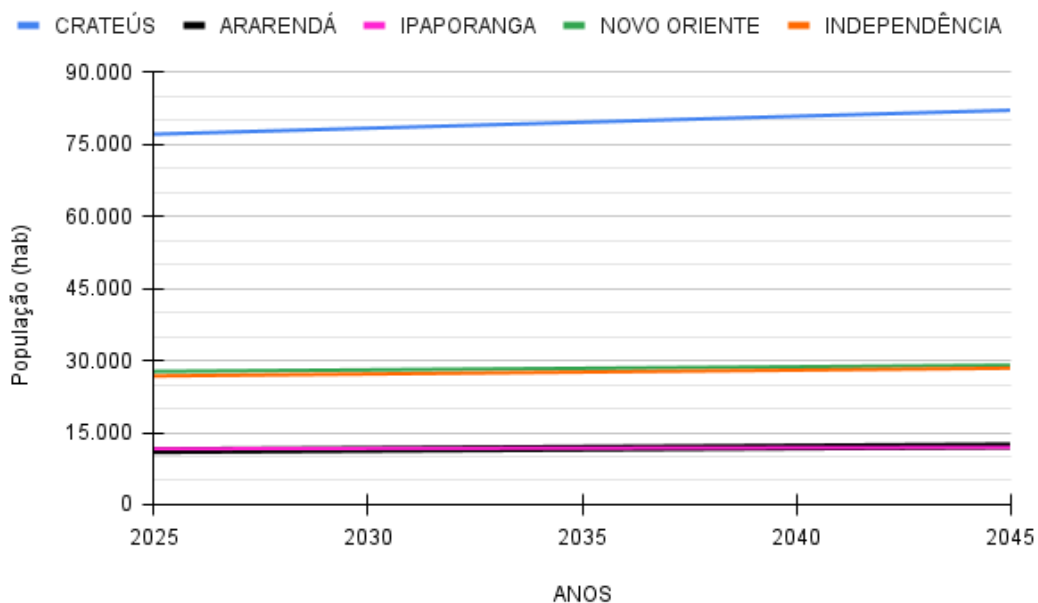


Fonte: Google Earth, 2025.

5.2. Dimensionamento da área do Aterro Sanitário

Para que ocorresse a obtenção da área total do aterro sanitário, antes foi necessário realizar a estimativa populacional dos cinco municípios que fazem parte do consórcio, de acordo com a Equação 01, onde com a aplicação da fórmula no *Excel* foi possível obter a estimativa populacional em um intervalo de 20 anos, contando de 2025 a 2045, abaixo encontra-se (Figura 17) com a estimativa populacional de cada município.

Figura 17 - Estimativa populacional dos Municípios

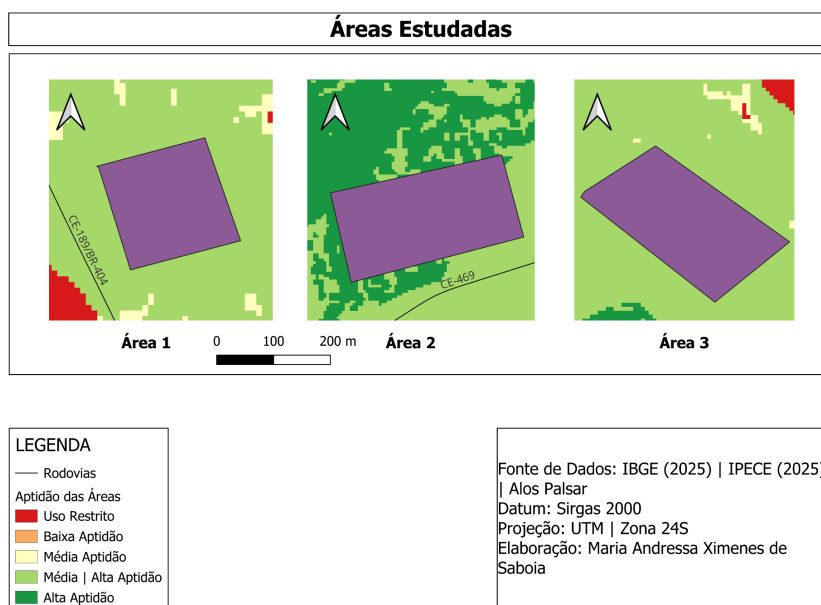


Fonte: Autora, 2025.

Obtendo-se uma estimativa total de 163.732 habitantes, no intervalo de 20 anos para os cinco municípios no ano, sendo realizado o somatório da última estimativa de todas as cidades no ano de 2045. Logo, a área do aterro foi calculada de acordo com o tamanho da população, o que apresenta-se no Quadro 08, para uma população de 150.001 a 200.000 habitantes, a área mínima recomendável pelo Ministério das Cidades, perfaz um tamanho de 35 hectares (BRASIL, 2011).

Com base no tamanho da área mínima necessária para o aterro sanitário, foi possível realizar o mapeamento e escolha de três áreas dentro do município de Crateús, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Mapa com as áreas selecionadas



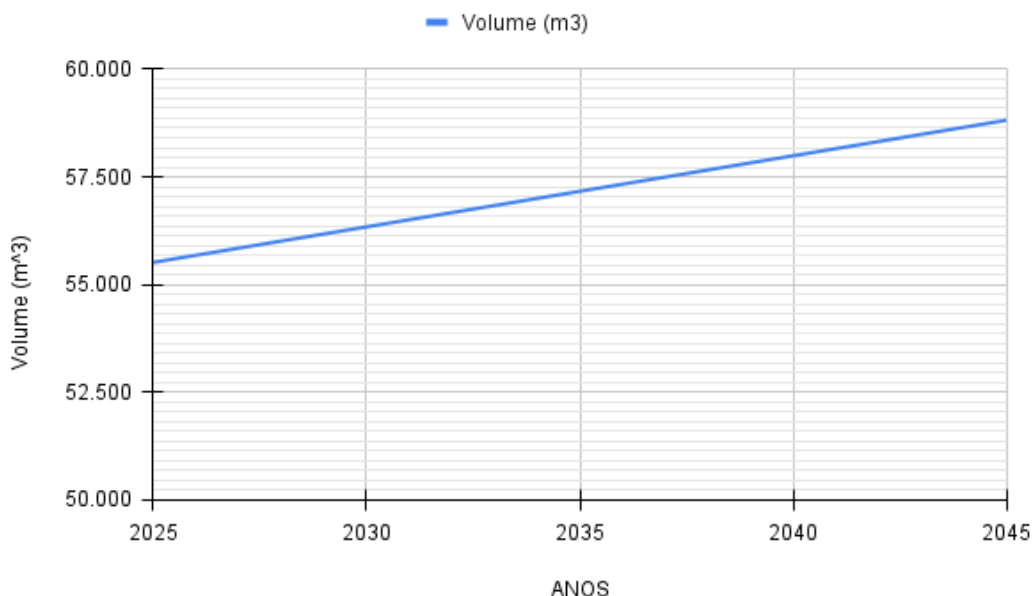
Fonte: Autora, 2025

5.2.1 Geração de RSU's e Volume

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), em 2019, a produção per capita de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, considerando apenas a população urbana, foi de 0,99 kg/hab/dia. Na região Nordeste, esse valor foi superior, atingindo 1,2 kg/hab/dia, enquanto o estado do Ceará apresentou uma média ainda mais elevada, de 1,4 kg/hab/dia. Com base nesses dados, foi considerada a média per capita do estado do Ceará de 1,4 kg/hab/dia, além da aplicação de um reajuste anual de

1,05% para a estimativa da geração de RSU em ton/ano (Figura 19).

Figura 19 - Estimativa do volume em m³ dos cinco municípios no decorrer dos 20 anos



Fonte: Autora, 2025.

Logo, pode-se concluir que a geração de RSU em ton/ano ao final da vida útil do aterro sanitário poderá chegar a uma geração de RSU total de 1.707.652 toneladas e volume de 1.200.479 m³ no decorrer dos 20 anos do aterro. Porém, esse valor pode ser superestimado, tendo em vista que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) busca diminuir a geração de resíduos a partir de práticas sustentáveis, como a reciclagem, reutilização de material e utilização de tecnologias verdes.

A disposição final dos resíduos sólidos é quantificada com base no volume efetivamente ocupado por esses materiais no corpo do aterro sanitário, logo, a massa encontrada foi de 1.707.652 ton. Segundo Monteiro et al. (2001), deve-se considerar um acréscimo de 20% referente ao material de cobertura de solo, aplicado sobre o volume total de resíduos sólidos gerados. Com isso, o volume total final estimado atinge 1.440.574,8 m³, uma célula pode chegar até 93 mil m³ (Dias *et al* ,2021), logo, estima-se que ao final serão necessárias 16 células para depositar esses resíduos.

5.3. Granulometria e Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP)

A distribuição granulométrica, o limite de liquidez e o limite de plasticidade das amostras de solos obtidas nas áreas 1, 2, e 3, os seguintes resultados estão presentes na

Tabela 01.

Tabela 01 - Resultados das Análises granulométricas, Limites de LL e LP, Classificação SUCS.

RESULTADOS	ÁREA 1	ÁREA 2	ÁREA 3
Umidade média (%)	2,86	2,41	5,00
Massa específica média dos grãos (g/cm ³)	2,65	2,65	2,68
Pedregulho (%)	11,40	5,90	4,30
Areia Grossa (%)	20,90	19,90	24,70
Areia Média (%)	22,10	22,70	21,70
Areia Fina (%)	25,10	26,90	22,80
Silte (%)	14,10	13,60	9,60
Argila (%)	6,40	11,10	16,80
LL (%)	14,00	15,00	19,00
LP (%)	15,00	15,00	15,00
IP	0	0	4
Classificação SUCS	Areia mal graduada -SW	Areia mal graduada - SW	Areia Argilosa - SC

Fonte: Autora, 2025

A umidade média de cada área analisada encontrou-se na faixa de 2,4% a 5%, demonstrado que os solos apresentam baixa capacidade de retenção de água, Araújo (2017) destaca que tal evento pode ocorrer devido ao clima semiárido nordestino e a grande quantidade de material fino encontrado nos locais, destacado posteriormente.

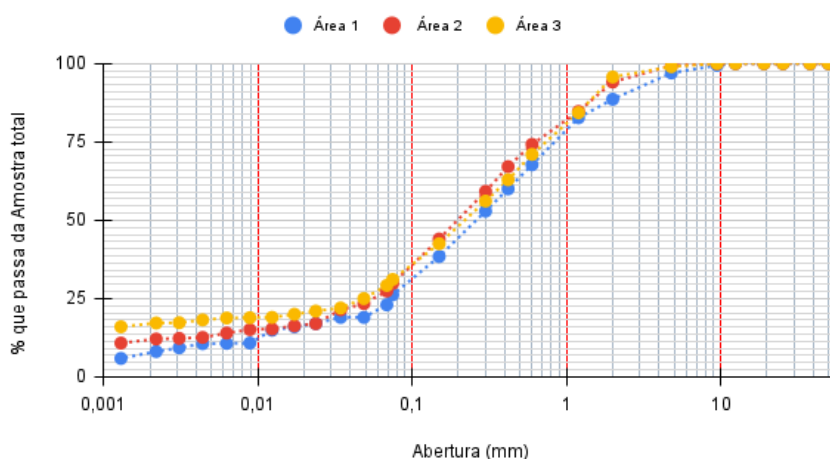
De acordo com Araújo (2017) o solo utilizado para a camada de cobertura de um aterro sanitário pode apresentar uma porcentagem acima de 40% de fração fina, diante dessas características, todas as áreas apresentaram uma maior quantidade de fração fina, porém a CETESB (1993) afirma que deve ser maior que 30%, as áreas apresentaram o dobro desse valor. Segundo Silva (2017), a camada base de um aterro sanitário pode chegar a apresentar até 89% de material fino, o que pode ser compensado com a presença de um material que contenha alto teor de argila, fazendo com que os vazios sejam preenchidos com o material fino e garantindo a impermeabilização da camada base do aterro.

A massa específica dos grãos está de acordo com o estabelecido pela NBR 6.458 (ABNT, 2025), onde os grãos não devem diferir de 0,02g/cm³, todas as áreas (1, 2 e 3) demonstraram resultados satisfatórios em mais de duas amostras, na qual é recomendado pela norma.

Pode-se observar na Tabela 01 que a Área 3 apresentou a maior porcentagem de argila em seu meio, chegando próximo a 17%, enquanto a Área 1 exibiu uma menor quantidade de argila em sua composição, encontrada com 6,4%. A NBR 13.869 (ABNT, 1997) recomenda o uso de solos que apresentam baixa permeabilidade, logo, a argila é um material que apresenta baixa permeabilidade devido a sua composição granulométrica, ajudando na contenção de contaminantes e auxiliando na impermeabilização do aterro.

A Figura 20 apresenta a curva granulométrica de cada área (1, 2 e 3), onde as três áreas apresentaram uma ampla faixa de tamanhos, como destacado na Tabela 01.

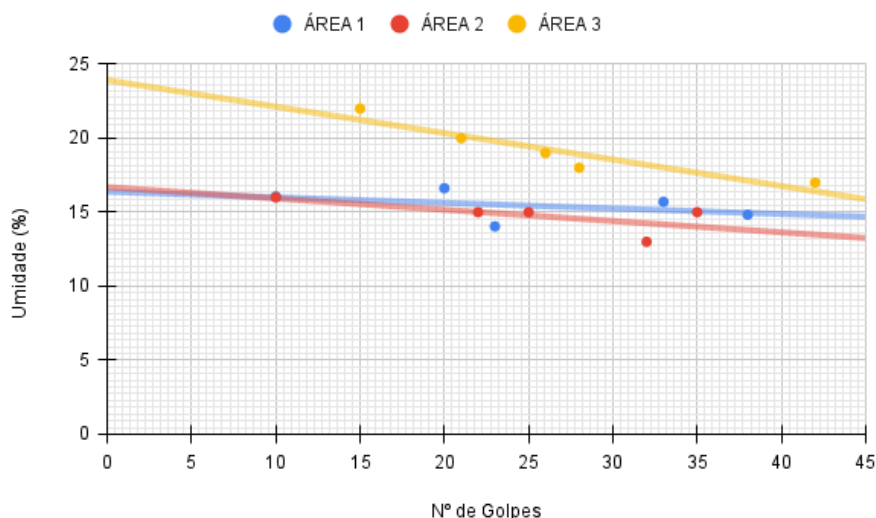
Figura 20 - Curvas granulométricas



Fonte: Autora, 2025.

Com a realização do ensaio de Limites de Liquidez foi possível encontrar a umidade a cada cinco pontos de cada solo analisado. As curvas da Figura 21 indicam que o Limite de Liquidez da área 1 e 2 ficam em torno de 14% e 15%, respectivamente, apresentando valor inferior à área 3 que chegou a 19%.

Figura 21 - Limites de Liquidez



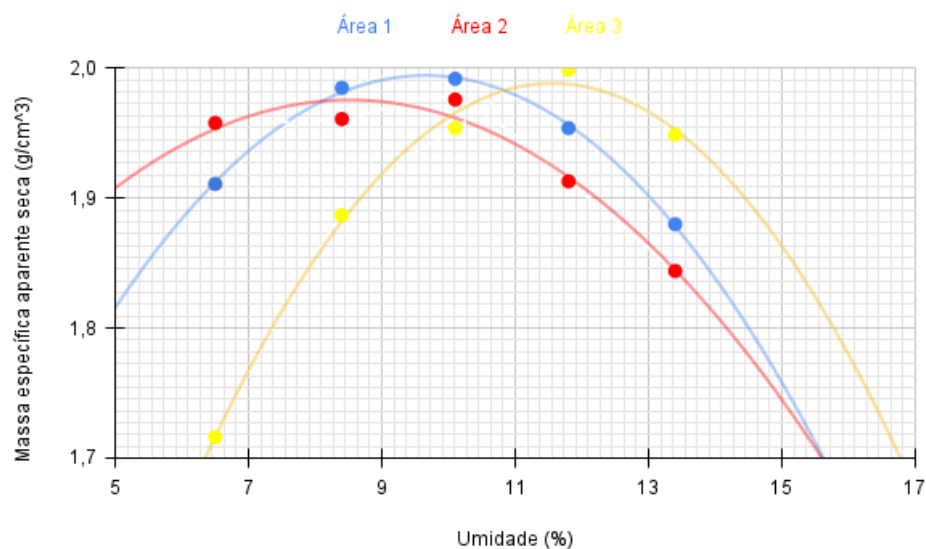
Fonte: Autora, 2025.

A partir da curva granulométrica e os resultados de Limites de Liquidez (LL) e Limites de Plasticidade (LP) foi possível realizar a classificação de cada solo estudado (área 1, área 2 e área 3) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Logo, a Área 1 e 2 apresentaram características granulométricas de uma areia mal graduada - SW, com os ensaios de LP foi possível constatar que os dois solos são não plásticos, já o solo da Área 3 foi classificado como uma areia argilosa - SC. De acordo com Silva (2017), na camada base de um aterro sanitário podem ser encontradas areias argilosas mal graduadas, já Araújo (2017) destaca que em solos de cobertura podem ser encontradas argilas inorgânicas. Porém, a CETESB (1993) enquadra quais tipos de solos podem ser utilizados em aterros sanitários, na qual são: CL, CH, SC ou OH. Logo, a área 3 apresenta características próximas às citadas acima.

5.4. Compactação

A Figura 22 apresenta a curva de compactação dos locais analisados de acordo com os resultados obtidos a partir do ensaio de compactação.

Figura 22 - Curvas de compactação



Fonte: Autora, 2025.

De acordo com Araújo (2017), para utilização de um solo de cobertura para o aterro sanitário, a umidade ótima pode chegar até 20% e peso específico de até 16,10 kN/m³. Já Silva (2017) destaca que a umidade da base de um aterro pode chegar até 11,20% e seu peso específico até 16,03 kN/m³. A Tabela 02 apresenta a umidade ótima de cada área e suas respectivas massas e pesos.

Tabela 02 - Umidade ótima, Massa específica seca e Peso específico seco.

SOLOS	Umidade ótima (%)	Massa específica seca (g/cm³)	Peso específico seco (kN/m³)
ÁREA 1	9,61	1,98	19,84
ÁREA 2	10,00	1,97	19,72
ÁREA 3	10,20	1,99	19,86

Fonte: Autora, 2025.

Logo, de acordo com os valores encontrados nas curvas de compactação de cada área analisada, a Área 3 apresentou os valores mais próximos ao de Araújo (2017) e Silva (2017) em relação à umidade (10,2%), tanto para base do aterro como para cobertura do solo, já a Área 2 aproximou-se mais dos valores descritos pela literatura em relação ao seu peso específico (19,72 kN/m³), porém, houve uma boa diferença entre os valores de peso específico seco, chegando há 3kN/m³.

5.5. Permeabilidade

A NBR 13.896 (ABNT, 1997) destaca que os solos ideais para serem utilizados em camadas bases de aterros sanitários devem apresentar um coeficiente de permeabilidade de 10^{-8} m/s, já a CETESB (1993) e a USEPA (2004) ressaltam que o coeficiente de permeabilidade deve ser de 10^{-9} m/s. Belfort (*et al* 2019) afirma que os solos usados em cobertura de aterros podem apresentar uma permeabilidade de até 10^{-11} m/s. Conforme as regulações estabelecidas e os valores encontrados acima, os mesmos podem ser utilizados como parâmetros para comparações. A partir do ensaio de permeabilidade foi possível obter os seguintes resultados para as três áreas estudadas, presentes na Tabela 03.

Tabela 03 - Permeabilidade das áreas 1, 2 e 3.

SOLOS	K20 (m/s)
ÁREA 1	$1,61 \times 10^{-7}$
ÁREA 2	$6,51 \times 10^{-7}$
ÁREA 3	$1,72 \times 10^{-7}$

Fonte: Autora, 2025.

O coeficiente de permeabilidade encontrado de cada área analisada está acima do estabelecido pela CETESB (1993), USEPA (2004) e NBR 13.896 (ABNT, 1997), a área 1 apresentou o resultado mais próximo, porém, todas as áreas não encaixaram-se nos valores descritos acima. Nesse caso, podem ser utilizados materiais como geomembranas, camadas enriquecidas com bentonita ou aquisição de argila de baixa permeabilidade para confecção desses revestimentos de base.

De acordo com as interpretações dos resultados de granulometria, classificação do tipo de solo, limites de consistência, compactação e permeabilidade, foi possível estabelecer que a área 3 apresentou uma melhor adequabilidade a instalação de um aterro sanitário, diante dos resultados obtidos, servindo para camadas de cobertura e base do aterro.

5.6. Análise comparativa das áreas selecionadas

De acordo com as análises realizadas e as metodologias aplicadas, na qual avaliaram os parâmetros técnicos, ambientais e econômicos, baseado na NBR 13.896 (ABNT, 1997), os parâmetros e dados da análise técnica constam no Quadro 11.

Quadro 11 - Critérios para avaliação das áreas (Retirado da NBR 13.896/97)

Critérios	Área 1	Área 2	Área 3
Distância mínima dos cursos d'água	>200m	>200m	>200m
Distância mínima dos núcleos populacionais	>500m	>500m	>500m
Distância de aeroportos	Sem restrição	Sem restrição	Sem restrição
Permeabilidade do solo natural	Ruim	Ruim	Ruim
Granulometria do solo natural	Ruim	Ruim	Ótima
Compactação do solo natural	Boa	Boa	Ótima
Área de Proteção Permanente (APP)	Sem restrição	Sem restrição	Sem restrição
Distância dos centros de coleta	Ruim	Ótima	Ruim
Distância satisfatória de sistemas viários	>100m	>150m	>1km
Área do governo ou prefeitura	Não atende	Não atende	Não atende
Área privada	Atende	Atende	Atende
Textura do solo (material de cobertura e base do aterro)	Areia mal graduada (solo não plástico)	Areia mal graduada (solo não plástico)	Areia argilosa - SC
Vida útil mínima	Baixa a média expectativa	Baixa a média expectativa	Alta a média expectativa
Declividade	Plano	Plano	Plano
Uso do solo	Boa	Boa	Ótima
Acesso a veículos pesados	Ótima	Ótima	Boa

Fonte: Adaptado de Monteiro (*et al* 2001)

Logo, após o desenvolvimento das atividades aplicadas à NBR 13.896 (ABNT, 1997), com o auxílio do Quadro 9 e Quadro 10, foi possível realizar uma análise comparativa entre as áreas selecionadas, tudo de acordo com suas respectivas prioridades e pesos, mostrados no Quadro 12.

Quadro 12 - Percentual de atendimento dos critérios

Critérios	Peso	Percentual de atendimento dos critérios (%)		
		Área 1	Área 2	Área 3
Distância mínima dos cursos d'água	10	100	100	100
Distância mínima dos núcleos populacionais	10	100	100	100
Distância de aeroportos	10	100	100	100
Permeabilidade do solo natural	10	0	0	0
Granulometria do solo natural	10	0	0	100
Compactação do solo natural	10	100	100	100
Área de Proteção Permanente (APP)	10	100	100	100
Distância dos centros de coleta	6	50	100	50
Distância satisfatória de sistemas viários	6	100	100	100
Área do governo ou prefeitura	6	0	0	0
Área privada	4	100	100	100
Textura do solo (material de cobertura e base do aterro)	4	0	0	100
Vida útil mínima	4	0	0	100
Declividade	3	100	100	100
Uso do solo	3	50	50	100
Acesso a veículos pesados	2	100	100	50

Fonte: Adaptado de Monteiro (et al 2001)

***Legenda: 100% = integralmente atendido, 50% = parcialmente atendido, 0% = não atendido**

Em seguida, aplicando-se as notas de cada critério presente no Quadro 12 juntamente com o atendimento percentual, conseguiu-se a pontuação final das áreas selecionadas, exposto no Quadro 13 respectivamente.

Quadro 13 - Percentual de atendimento dos critérios com a devida pontuação

Critérios	Peso	Percentual de atendimento dos critérios (%)		
		Área 1	Área 2	Área 3
Distância mínima dos cursos d'água	10	10	10	10
Distância mínima dos núcleos populacionais	10	10	10	10
Distância de aeroportos	10	10	10	10
Permeabilidade do solo natural	10	0	0	0
Granulometria do solo natural	10	0	0	10
Compactação do solo natural	10	10	10	10
Área de Proteção Permanente (APP)	10	10	10	10
Distância dos centros de coleta	6	3	6	3
Distância satisfatória de sistemas viários	6	6	6	6
Área do governo ou prefeitura	6	0	0	0
Área privada	4	4	4	4
Textura do solo (material de cobertura e base do aterro)	4	0	0	4
Vida útil mínima	4	0	0	4
Declividade	3	3	3	3
Uso do solo	3	1,5	1,5	3
Acesso a veículos pesados	2	2	2	1
Total bruto	108	69,5	72,5	88
Total em percentual (%)	100	63,13%	64,35%	81,48%

Fonte: Adaptado de Monteiro (*et al* 2001)

Portanto, realizando o cálculo bruto e percentual dos critérios e pesos estabelecidos foi possível obter o resultado final da análise multicritério de cada área estudada.

A Área 1 apresentou o menor percentual total (63,13%), isso deu-se ao fato de que as análises de solo demonstraram que o mesmo é uma areia mal graduada, e para o uso do solo seria necessário a adição de materiais que fizessem com que baixasse a permeabilidade do mesmo, para que o solo pudesse ser utilizado na camada base e cobertura do aterro, mesmo diante dessas características do solo.

A Área 2 apresentou o percentual total de 64,35%, o local também apresentou características semelhantes a área 1 em relação a análise do solo, sendo classificada como uma areia mal graduada, que apresentaria aumento de custos para implantação do aterro, porém, a área 2 apresentou um bom acesso a veículos pesados e distância do centro de coleta, ajudando a reduzir os custos operacionais.

Já a Área 3 apresentou o maior percentual total chegando a 81,48%, demonstrado melhores características para a construção de um aterro sanitário no município de Crateús, destacando-se nas análises de solo e obtendo os melhores resultados em comparação às outras áreas estudadas, destacando-se na análise granulométrica, onde o solo encontrado pode ser utilizado em aterros sanitários, apenas na permeabilidade o resultado não foi satisfatório, pois não apresentou o resultado estabelecido pela norma, assim como as outras duas áreas.

Diante do exposto, a partir da ponderação dos critérios, evidenciou-se que a escolha da área ideal vai além de um único fator isolado, exigindo uma avaliação integrada e criteriosa. É importante destacar que o fato de uma área não apresentar o maior índice de aptidão não significa que ela seja inapta, mas sim que, entre as opções analisadas, existem alternativas mais vantajosas em termos técnicos e operacionais.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou realizar uma análise técnica, ambiental e social, realizando a análise do solo dos locais selecionados, a fim de elencar a adequabilidade de cada área por meio de uma análise multicritério. Logo, foram obtidas as seguintes conclusões.

- A realização da análise multicritério juntamente ao Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitiu com que fosse possível selecionar três áreas no município de Crateús para analisar sua adequabilidade para instalação de um aterro sanitário.
- A partir da seleção dos locais foi possível realizar a análise de solo das três áreas, onde o coeficiente de permeabilidade das áreas 1, 2 e 3 apresentaram alta permeabilidade, sendo necessário o incremento de aditivos que contenham argila, para que o coeficiente diminua e se adeque ao valor padrão estabelecido.
- Na análise granulométrica foi possível classificar qual o tipo de solo presente no local, a área 3 apresentou um solo arenoso-argiloso, podendo ser utilizado em aterros sanitários. As Áreas 1 e 2 classificaram-se como areia mal graduada, possivelmente gerando um aumento de custos para a implantação de um aterro, devido ao fato que jazidas de terra devem ser retiradas de outros locais.
- Apesar das áreas 1 e 2 apresentarem menores percentuais de acordo com a análise multicritério, não significa que os locais não são aptos a receber um aterro sanitário, apenas que as mesmas poderiam gerar mais custos de implantação e operação.
- O método AHP utilizado para realizar a hierarquização dos critérios demonstrou-se eficiente na priorização dos critérios e atribuição de pesos para cada aspecto analisado. A partir das análises técnicas, ambientais e sociais foi possível elencar o percentual total de cada área, sendo a Área 3 com o maior percentual (81,48%), sendo a mais indicada para implantação de um aterro sanitário.
- A seleção de áreas para a implantação de um aterro sanitário auxilia diretamente na minimização dos impactos ambientais causados pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, contribuindo para a erradicação dos lixões nos municípios consorciados. Além disso, o desenvolvimento deste estudo serve como subsídio técnico para o planejamento regional e futuras etapas do licenciamento e implantação da infraestrutura no município de Crateús.

REFERÊNCIAS

ADRIANO, J. P. P. **Pré-seleção de áreas para a implantação de um aterro sanitário no município de Açailândia-MA**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em:< <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5061>>. Acesso em: 18 de Novembro de 2024

ALMEIDA, B. A.; CANTÃO, L. G. V.; LOUZADA, A. F.; NEVES, R. R.; MOREIRA, A. C. N. Seleção de áreas adequadas para implantação de aterro sanitário intermunicipal no sudeste paraense-Brasil, utilizando SIG vinculado ao método AHP. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 17, n. 1, p. 53-80, abr. 2022. Disponível em:<<https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/84084>> Acesso em: 19 de Novembro de 2024

ARAUJO, P. da S.. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2017. Disponível em:<<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/373>>. Acesso em 05 de Junho de 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6.457:2024. Métodos para preparação de amostras de solos destinados a ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (Abnt). Nbr 6.459: Solo – Determinação Do Limite De Liquidez. Rio De Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6.458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (Abnt). Nbr 7.180: Solo – Determinação Do Limite De Plasticidade. Rio De Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7.181:2016. Análise granulométrica de solos: Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento e sedimentação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7.182:2016. Ensaio de compactação de solos: Método de ensaio para determinação da relação entre a umidade e a densidade máxima de solos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8.419:1992. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13.896:1997. Aterros sanitários — Critérios de implantação, projeto e operação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 14.545:2021. Permeabilidade de solos: Determinação da permeabilidade à água por meio de permeâmetro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

BARROS, R. G.; DIAS, P. P.; ARAÚJO, V. K. A. Investigação de passivo ambiental na área do aterro sanitário de Hidrolândia, GO. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 73-82, set./dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2236117018948>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2024

BELFORT, N. T.; SANTANA, D. D. S.; SANTOS FILHO, D. A. D.; JUCÁ, J. F. T. *Permeabilidade de um solo de comportamento anômalo utilizado para cobertura do aterro sanitário de Altinho/PE*. In: Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental – Regeo; Congresso Brasileiro De Geossintéticos, 9. e 8., 2019, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: IGS-Brasil/ABMS, 2019. p. 443–452. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Nayara-Belfort/publication/335192985_Permeabilidade

[_de_um_Solo_de_Comportamento_Anomalo_Utilizado_para_Cobertura_do_Aterro_Sanitario_de_AltinhoPE/links/5d55e56ba6fdccb7dc3f9d5a/Permeabilidade-de-um-Solo-de-Comportamento-Anomalo-Utilizado-para-Cobertura-do-Aterro-Sanitario-de-Altinho-PE.pdf](https://www.altinho-pe.gov.br/links/5d55e56ba6fdccb7dc3f9d5a/Permeabilidade-de-um-Solo-de-Comportamento-Anomalo-Utilizado-para-Cobertura-do-Aterro-Sanitario-de-Altinho-PE.pdf)> Acesso em: 14 de Julho de 2025.

BRASIL. **Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.** Termo de Referência Técnico 1: Execução dos estudos ambientais preliminares, elaboração do projeto básico e executivo completo do aterro sanitário. Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2019.** Brasília: SNS/MDR, 2020. 244 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1/2019/Diagnostico_RS2019.pdf> Acesso em: 08 de Maio de 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (2022) - SNIS.** Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/rs>> Acesso em: 10 de Novembro de 2024.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 10 de Novembro de 2024

BRASIL. Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2005. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 jan. 2005. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2005/L11445.htm> Acesso em: 25 de Novembro de 2024

BROLLO, M. J. **Metodologia automatizada para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos: aplicação na Região Metropolitana de Campinas (SP).** 2001. 225 p. Tese

(Doutorado em Saúde Ambiental) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/306276575>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2024

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Resíduos Sólidos Industriais. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). Mapeamento dos consórcios públicos brasileiros 2023. Brasília: CNM, 2023. Disponível em: <<https://cnm.org.br/biblioteca/exibe/5539>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2025

CONSELHO DE POLÍTICAS E GESTÃO DO MEIO AMBIENTE. Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos dos Municípios da Bacia do Poti/Parnaíba: Sertão de Crateús. Fortaleza: CONPAM, 2012. 70 p. Disponível em: <<https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2018/12/Sertão-de-Crateús-F.pdf>>. Acesso em: 21 de Janeiro de 2025

DIAS, G. D. R.. FIGUEIRA NETO, M. D. S.. MARTINS, R. O. G.. **Dimensionamento De Uma Célula De Aterro Sanitário De Pequeno Porte Para A Cidade De Guajeru – BA.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 06, Ed. 06, Vol. 08, pp. 113-136. Junho de 2021. ISSN: 2448-0959, Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/cidade-de-guajeru>> Acesso em: 17 de Julho de 2025.

DIAS, J. A. **A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos: uma introdução à oceanografia geológica.** Versão preliminar. 2004. Disponível em: <<https://archive.org/details/2004-jad-a-analise-sedimentar-e-o-conhecimento-dos-sistemas-marinhos.-introducao/page/n5/mode/2up>> . Acesso em: 15 de Dezembro de 2024

FERNANDES, D.; MORAIS, Í. S.; MORAIS, I. S.; MARINO, M. T. R. D.; TAVEIRA, N. P.; SOUZA, P. F. A. de; CUNHA, P. V. M.; PEIXOTO, V. P.; SILVA, V. B. G. Estudo granulométrico da Lagoa da Precabura, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Ceará. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 34, n. 1 e 2, p. 63-78, dez. 2013. Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/view/4493>>. Acesso em: 20 de Dezembro de 2024

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 169 p. ISBN 85-85771-43-7.

Disponível em:

<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/15292/1/2006OL008.pdf>>.

Acesso em: 10 de Janeiro de 2025

HENRICHES, J. A.; LIMA, D. V.; CUNHA, M. V.. **Consórcios públicos intermunicipais: estrutura, prestação de contas e transparência**. 2. ed. Brasília: Confederação Nacional de Municípios – CNM, 2020. 164 p. ISBN 978-65-88521-01-4. Disponível em:

<<https://cnm.org.br/storage/biblioteca/Consortorios-publicos-intermunicipais-2ed.pdf>> . Acesso

em: 21 de Janeiro de 2025

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (IBGE). 2022: População do município de Crateús. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/crateus.html>> Acesso em: 15 de Novembro de 2024

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (IBGE). 2022: População do município de Ararendá. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/ararenda.html>> Acesso em: 15 de Novembro de 2024

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (IBGE). 2022: População do município de Ipaporanga. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/ipaporanga.html>> Acesso em: 15 de Novembro de 2024

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (IBGE). 2022: População do município de Independência. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/independencia.html>> Acesso em: 15 de Novembro de 2024

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (IBGE). 2022: População do município de Novo Oriente. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/novo-oriente.html>> Acesso em: 15 de Novembro de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE).
Perfil Municipal 2017 – Crateús. Fortaleza: IPECE, 2018. Disponível em:https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Crateus_2017.pdf.
 Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE).
Perfil Municipal 2017 – Ararendá. Fortaleza: IPECE, 2018. Disponível em:
 <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Ararenda_2017.pdf>
 Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE).
Perfil Municipal 2017 – Novo Oriente. Fortaleza: IPECE, 2018. Disponível em:
 <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Novo_Orientes_2017.pdf>
 Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE).
Perfil Municipal 2017 – Ipaporanga. Fortaleza: IPECE, 2018. Disponível em:
 <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Ipaporanga_2017.pdf>
 Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE).
Perfil Municipal 2017 – Independência. Fortaleza: IPECE, 2018. Disponível em:
 <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Independencia_2017.pdf>
 Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

JESUS, L. S. D. **Estudo da permeabilidade dos solos de fundação do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP.** 2012. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3899d3a0-260a-42c7-aba1-156c3d82dda5>>.

Acesso em: 16 de Janeiro de 2025

JUNIOR, H. R. M.; MARMOS, J. L.; CONCEIÇÃO, R. A. C.; MAIA, M. A. M.; MACHADO, M. F. **Seleção e caracterização de áreas adequadas para a instalação de aterros sanitários: volume 6, versão 1**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2022. 1 recurso eletrônico (PDF). ISBN 978-65-5664-345-8. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23007>>. Acesso em: 05 de Dezembro de 2024

LINO, I. C. **Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: análise comparativa de métodos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2007. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/e1ba9a4d-24e8-4c0a-8ab5-8d95a5c8ce5f>>.

Acesso em: 10 de Novembro de 2024

MARQUES, G. N. **Seleção de áreas para aterros sanitários baseada em mapeamento geotécnico e Analytic Hierarchy Process (AHP)**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-04102017-163803/pt-br.php>>.

Acesso em: 03 de Dezembro de 2024

MENESES, H. B.; SOUSA, V. M. P. L.; FERNANDES, F. J. S. **Cartilha técnica: planejamento, construção e operação de aterros para a destinação final de resíduos sólidos**. Teresina: Tribunal de Contas do Estado do Piauí, 2008. Disponível em: <https://www.tcepi.tc.br/dmdocuments/cartilha_tecnica.pdf>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2024

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coord. técnica: Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2024/08/Manual-de-gerenciamento-de-residuos-solidos-Ibam.pdf>> Acesso em: 10 de Janeiro de 2025.

RAMIRES, J. Z. S.; VITOR, J. D. S. O impacto ambiental oriundo do descarte irregular de resíduos: a contaminação do solo e das águas subterrâneas no município de São Paulo. In: **XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23080/15195>> . Acesso em: 17 de Novembro de 2024

SANTOS, F. M. N.; PINTO FILHO, J. L. de O.; SANTOS, F. K. N. **Consórcios públicos para gestão de resíduos sólidos urbanos no Nordeste. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Natal, RN, 7-10 nov. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.14.23.III-033>. Acesso em: 14 de Janeiro de 2025

SILVA, T. F.. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2017. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/390>> Acesso em: 08 de Junho de 2025.

SOUSA, B. N.; MARTINS, V. R. A.; PORTELA, F. A. B.; SABOIA, M. A. X. de; SILVA, T. F. **Utilização de Sistemas de Informações Geográficas para implantação de um aterro sanitário no município de Crateús/CE. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Natal, RN, 7-10 nov. 2023. DOI: <<http://dx.doi.org/10.55449/congea.14.23.III-027>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2025

SOUSA, T. M. P. **Avaliação do meio físico como ferramenta para a seleção adequada de área para instalação de aterro sanitário municipal: estudo de caso do CONCISSS, região nordeste do estado do Pará**. 2022. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2022. Disponível em: <<https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/7320>>. Acesso em: 16 de Novembro de 2024

SPÍNOLA, G. M. R. **Caracterização e dimensionamento de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos no Brasil e nos municípios paulistas**. 2017. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017. Disponível

em:

<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.08.19.01/doc/spinola_caracterizacao.pdf>. Acesso em: 03 de Fevereiro de 2025

SUZUKI, J. A. N.; GOMES, J. Consórcios intermunicipais para a destinação de RSU em aterros regionais: estudo prospectivo para os municípios no Estado do Paraná. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 1-4, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000200002>>. Acesso em: 05 de Fevereiro de 2025.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solid waste disposal facility criteria technical manual**. Office of solid waste and emergency response. EPA-530-R-93-017. Washington DC.: USEPA, 1993. 11 p.