CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE ÁREAS DE EXTRAÇÃO DE AREIA: ESTUDO DE CASO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DOS CACHORROS EM SÃO LUÍS – MA

Iago Thadeu Rodrigues Andrade[1]

Karina Suzana Feitosa Pinheiro[2]

Daniel de Lima Nascimento Sírio[3]

Cláudio José da Silva de Sousa[4]

INTRODUÇÃO

O Estado do Maranhão, localizado na região Nordeste do Brasil, apresenta uma configuração geológica caracterizada predominantemente por bacias sedimentares e coberturas superficiais fanerozoicas, que ocupam aproximadamente 85% de seu território. Os 15% restantes correspondem aos terrenos pré-cambrianos, representados pelo Fragmento Cratônico São Luís e pelo Cinturão Gurupi, que constituem o embasamento aflorante dessas bacias (CPRM, 2013; Sousa, 2021; Pinheiro, 2025). Associadas a esses terrenos ocorrem diversas manifestações e reservas minerais, destacando-se areia, granito, granodiorito, entre outros recursos de importância econômica.

Nesse contexto, a Ilha do Maranhão, situada no litoral norte do Brasil, compreende os municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, totalizando uma população de 1.309.330 habitantes (IBGE, 2010). A região metropolitana de São Luís e áreas adjacentes integram a Província Costeira e Margem Continental Atlântico Equatorial (Almeida *et al.,* 1976; Hasui et al., 1984; Cordani *et al.,* 2009), estando inseridas, mais especificamente, na Bacia Intracratônica de São Luís. Esta, juntamente com as bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova, compõe o Sistema de Grábens do Gurupi (Azevedo, 1991).

Na porção sul do município de São Luís, em meio à cobertura sedimentar fanerozoica, afloram rochas pré-cambrianas associadas ao Fragmento Cratônico São Luís, representadas por remanescentes tectônicos e erosivos. Entretanto, esses afloramentos possuem distribuição espacial restrita quando comparados às extensas coberturas sedimentares que ocupam cerca de 99% do território municipal (Sousa, 2021).

Dessa forma, o potencial mineral da Ilha do Maranhão está diretamente relacionado às unidades geológicas predominantes na região, especialmente às formações sedimentares. Entre os recursos minerais de maior relevância destacam-se as areias, amplamente utilizadas pela indústria da construção civil. Originadas da desagregação natural de rochas preexistentes, as areias são constituídas predominantemente por quartzo, podendo conter feldspatos, micas, argilas e minerais ferromagnesianos em proporções variadas. Além desse recurso, também são explorados materiais como argila para a indústria cerâmica, pedra britada, material de empréstimo, laterita, saibro e cascalho.

Ressalta-se, entretanto, que a exploração desses recursos ocorre, em sua maioria, por meio de lavra a céu aberto, frequentemente nas proximidades de áreas urbanizadas, o que contribui

1 Discente do Curso de Engenharia Civil Bacharelado do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão; Bolsista PIBIC/UEMA.
2 Professora do Departamento de Engenharia Civil do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão; Orientadora.
3 Professor do Departamento de Engenharia Civil do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão; Colaborador.
4 Professor do Departamento de Engenharia Civil do Campus Paulo VI da Universidade Estadual do Maranhão; Colaborador.

para a geração de passivos ambientais. Tal situação demanda estudos voltados à compreensão das características geológico-geotécnicas dos depósitos explorados, possibilitando a qualificação das atividades minerárias e a proposição de modelos de exploração mais sustentáveis, capazes de reduzir os impactos ambientais e contribuir para a gestão adequada dos recursos minerais.

Atualmente, no Distrito Industrial de São Luís, localizado às margens da BR-135, sentido São Luís–Teresina, no km 8, na localidade do Maracanã, inserida na área Tibiri-Pedrinhas, coexistem grandes empreendimentos industriais e empresas de pequeno e médio porte voltadas para os setores alimentício, metalúrgico, moveleiro, da construção civil e da mineração. No setor mineral, destaca-se a extração de areia, matéria-prima amplamente empregada na construção civil, na fabricação de concreto, argamassas, artefatos de cimento e materiais abrasivos.

No município de São Luís, especialmente nas regiões oeste e sudoeste, os depósitos de areia estão associados aos sedimentos areno-argilosos pouco consolidados do Grupo Barreiras. A exploração desses depósitos ocorre a céu aberto, mediante escarificação mecânica com o auxílio de pás carregadeiras. Posteriormente, o material é submetido a processos de lavagem e classificação por hidrociclones, sendo os materiais secundários, como seixos conglomeráticos, siltes e argilas, geralmente descartados.

Embora a atividade minerária desempenhe papel fundamental na economia regional e no fornecimento de insumos para a construção civil, a extração de areia tem gerado significativos passivos ambientais. Esses impactos decorrem principalmente do decapeamento do solo e das operações de lavra por desmonte hidráulico. Entre os principais efeitos observados destacam-se a intensificação dos processos erosivos, alterações na dinâmica de infiltração das águas subterrâneas, instabilidade de encostas e outras modificações ambientais que comprometem a qualidade dos ecossistemas locais.

Diante desse cenário, surgem os seguintes questionamentos: quais são as implicações da extração de areia em um ambiente insular, sedimentar e costeiro? É possível desenvolver essa atividade em consonância com os princípios da sustentabilidade ambiental? Quais medidas podem ser adotadas para minimizar os impactos geológico-geotécnicos, hidrogeológicos e geoambientais decorrentes da atividade mineradora?

Com base nessas questões, o presente estudo tem como objetivo geral *caracterizar os solos das áreas de extração de areia localizadas na Bacia Hidrográfica do Riacho dos Cachorros, considerando seus aspectos geológico-geotécnicos e os impactos ambientais associados*. Como objetivos específicos, busca-se: investigar as características geológico-geotécnicas dos solos presentes nas áreas de extração; e avaliar os impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora por meio da aplicação da Matriz de Leopold e do método Check-list.

METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa será desenvolvida conforme etapas descritas a seguir, sendo o levantamento bibliográfico, reconhecimento de campo e coleta de amostras, o uso do Ensaio do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP), caracterização geológica geotécnica do solo ou sedimentos e a avaliação dos impactos ambientais da extração de areia os temas a serem discutidos.

Caracterização Geoambiental da Área de Estudo

A caracterização geoambiental da área de estudo foi desenvolvida a partir da delimitação e análise integrada da bacia hidrográfica, contemplando parâmetros climáticos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e de uso e ocupação do solo. Para essa etapa, foram elaborados mapas temáticos no *software QGIS v. 3.22 (General Public License),* utilizando imagens orbitais do *Google Earth* e Modelos Digitais de Elevação (MDE) disponibilizados pela plataforma *OpenTopography*. Complementarmente, os dados temáticos de geologia, geomorfologia, hidrografia e hidrogeologia foram obtidos em bases oficiais do IBGE, SGB-

CPRM, ANA e MapBiomas, garantindo consistência e confiabilidade às interpretações produzidas.

Reconhecimento de Campo e Coleta de Amostras de Solo

Com base no mapa de solos da Ilha do Maranhão (Sousa, 2021) e na interpretação de imagens de satélite do *Google Earth*, foram selecionados pontos para visitas de campo com o objetivo de identificar o uso e ocupação do solo, especialmente nas áreas de extração de areia da bacia hidrográfica do Riacho dos Cachorros. As atividades incluíram o reconhecimento dessas áreas, a coleta de amostras de solo para caracterização e classificação geotécnica, bem como a avaliação da suscetibilidade dos solos aos processos erosivos associados à mineração.

As coletas de amostras deformadas de solos/sedimentos foram realizadas conforme a NBR 9820/1997, em duas campanhas de campo, nos dias 27 de janeiro e 20 de fevereiro de 2025. As amostras foram obtidas tanto em áreas diretamente impactadas pela extração quanto em locais adjacentes com baixa interferência antrópica. Nas áreas mineradas, as coletas ocorreram em taludes erosivos, enquanto nas áreas conservadas utilizou-se trado tipo holandês. Foram coletados aproximadamente 2 kg de solo por ponto, devidamente identificados e encaminhados ao Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) da Uema, onde foram realizados ensaios físicos e mecânicos para caracterização geotécnica e posterior classificação dos solos.

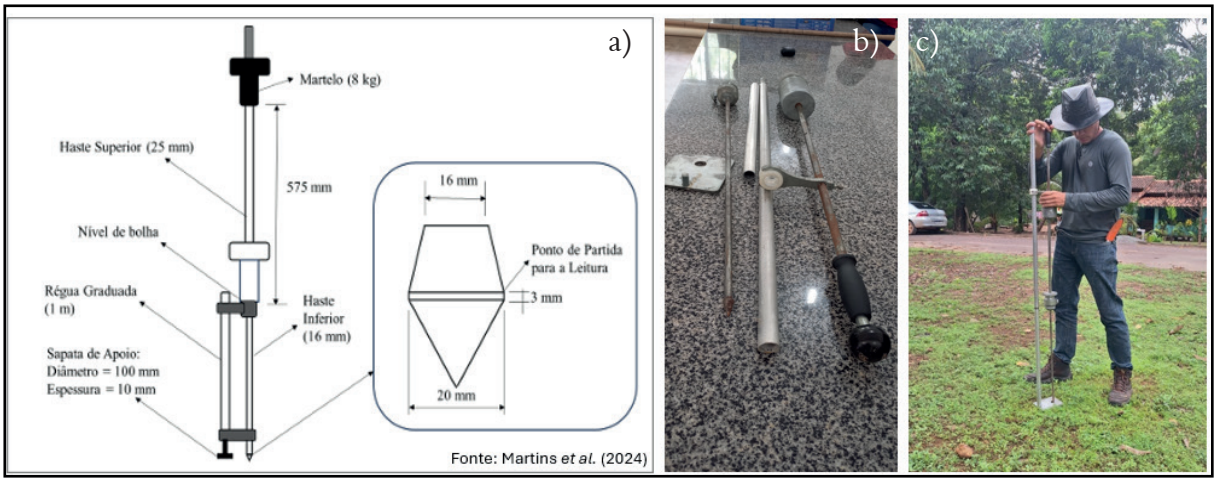
Caracterização Geológica Geotécnica de Solos

A caracterização geotécnica dos solos foi realizada com o objetivo de determinar as suas principais propriedades físicas e mecânicas e proceder à sua classificação segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS/ASTM) e o Sistema de Classificação MCT (*Miniatura Compactado Tropical)*. Para tal, foram conduzidos os seguintes ensaios: Teor de Umidade do Solo – NBR 16097/2012, a análise granulométrica por peneiração e sedimentação (NBR 7181/2016), a determinação do limite de liquidez (NBR 6459/2016) e do limite de plasticidade (NBR 7180/2016), a determinação da massa específica aparente seca (NBR 6458/2016), o ensaio de Compactação de Solos com Equipamento Miniatura" – DNIT 259/2023; e por fim, a determinação a Perda de Peso por Imersão de Solos Compactados" – DNIT 258/2023.

Ensaio de Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP)

Foram realizados 3 ensaios de penetração - distanciados a cada 3 m um do outro - nas áreas de extração de areia e em locais em seu entorno. Os pontos para a realização do ensaio são relativamente planos, previamente limpos para o posicionamento do cone conforme procedimento descrito pela norma NBR 17091/2023. Foram realizadas medidas em média a cada três golpes. O equipamento utilizado foi do Laboratório de Geociências da Uema, sendo realizado ao todo três ensaios por área, um total de 9 ensaios (**Figura 1**).

Figura 1 – Uso do Penetrômetro Dinâmico de Cone – DCP: (a) ilustração do DCP; (b) DCP utilizado; (c) realização do ensaio *in situ*.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Neste estudo, o valor do CBR foi estimado por meio de correlação com os dados obtidos pelo ensaio DCP, conforme a norma técnica ASTM D-6951 (2009), recomendada pela USACE. Essa abordagem permite a determinação do CBR in situ a partir do Índice de Penetração Dinâmica (DPI), expresso em milímetros por golpe, utilizando a Equação (1), aplicável a todos os tipos de solo.

$$CBR = 292 / DPI^{1,12} \quad (1)$$

Os resultados dos ensaios, segundo NBR 9895 (ABNT, 1987), são variáveis de acordo com a textura (granulometria) do solo e da constituição mineral de suas partículas, tornando-se difícil a previsão do CBR. Entretanto, os siltes e outros solos expansíveis, apresentam baixos valores de CBR, inferiores a 6%, enquanto solos finos em geral, incluindo solos arenosos, apresentam valores de CBR entre 8% e 20%. Já os solos grossos, como pedregulhos e as britas graduadas, situam-se em patamares de 50% a 100%, podendo atingir valores mais elevados (BRAJA DAS, 2000).

Avaliação dos impactos ambientais das áreas de extração de areia

A avaliação dos impactos ambientais da atividade de mineração de extração de areia será conduzida através de uma metodologia dupla, empregando a Matriz de Leopold e a Matriz *Checklist*. A Matriz de Leopold é utilizada para identificar e avaliar as relações de causa e efeito entre as ações do projeto (extração, transporte, etc.) e os fatores ambientais afetados (água, solo, flora, fauna). Isso permite classificar os impactos em termos de magnitude e importância, fornecendo uma análise qualitativa detalhada. Por fim, o impacto ambiental pelo método de Leopold é classificado de acordo com a **Tabela 1**, o cruzamento dos critérios de análise (Severidade x Frequência/Probabilidade).

Tabela 1 – Classificação do impacto ambiental segundo a metodologia do Leopold

Severidade	ALTA	MÉDIA	BAIXA
ALTA	Alta Significância	Média Significância	Média Significância
MÉDIA	Média Significância	Média Significância	Baixa Significância
BAIXA	Média Significância	Baixa Significância	Baixa Significância

Fonte: Gondim e Leite (2016)

O método Check-list é uma ferramenta qualitativa utilizada na Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) para identificar, de forma sistemática, os impactos positivos e negativos decorrentes de uma determinada atividade ou empreendimento. Consiste na elaboração de uma lista de verificação contendo os principais componentes ambientais (meio físico, biótico e socioeconômico) que podem ser afetados (Gondim; Leite, 2016). A partir dessa lista, são analisadas as possíveis alterações causadas pela atividade em estudo, permitindo identificar e registrar os impactos ambientais de maneira rápida e organizada.

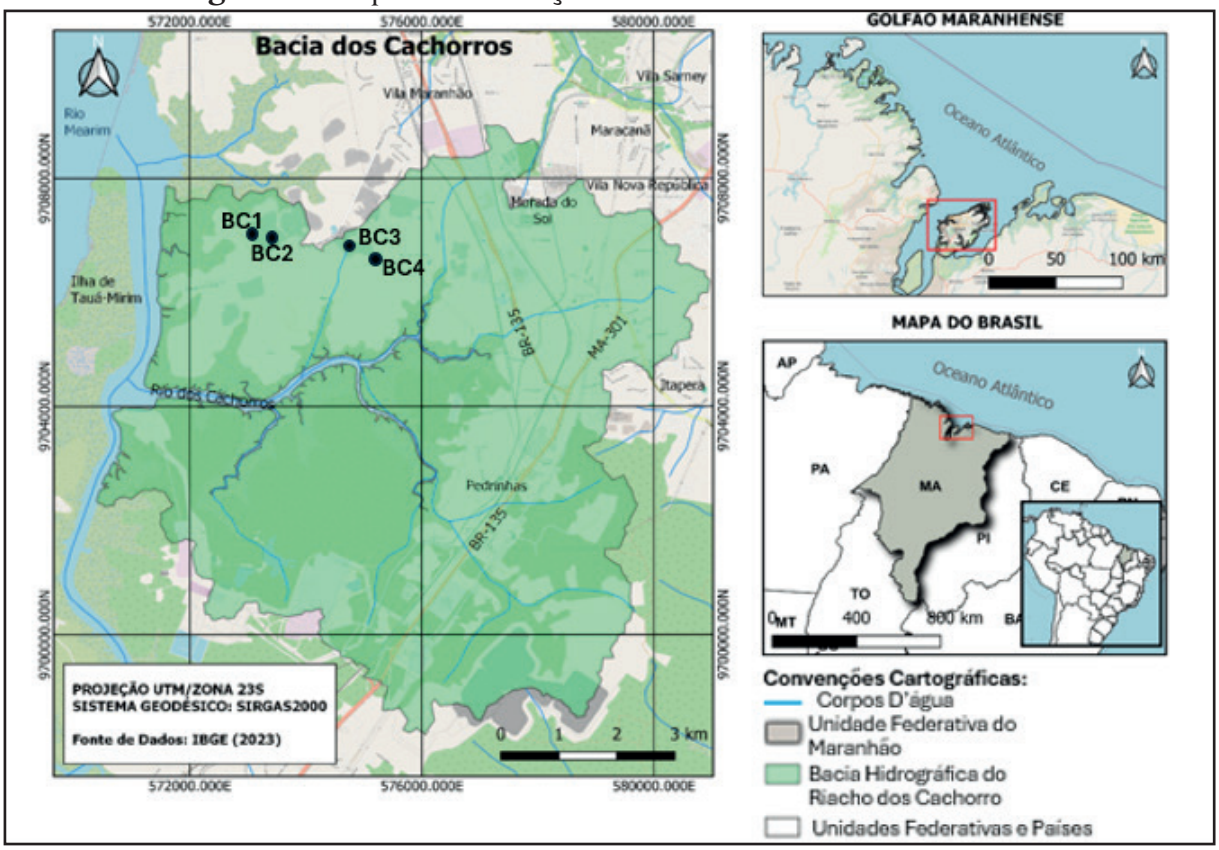
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo a bacia hidrográfica do Riacho dos Cachorros localiza-se na zonal rural do município de São Luís, ao norte do Estado do Maranhão, na região nordeste do Brasil (**Figura 2**). A bacia possui 63,7 km² e é drenada pelo Riacho dos Cachorros, cuja nascente situa-se entre os bairros Rio Grande e Tanandiba, desaguando no Estreito dos Coqueiros. O clima regional é tropical úmido, caracterizado por temperaturas entre 23°C e 32°C e elevada umidade relativa, especialmente durante o período chuvoso (Pinheiro, 2025).

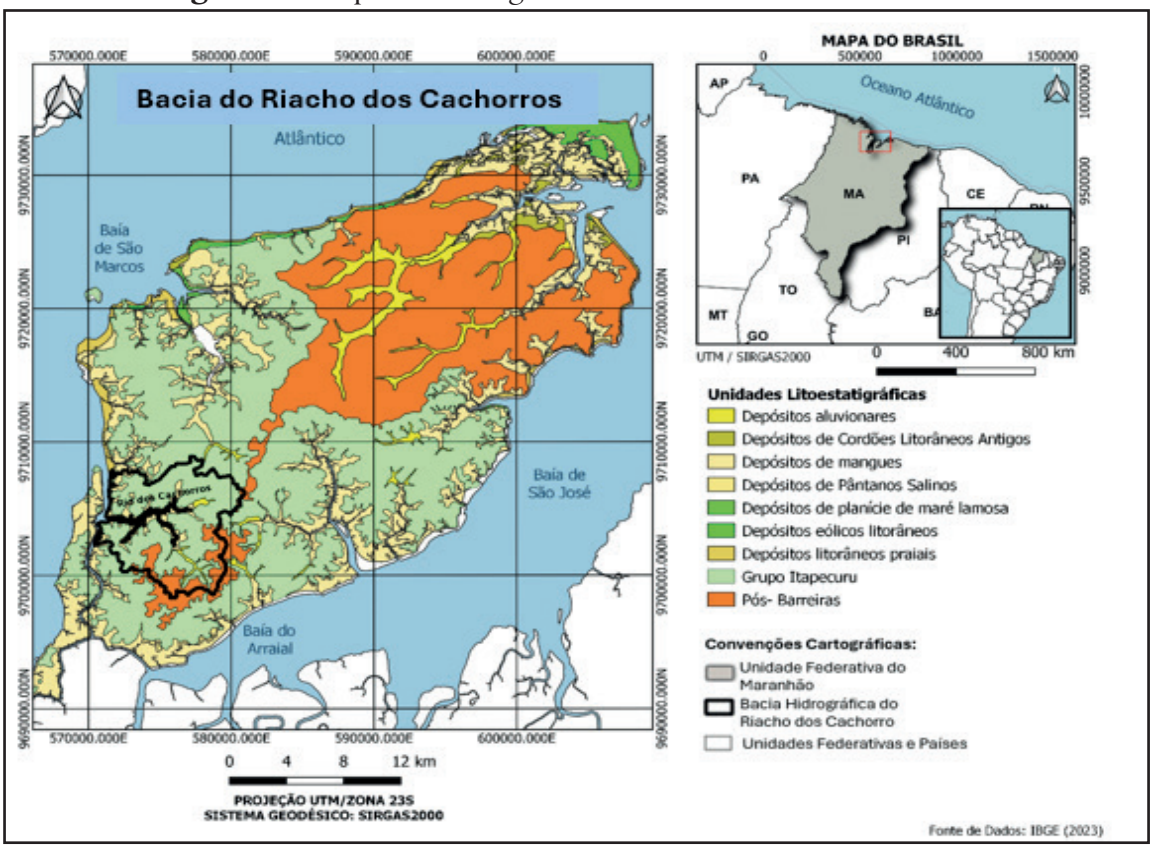
No que se refere às características geológicas e geomorfológicas, a Ilha do Maranhão integra a planície Flúviomarinha do Golfão Maranhense e é diretamente influenciada pelos sedimentos dos grupos Barreiras e Itapecuru. Sua constituição geológica é formada por rochas e depósitos dos períodos Mesozoico e Cenozoico, compostos por areias finas a médias com intercalações argilosas, crostas ferruginosas resultantes do intemperismo químico e arenitos quartzosos contendo feldspato e mica. O relevo apresenta planícies flúvio-marinhas com manguezais, colinas suaves entre 20 e 30 metros e tabuleiros que podem atingir até 60 metros de altitude (Sousa, 2021; Pinheiro, 2025). Na Bacia do Riacho dos Cachorros, predominam fácies arenosas, areno-argilosas e argilo-arenosas da Formação Barreiras, além das fácies de mangue da Formação Açuí, associadas a ambientes planos de deposição lamosa. A área apresenta padrão de drenagem dendrítico e concentra importantes reservas de areia e laterita, recursos amplamente utilizados na construção civil (CPRM, 2013).

Figura 2 – Mapa de Localização da Bacia do Riacho dos Cachorros



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

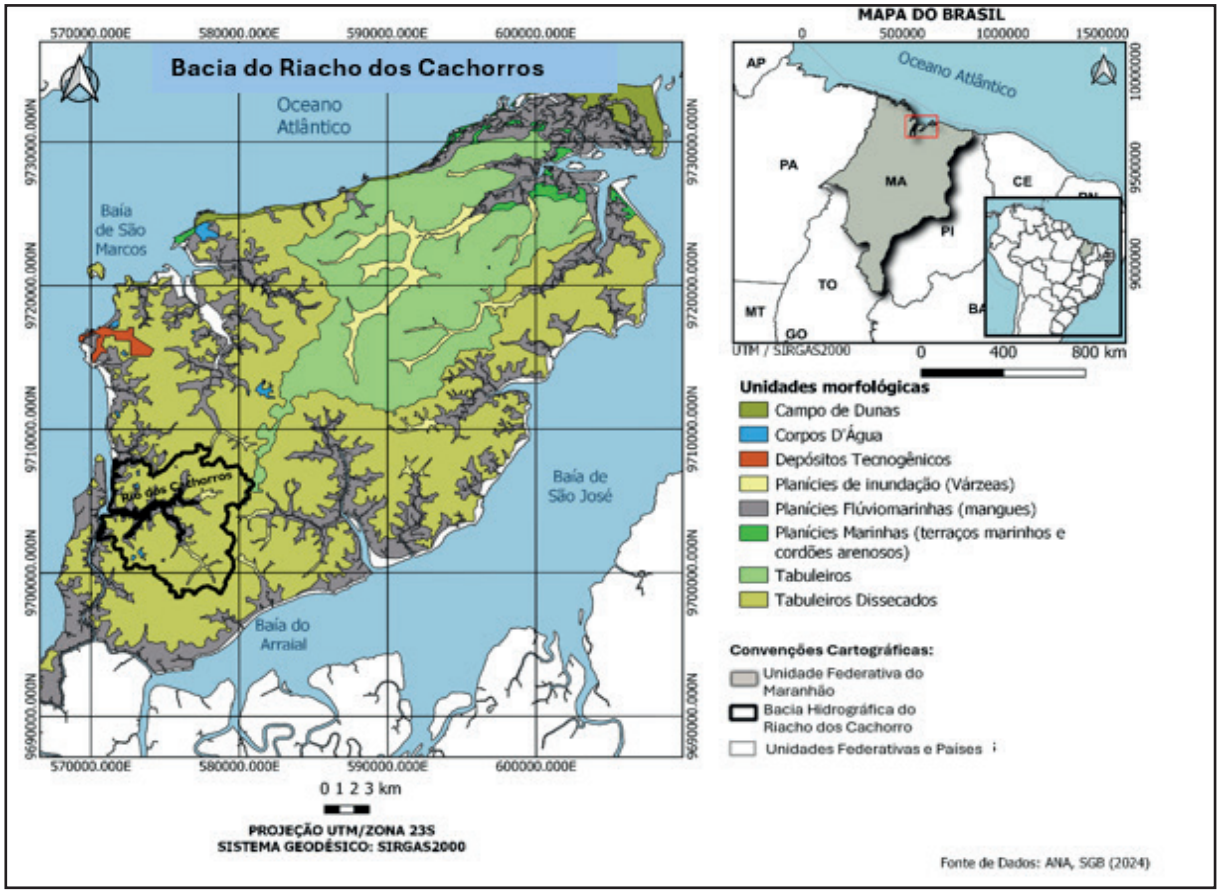
Figura 3 – Mapa de Geologia da Bacia do Riacho dos Cachorros



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

A Ilha do Maranhão é caracterizada por apresentar uma paisagem composta por relevos agradacionais e de baixa declividade, sendo esses especificamente tabuleiros, colinas dissecadas, planícies fluviais, dunas, praias, mangues e restingas, sendo essas últimas formadas desde os períodos geológicos do Pleistoceno e Holoceno e predominantes nas porções norte e nordeste da ilha por conta da ação das ondas e correntes litorâneas (Sousa, 2021). No mapa da **Figura 4,** os Tabuleiros Dissecados predominam na área da bacia do Riacho dos Cachorros

Figura 4 – Mapa de Unidades Morfológicas da Bacia do Riacho dos Cachorros



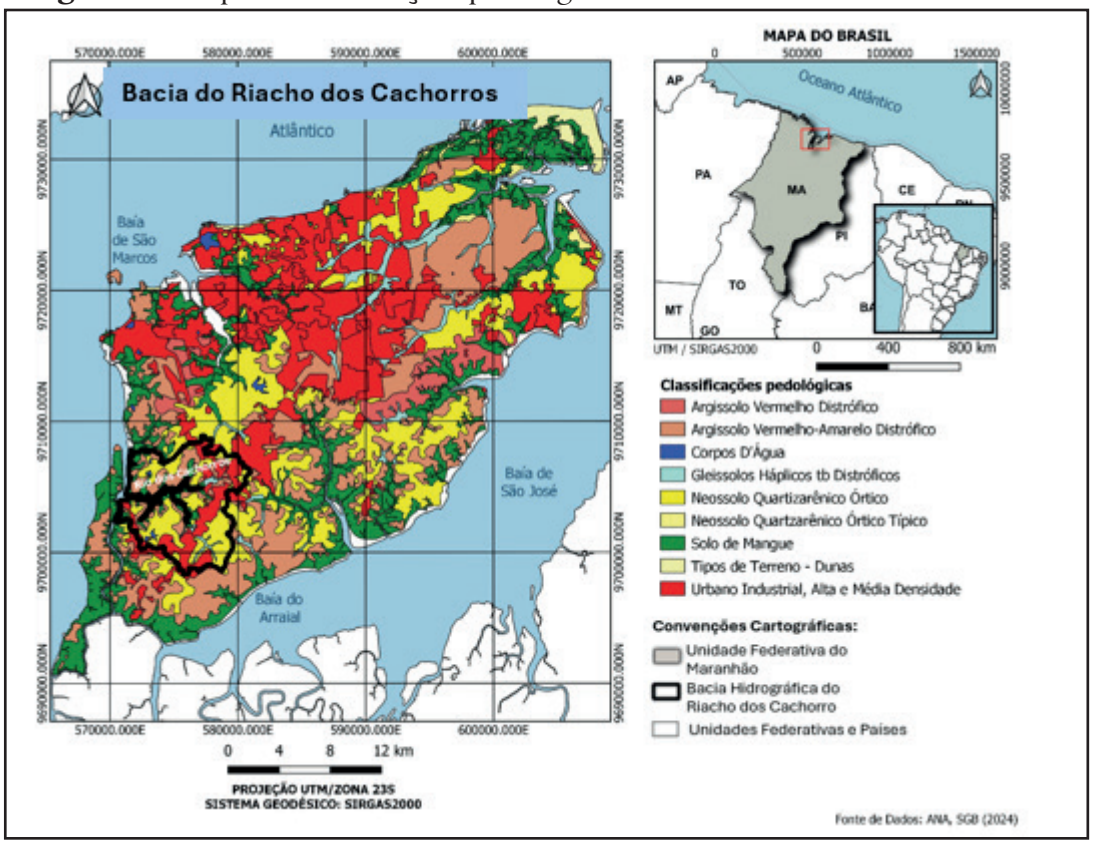
Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Os solos da Ilha de Maranhão são, de forma geral, originários de formações sedimentares datadas do período Cenozóico, os quais apresentam elevado grau de intemperismo, elevado nível de acidez e baixa saturação por bases (Sousa, 2021; Pinheiro, 2025). Segundo Carlos Ernesto (2018), os solos da ilha são classificados como hidromórficos com textura argilosa e arenosa, apresentando altos teores de Cálcio, Magnésio e Alumínio em sua composição. Esses podem ser classificados como Argissolos vermelhos ou amarelos, Gleissolos Háplicos Distróficos e Neossolos Quartzarênicos, apresentando distinções somente em suas texturas por conta da influência do clima e do ambiente em que estão inseridos.

A bacia hidrográfica do Riacho dos Cachorros detém de solos arenosos e areno-argilosos provenientes principalmente da Formação Barreiras, os quais são afetados por intensas atividades industriais e extração de minerais, como a laterita e a própria areia, sendo essas atividades as principais causas da degradação ambiental e alteração da paisagem local, conforme Joaquim Eudes (2002). Além disso, o solo é coberto majoritariamente por diferentes tipos de vegetação, incluindo o mangue e a vegetação arbórea, os quais são representados pelos diferentes tons de cor verde. Dessa forma, é possível compreender e analisar as características citadas anteriormente através do mapa de classificações pedológicas presente na **Figura 5.** O uso e ocupação do solo

na Bacia do Rio dos Cachorros é marcado pela influência de atividades agrícolas e industriais, empreendimentos que pressionam as áreas verdes da região, alterando os processos físico-químicos e biológicos dos sistemas naturais, constituindo um solo exposto ocupando 14% da área, uma vegetação caracterizada secundária, ocupando 43%, vegetação de manguezal com 13% e área urbanizada em expansão ocupando atualmente 30% da região.

Figura 5 – Mapa de classificações pedológicas da Bacia do Riacho dos Cachorros



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

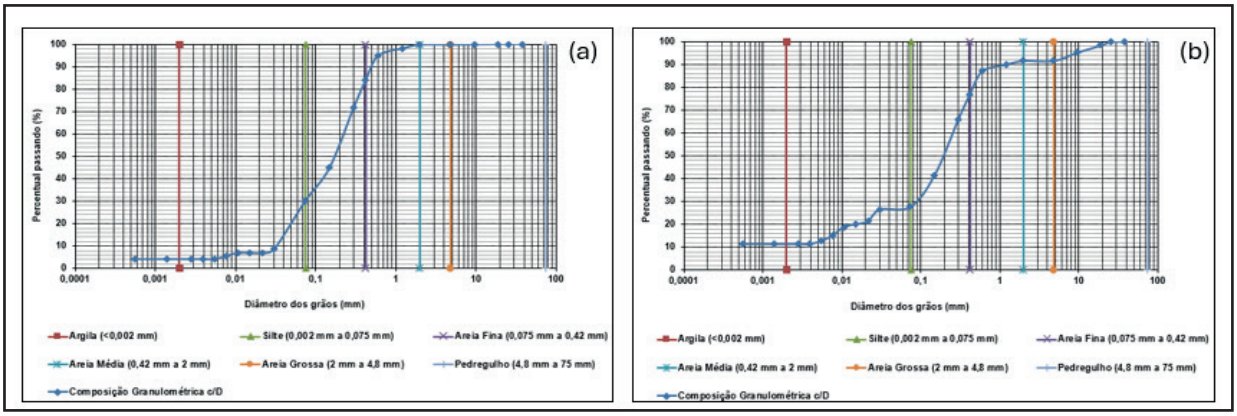
Caracterização e Classificação Geotécnica dos Solos

Foram realizados coletas e caracterização geotécnica dos solos em 2 pontos em área de extração de areia (BC1 e BC3) e 2 em seu entorno (BC2 e BC4), como demostrado no mapa de localização. Os solos foram caracterizados em seus aspectos texturais através da análise granulométrica, do seu teor de umidade, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Com a coleta das amostras de solos em campo nos pontos selecionados, os mesmos foram transportados ao Laboratório de Solos e Pavimentação da Universidade Estadual do Maranhão (Uema) com o intuito de analisar suas composições, para que, assim, possam ser classificados quanto às suas características físicas. Após a realização dos ensaios, constou-se que, de acordo com a padronização aplicada pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), os solos foram classificados como areno-siltosos, apresentando, majoritariamente, predominância de areia fina e pequenas porções de silte e argila.

Do ponto de coleta BC1, o solo de infiltração apresentou porcentagens de 11,38% de argila, 49,41% de areia fina, areia média de 14,56%, silte de 16,20% e 8,44% de pedregulho; enquanto o solo de mineração é composto por uma camada de argila de 4,36%, 25,68% de silte,53,82% de areia fina, 15,86% de areia média e 0,27% de pedregulho. Já no ponto de coleta BC2, o solo de infiltração apresentou cerca de 11,23% de argila, silte de 15,12%, areia fina de 64,78%, areia média de 8,59% e areia grossa de 0,27%, enquanto o solo de mineração apresentou 9,73% de argila, acompanhada de uma fração de silte de 6,36%, uma porção de areia fina de 69,70%, areia média de 13,90%, 0,25% de areia grossa e 0,05% de pedregulho.

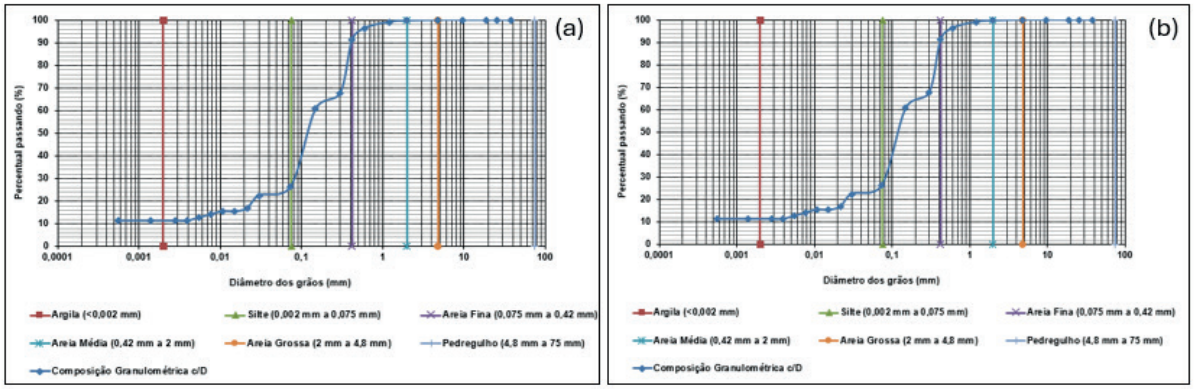
Após a análise granulométrica das quatro amostras, verificou-se que os solos apresentam características comuns, como baixa coesão, elevada permeabilidade e alta suscetibilidade à erosão, conforme evidenciado nas curvas granulométricas das **Figuras 6 e 7**. De modo geral, as curvas indicam predominância de partículas finas, principalmente areia fina e silte, além de pequenas frações de pedregulho. Esse comportamento revela que os solos são mal graduados ou tendem a apresentar má graduação caso ocorram alterações adicionais em sua composição.

Figura 6 – Curva granulométrica dos solos: (a) ponto BC1, (b) ponto BC2



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Figura 7 – Curva granulométrica dos solos: (a) ponto BC3, (b) ponto BC4



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Além das determinações da composição das amostras através da análise granulométrica, foi possível determinar os índices físicos de caracterização dos solos, incluindo o Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade e Teor de Umidade. Dessa forma, é possível identificar o comportamento do solo em condições de umidade, a possibilidade de um potencial de retração ou expansão, definir o tipo de material mais adequado para a construção, evitando fissuras e deformações, e a identificação de uma quantidade de material presente na composição, que, no caso das amostras coletadas, seria a porção de argila. Com isso, os solos coletados em campo obtiveram resultados distintos, conforma a **Tabela 2**.

Diante do exposto, os resultados indicam que os solos coletados apresentam propriedades semelhantes, especialmente quanto aos Limites de Plasticidade (LP), que atingiram valores idênticos entre si. Os Limites de Liquidez (LL) mostraram apenas pequenas variações percentuais, enquanto os Índices de Plasticidade (IP) revelaram que, em sua maioria, os materiais são classificados como não plásticos (**Tabela 2**).

Tabela 2 – Propriedades dos solos coletados

Propriedades	Infiltração BC1	Mineração BC1	Infiltração BC2	Mineração BC2
Limite de Liquidez (LL)	26,7%	18,8%	15,6%	13,5%
Limite de Plasticidade (LP)	18,0%	18,0%	18,0%	18%
Índice de Plasticidade (IP)	8,7% (Medianamente Plástico)	0,8% (Não Plástico)	0% (Não Plástico)	0% (Não Plástico)

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Correlação entre CBR e DCP

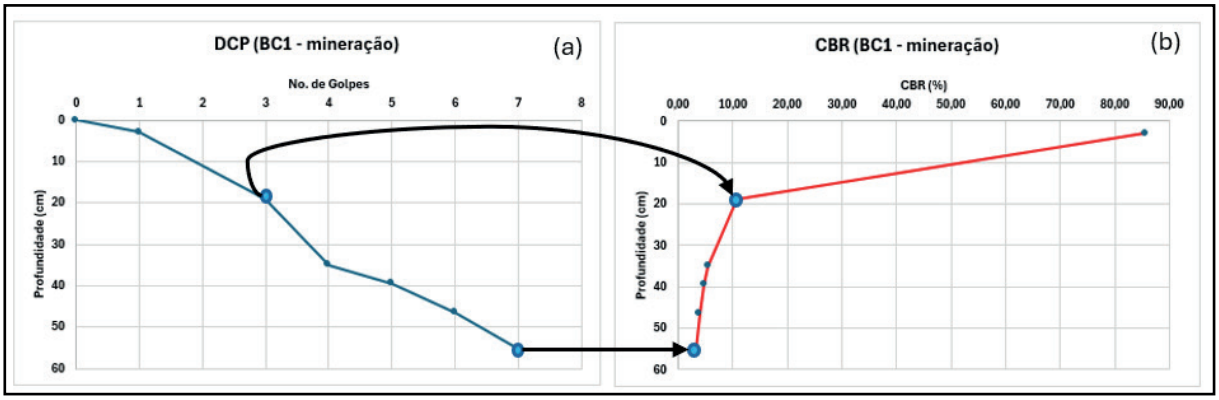
Segundo Das e Sobhan (2014) os valores típicos de CBR podem ser interpretados como: CBR < 5% → solos muito fracos (argilas moles, siltes), baixa capacidade de suporte. CBR entre 5% e 12% → solos de suporte médio (argilas arenosas, areias finas), podem precisar de estabilização. CBR entre 12% e 25% → solos bons (areias bem graduadas, cascalhos), adequados para sub-base. CBR > 25–30% → solos muito bons, considerados CBR alto (areias compactas, cascalhos, solos lateríticos bem estruturados), com desempenho adequado inclusive para camadas de base. Nos pontos BC1 e BC3, os ensaios mostram que a resistência à penetração aumenta com a profundidade (**Figura 8a**). Até cerca de 10 cm, o solo apresenta baixa resistência, indicando uma camada superficial pouco compactada e mais suscetível à erosão. Em profundidade, a resistência cresce, sugerindo camadas mais densas ou naturalmente compactadas.

O comportamento do CBR confirma essa tendência: há um aumento rápido até aproximadamente 10 cm, seguido de crescimento mais gradual. Esse padrão indica boa capacidade de suporte nas camadas superficiais, possivelmente influenciada pela compactação decorrente da atividade mineradora, enquanto o subsolo mantém características naturais. O valor de CBR em torno de 10% até 20 cm (**Figura 8b**) classifica esses solos como de suporte médio, típicos de argilas arenosas e areias finas, podendo requerer estabilização adicional. Os resultados reforçam que a camada superficial é mais vulnerável à erosão e demanda manejo adequado, especialmente em áreas de extração de areia.

A **Figura 9** mostra que o solo apresenta maior resistência nos primeiros centímetros, exigindo poucos golpes para penetração. Após cerca de 30 cm, a resistência diminui, facilitando a penetração até aproximadamente 70 cm. Quanto ao CBR, os valores são inferiores a 10% entre 60 e 70 cm, mas aumentam rapidamente entre 70 e 30 cm, atingindo 50–60% nas camadas superficiais, indicando alta capacidade de suporte.

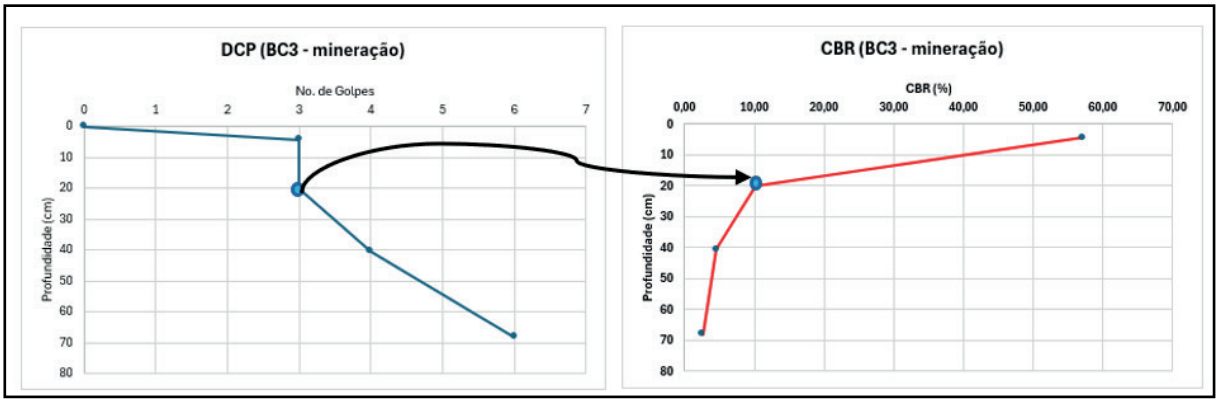
O ensaio com o DCP (**Figura 9a**) revela baixa compactação na camada superficial, tornando-a mais vulnerável à erosão, especialmente em áreas mineradas. Em profundidade, a resistência aumenta gradualmente, sugerindo material mais consolidado. Já o ensaio de CBR (**Figura 9b**) indica maior suporte nas camadas profundas e estabilização nas superficiais, que permanecem menos resistentes, porém homogêneas. Os valores de CBR entre 10% e 70% ao longo do perfil classificam o solo como de suporte médio a bom, típico de areias finas e argilas arenosas. A baixa resistência inicial reforça a necessidade de manejo adequado da superfície para reduzir riscos erosivos em áreas de extração de areia.

Figura 8 - Correlação entre CBR e DCP para os solos BC1 - mineração



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Figura 9 - Correlação entre CBR e DCP para os solos BC3 - mineração



Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Avaliação dos Impactos Ambientais da Atividade de Mineração

A visita às áreas de extração permitiu identificar os principais aspectos e impactos ambientais associados à atividade, os quais fundamentaram a elaboração das Matrizes de Leopold e Checklist. A análise evidencia que a escavação e remoção de areia têm provocado alterações significativas no ecossistema local, incluindo perda de biodiversidade, fragmentação de habitats, formação de cavas, degradação do solo por erosão, compactação e remoção da camada fértil, além de impactos no ciclo hidrológico e no microclima. Também se observam emissões de poeira, ruídos e gases, que afetam a fauna e representam riscos à saúde humana. Apesar desse cenário, a atividade apresenta relevância socioeconômica, contribuindo para a geração de empregos, renda, arrecadação de tributos e oferta de matéria-prima essencial. No entanto, a predominância de impactos classificados como de alta relevância reforça a necessidade de medidas mitigadoras e de gestão ambiental adequada para equilibrar os benefícios econômicos com a preservação ambiental (**Quadro 1**).

Quadro 1 – Matriz de Leopold sobre desmatamento e remoção da vegetação

Etapas na extração de areia	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Situação			Severidade			Frequência			Classificação		
			N	A	E	A	M	B	A	M	B	A	M	B
Desmatamento e remoção da vegetação, e limpeza do terreno Área	Perda da biodiversidade	Desequilíbrio no ecossistema e perda de predadores naturais e proliferação de vetores de doenças		■		■				■		■		
	Fragmentação de habtats	Redução de espécies e Perda de serviços ecossistêmico			■		■			■		■		
	Alteração da paisagem	Impacto Visual (cavas)	■				■		■			■		
	Alteração do solo	Perda da camada fértil			■		■			■		■		
		Erosão do solo			■		■			■			■	
		Compactação do solo			■		■		■				■	
	Ciclo hidrológico afetado	Redução da evapotranspiração			■			■		■			■	
		Redução da infiltração e recarga subterrânea			■		■			■			■	
	Mudança no microclima local (Incremento da insolação/luminosidade;elevação da temperatura no ambiente local)	Redução da umidade local			■			■		■				■
		Alteração da composição florística, etc.			■		■		■				■	
		Estresse em espécies sensíveis à sombra	■					■			■		■	
	Poeira em suspensão	Alteração da qualidade do ar e do ambiente em geral			■			■	■					
		Problemas de saúde (respiratórios, alergias, etc.)			■		■		■			■		

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

O **Quadro 2** mostra que a etapa de escavação e remoção da areia gera impactos ambientais negativos, como alteração e compactação do solo, instabilidade de taludes, emissão de ruídos, poeiras e gases, que afetam a fauna e podem causar problemas respiratórios na população. Apesar disso, a atividade também apresenta efeitos socioeconômicos positivos, como a oferta de matéria-prima essencial, geração de empregos, aumento de renda, arrecadação de tributos e fortalecimento da economia local. Contudo, por se tratar de um recurso mineral finito, seu esgotamento futuro reforça a necessidade de práticas de gestão sustentável e de medidas mitigadoras que conciliem o aproveitamento econômico com a preservação ambiental.

Quadro 2 – Matriz de Leopold sobre escavação e remoção da areia

Escavação e remoção do bem mineral (areia)	Alteração do solo	Compactação do terreno/alteração geotécnica	■				■		■				■	
	Instabilidade de talude	Movimento de massa e risco de acidentes	■			■				■		■		
	Geração de ruídos, gases e poeiras fugitivas pela movimentação de maquinários	Fuga da fauna		■			■		■				■	
		Problemas de saúde (respiratórios, alergias, etc.)	■			■			■			■		
	Economia mineral/oferta de matéria prima	Geração de matéria-prima essencial	■					■	■					■
		Incremento da economia local e regional	■				■			■				■
		Desenvolvimento tecnológico	■					■		■				■
		Esgotamento do recurso mineral	■				■		■				■	
	Criação de empregos diretos e indiretos	Geração de renda	■					■		■				■
	Crescimento do comércio	Arrecadação de tributos	■					■		■				■

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

O **Quadro 3** mostra que as etapas de carregamento, transporte e comercialização da areia geram diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Entre os negativos, destacam-se alterações no microclima, emissões atmosféricas, poluição sonora, compactação do solo, danos às vias e perda de biodiversidade, além de riscos à saúde humana, como problemas respiratórios e estresse decorrente da circulação de veículos pesados. No âmbito econômico, a atividade é relevante por garantir a oferta de insumos essenciais à construção civil, dinamizar o comércio, gerar empregos, aumentar a renda e fortalecer a arrecadação municipal. Contudo, o risco de acidentes de trabalho se sobressai como impacto crítico, podendo resultar em perdas humanas, danos físicos permanentes, paralisação das operações e prejuízos financeiros. Assim, embora contribua significativamente para o desenvolvimento regional, essa etapa também envolve

impactos ambientais relevantes e elevados riscos ocupacionais, reforçando a necessidade de medidas preventivas e mitigadoras que conciliem eficiência econômica, proteção ambiental e segurança dos trabalhadores.

Quadro 3 – Matriz de Leopold sobre carregamento, transporte e comercialização da areia

Carregamento,transporte e comercialização do bem mineral (areia)	Mudança no microclima local	Problemas de saúde (respiratórios, alergias, etc.)	■			■			■			■		
	Emissões atmosféricas	Problemas de saúde (respiratórios, alergias, etc.)			■	■			■			■		
	Poluição sonora	Problemas de saúde (estresse, etc.)	■			■			■				■	
	Aumento da temperatura em áreas urbanas	Problemas de saúde (estresse, alergias, etc.)		■		■				■		■		
	Movimentação de caçambas	danificação das vias de acesso	■				■		■				■	
	Alteração do solo	Compactação do solo			■	■			■			■		
	Perda da biodiversidade	Perturbação e fuga da fauna		■		■			■			■		
	Produção de insumos para construção civil	Atendimento do mercado local e regional	■				■			■			■	
	Dinamização do setor comercial	Geração de emprego, serviços e renda	■				■			■				■
	Contribuição para o desenvolvimento regional	Crescimento da economia mineral	■					■		■				■
	Aumento da receita dos governos estaduais e, principalmente, municipais	Arrecadação de tributos		■				■	■					■
		Perda de vida humana	■				■				■		■	
		Lesões físicas e incapacidades permanentes	■				■			■			■	
	Risco de acidente de trabalho	Problemas de saúde ocupacional	■			■				■			■	
		Abalo psicológico	■				■				■		■	
		Paralisação temporária das atividades		■				■		■		■		
		Aumento de custos operacionais		■				■		■			■	
		Perda de mão de obra qualificada		■			■			■		■		
		Redução da produtividade	■				■				■	■		
		Multas e penalidades legais	■					■			■	■		
		Aumento dos custos de seguro e encargos trabalhistas.		■				■		■			■	

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

O **Quadro 4** apresenta a aplicação do método de *checklist* na fase de implantação, destacando os impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes das atividades realizadas. No meio ambiental, os impactos predominam de forma negativa, como evidenciado pelo desmatamento e remoção da vegetação, alteração do solo, geração de poeiras e gases, além de ruídos e vibrações provenientes da movimentação de máquinas. Observa-se ainda a alteração no regime hídrico, o risco de contaminação do solo e da água, o afugentamento temporário da fauna e a abertura de estradas, todos classificados como de elevada importância e magnitude, com baixa reversibilidade e caráter cumulativo.

No meio socioeconómico, por outro lado, verificam-se efeitos predominantemente positivos. Destacam-se a criação de empregos temporários, a valorização e/ou a desvalorização de terrenos (dependendo da área atingida), o impacto nas atividades económicas já existentes e a possibilidade de qualificação profissional. Além disso, a implantação do projeto pode favorecer o surgimento de novas profissões e comércios locais, impulsionando a economia e proporcionando oportunidades de crescimento regional. A etapa de implantação, portanto, um contraste entre os efeitos ambientais e socioeconómicos: enquanto o meio ambiente sofre impactos negativos de difícil reversão, os benefícios socioeconómicos surgem como potenciais compensadores, sobretudo pela geração de renda e oportunidades de trabalho. No entanto, esse equilíbrio é frágil, uma vez que a degradação ambiental pode comprometer, a longo prazo, a própria sustentabilidade das atividades económicas.

A aplicação do Método Check-list, apresentada nos **Quadros 4 e 5**, permitiu identificar os principais impactos ambientais e socioeconômicos da fase de implantação da atividade de extração de areia. No meio ambiental, predominam impactos negativos de alta relevância, como desmatamento, remoção da vegetação, alteração do solo, geração de poeira, gases, ruídos e vibrações, além de mudanças no regime hídrico, risco de contaminação e afugentamento da fauna, todos com baixa reversibilidade e caráter cumulativo. Em contraste, os efeitos socioeconômicos são majoritariamente positivos, destacando-se a geração de empregos temporários, a valorização ou desvalorização de terrenos, o estímulo a atividades econômicas locais e a criação de novas oportunidades profissionais. Assim, embora a implantação proporcione benefícios econômicos

e sociais, os impactos ambientais negativos podem comprometer a sustentabilidade futura da região, evidenciando a necessidade de equilíbrio entre desenvolvimento e conservação.

Quadro 4 – Tabela de Método de Check-list por Implantação

Fase	Meio	Atividades impactantes	Caráter		Magnitude			Importância			Duração			Reversib.		Ordem		Temporalidade		Escala		Cumulat.		Sinergia	
			+	-	MP	MM	MG	IN	IM	IS	DC	DM	DL	RR	RI	OD	OI	TT	TP	EL	ER	CS	CN	SS	SN
IMPLANTAÇÃO	Ambiental	Desmatamento e remoção da vegetação		–			■			■			■		■	■		■							
		Alteração do solo		–			■			■			■		■		■		■	■		■		■	
		Geração de poeiras e/ou gases		–		■			■		■			■		■		■			■		■	■	
		Ruídos e vibrações		–			■		■		■			■		■		■			■		■		■
		Alteração de regime hídrico		–		■				■			■		■		■		■		■	■		■	
		Risco de contaminação (solo/água)		–		■				■			■		■	■		■			■	■		■	
		Afugentamento temporário da fauna		–		■			■			■		■		■		■		■		■			■
	Socioeconômico	Abertura de estradas		–		■			■				■		■		■	■		■		■			■
		Contração de mão de obra		–		■		■				■		■		■		■		■			■		■
		Criação de empregos temporários	+			■				■			■		■		■	■			■		■		■
		Valorização ou desvalorização de terrenos	+		■				■				■		■		■	■			■	■		■	
		Impacto nas atividades existentes		–			■			■			■	■			■	■			■	■		■	
		Qualificação profissional	+			■				■			■		■		■		■		■		■		■
		Surgimento de novas profissões / comércios	+			■				■			■		■		■		■		■	■			■

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

Quadro 5 – Tabela de Método de Check-list por Operação

Fase	Meio	Atividades impactantes	Caráter		Magnitude			Importância			Duração			Reversib.		Ordem		Temporalidade		Escala		Cumulat.		Sinergia	
			Ben	Adv	MP	MM	MG	IN	IM	IS	DC	DM	DL	RR	RI	OD	OI	TT	TP	EL	ER	CS	CN	SS	SN
OPERAÇÃO	Ambiental	Alteração da paisagem		■		■				■		■				■			■	■		■		■	
		Degradação do solo		■			■			■			■		■		■		■	■		■		■	
		Poluição do ar		■		■				■	■				■	■			■		■		■		■
		Ruído e vibrações contínuas		■	■			■			■			■		■		■		■			■	■	
		Alteração hidrológica		■			■			■		■		■			■		■	■		■		■	
		Contaminação hídrica		■			■			■		■		■			■		■	■	■		■		■	
		Perda de biodiversidade		■			■		■				■	■			■		■	■		■			■	
		Assoreamento de rios		■			■		■			■		■		■			■	■	■		■			■
		Erosão do solo		■			■			■			■		■		■		■	■		■		■		
		Compactação de solos		■		■			■				■		■		■		■	■		■		■		
		Interrupção de corredores ecológicos		■		■			■			■		■			■	■			■		■			■
		Aumento de turbidez de rios		■		■			■		■			■		■		■			■	■				■
	Socioeconômico	Aumento de tráfego pesado		■		■			■			■		■		■		■			■		■		■
		Ruído, poeira e vibrações em comunidades próximas		■		■			■		■			■		■		■			■		■	■	
		Impactos visuais		■			■	■			■				■	■			■	■		■			■	
		Criação de emprego direto e indireto	■		■					■		■			■	■			■		■	■				■
		Receita fiscal para o município	■		■				■			■		■			■		■		■	■				■
		Pressão sobre outras atividades económicas		■			■			■		■			■		■		■		■	■		■		
		Possível desvalorização imobiliária		■			■			■		■		■			■		■		■	■				■
		Geração de resíduos		■		■			■		■			■			■	■			■		■			■
		Danos à Infraestrutura viária		■		■			■		■			■		■			■	■	■		■		■	
		Congestionamento e Fluxo de Trânsito		■		■			■			■		■			■	■	■		■			■		■
		Aumento da Poeira e Poluição do Ar		■		■		■			■			■		■		■	■		■	■		■		
		Diminuição da Qualidade de Vida		■			■			■		■			■		■			■	■		■		■	

Fonte: elaborado pelo autor, 2025

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa revelam que a área de estudo apresenta significativa diversidade geológica e geotécnica, sendo constituída predominantemente por fácies arenosas, areno-argilosas, argilo-arenosas e sedimentos lamosos das Formações Barreiras e Açuí. Essas características justificam o elevado potencial mineral da região, especialmente para a exploração de areia e lateritas. O relevo é ondulado, com elevações moderadas de até 9 metros e declividades acentuadas, associadas a processos erosivos intensificados pelo clima tropical úmido. Durante as atividades, foram identificados taludes próximos às áreas de extração

e zonas com diferentes níveis de compactação, onde foram coletadas amostras e realizados ensaios DCP para avaliação da resistência do solo. Ressalta-se, que os trabalhos de campo foram fundamentais para a compreensão das características geoambientais da área e para a obtenção de materiais destinados às análises laboratoriais, que possibilitaram a determinação dos valores de CBR e o aprofundamento da caracterização geotécnica.

Conclui-se que a bacia hidrográfica do Riacho dos Cachorros possui elevado potencial mineral estratégico para a construção civil; entretanto, a exploração sem manejo adequado tem gerado importantes passivos ambientais, reforçando a necessidade de planejamento integrado, recuperação das áreas degradadas e adoção de práticas sustentáveis de exploração.

REFERÊNCIAS

BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento. **Geodiversidade do estado do Maranhão** / Organização Iris Celeste Nascimento. – Teresina : **CPRM,** 2013.

BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: **DNPM**, 2016.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais.** Solos e Rochas, v.16, n.2, p.77-91, 1993.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. / Braja M. Dias, Khaled Sobhan ; tradução Noveritis do Brasil; revisão técnica Roberta Boszczowski. – São Paulo : Cengage Learning, 2017.

FERRREIRA, Mario Cesar Perfetti Jansen. **Distritos Industriais: opção de desenvolvimento.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, p. 130.2003.

GEOCONSULT. **Geoconsult Consultoria**, **Geologia & Meio Ambiente Ltda. Complexo Ecoturístico Reserva Garaú** – Conde / PB. Relatório de Impacto Ambiental (Rima) – VOL II. Disponível em: https://sudema.pb.gov.br/consultas/downloads/arquivos-eia-rima/lord/rima/00_apresentacao-sumario.pdf

HORBE A.M.C., HORBE M.A., Suguio K. (2003). **Origem dos depósitos de areias brancas no Nordeste do Amazonas.** Revista Brasileira de Geociências, 33:41-50.

LEOPOLD, L. B.; CLARKE, F. E.; HANSHAW, B. B.; BALSLEY, J. R. **A procedure for evaluating environmental impact**. U. S. Geological Survey, Washington: Geological Survey 1971. 13p. Circular 645

PINHEIRO, KARINA S. F. **OCUPAÇÃO DO SOLO, QUALIDADE DAS ÁGUAS E CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS:** Implicações aos Estudos Hidrológicos em Ambiente Sedimentar Costeira. / KARINA SUZANA FEITOSA PINHEIRO; orientador JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS; co-orientardor CLÁUDIO JOSÉ DA SILVA DE SOUSA. – Brasília, 2025.311 p. Tese de Doutorado em Geociências Aplicadas. Universidade de Brasília.

SOUSA, C. J. da S. de (2021). **Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão**:

reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão. / Cláudio José da Silva de Sousa; Orientador Welinton Rodrigues Borges. Brasília, 2021. Tese de Doutorado em Geociências Aplicadas. Universidade de Brasília.

Universidade Estadual do Maranhão. Centro de Ciências Agrárias. Núcleo Geoambiental (NUGEO). **Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão** / Universidade Estadual do Maranhão. - São Luís, 2016. 165 p.