

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

JOSÉ SOARES NETO
YURI NOGUEIRA BERTOLDO

**SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE IGUATU-CE, UTILIZANDO TÉCNICA DE
GEOPROCESSAMENTO**

Cajazeiras-PB
2024

JOSÉ SOARES NETO
YURI NOGUEIRA BERTOLDO

**SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE IGUATU-CE, UTILIZANDO TÉCNICA DE
GEOPROCESSAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Gastão Coelho de Aquino Filho.

Cajazeiras-PB
2024

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

S676s Soares Neto, José.
Seleção de áreas para implantação de aterro sanitário no município de Iguatu-CE, utilizando técnica de geoprocessamento / José Soares Neto, Yuri Nogueira Bertoldo. – 2024.

48f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2024.

Orientador(a): Prof. Me. Gastão Coelho de Aquino Filho.

1. Resíduos sólidos. 2. Aterro sanitário. 3. Gestão ambiental. 4. Geoprocessamento. I. Bertoldo, Yuri Nogueira. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

JOSÉ SOARES NETO
YURI NOGUEIRA BERTOLDO

**SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO NO
MUNICÍPIO DE IGUATU-CE, UTILIZANDO TÉCNICA DE
GEOPROCESSAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 18 de Novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Gastão Coelho de Aquino Filho – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Cicero Joelson Vieira Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Cinthya Santos da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

À minha família, que sempre foi minha base e minha força. Vocês foram o alicerce em cada etapa, a mão estendida em cada dificuldade e o incentivo constante que me guiou a seguir em frente. A cada desafio, encontrei em vocês a coragem e o apoio para persistir. Este trabalho é fruto de cada palavra de incentivo, cada sacrifício e cada gesto de amor que recebi ao longo dessa jornada.

Por José Soares Neto

A toda à minha família, em especial aos meus pais, fundamentais em minha jornada. Sem o apoio e suporte de vocês, não teria conseguido chegar até aqui.

Por Yuri Nogueira Bertoldo

AGRADECIMENTOS

Por José Soares Neto

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter sido minha fonte de força e resiliência nos momentos difíceis, permitindo-me superar cada desafio ao longo desta jornada acadêmica. Sem Sua presença e apoio, não teria chegado até aqui com a determinação necessária para enfrentar cada obstáculo.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de curso, que estiveram ao meu lado nos momentos de maior dificuldade e tornaram a caminhada muito mais leve e enriquecedora. O apoio e a companhia de cada um foram essenciais para que eu enfrentasse as adversidades e seguisse em frente. São amizades que levarei para a vida e que tornaram essa jornada ainda mais especial.

Meu reconhecimento vai a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada aprendizado que recebi ao longo do caminho deixaram uma marca importante na minha formação.

À minha família, que sempre me incentivou a crescer e esteve presente em todos os momentos, minha gratidão eterna. Em especial, expresso meu apreço e admiração ao meu irmão Luiz Ricardo, um verdadeiro exemplo de integridade e excelência, tanto na área profissional quanto pessoal. Sua trajetória e apoio constantes me inspiraram e motivaram a buscar o melhor de mim em cada etapa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB *Campus* Cajazeiras, onde compartilho histórias e experiências desde o ensino médio, deixo meu agradecimento sincero. Foi nesse espaço de aprendizado e convivência que desenvolvi meus conhecimentos. Este *campus* sempre será um local de grande significado em minha trajetória.

Por fim, deixo meu agradecimento aos professores do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFPB-*Campus* Cajazeiras, por toda a orientação, paciência e dedicação que me concederam ao longo de minha formação. Em especial, agradeço ao professor Gastão Coelho de Aquino Filho, cujos ensinamentos e apoio constante foram fundamentais para que eu pudesse realizar este trabalho e alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Por Yuri Nogueira Bertoldo

Agradeço a Deus por todas as possibilidades a mim concedidas ao longo da vida, além de ser minha fonte de esperança; por guiar meus passos nessa longa jornada e sempre dar-me forças para enfrentar todos os obstáculos encontrados pelo caminho.

Gratidão à minha amada família: aos meus pais, irmã, avós e tias. Meus pais e minha irmã que sempre me incentivaram e deram-me forças para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Ao restante da minha família pelo carinho e orações, oferecendo-me força e enchendo-me de fé e esperança.

A todos os meus amigos, em especial àqueles que estiveram sempre ao meu lado, os que mesmo na minha ausência nunca se esqueceram de mim.

Aos colegas do IFPB pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Os agradecimentos são extensivos a todos os professores da graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras*, que durante esse período de formação mostraram-se disponíveis para orientarem no que fosse necessário. Agradeço especialmente ao professor Gastão Coelho de Aquino Filho, cujo suporte contínuo e ensinamentos foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

A todos os professores e professoras, com quem tive a honra de aprender ao longo de todo o percurso acadêmico, possibilitando assim meu desenvolvimento pessoal.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus Cajazeiras*, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, acolhimento e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

E de modo geral, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A geração de resíduos sólidos no Brasil vem crescendo a cada ano, acompanhando de perto o aumento populacional e a expansão das atividades econômicas e urbanas. Esse aumento na produção de resíduos, porém, não tem sido acompanhado de soluções adequadas para seu gerenciamento e descarte, o que representa um desafio crescente para muitas cidades, especialmente nas regiões mais carentes de infraestrutura, como o Nordeste. Em diversas localidades, as práticas de descarte ainda são inadequadas e causam sérios danos ambientais e riscos à saúde pública, uma situação que está em desacordo com a legislação ambiental vigente no país. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece diretrizes para o descarte e o manejo ambientalmente correto de resíduos. No entanto, municípios como Iguatu, localizado no Estado do Ceará, ainda enfrentam grandes dificuldades para cumprir essas exigências legais, principalmente considerando a falta de estrutura e planejamento adequado para a gestão de seus resíduos sólidos. Isso torna urgente a busca por soluções que possam atender às demandas ambientais e legais de forma eficaz e sustentável. A pesquisa desenvolvida focou em identificar áreas adequadas para a implantação de um aterro sanitário em Iguatu, contribuindo assim para uma gestão mais adequada dos resíduos sólidos produzidos no município. Para alcançar esse objetivo, foi utilizada uma metodologia baseada na Análise Multicritério, que permite avaliar uma série de fatores e condições ambientais, geográficas e legais para a escolha do local mais apropriado. Mapas temáticos foram elaborados com base em normas ambientais e técnicas específicas, resultando na classificação das áreas do município em quatro categorias de aptidão para a instalação do aterro: Impróprias, Desfavoráveis, Regulares e Propícias. Os resultados da análise revelaram áreas viáveis e ambientalmente adequadas para o desenvolvimento de um aterro sanitário, confirmando que o método empregado, integrado ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), é uma ferramenta eficaz para esse tipo de avaliação. A utilização do SIG permitiu uma análise detalhada e abrangente das variáveis envolvidas, garantindo que a seleção das áreas fosse precisa e fundamentada. Esse tipo de abordagem é essencial para assegurar que o novo aterro sanitário seja implantado em locais que causem o menor impacto ambiental possível e que atendam às necessidades da população de forma sustentável.

Palavras-chave: resíduos sólidos; aterro sanitário; gestão ambiental; análise multicritério.

ABSTRACT

The generation of solid waste in Brazil has been growing each year, closely following population increases and the expansion of economic and urban activities. However, this rise in waste production has not been matched by adequate solutions for its management and disposal, presenting a growing challenge for many cities, particularly in regions that lack infrastructure, such as the Northeast. In various locations, disposal practices remain inadequate, causing serious environmental damage and public health risks, a situation that is inconsistent with the current environmental legislation in the country. The National Solid Waste Policy sets guidelines for the disposal and environmentally correct management of waste. However, municipalities like Iguatu, located in the state of Ceará, still face significant difficulties in meeting these legal requirements, primarily due to a lack of structure and proper planning for managing their solid waste. This urgency calls for solutions that can effectively and sustainably meet environmental and legal demands. The research developed focused on identifying suitable areas for the implementation of a sanitary landfill in Iguatu, thus contributing to better management of the solid waste produced in the municipality. To achieve this goal, a methodology based on Multicriteria Analysis was employed, allowing for the evaluation of a range of environmental, geographical, and legal factors to choose the most appropriate location. Thematic maps were created based on specific environmental standards and techniques, resulting in the classification of the municipality's areas into four suitability categories for landfill installation: Unsuitable, Unfavorable, Regular, and Suitable. The results of the analysis revealed viable and environmentally appropriate areas for the development of a sanitary landfill, confirming that the method used, integrated with the Geographic Information System (GIS), is an effective tool for this type of assessment. The use of GIS enabled a detailed and comprehensive analysis of the involved variables, ensuring that the area selection was accurate and well-founded. This type of approach is essential to ensure that the new sanitary landfill is implemented in locations that cause the least environmental impact possible and that meet the population's needs sustainably. Thus, the study not only indicates potential solutions to the problem of improper waste disposal in Iguatu but also reinforces the importance of integrated and rigorous analytical methods for solid waste management in other regions of Brazil facing similar issues.

Keywords: solid waste; sanitary landfill; environmental management; multicriteria analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo de um lixão.	20
Figura 2 – Esquema ilustrativo de um aterro controlado.....	20
Figura 3 – Esquema ilustrativo de um aterro sanitário.....	21
Figura 4 – Etapas do procedimento metodológico adotado.	25
Figura 5 – Lixão municipal de Iguatu/CE.	27
Figura 6 – Ilustração de uma operação de Combinação Linear Ponderada.....	33

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	26
Mapa 2 – Localização dos critérios.	27
Mapa 3 – Mapa de afastamento em relação aos corpos d'água.	36
Mapa 4 – Mapa de afastamento em relação às rodovias.	37
Mapa 5 – Mapa de afastamento em relação aos núcleos populacionais.....	38
Mapa 6 – Mapa de afastamento em relação ao aeroporto.	38
Mapa 7 – Mapa de declividades.	39
Mapa 8 – Mapa de áreas adequadas e inadequadas para a implantação do aterro sanitário em Iguatu-CE.	40
Mapa 9 – Mapa de áreas adequadas para a implantação do aterro sanitário em Iguatu-CE. ...	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios para localização de um aterro sanitário de resíduos não perigosos.	21
Quadro 2 – Critérios para avaliação da adequabilidade de um local para implantação de um aterro sanitário.	22
Quadro 3 – Critérios para localização de um aterro sanitário de resíduos não perigosos.	22
Quadro 4 – Localização dos dados geográficos obtidos para confecção dos mapas.....	29
Quadro 5 – Critérios para Instalação do Aterro Sanitário.	29
Quadro 6 – Critérios utilizados para a seleção das áreas de aterro sanitário.....	30
Quadro 7 – Áreas proibidas para implantação de aterros sanitários.....	31
Quadro 8 – Classificação dos critérios e seus respectivos índices.	31
Quadro 9 – Valores utilizados para pesos e critérios.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa da população e da geração de RSU do Município de Iguatu-CE.	35
Tabela 2 – Valores representativos do mapa de áreas adequadas e inadequadas de acordo com sua classificação.	40
Tabela 3 – Valores utilizados para pesos e critérios.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará.

MDE – Modelo Digital de Elevação.

NBR – Norma Brasileira.

NUCASE – Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental.

RSU – Resíduos sólidos urbanos.

SIG – Sistema de Informações Geográficas.

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul.

SRC – Sistema de Referência de Coordenadas.

UTM – *Universal Transversa de Mercator*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
3.2	FORMAS DE DISPOSIÇÃO FINAL E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	19
3.2.1	<i>Lixão</i>	19
3.2.2	<i>Aterro controlado</i>	20
3.2.3	<i>Aterro sanitário</i>	20
3.3	CRITÉRIOS DA NORMA NBR 13896	21
3.4	LEI N° 12.305	22
3.5	TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO	23
3.5.1	<i>Análise Multicritério</i>	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.2	ESTIMATIVA DA ÁREA TOTAL DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS.....	28
4.3	CONSTRUÇÃO DE BANCO DE DADOS	28
4.4	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DAS ÁREAS DE ATERRO SANITÁRIO.....	29
4.5	GEOPROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES	30
4.6	APLICAÇÃO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO	32
5	RESULTADOS E ANÁLISES	35
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente de resíduos sólidos é um dos desafios mais significativos enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente em um contexto de crescimento populacional e urbanização acelerada. Em muitas dessas cidades, não há locais adequados para descarte de resíduos sólidos urbanos. Isso faz com que esses resíduos sejam despejados em lixões a céu aberto e aterros controlados, gerando diversas complicações para o meio ambiente e a saúde pública. O Panorama da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023) revela que o total de resíduos sólidos gerados no Brasil em 2022 foi de 77,1 milhões de toneladas, das quais 27,9 milhões de toneladas foram destinadas de forma inadequada.

Ainda de acordo com a ABREMA (2023), a Região Nordeste apresentou o menor índice de cobertura na coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Em 2022, os municípios da região geraram 18,9 milhões de toneladas de resíduos, dos quais 82,7% foram coletados. No entanto, aproximadamente 62,7% dos resíduos coletados foram destinados inadequadamente, sendo encaminhados para lixões, aterros controlados, valas, vazadouros e áreas semelhantes.

Conforme Crespo (2006), os impactos causados pela disposição de resíduos podem ser reduzidos e controlados com a implantação de um aterro sanitário, desde que sejam usadas técnicas adequadas para acomodar os resíduos e escolhido um local apropriado para o empreendimento.

A escolha do local para a implantação de um aterro sanitário é a primeira etapa do projeto e fundamental para seu bom desempenho. Segundo o Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental-NUCASE (2008), o sucesso do aterro, nos aspectos ambientais, técnicos, econômicos, sociais e de saúde pública, depende diretamente de uma seleção adequada da área de implantação. De acordo com a Norma Técnica NBR 13896 (ABNT, 1997), a escolha de um local para um aterro sanitário deve minimizar os impactos ambientais durante sua implantação e operação. O aterro deve ser aceito pela população local, respeitar o zoneamento e que possa ser utilizado por longo período.

Segundo Calijuri, Melo e Lorentz (2002), a escolha da localização de um aterro envolve uma decisão multicritério, considerando diversos atributos e avaliando várias áreas alternativas. Para isso, é necessário que profissionais qualificados realizem estudos para identificar a área mais adequada para o armazenamento dos resíduos.

De acordo com Lourenço *et al.* (2015), a coleta dessas informações tende a ser custosa e difícil de integrar e manipular. Entretanto, as técnicas de sensoriamento remoto auxiliam nesse

processo, fornecendo uma ferramenta para a análise de múltiplos critérios, o que permite a criação de mapas que facilitam a compreensão e a tomada de decisões (Alves, 2019).

Portanto, as ferramentas de geoprocessamento, integradas aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), possuem grande capacidade para a análise da destinação final de resíduos, pois englobam fatores técnicos, ambientais e socioeconômicos que apresentam variações e correlações espaciais na área estudada (Lourenço *et al.*, 2015).

Assim, o objetivo do trabalho é identificar áreas no município de Iguatu, Ceará, que possam ser utilizadas para a implantação de um aterro sanitário para o descarte adequado de resíduos sólidos urbanos, considerando a legislação e normas técnicas vigentes, e com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento.

2 OBJETIVOS

A ideia central do presente trabalho e os resultados que se pretendem alcançar através dele estão apresentados no referido capítulo.

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo identificar possíveis áreas que possam ser utilizadas à implantação de um aterro sanitário para o descarte correto de resíduos sólidos urbanos no Município de Iguatu, Ceará.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral desse trabalho, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- avaliar os aspectos legais e normas técnicas existentes para a seleção de áreas;
- definir os critérios técnicos para a implantação de um aterro no Município de Iguatu;
- analisar o potencial do uso de ferramenta SIG para determinação de áreas propícias para implantação de aterros sanitários.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção apresenta-se um levantamento de conceitos, legislação e normas técnicas vigentes, que auxiliam na tomada de decisões para a utilização correta de ferramentas de geoprocessamento para atingir o objetivo do trabalho.

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT,2004), os resíduos sólidos são definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, p. 1).

Segundo Pereira (2019), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua origem como:

- a) urbanos: são todos os resíduos sólidos descartados em áreas urbanas, abrangendo aquelas provenientes de atividades domésticas, comerciais e da limpeza urbana;
- b) industriais: são os resíduos, sobras e detritos resultantes de processos industriais, como os gerados em fábricas, siderúrgicas e petroquímicas. Podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, variando conforme o tipo de indústria;
- c) agrícolas: são resíduos gerados por atividades agrícolas e pecuárias, como embalagens de fertilizantes, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita e esterco animal;
- d) de serviços de saúde: são os materiais produzidos em hospitais, clínicas médicas e veterinárias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, centros de saúde, consultórios odontológicos e outros estabelecimentos afins;
- e) de construção civil: os resíduos gerados durante atividades de construção, reformas, reparos e demolições, bem como os resíduos resultantes da preparação e escavação de terrenos;
- f) radioativos: são os materiais sólidos, líquidos ou gasosos contaminados por núcleos que emitem radiação.

Os resíduos sólidos também são classificados com base em sua periculosidade, conforme as diretrizes da Norma Técnica NBR 10004 (ABNT, 2004).

- a) Resíduos Classe I – Perigosos: devido às suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, esses materiais podem representar riscos à saúde pública, contribuindo para o aumento da mortalidade ou causando efeitos adversos ao meio ambiente, especialmente quando manuseados ou descartados inadequadamente;
- b) Resíduos Classe II-A – Não perigosos (não inertes): são aqueles que não se classificam como resíduos de classe I ou classe II-B. Podem possuir características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- c) Resíduos Classe II-B – Não perigosos (inertes): são todos os resíduos que, ao entrarem em contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, não apresentarem a solubilização de nenhum de seus componentes, conforme os padrões estabelecidos pela norma.

3.2 FORMAS DE DISPOSIÇÃO FINAL E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

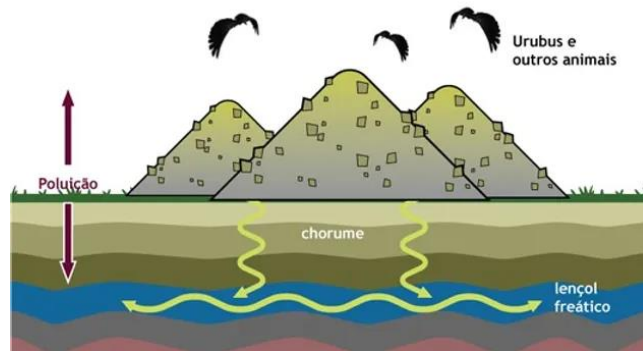
As três formas mais frequentes de disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são lixões ou vazadouros, aterros controlados e aterros sanitários.

3.2.1 Lixão

Tsuhako (2004) define lixão como uma forma de descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos que ocorre quando eles são simplesmente jogados no solo, sem medidas de proteção ambiental ou saúde pública, sendo também conhecido como lançamento a céu aberto, aterro comum ou vazadouro.

Esse método de disposição, conforme representado na Figura 1, polui o solo e as águas superficiais e subterrâneas através da infiltração de chorume, favorece o surgimento de vetores de doenças como moscas, mosquitos, baratas e ratos, e emite odores desagradáveis. Além disso, representam um grave problema social, pois atraem pessoas que buscam no lixo uma forma de sustento, frequentemente permanecendo na área e formando pequenas comunidades.

Figura 1 – Esquema ilustrativo de um lixão.



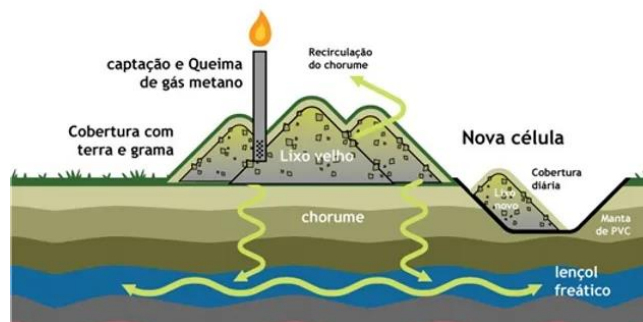
Fonte: Martins (2019).

Para Marques (2011), nos lixões, os resíduos são frequentemente descartados diretamente no solo, sem tratamento prévio, devido à simplicidade do método e ao baixo custo, apesar de serem um dos mais prejudiciais tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública.

3.2.2 Aterro controlado

O aterro controlado, conforme ilustrado na Figura 2, adota certos mecanismos para minimizar impactos negativos, como cercamento, controle de acesso, cobertura dos resíduos com solo, drenagem e queima de gases. No entanto, esses aterros carecem de algumas medidas essenciais, como a impermeabilização da base, o que pode resultar em contaminação do solo e do lençol freático (Duarte; Schoenell, 2024).

Figura 2 – Esquema ilustrativo de um aterro controlado.



Fonte: Martins (2019).

3.2.3 Aterro sanitário

A Figura 3 ilustra a definição de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos com base na norma NBR 8419 (ABNT, 1992).

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 (ABNT, 1992, p. 1).

Figura 3 – Esquema ilustrativo de um aterro sanitário.



Fonte: Martins (2019).

Segundo Elk (2007), é uma técnica eficiente e segura para destinação de resíduos sólidos, com controle rigoroso, boa relação custo-benefício, capaz de receber diferentes tipos de resíduos, e adaptável em qualquer comunidade, independentemente do seu tamanho.

Ainda de acordo com a norma NBR 8419 (ABNT, 1992), aterros sanitários não devem ser instalados em áreas suscetíveis a inundações. É necessário manter uma camada de pelo menos 1,5 m de solo insaturado entre a base do aterro e o nível mais alto do lençol freático, medido na época de maior incidência pluviométrica da região. O solo deve ser de baixa permeabilidade (argiloso).

3.3 CRITÉRIOS DA NORMA NBR 13896

Na norma NBR 13896 (ABNT, 1997), são abordados critérios relacionados ao projeto, instalação e operação de aterros de resíduos não perigosos. No item 4 da norma, são apresentadas diretrizes gerais para garantir que essas etapas sejam realizadas de maneira adequada, incluindo no subtópico 4.1 exigências específicas sobre a localização, conforme estabelecido o Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios para localização de um aterro sanitário de resíduos não perigosos.

a)	o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja minimizado
b)	a aceitação da instalação pela população seja maximizada
c)	esteja de acordo com o zoneamento da região
d)	possa ser utilizado por um longo espaço de tempo, necessitando apenas de um mínimo de obras para início da operação

Fonte: ABNT (1997).

No subtópico 4.1.1 da mesma norma estão especificados os critérios para a seleção da área destinada a aterros sanitários, destacando a necessidade de considerar, no mínimo, os fatores de análise indicados no Quadro 2 para avaliar a adequabilidade do local.

Quadro 2 – Critérios para avaliação da adequabilidade de um local para implantação de um aterro sanitário.

a)	topografia - esta característica é fator determinante na escolha do método construtivo e nas obras de terraplenagem para a construção da instalação. Recomendam-se locais com declividade superior a 1% e inferior a 30%
b)	geologia e tipos de solos existentes - tais indicações são importantes na determinação da capacidade de depuração do solo e da velocidade de infiltração. Considera-se desejável a existência, no local, de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 m
c)	recursos hídricos - deve ser avaliada a possível influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas próximas. O aterro deve ser localizado a uma distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso de água
d)	vegetação - o estudo macroscópico da vegetação é importante, uma vez que ela pode atuar favoravelmente na escolha de uma área quanto aos aspectos de redução do fenômeno de erosão, da formação de poeira e transporte de odores
e)	acessos - fator de evidente importância em um projeto de aterro, uma vez que são utilizados durante toda a sua operação
f)	tamanho disponível e vida útil - em um projeto, estes fatores encontram-se inter-relacionados e recomenda-se a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos
g)	custos - os custos de um aterro têm grande variabilidade conforme o seu tamanho e o seu método construtivo. A elaboração de um cronograma físico-financeiro é necessária para permitir a análise de viabilidade econômica do empreendimento
h)	distância mínima a núcleos populacionais - deve ser avaliada a distância do limite da área útil do aterro a núcleos populacionais, recomendando-se que esta distância seja superior a 500 m

Fonte: ABNT (1997).

3.4 LEI N° 12.305

A lei n° 12.305 (Brasil, 2010) que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispõe, em seus Artigos 18 e 19, que os municípios têm a obrigação de desenvolver Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Esses planos devem incluir diversos aspectos relacionados ao manejo adequado dos resíduos, conforme apresenta o Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios para localização de um aterro sanitário de resíduos não perigosos.

a)	diagnóstico da situação dos resíduos sólidos gerados no respectivo território, contendo a origem, o volume, a caracterização dos resíduos e as formas de destinação e disposição final adotadas
b)	identificação de áreas favoráveis para disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, observado o plano diretor de que trata o § 1° do art. 182 da Constituição Federal e o zoneamento ambiental, se houver
c)	identificação dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos, incluindo áreas contaminadas, e respectivas medidas saneadoras

Fonte: Brasil (2010).

3.5 TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Entre os procedimentos recomendados para reduzir os riscos ambientais associados à disposição de resíduos sólidos, destaca-se a escolha de locais adequados e com baixa vulnerabilidade a impactos ambientais negativos. Nesse contexto, metodologias vêm sendo elaboradas, tanto no Brasil quanto em outros países, com o objetivo de orientar a seleção de áreas que atendam aos requisitos ambientais e geotécnicos para a implantação de aterros sanitários.

Bortolatto e Ahlert (2012) apontam o geoprocessamento como uma técnica essencial para estudos e avaliações de áreas adequadas à implantação de aterros sanitários. Bezerra (2014) destaca o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) tanto na escolha de áreas adequadas para a instalação de unidades de recebimento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) quanto no monitoramento de seus produtos, como os percolados de efluentes.

Costa *et al.* (2006) afirmam que o uso de tecnologias como o Sistema de Informação Geográfica (SIG) auxilia nos trabalhos possibilitando uma organização adequada de áreas com risco ambiental, seja por influência das atividades humanas ou pelas transformações naturais do ambiente.

As geotecnologias são definidas como um conjunto de técnicas voltadas para a coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica, incluindo sistemas de informações geográficas, cartografia digital, sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global e topografia georreferenciada. Os produtos dessas técnicas são desenvolvidos por soluções de *hardware*, *software* e *peopleware* que juntos servem como ferramentas de apoio à tomada de decisão (Rosa, 2005).

3.5.1 Análise Multicritério

A análise multicritério é uma das ferramentas disponíveis para auxiliar na escolha de locais para a disposição final de resíduos sólidos urbanos.

Segundo Souza (2008), a análise de multicritérios é um sistema de suporte à decisão que combina vários critérios para hierarquizar alternativas de solução, ajudando gestores na tomada de decisão, especialmente quando um único critério não é suficiente para resolver o problema.

Na análise multicriterial, os diferentes critérios, por apresentarem valores que não são compatíveis entre si, precisam ser padronizados para permitir sua agregação. Esse processo ocorre pela atribuição de pesos, que representam a importância relativa de cada critério na

tomada de decisão (Calijuri; Melo; Lorentz, 2002).

Para Brans e Mareschal (2005 *apud* Briozo; Musetti, 2015), métodos multicritérios de tomada de decisão surgiram como ferramentas matemáticas de apoio, oferecendo eficácia na resolução de problemas onde há critérios conflitantes.

4 METODOLOGIA

O objetivo deste estudo foi identificar áreas adequadas e inadequadas para a instalação de um aterro sanitário no Município de Iguatu-CE, buscando otimizar custos financeiros, tempo e a integração de informações. Para isso, foram utilizados dados fornecidos por órgãos oficiais, que foram manipulados e processados em um ambiente de SIG.

O presente trabalho, sob o ponto de vista da sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada com objetivo de gerar mapas temáticos para aplicação prática dirigidos à identificação de áreas adequadas para a instalação do aterro sanitário. Quanto aos seus procedimentos, classifica-se como uma pesquisa operacional devido à utilização de métodos matemáticos, estatísticos e computacionais para auxiliar na tomada de decisão. O procedimento metodológico adotado para selecionar as áreas adequadas para a instalação do aterro sanitário seguiu as etapas descritas na Figura 4.

Figura 4 – Etapas do procedimento metodológico adotado.

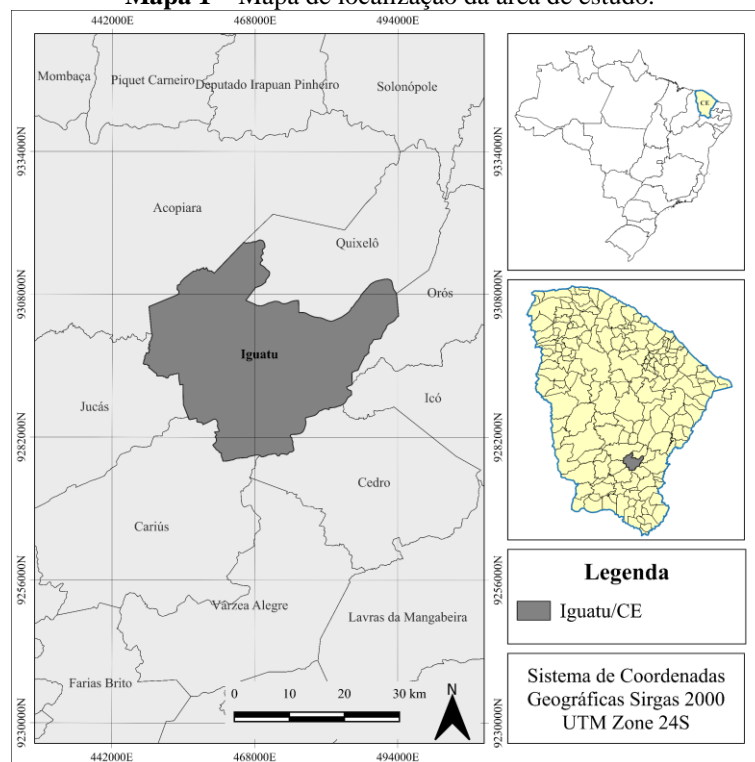


Fonte: Autoria Própria (2024).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no Município de Iguatu-CE, localizado na Região Nordeste do Brasil, na porção Centro-Sul do Estado do Ceará. Suas coordenadas UTM são 468.826,86 m E e 9.297.159,66 m S, abrangendo uma área de 971,07 km². O município faz parte da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, tem clima tropical quente semiárido e vegetação de caatinga arbustiva densa. De acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), sua população é de 98.064 habitantes, com uma densidade demográfica de 98,83hab/km². O Mapa 1 ilustra a localização da área de estudo.

Mapa 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

No município de Iguatu, os resíduos sólidos são coletados regularmente nas residências, por meio da coleta convencional. Posteriormente, os resíduos são destinados ao lixão, localizado no Bairro Chapadinha, em operação desde o ano de 1989. De acordo com Barbosa (2020), o lixão recebe diariamente cerca de 60 toneladas de resíduos sólidos, o que resulta em impactos negativos como a poluição ambiental e visual, além da degradação da área e do lençol freático, devido ao acúmulo de resíduos provenientes de fontes domésticas, comerciais e industriais. A Figura 5 apresenta o lixão municipal de Iguatu que está às margens da CE 284.

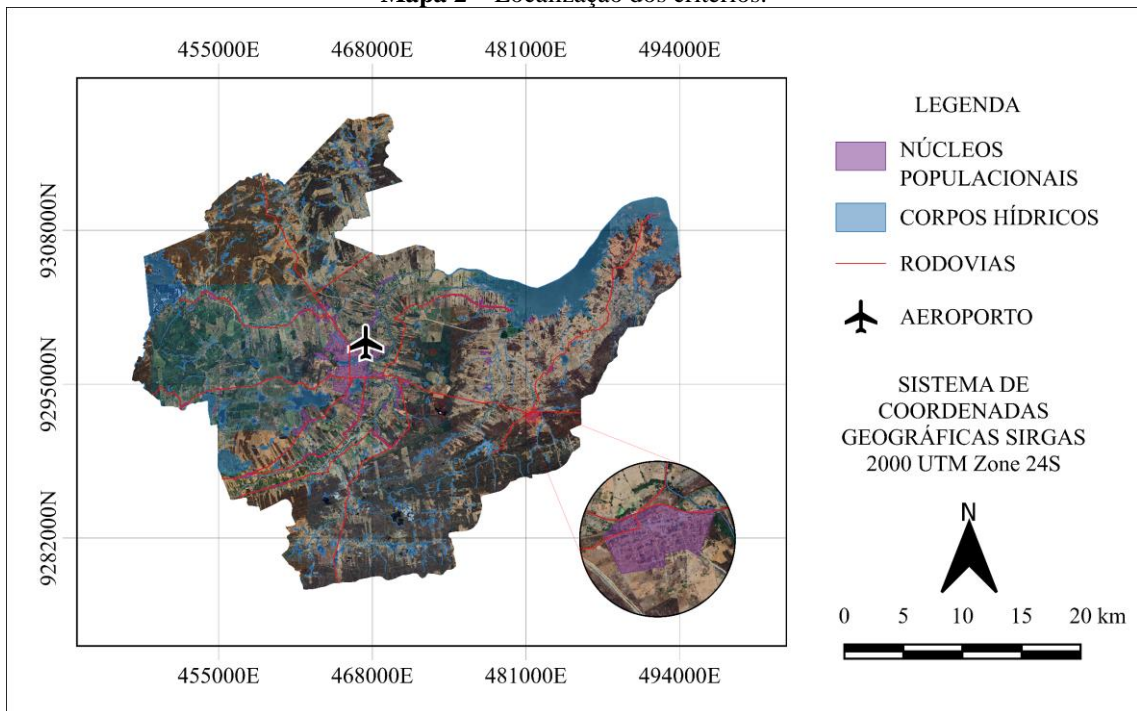
Figura 5 – Lixão municipal de Iguatu/CE.



Fonte: Belém (2020).

Suas principais rodovias (CE-060, CE-282, CE-375, CE-378, CE-481, CE-482, BR-122 e BR-404), o Aeroporto Dr. Francisco Tomé da Frota, seus principais corpos hídricos e sua área urbanizada estão ilustrados no Mapa 2.

Mapa 2 – Localização dos critérios.



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.2 ESTIMATIVA DA ÁREA TOTAL DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

Para estimar a área necessária para a disposição dos resíduos, foi preciso definir o horizonte do projeto e calcular a população final prevista da área de estudo para o ano de referência (Pop_f), que neste trabalho considerar-se-á 20 anos. Para esse cálculo, utiliza-se a Equação 1.

$$Pop_f = P_0 \cdot (1 + d)^t \quad (1)$$

onde P_0 é a população atual, d é a taxa de crescimento anual e t o tempo em anos.

Conforme a ABREMA (2023), a geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos na Região Nordeste do Brasil é de 0,950 kg por habitante por dia. Com base na população projetada e na taxa de geração *per capita*, foi calculada a quantidade de lixo (em toneladas) que será produzida para cada ano do projeto, utilizando a Equação 2.

$$RSU_{ano} = \frac{Pop_{ano} \cdot 0,950 \cdot 365}{1000} \quad (2)$$

onde Pop_{ano} é a população estimada para o ano em questão.

Segundo Haddad (1994 *apud* Santos; Girardi, 2007) a massa específica do lixo compactado varia entre 0,5 a 0,7 ton/m³. Assim, considerando o cenário mais crítico, o volume de resíduos gerados durante o projeto pode ser determinado pela Equação 3.

$$V(RSU)_{total} = \frac{RSU_{total}}{0,7} \quad (3)$$

onde RSU_{total} é a soma de toda a quantidade de lixo produzida durante os 20 anos.

A área mínima requerida para o aterro sanitário, em hectares, foi calculada com base na Equação 4, onde h corresponde à altura máxima de empilhamento dos resíduos.

$$A_{mínima} = \frac{V(RSU)_{total}}{h \cdot 10000} \quad (4)$$

4.3 CONSTRUÇÃO DE BANCO DE DADOS

Para a realização deste estudo foi necessária a criação de uma base de dados digital georreferenciada para a realização das atividades. As informações para elaboração dos mapas de restrições são coletadas nas plataformas mencionadas no Quadro 4. Todo o processo de tratamento de dados e produção de mapas temáticos foi realizado através do *software* QGIS 3.34.10.

Quadro 4 – Localização dos dados geográficos obtidos para confecção dos mapas.

Tipo de dados	Fonte dos dados	Sites
<i>Shapefile</i> de corpos d'água, drenagem, áreas urbanizadas e estradas pavimentadas	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE	http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/interface/gm.phtml
<i>Shapefile</i> dos limites dos municípios	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html
<i>Shapefile</i> dos aeroportos	Ministério dos Transportes	https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-mapas
Modelo Digital de Elevação	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE	http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.4 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DAS ÁREAS DE ATERRO SANITÁRIO

Nesta etapa, foi realizado um levantamento dos critérios para identificar áreas adequadas para a instalação de aterros sanitários. Esse levantamento baseou-se na norma NBR 13896 (ABNT, 1997), além da portaria n° 906/GC5 do Ministério da Defesa (Brasil, 2010) e do Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do IBAM (2001). O objetivo foi selecionar os critérios e subcritérios mais relevantes e comumente utilizados atualmente. Os critérios e seus respectivos fatores levantados nesta etapa da pesquisa estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Critérios para Instalação do Aterro Sanitário.

Critério	Recomendações	Referência
Topografia	Recomendam-se locais com declividade superior a 1% e inferior a 30%	NBR 13896
Recursos hídricos	Distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso de água	NBR 13896
Tamanho disponível e vida útil	Possibilidade de expansão do aterro, garantindo uma vida útil mínima de 10 anos	NBR 13896
Distância mínima a núcleos populacionais	Recomenda-se que esta distância seja superior a 500 m	NBR 13896
Segurança Aeroportuária	Distância em um raio de 9 quilômetros de aeroportos	Portaria n° 906/GC5
Acessos	O acesso ao terreno deve ser pavimentado, sem rampas íngremes ou curvas acentuadas, para evitar o desgaste dos veículos coletores e garantir acesso livre, mesmo durante chuvas	Manual IBAM

Fonte: Autoria Própria (2024).

Considerando os elementos apresentados, os critérios descritos no Quadro 6 foram adotados para a escolha das áreas adequadas à implantação do aterro sanitário.

Quadro 6 – Critérios utilizados para a seleção das áreas de aterro sanitário.

Critério	Recomendado	Adotado
Declividade	Superior a 1% e inferior a 30%	Superior a 1% e inferior a 15%
Distância mínima de qualquer coleção hídrica ou curso de água	200 m	200 m
Vida útil mínima do aterro	10 anos	20 anos
Distância mínima a núcleos populacionais	500 m	2 km
Distância mínima de aeroportos	9 km	9 km
Distância mínima da localização de rodovias e estradas de acesso	-	100 m

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.5 GEOPROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES

O *software* utilizado foi o QGIS versão 3.34.10 para manipulação dos dados e informações e geração dos mapas temáticos. Nesta etapa, primeiramente foi definido o Sistema de Referência de Coordenadas - SRC do projeto, o qual foi adotado o SIRGAS 2000, Zona 24S que contempla a área de estudo. Para o tratamento dos arquivos *shapefiles* e seleção dos dados apenas para a área de estudo em questão foi feita a intersecção de todas as camadas vetoriais com a camada do limite da área do Município de Iguatu-CE. Após esse processo, os dados que se encontravam com projeções distintas a definida no projeto, foram convertidos para a projeção cartográfica UTM com *Datum* SIRGAS 2000 Zona 24S.

O Modelo Digital de Elevação - MDE contendo dados de altitude do terreno também foi reprojetoado para o SRC de projeto, em seguida, para delimitar os dados presentes na área de estudo, foi realizado o recorte do próprio, utilizando a camada referente aos limites territoriais do município. Logo, utilizando a função declividade foi gerado uma imagem *raster* contendo os valores de declividade do terreno expressos em porcentagem.

Adiante, todas as camadas de feições vetoriais foram convertidas em imagens *raster*, resumindo esses arquivos em uma única imagem binária, onde os valores 1 correspondem a feições encontradas na camada vetorial e os valores 0 referem-se às áreas sem feições. Essa conversão para arquivos *raster* é necessária pois permite o tratamento dos dados pela Análise Multicritério e a classificação das regiões em vários níveis, ao contrário dos dados vetoriais, onde esta classificação estaria restringida somente para duas categorias, a áreas adequadas e não adequadas.

Em seguida, utilizando a ferramenta de processamento proximidade (distância *raster*)

foram criadas camadas *raster* de proximidade para os critérios relacionados a proximidade (rodovias pavimentadas) e afastamento (de corpos hídricos, centros urbanos e aeroportos). Esse processo resulta em um *buffer* estilizável para cada camada, permitindo alterar os valores máximo e mínimo de cada *pixel* criando um intervalo de distância para estudo.

Através da calculadora *raster* foi criado uma única imagem *raster* contendo todas as áreas restritas à implantação do aterro sanitário utilizando os valores de acordo com o Quadro 7. Ao final do processo foi gerado uma imagem binária, onde os valores 1 correspondem às regiões proibidas que não podem em hipótese nenhuma receber o aterro sanitário e os valores 0 referem-se às áreas possíveis para implantação.

Quadro 7 – Áreas proibidas para implantação de aterros sanitários.

Critério	Área Proibida
Declividade	Superior a 15%
Distância de qualquer coleção hídrica ou curso de água	Inferior a 200 m
Distância a núcleos populacionais	Inferior a 2 km
Distância de aeroportos	Inferior a 9 km

Fonte: Autoria Própria (2024).

Por fim, foi utilizado a ferramenta *r.reclass* que permite reclassificar uma camada *raster* de entrada e criar uma camada de mapa de saída. As camadas de entrada utilizadas neste processo foram as imagens *raster* de proximidade e os índices atribuídas para cada classe são apresentadas no Quadro 8.

Por fim, foi utilizado a ferramenta *r.reclass* que permite reclassificar uma camada *raster* de entrada e criar uma camada de mapa de saída. Esses mapas foram reclassificados segundo um processo distinto de atribuição de índices para a realização da análise multicritério. A nota atribuída varia de 0 a 10 (zero a dez), em que zero representa a menor aptidão e dez a melhor. O Quadro 8 apresenta os índices atribuídos para cada classificação.

Quadro 8 – Classificação dos critérios e seus respectivos índices.

Critério	Classes	Classificação	Índices
Corpos hídricos	Água	Imprópria	0
	0 – 200 m	Imprópria	0
	200 – 500 m	Desfavorável	5
	500 – 1000 m	Regular	7
	Acima de 1000 m	Propícia	10
Declividade	Inferior a 1%	Imprópria	0
	Superior a 15%	Imprópria	0
	Entre 10% e 15%	Desfavorável	5
	Entre 5% e 10%	Regular	7
	Entre 1% e 5%	Propícia	10

Critério	Classes	Classificação	Índices
Núcleos populacionais	Até 2 km	Imprópria	0
	Entre 2 km e 5 km	Regular	7
	Entre 5 km e 10 km	Propícia	10
	Acima de 10 km	Desfavorável	5
Rodovias	Acima de 500 m	Desfavorável	5
	Entre 100 m e 500 m	Regular	7
	Até 100 m	Propícia	10
Aeroportos	Até 9 km	Imprópria	0
	Acima de 9 km	Propícia	10

Fonte: Autoria Própria (2024).

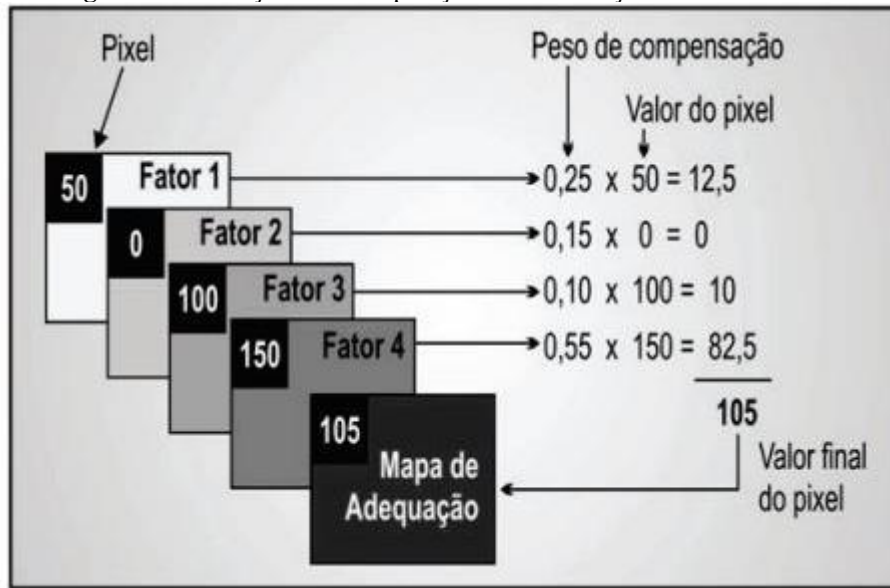
4.6 APLICAÇÃO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Conforme Malczewski (2000 *apud* Carvalho, 2017), diversos métodos têm sido empregados para a integração de critérios utilizando a abordagem multicritério, entre eles destacam-se a Combinação Linear Ponderada (método utilizado no presente trabalho) e a Média Ponderada Ordenada.

Para Voogd (1983 *apud* Valente; Vettorazzi, 2005), na Combinação Linear Ponderada, os fatores são convertidos para uma mesma escala numérica, recebem pesos específicos e são integrados por meio de uma média ponderada.

Na Figura 6 é apresentada a operação da Combinação Linear Ponderada, com quatro critérios de entrada em formato *raster*, sendo que cada critério possui um peso (influência). Uma vez que os mapas de critérios (fatores e restrições) tenham sido gerados, é uma simples questão de multiplicar cada célula ou pixel, de cada mapa pelo seu peso, e então somar os resultados.

Figura 6 – Ilustração de uma operação de Combinação Linear Ponderada.



Fonte: Sartori, Silva e Zimback (2012).

Para aplicação desse método no QGIS, utiliza-se a calculadora *raster* através da aplicação da Equação 5.

$$(P_1 \cdot C_1 + P_2 \cdot C_2 + P_3 \cdot C_3 + P_4 \cdot C_4 + P_5 \cdot C_5) \cdot (R_{proibições} \neq 1) \cdot R_{limites} \quad (5)$$

Onde:

P_n é o peso definido para o critério;

C_n é a imagem *raster* gerada para cada critério;

$R_{proibições}$ é a imagem *raster* gerada para as áreas proibidas;

$R_{limites}$ é a imagem *raster* com os limites territoriais do município.

No presente trabalho, todos critérios foram considerados com o mesmo grau de importância. A ordem e os pesos atribuídos para cada critério estão apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Valores utilizados para pesos e critérios.

Ordem	Peso	Critério
1	20%	Afastamento de corpos hídricos
2	20%	Afastamento de núcleos populacionais
3	20%	Afastamento de aeroportos
4	20%	Proximidade a rodovias
5	20%	Declividade

Fonte: Autoria Própria (2024).

Através do cálculo da Combinação Linear Ponderada do índice de cada pixel, foram definidas as classes com as variações dos índices para determinar as áreas adequadas e inadequadas a inserção do aterro sanitário.

As áreas com índices resultantes entre 8 até 10 foram classificadas como propícias, de 6 até 8, como regulares, entre 4 até 6, desfavoráveis, e de 0 até 4, como áreas impróprias a implantação do aterro.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Conforme dados do IBGE (2022), a população estimada para o Município de Iguatu/CE em 2024 é de 102.251 habitantes. Com base em uma projeção de 20 anos e uma taxa de crescimento anual de 0,13%, a população futura será determinada pela Equação 1. A partir dessas informações, foi estimada a quantidade de resíduos gerados para cada ano de operação do projeto (Equação 2). Ao término da vida útil do aterro, em 2044, o município terá gerado um total de 718.870,21 toneladas de resíduos sólidos urbanos, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa da população e da geração de RSU do Município de Iguatu-CE.

Ano	População	RSU (t)	RSU Acumulado (t)
2025	102.384	35.501,63	35.501,63
2026	102.517	35.547,78	71.049,41
2027	102.650	35.593,99	106.643,40
2028	102.784	35.640,26	142.283,66
2029	102.917	35.686,60	177.970,25
2030	103.051	35.732,99	213.703,24
2031	103.185	35.779,44	249.482,68
2032	103.319	35.825,95	285.308,64
2033	103.454	35.872,53	321.181,16
2034	103.588	35.919,16	357.100,33
2035	103.723	35.965,86	393.066,18
2036	103.858	36.012,61	429.078,80
2037	103.993	36.059,43	465.138,22
2038	104.128	36.106,31	501.244,53
2039	104.263	36.153,24	537.397,77
2040	104.399	36.200,24	573.598,02
2041	104.534	36.247,30	609.845,32
2042	104.670	36.294,43	646.139,75
2043	104.806	36.341,61	682.481,36
2044	104.943	36.388,85	718.870,21

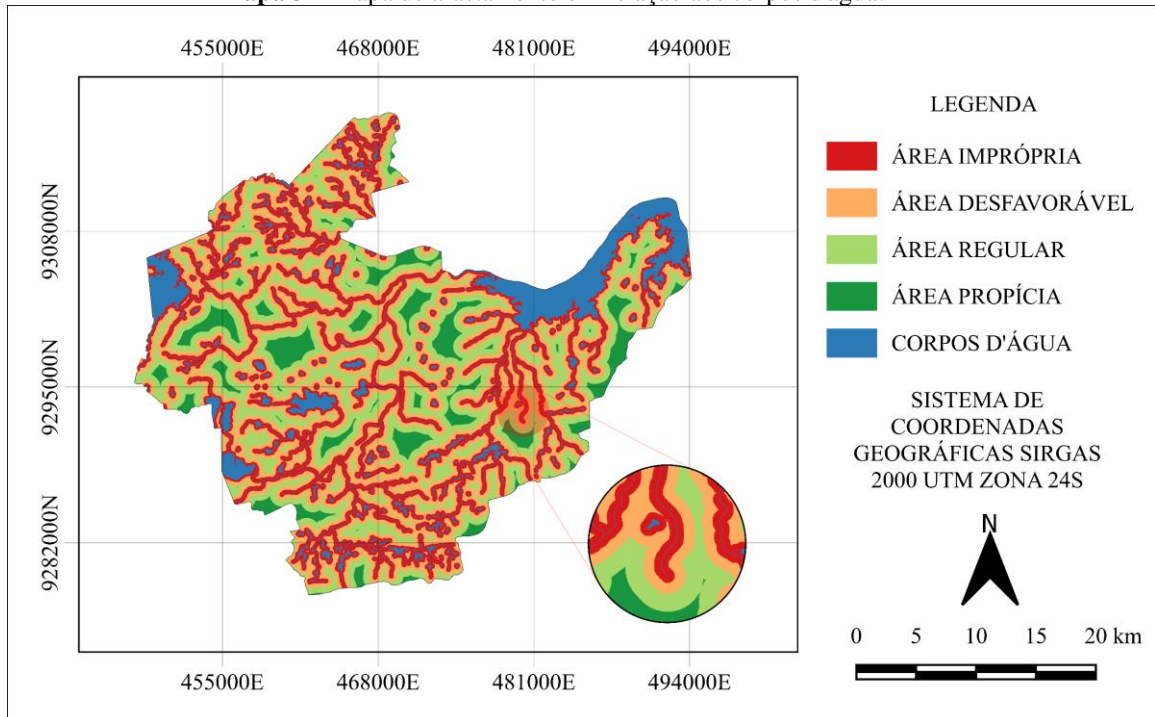
Fonte: Autoria Própria (2024).

Considerando a massa específica de resíduos sólidos compactados de 0,7 ton/m³, o volume total de resíduos a ser depositado no aterro será de 1.026.957,44 m³ (Equação 3). Em seguida, considerando uma altura máxima (h) de 6 metros para o empilhamento dos resíduos, conforme sugerido por Carrilho, Candido e Souza (2018), foi calculada a área mínima necessária de 17,12 hectares (Equação 4) para o aterro sanitário.

Para a criação dos mapas base apresentados, foi utilizada a ferramenta *r.reclass* do QGIS. No mapa de distâncias em relação aos corpos hídricos, foram empregados arquivos

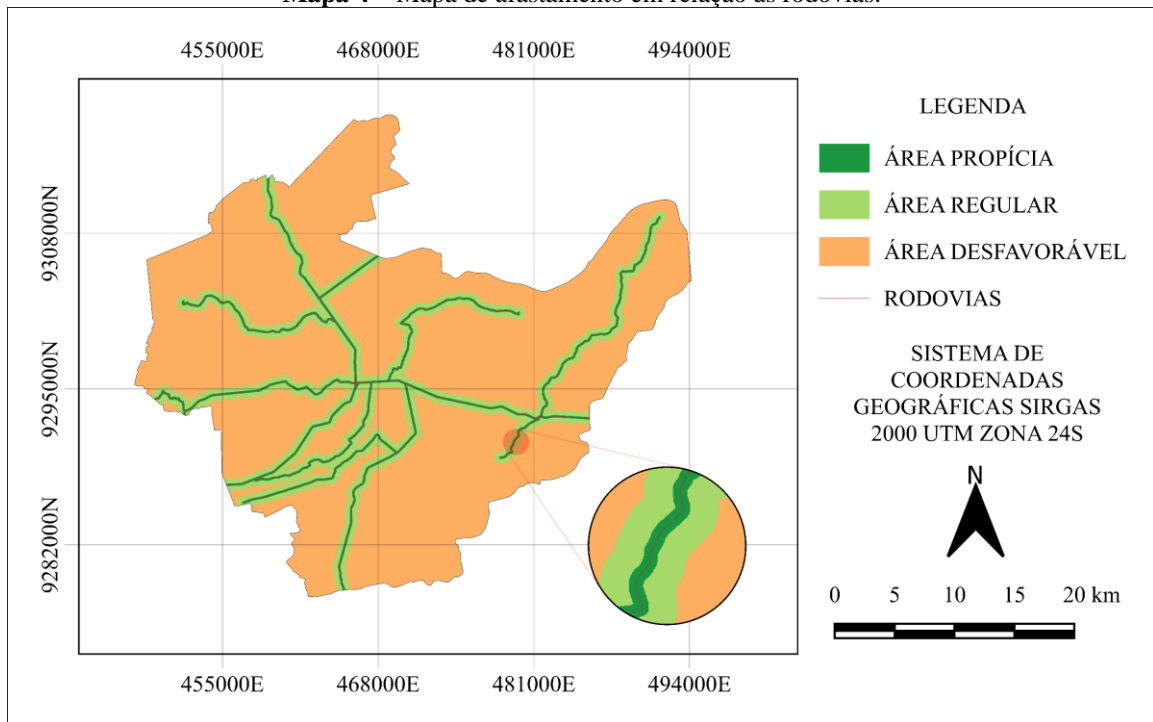
shapefiles que contêm as drenagens e os corpos d'água presentes no município. Áreas situadas a mais de 200 metros dos corpos hídricos estão dentro dos limites legais para implantação, no entanto, áreas entre 200 e 500 metros foram classificadas como desfavoráveis devido à sua proximidade com a área proibida, entre 500 e 1000 metros como regulares, e acima de 1000 metros como propícias por garantir um distanciamento mais seguro devido ao seu maior afastamento dos corpos hídricos, conforme exemplificado no Mapa 3.

Mapa 3 – Mapa de afastamento em relação aos corpos d'água.



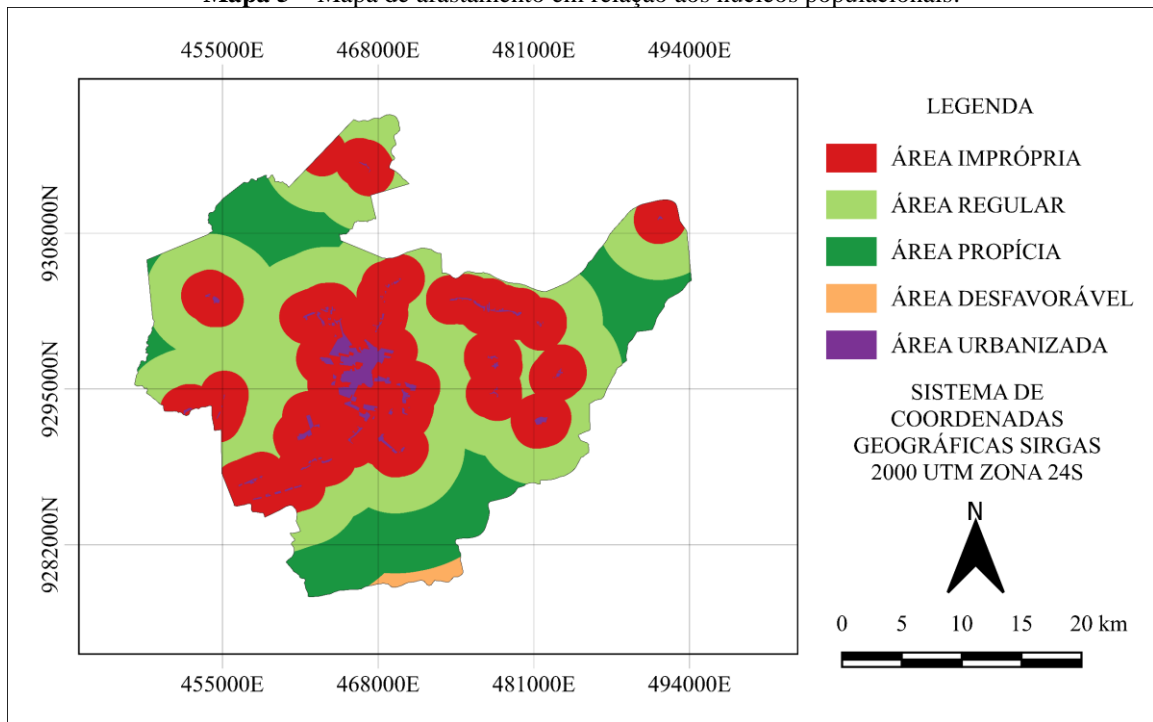
Fonte: Autoria Própria (2024).

Na elaboração do mapa de distanciamento das rodovias mostrado no Mapa 4, verificou-se que o município é atravessado por trechos de 8 rodovias: CE-060, CE-282, CE-375, CE-378, CE-481, CE-482, BR-122 e BR-404. A partir dessa informação, foram consideradas propícias as áreas localizadas até 100 metros da margem das rodovias pois essas áreas ficam mais próximas dos acessos pavimentados o que facilita o transporte dos resíduos sólidos, enquanto aquelas entre 100 e 500 metros foram classificadas como regulares. Áreas além de 500 metros foram classificadas como desfavoráveis devido à maior dificuldade de acesso, principalmente em épocas de elevada precipitação o que pode comprometer o transporte desses resíduos.

Mapa 4 – Mapa de afastamento em relação às rodovias.

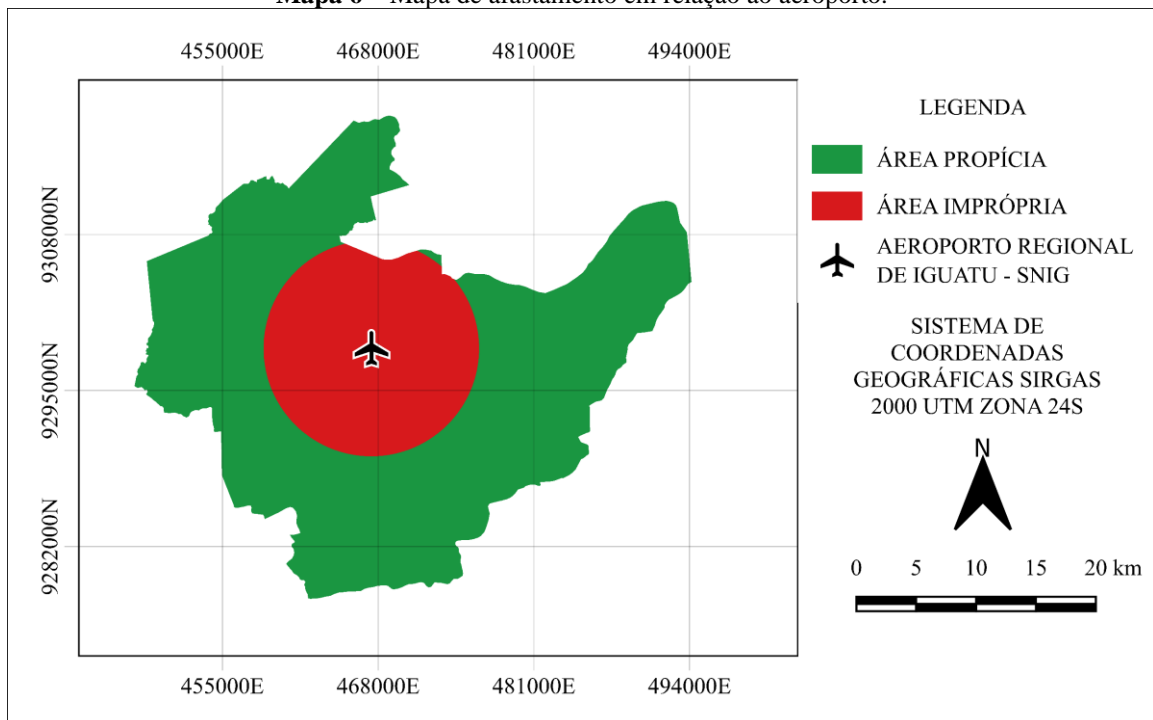
Fonte: Autoria Própria (2024).

Na concepção do mapa de distanciamento da zona urbana mostrado no Mapa 5, foram definidas quatro categorias de classificação. Áreas localizadas em um raio de até 2 km da zona urbana foram consideradas impróprias devido à proximidade com os centros populacionais, enquanto aquelas a mais de 10 km foram classificadas como desfavoráveis pela distância da zona de coleta o que pode acarretar um maior custo de operação. As áreas ideais para a implantação do aterro foram classificadas como propícias, entre 5 e 10 km por manter uma distância equilibrada para evitar possíveis impactos ao núcleo urbano e um custo de operação aceitável, e regulares, entre 2 e 5 km da zona urbana.

Mapa 5 – Mapa de afastamento em relação aos núcleos populacionais.

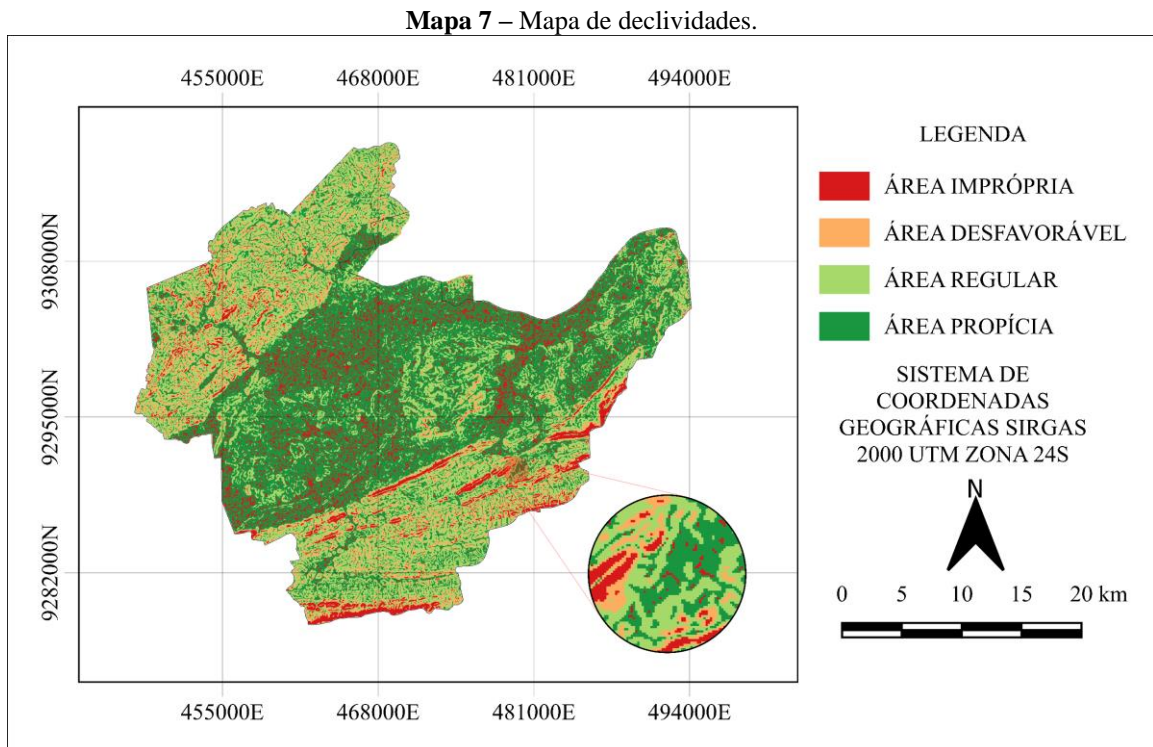
Fonte: Aatoria Própria (2024).

Na construção do mapa de distanciamento de aeroportos mostrado no Mapa 6, foi aplicada a restrição do Ministério da Defesa, que estabelece um raio mínimo de 9 km a partir dos aeroportos. Dessa forma, áreas dentro desse raio foram classificadas como impróprias, enquanto aquelas além desse limite foram consideradas propícias.

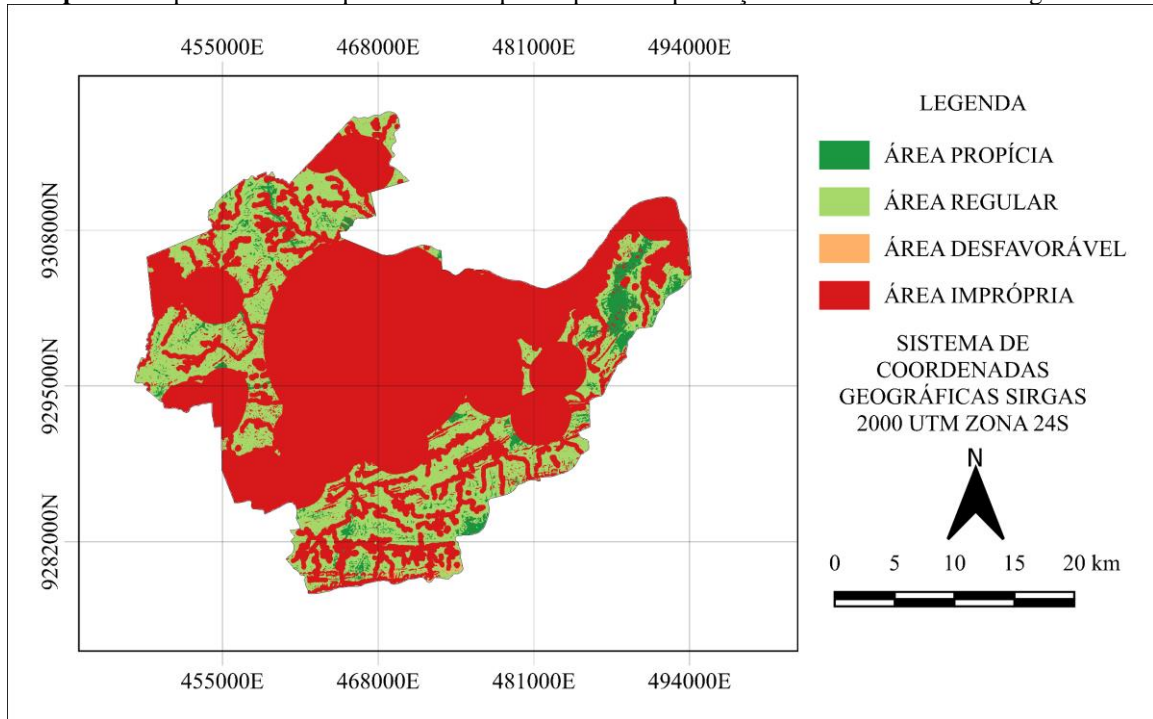
Mapa 6 – Mapa de afastamento em relação ao aeroporto.

Fonte: Aatoria Própria (2024).

Na criação do mapa de declividades mostrado no Mapa 7, foram definidas quatro categorias. Áreas com declividades inferiores a 1% e superiores a 15% foram classificadas como impróprias, enquanto as com declividade entre 1% e 5% foram consideradas propícias devido ao menor custo para a execução do serviço de terraplenagem na sua implantação. Áreas com declividade entre 5% e 10% foram classificadas como regulares, e aquelas com inclinação entre 10% e 15% foram avaliadas como desfavoráveis, pois demandam um maior custo para implantação.



Por fim, após a integração dos mapas base, foi elaborado o mapa que indica as áreas adequadas e inadequadas para a instalação do aterro sanitário, conforme ilustrado no Mapa 8.

Mapa 8 – Mapa de áreas adequadas e inadequadas para a implantação do aterro sanitário em Iguatu-CE.

Fonte: Autoria Própria (2024).

As áreas propícias foram consideradas adequadas ou ideais para a implantação do aterro, enquanto as áreas regulares foram vistas como aceitáveis para a instalação. Territórios classificados como desfavoráveis foram considerados não recomendados, e áreas caracterizadas como impróprias foram vistas como inadequadas e desconsideradas para a instalação do aterro.

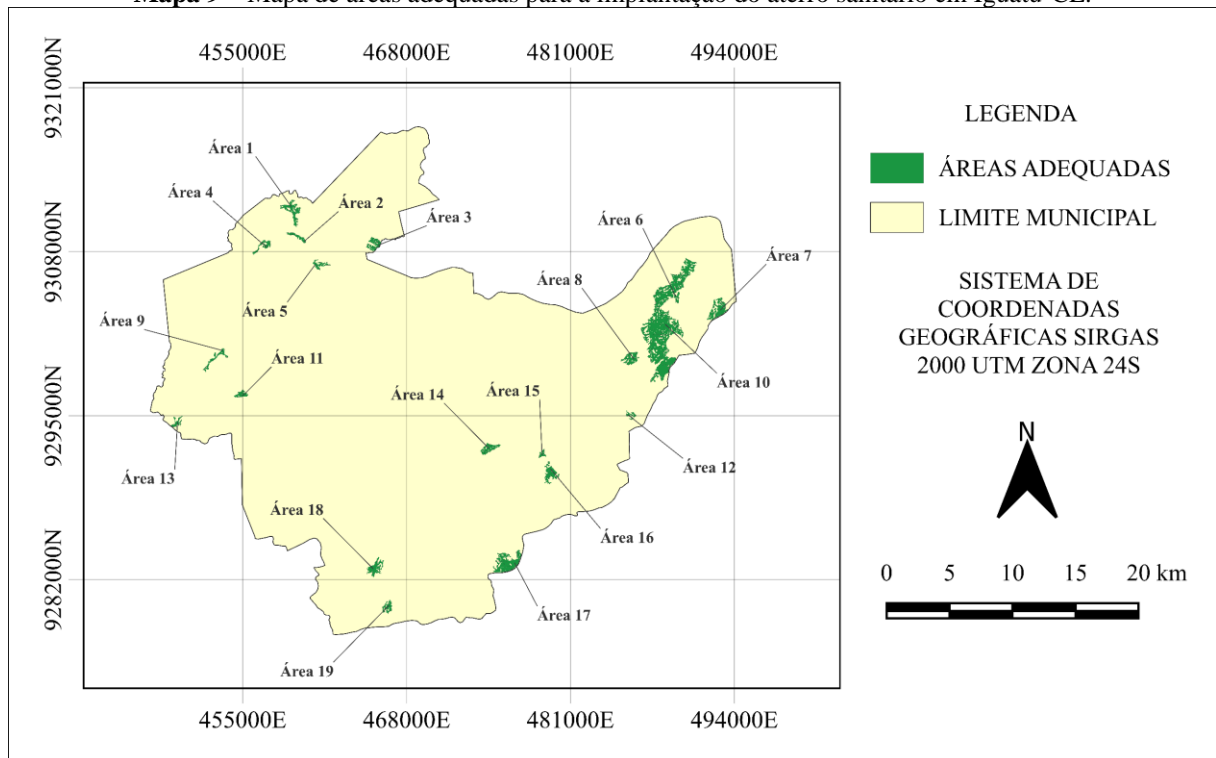
A Tabela 2 traz os valores das áreas geradas para cada classificação e sua porcentagem em relação a área total do Município de Iguatu-CE.

Tabela 2 – Valores representativos do mapa de áreas adequadas e inadequadas de acordo com sua classificação.

Mapa	Classificação	Área (km ²)	Área (%)
Áreas adequadas e inadequadas para a implantação do aterro sanitário em Iguatu-CE	Propícia	30,80	3,17
	Regular	235,69	24,27
	Desfavorável	0,93	0,10
	Imprópria	703,65	72,46

Fonte: Autoria Própria, 2024.

Após desconsiderar os locais que não possuíam área mínima de 17,12 ha para a implantação do aterro sanitário, foram encontradas 19 áreas adequadas para sua instalação como mostra o Mapa 9.

Mapa 9 – Mapa de áreas adequadas para a implantação do aterro sanitário em Iguatu-CE.

Fonte: Autoria Própria, 2024.

A Tabela 3 traz os valores de cada área disponível para a implantação do aterro sanitário.

Tabela 3 – Valores utilizados para pesos e critérios.

Área	Área (km ²)	Área (ha)
1	0,89	89,29
2	0,30	30,10
3	0,57	57,45
4	0,39	39,33
5	0,33	33,33
6	0,20	20,06
7	1,13	112,65
8	0,70	70,43
9	0,46	45,80
10	11,32	1131,89
11	0,32	31,81
12	0,19	19,34
13	0,27	26,56
14	0,59	59,34
15	0,18	17,72
16	0,78	77,95
17	1,84	184,19
18	0,78	77,75
19	0,40	40,27

Fonte: Autoria Própria (2024).

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados do estudo, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) mostrou uma ferramenta eficaz e útil para a seleção de áreas, permitindo uma análise rápida e precisa dos dados disponíveis. A integração da análise multicritério, fundamentada em normas legais, com o uso do SIG permitiu a redução da área total do município disponível para a implantação de aterros de aproximadamente 971,07 km² para 30,80 km², sendo que a área mínima requerida era de 0,17 km², no Município de Iguatu, Ceará.

Os resultados alcançados no presente estudo poderão servir de subsídio tanto à equipe técnica da administração pública municipal quanto àquela encarregada da implantação de um aterro sanitário municipal, uma vez que as informações foram processadas de forma objetiva e com base em critérios técnicos específicos, em conformidade com a legislação ambiental vigente nas esferas federal e estadual.

A gestão sustentável é essencial para equilibrar o desenvolvimento econômico, a preservação ambiental e o bem-estar social, especialmente diante do crescente volume de resíduos gerado pela urbanização. A seleção adequada de áreas para a implantação de um aterro sanitário no Município de Iguatu é crucial para minimizar impactos negativos, como contaminação do solo e da água, além de proteger comunidades. Nesse sentido, o uso de ferramentas de geoprocessamento permitiu analisar diversos critérios técnicos, ambientais e sociais, identificando locais ideais para esses empreendimentos com base em dados espaciais e ambientais.

O geoprocessamento também promove transparência e engajamento público, possibilitando que as decisões sejam compreendidas pelas partes interessadas e ganhem maior aceitação social. Assim, a pesquisa que utiliza essas ferramentas na escolha de áreas para aterros sanitários contribui para práticas de gestão de resíduos mais eficientes e ambientalmente responsáveis, reafirmando o compromisso com o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos para as futuras gerações.

Em conclusão, verifica-se que o estudo proporcionou uma contribuição significativa para a identificação de áreas propícias para a instalação de aterros sanitários no Município de Iguatu-CE. Todavia, considerando que o escopo do trabalho se restringiu à utilização de ferramentas de geoprocessamento, pautadas nos critérios estabelecidos no Quadro 7, recomenda-se a realização de estudos complementares aprofundados, englobando as áreas de geologia, geomorfologia, hidrogeologia, pedologia e topografia, nas zonas selecionadas

preliminarmente, com o intuito de atender às normativas em vigor e determinar a localização mais adequada para a implantação do aterro.

Ademais, será entregue um ofício à Secretaria de Infraestrutura do Município de Iguatu, formalizando os resultados obtidos. Ressalta-se, ainda, que a metodologia aplicada neste estudo apresenta potencial para ser replicada em outros municípios que se encontrem em situações semelhantes, contribuindo para a identificação de áreas apropriadas para aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ALVES, Nathália Ferreira. **Identificação de áreas para a implantação de aterro sanitário na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba com a utilização de geotecnologias**. 2019. 116 p. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE-ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABREMA, 2023.

BARBOSA, Honório. Lixão gera poluição e compromete a saúde pública em Iguatu. **Diário do Nordeste**, 18 nov. 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/lixao-gera-poluicao-e-compromete-a-saude-publica-em-iguatu-1.3012743>. Acesso em: 19 nov. 2024.

BELÉM, Wandenberg. Lixão gera poluição e compromete a saúde pública em Iguatu. **Diário do Nordeste**, 18 nov. 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/lixao-gera-poluicao-e-compromete-a-saude-publica-em-iguatu-1.3012743>. Acesso em: 19 nov. 2024.

BEZERRA, João Paulo Peres. Gestão de resíduos sólidos e geotecnologias: considerações elementares. *In*: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 10, 2014, [s. l.]. **Anais [...]**. [s. l.]: ANAP, 2014. p. 75-91.

BORTOLATTO, Glauco Rodrigo; AHLERT, Siclério. Geotecnologias para a escolha de um local para possível construção de um aterro sanitário em Bento Gonçalves, RS. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3, 2012, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 5.

BRASIL. Portaria nº 906/GC5, de 22 de dezembro de 2010. Estabelece o Plano Básico de Gerenciamento de Risco Aviário - PBGRA e dispõe sobre as ações dos Órgãos do Comando da Aeronáutica visando à eliminação ou mitigação do risco aviário à operação de aeronaves. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 2010. Seção 1, p. 55.

BRIOZO, Rodrigo Amancio; MUNETTI, Marcel Andreotti. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 805-819, dez. 2015.

CALIJURI, Maria Lúcia; MELO, André Luis de Oliveira; LORENTZ, Juliana Ferreira. Identificação de áreas para implantação de aterros sanitários com uso de análise estratégica de decisão. **Informática Pública**, Belo Horizonte-MG, v. 4, n. 2, p. 231-250, dez. 2002.

CARRILHO, Atalanta Nayara; CANDIDO, Humberto Gois; SOUZA, Amilton Diniz. Geoprocessamento aplicado na seleção de áreas para a implantação de aterro sanitário no município de Conceição das Alagoas (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 201-206, jan./fev. 2018.

CARVALHO, Renei Rocha de. **Aplicação de análise multicritério em ambiente de geoprocessamento no estudo de áreas para implantação de aterros sanitários - Área Sul da RIDE/DF e Entorno**. 2017. 141 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

COSTA, Fabiane Hilario dos Santos; PETTA, Reinaldo Antônio; LIMA, Raquel Franco de Souza; MEDEIROS, Cleyber Nascimento de. Determinação da vulnerabilidade ambiental na Bacia Potiguar, região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 2, p. 119-127, ago. 2006.

CRESPO, Daniel Pizarro. **Estudo de viabilidade ambiental para implantação do aterro sanitário de Canaã dos Carajás**. 2006. 39 f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

DUARTE, Pedro Alves; SCHOENELL, Elisa Kerber. **Encerramento de lixão e aterro controlado: orientações e alertas**. Brasília: CNM, 2024. 82 p.

ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira Van. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL-IBAM. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Brasil, Ceará, Iguatu**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/iguatu/panorama>. Acesso em: 16 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Geociências, organização do território, malhas territoriais, malha municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 16 set. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ-IPECE. **Ceará**

em mapas interativos. Disponível em:

<http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/interface/gm.phtml>. Acesso em: 16 set. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE. **Topodata, acesso.**

Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 16 set. 2024.

LOURENÇO, Roberto Wagner; SILVA, Darllan Collins da Cunha e.; SALES, Jomil Costa Abreu; MEDEIROS, Gerson Araujo de; OTERO, Rafael Arosa ProI. Metodologia para seleção de áreas aptas à instalação de aterros sanitários consorciados utilizando SIG. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 122-140, set-dez. 2015.

MARQUES, Marília Daher. **Seleção de área para implantação de aterro sanitário**

simplicado: estudo de caso para município de Guapó – GO. 2011. 63 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiania-GO, 2011.

MARTINS, Caroline. **Entenda as diferenças entre lixão, aterro controlado e aterro**

sanitário. 2019. Disponível em: [https://www.trilhoambiental.org/post/entenda-as-](https://www.trilhoambiental.org/post/entenda-as-diferen%C3%A7as-entre-lix%C3%A3o-aterro-controlado-e-aterro-sanit%C3%A1rio)

[diferen%C3%A7as-entre-lix%C3%A3o-aterro-controlado-e-aterro-sanit%C3%A1rio](https://www.trilhoambiental.org/post/entenda-as-diferen%C3%A7as-entre-lix%C3%A3o-aterro-controlado-e-aterro-sanit%C3%A1rio). Acesso em: 19 nov. 2024.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Mapas nacionais e bases georreferenciadas.**

Disponível em: [https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-](https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-mapas)
[mapas](https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-mapas). Acesso em: 16 set. 2024.

NÚCLEO SUDESTE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM

SANEAMENTO AMBIENTAL-NUCASE. **Resíduos sólidos:** projeto, operação e

monitoramento de aterros sanitários. Guia do profissional em treinamento - Nível 2. Belo Horizonte: RECESA, 2008. 120 p.

PEREIRA, Eduardo Vinícius. **Resíduos sólidos.** 1. ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo,

2019. 310 p.

ROSA, Roberto. Geotecnologias na Geografia aplicada. **Revista do Departamento de**

Geografia da USP, São Paulo, v. 16, p. 81-90, mar. 2005.

SANTOS, Juliana Silveira dos; GIRARDI, Alessandro Gonçalves. Utilização de

geoprocessamento para localização de áreas para aterro sanitário no município de Alegrete-

RS. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007,

Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: INPE, 2007. p. 5491-5498.

SARTORI, Anderson Antônio da Conceição; SILVA, Ramon Felipe Bicudo da; ZIMBACK,

Célia Regina Lopes. Combinação linear ponderada na definição de áreas prioritárias à

conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.

36, n. 6, p. 1079-1090, dez. 2012.

SOUZA, Sônia. **Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas potenciais à**

degradação da qualidade da água. 2008. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso

(Especialista em Geoprocessamento) - Departamento de Cartografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

TSUHAKO, Edson Mitsuhide. **Seleção preliminar de locais potenciais à instalação de aterros sanitários na sub-bacia da represa de Itupararanga (Bacia dos Rios Sorocaba e Médio Tietê)**. 2004. 160 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VALENTE, Roberta de Oliveira Aversa; VETTORAZZI, Carlos Alberto. Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 51-61, dez. 2005.