



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

**AVALIAÇÃO DO MEIO FÍSICO COMO FERRAMENTA
PARA A SELEÇÃO ADEQUADA DE ÁREA PARA
INSTALAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL:
ESTUDO DE CASO DO CONCISSE, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO PARÁ.**

Apresentado por:

Nome: TIAGO MARINHO PEDROSO SOUSA

Orientador: HOMERO REIS DE MELO JUNIOR (CPRM)

**BELÉM, PARÁ
JUNHO, 2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

**AVALIAÇÃO DO MEIO FÍSICO COMO FERRAMENTA
PARA A SELEÇÃO ADEQUADA DE ÁREA PARA
INSTALAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL:
ESTUDO DE CASO DO CONCISSE, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO PARÁ.**

Apresentado por:

Nome: TIAGO MARINHO PEDROSO SOUSA

Orientador: HOMERO REIS DE MELO JUNIOR (CPRM)

BELÉM, PARÁ

JUNHO, 2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S725a Sousa, Tiago Marinho Pedroso.
Avaliação do meio físico como ferramenta para a seleção adequada de
área para instalação de aterro sanitário municipal: estudo de caso do
CONCISSS, Região Nordeste do Estado do Pará.
/ Tiago Marinho Pedroso Sousa. — 2022.
xvii, 107 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Homero Reis de Melo Júnior Trabalho de
Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia,
Belém, 2022.

1. Aterro sanitário consorciado. 2. Seleção de áreas adequadas.
3. Sistema de Informações Geográficas (SIG). 4. Aspectos
texturais e mineralógicos do Solo. 5. Teste de infiltração. I. Título.

CDD 624.162



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Faculdade de Geologia

**AVALIAÇÃO DO MEIO FÍSICO COMO FERRAMENTA
PARA A SELEÇÃO ADEQUADA DE ÁREA PARA
INSTALAÇÃO DE ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL:
ESTUDO DE CASO DO CONCISS, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO PARÁ.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

Tiago Marinho Pedroso Sousa

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia
nas Áreas de Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental e Linha de
pesquisa Geotecnia Ambiental**

Data da Defesa: 20/07/2022

Banca Examinadora:

MSc. Homero Reis de Melo Junior.
(Orientador – CPRM)

DocuSigned by:
Maurício Borges
C392EC4757E6412...

Prof. Dr. Maurício da Silva Borges.
(Membro - UFPA)

Prof. Dr. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos.
(Membro Externo – UFPA)

A todos os meus familiares,
em especial a minha mãe Marilourdes Pedroso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus familiares, que sempre incentivarem os meus estudos. Em especial eu agradeço a minha mãe Marilourdes Pedroso por sempre me aconselhar, incentivar-me a estudar, torcer por cada conquista alcançada, acreditar nas minhas escolhas e me oferecer o suporte necessário nesta caminhada.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Geociências (IG) e Faculdade de Geologia (FAGEO) por toda infraestrutura fundamental para o melhor proveito das atividades acadêmicas, tanto em âmbito laboratorial quanto de campo.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha caminhada e que puderam compartilhar os melhores ensinamentos possíveis e que me proporcionaram diversas reflexões acerca dos entendimentos geológicos.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

Aos geólogos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em especial à Sheila Gatinho pela a atenção e oportunidade de me receber na CPRM. Ao Almir da Costa por toda a atenção e ensinamentos repassados sobre o geoprocessamento utilizado nos mapas elaborados neste trabalho, também a Iris Bandeira e Diane Fonseca, pelos conselhos e recomendações para estudos e carreira profissional.

Ao meu orientador Msc. Homero Reis de Melo Junior pela confiança, paciência, conselhos, oportunidades e ensinamentos valiosos ao longo de toda trajetória deste trabalho.

Ao Lenilson Queiroz e Avelino pelos ensinamentos sobre a execução da metodologia *Open and Hole* praticada em campo. Aos responsáveis pelo Lamim/Be, em especial à Rosalva Coelho, Erica Costa e Valmir por toda paciência, conversas, ensinamentos, auxílio e dedicação no desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

Ao Prof. Dr. Joaquim Queiroz a imensa ajuda e direcionamento na elaboração da análise estatística abordada neste trabalho.

Aos meus amigos Raianny Paixão, Matheus Aquino e Vinicius Barbosa pelas conversas, incentivos e conselhos desde antes da faculdade, bem como durante estes anos de vida acadêmica.

Aos meus amigos da GEO16, em especial ao Maylom Paixão e Victor Vale (eterno trio 11), Isabella Paiva, Carlos Andrei e André Arguelhes pelos conselhos, companheirismo, histórias e lições aprendidas na produção de relatórios e elaboração de mapas ao longo da graduação.

RESUMO

Na Região Nordeste do Estado do Pará, cinco municípios firmaram o Consórcio Intermunicipal denominado CONCISSS, para instalação de aterro sanitário, sendo este constituído por Castanhal, Inhangapi, Santa Izabel do Pará, Santa Maria do Pará e São Francisco do Pará, dentre os quais, o município de Castanhal dispôs de sete áreas previamente selecionadas para identificar as mais adequadas para a instalação do aterro sanitário, atendendo às exigências legais e normativas. Para a realização dos estudos nas áreas previamente selecionadas foi aplicada a Norma NBR 13.896 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), bem como as disposições previstas na legislação vigente. Para avaliar os aspectos físicos, espaciais e políticos foram utilizadas ferramentas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), testes de infiltração para avaliar a condutividade hidráulica da zona vadosa pelo método *Open End Hole*, coleta de amostras de sedimentos para análise granulométrica e difração de raio-x, além de dimensionar a área do aterro para uma vida útil, mínima, para o período de 20 anos (2021 a 2040). Dentro do ambiente SIG foi possível desenvolver, nas sete áreas previamente selecionadas, a análise espacial com uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento de imagens de satélite, de acordo com as normas vigentes, destacando-se a análise da declividade, do uso do solo, da distância mínima de cursos da água e de Áreas de Proteção Permanente (APP), distâncias mínimas a núcleos populacionais, distâncias mínimas dos centros produtores de lixo (CPL) e distâncias seguras dos sistemas viários, considerando que, nenhuma das sete áreas satisfaz estes aspectos de forma integral. A condutividade hidráulica (K_v) média das áreas 1, 2, 6 e 7 estão na ordem de 10^{-4} cm/s, e satisfazem, com ressalvas às condições previstas na norma técnica, sendo que, as demais áreas não oferecem condições mínimas neste parâmetro. O solo do município de Castanhal apresenta predominância de dois tipos texturais, solo médio-argiloso e médio-arenoso, sendo localmente argiloso. No que se refere à assembleia mineralógica os sedimentos são constituídos basicamente por quartzo, e, pontualmente menores teores de hematita e goethita, bem como minerais traços de anatásio e ilita, com o argilomineral caulinita comportando-se com dualidade, ora em menor teor e ora como mineral traço. Os dados foram reunidos em uma matriz de ponderação, e, em níveis de prioridade, considerando os aspectos técnico, econômico, social e político para proposição de índices finais, com a avaliação das áreas, dentre as quais apenas as áreas 1 e 2 apresentam condições favoráveis para prática do aterro sanitário, enquanto as áreas 6 e 7 como medianamente favoráveis; as demais, áreas 3, 4 e 5, apresentaram pelo menos um critério eliminatório, considerando-as desfavoráveis para a instalação do aterro sanitário.

Palavras-chave: aterro sanitário consorciado; seleção de áreas adequadas; Sistema de Informações Geográficas (SIG); aspectos texturais e mineralógicos do solo; teste de infiltração.

ABSTRACT

In the Northeast Region of the State of Pará, five cities signed the Intermunicipal Consortium called CONCISSS, for the installation of a sanitary landfill, which consists of Castanhal, Inhangapi, Santa Izabel do Pará, Santa Maria do Pará and São Francisco do Pará, among which, the municipality of Castanhal had seven areas previously selected to identify the most suitable for the installation of the sanitary landfill, meeting legal and regulatory requirements. In order to carry out the studies in the previously selected areas, the NBR 13,896 Standard of the Brazilian Association of Technical Standards - ABNT (1997) was applied, as well as the provisions provided for in the current legislation. To evaluate the physical, spatial and political aspects, tools were used in a Geographic Information System (GIS) environment, infiltration tests to evaluate the hydraulic conductivity of the vadose zone by the Open End Hole method, collection of sediment samples for granulometric and diffraction analysis. Ray-x, in addition to dimensioning the landfill area for a minimum useful life for the period of 20 years (2021 to 2040). Within the GIS environment, it was possible to develop, in the seven previously selected areas, spatial analysis using remote sensing and geoprocessing of satellite images, in accordance with current regulations, highlighting the analysis of slope, land use, minimum distance from water courses and Permanent Protection Areas (APP), minimum distances to population centers, minimum distances from waste producing centers (CPL) and safe distances from road systems, considering that none of the seven areas satisfied these aspects of integral form. The average hydraulic conductivity (K_v) of areas 1, 2, 6 and 7 are in the order of 10^{-4} cm/s, and meet, with exceptions, the conditions provided for in the technical standard, and the other areas do not offer minimum conditions in this parameter. The soil of the city of Castanhal presents a predominance of two textural types, medium-clay and medium-sandy soil, being locally clayey. With regard to the mineralogical assemblage, the sediments are basically constituted by quartz, and occasionally lower levels of hematite and goethite, as well as trace minerals of anatase and illite, with the clay mineral kaolinite behaving with duality, sometimes in lower content and sometimes as a trace mineral. The data were gathered in a weighting matrix, and, in priority levels, considering the technical, economic, social and political aspects to propose final indices, with the evaluation of the areas, among which only areas 1 and 2 present conditions favorable for the practice of sanitary landfill, while areas 6 and 7 as moderately favorable; the others, areas 3, 4 and 5, presented at least one eliminatory criterion, considering them unfavorable for the installation of the sanitary landfill.

Keywords: consortium landfill; selection of suitable areas; Geographic Information System (GIS); soil textural and mineralogical aspects; infiltration test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Formatos raster/matricial e formato vector/vetorial. Fonte: Adaptado de (Davis 2001) | 6 |
| Figura 2 - Elementos fundamentais para aplicação das técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Retirado de (Novo & Ponzoni 2001)..... | 7 |
| Figura 3 - Representação esquemática da obtenção de dados por meio de sensores orbitais e sensores sub-orbitais. Adaptado de (Rosa 2013)..... | 8 |
| Figura 4 - Exemplo de um agitador de peneiras. Retirado de (Dias 2004). | 11 |
| Figura 5 - A) Representação esquemática do ensaio de infiltração do método <i>open and hole</i> ; B) Desenvolvimento do teste open and hole em campo. Fonte: Adaptado de (Almeida <i>et al.</i> 2006)..... | 12 |
| Figura 6 - Mapa de localização da região de estudo, com ênfase no município objeto deste trabalho. | 13 |
| Figura 7 - Localização da Plataforma Pará-Maranhão, com ênfase na delimitação pelos Arcos Tocantins e Amapá, e das Bacias do Marajó e Bragança-Viseu. Fonte: Retirado de (Amorim 2016)..... | 14 |
| Figura 8 - Bacias Hidrográficas pertencentes a circunscrição do município de Castanhal | 20 |
| Figura 9 - Áreas previamente selecionadas no município de Castanhal, diante do projeto CONCISSS..... | 23 |
| Figura 10 - Imagens SRTM necessárias para o desenvolvimento da análise espacial do Município de Castanhal. Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS 2019). | 24 |
| Figura 11 - Representação esquemática da disposição dos tubos de PVC para posterior execução do teste de condutividade hidráulica pelo método <i>Open And Hole</i> | 26 |
| Figura 12 - A) Elaboração do furo vertical com trado motorizado; B) Verificação da profundidade pretendida do furo de trado; C) Acomodação do tubo de PVC no espaço escavado, bem como a fixação deste no fundo do furo; D) Três tubos equidistantes uns dos outros formando um triângulo equilátero. | 27 |
| Figura 13 - Mapa de declividade do Município de Castanhal. | 32 |
| Figura 14 - Análise visual do uso do solo das áreas previamente selecionadas..... | 33 |
| Figura 15 - Mapa de distância mínima das águas superficiais do Município de Castanhal. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 16 - Mapa de zoneamento dos centros urbanos dos municípios inseridos no caso do CONCISSS..... | 36 |
| Figura 17 - Mapa de distância dos núcleos populacionais de Castanhal..... | 37 |
| Figura 18 - Mapa de áreas mais promissoras para instalação do aterro sanitário, considerando a equidistância dos municípios envolvidos no CONCISSS..... | 38 |
| Figura 19 - Mapa de distâncias das principais estradas..... | 39 |
| Figura 20 - Mapa de Áreas de Proteção Permanente (APP's) no município de Castanhal. | 41 |
| Figura 21 - Box-plot evidenciando a disparidade entre a média e a mediana da condutividade hidráulica em comparação entre a análise da área e profundidade. | 58 |
| Figura 22 - Análise Residual para a condutividade hidráulica..... | 59 |
| Figura 23 - Análise gráfica comparativa da condutividade hidráulica frente as variáveis área e profundidade..... | 60 |
| Figura 24 - Áreas selecionadas para a instalação do aterro sanitário dentro do Município de Castanhal | 78 |
| Gráfico 1 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 1..... | 42 |
| Gráfico 2 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 2. | 43 |
| Gráfico 3 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 3. | 44 |
| Gráfico 4 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 4. | 45 |
| Gráfico 5 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 5. | 46 |
| Gráfico 6 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 6..... | 47 |
| Gráfico 7 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 7. | 48 |
| Diagrama 1 - Análise textural dos solos das áreas previamente selecionadas do município de Castanhal. | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Parâmetros técnico e espaciais estabelecidos pela NBR 13.896 da ABNT para a seleção do local para implantação do aterro sanitário. | 22 |
| Tabela 2 - Classificação granulométrica de Wentworth 1922..... | 25 |
| Tabela 3 - Hierarquia dos critérios | 29 |
| Tabela 4 - Relação de pontuação entre os critérios e o tipo de atendimento..... | 30 |
| Tabela 5 - Classificação do relevo e declividade. | 31 |
| Tabela 6 - Distância do centro e peso atribuído. | 35 |
| Tabela 7 - Análise granulométrica da Área 1. | 42 |
| Tabela 8 - Análise granulométrica da Área 2. | 43 |
| Tabela 9 - Análise granulométrica da Área 3. | 44 |
| Tabela 10 - Análise granulométrica da Área 4. | 45 |
| Tabela 11 - Análise granulométrica da Área 5. | 46 |
| Tabela 12 - Análise granulométrica da Área 6. | 47 |
| Tabela 13 - Análise granulométrica da Área 7..... | 48 |
| Tabela 14 - Classificação textural dos solos do município de Castanhal..... | 50 |
| Tabela 15 - Parâmetros investigados e valores de Kv obtido em cada profundidade pretendida, dos pontos investigados de cada área. | 52 |
| Tabela 16 - Análise de medidas de tendência central para as profundidades contempladas, bem como para cada área..... | 55 |
| Tabela 17 - Estatísticas descritivas para a condutividade (x 10000) para as Áreas | 58 |
| Tabela 18 - Estatísticas descritivas para a condutividade (x 10000) para as Profundidades.... | 58 |
| Tabela 19 - Comparação entre a condutividade hidráulica das áreas e das profundidades..... | 60 |
| Tabela 20 - Conteúdo mineralógico identificado nos difratogramas obtidos nas análises de DRX. | 61 |
| Tabela 21 - Dimensões em hectares das áreas previamente selecionadas..... | 65 |
| Tabela 22 - População brasileira no Censo de 2010 e estimada para 2020..... | 65 |
| Tabela 23 - Taxa exponencial anual de crescimento "k", obtidos para cada município do CONCISSS. | 66 |
| Tabela 24 - Projeção populacional para os municípios envolvidos no CONCISSS | 67 |
| Tabela 25 - Valores brutos de resíduos sólidos produzidos pela população, em toneladas estimada para o período de 20 anos..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Tabela 26 - Referência de área mínima recomendável em relação ao número estimado de habitantes. | 69 |
| Tabela 27 - Análise simplificada dos atributos de cada área. | 71 |
| Tabela 28 - Relação da hierarquia dos critérios, peso dos critérios e o tipo de atendimento. .. | 73 |
| Tabela 29 - Critérios adotados de acordo com a NBR 13.896 da ABNT, com as devidas prioridades e pesos ajustados ao CONCISSS. | 74 |
| Tabela 30 - Percentual do tipo de atendimento das áreas pré-selecionadas para instalação do aterro sanitário no caso do CONCISSS, de acordo com a norma NBR 13.896 da ABNT. | 75 |
| Tabela 31 - Pontuação final das áreas pré-selecionadas para a implantação do aterro sanitário do caso do CONCISSS. | 76 |

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| DEDICATÓRIA | iv |
| AGRADECIMENTOS | v |
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | ix |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | xi |
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 3 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 3.1 CONSÓRCIOS PÚBLICOS INTERMUNICIPAIS | 4 |
| 3.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)..... | 5 |
| 3.2.1 Sensoriamento Remoto | 7 |
| 3.2.2 Geoprocessamento | 8 |
| 3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA | 9 |
| 3.3.1 Método da Peneiração | 10 |
| 3.4 MÉTODO <i>OPEN END HOLE</i> | 11 |
| 3.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS X..... | 12 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO | 13 |
| 4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL..... | 14 |
| 4.1.1 Formação Pirabas | 15 |
| 4.1.2 Formação Barreiras | 15 |
| 4.1.3 Sedimentos Pós-Barreiras | 16 |
| 4.1.4 Contexto Geológico da Área de Estudo | 16 |
| 4.2 ASPECTOS POLÍTICO-ADMINISTRATIVOS E FISIAGRÁFICOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ÁREA DE ESTUDO | 16 |
| 4.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Guamá | 17 |
| 4.2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim | 18 |
| 4.2.3 Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã | 18 |
| 4.2.4 Contexto das Sub-bacias Hidrográficas da Área de Estudo | 19 |
| 5 MATERIAIS E MÉTODOS | 21 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.1 | ANÁLISE TÉCNICO - ESPACIAL – NBR – 13.896/1997..... | 22 |
| 5.1.1 | Geoprocessamento em Ambiente SIG | 23 |
| 5.1.2 | Análise Granulométrica | 24 |
| 5.1.3 | Testes de Infiltração <i>In Situ</i> | 26 |
| 5.1.4 | Difração de Raio-X | 28 |
| 5.1.5 | Matriz de ponderação para seleção de áreas | 29 |
| 6 | DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS E APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA A SELEÇÃO DA ÁREA | 31 |
| 6.1 | GEOPROCESSAMENTO | 31 |
| 6.1.1 | Análise da Declividade | 31 |
| 6.1.2 | Uso do Solo das Áreas Previamente Seleccionadas | 32 |
| 6.1.3 | Distância Mínima de Cursos da Água Superficiais | 33 |
| 6.1.4 | Distância dos Centros Produtores de Resíduos Sólidos | 35 |
| 6.1.5 | Distância dos Núcleos Populacionais | 36 |
| 6.1.6 | Distância dos Sistemas Viários | 38 |
| 6.1.7 | Área de Proteção Permanente (APP) | 39 |
| 6.2 | CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA | 41 |
| 6.2.1 | Análise dos Dados e da Uniformidade dos Intervalos Granulométricos | 41 |
| 6.2.1.1 | <i>Análise Granulométrica da Área 1</i> | 42 |
| 6.2.1.2 | <i>Análise Granulométrica da Área 2</i> | 43 |
| 6.2.1.3 | <i>Análise Granulométrica da Área 3</i> | 44 |
| 6.2.1.4 | <i>Análise Granulométrica da Área 4</i> | 45 |
| 6.2.1.5 | <i>Análise Granulométrica da Área 5</i> | 46 |
| 6.2.1.6 | <i>Análise Granulométrica da Área 6</i> | 47 |
| 6.2.1.7 | <i>Análise Granulométrica da Área 7</i> | 48 |
| 6.2.2 | Análise Textural do Solo | 49 |
| 6.3 | TESTE DE INFILTRAÇÃO DA ZONA NÃO SATURADA | 51 |
| 6.3.1 | Valores de Condutividade Hidráulica dos Ensaios de Infiltração <i>In Situ</i> | 51 |
| 6.3.2 | Avaliação Individual da Condutividade Hidráulica de Acordo com a Profundidade e Áreas | 54 |
| 6.3.3 | Análise Estatística dos Dados de Condutividade Hidráulica | 56 |
| 6.3.3.1 | <i>Avaliação Conjunta da Condutividade Hidráulica das Áreas e da Profundidade</i> | 57 |
| 6.4 | ASSEMBLEIA MINERALÓGICA | 61 |
| 6.4.1 | Análise dos Dados Obtidos na Difração de Raio-X | 61 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 6.4.2 | Avaliação da Assembleia Mineralógica | 62 |
| 6.4.3 | Implicações das Argilas na Impermeabilização e Estabilidade | 63 |
| 6.5 | DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DO ATERRO SANITÁRIO | 64 |
| 6.5.1 | Estimativa Populacional | 65 |
| 6.5.2 | Identificação de Massa e Volume de Resíduos | 67 |
| 6.5.3 | Dimensionamento da Área | 69 |
| 6.6 | ANÁLISE COMPARATIVA DAS ÁREAS FRENTE AOS CRITÉRIOS UTILIZADOS. | 70 |
| 6.6.1 | Elaboração de Mapa Visando as Áreas Favoráveis | 77 |
| 7 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 79 |
| | REFERÊNCIAS | 81 |
| | APENDICE A | 91 |
| | ANEXO A | 98 |

1 INTRODUÇÃO

A destinação dos resíduos sólidos resultantes das atividades humanas em sociedade se configura como um dos maiores impasses das administrações públicas municipais, em virtude do aumento populacional das cidades; conseqüente aumento da produção de lixo, bem como a mudança do paradigma socioambiental equacionado pela legislação recomendada por instituições internacionais ou legislação vigente como a lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, institui a modificação do descarte a céu aberto do lixo urbano para locais com planejamento e de acordo com normas técnicas, constituindo os aterros sanitários (BRASIL 2010, Schmidt 2016).

Além disto, a lei determina que o gerenciamento dos resíduos sólidos são responsabilidades dos geradores e do poder público, assim, estes devem fornecer destinação adequada ao lixo produzido, apreciando e ponderando as questões sociais, políticas e econômicas da região que possa receber os resíduos sólidos. Assim, ocorre a redução das áreas potenciais disponíveis para a implantação dos aterros sanitários, devido a legislação para a proteção ambiental e sanitária ou econômica (Reichert *et al.* 1998, Lopes 2006).

De acordo com a NBR 13.896/1997 a escolha do local de instalação do aterro sanitário deve atender as condições mínimas exigíveis para o adequado posicionamento do projeto, implantação e operação de atividades em aterros sanitários, tendo em vista minimizar os impactos ambientais resultantes da instauração do projeto em determinada localidade, não haver influência ou perturbação às populações adjacentes, bem como assegurar condições de segurança do terreno para o exercício dos funcionários ligados diretamente ao empreendimento.

O gerenciamento e a disposição dos resíduos sólidos devem atender as necessidades básicas da sociedade humana em consonância com a minimização dos impactos ambientais proporcionados pela destinação dos resíduos. O emprego da implantação de aterro sanitário obedece ao parâmetro sanitário que confere a atenuação dos impactos socioambientais, considerando que a destinação inadequada gera impactos ambientais, como a contaminação do solo, dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, poluição atmosférica por gases do efeito estufa (CO₂ e CH₄), bem como a atração de vetores de doenças. O cenário para a implantação do aterro sanitário deve ter em pauta todas estas características, a fim de minimizar os impactos ambientais para que não ocorra um contratempo de saúde pública na circunscrição do município e sua vizinhança (Muñoz 2002, Schmidt 2016).

Vale ressaltar que a crescente produção dos resíduos sólidos domiciliares contribui continuamente com o acúmulo dos materiais nocivos, em virtude do aumento populacional e a utilização de componentes eletrônicos que contenham metais pesados e metais tóxicos no aparelhamento dos bens comuns a vida contemporânea, como exemplo estão os metais pesados presentes na composição de pilhas, smartphones e baterias (Pb, Cd, Be, Li e etc.), bem como metais tóxicos presentes nas lâmpadas fluorescentes (Hg e Al) (Lino 2007). Assim, o descarte inadequado de resíduos sólidos pode prejudicar a circunvizinhança do ambiente onde ocorra o despejo dos resíduos sólidos, o que pode conseqüentemente propiciar a degradação do meio ambiente com a interação destes metais com águas superficiais e subterrâneas.

Além de critérios previamente estabelecidos, há estudos preliminares para a seleção de áreas adequadas para a disposição dos resíduos sólidos, em que o geoprocessamento aparece como uma forma intuitiva e facilitadora neste panorama, pois confere ao desenvolvimento do projeto, a seleção de áreas mais promissoras no empreendimento, com a utilização do sensoriamento remoto, modelos digitais de superfície adquiridos com imagens de satélite, processamento de imagens, cartografia e ambiente favorável para a análise multicriteriosa dos dados obtidos, culminam em maior precisão das áreas previamente escolhidas (Santos & Girardi 2007, Carrilho *et al.* 2018, Lourenço *et al.* 2015).

Diante deste cenário pertinente a sociedade e ao meio ambiente local e regional, a seleção adequada da área deve passar por análises criteriosas do ponto de vista técnico, de acordo com a legislação vigente. Desta maneira, é necessária a investigação individual e minuciosa dos locais propícios para a ocupação por um aterro sanitário, afinal, a gestão eficiente das atividades começa com a escolha do local apropriado para a instalação deste, considerando também o ponto de vista social e/ou ambiental, podendo repercutir futuramente nas operações técnicas intrínsecas a qualquer administrador do aterro sanitário e ao desenvolvimento das atividades (Kajino 2005, Barros *et al.* 2015, Ramires & Vitor 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar as áreas previamente selecionadas pela administração pública dos municípios de Castanhal, Inhangapi, Santa Maria do Pará, Santa Isabel do Pará e São Francisco do Pará, que constituem o Consórcio Integrado CONCISSS, para implantação do aterro sanitário consorciado, com o objetivo de avaliar os elementos técnicos e fisiográficos que constituem a Norma NBR 13.896/1997 da ABNT. Focando em realizar uma análise multicriteriosa as áreas aptas a receberem a instalação do aterro sanitário.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a granulometria dos sedimentos coletados nos furos de trado nas áreas previamente selecionadas;
- Determinar a condutividade hidráulica da zona não saturada nas áreas previamente selecionadas;
- Identificar por meio de difração de Raios-X a composição mineralógica dos sedimentos constituintes da zona vadosa nas áreas investigadas;
- Elaborar mapas temáticos identificando as áreas avaliadas e os elementos do meio físico e político, conforme a Norma NBR 13.986/1997 da ABNT.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONSÓRCIOS PÚBLICOS INTERMUNICIPAIS

Devido aos altos gastos de manutenção dos aterros sanitários, um empreendimento que seja planejado, elaborado e desenvolvido com recursos públicos de apenas um município pode, facilmente, no decorrer da operação transforma-se em um lixão, em virtude da falta de recursos para manutenção da operação diária e custeio dos funcionários, além da baixa capacidade técnica aplicada ao empreendimento em consequência da economia de recursos públicos. Desta maneira, a ação conjunta e coordenada de vários entes políticos propicia um cenário favorável para o desenvolvimento saudável do gerenciamento de RSU nos municípios, com vantagens econômicas e ambientais para a prestação destes serviços públicos (Suzuki & Gomes 2009).

Para tanto a Lei 11.107/2005 em consonância com o Decreto 6.017/2007, estabeleceu no ordenamento jurídico a criação de consórcios públicos, caracterizado como um mecanismo que condiciona a criação de pessoa jurídica, constituída exclusivamente por entes políticos (Municípios, Estados, Distrito Federal e União), com a finalidade de cooperação para a realização de objetivos de interesse comum. Assim, os consórcios públicos constituem aparatos legais que visam criar comprometimento dos diversos entes políticos para atendimento das demandas locais de pequenos municípios, economia dos recursos financeiros, implantação de políticas públicas abrangentes, bem como resolver os problemas regionais impostos pelas fronteiras político-administrativas dos entes envolvidos (Batista *et al.* 2011).

Assim, a figura dos consórcios públicos emerge no âmbito jurídico como uma possibilidade para estimular e provocar a atuação conjunta dos entes políticos, além da oportunidade de comunicação efetiva dos entes para fins de posicionamento para continuidade e desenvolvimento de futuros projetos que visem atender a população, bem como a evolução da gestão pública com enfoque no interesse público pretendido (Henrichs & Moyano 2016).

No entanto, a formação de consórcios públicos depende de prévio ajuste político, pois os interesses destes entes políticos devem ocorrer de maneira forte e coesa com a convergência dos interesses das respectivas administrações públicas, além disso a implantação e desenvolvimento dos consórcios públicos dependem também do estabelecimento das novas geografias político-partidárias após as eleições, que consideram a reavaliação dos recursos financeiros e atual modo operante do consórcio. (Henrichs & Moyano 2016, Silva Filho & Barros 2020).

Em consonância, a Lei 12.305/2010, no art. 8º, inciso XIX, apresenta que um dos instrumentos indicados pelo PNRS é o incentivo a criação de consórcios ou de outras formas de cooperação de entes federados. Tal perspectiva, conduz os entes políticos a questão de reciprocidade dentro da esfera administrativa e política frente a gestão dos resíduos sólidos, vislumbrando a possibilidade de redução dos custos operacionais, escolha de apenas um local para melhor gestão de impactos ambientais e facilitar o acesso de prefeituras menores à infraestrutura de outros entes políticos com estruturas melhores e mais adequadas às condições de implantação de aterros sanitários (Batista *et al.* 2011, Rikils 2015).

A Lei 11.445/2007 que dispõe sobre o marco legal do saneamento, junto a regulamentação com o Decreto nº 10.588, introduz que os Consórcios Públicos de Manejo de RSU estão condicionados à forma de prestação regionalizada, que implica dizer que alocação de recursos públicos federais ou financiamento com recursos da União serão condicionadas ao estabelecimento desta figura de prestação regionalizada. Desta maneira, a solução regionalizada até 31 de março de 2022, é condição necessária para o acesso a recursos da União (Brasil 2021).

3.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) é compreendido como um ambiente tecnológico computacional aliado a técnicas de obtenção de informação por intermédio de imagens de satélite, modelos numéricos, mapas, cartas climatológicas, censos dentre outros. Os dados são coletados, armazenados e codificados para o ambiente SIG, comumente por meio de *softwares* e *hardwares* especializados que permitem a inserção de diversas bases de dados, manipulação, bem como plotar e visualizar os dados georreferenciados, por exemplo em mapas temáticos (Câmara & Queiroz 2001, Santos *et al.* 2010).

Para um tratamento de dados em ambiente SIG, é de fundamental importância que estes estejam georreferenciados, ou seja, localizados na superfície terrestre, para a efetiva manipulação e operação da geometria dos dados (células, pontos, linhas, polígonos, etc.) e dos atributos vinculados aos dados, para posterior geração organização e ordenação dos dados, a fim de gerar informações relevantes para o usuário (Câmara & Queiroz 2001).

No ambiente SIG, os dados espaciais apresentam dois formatos primários, identificados como *raster*/matricial ou *vector*/vetorial (Figura 1), os quais auxiliam o profissional de SIG na manipulação dos dados e a produção de informações relevantes para o observador (Gallis 2002).

O formato *raster* ou matricial é representado por um conjunto de células (pixels) organizados em uma série de colunas e linhas que carregam consigo dados e/ou informações

específicas em formato numérico a respeito de feições geográficas, dentre as suas vantagens o formato raster permite que o usuário possa utilizar o conjunto de células para elaboração de modelos estatísticos, preditivos, referenciais ou temáticos, conferindo a possibilidade de empregar ferramentas matemáticas para operações com os valores atribuídos às células. No entanto, necessitam de amplo espaço de armazenamento e de *hardwares* apropriados para o efetivo desempenho das atividades em ambiente SIG (Gallis 2002, Rosa 2013).

O formato *vector* ou vetorial é representado por feições gráficas, dentre os quais se destacam pontos, linhas e polígonos, os quais indicam, comumente, a localização, trajetórias e áreas em um documento cartográfico. Os traços e as formas do formato vetorial são de caráter analógico, ou seja, são contínuos e não apresentam segmentos na sua estrutura, conferindo uma maior conformidade e suavização aos elementos de forma e contorno dos objetos observados na superfície terrestre (Davis 2001, Gallis 2002).

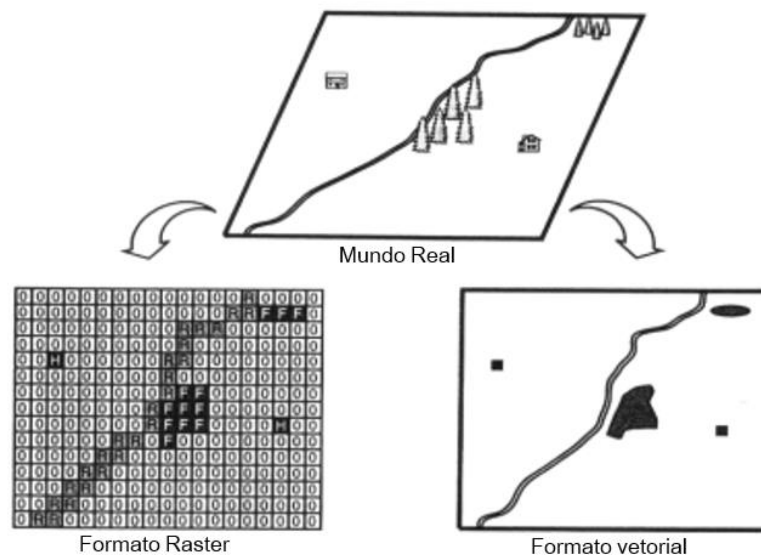


Figura 1 - Formatos raster/matricial e formato vector/vetorial. Fonte: Adaptado de (Davis 2001)

Dentre as mais diversas operações com dados, os SIG's disponíveis no mercado oferecem funções que permitem ao usuário trabalhar com arquivos vetoriais e *rasterizados*, a fim de alcançar medidas de distancias, cálculo de áreas, caracterização de zonas de influência, operações matemáticas e determinação de pesos para os dados em questão, análise espacial de imagens de satélite, manipulação de imagens, avaliação de dados altimétricos, criação e edição de feições espaciais outrora definidas, ajustes e organização do banco de dados, dentre outras funções. Conferindo ao usuário a melhor apreciação destas informações de maneira integrada no ambiente SIG para a tomadas de decisão (Piroli 2010).

Em virtude das diversas aplicações dos SIG's na distribuição espacial dos dados geográficos, o uso desta tecnologia apresenta um campo amplo de aplicações no que concerne

aos aspectos do espaço físico, social, econômico e humano, dentre os quais se destacam a agricultura de precisão, engenharias, modelagem numérica do terreno, florestas, geodésia e cartografia, mapas cadastrais, mapas ambientais, planejamento urbano e de negócios (Câmara & Queiroz 2001, Piroli 2010, Souza 2015).

3.2.1 Sensoriamento Remoto

Dentre os métodos de aquisição de dados para o ambiente SIG encontra-se o sensoriamento remoto, que consiste em técnicas destinadas a visualização de imagens da superfície terrestre, comumente, equipamentos tecnológicos (sensores) com mecanismos e técnicas capazes de mensurar propriedades eletromagnéticas de objetos na superfície terrestre sem que haja contato físico entre eles. Para tanto são necessários quatro elementos fundamentais, representados por: (i) fonte da radiação eletromagnética; (ii) o alvo, que comumente é a superfície terrestre (objeto); (iii) o sensor, mecanismo capaz de coletar e registrar a radiação eletromagnética refletida/emitida pela superfície terrestre (objeto) e; (iv) radiação eletromagnética em trânsito entre o sensor e o alvo (Figura 2) (Novo & Ponzoni 2001).

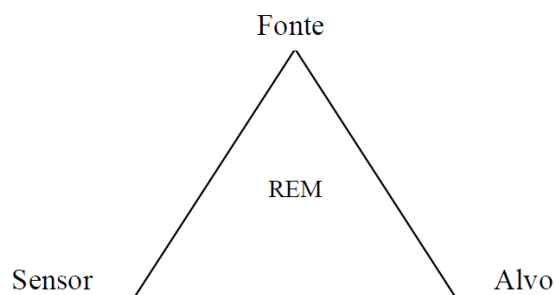


Figura 2 - Elementos fundamentais para aplicação das técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Retirado de (Novo & Ponzoni 2001).

Vale ressaltar que os sensores trabalham com diferentes capacidades de captura e processamentos dos dados, implicando na qualidade e detalhamentos dos dados, e posteriormente influenciando nos aspectos de observação espacial, temporal, espectral e radiométrico (Novo & Pozoni 2001, Ferreira 2006).

Além disto, o sensoriamento remoto a nível terrestre pode ser dividido em: (i) orbital: quando os equipamentos que realizam a coleta de dados estão localizados na orbitar terrestre, comumente em satélites geoestacionários, capturando imagens da superfície terrestre em intervalos de tempo e espaço pré-definidos, normalmente fornecendo as “imagens de satélite”; (ii) suborbital: quando os equipamentos são aerotransportados, geralmente utilizados acoplados em aviões, balões ou drones, os quais produzem de maneira mais comum, fotografias aéreas para o usuário do ambiente SIG (Figura 3) (Piroli 2010).

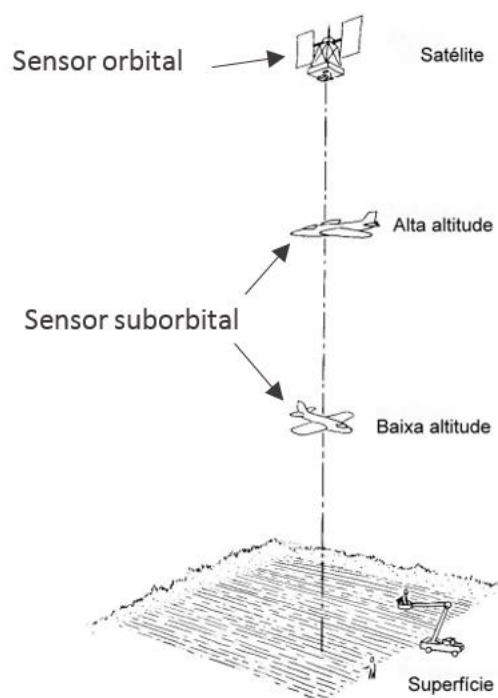


Figura 3 - Representação esquemática da obtenção de dados por meio de sensores orbitais e sensores sub-orbitais. Adaptado de (Rosa 2013).

3.2.2 Geoprocessamento

De acordo com Camara & Davis (2001) o geoprocessamento consiste na área do conhecimento capaz de empregar diversas técnicas de natureza matemática e computacional para tratamento dos dados geográficos, permitindo a integração de diferentes dados em ambiente SIG, para posterior criação e manipulação de bancos de dados georreferenciados, tais técnicas possibilitam ao usuário a realização de tarefas complexas ou mesmo a automação no desenvolvimento de informações cartográficas, comumente identificadas por intermédio de documentos cartográficos (mapas e cartas). Auxiliando na tomada de decisão nas áreas da análise de recursos naturais, transportes, comunicação e planejamento urbano, dentre outras áreas.

Segundo IBGE (2019), dentro do universo de técnicas e tratamentos de dados, as tecnologias de geoprocessamento são competentes para satisfazer o uso e a manipulação dos mais diversos tipos de dados, dos quais destacam-se:

Dados de referência e cadastrais: armazenamento de dados em forma de coordenadas, de natureza vetorial ou matricial, com as feições contendo informações em tabela de atributos em formato alfanumérico, constituindo um banco de dados geoespaciais de referência.

Dados temáticos: são dados referentes a temas específicos, abordando aspectos sobre dados estatísticos, vegetação, uso do solo, recursos hídricos, geologia, dentre outros, de natureza vetorial ou matricial.

Redes: são dados que admitem a estrutura dos dados referenciais e dados temáticos, os dados são armazenados em coordenadas vetoriais com topologia arco-nó que indicam o sentido e fluxo do objeto geográfico, isto tudo inserido no banco de dados.

Imagens de sensoriamento remoto: são imagens especiais, comumente de natureza matricial, constituída por pixels que carregam valores característicos para determinados dados. São obtidas por sensores a bordo de satélites ou aeronaves, a depender do sensor apresentam diferentes níveis de detalhamento.

Modelo digital de elevação (MDE): são modelos digitais, de natureza matricial que representam a altitude da superfície topográfica considerando os elementos na superfície terrestre, como a vegetação e edificações.

Modelo digital de Terreno (MDT): são modelos digitais, de natureza matricial que representam a altitude da superfície topográfica, desconsiderando os elementos da superfície terrestre e considerando apenas o relevo natural.

3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A classificação do tamanho das partículas apresenta uma grande importância para o entendimento da natureza dos depósitos sedimentares, no que diz respeito a proveniência, transporte e ambientes deposicionais, além disto ajuda a pressupor informações importantes sobre o comportamento mecânico e de atividade hidráulica nos terrenos para projetos de engenharia. Para tanto a análise granulométrica constitui uma determinação das dimensões dos grãos existentes em determinada amostra de solo e rochas, com a finalidade, dentre outras, de caracteriza-las de forma estatística e representativa (Dias 2004).

Normalmente a caracterização granulométrica das amostras é expressa em porcentagem, representados graficamente por curvas granulométrica de frequência normal ou acumulada, com o percentual relacionado a massa de cada fração granulométrica devidamente medida (pesagem) (Fernandes *et al.* 2013). Classicamente, as frações granulométricas são estabelecidas inicialmente em ordem decrescente de diâmetro, como cascalho, areia, silte e

argila, com destaque para os três primeiros que podem ser subdivididos em fino, médio e grosso (Wentworth 1922).

Dentre as diversas escalas granulométricas não existe um padrão universal para a determinação das dimensões granulométricas, com basicamente cada escola adotando a caracterização granulométrica mais conveniente (Fernandes *et al.* 2013). Vale ressaltar que as técnicas de peneiramento se adequam geralmente aos sedimentos grosseiros (cascalho e areias) e as técnicas de sedimentação se adequam melhor aos sedimentos finos (silte e argilas), no entanto um análise granulométrica conjunta pode ser desenvolvida com estas duas técnicas (Teixeira *et al.* 2017).

3.3.1 Método da Peneiração

O método mais conhecido para verificar a granulometria presente em uma amostra certamente é o da peneiração. Desenvolvido com a utilização de peneiras de material metálico com malhas específicas, neste método as peneiras são encaixadas umas nas outras formando uma coluna de peneiras que permitem a retenção do material com dimensões de interesse. A ordenação das peneiras é estabelecida de acordo com a abertura das malhas das peneiras em ordem decrescente, do topo para base, e na porção basal um peneiro cego para reter o material que atravessou toda a coluna de peneiras (Dias 2004).

A escolha da série de peneiras para análise granulométrica constitui um dos objetivos de qualquer trabalho de análise granulométrica, estas estabelecem os intervalos granulométricos de interesse, normalmente as malhas são definidas em 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm, com a finalidade de identificar as frações granulométricas mais grosseiras, das quais destacam-se o cascalho e areia. Contudo malhas com aberturas menores podem ser usadas para o detalhamento das frações mais finas, como o silte e argila (Wentworth 1922, Dias 2004).

Após o empilhamento das peneiras estas podem ser agitada manualmente ou se envolver muitas peneiras a coluna deve ser agitada por um aparelho vibratório, comumente conhecido como “agitador de peneiras” (Figura 4), que confere movimentos mecânicos de alta frequência que proporcionam o deslocamento lateral e descendente do conteúdo granulométrico, a fim de acumular as frações granulométricas estabelecida pela malha de cada peneira (Dias 2004).



Figura 4 - Exemplo de um agitador de peneiras. Retirado de (Dias 2004).

3.4 MÉTODO *OPEN END HOLE*

O método denominado *open end hole* (Almeida *et al.* 2006) consiste na determinação da condutividade hidráulica em profundidade, o desenvolvimento deste ensaio de infiltração compreende a utilização de furos no terreno em que se pretende avaliar a condutividade hidráulica, utilizando-se trados manuais ou mesmo trados motorizados, comumente são realizados 4 furos verticais (Figura 5A), preferencialmente, em formato cilíndrico para acomodação de tubos de PVC cravados no fundo, nas profundidades de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 (Fiore 2010) ou apenas 3 furos em profundidade de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m (ANA 2018).

Instalados e fixados os tubos de pvc, adiciona-se água no interior destes tubos até a saturação do solo e a observação de um fluxo descendente uniforme (Figura 5B). Satisfeitas estas condições, verifica-se as medidas de rebaixamento da coluna da água no tubo em relação ao topo, no intervalo de tempo estabelecido para o ensaio (ANA 2018).

Os cálculos de condutividade hidráulica utilizando-se o método *open and hole* são realizados de acordo com a seguinte formula (Almeida *et al.* 2006):

$$Kv = 2,303 \times \left(\frac{R}{4\Delta t} \right) \times \log \frac{h_0}{h_1} \quad \text{Equação 1}$$

K_v = condutividade hidráulica vertical (m/s)

R = raio do tubo (m)

Δt = intervalo de tempo para o rebaixamento da água (min ou s)

$h_0 = H - M_i$ = carga hidráulica inicial (cm ou mm)

$h = H - M_f$ = carga hidráulica final (cm ou mm)

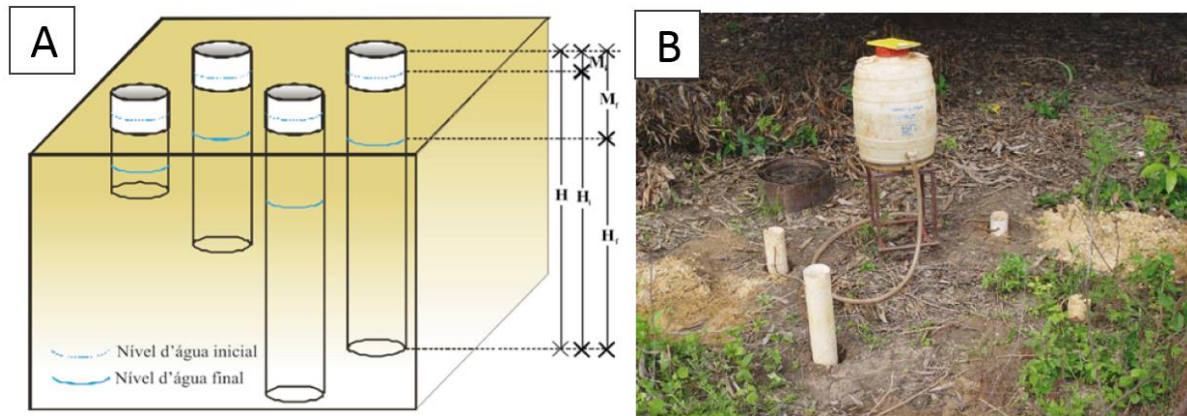


Figura 5 - A) Representação esquemática do ensaio de infiltração do método *open and hole*; B) Desenvolvimento do teste *open and hole* em campo. Fonte: Adaptado de (Almeida *et al.* 2006).

3.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios x (DRX) consiste em um procedimento laboratorial que visa a caracterização de materiais para a indústria, bem como para a análises ambientais, no que diz respeito a superfície terrestre, tal técnica analítica é altamente empregada no meio técnico-científico, em virtude de ser um método não destrutivo de amostras por utilizar apenas ondas eletromagnéticas para se identificar a composição mineralógica das amostras pretendidas (Amorim 2007, Teixeira 2017). Além de oferecer resultados eficientes, confiáveis e de baixo custo, com a finalidade de se obter dados quantitativos e qualitativos de fases cristalinas, no entanto para uma avaliação mais completa deve ser aliado, concomitantemente, a outras técnicas (Farias 2011).

Tal técnica permite a caracterização mineralógica dos constituintes fino dos solos e rochas, bem como dos argilominerais, o quais têm maior destaque no ramo indústria (como a do petróleo, por exemplo), engenharia, agronomia e áreas das geociências (Kafino 2009), no entanto, vale destacar que grandes quantidades do mineral quartzo situados no intervalo granulométrico da fração argila implicam dificuldade da aplicação desta técnica, pois, prejudica a caracterização das demais fases minerais (Albers *et al.* 2002).

4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo compreende o município de Castanhal, localizado na região nordeste do Estado do Pará, contudo a implantação do projeto do aterro sanitário atenderá além de Castanhal (1.029.000 km²), também aos municípios de Santa Izabel do Pará (717.661 km²), Inhangapi (472.605 km²), Santa Maria do Pará (457.724 km²) e São Francisco do Pará (479.441 km²).

O projeto visa a identificação da área adequada à instalação do aterro sanitário, relacionado ao Consórcio Municipal CONCISSS (Castanhal, Inhangapi, Santa Izabel do Pará, Santa Maria do Pará e São Francisco do Pará), uma parceria entre os 5 municípios citados, envolvendo dimensão territorial em torno de 3.156,732 km², que visa atender inicialmente cerca de 327 mil habitantes (IBGE 2019) e ao final cerca de 450 mil habitantes. O acesso principal ao município de Castanhal é realizado pela rodovia BR-316, a qual é interligada a BR-010 (Belém – Brasília); a PA-136 que liga Castanhal ao município de Curuçá; a PA-320 que comunica aos municípios de São Francisco do Pará e; a PA-422 com destino a Inhangapi (Figura 6) (Pinheiro 2007).

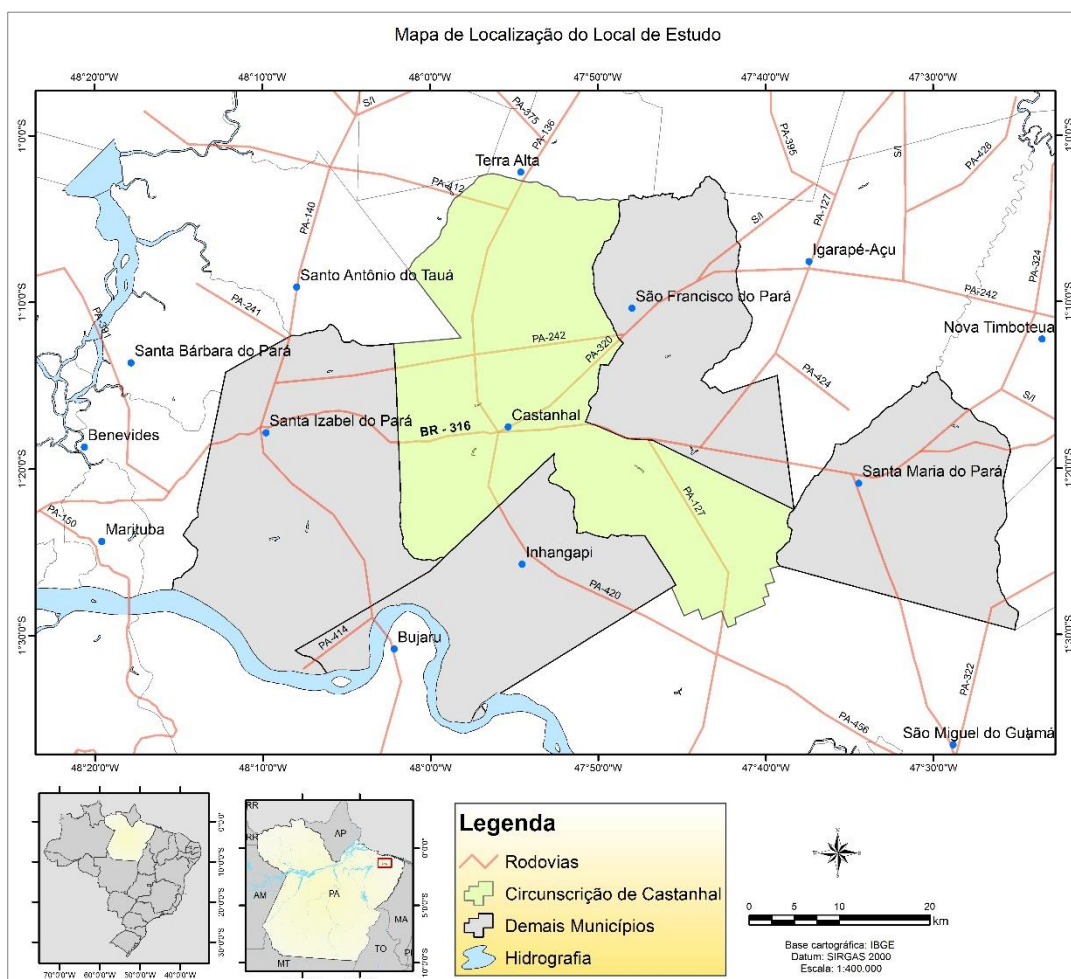


Figura 6 - Mapa de localização da região de estudo, com ênfase no município objeto deste trabalho.

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo está estabelecida sobre a plataforma Pará-Maranhão, que corresponde a porções do embasamento que continuaram tectonicamente estáveis entre as bacias sedimentares, situado no nordeste do estado do Pará. A Plataforma Pará-Maranhão é delimitada pelo Arco Tocantins a sudeste, pelo Cinturão Gurupi e Bacia Bragança-Viseu a leste, pelo Cinturão Amapá a noroeste e, pela bacia do Bacia do Marajó a sul e sudeste (Figura 7) (Costa *et al.* 2002, Rossetti 2006, Amorim 2016).

A estratigrafia da região nordeste do Estado do Pará é definida por rochas que datam deste o Arqueano até o Quaternário, contudo com destaque para o município de Castanhal as unidades estratigráficas são caracterizadas por rochas situadas desde o Mioceno Inferior até o Pleistoceno, estabelecida pelas formações Pirabas (não aflorante) e Barreiras, bem como por sedimentos inconsolidados denominados de sedimentos Pós-Barreiras (Góes 1990, Pinheiro 2007).

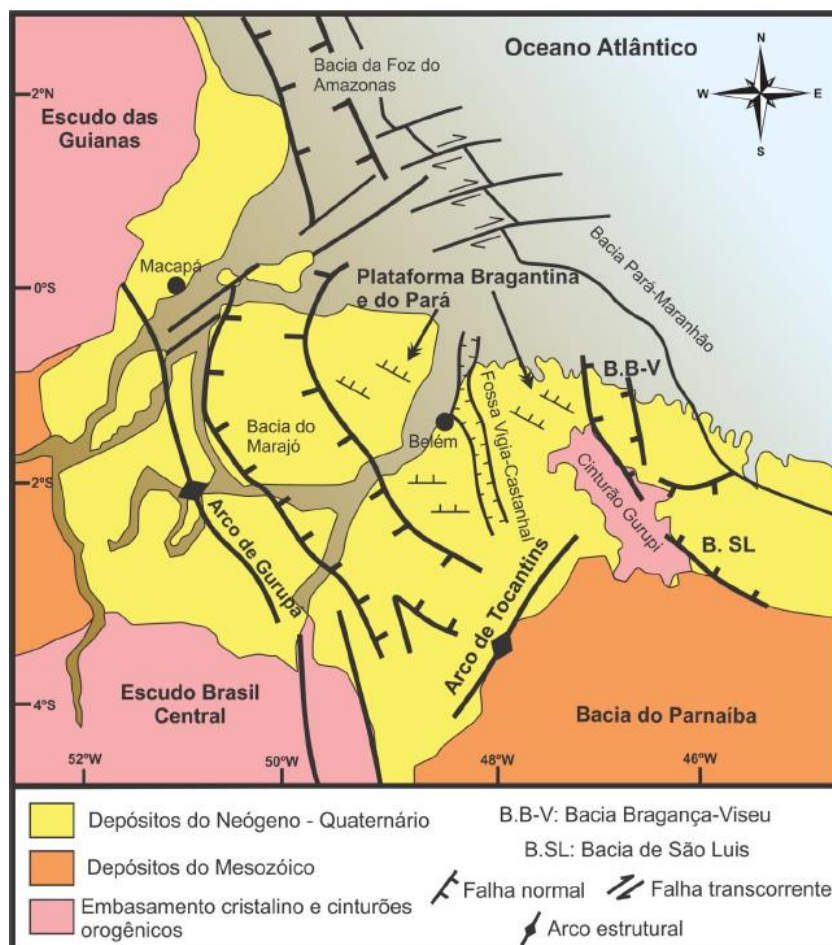


Figura 7 - Localização da Plataforma Pará-Maranhão, com ênfase na delimitação pelos Arcos Tocantins e Amapá, e das Bacias do Marajó e Bragança-Viseu. Fonte: Retirado de (Amorim 2016).

4.1.1 Formação Pirabas

Inicialmente os estudos da Formação Pirabas se propuseram as investigações e análises dos grupos fossilíferos que ocorrem nesta formação, feitas por Petri (1957) que se baseando exclusivamente em foraminíferos, estabeleceu as biofácies Castelo, Canecos e Baunilha Grande. Posteriormente, o trabalho de Ferreira (1977) individualizou as rochas de acordo com a litoestratigrafia, esta foi elaborada com a seguinte divisão da base para o topo: Castelo, Baunilha Grande e Capanema. No entanto, segundo Góes *et al.* (1990) a Formação Pirabas não apresenta um registro estratigráfico singular, mas, sim, registros de fácies intercaladas umas às outras, com ocorrências geográficas irrestritas, ou seja, diferentes fácies anteriormente descritas ocorrem intercaladas em porções distintas do Nordeste do Pará, o que sugere que dentro de um ambiente ocorriam diferentes subambientes, os quais em determinados momentos superponham-se uns aos outros.

De acordo com a análise faciológica a Formação Pirabas é constituída de 7 litofácies: biocalciruditos, biocalcalrenitos estratificados, biocalcarenitos não estratificados, margas e, subordinadamente, biohermitos, folhelhos (negros e verdes) e calcilutitos. Vale ressaltar, que os carbonatos desta formação, quando encontrados em sua forma sã apresentam coloração cinza e quando intemperizados a coloração é modificada para tons amarelados. (Góes *et al.* 1990, Rossetti *et al.* 2013)

As análises faciológicas em consonância com a presença do conteúdo paleontológico comumente encontrado nesta área, caracterizam o ambiente deposicional da Formação Pirabas como um ambiente marinho aberto, com águas de elevadas temperaturas, rasas e agitadas, pois este seria o ambiente propício para originar os carbonatos e estruturas sedimentares tipicamente produzidas por ondas de tempestade como a presença de estratificação cruzada *hummocky* (Góes *etal.* 1990, Rossetti 2004).

4.1.2 Formação Barreiras

A Formação Barreiras ocupa uma grande porção do litoral brasileiro, se estendendo desde o estado do Amapá até o estado do Rio de Janeiro (Rossetti 2006). A formação é constituída por sucessões de rochas siliciclásticas como argilitos com laminação plano-paralela, por vezes bioturbados e com gretas de contração; os arenitos apresentam estratificação cruzada tangencial, estratificação cruzada sigmoidal e arenitos com leitos de argila e estratificação cruzada incipiente; os conglomerados ocorrem com clastos de argila, e com seixos de quartzo (Souza 1992 *apud.* Pinheiro 2009, Bandeira 2008).

O ambiente deposicional é entendido como sistemas fluviais entrelaçados, que comportaram subambientes em sua constituição como planícies de areia, planícies de lama e leques aluviais, com atuação de fenômenos de maré, pois foi reconhecido nestas sucessões siliciclásticas as superfícies de reativação, que são lâminas de argila que preenchem os *foresets* das estratificações cruzadas, além disto as paleocorrentes apresentam caráter bidirecional e as camadas exibem variação cíclica no conteúdo rochoso, provavelmente originado pela atividade de marés (Rossetti *et al.* 2001, Rossetti 2000, Rossetti & Santos Junior 2006).

4.1.3 Sedimentos Pós-Barreiras

Os sedimentos Pós-Barreiras são constituídos por sedimentos inconsolidados de coloração amarela, caracterizada por compreender apenas conteúdo siliciclástico e constituído de areias com conteúdo de argilominerais de estrutura maciça, concreções ferruginosas disseminadas em arenitos quartzosos brancos maciços, além de clastos de arenitos e argilitos (Tatumi *et al.* 2008, Bandeira 2008, Pinheiro 2009).

4.1.4 Contexto Geológico da Área de Estudo

De acordo com Costa *et al.* (2000) e Pinheiro (2007), geologicamente, a área de estudo apresenta apenas rochas aflorantes pertencentes a Formação Barreiras representado por litotipos como:

- (i) argilitos de laminação plano-paralela;
- (ii) arenitos de granulação fina a média com estratificação cruzada acanalada e tangencial,
- (iii) arenitos argilosos, conglomerados com seixos de argilas contendo material ferruginosos, além de ritmitos.

E cobrindo esta formação, ocorre os sedimentos Pós-Barreiras representado por sedimentos inconsolidados areno-argilosos e argilo-arenoso de cor amarela a vermelho (Costa *et al.* 2000, Valente *et al.* 2001).

4.2 ASPECTOS POLÍTICO-ADMINISTRATIVOS E FISIOGRÁFICOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com a Lei n° 9.4433 de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, do ponto de vista político-administrativo, as bacias hidrográficas são unidades

territoriais que servem para implementação de estudos preliminares e gestão da área, para atuação de comitês acerca das propostas de gerenciamento ambiental de curto a médio prazo.

A área de estudo é estabelecida hierarquicamente na Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia que comporta os estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso, Goiás e Distrito Federal, com dimensões em torno de 920 mil km², o que representa 10,8% do território nacional. As nascentes dos rios Tocantins e Araguaia estão localizadas na porção Centro-Oeste do Brasil, no estado de Goiás, com confluência das águas percorrendo até a foz na Baía do Marajó, na região norte, onde também deságuam os rios Pará e Guamá (ANA 2015).

O município de Castanhal tem seus domínios territoriais pertencentes à três bacias hidrográficas localizadas na Região Amazônica, circunscrito neste município: a Bacia Hidrográfica do Rio Guamá, Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim e a Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã (Rocha & Lima 2020, Bandeira 2008).

4.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Guamá

A Bacia Hidrográfica do Rio Guamá que ocupa cerca de 11.870 km², compreendendo parcialmente 19 municípios paraenses, que aparecem no cenário estadual, em virtude da dinâmica econômica inclinada ao avanço da indústria, comércio, mineração e agropecuária, sendo estes: Acará, Ananindeua, Belém, Benevides, Bonito, Bujarú, Capitão Poço, Castanhal, Concordia do Pará, Garrafão do Norte, Inhangapi, Irituia, Mãe do Rio, Ourém, São Domingos do Capim, Santa Izabel do Pará, Santa Luzia do Pará e São Miguel do Pará (Rocha & Lima 2020).

A região apresenta cobertura vegetal natural em torno de 40% (Rocha & Lima 2020; Parizzi *etal.* 2017) constituída por uma floresta ombrófila por ora densa e aberta com vegetação com folhas sempre verdes, além de campos cerrados e vegetação pioneira, contudo, a vegetação encontra-se intensamente alterada, devido a atividade agropecuária, plantação de soja e reflorestamento com eucalipto (Santos 2014). O ciclo hidrogeológico presente na bacia do Rio Guamá, no que tange ao escoamento superficial médio, indica que 29,51% das águas pluviais têm escoamento direto para as confluências dos leitos de rios que compõem as sub-bacias, enquanto o restante do escoamento é subterrâneo, constituindo junto as formações geológicas das formações Barreiras e Pirabas, as unidades aquíferas da região (Matta *etal.* 2000, Rocha *etal.* 2020).

4.2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim

A Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim que ocupa em torno de 2.141,26 km² está estabelecida no nordeste paraense, sendo vizinha da Bacia Hidrográfica do Rio Guamá. Inserida de modo parcial em 12 municípios do Pará, aparece no cenário econômico, devido as atividades agropecuárias, sendo estes: Castanhal, Curuçá, Igarapé-Açu, Magalhães Barata, Maracanã, Marapanim, São Caetano de Odivelas, Santo Antônio do Tauá, Santa Izabel do Pará Terra Alta e Vigia de Nazaré (Andrade *et al.* 2020). O município de Castanhal apresenta a maior parcela de área ocupada com cerca de 25,38% da bacia sob sua jurisdição e possui 48 nascentes em seu território (Gutierrez 2017)

A vegetação na área da Bacia do Rio Marapanim corresponde a 49% da área total da bacia, indicando uma boa parcela de floresta nativa ainda preservada, contudo em diferentes estágios de transformação para sucessão secundária, resultante da agropecuária atuante na região, bem como o processo de desenvolvimento econômico da região nordeste do Pará. Vale ressaltar, que os maiores fragmentos de floresta nativa preservada se encontram na porção norte da Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim, em razão de uma área de preservação permanente decorrente da presença de recurso hídrico, com fragmentos que ultrapassam 1.000 ha de extensão. (Andrade *et al.* 2020, Attanasio *et al.* 2012, Farias *et al.* 2020).

4.2.3 Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã

A Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã situada na mesorregião Nordeste do Pará, está inserida, parcialmente, nos municípios de Bonito, Capanema, Castanhal, Igarapé-açu, Maracanã, Nova Timboteua, Peixe-Boi, Primavera, Salinópolis, Santa Maria do Pará, Santarém Novo, São Francisco do Pará, São João de Pirabas e São Miguel do Guamá. Apresenta as principais nascentes localizadas no município de Santa Maria do Pará com a confluência das águas chegando até a região estuarina, compreendendo os municípios de Santarém Novo e Maracanã (Costa & Lima 2009).

Identifica-se que a cobertura vegetal nas áreas de nascente é caracterizada por floresta remanescente, bem como áreas desmatadas e com vegetação secundária, definida por gramíneas, cultivos agrícolas e palmeiras. Além disto ocorre uma mudança gradual do continente para a área estuarina, conferindo à porção continental formações florestais, à medida que na porção costeira há presença de manguezais, algo decorrente do ambiente fluviomarinho na região dos municípios de Santarém Novo e Maracanã (Costa & Lima 2009).

4.2.4 Contexto das Sub-bacias Hidrográficas da Área de Estudo

Os órgãos públicos dos Estados e da União, bem como a literatura envolvida diante da delimitação de bacias hidrográficas não apresentam um consenso para a classificação de sub-bacias e microbacias no território brasileiro, culminando em classificações que atendem parcialmente a alguns requisitos (Costa & Guimarães 2005).

Os termos sub-bacia e microbacias estão difundidos na literatura, mas os conceitos pertinentes a estes termos não estão ajustados ou em sintonia, e não foram pacificados na literatura, resultando para as sub-bacias conceitos distintos, que consideram as dimensões da sub-bacia ou fluxo local de drenagem. Assim, Faustino (1996) contempla como áreas de drenagem, aquelas superiores a 100 km² e menores que 700 km²; enquanto Santana (2003) analisa que as bacias podem ser fracionadas em número qualquer, considerando o ponto de entrada e saída do fluxo de água em uma dada região de estudo pretendido.

Outro termo recorrente na literatura é o de microbacia, o qual é decorrente da subdivisão de sub-bacias. Para Faustino (1996) as áreas de drenagem que alimentam um curso principal (sub-bacia) podem ser denominadas de microbacia, correspondendo a uma área inferior a 100 km²; em contrapartida Santana (2003) considera que o termo microbacia é estabelecido com denominação empírica, caracterizando de forma análoga ao conceito de sub-bacia hidrográfica

Desta maneira, considerando o entendimento de Faustino (1996), o município de Castanhal apresenta 6 sub-bacias em seu domínio, pertencentes ao contexto das bacias hidrográficas dos rios Guamá, Marapanim e Maracanã (Figura 8).

No que concerne à Bacia hidrográfica do Rio Guamá, Bandeira (2008) identifica a participação das sub-bacia do Rio Apeú (316,47 km²) e sub-bacia do rio Inhangapi (506,67 km²) no município de Castanhal. Vale ressaltar, que de maneira restrita a sul dos limites territoriais do município de Castanhal ocorre outra microbacia, denominada neste trabalho de sub-bacia Igarapé Crauateua (194 km²), que também alimenta a Bacia do Rio Guamá.

De acordo com Bandeira (2008) a Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim na região de estudo é caracterizada por compreender pelo menos duas sub-bacias, denominadas de Sub-bacia do Rio Marapanim (466,56 km²) e Sub-bacia Braço Esquerdo do Rio Marapanim (396,43 km²).

A Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã na região de estudo é caracterizada por apenas uma Sub-bacia, situada na porção sul do município de Castanhal, e denominada Sub-bacia do Rio Maracanã (314,53 km²).

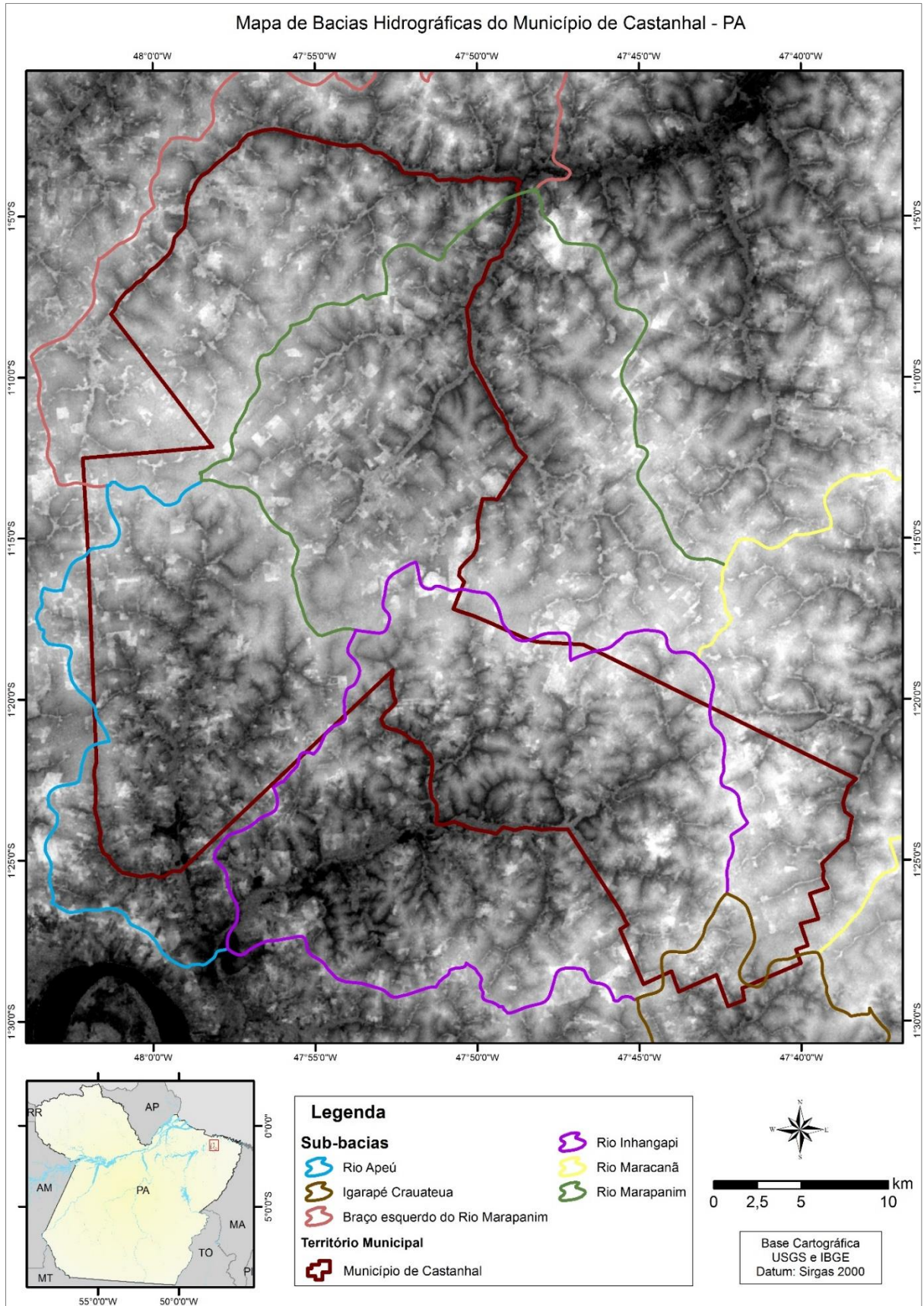


Figura 8 - Bacias Hidrográficas pertencentes a circunscrição do município de Castanhal

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Com vista a selecionar áreas adequadas para instalação do aterro sanitário, o presente estudo visa promover uma aplicação prática, com a finalidade de avaliar o meio físico, espacial e político das áreas previamente selecionadas do município de Castanhal, as quais deverão atender às expectativas da administração pública diretamente interessada, no caso os municípios, assim como aos aspectos técnicos mínimos esperados.

As metodologias empregadas para a execução dos estudos no município de Castanhal, a fim de avaliar as áreas previamente selecionadas para a instalação do aterro sanitário, consistem em:

- Produzir mapas temáticos utilizando os elementos do meio físico e políticos estabelecidos pela NBR 13.896 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT,1997), utilizando o sensoriamento remoto e banco de dados do IBGE (2010), por intermédio do *software ArcGis 10.5.*;
- Análise granulométrica dos sedimentos coletados nos furos de trado por intermédio de peneiramento, de acordo com a classificação proposto por Wentworth (1922);
- Determinar a condutividade hidráulica da zona não saturada de acordo com o método do *open end hole* (Almeida et al. 2016);
- Identificar por Difração de Raio-X os minerais constituintes da zona vadosa;
- Avaliar individualmente as áreas de acordo com a Norma NBR 13.896 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 1997) e identificar a (s) mais viável (is) para locação do aterro sanitário consorciado.

Os dados utilizados no processo de elaboração deste trabalho foram majoritariamente desenvolvidos e obtidos junto a Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), além da obtenção de dados estatísticos e cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Serviço Geológico dos Estados Unidos (IUGS), Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), extensão *Basemap do software ArcGis 10.5*, bem como interpretação e produção de dados vetoriais a partir das imagens obtidas.

5.1 ANÁLISE TÉCNICO - ESPACIAL – NBR – 13.896/1997

Considerando a NBR 13.896/1997, as áreas potenciais para implantação do projeto devem apresentar um meio físico natural e geográfico com condições mínimas exigíveis para implementação e operação do projeto, observando os critérios técnicos previamente definidos (Tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros técnico e espaciais estabelecidos pela NBR 13.896 da ABNT para a seleção do local para implantação do aterro sanitário.

| Crítérios Avaliados | Considerações Técnicas |
|--|--|
| Topografia | Fator determinante para o método construtivo do terreno, em virtude das obras de terraplanagem para a construção da instalação do aterro sanitário. Recomenda-se declividade superior a 1% e inferior a 30%. |
| Geologia e tipos de solos existentes | A característica do material rochoso e da camada de solo sobrejacente implica na determinação da capacidade de infiltração, bem como a velocidade de percolação das águas. |
| Uso do Solo | As áreas devem estar localizadas em regiões em que o solo é usado majoritariamente para fins de atividade rural (agricultura/pecuária). |
| Proximidade aos recursos hídricos | <ul style="list-style-type: none"> Água Superficial: O local de implantação do aterro sanitário deve estar no mínimo 200 metros de qualquer curso de água, considerando lagos, rios e oceano, e a distância mínima de 50 metros de qualquer vala ou drenagem do sistema de saneamento público ou particular. Água Subterrânea: Entre a superfície mais baixa do aterro sanitário e a superfície mais alta do nível do lençol freático, deve haver uma camada impermeável de solo de no mínima de 1,5 metros, com nível do lençol freático medido em período de maior precipitação. |
| Distância mínima dos núcleos populacionais | Recomenda-se uma distância mínima de 500 metros de núcleos populacionais, contudo deve ser analisado os parâmetros socioeconômicos da região, pois os aterros podem atrair pessoas de baixa renda ou sem qualificação profissional que passam a viver de catação de lixo em condições insalubres e desumanas, de todo modo, se o local de implantação ocorrer em áreas assim, deve haver planos de contingência para alocação destas pessoas em cooperativas de catadores. |
| Distância ao centro geométrico | Desejável que o percurso de ida e volta por ruas, rodovias e estradas seja o menor possível, para redução de gastos com o transporte de resíduos sólidos. |
| Permeabilidade do solo natural | Considerando um solo natural e extenso, o coeficiente de permeabilidade deve ser inferior a 10^{-5} cm/s, em casos excepcionais 10^{-4} cm/s, e uma zona não saturada de espessura superior a 3 metros. |
| Extensão da bacia de drenagem | A bacia de drenagem deve ser pequena e não deve ter a contribuição elevada de águas meteóricas, a fim de se evitar o grande fluxo de água no aterro sanitário. |
| Vida útil mínima | Recomenda-se aterros sanitários com vida útil mínima de 10 anos. |

Fonte: Modificado de (Monteiro *et al.* 2001, Melo Junior 2019.)

Para o desenvolvimento do trabalho em ambiente SIG foi necessária a aquisição de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de aproximadamente 30 metros, obtidos no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Contudo, o município de Castanhal necessitou de duas imagens SRTM (*SRTMIS02W048V3 e SRTMIS02W049V3*) para contemplar de maneira integral o território do município (Figura 10).

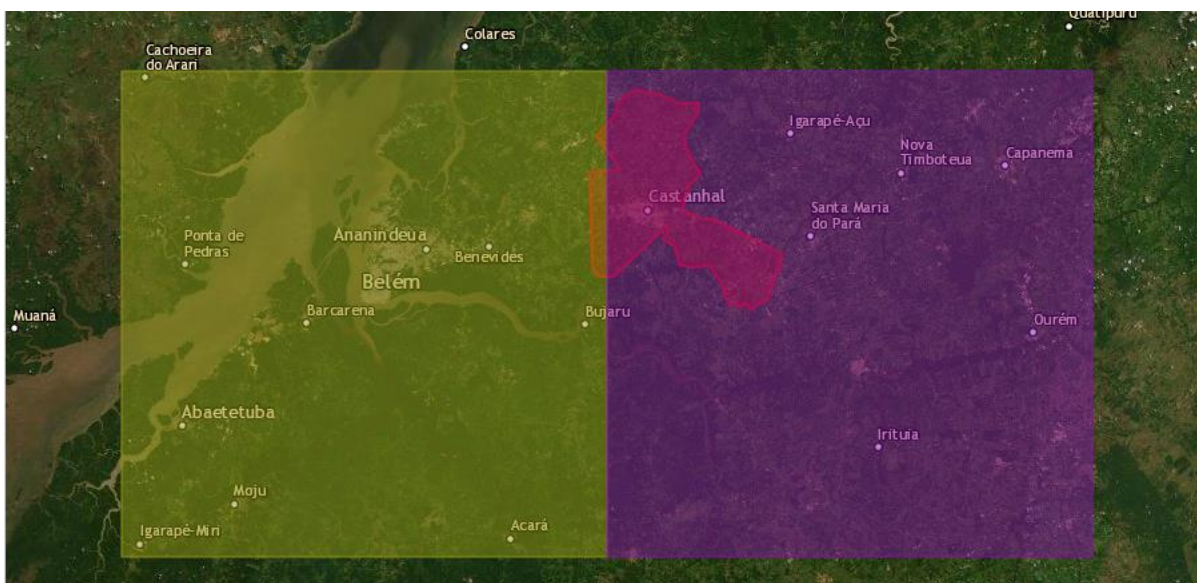


Figura 10 - Imagens SRTM necessárias para o desenvolvimento da análise espacial do Município de Castanhal. Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS 2019).

Houve a necessidade dentro do *software ArcGis 10.5* de realizar a unificação destas duas imagens SRTM, com a utilização de um mosaico para transformar em apenas uma imagem *Raster*.

5.1.2 Análise Granulométrica

Foram coletadas 20 amostras de sedimentos inconsolidados da região de Castanhal, sendo todas as amostras coletadas no intervalo entre 0,0 m e 1,5m de profundidade com a utilização de um trado motorizado com broca de 4 polegadas de diâmetro.

Posteriormente, as amostras foram alojadas na estufa e submetidas uma temperatura de 100 °C, durante 24 horas, para, em seguida, serem dispostas em recipientes plásticos vedados. A próxima etapa consistiu em retirar e homogeneizar as amostras aplicando o processo de quarteamento manual, a fim de obter uma porção final em torno de 50 g.

Para a realização da análise granulométrica foi utilizado o método de peneiramento a úmido, de acordo com o Procedimento Operacional Padrão, conforme o manual da CPRM

“Separação de Areia, Silte e Argila” da CPRM. O método por via úmida foi empregado, em virtude do material coletado apresentar uma singularidade em reter material, pois as amostras provenientes das áreas previamente selecionadas, em alguns casos, apresentaram grãos de sedimentos muito finos (< 2 mm) com baixa esfericidade e formatos sub-angulosos e angulosos, e sobretudo espaços vazios na estrutura do grão, o que conseqüentemente abrigava e retia grãos mais finos como silte e argila no processo de peneiramento tradicional.

Para efeitos finais, a fração de areia após secagem foi colocada no jogo de peneiras correspondente a Tabela 2, a fim de identificar detalhadamente os intervalos de cada fração retida nestas peneiras, frações estas pesadas na balança com precisão de 0,0001 g, para o melhor detalhamento do conteúdo. Para a fração silte restante, foi feita a pesagem na balança de precisão semelhante a fração areia. A fração argila teve o peso obtido como a diferença entre o peso inicial da amostra e o peso da areia somado ao silte (Equação 1).

$$\text{Peso da argila} = \text{Peso inicial} - (\text{Peso areia} + \text{Peso silte}) \rightarrow \text{Equação 1}$$

Tabela 2 - Classificação granulométrica de Wentworth 1922.

| Classificação de Wentworth (1992) | Abertura (mm) | Tyler/Mesh | ABNT/ASTM |
|-----------------------------------|---------------|------------|-----------|
| Cascalho muito fino | 2 | 9 | 10 |
| Areia muito grossa | 1 | 16 | 18 |
| Areia grossa | 0,5 | 32 | 35 |
| Areia média | 0,25 | 60 | 60 |
| Areia fina | 0,125 | 115 | 120 |
| Areia muito fina | 0,0625 | 250 | 230 |
| Silte | 0,0039 | 400 | 400 |
| Argila | < 0,0039 | < 400 | < 400 |

5.1.3 Testes de Infiltração *In Situ*

Para a realização do teste de infiltração para determinar a condutividade hidráulica da zona vadosa, foi utilizado o método *Open End Hole* (Almeida *et al.* 2006), quando foram efetuadas 20 sondagens a trado em todas as áreas previamente selecionadas nos limites do município de Castanhal, atendendo a seguinte condição: Três ensaios de infiltração em cada área de estudo, com exceção da Área 2 onde foi possível realizar apenas dois ensaios de infiltração.

Para a execução deste método foi utilizado um trado motorizado com broca de 4 polegadas de diâmetro, 3 tubos de PVC, com dimensões de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m de comprimento por 100 mm de diâmetro. No desenvolvimento dos trabalhos práticos foram elaborados 3 furos verticais de geometria cilíndrica, equidistantes por 1 metro, formando um triângulo equilátero, com profundidades equivalentes aos comprimentos dos tubos de PVC (0,5 m, 1,0 m e 1,5m), a fim de inseri-los e acomodá-los nestes espaços (Figura 11 e Figura 12).

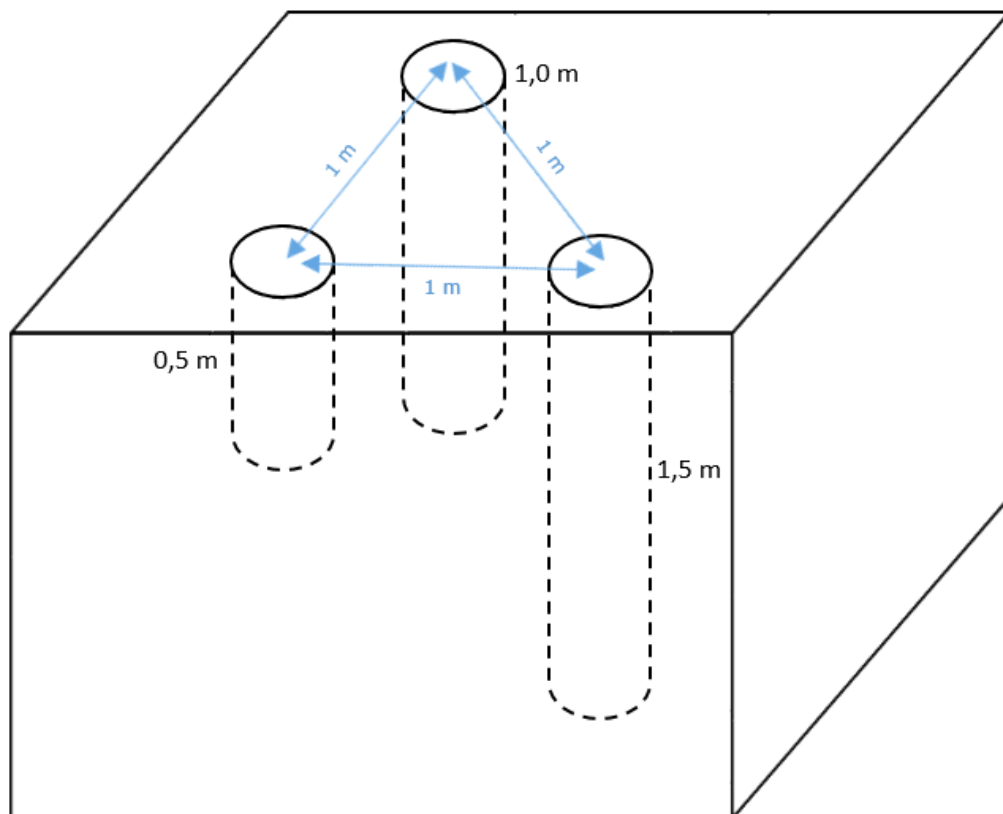


Figura 11 - Representação esquemática da disposição dos tubos de PVC para posterior execução do teste de condutividade hidráulica pelo método *Open And Hole*.

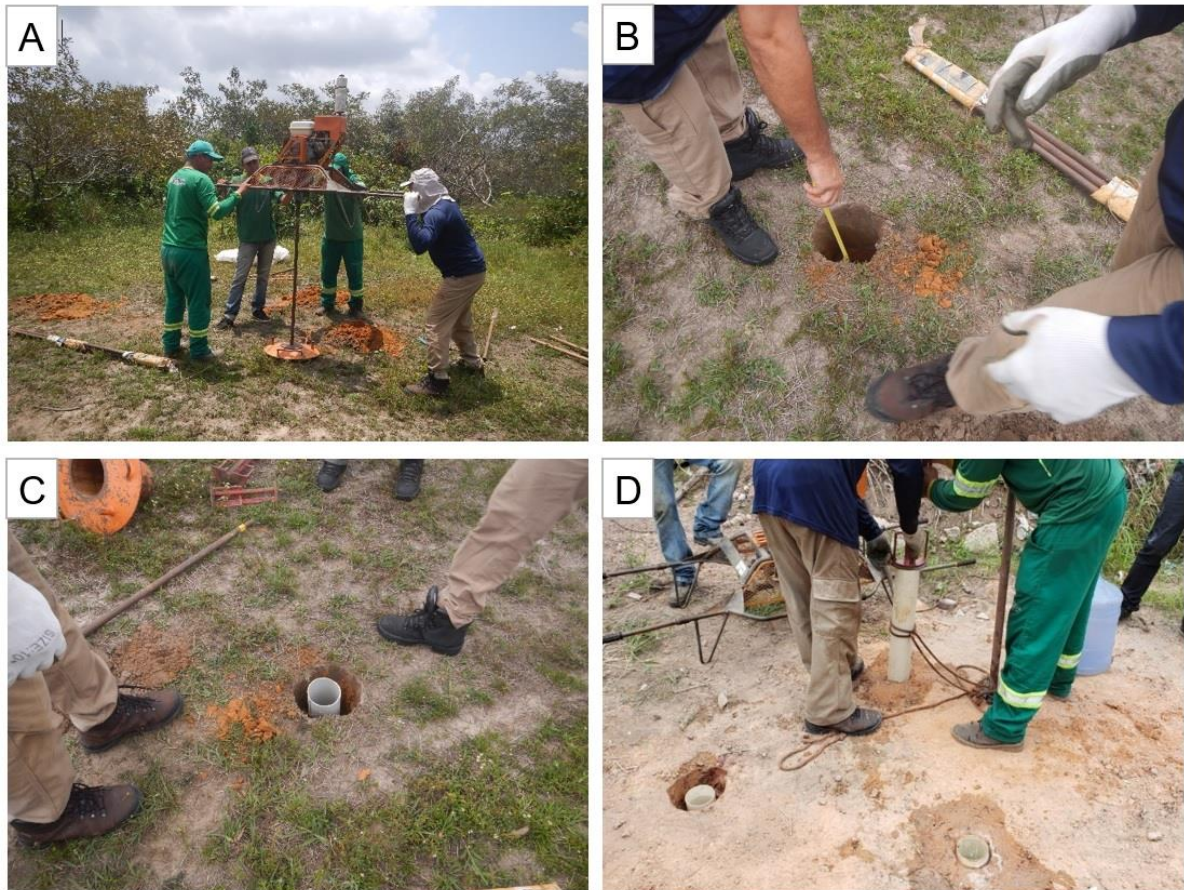


Figura 12 - A) Elaboração do furo vertical com trado motorizado; B) Verificação da profundidade pretendida do furo de trado; C) Acomodação do tubo de PVC no espaço escavado, bem como a fixação deste no fundo do furo; D) Três tubos equidistantes uns dos outros formando um triângulo equilátero.

Posteriormente, cada um dos 3 tubos de PVC é preenchido com água até que se observe na superfície a estabilização do nível, no caso a saturação do solo, então utiliza-se um cronômetro para medir o tempo em segundos e uma trena graduada em mm para medir o rebaixamento do nível de água em cada tubo, ou seja, a distância entre o topo do tubo e o nível de água, para tal aproveitou-se o intervalo de tempo de 1 minuto (T_0), até o tempo preferencial em torno de 20 minutos, salvo quando se atingisse a saturação do terreno ou infiltração integral da água.

Os parâmetros utilizados pelo método *open end hole* para determinar a condutividade hidráulica da zona não saturada são:

K_v = condutividade hidráulica vertical (m/min ou m/s)

R = raio do tubo (m)

Δt = intervalo de tempo para o rebaixamento da água (min ou s)

$h_0 = H - M_i$ = carga hidráulica inicial (cm)

$h = H - M_f$ = carga hidráulica final (cm)

H = altura da boca do cano até o fundo da sondagem (cm)

Tais grandezas são aplicadas na equação:

$$Kv = 2,303 \times \left(\frac{R}{4\Delta t} \right) \times \log \frac{h_0}{h_1} \quad \text{Equação 2}$$

5.1.4 Difração de Raio-X

Foram coletadas 20 amostras de sedimentos inconsolidados entre os intervalos de 0,0 m a 1,5 m com a utilização de um trado motorizado com broca de 4 polegadas de diâmetro. As amostras correspondem ao mesmo conteúdo que foi utilizado para realizar as análises granulométricas.

O conteúdo foi então subdividido para análise laboratorial de difração de Raio-x, sendo preparado no Laboratório de Análises Mineraias - LAMIN-BE, do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

O material foi seco ao ar livre, em seguida destorroado manualmente em gral de ágata, seco em estufa a 100° C, por 24 horas, a fim retirar o excesso de água. Posteriormente, as amostras foram moídas em gral de ágata, até todo o conteúdo de sedimentos atingir a fração granulométrica adequada para a realização da difração de Raios-X, situada na fração silte ($0,06 < \text{silte} > 0,0039$). Por conseguinte, o material foi encaminhado ao LAMIN-RJ, no Escritório do Rio de Janeiro, para os trabalhos de identificação mineralógica por difração de raios-x.

A metodologia utilizada pelo LAMIM-RJ consistiu em análises com Difratorômetro de raios x modelo *X'PERT PRO MPD* (PW 3040 60) da PANalytical, com Goniômetro PW 3050 60 (Theta/Theta) e com tubo de raios x cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00 foco fino longo, 2200 W, 60 kv. O detector utilizado é do tipo *RTMS, X'Celerator*. A aquisição de dados foi feita com o software *X'Pert Data Collector*, versão 2.1.a, e o tratamento dos dados com o software *X'Pert HighScore*, versão 3.0d, também da PANalytical.

A identificação dos minerais é feita por intermédio da comparação do difratograma obtido com padrões de fichas previamente estabelecidas no banco de dados do ICDD-PDF (*International Center dor Diffraction Data Powder Diffraction File*). As fichas são específicas para cada mineral (por ex. quartzo, 46 1045) podendo haver diferentes fichas para o mesmo

mineral, principalmente, quando há variações na composição química, soluções sólidas dentre outras variáveis.

5.1.5 Matriz de ponderação para seleção de áreas

A proposta metodológica de avaliação e seleção multicriteriosa compreende o levantamento dos aspectos técnicos, econômicos, políticos e sociais de cada área previamente selecionada, com ênfase na norma técnica NBR 13.896/1997; além de focar na legislação vigente, assim como em aspectos pertinentes como a análise espacial em ambiente SIG, condutividade hidráulica, assembleia mineralógica e caracterização granulométrica. Todos estes parâmetros são apresentados de maneira sistematizada, de acordo com os itens das normas para a implantação do empreendimento do aterro sanitário.

Para a avaliação conjunta dos parâmetros técnico, econômico, político e social empregou-se a matriz de ponderação proposta por Krebs *et al.* (1999), bem como posteriores modificações de Monteiro *et al.* (2001) e Melo Junior (2019), com o propósito de atribuir uma pontuação específica às áreas, de acordo com a hierarquia de prioridade dos critérios e seus respectivos pesos e, ao percentual de atendimento.

De acordo com Monteiro *et al.* (2001) os critérios podem ser preferencialmente hierarquizados conforme o atendimento das condicionantes da legislação ambiental, político/social, econômico e técnico, nesta ordem (Tabela 3).

Tabela 3 - Hierarquia dos critérios

| Critério | Prioridade |
|--|------------|
| Atendimento à legislação ambiental | 1 |
| Atendimento aos condicionantes político-sociais | 2 |
| Atendimento aos principais condicionantes econômicos | 3 |
| Atendimento aos principais condicionantes técnicos | 4 |
| Atendimento aos demais condicionantes econômicos | 5 |
| Atendimento aos demais condicionantes técnicos | 6 |

Fonte: (Monteiro *et al.* 2001.)

No que tange ao tipo/percentual de atendimento Monteiro *et al.*, (2001) considera que se o critério é atendido totalmente (100%) atribui-se o valor integral do peso, se o critério atendido parcial ou com obras (50%) atribui-se a metade do peso, se o critério não é atendido (0%) é atribuído o valor 0 ao peso (Tabela 4).

Tabela 4 - Relação de pontuação entre os critérios e o tipo de atendimento.

| Pesos dos Critérios e do Tipo de Atendimento | | | | |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Prioridade dos Critérios | Pesos dos Critérios | Notas dos critérios | | |
| | | Atendimento total (100%) | Atendimento Parcial (50%) | Não Atendido (0%) |
| 1 | 10 | 10 | 5 | 0 |
| 2 | 6 | 6 | 3 | 0 |
| 3 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| 4 | 3 | 3 | 1,5 | 0 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 1 | 0,5 | 0 |

Fonte: (Monteiro *et al.* 2001).

No desenvolvimento da construção de uma matriz de ponderação, algumas áreas previamente selecionadas podem possuir critério que não são atendidos, indicando por si só, este critério, a absoluta inaptidão da área para receber a instalação do aterro sanitário, pois estes vão de encontro a legislação ambiental em vigor, como por exemplo a inserção destas em áreas de proteção permanente (APP).

6 DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS E APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS PARA A SELEÇÃO DA ÁREA

6.1 GEOPROCESSAMENTO

6.1.1 Análise da Declividade

Um dos critérios elencados pela NBR 13.896/1997 considera a declividade do terreno a ser escolhido para o estabelecimento e desenvolvimento de aterros sanitários, pois este fator influenciará diretamente nos custos e nos trabalhos iniciais de terraplanagem e preparo do terreno para receber os resíduos sólidos, no desempenho diário de atividades do futuro empreendimento, além de influir no escoamento superficial das águas pluviais.

O mapa de declividade do município de Castanhal (Figura 13) foi elaborado a partir da imagem SRTM, considerando conjuntamente a classificação quanto aos intervalos de classes de declive do terreno (Tabela 5), que considera a limitação do uso do solo em função da suscetibilidade de erosão (Ramalho Filho & Beek 1995, Corseuli & Campos 2007, Melo Junior 2019), utilizando a ferramenta *Reclassify* do *software ArcGis 10.5* para adequação destes intervalos em ambiente SIG.

Tabela 5 - Classificação do relevo e declividade.

| Declividade (%) | Tipo de Relevo |
|-----------------|------------------------------|
| 0 – 3% | Relevo Plano |
| 3 – 8% | Relevo Suavemente Ondulado |
| 8 – 20% | Relevo Ondulado |
| 20 – 45% | Relevo Fortemente Ondulado |
| 45 – 75% | Relevo Montanhoso |
| >75% | Relevo Fortemente Montanhoso |

Fonte: (Ramalho Filho & Beek 1995, Corseuli & Campos 2007, Melo Junior 2019).

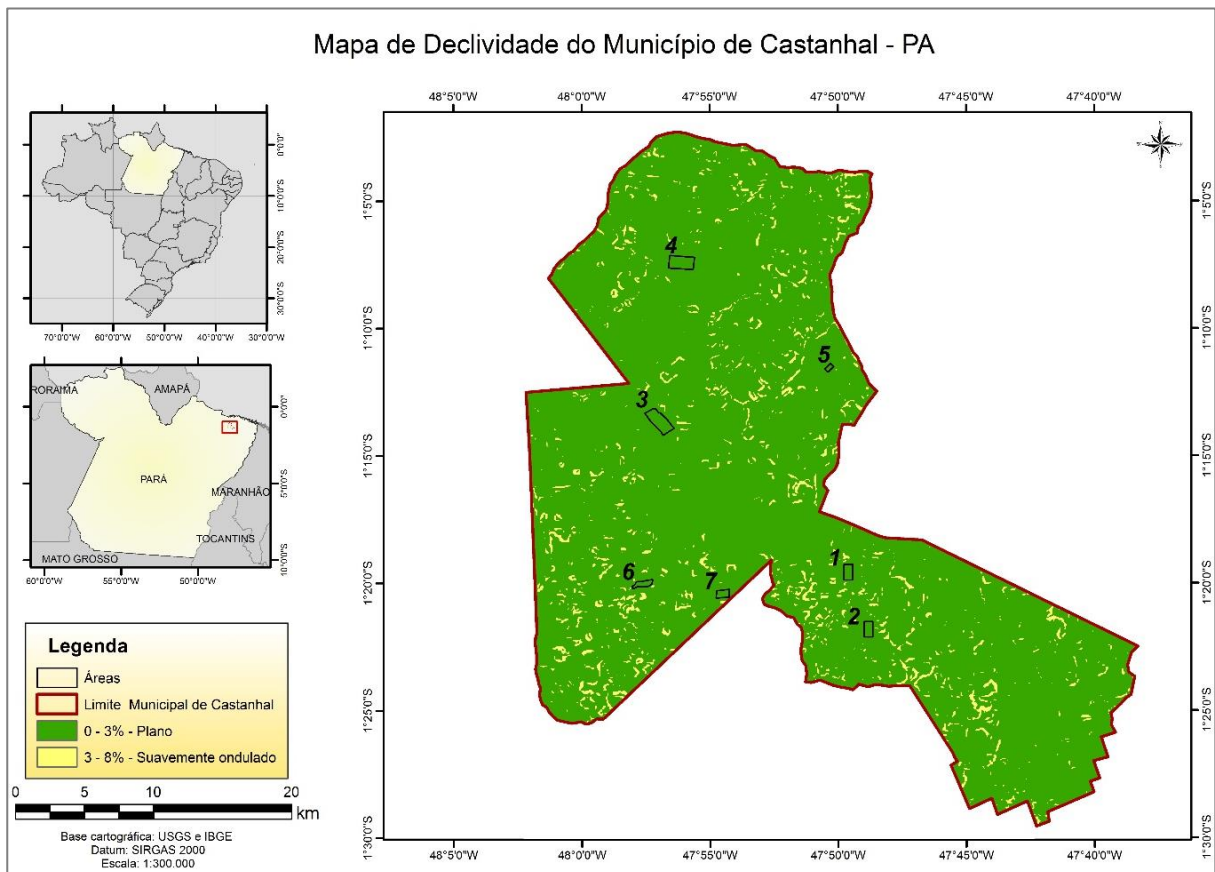


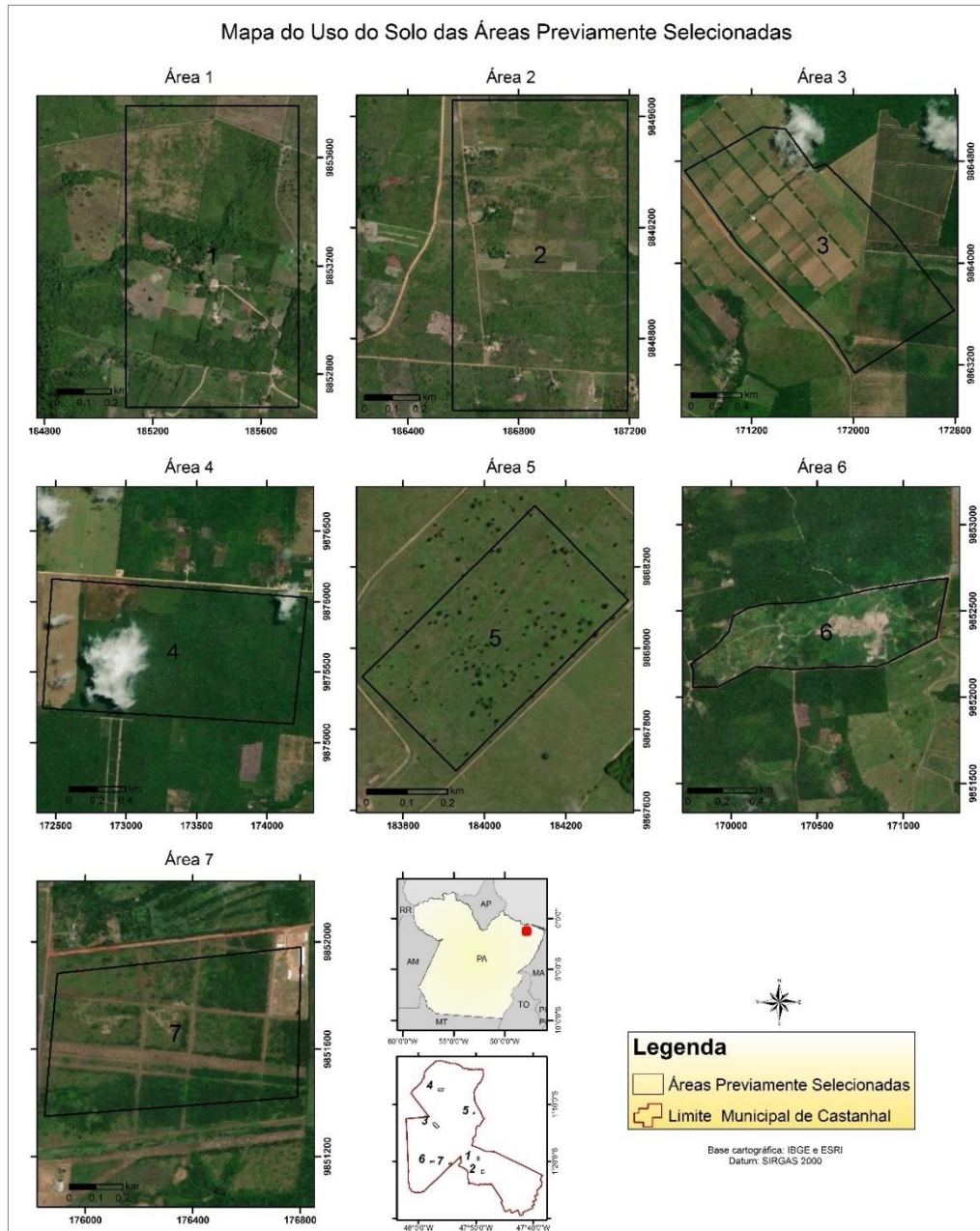
Figura 13 - Mapa de declividade do Município de Castanhal.

Como observado no mapa da Figura 13, o fator declividade não é um impeditivo para a construção de aterro sanitário do CONCISSS, pois verifica-se que toda a extensão dos limites de Castanhal está em condições aptas a instalação do empreendimento, com índices de declividade abaixo de 8%.

6.1.2 Uso do Solo das Áreas Previamente Selecionadas

De acordo com a NBR 13.896/1997 os aterros sanitários devem obedecer a legislação local de uso de solo, a fim de que cada município possa compreender as particularidades fisiográficas e político-sociais pertencente às respectivas cidades. Contudo, não há legislação específica vigente para compreender o uso do solo para o município de Castanhal.

Desta maneira, considerando Monteiro *et al.* (2001) as áreas devem estar localizadas em regiões em que o uso do solo seja predominantemente para fins de atividade rural (agricultura/pecuária), pois não haveria conflitos irremediáveis, em virtude da pequena ou ausente taxa de urbanização, algo perfeitamente condizente com as áreas previamente selecionadas (Figura 14).



6.1.3 Distância Mínima de Cursos da Água Superficiais

O município de Castanhal tem sua circunscrição municipal inserida em 3 bacias hidrográficas, denominadas: (i) Bacia Hidrográfica do Rio Guamá; (ii) Bacia Hidrográfica do Rio Maracanã e; (iii) Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim (Bandeira 2008, Rocha & Lima 2020).

Os principais rios que percorrem o município são os rios Apeú e Inhangapi, os quais servem de limite territorial parcial com outros municípios, sendo este, a sul o Rio Inhangapi estabelece limite parcial com o município homônimo; assim como o Rio Apeú que tem seus

afluentes a sudoeste estabelecendo limite parcial com o município de Santa Isabel do Pará (Menezes *et al.* 2018).

Considerando interdependências dos rios da região que transpassam mais de um município, é necessário um trabalho minucioso de extração da rede de drenagem para o município de Castanhal, assim, o trabalho de extração de drenagem foi feito manualmente com a observação de imagens SRTM e a extensão *Basemap* do *software ArcGis 10.5* para a definição das feições lineares de drenagem, de acordo com o método lógico-sistemático de Soares e Fiori (1978).

Considerando a NBR 13.896/1997 (ABNT) as áreas indicadas para a instalação do aterro devem compreender uma distância mínima de 200 metros de qualquer corpo da água, incluindo lagos, rios e oceanos. Portanto, fora estabelecido que os intervalos inferiores a 200 metros partir dos cursos de água superficiais seriam evitados para implantação do aterro sanitário, enquanto as porções sem restrição serão locais viáveis (Figura 15).

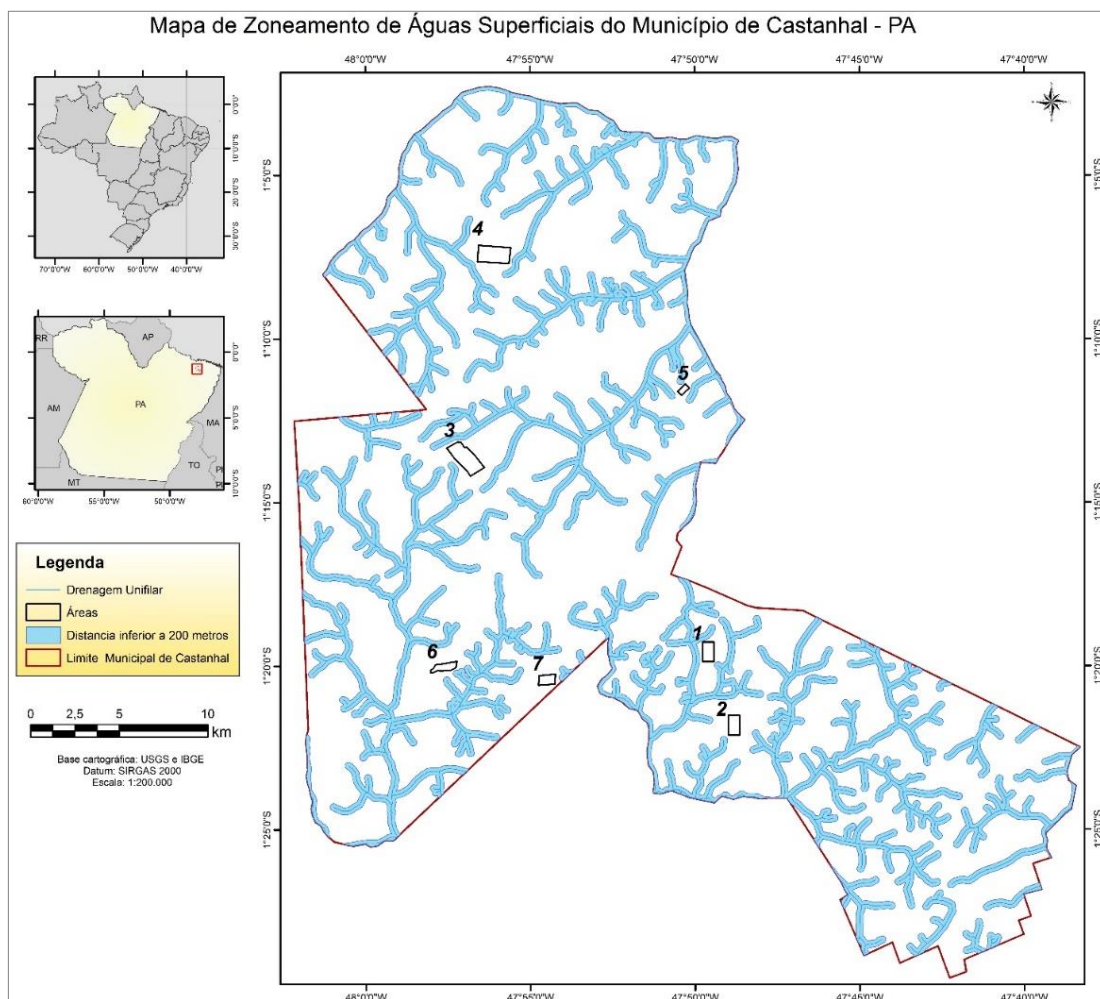


Figura 15 - Mapa de distância mínima das águas superficiais do Município de Castanhal.

6.1.4 Distância dos Centros Produtores de Resíduos Sólidos

Para efeitos desta distância máxima e mínima a ser percorrida, Melo Junior (2019) considera que é necessário compreender as características fisiográficas e sociais de cada município, como o fator topografia do terreno pretendido - para que o estudo em questão apresente condições ideais em sua totalidade - além da disponibilidade de áreas promissoras para o desenvolvimento do projeto. Percebendo estas peculiaridades vários autores propõem diversas distâncias relativas ao centro produtor de resíduos sólidos, assim, Melo Junior (2019) considera distância entre 5 e 10 km; Correia & Lança (2008) e Goez (2015) consideram a distância entre 5 e 15 km e; Silva (2019) considera a distância entre 5 e 20 km.

Desta maneira, considerando que o projeto do consorcio CONCISSS visa atender além de Castanhal, outros 4 municípios, e, que a circunscrição do município de Castanhal não apresenta fatores restritivos em relação à topografia, sendo que este apresenta limites territoriais de forma irregular, caracterizado pelo achatamento no eixo E-W e pelo alongamento no eixo N-S, além de considerar o viés econômico para os atores municipais envolvidos no projeto, serão estimados valores entre 5 a 20 km para o município de Castanhal em relação ao Centro Produtor de Lixo (CPL); enquanto que, para os demais municípios, serão atribuídos valores entre 5 e 45 km de distância do CPL, por considerar as maiores distâncias em relação ao CPL da sede de Castanhal.

Considerando que o trabalho central para a locação do aterro sanitário será desenvolvido inteiramente na circunscrição de Castanhal e, este representa o maior centro produtor de resíduos sólidos, foi dada maior prioridade para as adjacências deste município, valorizando de forma suplementar os centros urbanos dos demais municípios contemplados no CONCISSS (Tabela 6).

Tabela 6 - Distância do centro e peso atribuído.

| Distância do Centro Urbano de Castanhal (km) | Nota Atribuída (x3) | Distância do Centro Urbano dos Demais (km) Municípios (km) | Nota Atribuída |
|--|---------------------|--|----------------|
| 5 – 10 km | 10 | 5 – 10 km | 10 |
| 10 – 15 km | 9 | 10 – 15 km | 9 |
| 15 – 20 km | 8 | 15 – 20 km | 8 |
| - | - | 20 – 25 km | 7 |
| - | - | 25 – 30 km | 6 |
| - | - | 30 – 35 km | 5 |
| - | - | 35 – 40 km | 4 |
| - | - | 40 – 45 km | 3 |

Apreciando a distância dos centros urbanos dos municípios de Santa Maria do Pará, Inhangapi, São Francisco do Pará, Santa Izabel do Pará e Castanhal foi necessário ponderar no *software ArcGis 10.5* acerca das distâncias mínimas outrora definidas. Assim, foram definidos os centros urbanos utilizando a extensão *Basemap* para delimita-los, em seguida utilizou-se o “*ArcToolbox*” e a ferramenta “*Euclidian Distance*” para estabelecer de forma concêntrica (zonas) a distância em quilômetros dos centros urbanos do 5 municípios citados anteriormente, posteriormente cada centro urbano zoneado destes municípios teve a sua distância em quilômetros reclassificada com a utilização da ferramenta “*Reclassify*”, conforme apresentado na Figura 16, de acordo com a distância do centro descritos na Tabela 6.

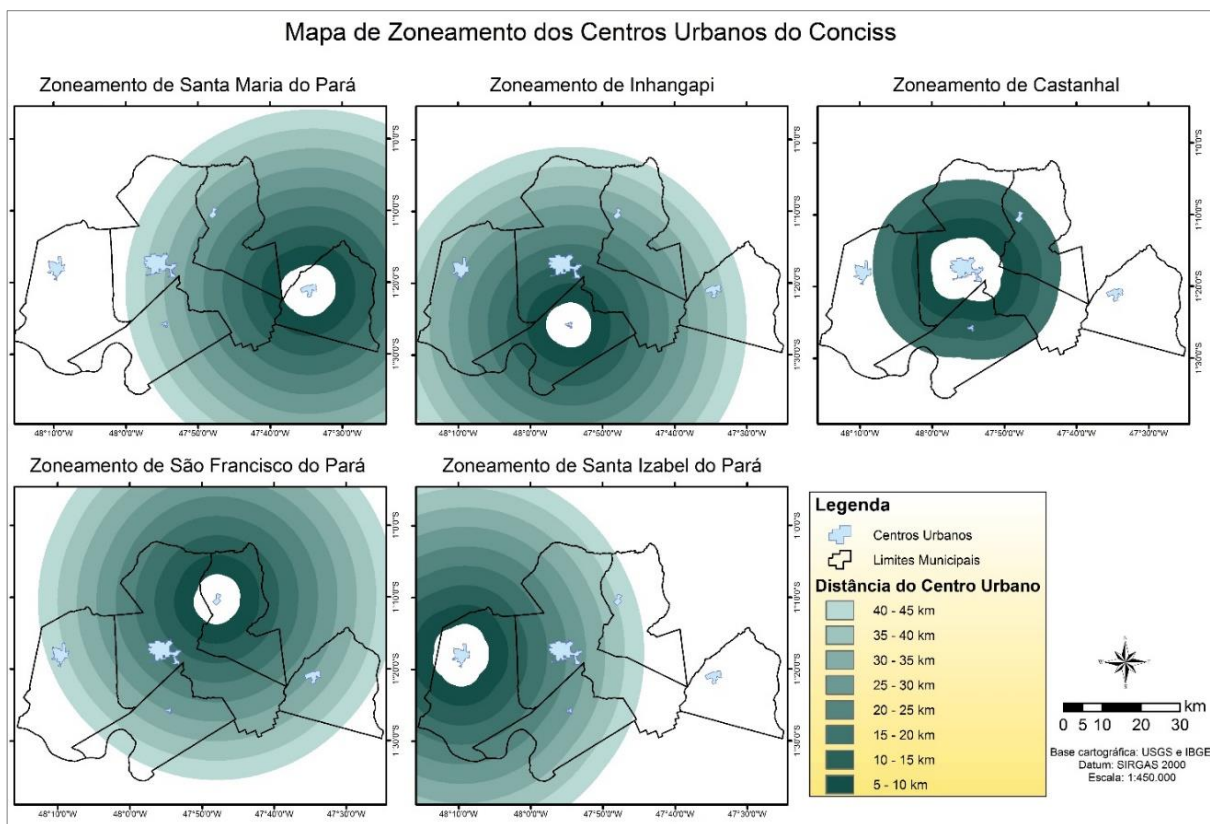


Figura 16 - Mapa de zoneamento dos centros urbanos dos municípios inseridos no caso do CONCISS.

6.1.5 Distância dos Núcleos Populacionais

Além do centros urbanos dos municípios envolvidos, a NBR 13.896/1997 também considera que os núcleos populacionais sejam incluídos ao avaliar-se o local adequado para a instalação do aterro sanitário, em respeito às condições da dignidade humana em que as populações locais estarão condicionadas com a instalação do mesmo, devido aos odores desagradáveis e a disseminação de vetores que possam incomodar os moradores destes núcleos populacionais, a distância mínima recomendada destes núcleos populacionais é estabelecida em

500 metros. Portanto, as distâncias inferiores a 500 metros dos núcleos populacionais têm definitivamente absoluta inaptidão para a seleção de áreas adequadas (Figura 17).

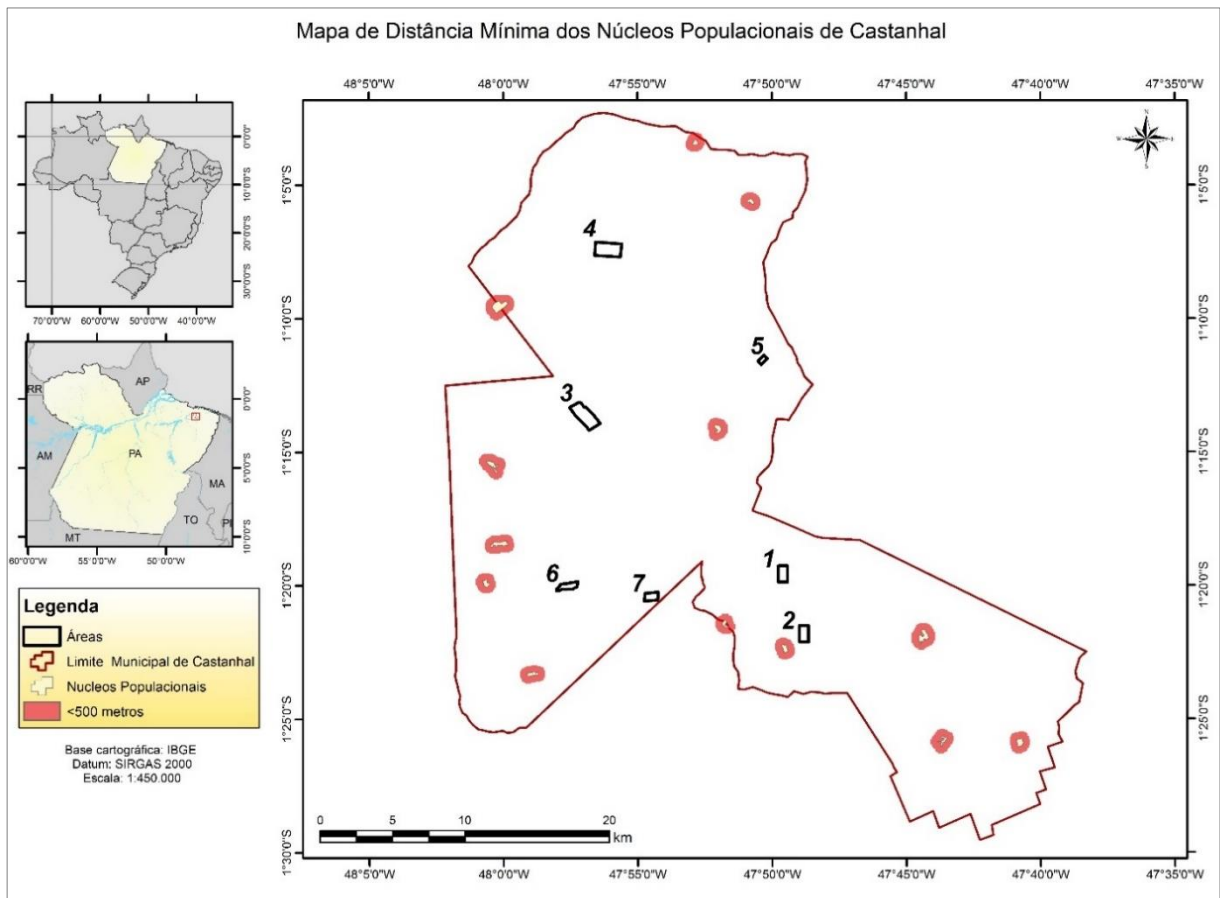


Figura 17 - Mapa de distância dos núcleos populacionais de Castanhal

Por conseguinte, com os dados obtidos por intermédio do zoneamento dos centros urbanos e distância de núcleos populacionais, da Figura 16 e Figura 17, respectivamente, foi elaborado um novo mapa a partir da ferramenta “*Raster Calculator*” utilizando os pesos atribuídos na Tabela 6, e excluindo as adjacências inferiores a 500 metros de núcleos populacionais, obteve-se as áreas mais promissoras para instalação do projeto, e que atendam de forma mais equidistante possível os centros urbanos produtores de resíduos sólidos, destes municípios (Figura 18).

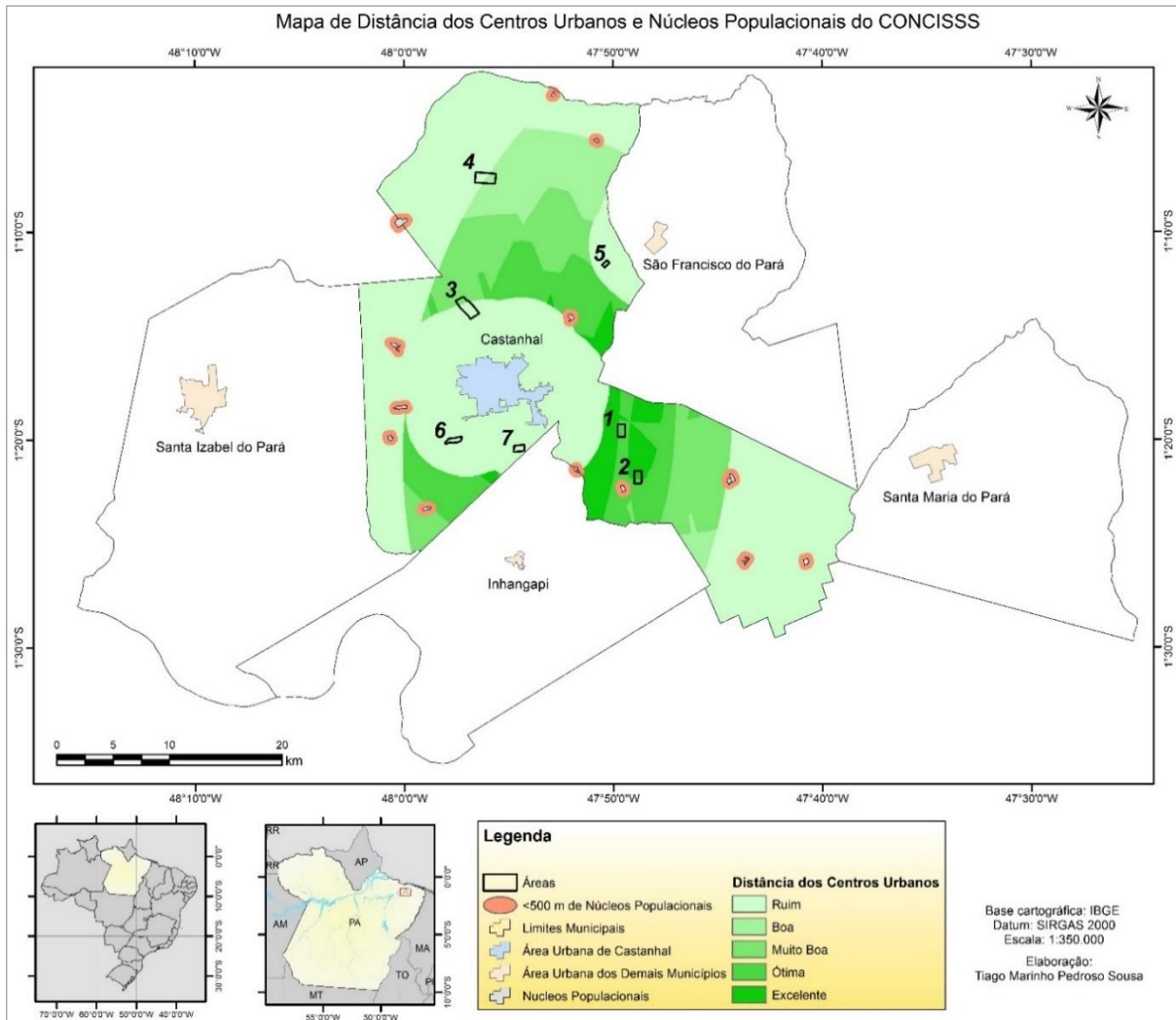


Figura 18 - Mapa de áreas mais promissoras para instalação do aterro sanitário, considerando a equidistância dos municípios envolvidos no CONCISSS.

6.1.6 Distância dos Sistemas Viários

A distância mínima das estradas busca preservar as áreas de circulação de veículos e pessoas dos impactos visuais e odor causado pelos resíduos sólidos, isto em consonância com o melhor custo/benefício da logística operacional de transporte. Assim, considerando Schmidt (2016), a distância mínima do aterro sanitário para as estradas foi estabelecida em 200 metros.

Desta maneira as áreas que possuem distâncias inferiores a 200 metros são consideradas inaptas. Contudo, as áreas com distâncias superiores a 200 metros apresentam maiores possibilidades de receber a instalação do aterro sanitário, no entanto, conforme a distância das

estradas aumenta consideravelmente, a aptidão diminui, devido a relação custo/benefício logístico do empreendimento (Figura 19).

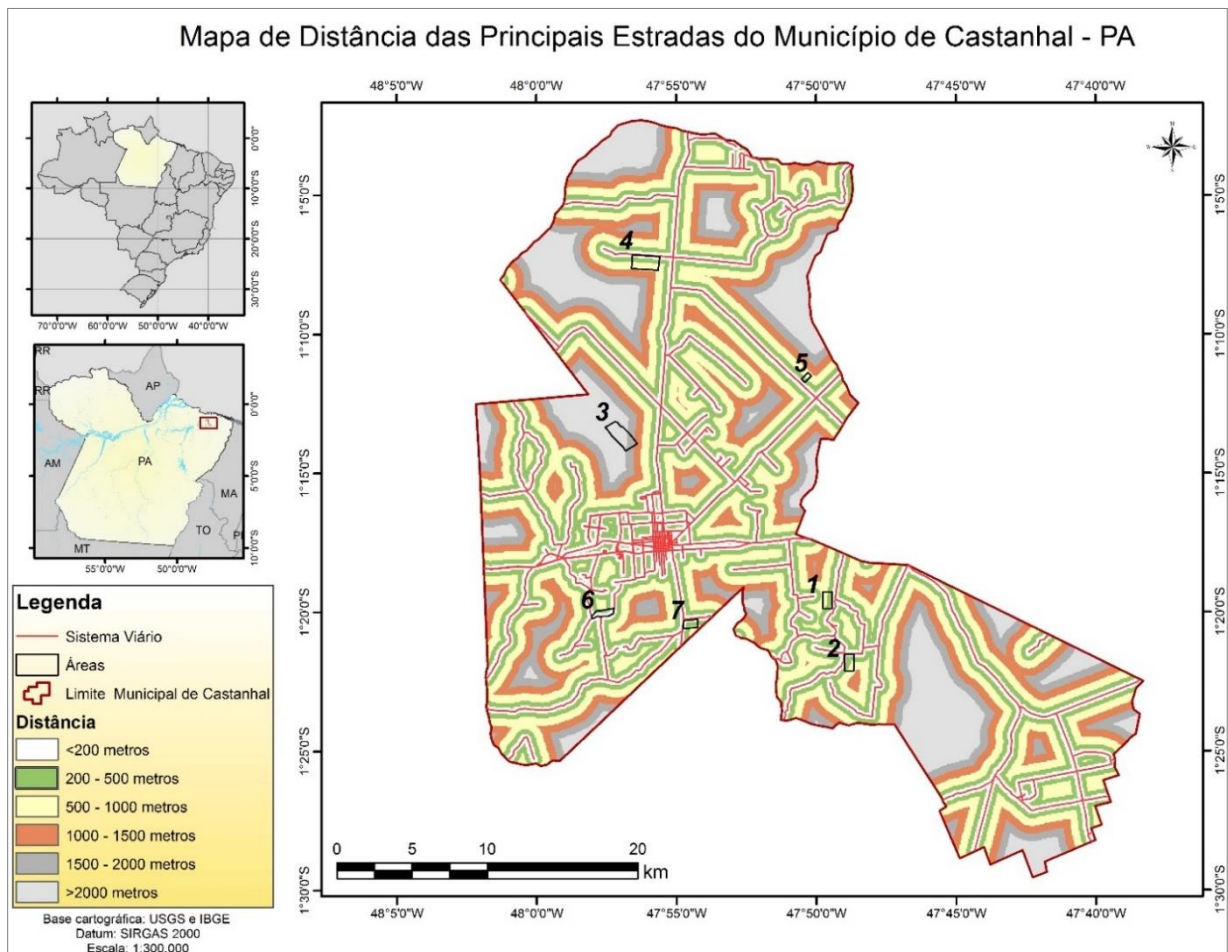


Figura 19 - Mapa de distâncias das principais estradas.

6.1.7 Área de Proteção Permanente (APP)

De acordo com a NBR 13.896/1997 as áreas de proteção permanente (APP) são consideradas regiões sensíveis e que devem ser consideradas inaptas à instalação do empreendimento de aterros sanitários, contudo este conceito ficou caracterizado como uma norma técnica em branco acerca do que seria Área de Proteção Permanente, a qual foi regulada a nível federal com a vigência da Lei N° 12.651/2012, que dispõem sobre a vegetação nativa brasileira, desta maneira a lei estabelece em seu Capítulo II, Art. 4°, a delimitação das áreas de preservação permanente. Para fins práticos apenas o inciso I desta lei alcança a jurisdição do Município de Castanhal.

Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:

I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: (Incluído pela Lei nº 12.727, de 2012).

a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;

b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;

c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;

d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;

e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros; ...

Por intermédio do *software ArcGis 10.5*, com o auxílio da extensão “*Basemap*” e da ferramenta “*measure*” foram observadas as larguras dos principais cursos de água no município de Castanhal, em que os principais cursos da água variam de 20 metros até 230 metros, caracterizado por rios de orientação dendrítica.

Desta maneira considerando a Lei 12.621/2012 as áreas de proteção permanente (APP) do município de Castanhal são definidas pelos cursos de água que percorrem a sua circunscrição territorial, contudo, devido a variação de largura destes cursos de águas, serão valorizados todos os cursos da água e pacificado com a adoção de 200 metros para todos, adotando o Art 4º, inciso I, alínea “d”, com a largura destes cursos hídricos de Castanhal contemplada com 200 metros (Figura 20).

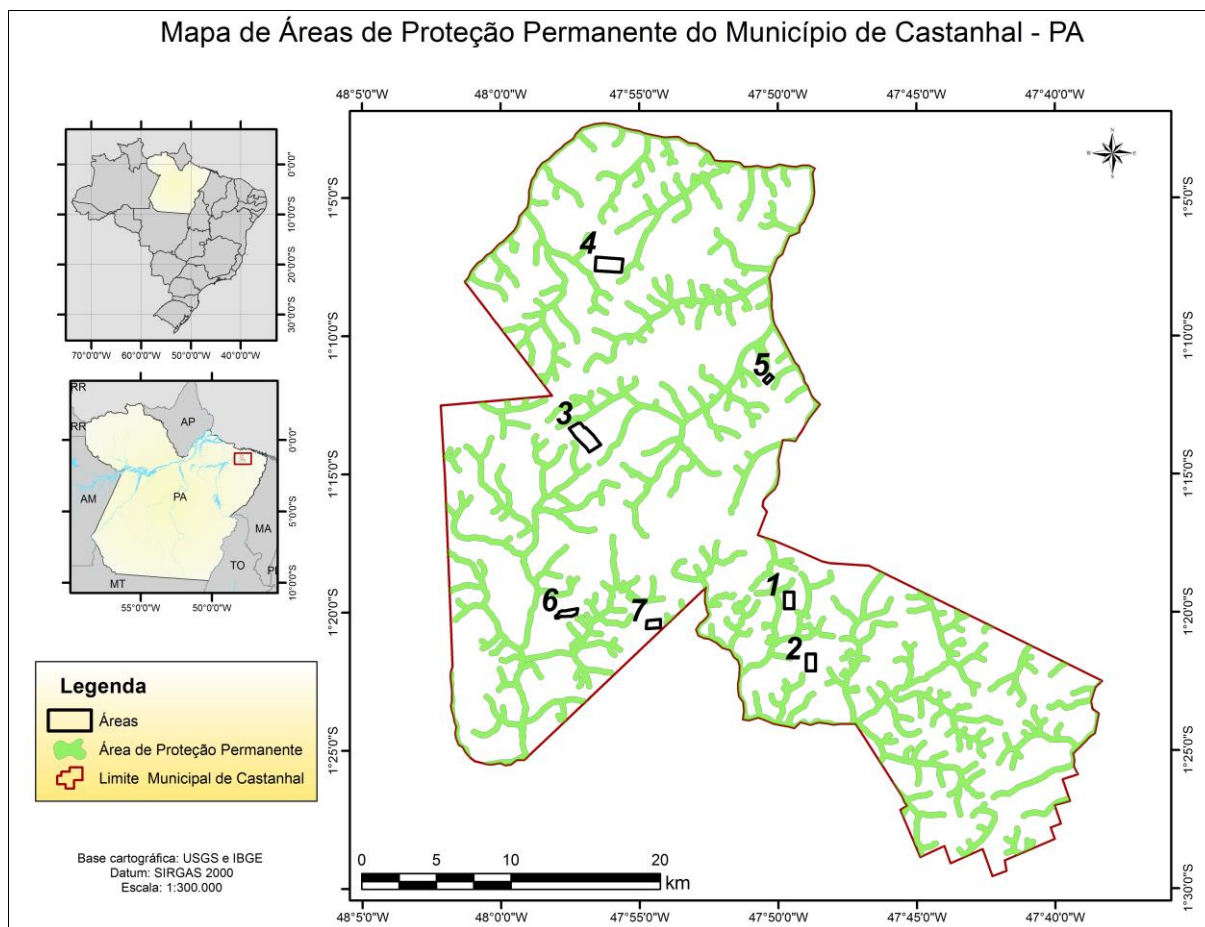


Figura 20 - Mapa de Áreas de Proteção Permanente (APP's) no município de Castanhal.

6.2 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

6.2.1 Análise dos Dados e da Uniformidade dos Intervalos Granulométricos

As análises granulométricas das 20 amostras de sedimentos coletadas nas áreas previamente selecionadas, obtidas nas porções mais profunda durante as sondagens, correspondem a três pontos de amostragem, coletadas em cada área de estudo, com exceção da Área 2, onde foram coletadas apenas duas amostras, em função da impossibilidade de continuar as sondagens a profundidades superiores a 0,5 m devido à dificuldade de penetração do trado em solo laterítico, em uma das regiões investigadas na referida área.

Os resultados das análises granulométricas das amostras coletadas no município de Castanhal estão detalhados no Anexo A, com curvas granulométricas de frequência simples e acumulada, de acordo com cálculo de composição granulométrica de Krumbein (1934) e Wentworth (1922). Para fins práticos e ponderativos os dados estão agrupados, com a finalidade de identificar e apresentar com clareza a fração granulométrica compreendida em cada área.

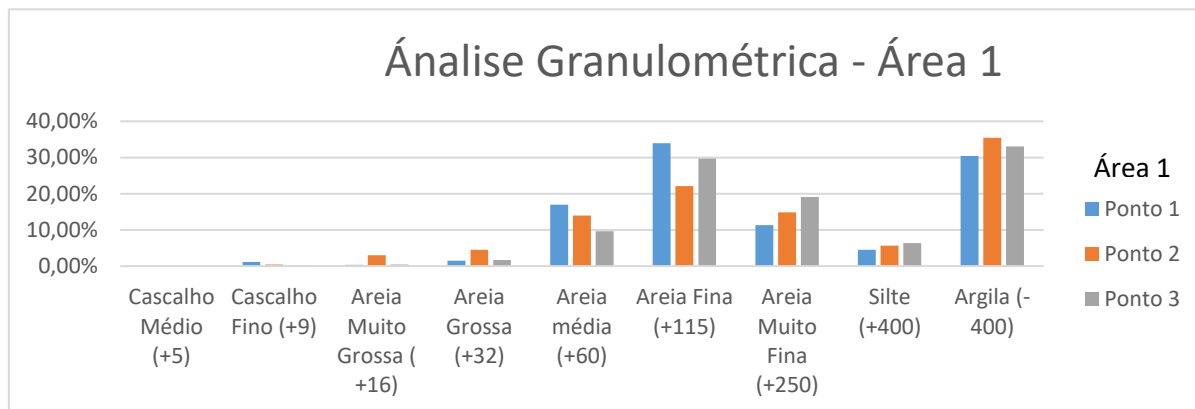
6.2.1.1 Análise Granulométrica da Área 1

As amostras DEU-038, DEU-039 e DEU-040 são correspondentes a área 1, sendo que os dados da Tabela 7 exibem o comportamento granulométrico dos referidos pontos, e o Gráfico 1 apresenta a análise comparativa dos pontos amostrados na Área 1.

Tabela 7 - Análise granulométrica da Área 1.

| Granulometria/Mesh | Ponto 1 – DEU 038 | | Ponto 2 - DEU 039 | | Ponto 3 – DEU 040 | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 51,0552 | | 59,2251 | | 55,09 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,5573 | 1,09% | 0,2733 | 0,46% | 0,0144 | 0,03% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,1819 | 0,36% | 1,7946 | 3,03% | 0,2468 | 0,45% |
| Areia Grossa (+32) | 0,7561 | 1,48% | 2,6673 | 4,50% | 0,9322 | 1,69% |
| Areia média (+60) | 8,6572 | 16,96% | 8,2881 | 13,99% | 5,2933 | 9,61% |
| Areia Fina (+115) | 17,3295 | 33,94% | 13,0728 | 22,07% | 16,3723 | 29,72% |
| Areia Muito Fina (+250) | 5,7602 | 11,28% | 8,8135 | 14,88% | 10,5212 | 19,10% |
| Silte (+400) | 2,2973 | 4,50% | 3,3298 | 5,62% | 3,4769 | 6,31% |
| Argila (-400) | 15,5157 | 30,39% | 20,9857 | 35,43% | 18,2364 | 33,10% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 1 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 1.



De acordo com a análise granulométrica dos sedimentos inconsolidados da Área 1, é fácil notar que os sedimentos apresentam heterogeneidade em sua composição, identificado pela quantidade de diversas frações granulométricas, onde nenhuma classe predomina. Além disto, estas convergem para a interpretação de que a Área 1 apresenta intervalos granulométricos que vão desde areia muito grossa a argila, contudo, apresentando similaridade nos três pontos verificados.

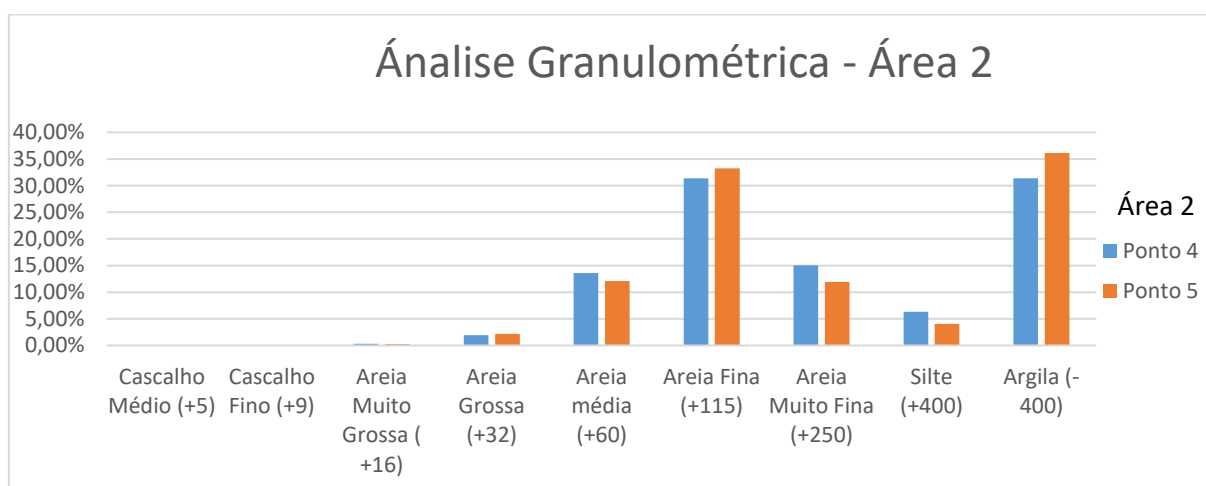
6.2.1.2 Análise Granulométrica da Área 2

Os pontos DEU-041 e DEU-042 são correspondentes às amostragens da Área 2 no município de Castanhal. Os dados da Tabela 8 exibem o comportamento granulométrico de cada ponto, sendo que o Gráfico 2 apresenta a análise comparativa das frações granulométricas.

Tabela 8 - Análise granulométrica da Área 2.

| | Ponto 4 - DEU 041 | | Ponto 5 - DEU 042 | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 54,8323 | | 60,7220 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,0000 | 0,00% | 0,0404 | 0,07% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,1789 | 0,33% | 0,1657 | 0,27% |
| Areia Grossa (+32) | 1,0681 | 1,95% | 1,3361 | 2,20% |
| Areia média (+60) | 7,4500 | 13,59% | 7,3600 | 12,12% |
| Areia Fina (+115) | 17,2200 | 31,40% | 20,2000 | 33,27% |
| Areia Muito Fina (+250) | 8,2369 | 15,02% | 7,2308 | 11,91% |
| Silte (+400) | 3,4769 | 6,34% | 2,4714 | 4,07% |
| Argila (-400) | 17,2015 | 31,37% | 21,9176 | 36,09% |
| TOTAL | | 100% | | 100% |

Gráfico 2 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 2.



É possível constatar que a Área 2 apresenta uma variedade no espectro granulométrico, caracterizando sedimentos de granulometria heterogênea, com os maiores expoentes indicados nas frações areia fina e argila. No entanto, as amostras da Área 2 apresentam similaridades nos intervalos granulométricos, com discrepância de no máximo 4%.

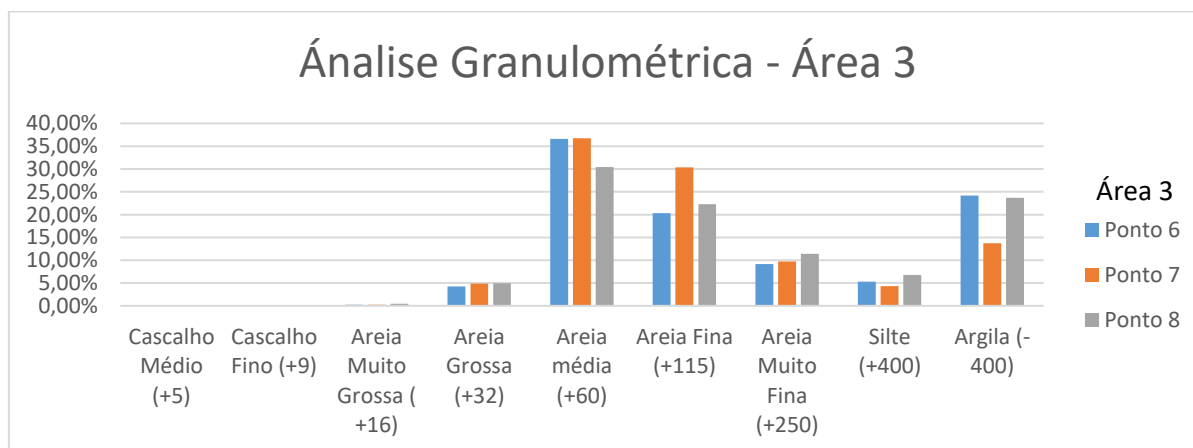
6.2.1.3 Análise Granulométrica da Área 3

As amostras DEU-043, DEU-044 e DEU-045 são correspondentes a Área 3, sendo que, os dados da Tabela 9 exibem o conteúdo seu granulométrico e o Gráfico 3 apresenta a análise comparativa dos sedimentos amostrados na Área 3.

Tabela 9 - Análise granulométrica da Área 3.

| Granulometria/Mesh | Ponto 6 – DEU 043 | | Ponto 7 - DEU 044 | | Ponto 8 – DEU 045 | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 54,9124 | | 54,7833 | | 63,8695 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0195 | 0,03% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,1310 | 0,24% | 0,1445 | 0,26% | 0,3100 | 0,49% |
| Areia Grossa (+32) | 2,3244 | 4,23% | 2,6600 | 4,86% | 3,1500 | 4,93% |
| Areia média (+60) | 20,0900 | 36,59% | 20,1300 | 36,74% | 19,4500 | 30,45% |
| Areia Fina (+115) | 11,1509 | 20,31% | 16,6200 | 30,34% | 14,2200 | 22,26% |
| Areia Muito Fina (+250) | 5,0487 | 9,19% | 5,3300 | 9,73% | 7,2700 | 11,38% |
| Silte (+400) | 2,8987 | 5,28% | 2,3800 | 4,34% | 4,3200 | 6,76% |
| Argila (-400) | 13,2687 | 24,16% | 7,5188 | 13,72% | 15,1300 | 23,69% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 3 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 3.



É possível identificar que a Área 3 apresenta um conteúdo granulométrico heterogêneo, com destaque para a fração areia, a qual corresponde a 70% do conteúdo das amostras coletadas, enquanto as frações silte e argila correspondem aos 30% restantes. De modo geral, a Área 3 apresenta um solo com propriedades granulométricas heterogêneas, com tendência a homogeneidade ponderado pela porcentagem de fração areia.

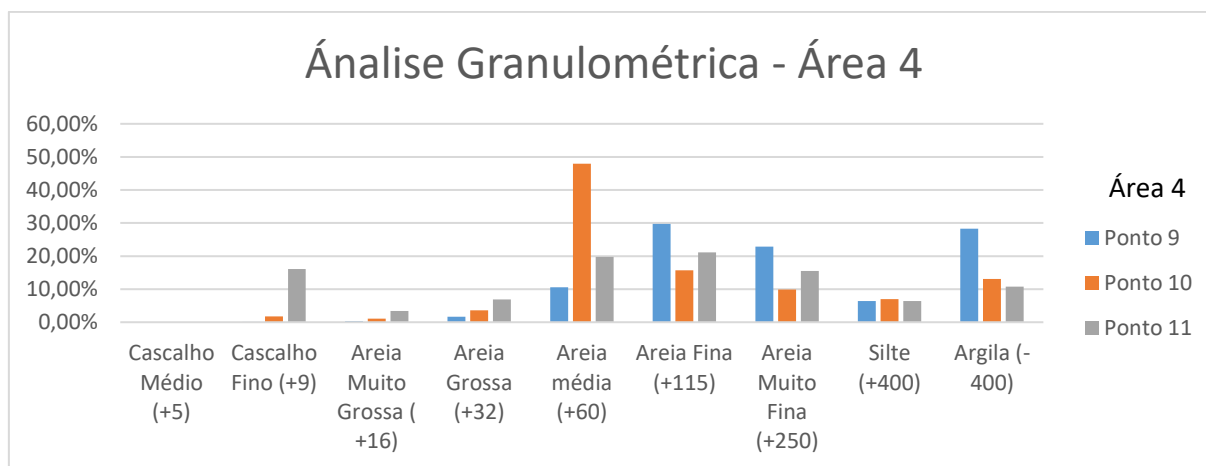
6.2.1.4 Análise Granulométrica da Área 4

As amostras DEU-046, DEU-047 e DEU-048 são correspondentes a área 4 no município de Castanhal, sendo que os dados da Tabela 10 exibem o comportamento granulométrico dos pontos anteriormente citados, e o Gráfico 4 apresenta a análise comparativa dos pontos amostrados.

Tabela 10 - Análise granulométrica da Área 4.

| | Ponto 9 – DEU 046 | | Ponto 10 - DEU 047 | | Ponto 11 – DEU 048 | |
|--------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 62,2437 | | 58,0457 | | 62,6441 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,0473 | 0,08% | 1,0056 | 1,73% | 10,1000 | 16,12% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,1983 | 0,32% | 0,6117 | 1,05% | 2,1500 | 3,43% |
| Areia Grossa (+32) | 1,0200 | 1,64% | 2,1100 | 3,64% | 4,3200 | 6,90% |
| Areia média (+60) | 6,6000 | 10,60% | 27,8000 | 47,89% | 12,4100 | 19,81% |
| Areia Fina (+115) | 18,5300 | 29,77% | 9,1200 | 15,71% | 13,2200 | 21,10% |
| Areia Muito Fina (+250) | 14,2100 | 22,83% | 5,7500 | 9,91% | 9,6900 | 15,47% |
| Silte (+400) | 4,0100 | 6,44% | 4,0600 | 6,99% | 4,0100 | 6,40% |
| Argila (-400) | 17,6281 | 28,32% | 7,5800 | 13,06% | 6,7300 | 10,74% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 4 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 4.



De acordo com os dados, a Área 4 apresenta um solo com forte heterogeneidade no seu conteúdo granulométrico, bem como na distribuição da porcentagem dentro de um mesmo intervalo granulométrico, caracterizando forte divergência entre as amostras, onde nenhuma fração granulométrica se comporta de forma predominante.

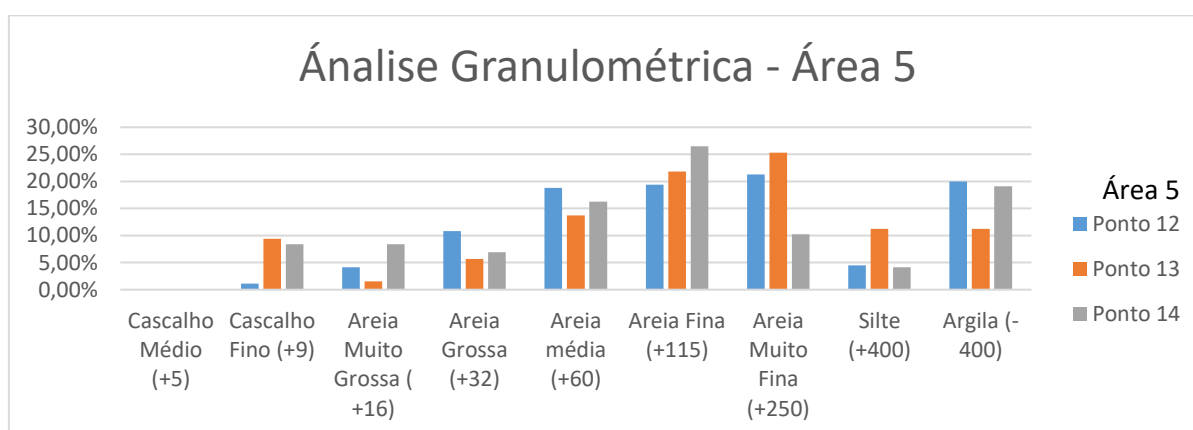
6.2.1.5 Análise Granulométrica da Área 5

As amostras DEU-049, DEU-050 e DEU-051 são correspondentes a Área 5, sendo que os dados da Tabela 11 exibem o comportamento granulométrico dos pontos anteriormente citados e o Gráfico 5 apresenta a análise comparativa dos sedimentos amostrados em cada ponto.

Tabela 11 - Análise granulométrica da Área 5.

| Granulometria/Mesh | Ponto 12 – DEU 049 | | Ponto 13 - DEU 050 | | Ponto 14 – DEU 051 | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 49,0845 | | 54,6603 | | 49,2455 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,5399 | 1,10% | 5,1300 | 9,39% | 4,1300 | 8,39% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 2,0470 | 4,17% | 0,8459 | 1,55% | 4,1500 | 8,43% |
| Areia Grossa (+32) | 5,3000 | 10,80% | 3,1100 | 5,69% | 3,4100 | 6,92% |
| Areia média (+60) | 9,2200 | 18,78% | 7,5000 | 13,72% | 8,0200 | 16,29% |
| Areia Fina (+115) | 9,5300 | 19,42% | 11,9300 | 21,83% | 13,0500 | 26,50% |
| Areia Muito Fina (+250) | 10,4400 | 21,27% | 13,8500 | 25,34% | 5,0300 | 10,21% |
| Silte (+400) | 2,2043 | 4,49% | 6,1512 | 11,25% | 2,0500 | 4,16% |
| Argila (-400) | 9,8033 | 19,97% | 6,1432 | 11,24% | 9,4055 | 19,10% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 5 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 5.



De acordo com o Gráfico 5 é possível perceber que a granulometria das amostras da Área 5 apresentam forte heterogeneidade em seu conteúdo granulométrico, estabelecido pela existência de material granulométrico de basicamente todos os intervalos granulométricos, desde cascalho fino até argila, com maior destaque para as granulometrias referente às frações areia média a muito fina. De um modo geral a Área 5 apresenta um solo heterogêneo e com divergência ao correlacionar os pontos amostrados dentro do mesmo intervalo granulométrico.

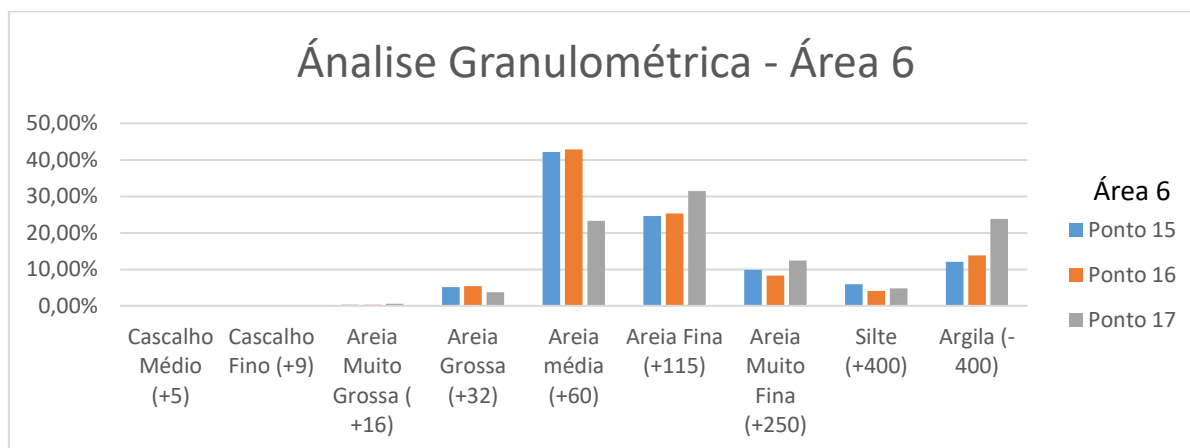
6.2.1.6 Análise Granulométrica da Área 6

As amostras DEU-052, DEU-053 e DEU-054 são correspondentes a área 6 no município de Castanhal. Os dados da Tabela 12 exibem o conteúdo granulométrico dos pontos anteriormente citados e o Gráfico 6 apresenta a análise comparativa dos pontos amostrados.

Tabela 12 - Análise granulométrica da Área 6.

| Granulometria/Mesh | Ponto 15 – DEU 052 | | Ponto 16 - DEU 053 | | Ponto 17 - DEU 054 | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 63,6928 | | 60,8960 | | 52,5684 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,0000 | 0,00% | 0,0077 | 0,01% | 0,0356 | 0,07% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,1881 | 0,30% | 0,1670 | 0,27% | 0,2766 | 0,53% |
| Areia Grossa (+32) | 3,2789 | 5,15% | 3,2810 | 5,39% | 1,9393 | 3,69% |
| Areia média (+60) | 26,8330 | 42,13% | 26,0832 | 42,83% | 12,2441 | 23,29% |
| Areia Fina (+115) | 15,6540 | 24,58% | 15,4100 | 25,31% | 16,5260 | 31,44% |
| Areia Muito Fina (+250) | 6,2938 | 9,88% | 5,0600 | 8,31% | 6,5228 | 12,41% |
| Silte (+400) | 3,7740 | 5,93% | 2,4600 | 4,04% | 2,4923 | 4,74% |
| Argila (-400) | 7,6710 | 12,04% | 8,4200 | 13,83% | 12,5300 | 23,84% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 6 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 6



É possível constatar que no Gráfico 6 que a granulometria dos pontos amostrados apresenta caráter heterogêneo, identificado pela quantidade de frações granulométricas em que há alguma predominância de areia média a fina com argila. Do ponto de vista comparativo as amostras da área 6 apresentam certa convergência entre seus intervalos granulométricos, com pontuais disparidades.

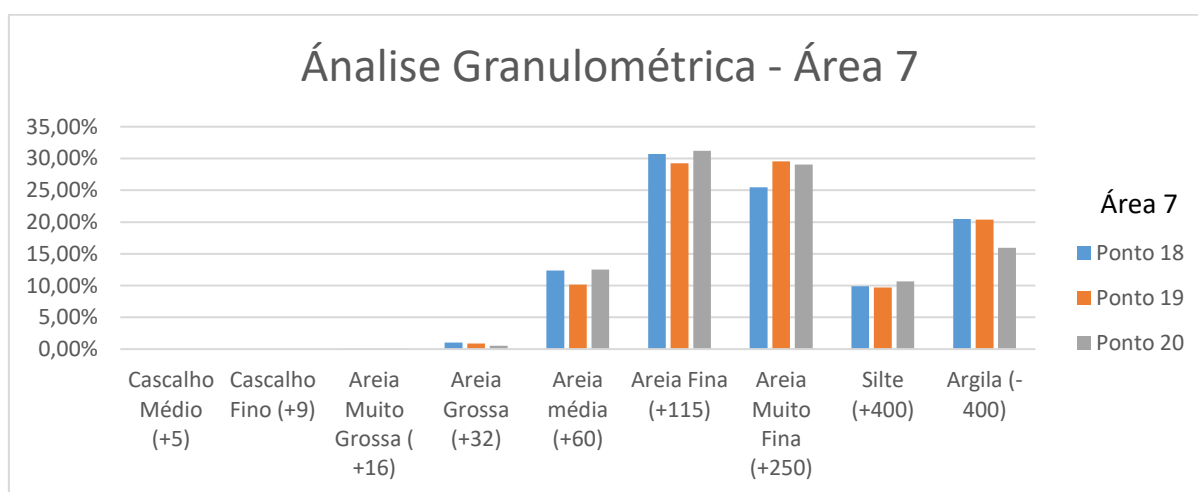
6.2.1.7 Análise Granulométrica da Área 7

As amostras DEU-055, DEU-056 e DEU-057 são correspondentes a área 7 no município de Castanhal. Os dados da Tabela 13 exibem o comportamento granulométrico dos pontos anteriormente citados e o Gráfico 7 apresenta a análise comparativa dos pontos amostrados.

Tabela 13 - Análise granulométrica da Área 7

| Granulometria/Mesh | Ponto 18 – DEU 055 | | Ponto 19 - DEU 056 | | Ponto 20 - DEU 057 | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Inicial (g) | | Inicial (g) | | Inicial (g) | |
| | 49,3017 | | 58,1632 | | 59,4229 | |
| Granulometria/Mesh | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) | Material (g) | Porcentagem (%) |
| Cascalho Médio (+5) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Cascalho Fino (+9) | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% | 0,0000 | 0,00% |
| Areia Muito Grossa (+16) | 0,0404 | 0,08% | 0,0494 | 0,08% | 0,0500 | 0,08% |
| Areia Grossa (+32) | 0,4976 | 1,01% | 0,5125 | 0,88% | 0,3300 | 0,56% |
| Areia média (+60) | 6,0915 | 12,36% | 5,9000 | 10,14% | 7,4496 | 12,54% |
| Areia Fina (+115) | 15,1305 | 30,69% | 17,0100 | 29,25% | 18,5314 | 31,19% |
| Areia Muito Fina (+250) | 12,5501 | 25,46% | 17,2000 | 29,57% | 17,2718 | 29,07% |
| Silte (+400) | 4,8918 | 9,92% | 5,6463 | 9,71% | 6,3249 | 10,64% |
| Argila (-400) | 10,0998 | 20,49% | 11,8400 | 20,36% | 9,4652 | 15,93% |
| TOTAL | | 100% | | 100% | | 100% |

Gráfico 7 - Análise comparativas dos intervalos granulométricos dos pontos amostrados na Área 7.



A análise granulométrica dos sedimentos inconsolidados da Área 7 apresentou heterogeneidade em sua composição, indicado predominância de areia fina a muito fina, com argila. Além disto, estas convergem para interpretação de que comparativamente, os percentuais dos intervalos granulométricos nos pontos amostrados da Área 7 são similares.

6.2.2 Análise Textural do Solo

A classificação textural do solo de cada ponto amostrado nas sete áreas investigadas foi realizada, com base nas frações granulométricas identificadas. Para fins específicos para a instalação do aterro sanitário, a NBR 13.896 condiciona que o projeto deve ser executado em áreas em que o material do subsolo (rocha ou solo) natural possa atenuar ou impedir a percolação de líquidos, ou seja, uma área, preferencialmente, com baixo coeficiente de permeabilidade.

As camadas de impermeabilização natural são estabelecidas basicamente por argilominerais, que já se encontram disponível dentro do local do aterro sanitário, essas camadas impermeabilizantes têm a função de proteger o subsolo e o lençol freático, a fim de evitar a contaminação. Além disto, sedimentos argilosos são utilizados posteriormente dentro do próprio aterro, nos trabalhos diários de recobrimento dos resíduos e impermeabilização das camadas, pois são responsáveis por evitar a infiltração de águas e o contato destas com o chorume, bem como evitar a percolação direta do chorume para as camadas subjacentes (Mazza 2019; Magalhães 2019)

Desta maneira, para o melhor entendimento da classificação textural foi utilizado o diagrama de subagrupamento textural da Embrapa (Santos *et al.* 2018), com os resultados identificados no Diagrama 1. Nesta etapa foi considerada somente a fração granulométrica areia para estabelecimento da textura do solo, considerando os intervalos granulométricos areia, silte e argila, determinados em cada análise, a fim de identificar por meio do diagrama triangular a classificação textural dos solos (Diagrama 1 e Tabela 14) (Pereira *et al.* 2019; Santos *et al.* 2018).

Diagrama 1 - Análise textural dos solos das áreas previamente selecionadas do município

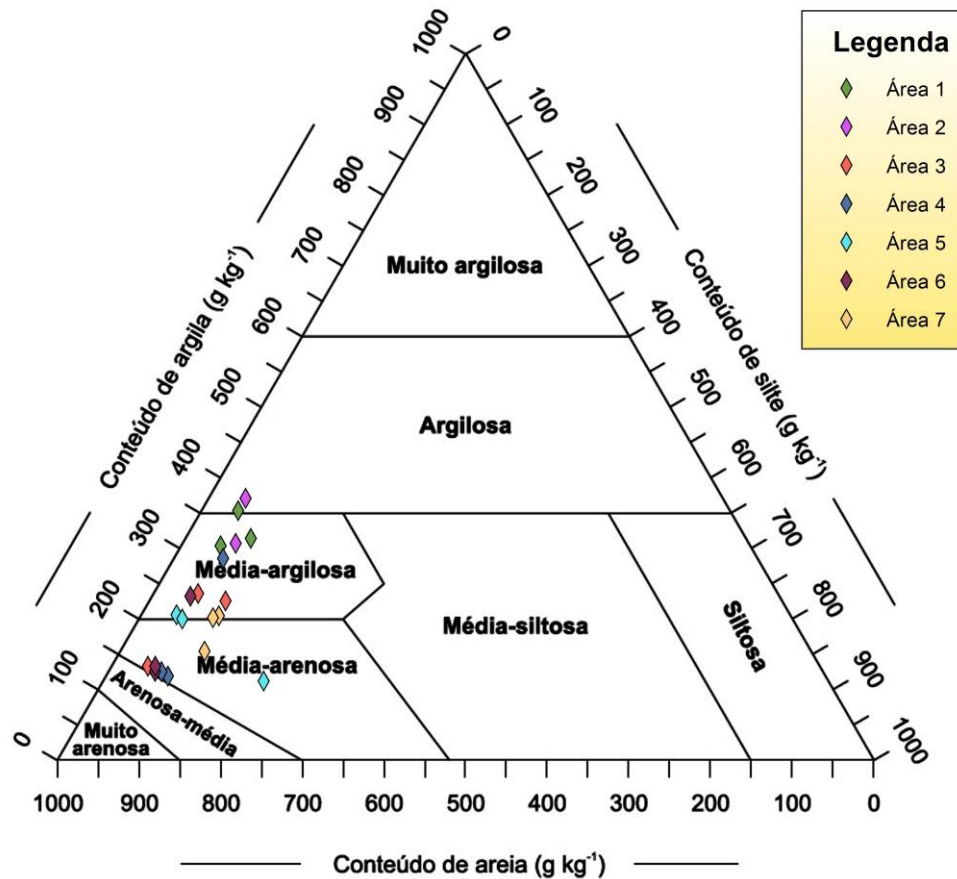


Tabela 14 - Classificação textural dos solos do município de Castanhal.

| ÁREA | PONTOS AMOSTRADOS | CASCALHO (%) | AREIA (%) | SILTE (%) | ARGILA (%) | CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL |
|--------|-------------------|--------------|-----------|-----------|------------|---------------------------------|
| Área 1 | Ponto 1 (P01) | 1,0916 | 64,0187 | 4,4996 | 30,3900 | Média-Argilosa |
| | Ponto 2 (P02) | 0,4615 | 58,4825 | 5,6223 | 35,4338 | Argilosa |
| | Ponto 3 (P03) | 0,0261 | 60,5621 | 6,3109 | 33,1008 | Média-Argilosa |
| Área 2 | Ponto 4 (P04) | 0,0000 | 62,2879 | 6,3410 | 31,3711 | Média-Argilosa |
| | Ponto 5 (P05) | 0,0665 | 59,7685 | 4,0700 | 36,0950 | Argilosa |
| Área 3 | Ponto 6 (P06) | 0,0000 | 70,5578 | 5,2788 | 24,1634 | Média-Argilosa |
| | Ponto 7 (P07) | 0,0000 | 81,9310 | 4,3444 | 13,7246 | Média-Arenosa |
| | Ponto 8 (P08) | 0,0305 | 69,5174 | 6,7639 | 23,6882 | Média-Argilosa |
| Área 4 | Ponto 9 (P09) | 0,0760 | 65,1605 | 6,4424 | 28,3211 | Média-Argilosa |
| | Ponto 10 (P10) | 1,7324 | 78,1999 | 6,9945 | 13,0731 | Média-Arenosa |
| | Ponto 11 (P11) | 16,1228 | 66,7102 | 6,4012 | 10,7657 | Média-Arenosa Pouco Cascalhento |
| Área 5 | Ponto 12 (P12) | 1,0999 | 74,4369 | 4,4908 | 19,9723 | Média-Argilosa |
| | Ponto 13 (P13) | 9,3852 | 68,1224 | 11,2535 | 11,2389 | Média-Arenosa |
| | Ponto 14 (P14) | 8,3866 | 68,3514 | 4,1628 | 19,0992 | Média-Argilosa |
| Área 6 | Ponto 15 (P15) | 0,0000 | 82,0309 | 5,9253 | 12,0437 | Média-Arenosa |
| | Ponto 16 (P16) | 0,0126 | 82,1092 | 4,0397 | 13,8385 | Média-Arenosa |
| | Ponto 17 (P17) | 0,0677 | 71,3524 | 4,7411 | 23,8388 | Média-Argilosa |
| Área 7 | Ponto 18 (P18) | 0,0819 | 69,5921 | 9,9222 | 20,4038 | Média-Argilosa |
| | Ponto 19 (P19) | 0,0000 | 69,9272 | 9,7077 | 20,3651 | Média-Argilosa |
| | Ponto 20 (P20) | 0,0000 | 73,4276 | 10,6439 | 15,9285 | Média-Arenosa |

Ao observar o Diagrama 1 e a Tabela 14, é possível identificar que os sedimentos dos pontos amostrados do município de Castanhal apresentam até 4 frações granulométricas (cascalho, areia, silte e argila), com destaque percentuais para as frações areia, silte e argila: (i) Areia: De modo geral os pontos amostrados apresentam um caráter granulométrico, predominantemente, situado no intervalo da fração Areia, indicado por teores percentuais, aproximadamente, situados entre 58% - 83%; (ii) Silte: É possível constatar que o percentual de fração silte nestes solos é relativamente baixo e constante, sem grandes disparidades entre os pontos, caracterizando a fração minoritária e nunca maior que a fração argila, quando comparado no mesmo ponto amostrado, apresenta teores percentuais situados entre 4% - 11%; (iii) Argila: No que se refere a fração argila, esta comporta-se de maneira variada, notadamente inversamente proporcional a fração areia, pois a medida que decresce a fração areia, a fração argila tem acréscimo e vice-versa, os teores percentuais estão situados entre 10% - 37%.

Ao adotar a classificação textural da Embrapa, proposta por Santos *et al.* (2018) o solo de Castanhal exhibe dois intervalos texturais preponderantes com gradação de Média-Arenosa a Média-Argilosa, com observância de pontos diminutos de solo argiloso. Ao considerar o resultado da classificação textural, é possível afirmar que solos com predominância de fração areia possuam maior condutividade hidráulica, enquanto que solos com predominância de fração argila possuem menor condutividade hidráulica, contudo esta generalização pode ser reavaliada, em virtude das disposições referentes à estrutura do solo e a atividade da fração argila na organização do sistema da permo-porosidade do solo (Sartori & Genovez 2011).

6.3 TESTE DE INFILTRAÇÃO DA ZONA NÃO SATURADA

6.3.1 Valores de Condutividade Hidráulica dos Ensaios de Infiltração *In Situ*

A Tabela 15 apresenta todos os parâmetros investigados, para as profundidades de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, cuja condutividade hidráulica (kv) calculada por intermédio da aplicação da equação 2, na unidade de m/min e posteriormente convertida em cm/s, com o fator de correção de “1,66”, para adequar a unidade de medida adotada na NBR 13.896. Tais ensaios têm a finalidade de compreender a velocidade do fluido que percorre as camadas subjacentes, considerando a influência do gradiente hidráulico em movimento descendente diante da porosidade efetiva de cada ponto amostrado.

Tabela 15 - Parâmetros investigados e valores de Kv obtido em cada profundidade pretendida, dos pontos investigados de cada área.

| Área 1 | | | | | | | |
|---------|--------------|--------|------------------|--------|-------|----------------|----------------------|
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 1 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,400 | 0,100 | $2,32 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,743 | 0,257 | $3,09 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 0,180 | 1,320 | $2,20 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 2 | 0,5 m | 0,05 | 25 | 0,5 | 0,200 | 0,300 | $7,63 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,340 | 0,660 | $1,12 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 0,934 | 0,566 | $4,93 \cdot 10^{-4}$ |
| Ponto 3 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,332 | 0,168 | $4,22 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,775 | 0,225 | $2,65 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 1,330 | 0,170 | $1,25 \cdot 10^{-5}$ |
| Área 2 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 4 | 0,5 m | 0,05 | 30 | 0,5 | 0,450 | 0,050 | $7,31 \cdot 10^{-5}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,576 | 0,424 | $5,74 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 1,420 | 0,080 | $5,70 \cdot 10^{-5}$ |
| Ponto 5 | 0,5 m | 0,05 | 17 | 0,5 | 0,431 | 1,160 | $1,82 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,854 | 0,146 | $1,64 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 1,390 | 0,110 | $7,93 \cdot 10^{-5}$ |
| Área 3 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 6 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,402 | 0,098 | $2,27 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 8 | 1,0 | 0,010 | 0,990 | $1,20 \cdot 10^{-2}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 19 | 1,5 | 0,010 | 1,490 | $5,49 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 7 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,100 | 0,400 | $1,68 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 5 | 1,0 | 0,010 | 0,990 | $1,92 \cdot 10^{-2}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 0,220 | 1,280 | $2 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 8 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,440 | 0,060 | $1,33 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,820 | 0,180 | $2,07 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 5 | 1,5 | 0,001 | 1,499 | $3,05 \cdot 10^{-2}$ |
| Área 4 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 9 | 0,5 m | 0,0375 | 20 | 0,5 | 0,001 | 0,499 | $4,86 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 25 | 1,0 | 0,808 | 0,192 | $1,33 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 25 | 1,5 | 0,768 | 0,732 | $4,18 \cdot 10^{-4}$ |

| Área 4 | | | | | | | |
|----------|--------------|--------|------------------|--------|-------|----------------|----------------------|
| Ponto 10 | 0,5 m | 0,0375 | 25 | 0,5 | 0,055 | 0,445 | $1,38 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 25 | 1,0 | 0,650 | 0,350 | $2,69 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 25 | 1,5 | 0,278 | 1,222 | $1,05 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 11 | 0,5 m | 0,0375 | 15 | 0,5 | 0,001 | 0,499 | $6,47 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 20 | 1,0 | 0,116 | 0,884 | $1,68 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 20 | 1,5 | 1,215 | 0,285 | $1,65 \cdot 10^{-4}$ |
| Área 5 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 12 | 0,5 m | 0,0375 | 20 | 0,5 | 0,305 | 0,195 | $3,86 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 20 | 1,0 | 0,846 | 0,154 | $1,31 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 20 | 1,5 | 1,260 | 0,240 | $1,36 \cdot 10^{-4}$ |
| Ponto 13 | 0,5 m | 0,0375 | 15 | 0,5 | 0,001 | 0,499 | $6,47 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 20 | 1,0 | 0,001 | 0,999 | $5,40 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 20 | 1,5 | 0,905 | 0,595 | $1,58 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 14 | 0,5 m | 0,0375 | 8 | 0,5 | 0,001 | 0,499 | $1,21 \cdot 10^{-2}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 6 | 1,0 | 0,001 | 0,999 | $1,80 \cdot 10^{-2}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 20 | 1,5 | 0,905 | 0,595 | $3,95 \cdot 10^{-4}$ |
| Área 6 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 15 | 0,5 m | 0,0375 | 30 | 0,5 | 0,446 | 0,054 | $5,95 \cdot 10^{-5}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 20 | 1,0 | 0,980 | 0,020 | $1,58 \cdot 10^{-5}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 20 | 1,5 | 1,450 | 0,050 | $2,65 \cdot 10^{-5}$ |
| Ponto 16 | 0,5 m | 0,0375 | 25 | 0,5 | 0,411 | 0,089 | $1,23 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 25 | 1,0 | 0,969 | 0,031 | $1,97 \cdot 10^{-5}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 25 | 1,5 | 1,481 | 0,019 | $7,97 \cdot 10^{-6}$ |
| Ponto 17 | 0,5 m | 0,0375 | 25 | 0,5 | 0,201 | 0,299 | $5,70 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,0375 | 25 | 1,0 | 0,675 | 0,325 | $2,46 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,0375 | 25 | 1,5 | 0,832 | 0,668 | $3,68 \cdot 10^{-4}$ |
| Área 7 | | | | | | | |
| Pontos | Profundidade | R (m) | Δt (min) | ho (m) | h (m) | ΔH (m) | kv (cm/s) |
| Ponto 18 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,291 | 0,209 | $5,64 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,775 | 0,225 | $2,66 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 10 | 1,5 | 1,291 | 0,209 | $3,13 \cdot 10^{-4}$ |
| Ponto 19 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,105 | 0,395 | $1,63 \cdot 10^{-3}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,762 | 0,238 | $2,83 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 0,540 | 0,960 | $1,06 \cdot 10^{-3}$ |
| Ponto 20 | 0,5 m | 0,05 | 20 | 0,5 | 0,447 | 0,053 | $1,17 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,0 m | 0,05 | 20 | 1,0 | 0,701 | 0,299 | $3,70 \cdot 10^{-4}$ |
| | 1,5 m | 0,05 | 20 | 1,5 | 0,662 | 0,838 | $8,52 \cdot 10^{-4}$ |

Os resultados individuais dos ensaios de infiltração *in situ* de cada ponto visitado para as profundidades pretendidas, exibidos na Tabela 15, indicam que as áreas não apresentam uniformidade no parâmetro investigado, pois os valores de condutividade hidráulica (kv) apresentam diferenças, comumente, máximas da ordem de grandeza de 10^{-1} , salvo exceções de ordem de grandeza de 10^{-2} , elencado nas profundidades das áreas a seguir: (i) 0,5 m da área 5; (ii) 1,0 m da área 3; e (iii) 1,5 m das áreas 1, 5 e 6.

Para melhor compreensão dos ensaios de infiltração, Almeida *et al.* (2006) pondera os resultados da condutividade hidráulica (kv), de acordo com a ordem de grandeza dos resultados, com relação ao conjunto total de dados, isto para compreender de forma extensiva o solo (análise de áreas); além da relação de variabilidade da condutividade hidráulica (kv) com a profundidade para cada área.

Ademais, estudos estatísticos podem ser de grande relevância para melhor vislumbrar a homogeneidade dados obtidos, considerando a análise da condutividade hidráulica (kv), a fim de compreender a relação da condutividade hidráulica com as áreas e a profundidade.

6.3.2 Avaliação Individual da Condutividade Hidráulica de Acordo com a Profundidade e Áreas

Ao considerar as profundidades outrora investigadas de cada área nos pontos visitados é nítido que não há mudanças lineares decorrentes da variação de profundidade, ou seja, o aumento ou a diminuição da profundidade não implica alteração concordante aos valores de kv. Fato este relacionado à água que pode ser retida pela tensão superficial em solos, em virtude das frações finas nos interstícios dos poros e, além disto, ao aumento das forças eletrolíticas características do conteúdo de argilas nos solos (Betim 2013).

A fim de considerar a homogeneidade e a uniformidade da condutividade hidráulica de cada profundidade investigada, bem como para as áreas como um todo, foram realizados cálculos de medida de tendência central para as profundidades investigadas e para a áreas de maneira geral, adotando a média e a mediana, para compreender se estas medidas centrais estão na mesma ordem de grandeza (Tabela 16), previstas na NBR 13.896.

Tabela 16 - Análise de medidas de tendência central para as profundidades contempladas, bem como para cada área.

| Condutividade Hidráulica (kv) Área 1 | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $4,27 \cdot 10^{-4}$ | $3,09 \cdot 10^{-4}$ | $4,94 \cdot 10^{-4}$ | $4,27 \cdot 10^{-4}$ | $6,61 \cdot 10^{-4}$ |
| Média (cm/s) | $4,74 \cdot 10^{-4}$ | $5,66 \cdot 10^{-4}$ | $9,43 \cdot 10^{-4}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 2 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $1,28 \cdot 10^{-4}$ | $3,70 \cdot 10^{-4}$ | $6,82 \cdot 10^{-5}$ | $1,22 \cdot 10^{-4}$ | $1,88 \cdot 10^{-4}$ |
| Média (cm/s) | $1,28 \cdot 10^{-4}$ | $3,70 \cdot 10^{-4}$ | $6,82 \cdot 10^{-5}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 3 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $2,27 \cdot 10^{-4}$ | $1,20 \cdot 10^{-2}$ | $5,49 \cdot 10^{-3}$ | $2,00 \cdot 10^{-3}$ | $7,93 \cdot 10^{-3}$ |
| Média (cm/s) | $6,79 \cdot 10^{-4}$ | $1,05 \cdot 10^{-2}$ | $1,27 \cdot 10^{-2}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 4 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $4,86 \cdot 10^{-3}$ | $2,69 \cdot 10^{-4}$ | $4,18 \cdot 10^{-4}$ | $1,05 \cdot 10^{-3}$ | $1,83 \cdot 10^{-3}$ |
| Média (cm/s) | $4,24 \cdot 10^{-3}$ | $6,95 \cdot 10^{-4}$ | $5,46 \cdot 10^{-4}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 5 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $6,47 \cdot 10^{-3}$ | $5,40 \cdot 10^{-3}$ | $3,95 \cdot 10^{-4}$ | $1,58 \cdot 10^{-3}$ | $4,96 \cdot 10^{-3}$ |
| Média (cm/s) | $6,33 \cdot 10^{-3}$ | $7,84 \cdot 10^{-3}$ | $7,03 \cdot 10^{-4}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 6 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $1,23 \cdot 10^{-4}$ | $1,97 \cdot 10^{-5}$ | $2,65 \cdot 10^{-5}$ | $5,95 \cdot 10^{-5}$ | $1,60 \cdot 10^{-4}$ |
| Média (cm/s) | $2,51 \cdot 10^{-4}$ | $9,37 \cdot 10^{-5}$ | $1,34 \cdot 10^{-4}$ | | |
| Condutividade Hidráulica (kv) Área 7 | | | | | |
| Profundidade | 0,5 m | 1,0 m | 1,5 m | Mediana da Área (cm/s) | kv Médio da Área (cm/s) |
| Mediana (cm/s) | $5,64 \cdot 10^{-4}$ | $2,83 \cdot 10^{-4}$ | $8,52 \cdot 10^{-4}$ | $3,70 \cdot 10^{-4}$ | $6,06 \cdot 10^{-4}$ |
| Média (cm/s) | $7,69 \cdot 10^{-4}$ | $3,06 \cdot 10^{-4}$ | $7,43 \cdot 10^{-4}$ | | |

Ao observar a Tabela 16, a ordem de grandeza das medidas de tendência central (mediana e média) das profundidades (0,5 m, 1,0 m e 1,5 m) referentes a cada área, é possível identificar que estas são concordantes e condizentes, com exceção das áreas 3 e 6 que apresentam desacordo na profundidade de 1,5 metros, em que estes valores discrepantes são

derivados de valores extremos (muito grandes ou muito pequenos) que fazem com que a média tenha seu valor deslocado. Analogamente, para as áreas de maneira geral, as medidas de tendência central que possam vir a fornecer representatividade, como a “mediana da área” e “kv médio da área” para as áreas estudadas apresentam concordância na ordem de grandeza, salvo para a área 6.

Todavia, apesar da área 6 não evidenciar homogeneidade e constância nos valores de condutividade hidráulica (K_v), é importante ressaltar que esta área se destaca com os menores valores de K_v dentre as áreas estudadas com grandezas que seguem desde 10^{-4} até 10^{-5} , estabelecendo uma das áreas promissoras para a instalação do aterro sanitário, neste quesito.

Para a NBR 13.896, o local de instalação do aterro sanitário deve apresentar os menores valores de condutividade hidráulica possíveis, mais especificamente um coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s, no entanto pode vir a ser aceito valores superiores, que não excedam a ordem de grandeza de 10^{-4} cm/s, a fim de se evitar a percolação de fluidos decorrentes das atividades inerentes ao aterro sanitário, no caso o chorume.

Dessa forma, ao considerar os valores de K_v obtidos em cada profundidade investigada em cada área, e, analisar as medidas de tendência central destas referidas profundidades, listadas na Tabela 16, apenas as áreas 1, 2, 6 e 7 apresentam condições mínimas descrita na NBR 13.896 para instalação do aterro sanitário, com valores comumente na ordem de grandeza de 10^{-4} cm/s, salvo a área 6, como mencionado anteriormente que apresenta ordem de grandeza com variação de 10^{-4} cm/s até 10^{-5} cm/s. No entanto, a homogeneidade e a distribuição destes dados devem ser apuradas e legitimadas com análise estatística.

6.3.3 Análise Estatística dos Dados de Condutividade Hidráulica

Para maior robustez dos dados de condutividade hidráulica a avaliação estatística é de suma importância para o desenvolvimento do trabalho, assim, diversos modelos estatísticos são utilizados para descrever as medidas típicas ou representativas de um conjunto de dados, geralmente indicadas por medidas de tendência central, elencando a média, mediana e moda. Assim, critérios como a forma de distribuição e objetivo da pesquisa são fundamentais a escolha da medida central adequada (Feijó 2010).

No entanto, normalmente os valores de K_v apresentam dados com valores distintos dentro de uma mesma área estudada, e, conseqüentemente uma distribuição assimétrica, contraindicando o uso de da média aritmética como melhor escolha de medida representativa,

recomendando o uso da mediana como medida de tendência central, como a mais representativa, a qual não é a mais adequada para representar trabalhos mais precisos (Trevisan *et al.* 2009, Feijó 2010, Rocha *et al.* 2019).

Neste caso, a estatística busca legitimar os valores representativos (no caso a média aritmética) obtidos na condutividade hidráulica, ainda que seja preciso transformações estatísticas para homogeneizar a distribuição dos dados amostrais dos valores obtidos em cada área (Campos 2000).

Dentre as diversas alternativas estatísticas foi utilizado nesse estudo a análise de variância (ANOVA), que consiste em uma técnica estatística utilizada em experimentos que apresentam variáveis quantitativas (chamadas de variáveis resposta) e qualitativas (denominadas de tratamentos), com o suporte do *Software R*. O principal objetivo é avaliar se, as categorias das variáveis qualitativas (área e profundidade) apresentam diferenças entre si em relação à variável resposta (condutividade hidráulica) (Milone 2009).

Em suma, a análise de variância é utilizada, a fim de se compreender se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Para tal, alguns pressupostos básicos devem ser obedecidos para a análise de variância, como: (i) as amostras são aleatórias e independentes; (ii) as populações têm distribuição normal; e (iii) as variâncias populacionais são iguais (Gomes 1990, Babertta *et al.* 2010). Ademais, observando-se diferenças acentuadas nos pressupostos, são utilizadas transformações de dados, a fim de se obter um conjunto de dados homogêneos e normalizados para análises estatísticas, dentre as quais se destaca a transformação Box-Cox (Box e Cox 1964).

6.3.3.1 Avaliação Conjunta da Condutividade Hidráulica das Áreas e da Profundidade

Desta maneira será utilizada a estatística descritiva neste trabalho, adquirida em planilha eletrônica do *Microsoft Excel 2013*, por intermédio da ferramenta “análise de dados”, bem como no *Software R*, onde, quanto mais medidas de assimetria estiverem distantes do valor “0”, maiores serão as chances da série de dados comportar-se como distribuição não normal. Vale ressaltar que tal valor também é identificado como coeficiente de Pearson, o qual indica que para intervalos em que: $0 < AS < 0,15$, a Assimetria é fraca; $0,15 < AS < 1$, a Assimetria é moderada e $AS \geq 1$, a Assimetria é forte (Petrucci & Oliveira 2017).

Os resultados obtidos para essa avaliação são apresentados nas tabelas 17 e 18 com suas estatísticas descritivas para a condutividade para as áreas e para as profundidades, respectivamente. Valores de média e mediana próximos indicam distribuições homogêneas, indicando nos cálculos de assimetria valores próximos de “0”. Neste caso, observa-se que, em geral, a presença de disparidade de valores de média e mediana, indicam razoável assimetria nas distribuições das variáveis. Além da observação matemática, isso pode ser observado, visualmente, nos Box-plots apresentados na Figura 21.

Tabela 17 - Estatísticas descritivas para a condutividade (x 10000) para as Áreas

| | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Min (*) | 1.250 | 0.571 | 1.33 | 1.33 | 1.31 | 0.0797 | 1.170 |
| Media (*) | 6.608 | 1.884 | 79.37 | 18.25 | 49.55 | 15.961 | 6.061 |
| Mediana (*) | 4.270 | 1.216 | 20.00 | 10.50 | 15.80 | 0.5950 | 3.700 |
| Max (*) | 22.100 | 5.750 | 305.00 | 64.70 | 180.00 | 57.000 | 16.300 |
| Desvio-padrão (*) | 6.571 | 1.962 | 106.83 | 22.81 | 63.57 | 19.737 | 4.896 |
| Assimetria | 1,956 | 2,08929 | 1,46488 | 1,51246 | 1,33253 | 1,38349 | 1,29532 |

(*): Valores multiplicados por x10000

Tabela 18 - Estatísticas descritivas para a condutividade (x 10000) para as Profundidades.

| | Profundidade 0,5m | Profundidade 1,0m | Profundidade 1,5m |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Min (*) | 0.595 | 0.158 | 0.0797 |
| Media (*) | 19.224 | 30.327 | 236.634 |
| Mediana (*) | 4.955 | 2.760 | 40.650 |
| Max (*) | 121.000 | 192.000 | 3.050.000 |
| Desvio-padrão (*) | 31.537 | 60.129 | 674.190 |
| Assimetrias | 2,260 | 2,150 | 4,230 |

(*) : Valores multiplicados por x10000

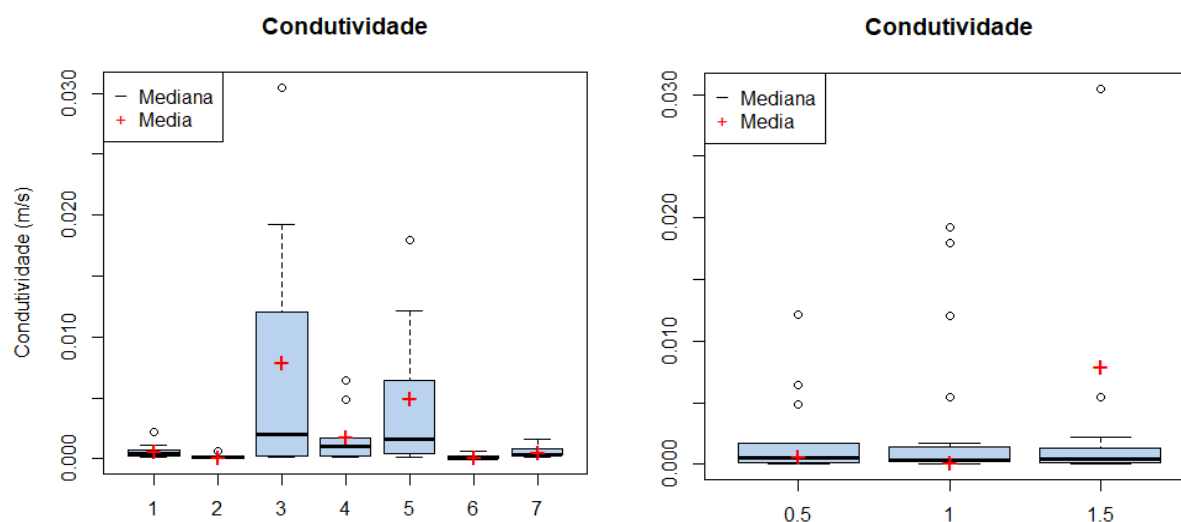


Figura 21 - Box-plot evidenciando a disparidade entre a média e a mediana da condutividade hidráulica em comparação entre a análise da área e profundidade.

Com a finalidade de se identificar a homogeneidade de variâncias dos parâmetros apresentados, área e profundidade, utilizou-se o teste de Bartlett, com nível de significância de 0,05, probabilidade de erro de 5%, em que o teste rejeitou a homogeneidade para a área ($t = 141.32$, $p < 2.2e-16$) e para a profundidade ($t = 10.272$, $p < 0.00588$). Desta maneira, foi realizada a transformação Box-Cox nos dados. Assim, com os dados transformados, o teste de Bartlett de homogeneidade de variâncias foi aceito para as duas covariadas, área ($t = 10.49$, $p < 0.1055$) e profundidade ($t = 1.2656$, $p < 0.5311$).

Em seguida foi utilizado o método ANOVA, para avaliação da análise de variância, neste caso para se fazer a comparação da condutividade entre as áreas e profundidades, onde o seguinte modelo foi utilizado:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J$$

Onde y_{ij} é a variável resposta (condutividade), μ é a média geral, τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento (Área), β_j é o efeito do j -ésimo tratamento (Profundidade) e ε_{ij} é o termo de erro aleatório $NID(0, \sigma^2)$. Os tratamentos são considerados fatores fixos. Consequentemente, os efeitos de tratamentos são considerados como desvios da média geral (Gomes 1990).

Tal avaliação indicou a existência de regressão, ou seja, a condutividade é afetada pela área ($F = 6.4216$, $p < 4.369e-05$). Entretanto, não foram detectadas diferenças para a profundidade ($F = 0.3802$, $p < 0.6857$). A análise residual (Figura 22) mostra que as condições de homogeneidade das variâncias (à esquerda), normalidade (à direita) estão satisfeitas. O objetivo principal é avaliar (testar) se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tratamentos, o que equivale a testar as hipóteses.

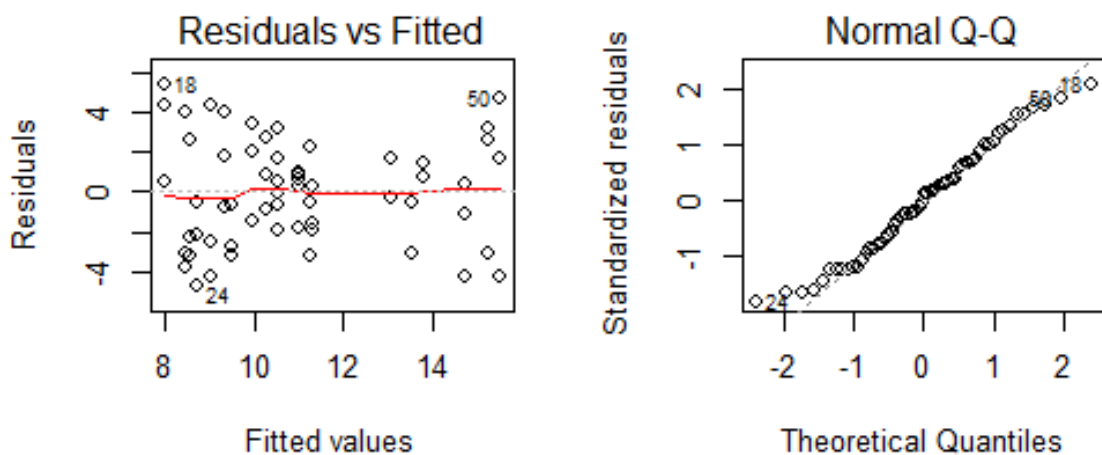


Figura 22 - Análise Residual para a condutividade hidráulica.

Por pressuposto, com os dados normalizados e a fim de estabelecer distinções entre as áreas estudadas, foi utilizado o teste de Duncan, que visa a comparação múltipla entre as diferentes variáveis (área e profundidade) associadas à condutividade hidráulica. Os resultados são apresentados na Tabela 19 (Letras iguais indicam diferenças não significativas) e na Figura 23. Diante do exposto, não houve diferenças marcantes para os valores de condutividade hidráulica entre as áreas 2 e 6 (ambas com a letra “a”), analogamente para as áreas 1, 2 e 7 (todas com a letra “b”) ou mesmo entre as áreas 1, 3, 4, 5 e 7 (todas com a letra “c”). Da mesma forma, pode-se inferir que os valores da condutividade hidráulica nas áreas 2 e 6 são diferentes dos valores da condutividade hidráulica nas áreas 3, 4 e 5. Considerando ainda que, a área 6 apresenta valores de condutividade hidráulica diferentes das áreas 1, 3, 4, 5 e 7.

Tabela 19 - Comparação entre a condutividade hidráulica das áreas e das profundidades.

| Variáveis | ID | Médias transformadas | Medias originais | Grupos |
|--------------|-----|----------------------|------------------|--------|
| Área | 6 | 15.1595 | 0.000159 | a |
| | 2 | 13.460 | 0.000188 | ab |
| | 7 | 10.9497 | 0.000606 | bc |
| | 1 | 10.9319 | 0.000660 | bc |
| | 4 | 9.9055 | 0.001825 | c |
| | 5 | 8.9883 | 0.004955 | c |
| | 3 | 8.4029 | 0.007937 | c |
| Profundidade | 1,5 | 11.3483 | 0.002366 | a |
| | 1,0 | 11.0559 | 0.003032 | a |
| | 0,5 | 10.5858 | 0.001922 | a |

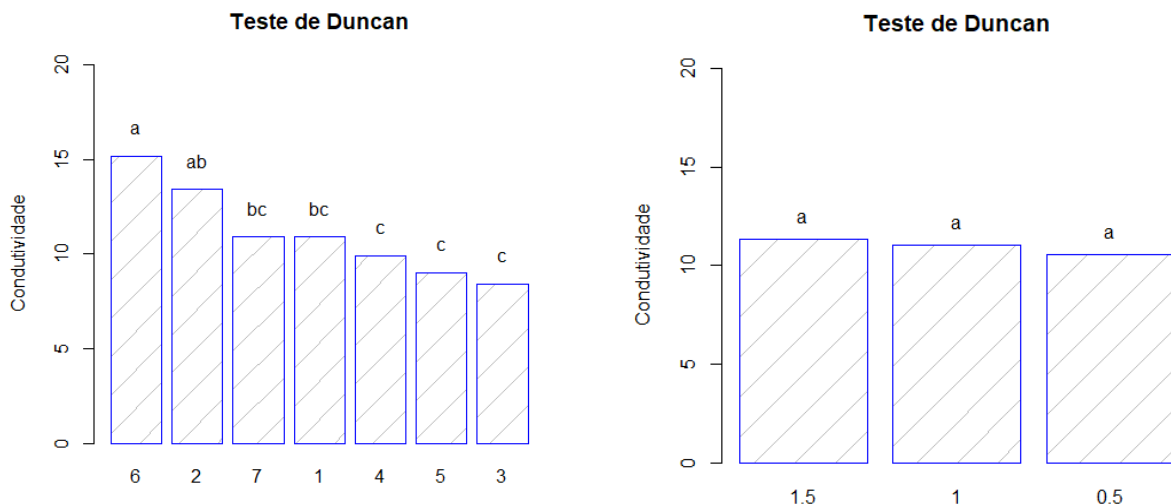


Figura 23 - Análise gráfica comparativa da condutividade hidráulica frente as variáveis área e profundidade.

6.4 ASSEMBLEIA MINERALÓGICA

6.4.1 Análise dos Dados Obtidos na Difração de Raio-X

Os resultados obtidos a partir dos 20 difratogramas com padrões de referência são apresentados no ANEXO B, o quais foram comparados no banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data Powder Diffraction File*). Os resultados das análises de DRX, indicando as principais fases cristalinas obtidas para cada amostra analisada das áreas avaliadas, à profundidade de 1,5 m, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Conteúdo mineralógico identificado nos difratogramas obtidos nas análises de DRX.

| Área 1 | | |
|----------|---------|---|
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 1 | DEU 038 | Totalidade de quartzo |
| Ponto 2 | DEU 039 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Ponto 3 | DEU 040 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Área 2 | | |
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 4 | DEU 041 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Ponto 5 | DEU 042 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Área 3 | | |
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 6 | DEU 043 | Totalidade de quartzo |
| Ponto 7 | DEU 044 | Totalidade de quartzo |
| Ponto 8 | DEU 045 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Área 4 | | |
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 9 | DEU 046 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Ponto 10 | DEU 047 | Predominância de Quartzo, e menores teores de Hematita, Goethita e Caulinita |
| Ponto 11 | DEU 048 | Totalidade de quartzo |
| Área 5 | | |
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 12 | DEU 049 | Predominância de Quartzo, menores teores de Hematita e Caulinita e traços de Anatásio |
| Ponto 13 | DEU 050 | Predominância de Quartzo, menores teores de Hematita e Caulinita e traços de Anatásio |
| Ponto 14 | DEU 051 | Predominância de Quartzo e menores teores de Hematita e Caulinita |
| Área 6 | | |
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 15 | DEU 052 | Predominância de Quartzo, menores teores de Hematita e traços de Anatásio |
| Ponto 16 | DEU 053 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Ponto 17 | DEU 054 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |

| Área 7 | | |
|----------|---------|--|
| Pontos | Amostra | Assembleia Mineral identificada |
| Ponto 18 | DEU 055 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |
| Ponto 19 | DEU 056 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita, Anatásio e ilita (muscovita) |
| Ponto 20 | DEU 057 | Predominância de Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio |

Em todas as amostras analisadas por Difração de Raio X, o quartzo (SiO_2) se comporta como a fase mineral predominante em todos os pontos, ou na totalidade da composição da amostra, subordinadamente, em determinados pontos ocorrem fases minerais estabelecida por caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), hematita (Fe_2O_3) e goethita (FeOOH), além de traços de anatásio (TiO_2) e ilita ($(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$).

Tais assinaturas mineralógicas são corroboradas na literatura para a Formação Barreiras, e em caso de derivação desta para a sucessão do Sedimentos Pós Barreiras, em diferentes locais na extensão destas unidades geológicas, desde a região nordeste do estado do Pará (Nascimento 2002; Berredo *et al.* 2008) até o estado da Bahia (Souza *et al.* 2016). De acordo com Berredos *et al.* (2008) e Nascimento (2002), estes sedimentos e solos do nordeste do estado do Pará são constituídos essencialmente de quartzo, seguido por caulinita, muscovita, hematita e goethita, além de outros minerais, que são definidos como acessórios neste cenário, em que se encontram a turmalina, zircão, cianita, rutilo e anatásio.

A presença destes minerais na Formação Barreiras e, por conseguinte nos Sedimentos Pós Barreiras, está relacionada ao intemperismo de rochas graníticas pretéritas, as quais por natureza são fontes ricas de quartzo e de elementos químicos essenciais para a composição da caulinita, hematita e goethita, tal relação geoquímica é descrita por Costa *et al.* (2004), em consonância Berredos *et al.* (2008) assinalam que os manguezais são influenciados por estas unidades geológicas.

6.4.2 Avaliação da Assembleia Mineralógica

Os minerais encontrados neste trabalho sugerem a forma ideal das reações de hidrólise, com a alteração dos minerais formadores de rocha como feldspatos potássicos para gibbsita (alutização) e caulinita (monossilicificação), e dos piroxênios para hematita e goethita (ferralitização), considerados por Melfi & Pedro (1978) e Toledo (2000).

Assim, quando o intemperismo químico atua nos minerais presentes na superfície terrestre por intermédio da hidrólise, os elementos químicos solúveis (móveis) como o K e SiO₄ são removidos pela drenagem, enquanto os elementos menos solúveis (imóveis) como Fe e Al têm um enriquecimento relativo e formam, respectivamente, o oxi-hidróxido de Fe (Goethita e Hematita) e hidróxido de Al (Gibbsita) (Souza 2017).

O mineral quartzo se estabelece como a principal fase cristalina nos sedimentos analisados das amostras, ocorrendo de forma predominante, sendo, em alguns pontos, a única mineralogia identificada. No entanto, os oxi-hidróxidos de Fe e Al podem fornecer um entendimento teórico acerca da disposição do solo em sub superfície. Assim a mineralogia indica que a rede de drenagem pretérita não foi eficiente para a lixiviação do conteúdo de sílica presente no solo ou havia excesso de sílica (Toledo 2000), conforme identificado nas análises de difração de Raio X.

Dentre os diversos argilominerais da região, apenas a caulinita e a illita foram identificados nas análises de DRX, sendo a caulinita o seu melhor expoente, com a forte predominância de quartzo, culminando em reações químicas que favoreceram a formação do argilomineral caulinita, em detrimento da gibbsita. Além da illita, em apenas um ponto amostrado. A origem destes minerais está associada a processos pedogenéticos e a concomitante existência relacionada a variabilidade do índice pluviométrico (Gonçalves 2004).

Ademais os oxi - hidróxidos de Fe também possuem origem pedogênica (Souza 2017), onde o ferro outrora presente na estrutura dos minerais ferromagnesianos, a exemplo do piroxênio, serviu de fonte deste elemento e a subsequente precipitação nas camadas em subsuperfície do solo, para posterior formação de hematita e, goethita, em menores teores. A presença do Fe é caracterizada também na região por grãos de aspecto ferruginoso e por vezes com tamanho cascalho, angulosos e de baixa esfericidade, comumente encontrados nos solos da região nordeste do Pará, como visto por Palheta (2008) e identificado na coleta das amostras.

6.4.3 Implicações das Argilas na Impermeabilização e Estabilidade

Para a NBR 13.986 as argilas são consideradas de extrema importância para a impermeabilização do solo, constituindo um grupo de minerais que podem modificar a permo-porosidade do solo de determinada região, preenchendo os poros das rochas impedindo o deslocamento vertical dos fluidos em sub superfície, em face da menor infiltração de fluidos e de maior escoamento superficial.

De acordo com Macambira (2002) o solo local é comumente utilizado como material complementar para a impermeabilização, contudo em alguns casos pode representar o único tipo de barreira que possa atenuar ou impedir a percolação de chorume dentro do empreendimento do aterro sanitário.

Os argilominerais podem ser classificados em três grupos: (i) Caulinita; (ii) Ilita; e (iii) Montmorilonita. Dentre estes, o grupo da Montmorilonita apresenta propriedade de afinidade e retenção de água em sua estrutura, em que a característica de atração por água e outros fluidos é denominada higroscopia. Tais argilominerais adquirem por absorção ou adsorção, parcialmente, e de forma temporária, moléculas de água em sua estrutura cristalina, culminando no fenômeno de aumento do volume da cela unitária destes argilominerais, caracterizando as argilas expansivas (Schroeder 1984, LEPSCH 2002, Macambira 2002).

Considerando que o material para compactação será retirado do entorno da área selecionada, bem como os materiais em sub superfície no local do aterro, é condição necessária que se compreenda os argilominerais constituintes destas camadas (Leme 2013), pois a ocorrência de argilominerais expansivos no solo da região pode inviabilizar a escolha de áreas, ou aumentar o custo das obras de engenharia no decorrer da operação do aterro sanitário.

Desta maneira, a ausência de argilominerais expansivos (grupo da montmorilonita) é necessária para a viabilidade do terreno, além disso, a presença majoritária do argilomineral caulinita é de fundamental importância para a avaliação positiva de todas as áreas, sugerindo viabilidade do ponto de vista mineralógico. Assim é possível compreender que o material de solo/sedimentos pode ser utilizado em maiores ou menores quantidades nas rotinas do empreendimento do aterro sanitário, o que não influenciará no comportamento do maciço de resíduos do aterro sanitário, em virtude da ausência de material argiloso com propriedades expansivas.

6.5 DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DO ATERRO SANITÁRIO

A estimativa de dimensionamento para o aterro sanitário de acordo com a NBR 13.896 deve atender ao mínimo de 10 anos de vida útil para o município, no entanto, comumente a literatura apresenta um período de 20 anos de vida útil, período que também foi adotado neste trabalho. No entanto, frente as áreas previamente selecionadas, foi verificado se suas dimensões apresentam viabilidade de funcionamento para o período de 20 anos, cujas dimensões das áreas em hectares são apresentadas na Tabela 21.

Para compreender a viabilidade das áreas, no que diz a respeito as dimensões das áreas e consequentemente o volume que estas comportarão, os cálculos referentes à estimativa populacional (habitantes) e volume de resíduos sólidos (m³) produzidos no decorrer da vida útil são de fundamental importância para trabalhos preliminares e no desenvolvimento dos projetos intrínsecos ao dimensionamento do aterro sanitário.

Tabela 21 - Dimensões em hectares das áreas previamente selecionadas.

| Identificação | Área (ha) |
|---------------|-----------|
| Área 1 | 71,259 |
| Área 2 | 70,823 |
| Área 3 | 184,807 |
| Área 4 | 163,708 |
| Área 5 | 19,494 |
| Área 6 | 52,979 |
| Área 7 | 50,312 |

6.5.1 Estimativa Populacional

A projeção de produção de resíduos sólidos gerado nos municípios considerou o intervalo de tempo entre os anos de 2021 até 2040. Considerando uma projeção exponencial do crescimento populacional e geração de resíduos sólidos dos municípios, utilizando os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), dentre os quais se destacam o Censo de 2010 e a estimativa populacional referente ao ano de 2020 (Tabela 22).

Tabela 22 - População brasileira no Censo de 2010 e estimada para 2020.

| | Castanhal | Santa Izabel do Pará | Inhangapi | Santa Maria do Pará | São Francisco do Pará |
|--------------------------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|
| População Censo 2010 | 173.149 | 59.466 | 10.037 | 23.026 | 15.060 |
| População estimada 2020 | 203.251 | 71.837 | 11.861 | 24.995 | 15.930 |

Fonte: (IBGE 2010)

O crescimento exponencial da população de 2021 até o ano de 2040 será calculado de acordo com a Equação 3, obtida em Goel *et al.* (2017).

$$N = N_o * exp^{k*(t-t_o)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

N = População no tempo t (final), habitantes

N_o = População no tempo t_o (inicial), habitantes

k = CTE, taxa exponencial de crescimento (obtida na equação 4)

t = Ano final

t_o = Ano inicial

Para aquisição da constante “k”, que fornece a taxa exponencial de crescimento dos municípios envolvidos é utilizada a Equação 4 Goel *et al.* (2017).

$$k = \frac{\ln(N/N_o)}{t - t_o} \quad \text{Equação 4}$$

Considerando a população de cada município contido na Tabela 22, correspondentes a 2010 e 2020 foram obtidas as constantes “k”, que se refere a taxa exponencial anual de crescimento (Tabela 23) de cada município.

Tabela 23 - Taxa exponencial anual de crescimento "k", obtidos para cada município do CONCISSS.

| | Castanhal | Santa Izabel do Pará | Inhangapi | Santa Maria do Pará | São Francisco do Pará |
|---------------|-----------|----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|
| Constante “K” | 0,016029 | 0,018899 | 0,016698 | 0,008205 | 0,005616 |

Em posse dos valores de “k”, utilizou-se a equação 3, em consonância com os dados populacionais do Censo de 2010 e da estimativa do IBGE para 2020 dos municípios envolvidos (Tabela 22), e os anos subsequentes a partir de 2021 em diante, até 2040, para se calcular a população total esperada no período de vida útil do aterro sanitário (Tabela 24).

Tabela 24 - Projeção populacional para os municípios envolvidos no CONCISSS

| Projeção Populacional dos Municípios Envolvidos no CONCISSS | | | | | | |
|--|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| ANO | Castanhal | Santa Izabel do Pará | Inhangapi | Santa Maria do Pará | São Francisco do Pará | População Total/Ano |
| 2021 | 206.535 | 73.208 | 12.061 | 25.201 | 16.020 | 333.024 |
| 2022 | 209.872 | 74.604 | 12.264 | 25.409 | 16.110 | 338.259 |
| 2023 | 213.263 | 76.028 | 12.470 | 25.618 | 16.201 | 343.580 |
| 2024 | 216.709 | 77.478 | 12.680 | 25.829 | 16.292 | 348.989 |
| 2025 | 220.211 | 78.957 | 12.894 | 26.042 | 16.384 | 354.487 |
| 2026 | 223.769 | 80.463 | 13.111 | 26.256 | 16.476 | 360.075 |
| 2027 | 227.385 | 81.998 | 13.332 | 26.473 | 16.569 | 365.756 |
| 2028 | 231.059 | 83.563 | 13.556 | 26.691 | 16.662 | 371.530 |
| 2029 | 234.792 | 85.157 | 13.784 | 26.911 | 16.756 | 377.400 |
| 2030 | 238.586 | 86.782 | 14.016 | 27.132 | 16.850 | 383.367 |
| 2031 | 242.441 | 88.437 | 14.252 | 27.356 | 16.945 | 389.432 |
| 2032 | 246.359 | 90.125 | 14.492 | 27.581 | 17.041 | 395.598 |
| 2033 | 250.339 | 91.844 | 14.736 | 27.809 | 17.137 | 401.865 |
| 2034 | 254.384 | 93.596 | 14.985 | 28.038 | 17.233 | 408.236 |
| 2035 | 258.495 | 95.382 | 15.237 | 28.269 | 17.330 | 414.713 |
| 2036 | 262.672 | 97.202 | 15.493 | 28.502 | 17.428 | 421.296 |
| 2037 | 266.916 | 99.057 | 15.754 | 28.736 | 17.526 | 427.989 |
| 2038 | 271.229 | 100.946 | 16.020 | 28.973 | 17.625 | 434.793 |
| 2039 | 275.611 | 102.872 | 16.289 | 29.212 | 17.724 | 441.709 |
| 2040 | 280.065 | 104.835 | 16.564 | 29.453 | 17.824 | 448.740 |

6.5.2 Identificação de Massa e Volume de Resíduos

Com base nos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS 2020), o Brasil apresentou em 2019 uma produção *per capita* de resíduos sólidos em relação a população urbana de 0,99 Kg/hab/dia, enquanto a região Norte apresentou 0,97 Kg/hab/dia, já o estado do Pará apresentou um valor médio de 0,94 Kg/hab/dia. Em virtude, do franco desenvolvimento dos municípios envolvidos no CONCISSS será considerado a média do país, com uma produção *per capita* de 0,99 Kg/hab/dia e reajuste de 1,05%/ano, isto para calcular a previsão de resíduos sólidos produzidos de 2021 até 2041, intervalo de tempo para qual será projetado o aterro sanitário (Tabela 25).

Tabela 25 - Valores brutos de resíduos sólidos produzidos pela população, em toneladas estimada para o período de 20 anos.

| | População Total/Ano | Geração per capita (kg/hab/dia) | Geração de RSU (kg/dia) | Geração de RSU (ton/ano) |
|-------------------------|----------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|
| 2021 | 333.024 | 0,9900 | 329.694 | 120.338 |
| 2022 | 338.259 | 1,0004 | 338.393 | 123.513 |
| 2023 | 343.580 | 1,0109 | 347.325 | 126.774 |
| 2024 | 348.989 | 1,0215 | 356.497 | 130.121 |
| 2025 | 354.487 | 1,0322 | 365.915 | 133.559 |
| 2026 | 360.075 | 1,0431 | 375.587 | 137.089 |
| 2027 | 365.756 | 1,0540 | 385.518 | 140.714 |
| 2028 | 371.530 | 1,0651 | 395.716 | 144.436 |
| 2029 | 377.400 | 1,0763 | 406.189 | 148.259 |
| 2030 | 383.367 | 1,0876 | 416.943 | 152.184 |
| 2031 | 389.432 | 1,0990 | 427.987 | 156.215 |
| 2032 | 395.598 | 1,1105 | 439.328 | 160.355 |
| 2033 | 401.865 | 1,1222 | 450.974 | 164.605 |
| 2034 | 408.236 | 1,1340 | 462.934 | 168.971 |
| 2035 | 414.713 | 1,1459 | 475.216 | 173.454 |
| 2036 | 421.296 | 1,1579 | 487.829 | 178.058 |
| 2037 | 427.989 | 1,1701 | 500.782 | 182.786 |
| 2038 | 434.793 | 1,1824 | 514.085 | 187.641 |
| 2039 | 441.709 | 1,1948 | 527.746 | 192.627 |
| 2040 | 448.740 | 1,2073 | 541.776 | 197.748 |
| Total em 20 anos | - | - | 8.546.431 | 3.119.447 |

Desta maneira, é possível concluir que a população dos municípios envolvidos no CONCISSS gerará em torno de 3.119.447 toneladas de resíduos sólidos no decorrer de 20 anos, no entanto esse é o valor superdimensionado, pois a Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tem como objetivos, dentre outros, a redução, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos domiciliares; assim como estímulos a padrões sustentáveis e desenvolvimento, além do aprimoramento de tecnologias limpas a fim de minimizar os impactos ambientais. Logo, isto certamente reduzirá a produção de resíduos sólidos no futuro.

Portanto, será considerado que no mínimo cerca de 20% dos resíduos sólidos produzidos terá destinação diversa do aterro sanitário, considerando os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Desta Maneira, apenas 80% das 3.119.447 toneladas de resíduos sólidos deverá ser considerado para o dimensionamento do aterro sanitário, haja vista que os

municípios terão que se adequar a legislação vigente. Assim é esperado que os municípios produzam cerca de 2.495.557 toneladas no decorrer de 20 anos.

A disposição dos resíduos sólidos é calculada de acordo com o volume que estes ocupam no aterro sanitário, assim é necessária a conversão de massa (2.495.557 t) para volume, de acordo com a Equação 5. Com o levantamento de diversas literaturas Spinola *et al.* (2017) convencionaram o valor médio da massa específica dos resíduos sólidos após a compactação em 0,703 t/m³. Quanto ao volume de cobertura Monteiro *et al.* (2001) consideram necessário um valor correspondente a uma taxa de 20% em cima do volume de resíduos sólidos previsto para o aterro.

$$\sigma = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 5}$$

Desta maneira, calcula-se que cerca de 3.549.869 m³ sejam produzidas no decorrer dos 20 anos, além da necessidade de 709.973 m³ de material de cobertura para cobrir os rejeitos, assim o volume total estimado será de 4.259.842 m³.

6.5.3 Dimensionamento da Área

Para a dimensionamento da área mínima recomendável do aterro sanitário será considerado a referência do Ministério das Cidades (Brasil 2011), que apresenta as extensões superficiais mínimas destinadas a implantação do aterro sanitário, relacionando com a estimativa populacional (Tabela 26).

Tabela 26 - Referência de área mínima recomendável em relação ao número estimado de habitantes.

| População urbana (habitantes) | Área mínima recomendável (ha) |
|-------------------------------|-------------------------------|
| até 2.000 | 1,0 hectares |
| entre 2.001 e 5.000 | 2,0 hectares |
| entre 5.001 e 10.000 | 4,0 hectares |
| entre 10.001 e 20.000 | 6,0 hectares |
| entre 20.001 e 50.000 | 10,0 hectares |
| entre 50.001 e 100.000 | 20,0 hectares |
| entre 100.001 e 150.000 | 25,0 hectares |
| entre 150.001 e 250.000 | 35,0 hectares |
| entre 250.001 e 500.000 | 55,0 hectares |
| entre 500.001 e 750.000 | 95,0 hectares |

Fonte: (Brasil 2011)

Portanto, considerando a população de 448.740 mil pessoas para serem atendidas pelo empreendimento do aterro sanitário, e de acordo com as Tabela 25 e Tabela 26, a área recomendável é de 55 hectares. Considerando estes valores como dimensões necessárias para atender ao aterro sanitário, apenas as áreas 1, 2, 3, 4 satisfazem integralmente as condições, enquanto as áreas 6 e 7 destoam ligeiramente para abaixo do mínimo necessário e a área 5 não chega nem próximo de satisfazer a condição. Contudo a depender da proposta de empilhamento dos resíduos sólidos, estes números podem oscilar para mais ou menos.

Vale ressaltar, que diversas metodologias matemáticas são adotadas para o cálculo da área mínima recomendável, pois diversos fatores inerentes ao projeto de engenharia do aterro sanitário são considerados como variáveis neste cálculo, dentre os quais se destacam a altura do aterro, a proporção dos taludes e o percentual de ocupação necessária para a infraestrutura do aterro. Para tanto os valores outrora calculados de estimativa populacional e de volume projetado para o aterro sanitário serão de fundamental importância para a metodologia e cálculos posteriores de engenharia no decorrer da execução do projeto futuro.

6.6 ANÁLISE COMPARATIVA DAS ÁREAS FRENTE AOS CRITÉRIOS UTILIZADOS

Diante do exposto, com a utilização das metodologias aplicadas para avaliar os parâmetros fisiográficos, mineralógicos, granulométricos, assim como a condutividade hidráulica e a vida útil do aterro sanitário, previstos na NBR 13.896, um resumo destas investigações é apresentado na Tabela 27, visando reunir e condensar os resultados obtidos.

Tabela 27 - Análise simplificada dos atributos de cada área.

| Crítérios | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 |
|---|--|--|--|--|---|--|---|
| Declividade | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) | Plano (0 -3%) |
| Distância dos Cursos das Águas Superficiais | >200m | >200m | >200m | >200m | >200m | >200m | >200m |
| Distância dos centros Produtores de Resíduos Sólidos | Ótima | Ótima | Ruim | Ruim | Ruim | Ruim | Ruim |
| Distância dos Núcleos Populacionais | >500m | >500m | >500m | >500m | >500m | >500m | >500m |
| Distância dos Sistemas Viários | 100 – 600 m | 50 – 700 m | 1,2 – 3,5 m | 50 – 800 m | 200 – 800 m | 50 – 350 m | 50 – 800 m |
| Área de Proteção Permanente | Sem Restrição | Sem Restrição | Sem Restrição | Sem Restrição | Sem Restrição | Sem Restrição | Sem Restrição |
| Texturas do solo | Média-argilosa e Argilosa | Média-argilosa e Argilosa | Média-Argilosa e Média-arenosa | Média arenosa cascalhenta e Média-Argilosa | Média-Argilosa e Média-Arenosa | Média-Arenosa e Média-Argilosa | Média-Argilosa e Média-Arenosa |
| Condutividade Hidráulica do solo | $6,61 \cdot 10^{-4}$ | $1,88 \cdot 10^{-4}$ | $7,93 \cdot 10^{-3}$ | $1,83 \cdot 10^{-3}$ | $4,96 \cdot 10^{-3}$ | $1,60 \cdot 10^{-4}$ | $6,06 \cdot 10^{-4}$ |
| Conteúdo Mineralógico do solo | Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio | Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio | Quartzo com traços de Caulinita e Anatásio | Quartzo, e menores teores de Hematita, Goethita, Caulinita, e traços de anatásio | Quartzo, menores teores de Hematita e Caulinita, traços de Anatásio | Quartzo, menores teores de Hematita e traços de Caulinita e Anatásio | Quartzo com traços de Caulinita, Anatásio e ilita (muscovita) |
| Vida Útil (20 anos) | Alta expectativa | Alta expectativa | Alta expectativa | Alta expectativa | Baixa expectativa | Baixa a média expectativa | Baixa a média expectativa |

Após o desenvolvimento dos trabalhos aplicados à Norma NBR 13.896 e com o auxílio de forma simplificada dos atributos na Tabela 27, uma análise comparativa entre as áreas estudadas foi estabelecida de acordo com a proposta de Krebs *et al.* (1999) e de forma complementar com a união de matrizes dos autores Monteiro *et al.* (2001) e Melo Junior (2019), que desenvolveram trabalhos condizentes com esta metodologia.

O desenvolvimento desta metodologia, proposta por Krebs *et al.* (1999), classifica as áreas avaliadas em três classes: (i) favoráveis; (ii) medianamente favoráveis e; (iii)

desfavoráveis, para a implantação do aterro sanitário; com a utilização de pontos de prioridade e pesos de Monteiro *et al.* (2001), pertinentes aos critérios e aos tipos de atendimento, quando necessário com modificações no *ranking* de pontuação.

Para fins práticos Krebs *et al.* (1999) consideram como **áreas favoráveis** aquelas que atendam de maneira mais íntegra possível os parâmetros técnicos estabelecidos pelas normas e legislações vigentes, ou seja, quanto menos empecilhos no decorrer da construção do aterro, menores serão as modificações físicas do terreno. Pode se entender também de forma positiva que, melhores condições ambientais podem contribuir positivamente para o menor emprego de tecnologias para remediação ambiental, além de que, não se deve priorizar locais que gerem conflitos sociais com as comunidades e núcleos populacionais próximos ao local previsto para instalação do empreendimento. De acordo com os referidos autores, áreas favoráveis são aquelas com índices finais de avaliação igual ou superior a 80% de atendimento aos critérios estabelecidos.

Para Krebs *et al.* (1999) as **áreas medianamente favoráveis** são aquelas que necessitam de projetos especiais, com custos adicionais para compensar deficiências relativas aos critérios previamente estabelecidos nas normas e legislação, identificadas na adaptação deste trabalho com índices finais $< 80\%$ e $> 60\%$, e que não apresentaram nenhuma característica eliminatória.

Conforme o entendimento de Krebs *et al.* (1999) as **áreas desfavoráveis** são aquelas que apresentam um ou mais critérios eliminatórios, ou identificados na adaptação deste trabalho com índices finais $< 60\%$.

De acordo com Monteiro *et al.* (2001) a seleção da melhor área para implantação do aterro sanitário deve atender as peculiaridades locais do desenvolvimento do trabalho, considerando as características regionais, como o grau singular de importância diante do ponto de vista técnico, social e econômico dos municípios, bem como os critérios apresentados fornecerem justificativa e motivação plausíveis para ponderação de prioridade.

Para tanto, adotou-se a hierarquia de prioridade de Monteiro *et al.* (2001) que estabelece um ordenamento do nível de prioridade do atendimento dos critérios técnico, econômico, político e social (Tabela 28), ainda assim, a ordem de prioridade dos critérios pode ser alterada a depender das peculiaridades do trabalho (Melo Júnior 2017).

Seguindo as propostas de Krebs *et al.* (1999) e Monteiro *et al.* (2001), se o critério de atendimento é “totalmente atendido” é atribuído o valor percentual de 100%; se “atendido parcialmente por meio de obras” é atribuído o valor percentual de 50% e; se “não é atendido”

é atribuído o valor percentual 0%. Ademais, uma correlação entre a hierarquia, peso dos critérios e tipo de atendimento pode ser representada de acordo com a Tabela 28.

Tabela 28 - Relação da hierarquia dos critérios, peso dos critérios e o tipo de atendimento.

| Hierarquia dos critérios | Prioridade dos Critérios | Pesos dos Critérios | Notas dos critérios | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| | | | Atendimento total (100%) | Atendimento Parcial (50%) | Não Atendido (0%) |
| Legislação Ambiental | 1 | 10 | 10 | 5 | 0 |
| Condicionantes Político-Sociais | 2 | 6 | 6 | 3 | 0 |
| Principais Condicionantes Econômicos | 3 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| Principais Condicionantes Técnicos | 4 | 3 | 3 | 1,5 | 0 |
| Demais Condicionantes Econômicos | 5 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| Demais Condicionantes Técnicos | 6 | 1 | 1 | 0,5 | 0 |

Fonte: (Monteiro *et al.* 2001)

Para o presente trabalho os critérios previstos na NBR 13.896 são elencados em ordem de predileção na Tabela 29, com a finalidade de atender as particularidades intrínsecas as características do meio físico do município de Castanhal e geográficas dos municípios atendidos no caso do CONCISSS. Considerando neste trabalho os seus respectivos valores de prioridade adotados por Monteiro *et al.* (2001). Vale ressaltar, que, a fim de considerar as peculiaridades dos municípios envolvidos, algumas adequações e alterações de *Ranking* fizeram-se necessárias para adequar as características do local de desenvolvimento do trabalho (Tabela 29).

Tabela 29 - Critérios adotados de acordo com a NBR 13.896 da ABNT, com as devidas prioridades e pesos ajustados ao CONCISSS.

| Critérios | Prioridade | Peso |
|--|-------------------|-------------|
| Distância Mínima dos Cursos da Águas | 1 | 10 |
| Distância Mínima dos Núcleos Populacionais | 1 | 10 |
| Distância de Aeroportos | 1 | 10 |
| Condutividade Hidráulica do Solo Natural | 1 | 10 |
| Área de Proteção Permanente (APP) | 1 | 10 |
| Distância Satisfatória dos Sistemas Viários | 2 | 6 |
| Distância dos Centros de Coleta (*) | 2 | 6 |
| Baixo Investimento com infraestrutura | 3 | 4 |
| Vida Útil Mínima | 3 | 4 |
| Textura do solo (material de cobertura) | 3 | 4 |
| Declividade | 4 | 3 |
| Conteúdo Mineralógico | 4 | 3 |
| Uso do Solo | 4 | 3 |
| Acesso a Veículos Pesados | 5 | 2 |

Fonte: Modificado de (Monteiro *et al.* 2001).

(*) a distância do centro de coleta apresenta prioridade “2” e peso “6”, em virtude de vários municípios estarem envolvidos no projeto.

Na Tabela 30 são identificados os percentuais do Tipo de Atendimento evidenciado nos locais de estudo, com a finalidade de identificar se as áreas atendem de forma mais integra possível os critérios previamente estabelecidos nas normas e legislação vigente, em síntese da NBR 13.896.

Tabela 30 - Percentual do tipo de atendimento das áreas pré-selecionadas para instalação do aterro sanitário no caso do CONCISSS, de acordo com a norma NBR 13.896 da ABNT.

| Critérios | Peso dos Critérios | Percentual do Tipo de Atendimento | | | | | | |
|--|--------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 |
| | | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Distância Mínima dos Cursos da Águas Superficiais | 10 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Distância Mínima dos Núcleos Urbanos/Populacionais | 10 | 100 | 50 (*) | 50 | 100 | 50 | 50 | 50 |
| Distância de Aeroportos (**) | 10 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Condutividade Hidráulica do Solo Natural | 10 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| Área de Proteção Permanente (APP) | 10 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Distância Satisfatória dos Sistemas Viários | 6 | 50 | 50 | 50 | 50 | 100 | 50 | 50 |
| Distância dos Centros de Coleta | 6 | 100 | 100 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Baixo Investimento com infraestrutura (***) | 4 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Vida Útil Mínima | 4 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 50 | 50 |
| Textura do solo (material de cobertura) | 4 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Declividade | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Conteúdo Mineralógico | 3 | 100 | 100 | 50 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Uso do Solo | 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Acesso a Veículos Pesados | 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Modificado de (Monteiro *et al.* 2001).

Legenda: 100% = Integralmente atendido; 50% = Parcialmente atendido; 0% = Não atendido.

(*) Ainda que a área 2 apresente condições mínimas de distância de núcleos populacionais (> 500 m), há um núcleo populacional a cerca de 2 km da referida área, algo que podem evoluir para conflitos futuros com a comunidade.

(**) O município de Castanhal não possui aeroporto;

(***) A infraestrutura é diretamente afetada por fatores vinculados a legislação ambiental, descritos com peso 10.

Aplicando-se as notas do critério decorrente do exposto na Tabela 30 entre o percentual do Tipo de Atendimento e os Pesos dos Critérios, obteve-se a pontuação final das áreas (Tabela 31).

Tabela 31 - Pontuação final das áreas pré-selecionadas para a implantação do aterro sanitário do caso do CONCISSS.

| Critérios | Peso dos Critérios | Pontuação das Áreas | | | | | | |
|--|--------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | Área 1 | Área 2 | Área 3 | Área 4 | Área 5 | Área 6 | Área 7 |
| Distância Mínima dos Cursos da Águas Superficiais | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Distância Mínima dos Núcleos Urbanos/Populacionais | 10 | 10 | 5 (*) | 5 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| Distância de Aeroportos | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Condutividade Hidráulica do Solo Natural | 10 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 |
| Área de Proteção Permanente (APP) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Distância Satisfatória dos Sistemas Viários | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 3 | 3 |
| Distância dos Centros de Coleta | 6 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Baixo Investimento com infraestrutura | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Vida Útil Mínima | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 2 | 2 |
| Textura do solo (material de cobertura) | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Declividade | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Conteúdo Mineralógico | 3 | 3 | 3 | 1,5 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Uso do Solo | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Acesso a Veículos Pesados | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Pontuação Bruta | 85 | 73 | 68 | 58,5 | 65 | 59 | 63 | 63 |
| Pontuação em Percentual | 100% | 86% | 80% | 69% | 76% | 69% | 74% | 74% |

(*) Ainda que a área 2 apresente condições mínimas de distância de núcleos populacionais (> 500 m), há um núcleo populacional a cerca de 2 km da referida área, algo que pode evoluir para conflitos futuros com a comunidade.

Com base na Tabela 31 foi possível identificar a pontuação final das áreas previamente selecionadas, estabelecendo como mais favoráveis as áreas 1 e 2, com percentual de atendimento igual ou superior a 80%; enquanto as áreas medianamente favoráveis são representadas pelas áreas 6 e 7, ambas com índice de 74%; as áreas desfavoráveis correspondem às áreas 3, 4 e 5, que não atendem aos critérios mínimos elencados nas normas, culminando na eliminação destas.

Dentre as áreas favoráveis, representadas pelas áreas 1 e 2, estas apresentaram melhores condições frente aos critérios outrora definidos na NBR 13.896 e legislação vigente para a disposição dos resíduos sólidos. No entanto, ressalta-se, que a área 2 encontra-se a uma distância de 1 km de um núcleo populacional, algo que pode interferir no empreendimento do aterro sanitário e vida da comunidade local ali próximo estabelecida.

6.6.1 Elaboração de Mapa Visando as Áreas Favoráveis

Com base nas imagens de satélites, obtenção e elaboração arquivos vetoriais em ambiente SIG, confecção de mapas temáticos, atenção as normas e legislações vigentes, foi possível hierarquizar os critérios outrora adquiridos e obter uma pontuação final das áreas previamente selecionadas.

Para tanto, a metodologia empregada evidencia que as áreas favoráveis (áreas 1 e 2) para a disposição dos resíduos sólidos estão localizadas na porção sudeste da área investigada; as áreas medianamente favoráveis, por sua vez, estão situadas à sudoeste (área 6 e 7) do centro urbano do município de Castanhal (Figura 24), indicando viabilidade técnica e econômica, e com a devida gestão dos municípios envolvidos, a viabilidade político-social.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os estudos desenvolvidos nos municípios que integram o Consórcio Integrado Castanhal, Inhangapi, Santa Maria do Pará, Santa Izabel do Pará e São Francisco do Pará - CONCISSS, com ênfase no município de Castanhal, que corresponde ao membro do consórcio que vai disponibilizar a área para armazenamento dos resíduos sólidos, as seguintes conclusões podem ser observadas diante das áreas previamente selecionadas e favoráveis para implantação do aterro sanitário.

a) Todas as áreas do município de Castanhal apresentam pelo menos um critério elencado na legislação que é atendido parcialmente, o que influencia diretamente nos custos de infraestrutura na execução do projeto;

b) De acordo com o mapa de distância mínima das águas superficiais, todas as áreas estão de acordo com a NBR 13.896, notadamente as áreas estão situadas em divisores topográficos (ou de águas), e a baixa declividade de Castanhal corrobora para um lento escoamento do chorume para partes mais baixas em casos de possíveis acidentes;

c) Ao considerar modelos estatísticos, a condutividade hidráulica dos sedimentos que constituem a zona vadosa da região estudada para as profundidades entre 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m apresenta similaridade em toda sua extensão, enquanto que, de modo particular, cada área apresenta singularidades frente à esse parâmetro;

d) A condutividade hidráulica (K_v) apresenta apenas índices mínimos exigíveis diante da cobrança da ordem de grandeza prevista na NBR 13.896, mínima de $K_v = 10^{-5}$ cm/s, sendo em casos justificados índices de K_v na ordem de 10^{-4} cm/s. Assim, as áreas selecionadas 1, 2, 6 e 7 apresentam K_v na ordem de grandeza de 10^{-4} .

e) O material de impermeabilização pretendido para as áreas favoráveis (que seria argila do entorno das áreas) não atenderá às exigências e necessidades do aterro, pois são encontradas apenas ocorrências em pequenas proporções, além da predominância de fração areia, indesejável para o desenvolvimento dos trabalhos de impermeabilização dos resíduos sólidos do aterro sanitário;

f) O material mineralógico de todas as áreas é constituído principalmente de quartzo e subordinadamente caulinita, hematita, goethita e anatásio, indicando a ausência de argilominerais expansivos que possam comprometer a estabilidade, e conseqüentemente a segurança do aterro sanitário;

g) Diante da distância mínima exigida dos centros populacionais e núcleos populacionais, dentre as áreas favoráveis apenas as áreas 1 e 2 atendem as recomendações, no entanto a área 2 apresenta uma distância de 1 km de um núcleo populacional, algo que, pode representar um conflito futuro ao empreendimento e a comunidade. A área 6 apesar de englobar o atual “lixão” de Castanhal, situa-se próximo ao centro urbano de Castanhal e pode implicar em conflitos com o plano diretor em desenvolvimento da cidade.

As recomendações para a instalação do aterro sanitário contemplam estudos detalhados acerca da flutuação do lençol freático em períodos de intensa quantidade de chuva (novembro a abril) e de menores intensidades de chuva (maio a outubro), para compreender se estes serão diretamente afetados pela instalação do aterro sanitário. Além disto, trabalhos diretamente ligados a geotecnia para definir o comportamento do solo diante dos trabalhos diários do aterro, como a movimentação de máquinas pesadas, e as possibilidades de disposição dos resíduos sólidos no terreno são recomendados.

Ademais, recomenda-se a utilização de mantas impermeáveis, em virtude da condutividade hidráulica identificada no município de Castanhal, condicionada a atender apenas ao mínimo necessário previsto na NBR 13.896, e do próprio ambiente natural do solo fornecer, predominantemente, a fração areia como material de cobertura.

Por conseguinte, a utilização de simulações de mapas de ventos é de fundamental importância para compreender se o deslocamento de ar nas áreas compreendidas como favoráveis neste trabalho, e compreender se influenciarão nas comunidades adjacentes, a fim de evitar conflitos e por fim atingir o bem-estar e a qualidade de vida da população local.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE. 2013. *Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para a sua execução no campo*. 4.ed. São Paulo.
- Agência Nacional De Águas - ANA. (Brasil). 2015. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras*. Brasília, DF, ANA – Edição Especial. (Cap. 11 Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia)
- Agência Nacional De Águas – ANA. (Brasil). 2018. *Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém: relatório técnico temático sobre os ensaios de infiltração na região de Belém / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Profill Engenharia e Ambiente S.A – Brasília, DF.*
- Almeida L, Resende L., Rodrigues A.P., Campos J.E.G. 2006. *Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal*. Goiás, Superintendência de Geologia de Mineração, Governo de Estado de Goiás, 230p.
- Albers A. P. F., Melchades F. G., Machado R., Baldo J. B., Boschi A. O. 2002. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. *Cerâmica*, **48**(305): 34-37.
- Amorim C. L. G. 2007. *Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios-X*. PhD Thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 92p.
- Amorim K. B. 2016. *Paleoambiente, paleogeografia e isótopos de carbono e oxigênio de depósitos carbonáticos miocenos da Plataforma Bragantina, NE do estado do Pará, Brasil*. PhD Thesis, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 158p.
- Andrade Á. de S., Ribeiro S. da C. A., Pereira, B. W. de F., Brandão V. V. P. 2020. Fragmentação da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Marapanim, nordeste do Pará. *Revista Ciência Floresta. Ci. Fl.*, Santa Maria, **30** (2): 406-420.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT). 1984. *NBR 7181: Solo – análise granulométrica*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 1997. *NBR 13.896. Aterros de resíduos não perigosos. Critérios para Projeto, Implantação e Operação*. Rio de Janeiro/RJ.
- Attanasio C. M. A. 2012. Importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. *Bragantia*, Campinas, **71** (4): 493-501.
- Bandeira I. C. N. 2008. *Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/PA*. MS Dissertation, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém/PA, 144p.
- Barbetta P. A., Reis M. M., Bornia A. C. 2020. *Estatística: para cursos de engenharia e informática*. 3ª ed. São Paulo, Atlas, 416p.

- Barrella W., Petrete Junior, M., Smith, W. S., Montag, F. A. 2001. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. *In: Rodrigues R.R. & Leitão Filho H.F. (ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação.* 2.ed. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, p. 187-207.
- Barros R. G., Dias, P. P., Araújo, V. K. A. 2015. Investigação de passivo ambiental na área do aterro sanitário de Hidrolândia-GO. Instituto Federal de Goiás. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Santa Maria - UFSM, **19** (3): 73-82.
- Batista S., Vecchia R., Pereira M. P., Augusti M. T., Hernandez J. L., Bacheiga C. A., Reis R. C., Gisolf M. M., Espindola N. M., Sanches M. M. 2011a. *O papel dos prefeitos e das prefeituras na criação e na gestão dos consórcios públicos.* Brasília, DF, Caixa Econômica Federal. 115 p. (Guia de Consórcios Públicos, Caderno v. 1).
- Berrêdo J. F., Costa M. L. Progene M. P. S. 2008. Efeitos das Variações Sazonais do Clima Tropical Úmido sobre as Águas e Sedimentos de Manguezais do Estuário do rio Marapanim, Costa Nordeste do Estado do Pará. *Acta Amazônica*, **38**: 473-482.
- Box G. E. P. & Cox D. R. 1964. An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, Londres, Series B (Methodological), **26** (2): 211-252.
- Brasil. *Decreto 6.017*, de 17 de janeiro de 2007. Regulamenta a Lei 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos. Brasília. 2007.
- Brasil. *Decreto Nº 10.588*, de 24 de dezembro de 2020. Dispõe sobre o apoio técnico e financeiro de que trata o art. 13 da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, sobre a alocação de recursos públicos federais e os financiamentos com recursos da União ou geridos ou operados por órgãos ou entidades da União de que trata o art. 50 da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Brasília. 2020.
- Brasil. *Lei nº 9.433*, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, D.F. 1997.
- Brasil. *Lei 11.107*, de 06 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. Brasília, DF, p. 1, 07 abril de 2005.
- Brasil. *Lei n. 11.445*, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília: Planalto, 2007.
- Brasil. *Lei no 12.305*, de 2 de agosto de 2010, dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.
- Brasil. *Lei nº 12.651*, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393 de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.
- Brasil. 2011. Ministério Das Cidades. *Termo de referência técnico.* Brasília, DF, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.

Brasil. 2021. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Roteiro para implementação de consórcios públicos de manejo de Rsu*.

Brasil. 2012. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília,DF.

Câmara G. & Queiroz G. R. 2001. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. *In: Câmara, G., Queiroz G. R, Monteiro A. M. V. Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos, INPE, Cap.3. p. 3-12.

Câmara G., Davis C., Monteiro A. M. V. 2001. Introdução. *In: Câmara G., Queiroz G. R, Monteiro A. M. V. Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos, INPE, Cap 01, p. 1-5.

Campos G. M. 2000. Transformação dos dados amostrais. *In: Campos G. M. Estatística prática para docentes e pós-graduandos*. Cap. 13. Disponível em: http://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_cap13.html.

Correa J. & Lança S. S. B. 2008. *Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento*. Nível 2. Belo Horizonte, ReCESA. 120 p. (Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, org.).

Corseuil W. C. & Campos S. 2007. Análise de adequação do uso das terras por meio de técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios. *In: 13º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, *Anais[...]*. v. 4, p. 2471-2478.

Costa J. L. da. 2000. *Castanhal, Folha SA.23-V-C*. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Brasília, DF, CPRM, p. 106. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

Costa J.B.S., Hasui Y., Bemerguy R.I., Soáres-Júnior A.V., Villegas, J.M.C. 2002. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. **74** (3): 519-531.

Costa M.L., Behling H., Berrêdo J.F., Siqueira N.V.M. 2004. Mineralogical, Geochemical and Palynological Studies of Late Holocene Mangrove Sediments from Northeastern Para State, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **34** (4): 479-488.

Costa T.C.C & Guimarães S P. 2005. Delineamento e parametrização ambiental de microbacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro. *CADMA*, Rio de Janeiro, **1**:1- 6.

Carrilho A. N., Candido H. G.; Souza A. D. 2018. Geoprocessamento aplicado na seleção de áreas para a implantação de aterro sanitário no município de Conceição das Alagoas (MG). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23** (1): 201–206.

Costa F. F., Lima W. N. Dias J. C. 2009. Avaliação hidrogeoquímica em áreas Seleccionadas na bacia hidrográfica do rio Maracanã (Nordeste do Pará). *Revista Holos Environment*, **9** (2), 167-182.

Costa M.L., Behling H., Berrêdo J.F., Siqueira N.V.M. 2004. Mineralogical, geochemical and palynological studies of late holocene mangrove sediments from Northeastern Para State, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **34** (4):479-488.

Serviço Geológico Brasileiro - CPRM. *Separação de areia, silte e argila*. Procedimento Operacional Padrão, p. 2.

Davis B. E. 2001. *Dados matriciais e dados vetoriais, em: "GIS: a visual approach*. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=81263>, acesso em 18/02/2021.

Dias J. A. 2004. *A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos – uma introdução à oceanografia geológica*. Universidade do Algarve, Faro, 91p. (Apostila).

Farias S. B. P. 2011. *Síntese, caracterização e avaliação do grau de cristalinidade de compostos hidrotalcita*. MS Dissertation, Universidade de Juiz de Fora, 160 p.

Farias. M. G. de S., Lima A. M. M de, Silva Junior J. de A. 2020. Manejo e conservação de nascentes na bacia hidrográfica do rio Marapanim (PA). *Revista Geonorte*, **11** (37): 78-96.

Faustino J. 1996. *Planificación y gestión de manejo de cuencas*. Turrialba, CATIE, 90 p.

Feijó A. M. L. C. 2010. Medidas de tendência central. In: Feijó A. M. L. C. *A pesquisa e a estatística na psicologia e na educação*. Rio de Janeiro, Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, p. 14-22. ISBN: 978-85-7982-048-9.

Fernandes D., Morais I. S., Morais I. S. Marino T. R. D., Taveira N. P., Souza P. F. A., Cunha, P. V. M., Peixoto V. P., Silva V. B. G. 2013 Estudo granulométrico da Lagoa da Precabura, região Metropolitana de Fortaleza (RMF), Ceará. *Revista Tecnologia (UNIFOR)*, **34** (1/2): 63-78.

Ferreira E. S. 1977. Fácies da Formação Pirabas (Mioceno Inferior): novos conceitos e aplicações. (Projeto específicos ABe. FINEP). *Academia Brasileira de Ciências*, **49** (2): 353.

Fiore J. P. 2010. *Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 110 p.

Freeze R.A. & Cherry J.A. 1996. *Groundwater*. 4a ed. New York. Prentice Hall, 604p.

Gallis R. B. A. 2022. *Integração de imagens vetoriais e matriciais na visualização dos levantamentos realizados com a unidade móvel de mapeamento digital*. MS Dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 66p.

Guedes T. A., Martins A. B. T., Acorsi C. R.L., Janeiro V. 2019. *Estatística descritiva. projeto de ensino: aprender fazendo estatística*. Disponível em: http://www.each.usp.br/rvicente/Guedes_etal_Estatistica_Descritiva.pdf. Acesso em 28 Abril, 2021.

- Guimarães S. G. & Costa T.C.C. 2005. Delineamento e parametrização ambiental de sub? bacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 40 p.
- Goel S., Bardhan B., Hazra T., Ranjan V. P. 2017. *Forecasting solid waste generation rates*. Media Singapore, Springer Science+Business. p.35-64.
- Góes A. M., Rossetti D. F., Nogueira A. C. R., Toledo P. M. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra, **2**: 3-15.
- Goez L. L. 2015. *Avaliação de áreas para a implantação de aterro sanitário no município de Senador Canedo em Goiás*. MS Dissertation, Pontifícia Universidade Católica de Goiás/GO.169 p.
- Gomes F. P. 1990 *Curso de estatística experimental*. 13. ed. Piracicaba, Nobel. 467 p.
- Gutierrez D.M.G. 2017. *Contribuições para criação do primeiro comitê de bacia hidrográfica do Estado do Pará, Brasil*. MS Dissertation, Ciências Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém/PA. 46 p.
- Henrichs A. J. & Moyano R. L. 2016. *Consórcios públicos intermunicipais: uma alternativa à gestão pública*. Confederação Nacional dos Municípios (CNM). 108 p.
- Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2019. *Acesso e uso de dados geoespaciais*. Rio de Janeiro, IBGE. 139p. (Manuais Técnicos em Geociências, 14).
- Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2010. *Censo demográfico*. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em 03 de Agosto de 2021.
- Isler E. 2014. *Condutividade hidráulica saturada e direcional em xisto: ensaios em laboratório*. MS Dissertation, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 100 p.
- Kafino C. V. 2009. *Estudo da composição e distribuição da alteração hidrotermal do Cerro Águas Calientes, Salta, Argentina a partir de imagens do sensor Aster*. MS Dissertation, Universidade de Brasília/DF, 75p.
- Kajino L. K. 2005. *Estudo de viabilidade de implantação, operação e monitoramento de aterros sanitários: uma abordagem econômica*. MS Dissertation, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, Bauru, 129 p.
- Krebs A. S. J., Adamy A. Reis M. R. 1999. *Alternativas locacionais para a disposição de resíduos sólidos urbanos na área de Porto Velho. Estado de Rondônia*. Porto Velho, CPRM. 66 p.
- Krumbein W. C. 1934. Size frequency distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, Colorado, **4** (2): 65-77.
- Larson R. & Farber B. 2010. *Estatística aplicada*. 4ª ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall. 640 p.

- Leme M. A. G. 2013. *Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos*. MS Dissertation, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP. 208 p.
- Lepsch I. F. 2002. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo, Oficina de Textos. 178 p.
- Lino I. C. 2007. *Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: análise comparativa de métodos*. MS Dissertation, Curso de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual de São Paulo - USP, Rio Claro, 99p.
- Lopes L. 2006. *Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos*. MS Dissertation, Universidade de São Paulo - USP. São Paulo/SP. 113 p.
- Lourenço R. W., Silva D. C. da C., Sales J. C. A., de Medeiros G. A., Otero R.A.P. 2015. Metodologia para seleção de áreas aptas à instalação de aterros sanitários consorciados utilizando SIG. *Ciência e Natura*, Santa Maria, **37** (4): 122-140.
- Macambira I. Q. 2002. Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável. MS Dissertation, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 140p.
- Magalhães P.R.F. 2019. *Caracterização de argilas para utilização em camadas de impermeabilização em sistemas de cobertura de aterros sanitários no semiárido*. MS Dissertation, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 78 p.
- Matta M. A. da S., Costa F. R. da, Moraes M.C da S. 2000. Águas superficiais e subterrâneas da região oeste da cidade de Belém/PA. In: 11º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, *Anais[...]*. 13 p. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23911>, acesso em: 22/02/2021
- Mazza B. L. S. 2019. *Avaliação da formação de fissuras em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários executadas com materiais alternativos*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 75 p.
- Melo Junior H. R. 2019. *Relatório técnico referente à seleção da área para implantação do aterro sanitário municipal de Oriximiná - PA*. [S.l.], Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 28 p.
- Melfi A. J. & Pedro G. 1978. Estudo Geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **8**: 11 – 22.
- Menezes A. L., Pita F. A. G., Costa C. D., Pinheiro A. 2018. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Castanhal - Pará, Amazônia. In: 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Gramado/RS, IBEAS, *Anais[...]*. p. 244-252.

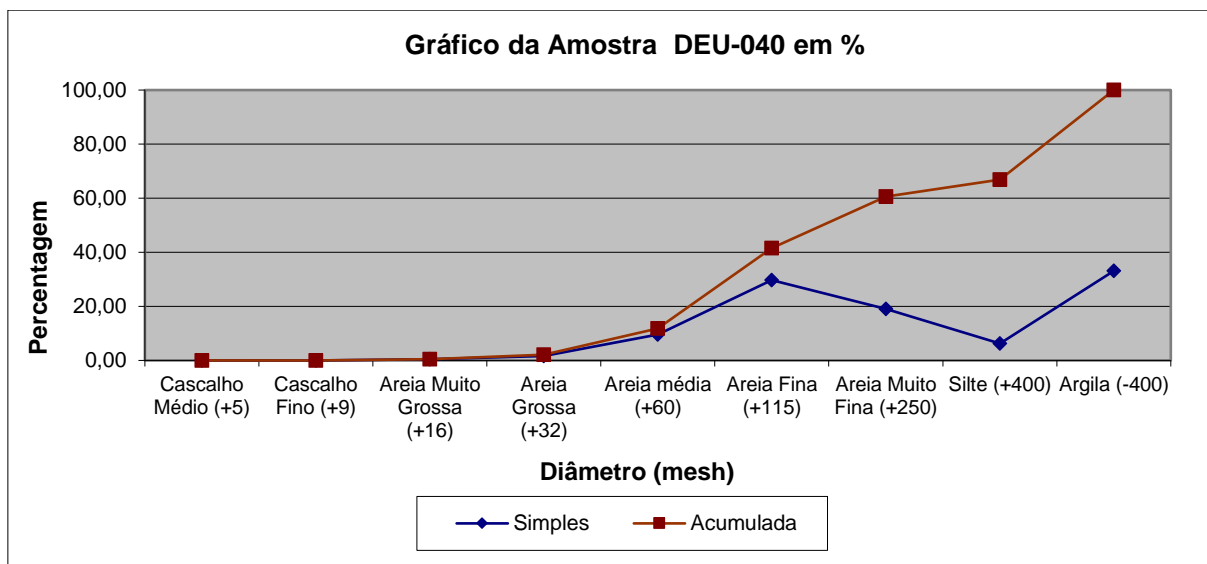
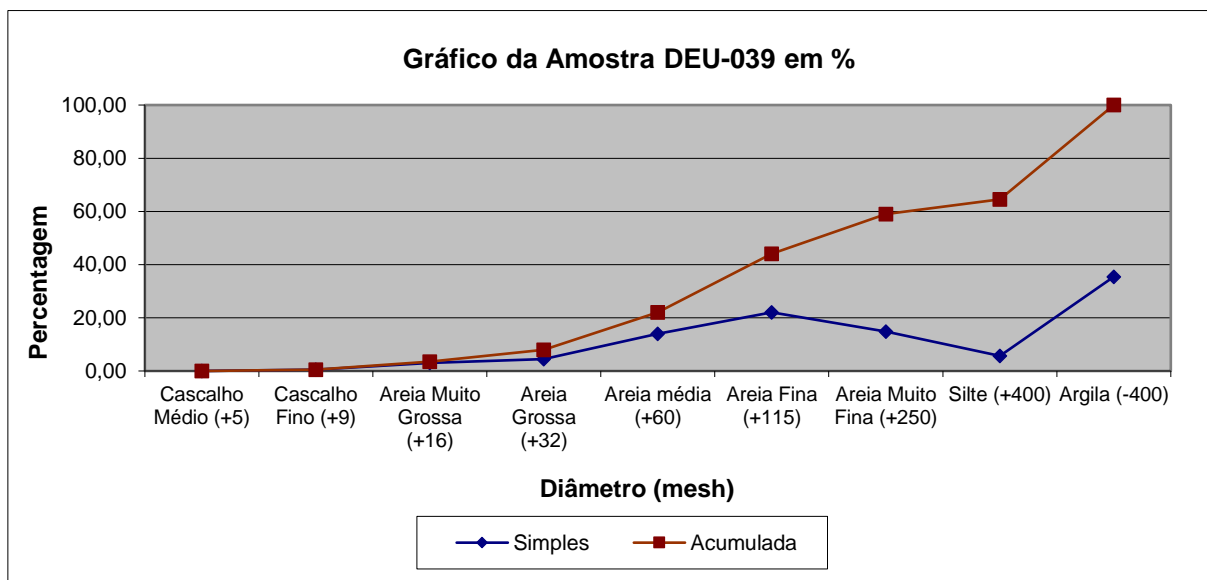
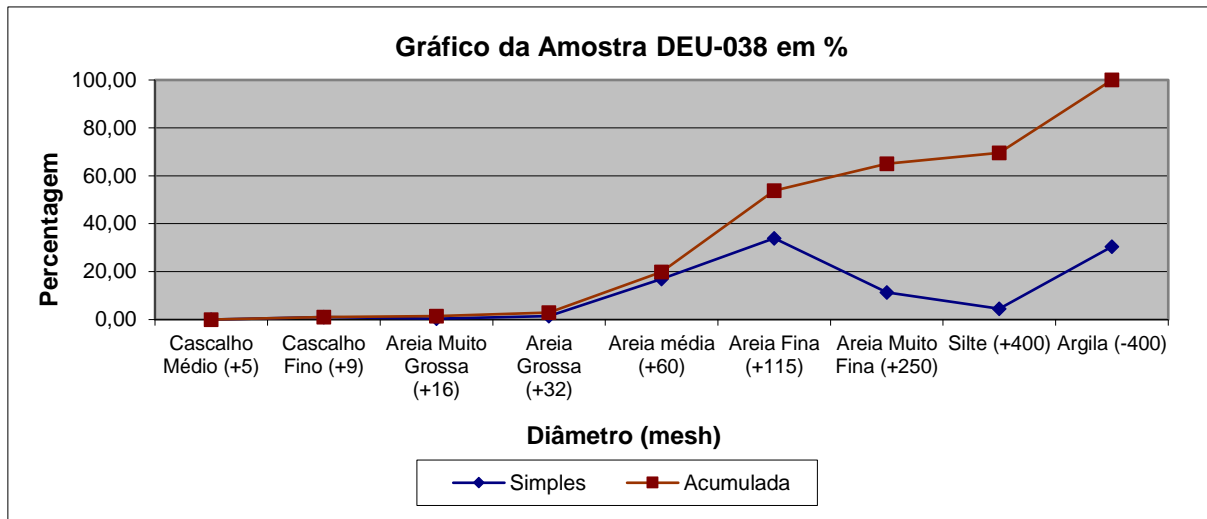
- Milone G. 2009. *Estatística geral e aplicada*. São Paulo, Centage Learning. 360 p.
- Monteiro J. H. P. 2001. *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, IBAM, 193p.
- Muñoz S. I. S. 2002. *Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de ribeirão preto, SP: avaliação dos níveis de metais pesados*. PhD Thesis. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 168 p.
- Nascimento M.S. 2002. *Minerais pesados das Formações Ipixuna e Barreiras, região de Ipixuna, leste da sub-bacia de Cameté – NE do Pará*. Belém. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 86p.
- Novo E. M. L. M. & Ponzoni F. J. 2001. *Introdução ao sensoriamento remoto*. São José dos Campos, INPE. 68 p. (Apostila).
- Oliveira J. C. C. 2018. *Construção de um banco de dados geotécnicos com base em sondagens spt e uso de ferramenta SIG: estudo de caso solos do Tocantins, com ênfase na capital Palmas – TO*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), CEULP/ULBRA, 74 p.
- Petri S. 1957. Foraminíferos miocênicos da formação Pirabas. *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras*, Universidade De São Paulo. Geologia, **16**: 1-80.
- Parizzi T. N. T., Coutinho A. C., Esquerdo J. C. D. M., Antunes J. F. G., Bertolo L. S. 2007. Dinâmica do uso e cobertura da terra na sub-bacia do Rio Guamá, Pará. *In: 18º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos, Anais[...]*. p. 1747– 1753.
- Parizzi T.N.T., Coutinho A.C., Esquerdo J.C.D.M., Antunes J.F.G.A. 2017. Dinâmica do uso e cobertura da terra na sub-bacia do Rio Guamá, Pará. *In: 18º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR*. São Paulo. *Anais[...]*. Santos/SP. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1073123/1/ParizziXVIIIISBSR2017.pdf>. Acesso em: 18/01/2021.
- Palheta E. S. M. 2008. *Estudo da compartimentação e Arcabouço Neotectônico da Ilha de Mosqueiro – PA empregado na prospecção hídrica subterrânea*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 241 p.
- Petrucci E. & Oliveira L. A. 2017. Coeficientes de assimetria e curtose nos dados de vazão média mensal da bacia do rio Preto-BA. *In: Perez Filho A. & Amorim R. R. (org). Os desafios da geográfica física na fronteira do conhecimento*. Campinas, SP, Instituto de Ciências - UNICAMP, v. 1. doi: 10.20396/sbgfa.v1i2017.1785.
- Pinheiro A. V. R. 2009. *Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará – Brasil*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 211 p.
- Pirolí E. L. 2010. *Introdução ao geoprocessamento*. Ourinhos, UNESP/Campus Experimental de Ourinhos, São Paulo, 46 p.

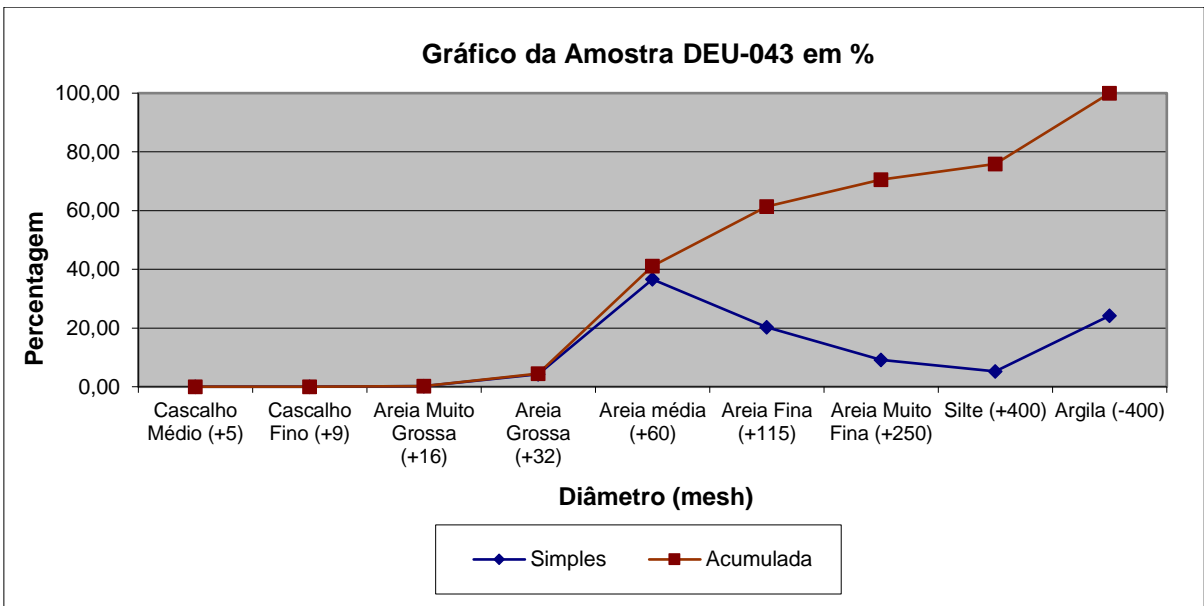
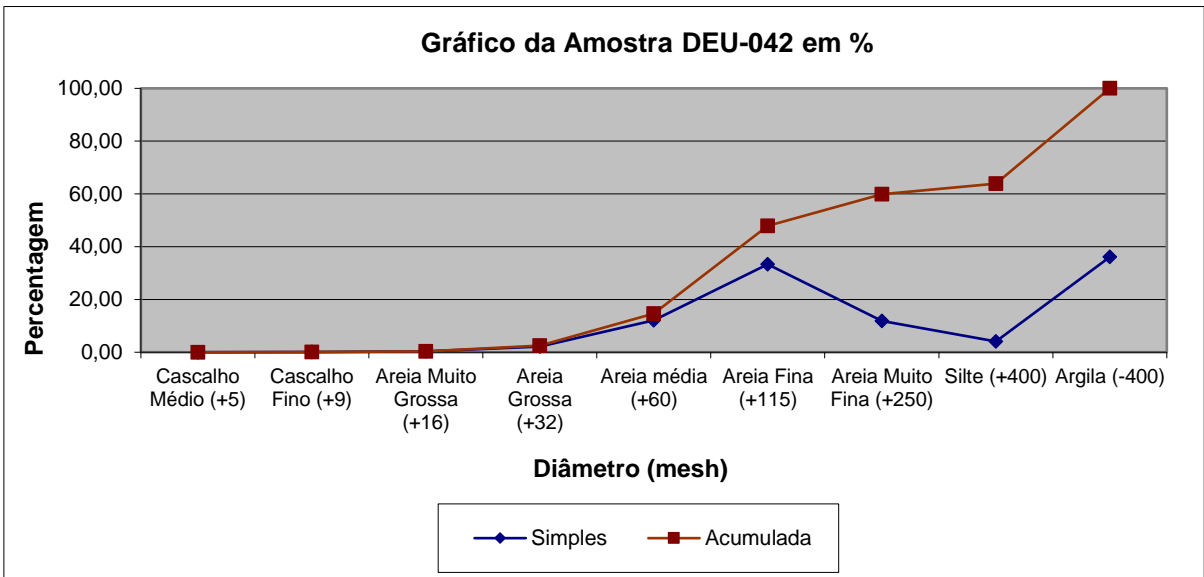
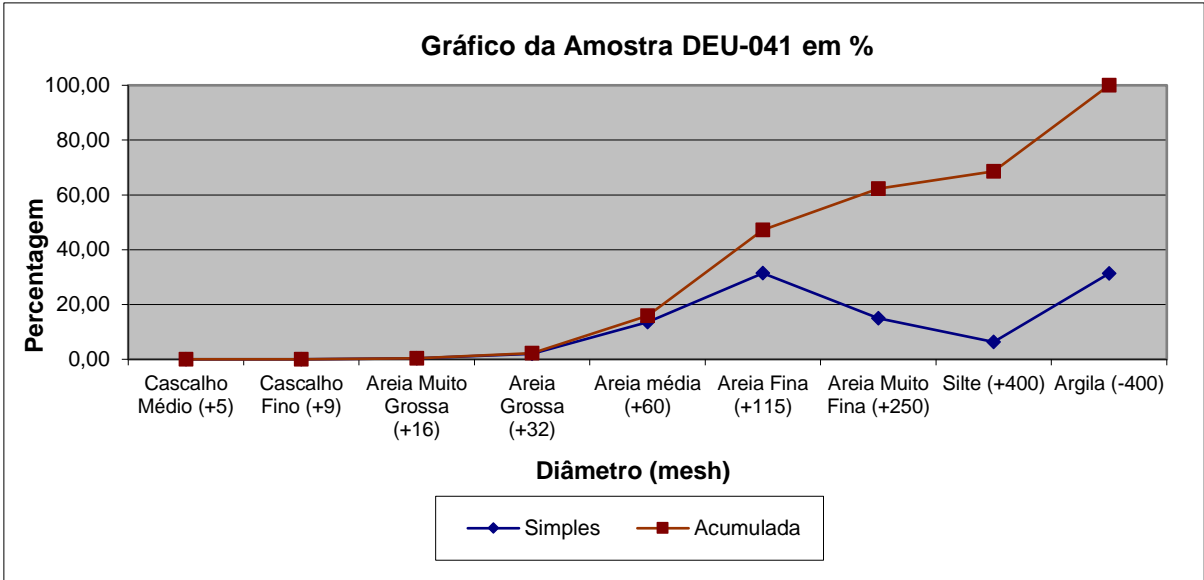
- Ramires J.Z.S. & Vitor J.D.A. 2010. O impacto ambiental oriundo do descarte irregular de resíduos: a contaminação do solo e das águas subterrâneas no município de São Paulo. *In*: 16º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas; 17º Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23080>, Acesso em: 21/11/2021.
- Ramalho Filho A. & Beek K. L. 1995. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3 ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 65p.
- Reetz H. F. 2017. *Fertilizantes e o seu uso eficiente*. São Paulo, ANDA, 178 p.
- Reichert G. A. & Reis J. C. F. 1998. Custos de implantação e de operação de aterro sanitário: estudo de caso aterro da extrema, Porto Alegre, RS. *In*: Frankenberg C.L., Rodrigues M.T.R., Cantelli M. *Gerenciamento de resíduos: certificação ambiental*. Porto Alegre, Edipucrs, p. 232-246.
- Rikils V. S. S. 2015. *Estudo de viabilidade de um consórcio público intermunicipal de resíduos sólidos urbanos na região do Sul do Estado de Roraima, RR, Brasil*. MS Dissertation, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 170p.
- Rocha R. E., Gastmans D., Sacchi M. D., Oliveira M. D. de. V. 2019. Espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. *Revista do Instituto Geológico*, **40** (2): 35–51.
- Rocha N. C. V. & Lima A. M. M. A. 2020. Sustentabilidade hídrica na Bacia do Rio Guamá, Amazônia Oriental/Brasil. *Sociedade & Natureza*, **32**:141–160.
- Rosa R. 2013. *Introdução ao geoprocessamento*. Uberlândia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, 142 p. (Apostila).
- Rossetti D. F. 2000. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, **133** (3-4): 295-324.
- Rossetti D.F. 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedimentary Geology*, **169**: 51- 174.
- Rossetti D. F., Bezerra F. H. R., Dominguez J. M. L. 2013. Late oligocene-miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. *Earth-Science Reviews*, **123**: 87-112.
- Rossetti D.F., Góes A.M., Souza L.S.B. 2001. Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (zona bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. *Revista Brasileira de Geofísica*, **19**: 113-130.
- Santos O. C. de O. 2014. A geografia física e as bacias hidrográficas na Amazônia. *Revista GeoAmazônia*, Belém, **02** (3), 17 – 27. DOI: 10.17551/2358-1778/geoamazonia.n2v1p17-27.

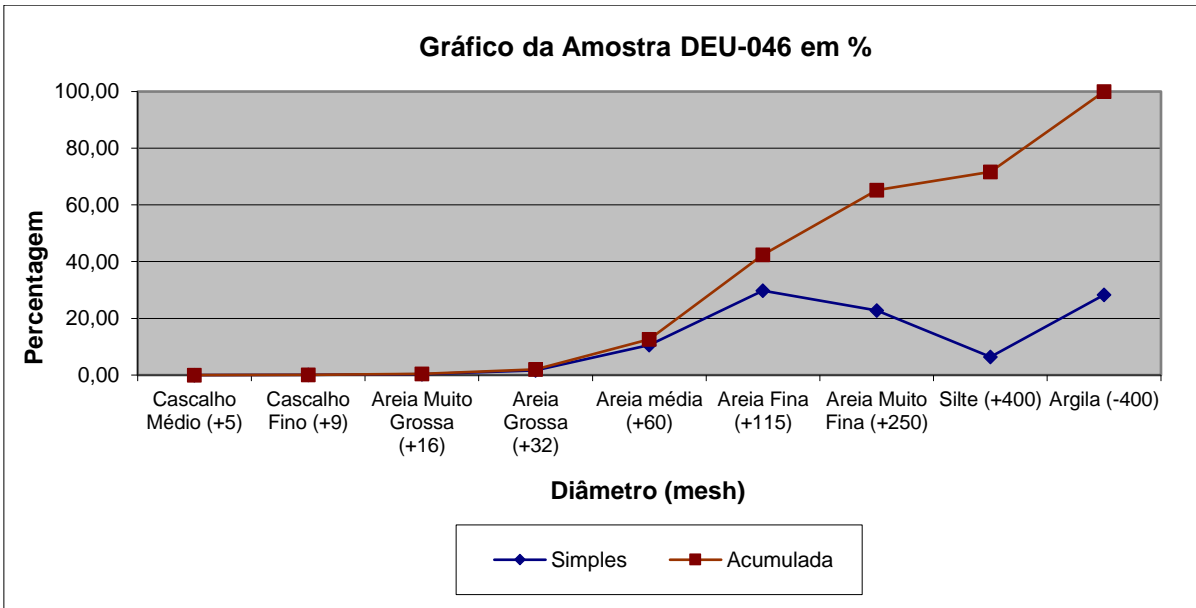
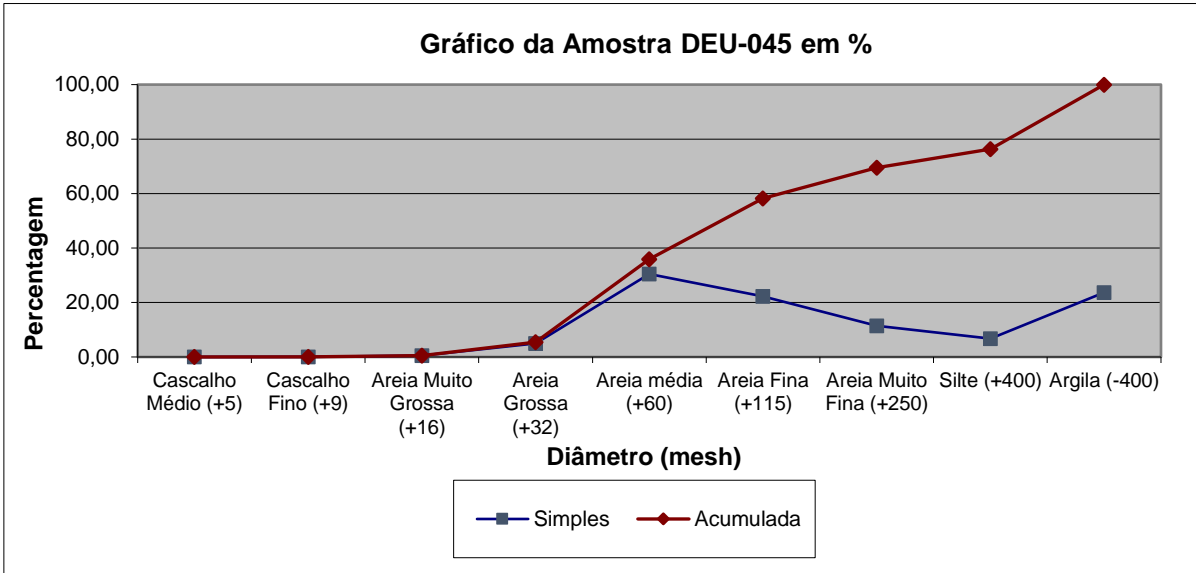
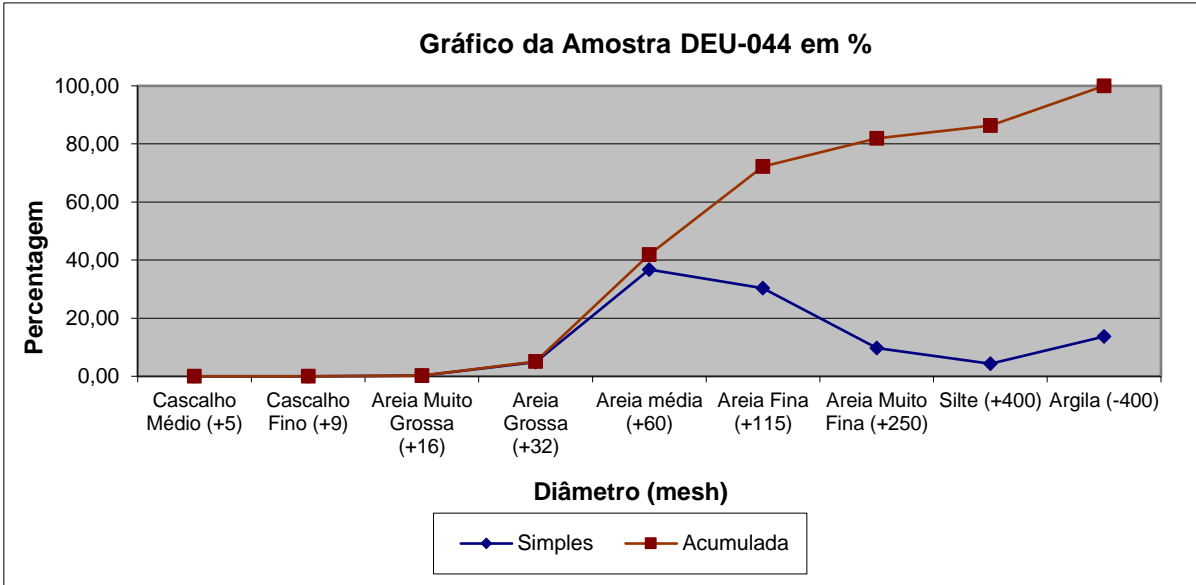
- Rossetti D.F. & Santos Junior A.E.A. 2006. Analysing the origin of the Upper Cretaceous-?Lower Tertiary Rio Capim semi-flint (Pará State, Brazil) under a sedimentologic perspective. *Sedimentary Geology*, **186**: 133-144.
- Santos J.S. & Girardi A.G. 2007. Utilização de geoprocessamento para localização de áreas para aterro sanitário no município de Alegrete-RS. *In: 13º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE*. p. 5491-5498.
- Santos A.R., Louzada F.L.R.O., Eugenio F.C. 2010. *ArcGis 9.3 total: aplicação para dados espaciais*. Espirito Santo, 184 p.
- Santos O.C.O. 2014. A geografia física e as bacias hidrográficas na Amazônia. *Revista Geoamazônia*, **1** (2): 17-27.
- Santos H. G. dos, Jacomine P. K. T., Anjos L. H. C. dos, Oliveira V. A. de, Lumbreras J. F.; Coelho M. R., Almeida J. A. de, Araújo Filho J. C., Cunha T. J. F., Oliveira J. B. de. 2018. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília,DF, Embrapa, 356 p.
- Santana D.P. 2003. *Manejo integrado de bacias hidrográficas*. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 62 p.
- Sartori A. & Genovez A. M. 2011. Critérios para classificação hidrológica de solos tropicais brasileiros. *In: 19º Simpósio de Recursos Hídricos, Maceió, Anais[...]*. 20 p.
- Schmidt T. 2016. *Seleção de área e dimensionamento de aterro sanitário para o consórcio público intermunicipal para assuntos estratégicos do G8 – CIPAE G8*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 146 p.
- Schroeder D. 1984. *Soils – facts and concepts*. Bern, Gething International Potash Institute. 140 p.
- Shapiro S.S. & Wilk M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, **52**: 591-611.
- Silva M. V. S. 2019. *Identificação e seleção de áreas potenciais à implantação de aterro sanitário no município de Castanhal - PA, através do uso de Sistema de Informações Geográficas*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Belém, 101 p.
- Silva C. S. S., Boll N., Zanin G. B., Peretti G., Souza D. S. 2020. Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *Revista Tecnologia Social*, Edição Especial, Curitiba, **16** (41): 125-138.
- Silva Filho R. I. & Corrêa A. C. B. Os Desafios do Consórcio Intermunicipal de Resíduos Sólidos do Vale do Açu, Rio Grande do Norte. *Geo UERJ*, Rio de Janeiro, n. 37, DOI: 10.12957/geouerj.2020.51274.
- Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS 2019. 2020. *Diagnóstico do manejo dos resíduos sólidos urbanos*. SNS/MDR. 244p.

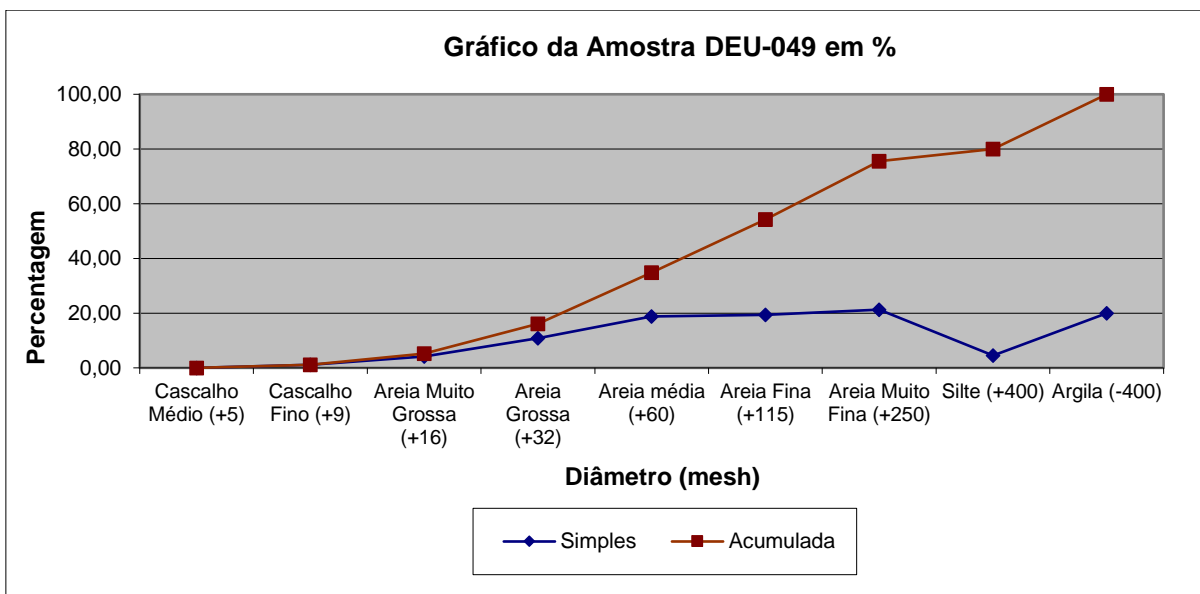
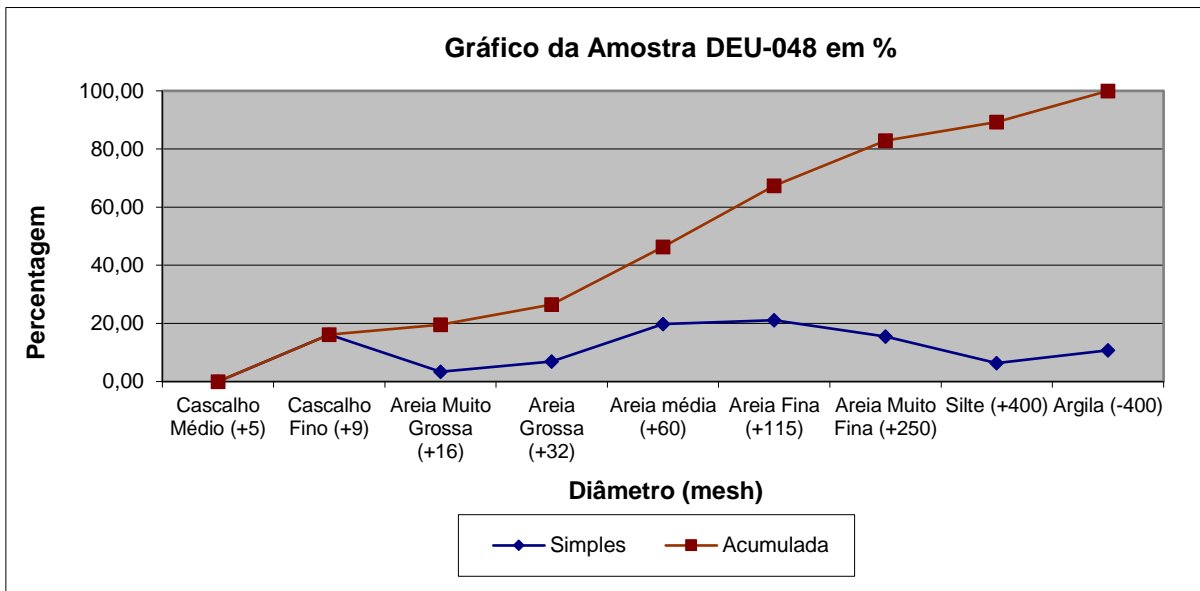
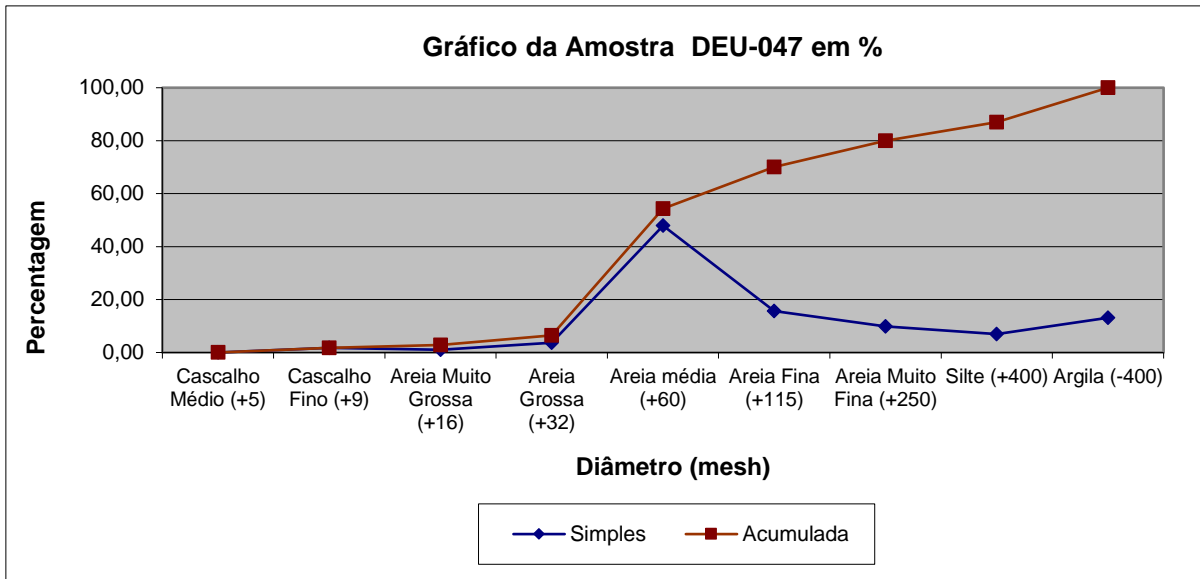
- Soares P.C.P. & Fiori A. 1978. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Boletim Geográfico*, **258/259**: 35-59.
- Souza V. N. 2015. *Aplicações de sistemas de informação geográfica (SIG) ao meio rural*. Trabalho de Conclusão de Curso, Especialização em Gestão Ambiental em Municípios, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 33p.
- Souza C. M. P., Costal L. M., Gomes, R. L., Moreau A. M. S. S. 2016. Análise das áreas de ocorrência e características morfológicas de sedimentos Pós-Barreiras na região Sul da Bahia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **9** (5): 1543-1557.
- Souza D. P. 2017. *Estudo geoquímico-mineralógico de litologias aflorantes na orla litorânea de Icapuí – Ceará*. MS Dissertation, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 95 p.
- Spinola G. M. R., Andrade P. R., Nascimento V. F. 2017. *Caracterização e dimensionamento de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos no Brasil e nos municípios paulistas*. Relatório final de projeto de Iniciação Científica, Universidade Estadual Paulista, 48 p.
- Suzuki J. A. N. & Gomes J. 2009. Consórcios intermunicipais para a destinação de RSU em aterros regionais: estudo prospectivo para os municípios no Estado do Paraná. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, **14** (2): 155-158.
- Tatumi S. H., Silva E. L., Rossetti D. F., Góes A. M. 2008. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, **38**(3): 514-524.
- Teixeira P. C., Donagemma G. K., Fontana A., Teixeira W. G. 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF, Embrapa, 574 p.
- Toledo M. C. M.O., Sonia M. B. Melfi A. J. 2000. Intemperismo e formação do solo. In: Teixeira W., Toledo M. C. M., Fairchild T. R., Taioli F. (org.). *Decifrando a terra*. São Paulo, Oficina de Textos, p.139-166.
- Trevisan R., Salemi L. F., Moraes J. M., Oliveira J. C. M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. *Irriga*, **14** (3): 413-422.
- United States Geological Service (USGS). 2019. *Acervo público de imagens de satélites*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, acesso em: 05/04/2020.
- Valente M. A. 2001. *Solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do município de Castanhal, Estado do Pará*. Belém, Embrapa Amazônia Oriental, 29 p. (Documentos, n. 119).
- Wentworth C. K. 1922. A scale of grade and glass terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30**: 377-392.

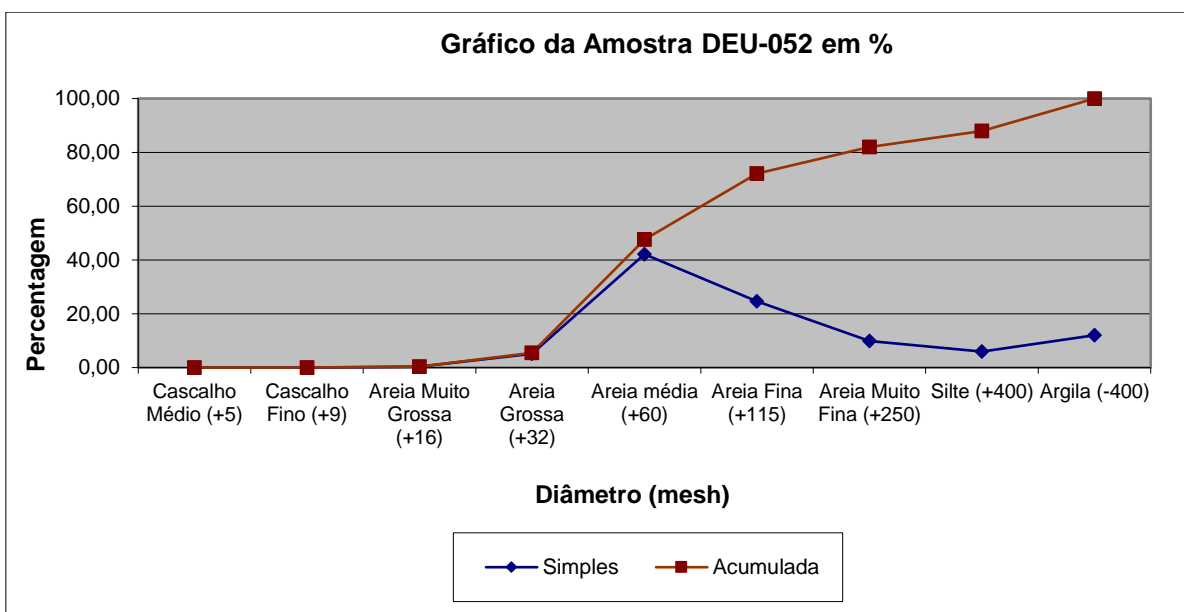
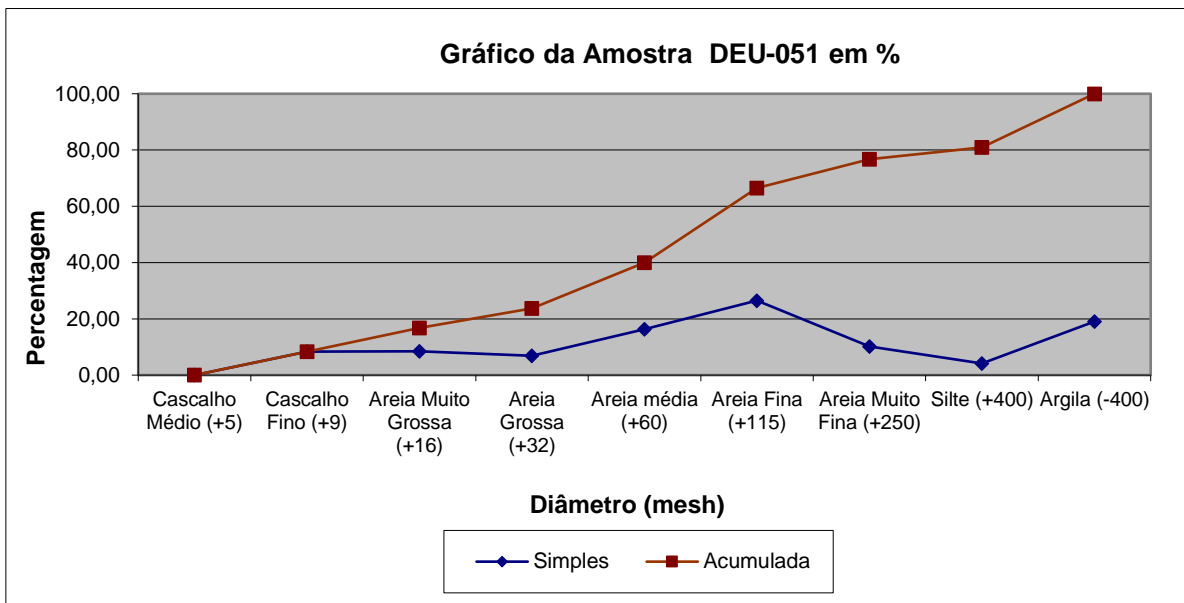
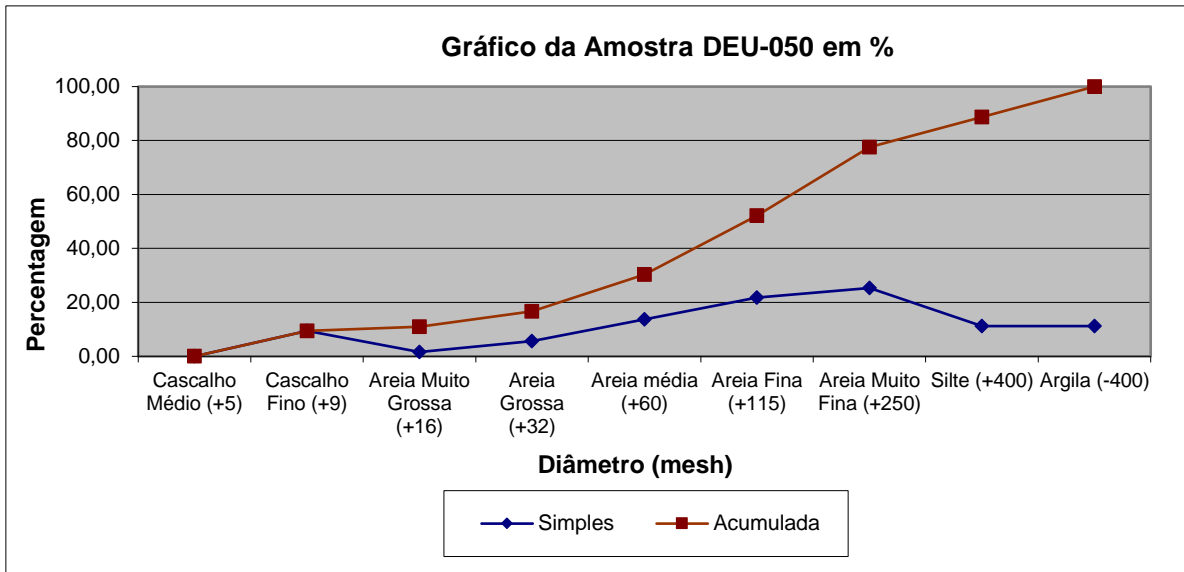
APÊNDICE A

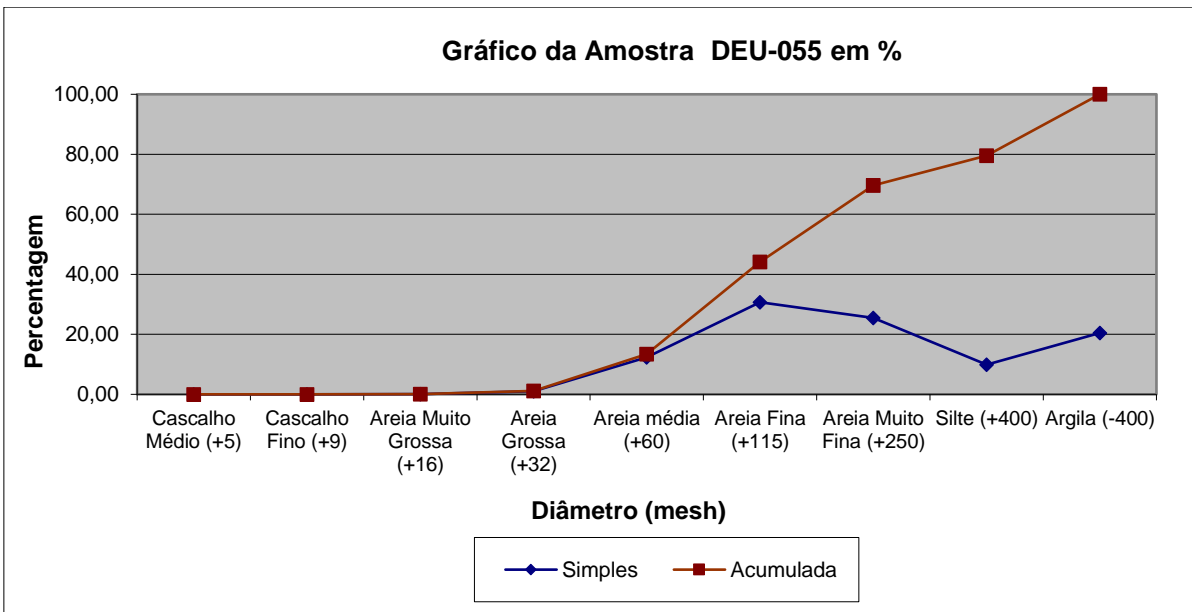
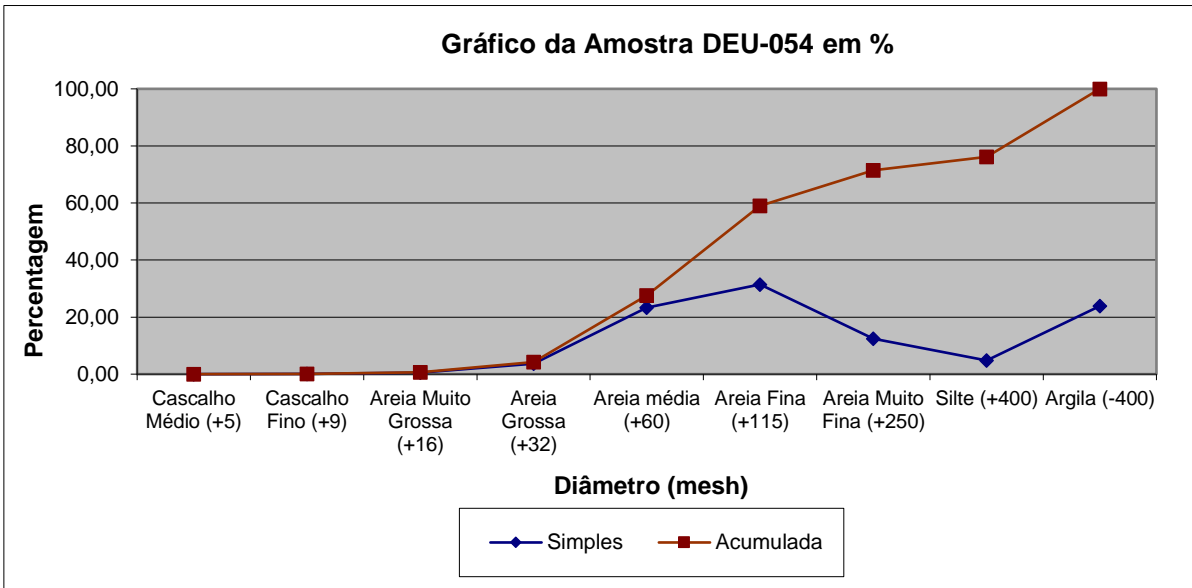
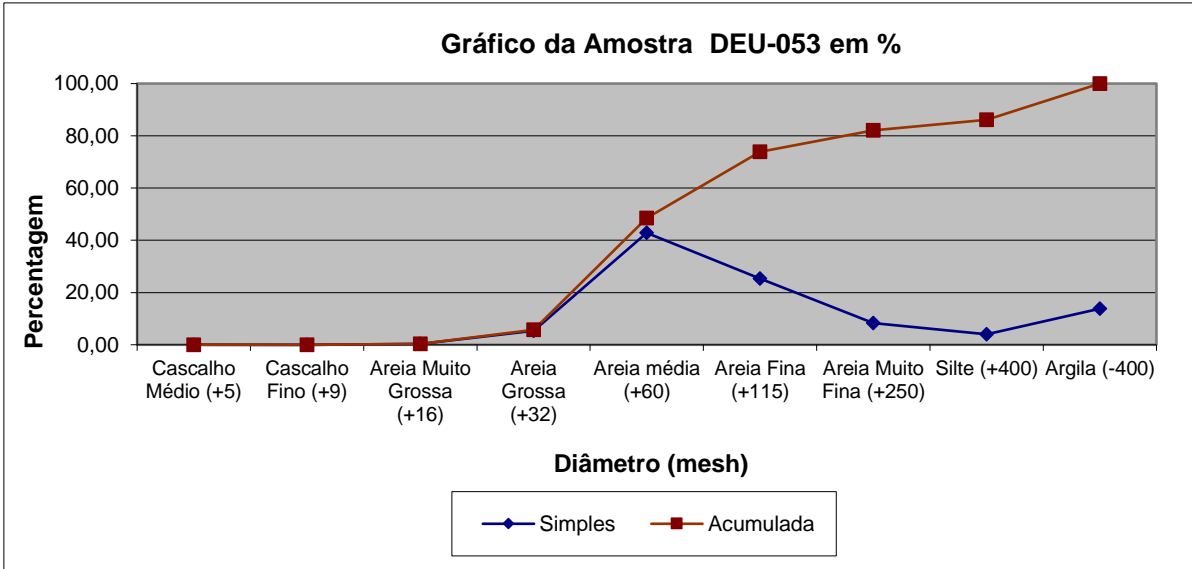


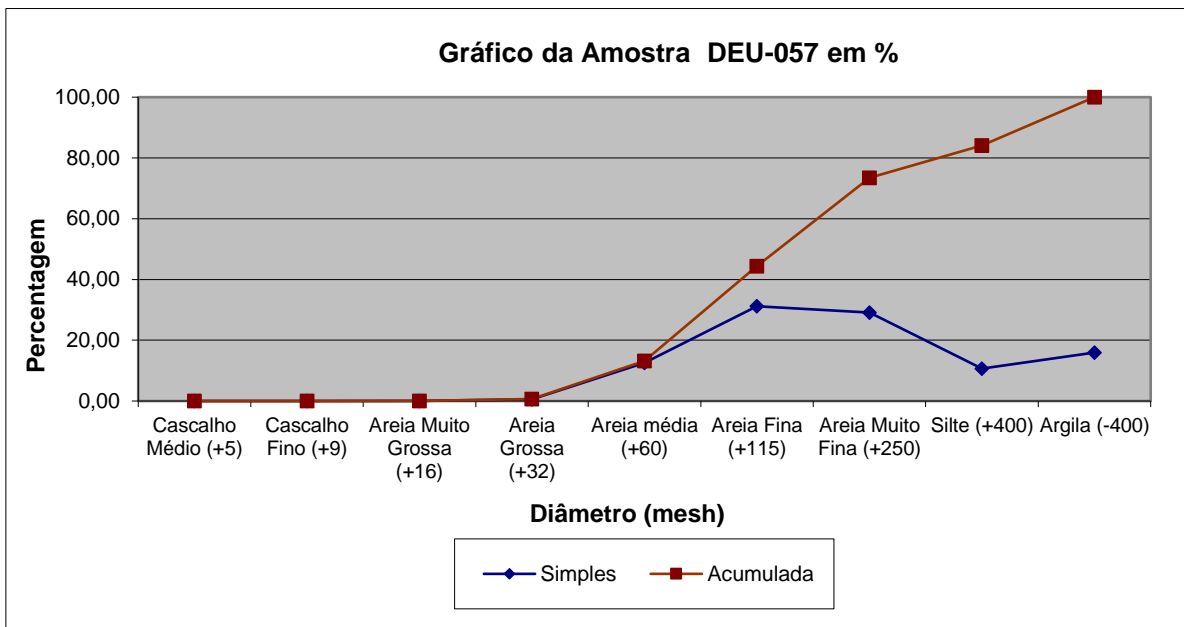
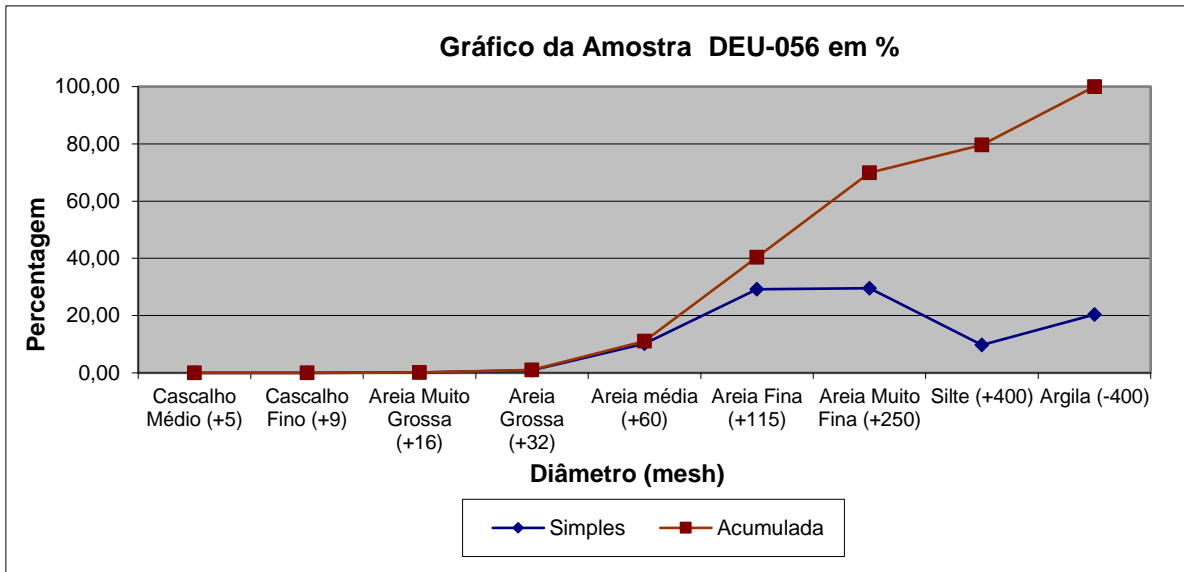










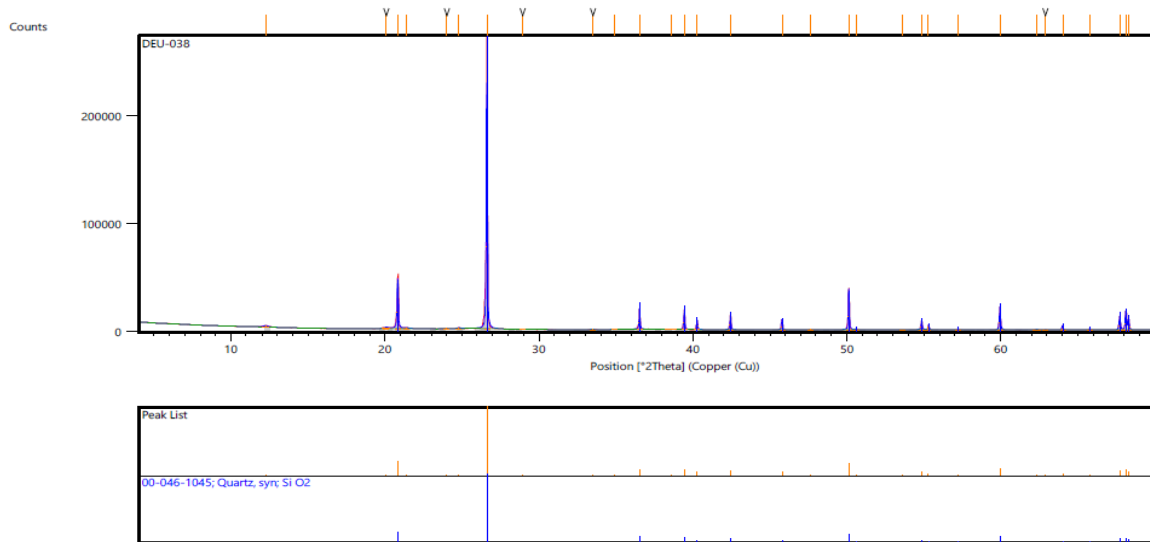


ANEXO A



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN

Amostra DEU-038

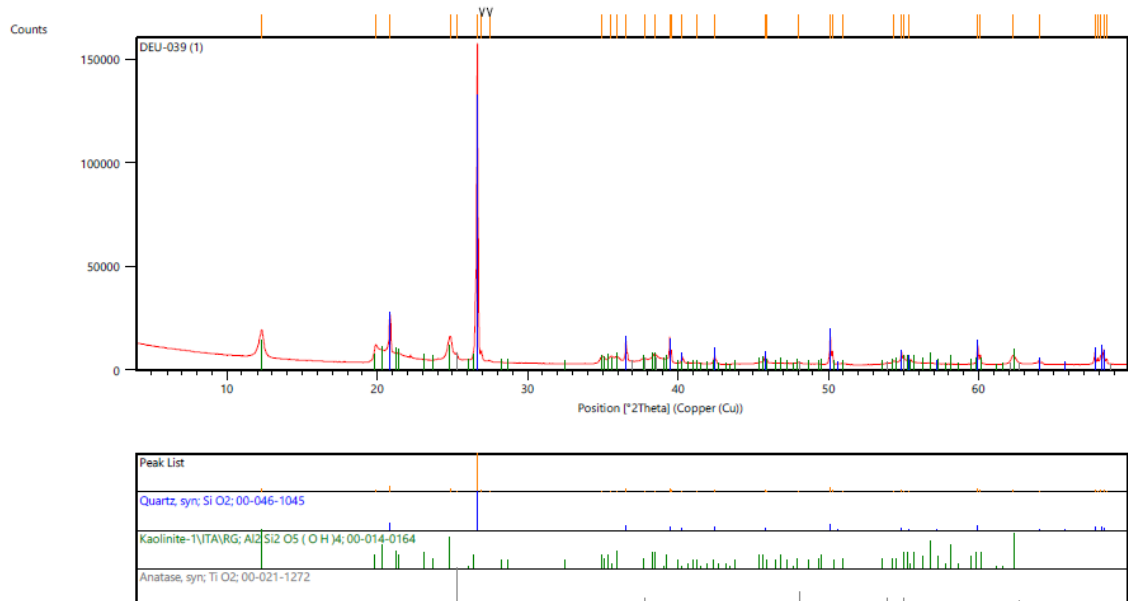


Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN

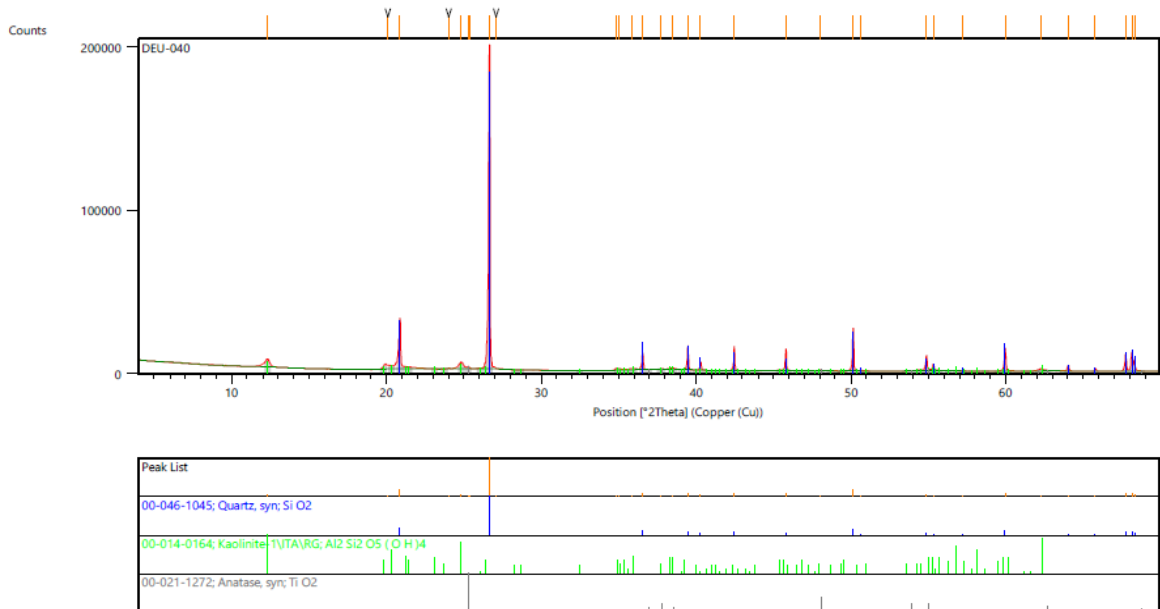
Amostra DEU-039



Fonte: CPRM, 2020.



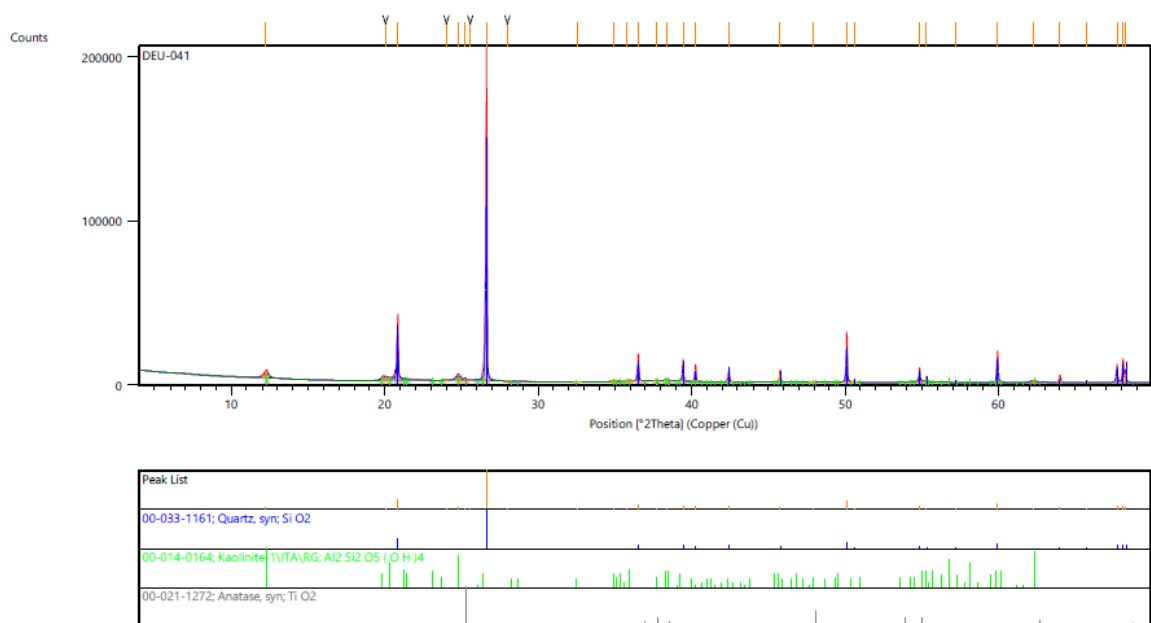
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-040



Fonte: CPRM, 2020.



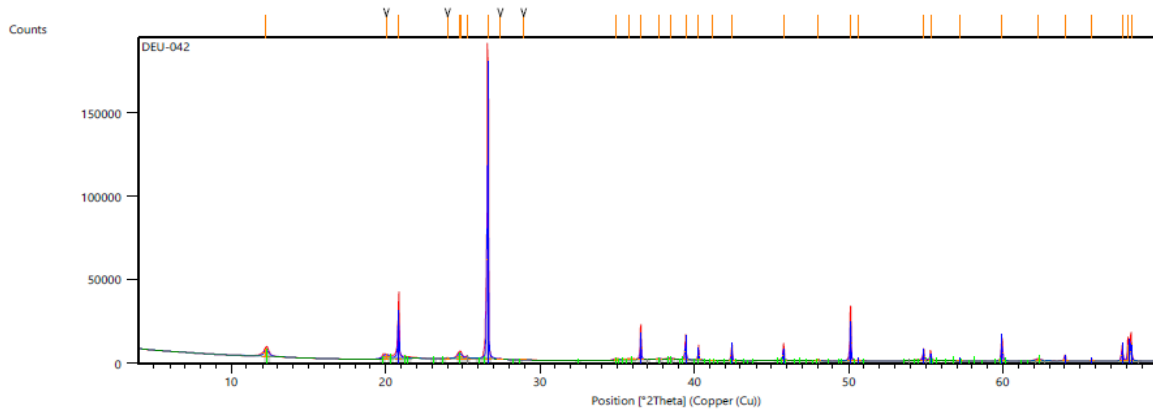
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-041



Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-042

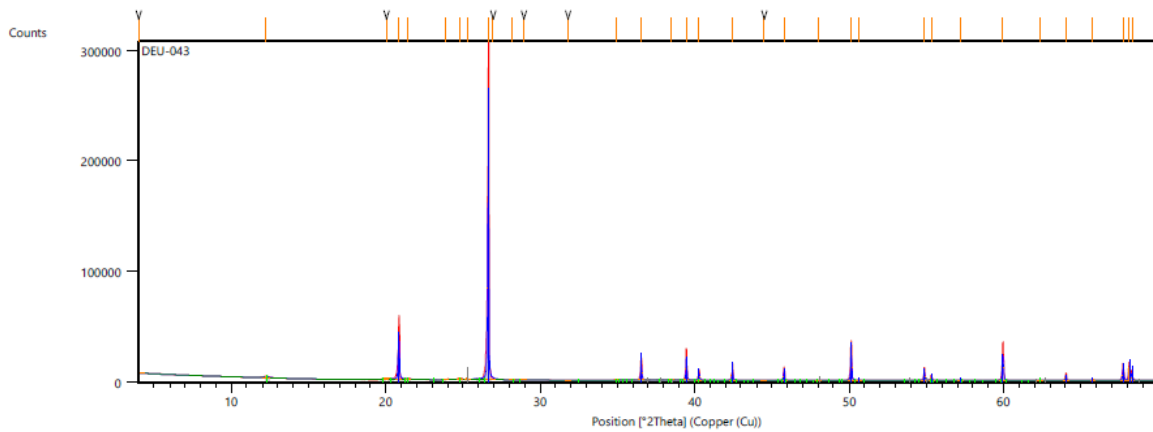


| Peak List |
|---|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O ₂ |
| 00-014-0164; Kaolinite 1\1TA\RG; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ |
| 00-021-1272; Anatase, syn; Ti O ₂ |

Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-043

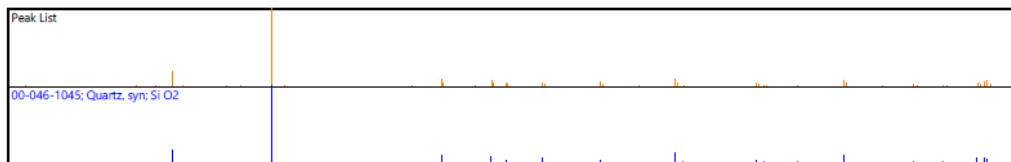
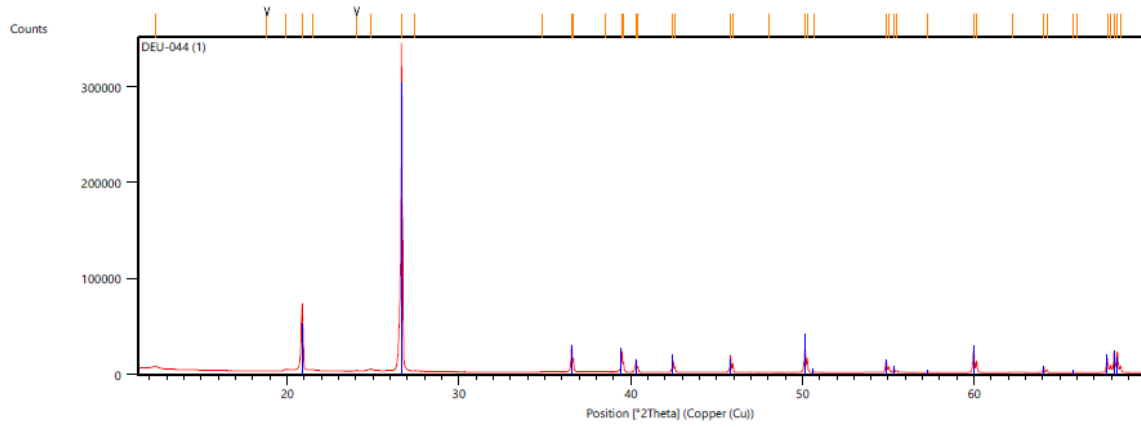


| Peak List |
|---|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O ₂ |
| 00-014-0164; Kaolinite 1\1TA\RG; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ |
| 00-021-1272; Anatase, syn; Ti O ₂ |

Fonte: CPRM, 2020.



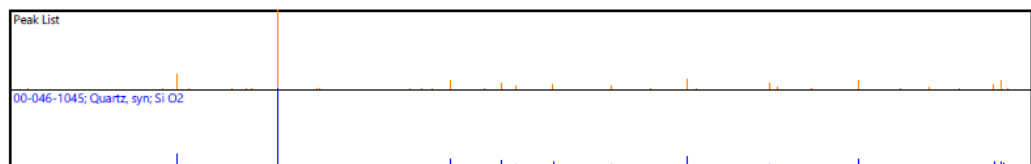
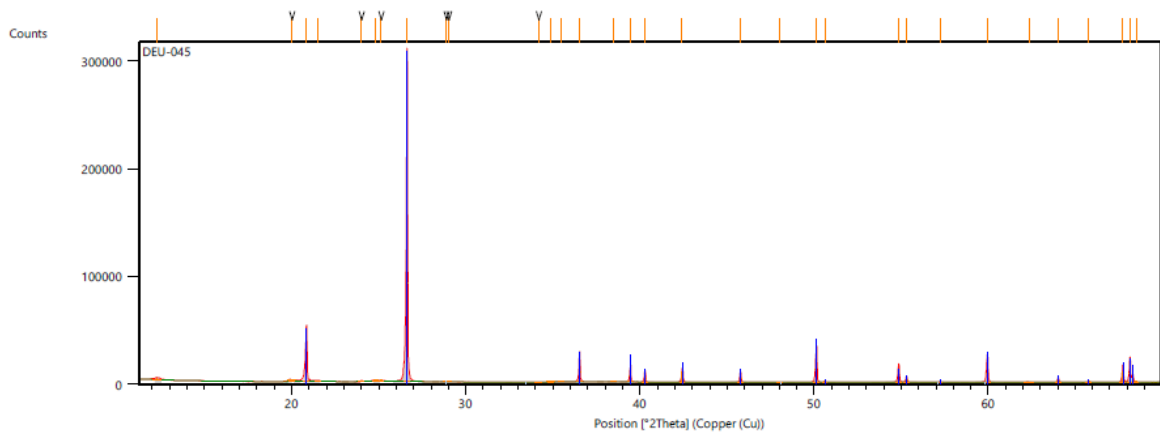
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-044



Fonte: CPRM, 2020.



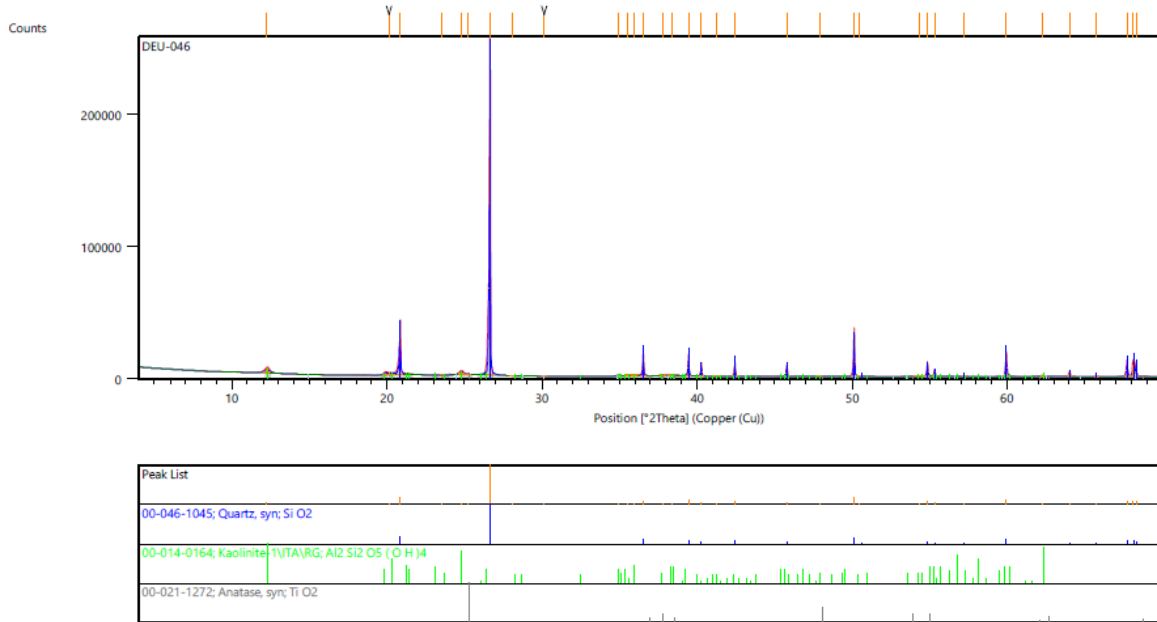
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-045



Fonte: CPRM, 2020.



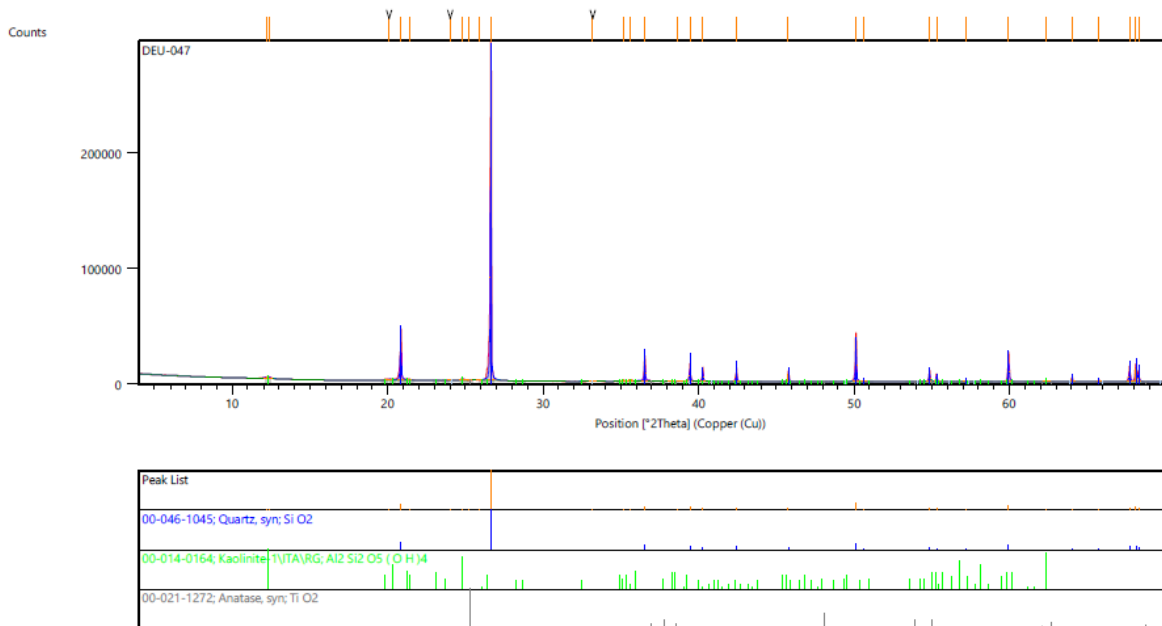
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-046



Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
 Amostra DEU-047

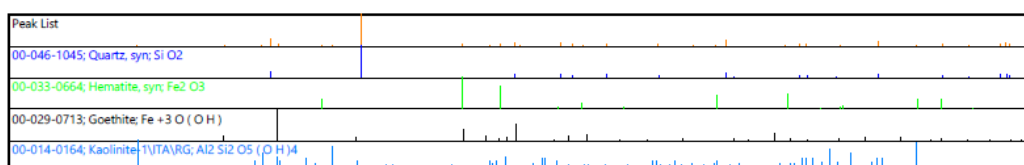
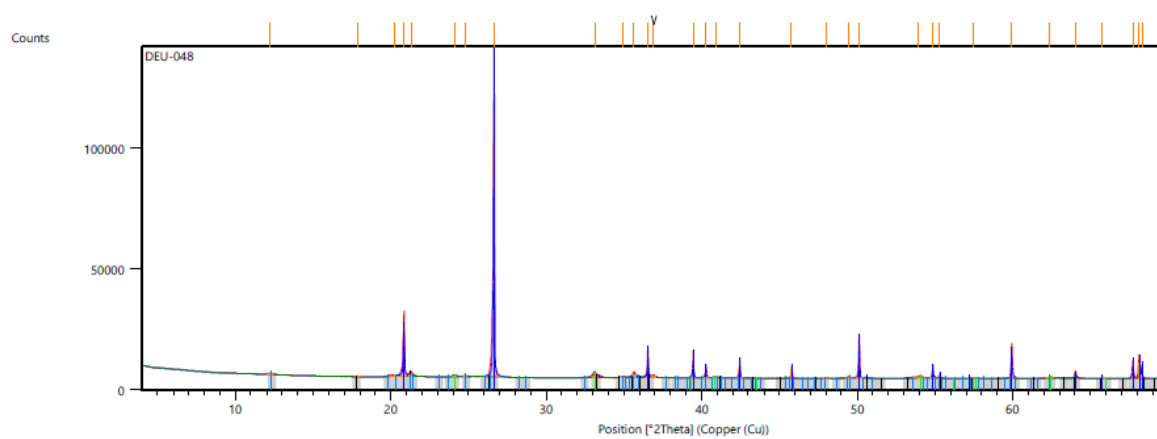


Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN

Amostra DEU-048

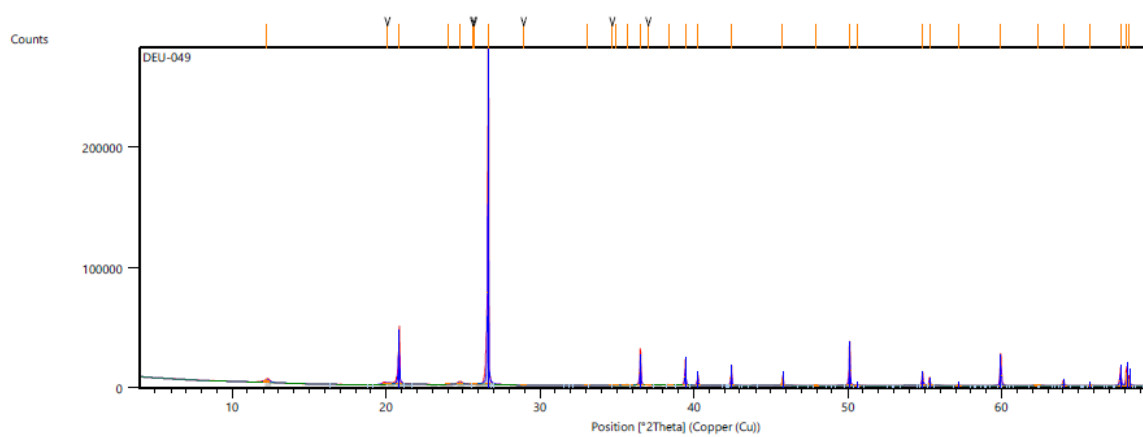


Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN

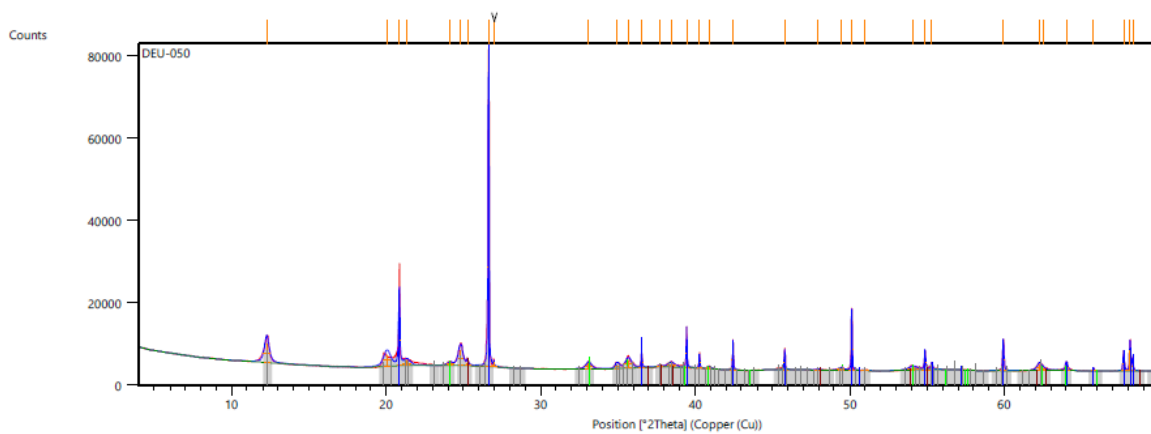
Amostra DEU-049



Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-050

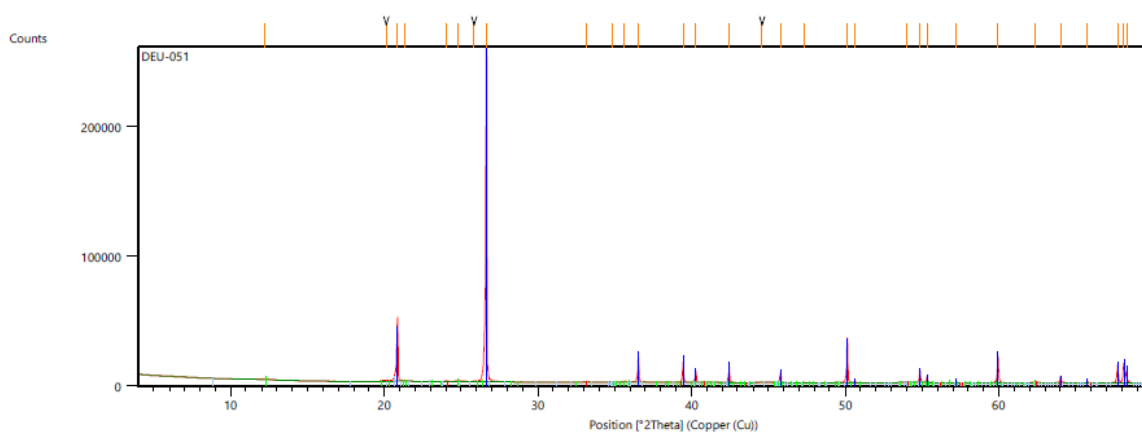


| Peak List |
|--|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O2 |
| 00-033-0664; Hematite, syn; Fe2 O3 |
| 00-014-0164; Kaolinite [Al2(OH)4Si2O5] (OH)4 |
| 00-021-1272; Anatase, syn; Ti O2 |

Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-051

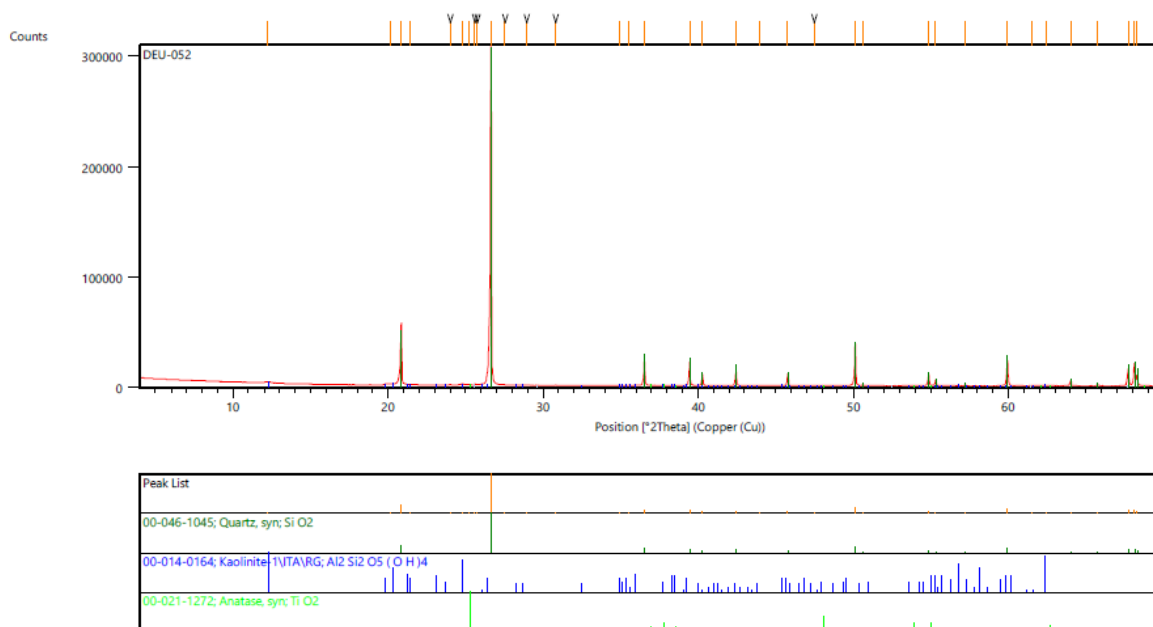


| Peak List |
|--|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O2 |
| 00-033-0664; Hematite, syn; Fe2 O3 |
| 00-014-0164; Kaolinite [Al2(OH)4Si2O5] (OH)4 |

Fonte: CPRM, 2020.



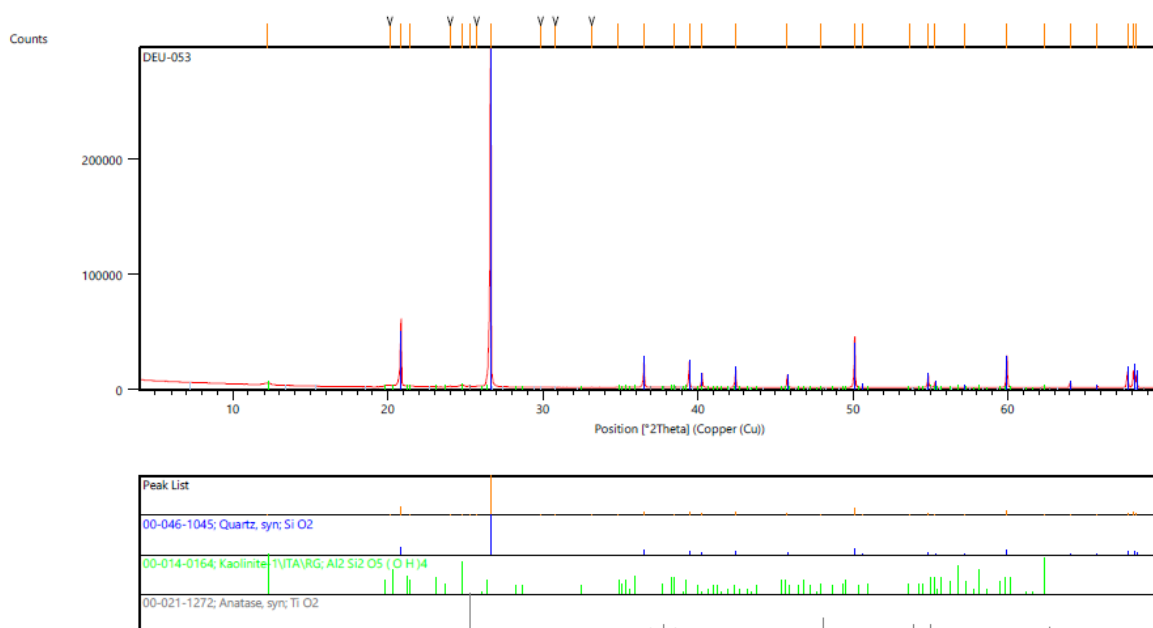
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-052



Fonte: CPRM, 2020.



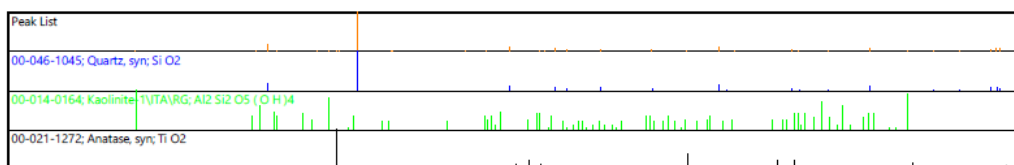
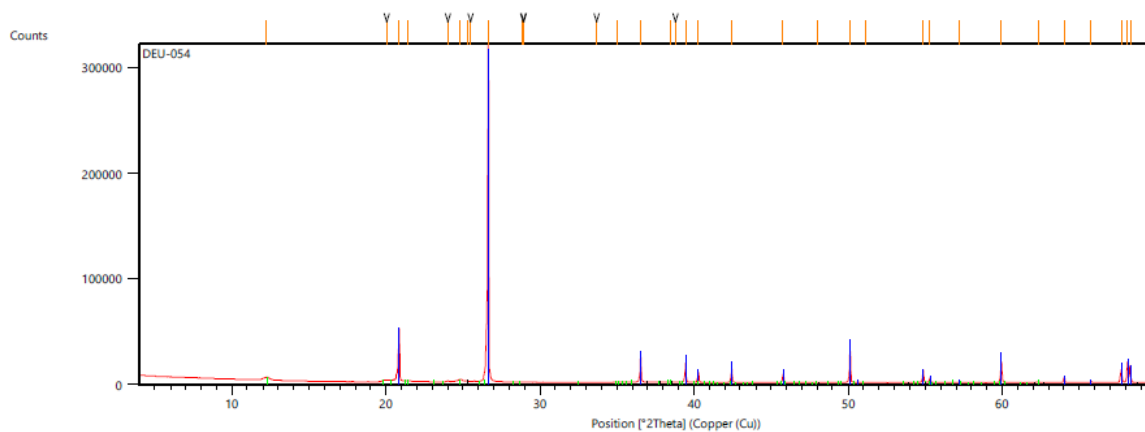
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-053



Fonte: CPRM, 2020.



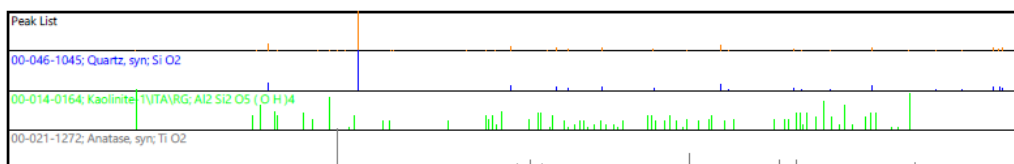
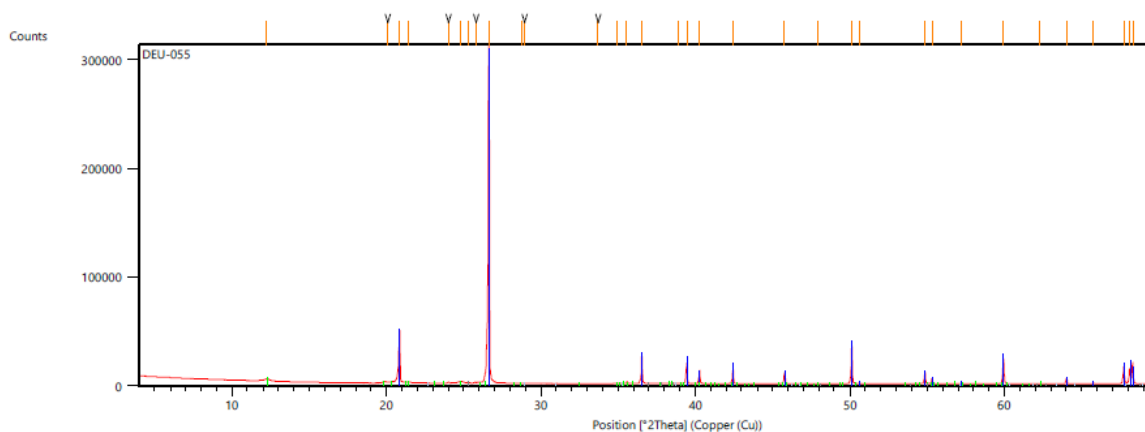
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-054



Fonte: CPRM, 2020.



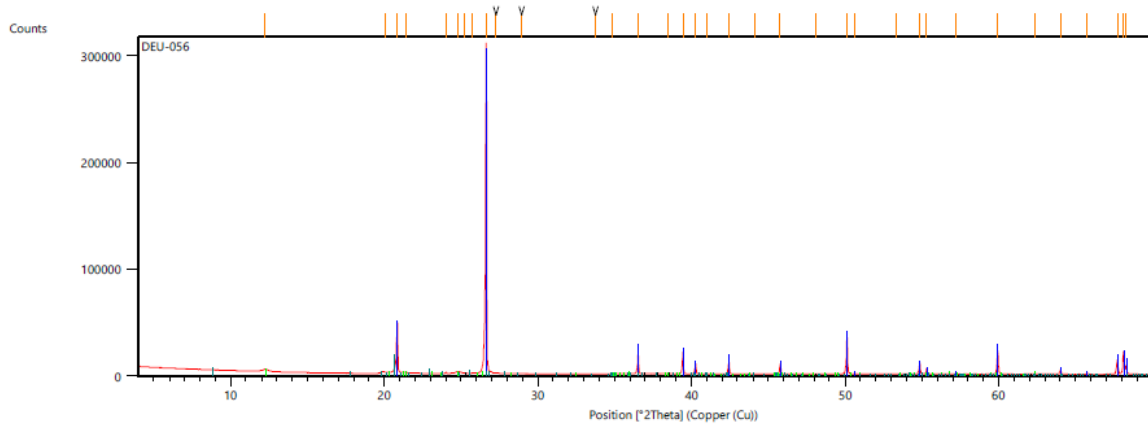
LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-055



Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-056

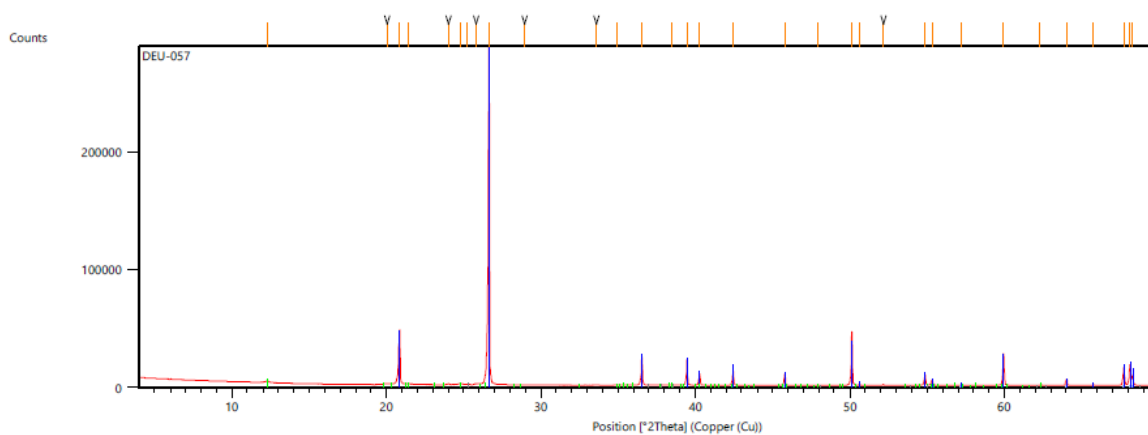


| Peak List |
|--|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O ₂ |
| 00-014-0164; Kaolinite 1\TAVRG; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ |
| 00-021-1272; Anatase, syn; Ti O ₂ |
| 01-075-0948; Muscovite 2\TMRG#1; K Al ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂ |

Fonte: CPRM, 2020.



LABORATÓRIO DE ANÁLISES MINERAIS – LAMIN
Amostra DEU-057



| Peak List |
|--|
| 00-046-1045; Quartz, syn; Si O ₂ |
| 00-014-0164; Kaolinite 1\TAVRG; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ |
| 00-021-1272; Anatase, syn; Ti O ₂ |

Fonte: CPRM, 2020.