

GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS NA DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO EM CAMAÇARI, BAHIA

GEOPROCESSING AND MULTICRITERIA ANALYSIS APPLIED TO THE SELECTION OF LOCATIONAL ALTERNATIVES FOR THE FINAL DISPOSAL OF URBAN SOLID WASTE: A CASE STUDY IN THE CITY OF CAMAÇARI, BAHIA

André Vinnicyus Borges BARROS, Luiz Rogério Bastos LEAL, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto MELO, Sérgio Carvalho GONÇALVES

Universidade Federal da Bahia (UFBA) - Rua Barão de Jeremoabo, s/n - Ondina, Salvador – BA.
E-mail: andrevbarros08@gmail.com; lrogerio@ufba.br; danilo.melo@ufba.br; carvalhosg@hotmail.com

Introdução
Materiais e métodos
Coleta de metadados e pesquisa bibliográfica
Lógica Booleana
Seleção de fatores e critérios restritivos
Drenagens, corpos d'água e áreas inundáveis
Áreas urbanas e rede elétrica
Unidades de conservação
Zona costeira
Rodovias, ferrovias, oleodutos e gasodutos
Processo Analítico Hierárquico
Definição dos pesos
Análise dos critérios não-restritivos
Critérios Ambientais
Critérios Técnicos
Critérios Socioeconômicos
Resultados e Discussões
Áreas restritas
Favorabilidade dos critérios não-restritivos
Modelo de favorabilidade final
Alternativas locais
Considerações finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A implementação de aterros sanitários é uma questão complexa, envolvendo diversos fatores ambientais, socioeconômicos e técnicos em estudos locais de empreendimentos deste tipo. A utilização de um *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite integrar esses dados em uma única análise. Apesar de o município de Camaçari possuir um aterro sanitário, este já foi autuado quatro vezes por irregularidades em seu período de operação e um plano de fechamento está em andamento. Portanto, o presente trabalho em questão buscou realizar uma análise multicritério através da metodologia Processo Analítico Hierárquico (AHP) e da lógica booleana no programa ArcGIS Pro com o objetivo de gerar um modelo de favorabilidade a disposição de resíduos sólidos urbanos no município, consoante com a legislação vigente e a literatura do tema. A utilização das metodologias citadas permitiu quantificar as importâncias relativas entre os critérios definidos e avaliar a pertinência do estudo. Os modelos de critérios restritivos e não-restritivos foram cruzados para a geração do modelo final, que permitiu verificar que 61,2% da área de estudo é classificada como “restrita”, 20,4% como “não-favorável”, 17,8% como “favorável” e 0,6% como “muito favorável”. Por fim, sugeriu-se 3 locais adequados para a implantação de um novo aterro sanitário.

Palavras-chave: Lixo sólido urbano. Sistema de Informação Geográfica. Análise multicritérios.

ABSTRACT - The implementation of sanitary landfills is a complex issue, involving several environmental, socioeconomic and technical factors in location studies of such projects. The use of Geographic Information System (GIS) software allows the integration of these data into a single analysis. Although the municipality of Camaçari has a sanitary landfill, it has already been fined four times for irregularities during its period of operation and a closure plan is underway. Therefore, this study sought to perform a multicriteria analysis using the Analytical Hierarchical Process (AHP) methodology and Boolean logic in the ArcGIS Pro with the objective of generating a favorability model for the disposal of urban solid waste in the municipality, in accordance with current legislation and the literature on the subject. The use of the aforementioned methodologies allowed the quantification of the relative importance between the defined criteria and the evaluation of the relevance of the study. The restrictive and non-restrictive criteria models were crossed to generate the final model, which allowed us to verify that 61.2% of the study area is classified as “restricted”, 20.4% as “no-favorable”, 17.8% as “favorable” and 0.6% as “very favorable”. Finally, 3 suitable locations were suggested for the implementation of a new sanitary landfill.

Keywords: Urban solid waste. Geographic Information System. Multi-criteria analysis.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um desafio para os gestores municipais, principalmente de países em desenvolvimento como o Brasil, devido a um crescimento desordenado e rápida industrialização de centros urbanos, demandando um planejamento eficaz de todas as etapas, entre elas a disposição final destes resíduos (Khan & Faisal, 2007). A escolha adequada de um local para a disposição de RSU envolve não apenas critérios que visem mitigar danos ambientais, mas também danos socioeconômicos e técnicos que podem ser consequência de uma má implementação deste tipo de empreendimento (Demesouka et al., 2013).

No Brasil, a Lei 12.325/2010, chamada também de Política Nacional dos Resíduos Sólidos, dispõe diretrizes que promovem uma gestão integrada e ordenamento adequados de RSU, além do papel da NBR 13.896/1997 de definir critérios para o projeto, a instalação e a operação de aterros de resíduos não-perigosos. A necessidade de uma legislação adequada para empreendimentos deste porte é cada vez mais evidente, já que 39% dos 81,8 milhões de toneladas de RSU produzidos em território brasileiro em 2022 foram dispostos de maneira inadequada (ABRELPE, 2022). Em um contexto mundial, cerca de 1,3 bilhões de toneladas de RSU são anualmente, com previsão de um aumento de até 2,2 bilhões de toneladas até 2025 (Sukholthaman & Shirada, 2015).

Como tantos fatores e questões devem ser considerados para a implementação, softwares

GIS em conjunto com metodologias de análise vêm sendo utilizadas por diversos autores para escolha de locais adequados para a disposição de RSU, já que permitem integrar diferentes dados geoespaciais tanto em estudos quantitativos quanto qualitativos (Silva & Pinheiro, 2010; Dalmas et al., 2011; Colman et al., 2015; Amaral & Lana, 2017; Kamdar et al., 2019; Muller et al., 2021).

Purificação et al. (2024) utilizaram as metodologias de processo analítico hierárquico (AHP) e booleana junto a um software GIS para classificar áreas quanto a favorabilidade de disposição de RSU na Região Metropolitana de Salvador (RMS), realizando também diagnóstico ambiental dos aterros presentes na RMS, incluindo o Aterro Sanitário de Camaçari (ASC), onde a localização foi classificada como parcialmente adequada. Entretanto, o ASC foi autuado 4 vezes (2005, 2009, 2014 e 2017) pelo Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA, 2022) segundo a LIMPEC (Empresa de Saneamento vinculada a Prefeitura de Camaçari).

Diante das questões expostas, o objetivo do trabalho em questão é criar um modelo de favorabilidade na disposição de RSU no município de Camaçari, sugerindo três localidades para a implementação de um novo aterro sanitário na área da cidade a partir da manipulação de dados geoespaciais dos critérios não-restritivos e restritivos em ambiente SIG com a utilização de metodologia AHP e booleana para a definição de pesos relativos destes fatores.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em três fases principais. Na primeira etapa, foram coletados dados geoespaciais provenientes de diferentes fontes, como instituições governamentais e bases de dados colaborativas, além de um levantamento bibliográfico sobre o tema. Na segunda etapa, foram definidos os pesos dos critérios a partir de cálculos matemáticos necessários na aplicação do método AHP (Saaty, 1990) em tabelas no *software* Excel. Por fim, o ambiente SIG ArcGIS Pro 3.3 foi escolhido para a edição dos metadados escolhidos e elaboração dos mapas necessários para a criação do modelo final de favorabilidade do município a partir da álgebra de mapas.

Caracterização da área de estudo

Camaçari possui uma população estimada de

309.208 pessoas (4º mais populoso do estado da Bahia) e extensão territorial de 785,421 km². O município está localizado na Região Metropolitana de Salvador (Figura 1) e está em torno das coordenadas 12° 41' 47" S e 38° 19' 24" W, cerca de 50 km distante da capital estadual. (IBGE, 2021).

A cidade é o maior polo industrial da Bahia, apresentando também o 5º maior PIB (Produto Interno Bruto) do estado. O clima do município é classificado como tropical do tipo Aw (verão chuvoso e inverno seco), com temperatura média de 25,4° C e pluviosidade média anual de 919 mm, de acordo com a Köppen e Geiger. Na figura 1, está representada a localização do município de Camaçari.

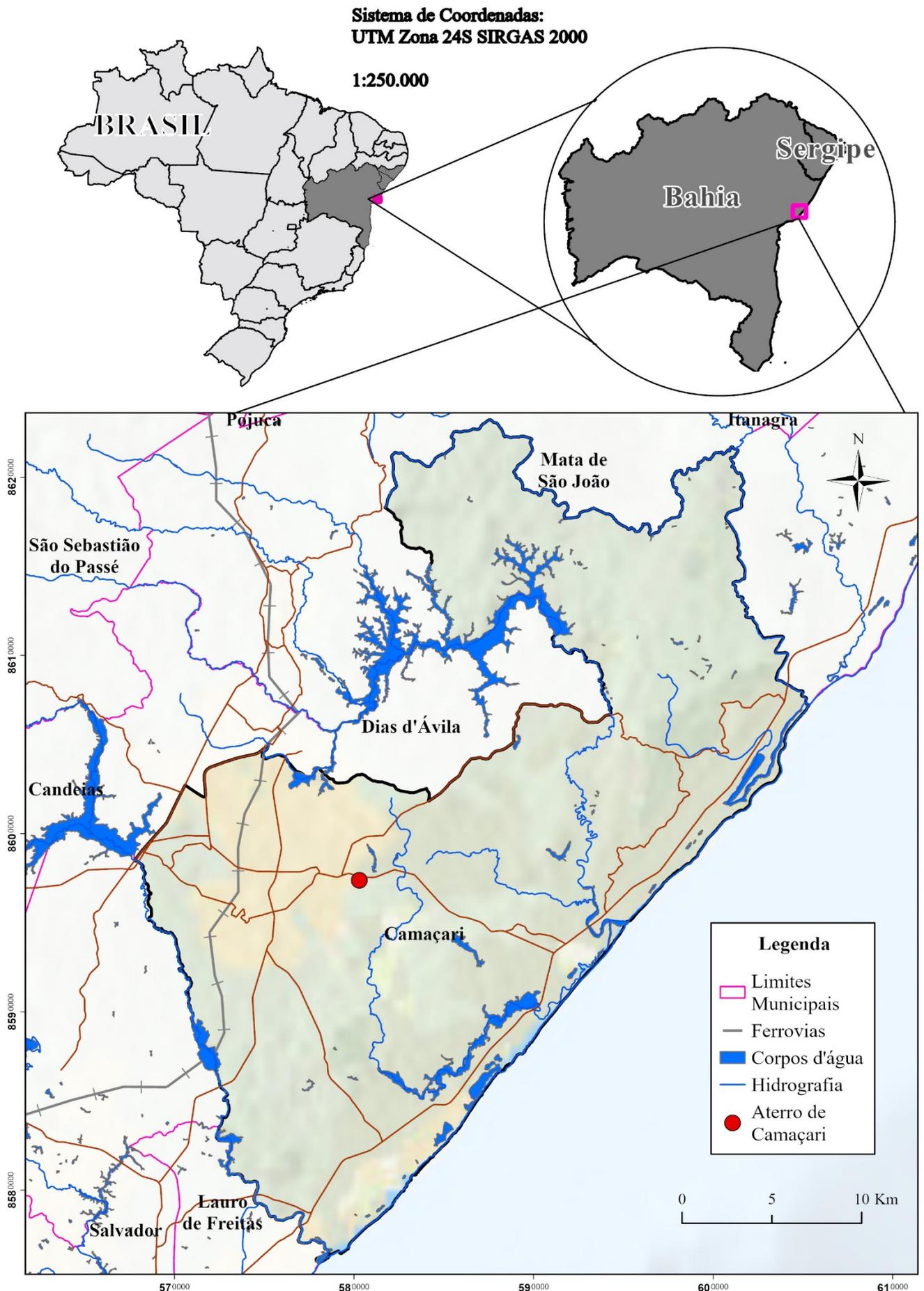


Figura 1 - Mapa de localização do município de Camaçari.

Coleta de dados geospaciais e pesquisa bibliográfica

Os dados necessários para a pesquisa foram coletados em plataformas online, tendo como exemplo o catálogo de metadados da ANA e o

VGeo da DNIT, sendo indicada a fonte em cada um dos mapas confeccionados do seguinte trabalho, conforme indicado na Tabela 1. O modelo digital de elevação do INPE foi utilizado para extrair a declividade do terreno da área de estudo.

Tabela 1 – Temas e respectivas fontes de dados

Tema	Tipo	Fonte
Geologia/Hidrogeologia	Vetorial	CPRM (2008)
Limites Estaduais e Municipais	Vetorial	IBGE (2023)
Localização do aterro	Vetorial	NEHMA/UFBA (2022)
Área Inundáveis	Vetorial	(Purificação, 2020)
Rodovias/Ferrovias	Vetorial	DNIT (2021)
Corpos d'água	Vetorial	ANA (2019)
Drenagens	Vetorial	ANA (2019)
Unidades de Conservação	Vetorial	MMA (2019)
Usinas Elétricas/Subestações	Vetorial	ANEEL – EPE (2021)
Áreas Urbanizadas	Vetorial	IBGE (2019)
Dutos de Gás/Óleo	Vetorial	MapBiomias (2019)
Uso e cobertura do solo	Matricial	ESRI/ESA (2022)
Pedologia	Vetorial	IBGE (2023)
Modelo Digital de Elevação	Matricial	INPE (2024)

Lógica Booleana

Como aborda Câmara et al. (2001), no Diagrama de Venn os princípios da teoria de conjuntos e dos operadores lógicos são utilizados pelo modelo booleano, testando afirmações com ponderadores de união (OU), intersecção (E), exclusão (XOR) e negação (NÃO).

A inferência booleana é ideal para os parâmetros com restrições segundo Leis e Normas, já que os resultados são expressos em uma lógica binária, com os valores “0” para as áreas restritas e “1” sem restrição legal, sentenciando a não-pertinência ou a pertinência da hipótese, respectivamente (Figura 2).

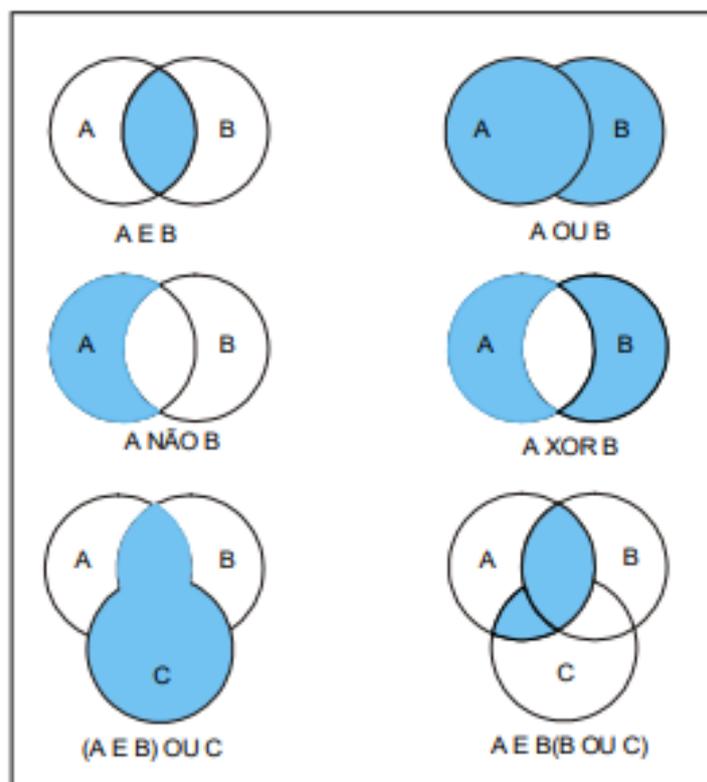


Figura 2 - Diagrama de Venn e conjuntos resultantes das respectivas operações (Fonte: Câmara et al., 2001)

Seleção de fatores e critérios restritivos

Foram selecionados nove critérios restritivos para locação de aterros, estabelecendo fatores técnicos, ambientais e socioeconômicos em conformidade com as normas e leis brasileira (Tabela 2) como feito por Purificação (2020).

Para todas as áreas restritas foi estabelecido peso “0” e para os locais sem restrição legal o peso “1”.

A ferramenta Merge foi utilizada para a junção de todas as áreas restritas, passo anterior a conversão dos vetores em um modelo *raster*.

Tabela 2 – Fatores e critérios restritivos e respectivas legislações, além de índice booleano

Fatores	Zona Restrita	Legislação	Índice
Rede Elétrica	500 m	NBR 13.896/1997	0
Dutos de Gás e Óleo	25 m	DNIT/2008; Lei 10.932/2004	0
Rodovias e Ferrovias	35 m	DNIT/2008; Lei 10.932/2004	0
Drenagens	200 m	NBR 13.896/1997	0
Corpos D'água	200 m	NBR 13.896/1997	0
Áreas Inundáveis	200 m	NBR 13.896/1997	0
UCs	Poligonal	Lei 9.985/2000	0
Zona Costeira	1000 m	*Resolução CONAMA 303/2002	0
Áreas Urbanas	500 m	NBR 13.896/1997	0

*Não está estabelecido na Resolução; critério foi definido pelo autor.

Drenagens, corpos d'água e áreas inundáveis

A NBR 13.896/1997, que dispõe sobre a implementação e operação de aterros de resíduos não perigosos (e.g. resíduos sólidos urbanos), restringiu áreas com relação a cinco critérios selecionados, como locais com distância menor que 200 metros de qualquer coleção hídrica (drenagens e corpos d'água) e de áreas sujeitas a inundações em período de recorrência de 100 anos, uma vez que gases tóxicos e efluentes são emitidos pelos aterros sanitários (Pasalari et al., 2019).

Áreas urbanas e rede elétrica

O distanciamento de núcleos populacionais (considerados estes as áreas urbanizadas e a rede elétrica) também está disposto na NBR 13.896/1997, com o mínimo recomendável de 500 metros, já que a proximidade de um aterro a essas áreas promove efeitos como a desvalorização imobiliária e problemas relacionados a saúde pública e planejamento urbano, fenômeno conhecido como *NIMBY* (não em meu quintal, traduzido para o português), que reflete a oposição da população em relação a esse tipo de empreendimento (Kamdar et al., 2019; Ramu et al., 2023).

Unidades de conservação

Existem três Unidades de Conservação (UCs) na área do município, dispostas como Unidades de Uso Sustentável perante a Lei 9.985/2000, correspondendo Reserva Particular do Patrimônio Natural das Dunas, área de conservação privada que corresponde a uma área de 78 há de proteção de campos de dunas, permitindo apenas

atividades de pesquisa científica e visitação segundo a legislação; Área de Proteção Ambiental Lagoas de Guarajuba, que corresponde a uma importante área no contexto hidrogeológico e ecológico, servindo como zonas de reprodução de diversas espécies e também como um tampão hidrológico para as águas subterrâneas (INEMA, 2022); Área de Proteção Ambiental Plataforma Continental do Litoral Norte, correspondendo a uma porção da zona costeira, que apresenta fragilidade ambiental considerável. Todas as três UCs tiveram suas poligonais consideradas restritas, dado as condições apresentadas.

Zona costeira

Quanto a zona costeira, a cidade de Camaçari apresenta 40 km de extensão de faixa litorânea, composta quase em sua totalidade por planícies de maré pleistocênicas e holocênicas, que se estendem até o contato com o Grupo Barreiras, de idade miocênica e depósitos semi-consolidados de composição areno-argilosa (Dominguez et al., 2009; Santos, 2012). A porção costeira do município apresenta uma alta diversidade de ecossistemas, como a presença de restingas, manguezais e recifes de corais, tornando a área frágil para empreendimentos como aterros sanitários (Leão & Kikuchi, 1999; Santos, 2012). A região ainda apresenta uma alta densidade demográfica, contando com o Complexo Guarajuba-Bahia como um dos polos turísticos (Silva et al., 2008). Além disso, Santos (2012) concluiu que as praias da faixa litorânea, classificadas com qualidade

recreacional média ou alta são atrativas para turistas, ainda que haja necessidade de uma melhor gestão do uso dos serviços ecossistêmicos. Por fim, a resolução CONAMA 303/2002 dispõe a faixa mínima de 300 metros medidas a partir da linha de preamar máxima como Área de Proteção Permanente para as restingas, porém diante da alta densidade demográfica da zona costeira, bem como a importância para a atividade turística, a diversidade ecológica e a fragilidade ambiental, foram adotadas neste estudo a faixa de proteção de 1000 metros a partir da linha de costa.

Rodovias, ferrovias, oleodutos e gasodutos

Por fim, foi estabelecido uma distância mínima de 35 metros para rodovias e ferrovias, já que os custos de operação do empreendimento aumentam à medida que se torna mais distante das vias de transporte (Kahraman et al., 2018; Kamdar et al., 2019), entretanto uma proximidade muito grande pode gerar efeitos de poluição visual e acidentes como objetos transportados pelos ventos nas

vias, além de obstrução das vias por caminhões transportadores dos resíduos (Ramu et al., 2023), de 25 metros para oleodutos e gasodutos, parâmetros estabelecidos por Purificação et al. (2024), em consonância com DNIT (2008) e a Lei 10.932/2004.

Processo Analítico Hierárquico

O Processo Analítico Hierárquico - **AHP** é um método desenvolvido por Saaty (1987) e utilizado por diversos autores na pré-seleção de áreas favoráveis à implementação de um aterro sanitário (Wang et al., 2009; Moeinadini et al., 2010; Marchezeti et al., 2011; Pasalari et al., 2019; Purificação, 2020). A metodologia permite desenvolver comparações pareadas e hierárquicas entre fatores preestabelecidos, a partir da importância relativa entre eles de acordo com escala proposta em nove níveis (Tabela 3). O julgamento é feito a partir da elaboração de matrizes pareadas para os subcritérios e critérios, permitindo determinar pesos entre 0 e 1 (Saaty, 1990; Câmara et al., 2001).

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICAÇÃO
1	Mesma importância	As alternativas i e j contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	A alternativa i tem importância moderada sobre a alternativa j
5	Importância essencial ou forte	A alternativa i tem importância grande sobre a alternativa j
7	Importância muito forte	A alternativa i tem importância muito grande sobre a alternativa j
9	Importância extrema	A alternativa i tem importância absoluta sobre a alternativa j
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se tem dúvidas entre as importâncias ímpares acima

Tabela 3 - Escala de importância relativa do método AHP (Fonte: Purificação, 2020. Adaptado de Saaty, 1990)

A partir da definição dos pesos, é possível calcular o autovetor (λ_{max}) pela média geométrica de cada linha da matriz em questão. É possível calcular então o índice de consistência e avaliar a partir do índice randômico está entre 0 a 10%, limiar para considerar o julgamento coerente (Saaty, 1990).

Definição dos pesos

Foram utilizadas nove matrizes de comparação de acordo com a metodologia de Saaty (1990), que permitiram gerar os pesos entre os fatores e critérios (Tabela 4). Após o cruzamento final, foram definidos os intervalos de favorabilidade entre não-favorável ($P_{AHP} \leq 0,3$), favorável ($0,3 < P_{AHP} \leq 0,4$) e muito favorável ($P_{AHP} > 0,4$), onde o maior valor obtido para uma área foi 0,48.

Além disso, a validação do julgamento dos critérios pelas matrizes de comparação foi

realizada a partir do índice de consistência (CR) de cada uma das nove matrizes, onde todos estiverem menores que os limiar aceitável de 0,1 segundo Saaty (1990), com o maior índice sendo para o fator “Hidrogeologia/Geologia” com 0,09.

O desenvolvimento final do modelo AHP foi feito através da ferramenta Calculadora *Raster*, seguindo a equação a seguir:

$$\text{Favorabilidade} = \Sigma(P_{fi} P_{ci})$$

Onde P_{fi} corresponde aos pesos dos fatores e P_{ci} aos pesos dos critérios.

Análise dos critérios não-restritivos

Os critérios não-restritivos foram escolhidos baseados no modelo proposto por Purificação et al. (2024), os oito temas foram divididos entre dois fatores técnicos, quatro ambientais e dois socioeconômicos.

Tabela 4 – Critérios não-restritivos e seus respectivos pesos relativos definidos por método AHP.

CRITÉRIOS	PESO-C	FATORES	PESO-F
Declividade	0,026	Valor < 1%	0,092
		1% < Valor < 30%	0,607
		30% < Valor < 100%	0,246
		Valor > 100%	0,054
Rodovias/Ferrovias	0,067	0 a 1 km	0,115
		1 a 2 km	0,588
		2 a 3 km	0,241
		Distância > 3 km	0,057
Drenagens	0,204	0 a 0,5 km	0,035
		0,5 a 1 km	0,068
		1 a 2 km	0,134
		2 a 5 km	0,260
		Distância > 5 km	0,503
Rios principais	0,385	0 a 0,5 km	0,035
		0,5 a 1 km	0,068
		1 a 1,5 km	0,134
		1,5 a 2 km	0,260
		Distância > 2 km	0,503
Geologia/Hidrogeologia	0,071	Complexo Rio Real	0,352
		Grupo Barreiras	0,086
		Formação São Sebastião	0,031
		Depósitos Marinheiros	0,030
		Complexo Salvador	0,217
		Grupo Ilhas	0,225
Pedologia	0,039	Formação Marizal	0,059
		Argissolo	0,483
		Latossolo	0,132
		Espodossolo	0,298
		Gleissolo	0,045
Zonas Geradoras de RSU	0,168	Neossolo	0,042
		0 a 0,5 km	0,084
		0,5 a 2 km	0,266
		2 a 5 km	0,588
		Distância > 5 km	0,063
Uso da terra e cobertura do solo	0,041	Corpo Hídrico	0,038
		Floresta	0,152
		Vegetação Inundada	0,035
		Agricultura/Pecuária	0,235
		Área Urbana	0,096
		Solo Descoberto	0,444

$$\text{Peso Final} = \text{Peso-C} * \text{Peso-F}$$

Critérios Ambientais

Geologia/Hidrogeologia, drenagens, rios principais e tipos de solos foram os quatro critérios não-restritivos selecionados. No que condiz a geologia, a área de estudo constitui-se de três terrenos hidrogeológicos associados, contendo rochas do embasamento caracterizadas por serem parte do Complexo Migmatítico Rio Real - Riachão do Dantas e do Complexo Granulítico Esplanada-Boquim como a primeira delas.

De acordo com Almeida Júnior et al. (2020), esta unidade é composta por ortognaisses migmatíticos e granitoides de baixa permeabilidade, e

granulitos e quartzitos do Neoarqueano de permeabilidade variável e que caracterizam o aquífero fissural da região, respectivamente.

A segunda unidade é a Bacia Sedimentar do Recôncavo, representada pela Formação Marizal e Formação São Sebastião que são unidades geológicas de maior importância hidrogeológica, compostas de rochas siliciclásticas de granulometria da escala de areia com intercalações de folhelhos, e pelo Grupo Ilhas, formado predominantemente por folhelhos e, por fim, a Margem Continental Atlântica (depósitos quaternários e terciários) e o Grupo Barreiras como a última

unidade hidrogeológica, de granulometria bastante heterogênea, com matriz argilosa e apresentando uma baixa porosidade efetiva (Purificação et al., 2024).

Com relação aos solos, foi utilizada a classificação adotada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), constatando a presença de 5 tipos na área de estudo: argissolos, latossolos, espodosolos, gleissolos e neossolos.

Os argissolos apresentam baixa porosidade efetiva devido ao processo de translocação de argila (*i.e.* acumulação de argila nos horizontes subsuperficiais), além de geralmente apresentar baixa expansividade.

Os latossolos, característicos pelo horizonte B latossólico (com alto teor de argila), apresentam estrutura microgranular, ocasionando em uma alta permeabilidade no solo, fator negativo para a implementação de um aterro sanitário, devido a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas.

Os espodosolos são característicos pela translocação de materiais organo-metálicos, reduzindo a porosidade efetiva desse solo, além de apresentarem estabilidade considerável, com baixas expansibilidade e erodibilidade. Os gleissolos são solos ditos encharcados, com flutuação do nível freático, geralmente apresentando alta umidade e baixa estabilidade, impróprios para o empreendimento. Por fim, os neossolos são solos imaturos, com textura arenosa e sem presença de horizonte B, apresentando alta condução hidráulica e baixa estabilidade (Silva et al., 2020; Santos et al., 2018; Ker et al., 2015).

Quanto aos fatores de rios principais e drenagens, a favorabilidade de implementação do aterro e a distância do empreendimento são diretamente proporcionais, já que o risco de

contaminação decresce em área mais distantes das águas superficiais (Ramu et al., 2023)

Critérios Técnicos

De acordo com a NBR 13.896/1997, os aterros sanitários devem ser construídos preferencialmente em locais com declividade acima de 1% e abaixo de 30%. Locais com alta declividade aumentam os custos de instalação do empreendimento, como as obras de terraplanagem, além de aumentar os riscos de estabilidade na fase de construção do aterro (Demesouka et al., 2013).

Como foi mencionado anteriormente, uma alta proximidade do aterro com as rodovias e ferrovias pode ocasionar acidentes e poluição visual, porém os custos operacionais aumentam à medida que há distanciamento do empreendimento das vias de transporte. Diante disso, áreas distantes entre 1 e 2 km das vias foram consideradas as mais favoráveis na análise deste critério.

Critérios Socioeconômicos

As áreas urbanas foram consideradas como as zonas geradoras de resíduos sólidos urbanos, portanto assim como feito para o critério das rodovias e ferrovias, áreas de distância intermediária (2 a 5 km) foram selecionadas como as de maior peso. Com relação ao uso e a cobertura do solo, foi utilizado o modelo disponibilizado e criado pela ESRI a partir da utilização de inteligência artificial com imagens do Sentinel-2, com uma classificação de 2022, resolução espacial de 10 metros e acurácia média de 75%. Foram definidas 6 classes, a partir do modelo utilizado: corpo hídrico, floresta, vegetação inundada (*e.g.* manguezais e brejos), área urbana, agricultura/pecuária e solo descoberto, com as duas últimas classes sendo consideradas as mais favoráveis para a instalação do empreendimento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Áreas restritas

O modelo booleano final, elaborado a partir da sobreposição das restrições impostas pela legislação aplicadas para cada um dos nove critérios, permitiu a classificar de 61,7% da área do município (785,4 km²) como “áreas restritas” e 38,3% como “áreas não-restritas”, conforme indicado no mapa da Figura 5.

Os critérios que apresentaram maior restrição foram “Áreas Urbanizadas” com 39,2%, seguido por “Drenagens” com 22,2%. Tal representatividade desses critérios é esperada, pela alta urbanização do município no entorno da sede

municipal, do Polo Industrial de Camaçari e da faixa litorânea.

Favorabilidade dos critérios não-restritivos

Quanto aos fatores não-restritivos, 71,4% da área foi classificada como “não-favorável”, 27,9% como favorável e 0,7% como muito favorável, segundo modelo gerado pelo método AHP com os oito critérios (Figura 6). Os três critérios considerados mais importantes, portanto, com pesos maiores, foram “Rios Principais”, “Drenagens” e “Zonas Geradoras de RSU”.

Para os dois primeiros fatores a favorabilidade à disposição final dos resíduos cresce propor-

cionalmente com a distância, já que a proximidade de corpos hídricos aumenta o risco de contaminação. Já para o terceiro fator, locais em distâncias intermediárias são os mais

adequados, uma vez que há equilíbrio entre os efeitos gerados pela síndrome *NIMBY* nas zonas urbanas e os custos de transporte dos resíduos para o aterro sanitário

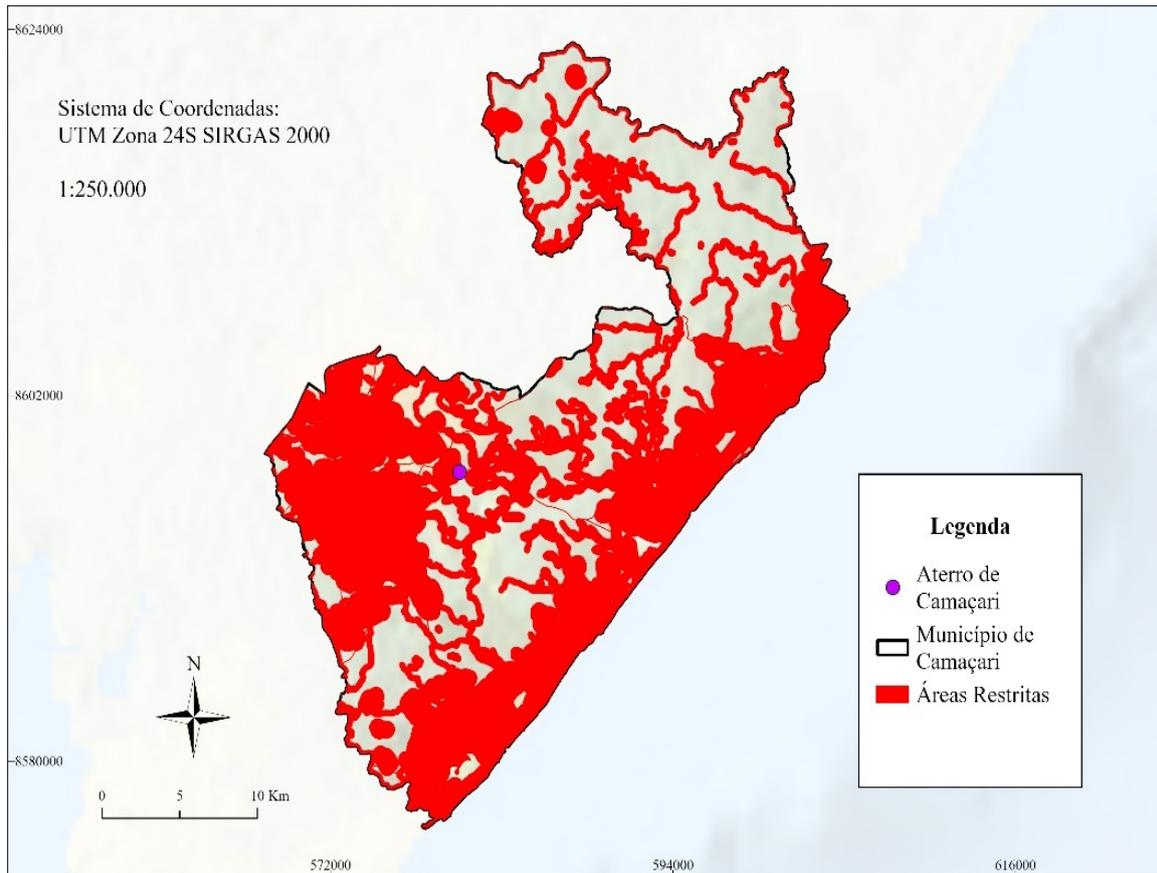


Figura 5 – Modelo final de critérios restritivos (lógica booleana) do Município de Camaçari

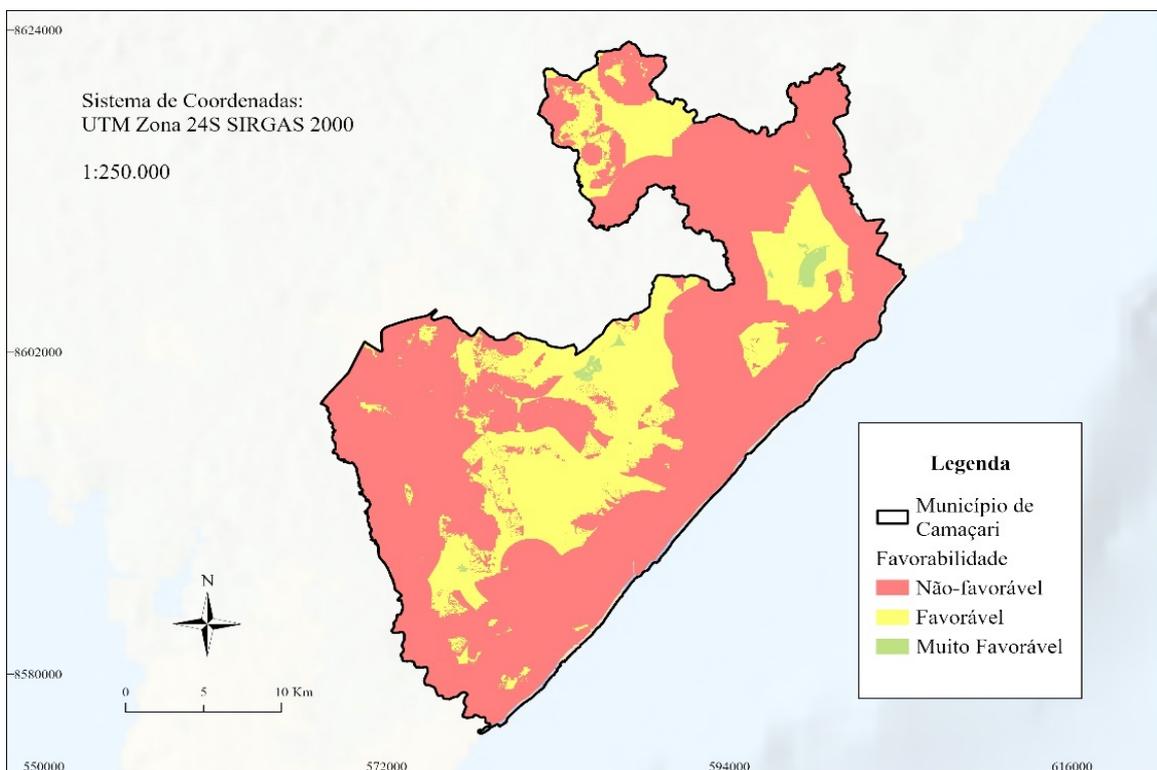


Figura 6 – Modelo final de critérios não-restritivos (AHP) do Município de Camaçari.

Modelo de favorabilidade final

A integração entre os modelos booleano e AHP gera como produto o modelo final de favorabilidade à disposição dos resíduos sólidos urbanos, onde é possível verificar que 61,2% da área de estudo é classificada como “restrita”, 20,4% como “não-favorável”, 17,8% como “favorável” e 0,6% como “muito favorável” (Figura 7).

Assim como nos resultados obtidos por Purificação et al. (2024), o modelo AHP classificou uma pequena porção (13,5%) das áreas sem restrições legais como locais não-favoráveis. Quanto à correspondência dos resultados obtidos

pelos dois métodos, 42,5% dos locais considerados não-favoráveis segundo o método adotado para os critérios não-restritivos também são restritos legalmente.

O cruzamento entre os dois modelos foi realizado também pela ferramenta Calculadora *Raster*, através da seguinte equação:

$$P_{final} = P_{AHP} \times P_{bool}$$

Onde P_{final} corresponde ao peso final de cada pixel, P_{AHP} ao peso do modelo AHP e P_{bool} ao peso do modelo booleano.

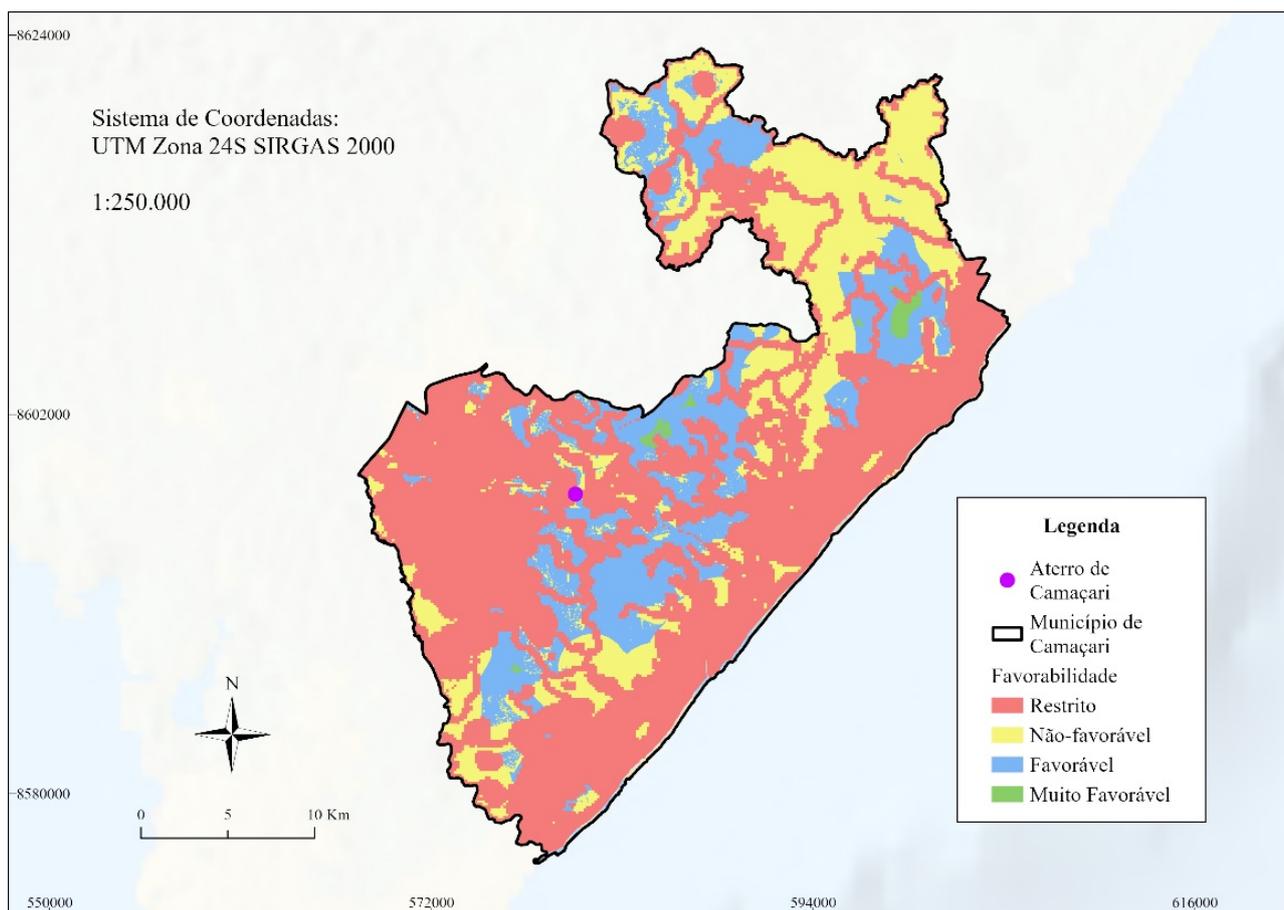


Figura 7 – Mapa de modelo final de favorabilidade a partir do cruzamento entre os dois modelos anteriores (critérios restritivos e não-restritivos) do município de Camaçari.

Alternativas locais

Foram escolhidos três locais para a implementação do aterro sanitário, a partir do modelo final gerado. Todas as alternativas encontram-se em áreas classificadas como muito favoráveis ou favoráveis, as quais passaram por uma checagem

por fotointerpretação a partir de imagens no Google Earth Pro (Figura 8). Ademais, duas localidades encontram-se próximas ao município limítrofe de Dias d’Ávila, facilitando a renovação do consórcio existente entre as duas cidades (Camaçari e Dias d’Ávila).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da lógica booleana junto ao método AHP mostrou-se eficiente em tornar a análise espacial mais robusta, gerando uma grande

economia de tempo e recursos financeiros, uma vez que exclui áreas restritas legalmente e indica quais os locais mais favoráveis para a implan-

tação do empreendimento, seguindo critérios ambientais, socioeconômicos e técnicos.

Entretanto, os resultados apresentados não dispensam a necessidade de outros estudos científicos como os de viabilidade econômica, geotécnicos, análises pedológicas, vulnerabi-

lidade das águas subterrâneas, além de ensaios laboratoriais e validações em campo. Além disso, dados em escala cada vez maior e uma adaptação dos critérios para a realidade de cada município ou região aumentam a confiabilidade dos resultados obtidos.

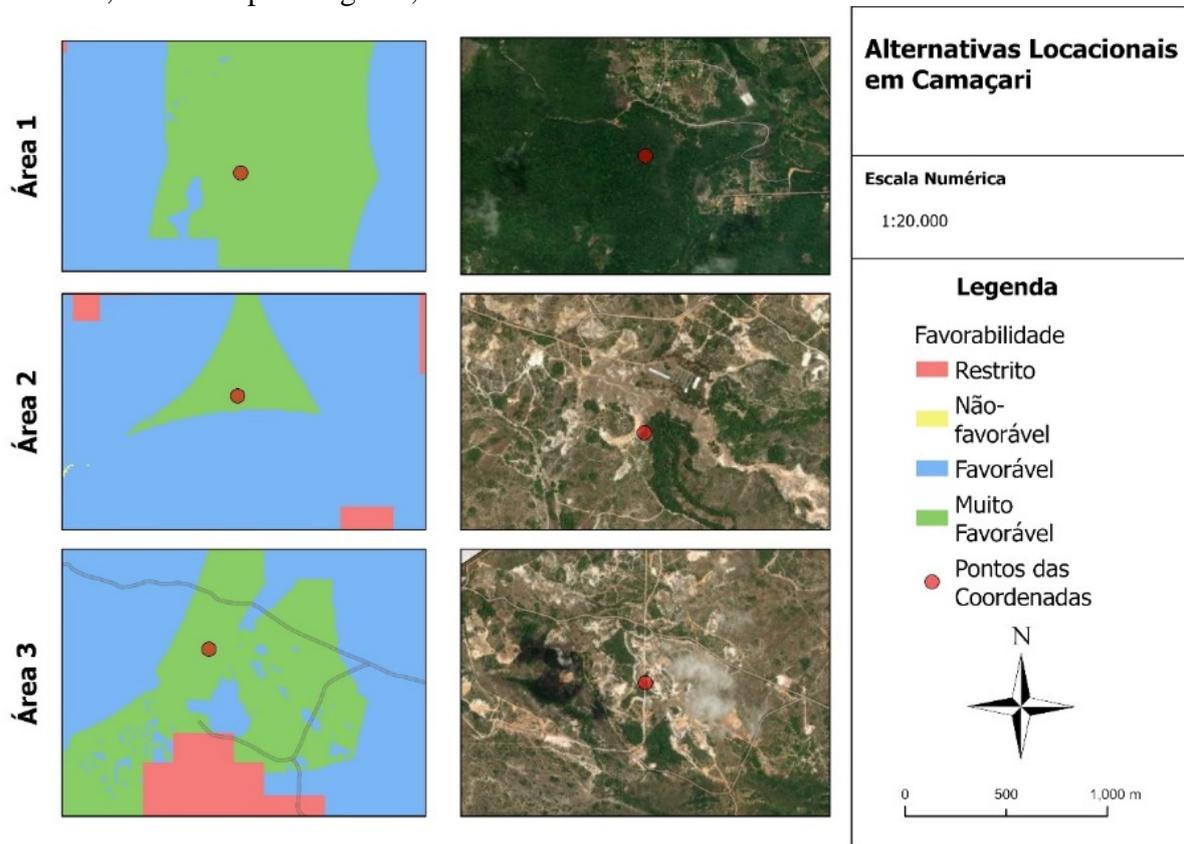


Figura 8 – Mapa de alternativas locais a implementação de um novo aterro sanitário em Camaçari.

Por fim, a escolha da área onde o aterro sanitário vai ser instalado envolve também questões sociais, já que o diálogo dos gestores públicos com a população é fundamental, devido aos efeitos causados nos arredores da obra (*i.e* efeito *NIMBY*).

Logo, a decisão final sobre a disposição dos resíduos sólidos urbanos deve envolver representantes da gestão municipal, da população e de um

corpo técnico-científico.

Com o surgimento de novos métodos estatísticos e a disponibilização de dados em maior escala, novas pesquisas podem ser feitas na área de estudo, bem como em outras regiões com a devida atenção a legislação específica, além da realidade local de acordo com os fatores socioeconômicos, técnicos e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Escola Politécnica da Bahia (FEP-BA) pelo financiamento durante o período da pesquisa e ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA/UFBA) da Universidade Federal da Bahia pelo apoio logístico e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.896/97**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo. 2022. Disp. em: <https://www.abrema.org.br/download/90935/?tmstv=1718136285> Acesso em: 15 de nov. de 2023.

ALASKA SATELLITE FACILITY – ASF. **ASF Data Search**. Disp. em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 15 jan. de 2023

ALMEIDA JUNIOR, M.V.C.; LEAL, A.B.M.; BARBOSA, J.S.F.; MARINHO, M.M. Petrografia e litoquímica das rochas migmatíticas da porção norte do Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim, Cráton do São Francisco, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 2, p. 133-143, 2020.

AMARAL, D.G.P. & LANA, C.E. Uso de geoprocessamento

- para indicação de áreas favoráveis à construção de aterro sanitário no município de Ouro Preto (MG) / Geographical information systems for indication of favorable areas to the sanitary landfill construction in Ouro Preto city (MG). **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 49, p. 368, 2017. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n49p368>
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Banco de dados**. Disp. em: <https://metadados.snirh.gov.br/>. Acesso em: 03 jan. 2023
- BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lex**: coletânea da legislação. Brasília.
- BRASIL. Lei 9.985, de 18 de JULHO de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, v. 345, 2001.
- COLMAN, C.B.; LIMA, D.L.; SILVA, N.M.; PARANHOS FILHO, A.C. Análise Regional para Implantação de Aterro Sanitário Utilizando Software Livre. **Anuário Instituto de Geociências**, v. 39, n. 3, p. 98, 2016. https://doi.org/10.11137/2016_3_98_104
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **RESOLUÇÃO nº 303, de 20 de março de 2002**. Diário Oficial da União, Brasília, 13 de maio de 2002, p.87-89.
- DALMAS, F.B.; GOVEIA, S.S.; OLIVEIRA, F.R.; AMARAL, C.H.; MACEDO, A.B. Geoprocessamento aplicado à gestão de resíduos sólidos na UGRHI-11-Ribeira de Iguape e Litoral Sul. **Geociências**, v. 30, n. 2, p. 285-299, 2011.
- DEMESOUKA, O.E.; VAVATSIKOS, A.P.; ANAGNOSTO POULOS, K.P. Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: method, implementation and case study. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 33, n. 5, p. 1190-1206, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.030>
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Banco de dados**. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>. Acesso em: 03 jan. 2023
- DOMINGUEZ, J.M.L.; ANDRADE, A.C.S.; ALMEIDA, A.B.; BITTENCOURT, A.C.S.P. In: DILLENBURG, S.; HESP, P. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 253-288. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_8
- ENVIRONMENT SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. **ESRI Land Cover**. Disp. em: <https://livingatlas.arcgis.com/landcover/> Acesso em: 05 jan. 2023
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de dados. Cidades e Estados**. Disp. em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba/camacari.html>. Acesso em: 10 de jan. de 2021
- INEMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Gestão. APA Lagoas de Guarajuba**. Disponível em: <http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/unidades-de-conservacao/apa/apa-lagoas-de-guarajuba/>. Acesso em: 17 de jan. de 2023.
- KAHRAMAN, C.; CEBI, S.; ONAR, S. C.; OZTAYSI, B. A novel trapezoidal intuitionistic fuzzy information axiom approach: An application to multicriteria landfill site selection. **Engineering applications of artificial intelligence**, v. 67, p. 157-172, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.09.009>
- KAMDAR, I; ALI, S.; BENNUI, A.; TECHATO, K. Municipal solid waste landfill siting using an integrated GIS-AHP approach: A case study from Songkhla, Thailand. **Resources, conservation, and recycling**, v. 149, p. 220-235, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.027>
- KER, J.C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C.E.G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 343 p.
- KHAN, S. & FAISAL, M. N. An analytic network process model for municipal solid waste disposal options. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 28, n. 9, p. 1500-1508, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.015>
- LEÃO, Z.M.A.N. & KIKUCHI, R.K.P. The Bahian coral reefs--from 7000 years BP to 2000 years AD. **Ciencia e Cultura (São Paulo)**, v. 51, n. 3, p. 262-273, 1999.
- MAPBIOMAS. Dados de Infraestrutura. Disp. em: <https://brasil.mapbiomas.org/dados-de-infraestrutura/> Acesso em: 10 jan. 2023
- MARCHEZETI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. **Ambiente construído**, v. 11, n. 2, p. 173-187, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000200012>
- MOEINADINI, M.; KHORASANI, N.; DANEHKAR, A.; DARVISHSEFAT, A. A.; ZIENALYAN, M. Siting MSW landfill using weighted linear combination and analytical hierarchy process (AHP) methodology in GIS environment (case study: Karaj). **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 30, n. 5, p. 912-920, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.015>
- MULLER, L. N. P. E. S.; ARRUDA, J. B. F.; ALCANTARA, R. L. C.; PEREIRA, R. L. Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 26, n. 1, p. 159-170, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190143>
- PASALARI, H.; NODEHI, R. N.; MAHVI, A. H.; YAGHMAEIAN, K.; CHARRAHI, Z. Landfill site selection using a hybrid system of AHP-Fuzzy in GIS environment: A case study in Shiraz city, Iran. **Methods X**, v. 6, p. 1454-1466, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.009>
- PURIFICAÇÃO, C.G.C. **Análise de decisão multicritério e SIG aplicados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos na escolha de áreas para implantação de aterros sanitários – RMS/Bahia**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020. 64 p.
- PURIFICAÇÃO, C.G.C.; LEAL, L.R.B.; KLAMMER, H.; CÂMARA, I.S.; NASCIMENTO, R.S. A.; HATFIELD, K. GIS-based multi-criteria decision analysis for landfill allocation in a tropical metropolitan region. **Environmental earth sciences**, v. 83, n. 3, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11407-y>
- RAMU, P.; SAI SANTOSH, B.; PRAVEEN, S. An integrated GIS-AHP approach for municipal solid waste landfill siting in srikakulam district, Andhra pradesh. **Nature, environment and pollution technology**, v. 22, n. 1, p. 139-148, 2023. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.012>
- SAATY, R.W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.
- SANTOS, R.C. **Serviços Ecológicos e Capacidade de Carga das Praias do Município de Camaçari, Litoral Norte do Estado da Bahia**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREAS; J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; ARAUJO FILHO, J.C de; OLIVEIRA, J.B de; CUNHA T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2018.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB-CPRM). **Banco de dados**. Disp. em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/14691>. Acesso em: 20 dez. 2022.

- SILVA, A.D. & PINHEIRO, E.S. A problemática dos resíduos sólidos urbanos em Tefé, Amazonas. **Sociedade & natureza**, v. 22, n. 2, p. 297–312, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132010000200006>
- SILVA, S.B.M.; SILVA, B.C.N.; CARVALHO, S.S. Metropolização e turismo no litoral norte de Salvador: de um deserto a um território de enclaves. **CARVALHO, I.; PEREIRA, G.C Como anda Salvador**, v. 2, p. 189-211, 2008. <https://doi.org/10.7476/9788523209094.0009>
- SILVA, T.B.; BELLO, M.I.M.C.V.; FERREIRA, S.R.M. Correlações das classes pedológicas com características geotécnicas aplicadas ao uso e ocupação do solo. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 3, p. 346–358, 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3327.346-358>
- SUKHOLTHAMAN, P. & SHIRAHADA, K. Technological challenges for effective development towards sustainable waste management in developing countries: Case study of Bangkok, Thailand. **Technology in society**, v. 43, p. 231–239, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2015.05.003>
- WANG, G.; LI, Q.; GUOXUE, L.; LIJUN, C. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: a case study in Beijing, China. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2414–2421, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.008>

Submetido em 20 de agosto de 2024
Aceito para publicação em 7 de outubro de 2024