



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID38085>



Estabilidade nas estradas da Amazônia brasileira: um recorte da BR-010 no Estado do Pará

Roads stability on in the Brazilian Amazon: a section of BR-010 in the Pará of State

Eduardo Francisco da Silva¹; Fernando Andrade de Oliveira²; Piera B. Coelho Amora³; Arthur Iven T. Fonseca⁴

¹ UFPA, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica - PPGG, Belém/PA, Brasil. Email: efrancisco_geo@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8817-6582>

² Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS, GEMINA, Belém/PA, Brasil. Email: oliveira.frd@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7224-9026>

³ UFPA, Programa de Pós-graduação em Geografia- PPGeo, Belém/PA, Brasil. Email: pieracoelho@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9639-5104>

⁴ Hg4 Soluções Ambientais e Mineração, Igarapé-Açu/PA, Brasil. Email: arthur_iven@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1949-088X>

Resumo: O modal rodoviário foi implantado no Brasil a partir dos anos de 1930, sendo intensificado após o ano de 1960 com os projetos de integração nacional. A construção de uma rodovia requer, dentre outras, a aplicação de diversas soluções de geotecnica para a correta execução do projeto. Os taludes de corte e aterro são frequentes, especialmente em regiões de relevo acidentado, com aclives e declives. Neste trabalho foram analisados seis taludes de corte em aproximadamente 36 Km da rodovia BR-010, entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará, no Estado do Pará. Os taludes analisados apresentam fator de segurança dentro dos limites recomendáveis, no entanto, problemas de erosão e movimentos gravitacionais de massa ocorrem na maioria deles. Os taludes necessitam de tratamento preventivo para evitar que as quedas de bloco e os escorregamentos provoquem a interrupção da pista, com potencial para trazer danos a vidas humanas, ambientais e econômicos.

Palavras-chave: Mapeamento; Rodovia; Erosão.

Abstract: In Brazil, road construction processes started in the 1930s but were intensified in the 1960s due to the projects of national integration. Building a road requires the application of various geotechnical solutions, among other studies, to ensure the correct execution of the project. Slopes are commonly deployed, particularly in regions of rugged terrain, presenting steep inclines and declines. In this research work, slopes six were analyzed along, approximately, 36 km of the BR-010 road, in the Paragominas and Ipixuna do Pará, municipalities of Pará State in Brazil. These presented values of safety factors within the recommended limits; however, erosion and mass movement problems occur in most of them. Hence, it is necessary to employ preventive treatment to avoid block falls and landslides that could obstruct the road causing traffic interruption, environmental and economic harm or, even worse, detriments to human lives.

Keywords: Mapping; Highway; Erosion.

1. Introdução

Rodovias são vias de trânsito terrestre utilizadas para a movimentação de pessoas, veículos e cargas. A implantação de rodovias no Brasil se deu no início dos anos de 1930, com a criação do fundo especial para a construção e conservação de estradas de rodagem federais, sendo intensificado a partir dos anos de 1970 com o Plano Rodoviário Nacional (PEREIRA; LESSA, 2011), que fomentava recursos para estimular a expansão do setor.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2007), as rodovias podem ser classificadas em: rodovia em área urbana, quando há trechos de rodovias localizados dentro do perímetro urbano; rodovia rural, quando há trechos de rodovias que conectam áreas urbanas e industriais que atravessam zona rural e; rodovia vicinal, que é destinada, principalmente, a dar acesso a propriedades ou servir de caminho para conectar pequenos núcleos rurais.

A implantação dos grandes projetos rodoviários na Amazônia, tiveram como premissa principal a integração territorial, aproximando as áreas consideradas despovoadas aos centros econômicos e políticos do país. Durante o século XX, essas estradas diminuíram as distâncias entre os núcleos urbanos e rurais, superando as barreiras físicas do território havendo um incremento no fluxo de circulação de pessoas, veículos e comércio de produtos (OLIVEIRA NETO et al., 2021).

A construção de uma rodovia requer, necessariamente, o cumprimento de diversas diretrizes básicas para atender os padrões mínimos de qualidade e segurança, dentre os quais são indispensáveis o estudo geológico, climatológico e geotécnico (DNIT, 2019).

A execução de obras de estradas, a depender das condições topográficas do terreno, requer a implantação de diversos taludes de corte. Os taludes de corte interferem de maneira direta nos fatores causadores da erosão, expondo os maciços rochosos às intempéries e, principalmente, à chuva. Os processos erosivos constituem sérios problemas e assolam, com maior intensidade, os países tropicais, devido aos altos índices pluviométricos (TRAN et al., 2020).

O avanço dos processos erosivos podem desencadear os movimentos gravitacionais de massa, que são um dos problemas mais recorrentes em taludes de corte e ocorre em diversas partes do mundo (TRAN et al., 2020), com potencial de gerar resultados catastróficos (GERSCOVICH et al., 2011; TRAN et al., 2015).

No Brasil, o fator de segurança dos taludes, são determinados pelo Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR (11682/2009). Os taludes de corte estão sujeitos aos processos intempéricos que os tornam suscetíveis a eventos de rompimento, especialmente durante a estação chuvosa (LI et al., 2009). A maioria dos problemas identificados nos taludes de corte são provocadas por erros de projeto, por exemplo, forma do corte, altura e inclinação do talude (SUTEJO; GOFAR, 2015). De acordo com a morfologia da região, para a construção de uma rodovia se faz necessário o corte de diversas formas de relevo para que o traçado e a inclinação da pista, prevista no projeto, sejam atendidos (ANDRADE, 2019).

A construção da rodovia BR-010, foi iniciada em 1959 tendo seu término em 1974, são, aproximadamente, 1.960 km que liga Belém a Brasília. É uma rodovia Federal que compreende um importante corredor logístico, interligando quatro estados brasileiros: Pará; Maranhão; Tocantins; Goiás (ANTERO, 2017). Essa rodovia possui grande importância para a região amazônica, pois foi a primeira e, até hoje, a principal conexão por terra entre a Amazônia e o Centro-Oeste do país, possibilitando os fluxos migratórios e a ocupação do território paraense (PFAFF et al., 2009).

A pesquisa aqui presente tem o objetivo de mapear o potencial de instabilidade da rodovia BR-010 provocado pelas deficiências no fator de segurança de estabilidade dos taludes de corte. Foram analisados seis taludes de corte em, aproximadamente 36 km, entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará, no Estado do Pará (Figura 1).

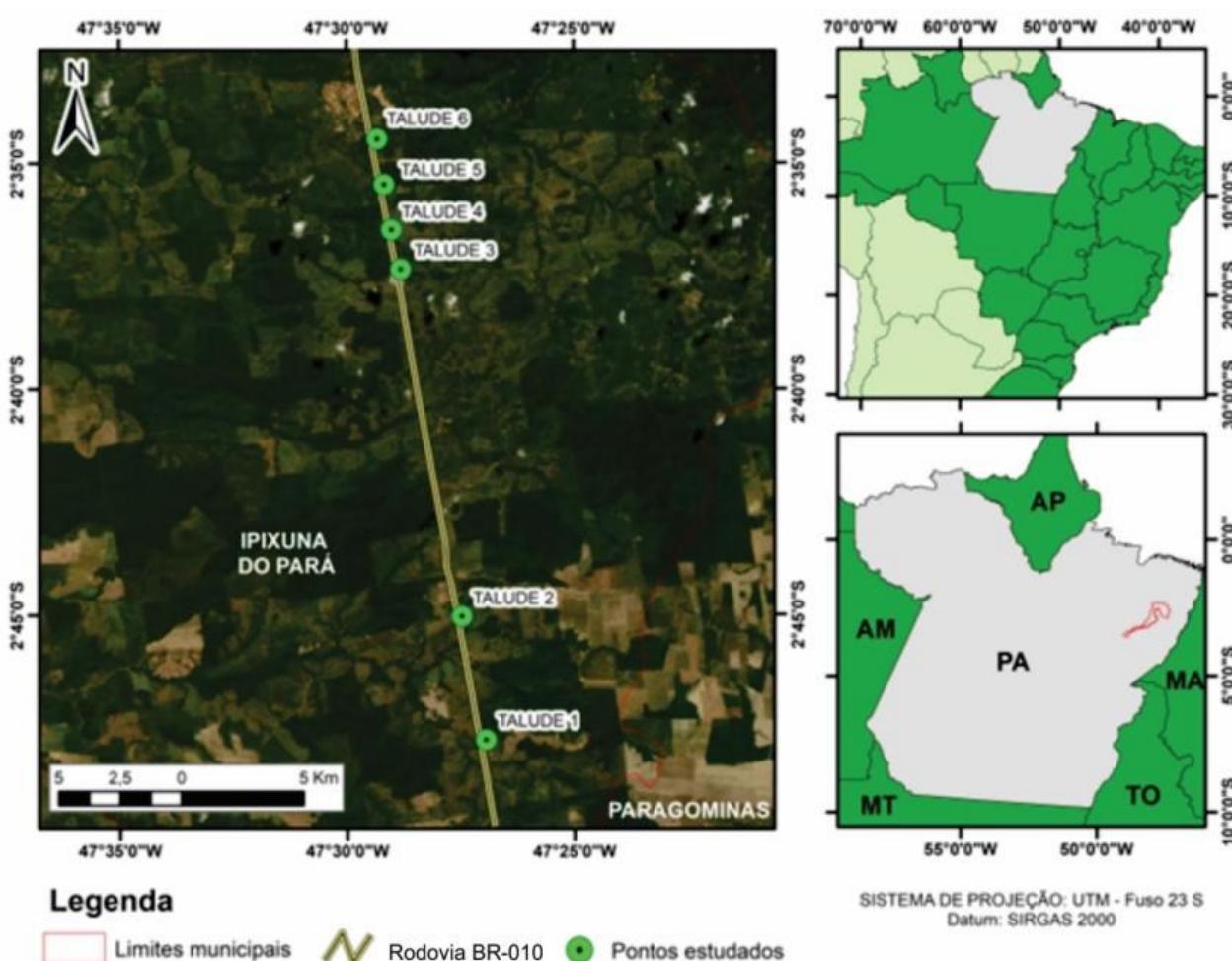


Figura 1 – Localização geográfica da rodovia BR-010 entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará.
Fonte: Autores (2024).

2. Metodologia

Esta pesquisa buscou utilizar métodos de análise que permitissem identificar, diagnosticar e compreender a dinâmica e a natureza dos fenômenos geológico-geotécnico. Para alcançar os resultados foi realizado um amplo levantamento bibliográfico e a pesquisa de campo para construir um banco de dados referentes ao tema.

A confecção das bases cartográficas foi realizada empregando o software ArcGIS versão 10.5, segundo metodologia de Silva et al. (2020). O mapeamento geológico foi realizado por meio de caminhamentos, empregando as técnicas de Lisle et al. (2014), observando os aspectos litológicos e suas relações estratigráficas.

O levantamento geotécnico foi realizado em dois períodos, sendo um na estação seca (junho) e outro na estação chuvosa (abril) entre os anos de 2020 e 2021, para verificar a estabilidade e a ação dos processos erosivos nos taludes.

Os dados pluviométricos foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, disponível no site da instituição (www.inmet.gov.br/portal/), na estação Paragominas (A212), os quais foram analisados por um período de dez anos (maio de 2011 a abril de 2021). Por não dispor de estação meteorológica no município de Ipixuna do Pará, os dados obtidos na estação Paragominas (A212) foram extrapolados para toda área do estudo. Nesses municípios o período de estiagem compreende os meses de junho a novembro, enquanto o chuvoso é entre os meses de dezembro a maio.

A estabilidade dos taludes foi obtida a partir de análises numéricas com uso do software GeoStudio 2012, na plataforma SLOPE/W, empregando o método Morgenstern-Price (1965). Além disso, foi confeccionada uma carta geotécnica de

susceptibilidade a erosão, através do uso de geotecnologias, utilizando a adaptação da metodologia de Zuquette e Gandolfi (2004) e Fernandes e Cerri (2011).

Para a confecção da carta geotécnica foi utilizado os dados de campo a os dados disponíveis em canais oficiais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, MDE proveniente da plataforma Earth Data – NASA). Durante a elaboração dos mapas temáticos foram definidos para cada tema, classes e seus respectivos pesos de acordo com o maior ou menor grau de suscetibilidade à erosão (**Tabela 1**). Os pesos foram atribuídos de 1 a 3, sendo 1 indicativo de menor suscetibilidade, 2 moderada suscetibilidade e 3 maior suscetibilidade (CREPANI *et al.*, 2001).

Tabela 1 – Variáveis e pesos dos fatores geotécnicos usados nos mapas temáticos.

MAPAS TEMÁTICOS	VARIÁVEL	PESO
SOLO	Latossolo Amarelo Distrófico com textura muito argilosa	1
	Latossolo Amarelo Distrófico com textura média	2
	Plintossolo Pétrico Concrécionário com textura muito argiloso e muito cascalhento	3
GEOLOGIA	Coberturas Lateríticas Formação Ipixuna	1 3
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	Formação Florestal	1
	Formação Savânicas Formação Campestre	2
	Fazenda (descoberto)	3
DECLIVIDADE (%)	0-7 7-12 12-18 18-23	1
	23-28 28-34 34-40	2
	40-48 48-69	3

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001); CPRM, (2021); EMBRAPA (2018); Oliveira (2011).

O mapa de solos foi definido com pesos segundo maior ou menor grau de susceptibilidade erosiva, correlacionando com o Mapa Pedológico do IBGE (2021) e o trabalho de Nogami e Villibor (1979). Os dados geográficos dos tipos de solo e de estrutura vetorial (polígonos) foram adquiridos no portal de geociências do IBGE e a atribuição dos pesos foi obtida pela ponderação tomada por base a escala de vulnerabilidade de solos desenvolvida por Crepani *et al.* (2001).

A confecção do mapa geológico utilizou pesos de acordo com a resistência e erosão das camadas litológicas, apoiando-se na base de dados do Mapa Geológico do estado do Pará de acordo com Vasquez e Rosa-Costa (2008). Os dados da geologia, foram obtidos por meio do GeoSGB, o banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2021). Um dos atributos presentes é a resistência ao intemperismo físico de cada tipo ou conjunto de rochas, sendo as classes existentes na RGIPI: baixa a alta e moderada a alta. Na área de trabalho predominam as rochas sedimentares que foram classificadas em pesos, de 1 a 3 segundo sua resistência. O peso 1 indica a maior resistência à erosão, o 2 indica uma moderada susceptibilidade à erosão e o 3 é utilizado para rochas com baixa resistência à erosão.

No mapa de Uso e Ocupação do Solo, utilizou-se a base de dados do Projeto Map Biomas (2022), os pesos aplicados às classes de cobertura vegetal foram definidos com base em Oliveira (2011), então a imagem do NDVI foi reclassificada para que cada pixel apresentasse o valor do peso seguindo a lógica de que quanto maior a cobertura vegetal, menor a suscetibilidade à degradação ambiental.

Na elaboração do Mapa de Declividade, foram definidos pesos de acordo com as classes encontradas nas áreas, sendo as áreas com maior declividade mais susceptíveis a processos erosivos. Neste trabalho foi adotada como referência a escala desenvolvida pela EMBRAPA (2018), na qual considera que quanto mais íngreme o terreno, ou seja, quanto maior a declividade, maior a chance de erosão, especialmente quando combinada com outros fatores, ausência de cobertura vegetal, tipo de solo ou do tipo de atividade desenvolvida naquele local, por exemplo.

Após a elaboração dos mapas temáticos e utilizando os pesos para cada classe, foi possível realizar o procedimento de reclassificação, utilizando a ferramenta *reclassify* no ArcGis 10.5, com novas notas e pesos atribuídos, gerando quatro novos arquivos *raster* reclassificados. Com estes dados, foram determinados novos pesos para cada tema de acordo com sua maior ou menor influência no processo erosivo.

Na definição dos pesos de cada classe e temas utilizou-se, de forma adaptada, a metodologia de análise multicritério de Moura (2009), que é um procedimento metodológico de cruzamento de variáveis amplamente aceito nas análises espaciais. Nela, realiza-se uma análise espacial baseada na conjugação de uma coleção de variáveis, em que cada nova análise irá exigir nova escolha de conjunto de variáveis e o peso que cada uma delas terá no produto final, está relacionado ao contexto da análise. O procedimento baseia-se no mapeamento de variáveis por plano de informação e na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus componentes de legenda para a construção do resultado final. Desta forma, foram atribuídos pesos para cada plano de informação (temas), de acordo com a importância relativa entre eles (Tabela 2).

Tabela 2 – Pesos dos fatores geotécnicos usados nos mapas temáticos reclassificados.

MAPAS TEMÁTICOS	PESOS
SOLOS	0,25
GEOLOGIA	0,15
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	0,35
DECLIVIDADE (%)	0,30

Fonte: Autores (2024).

Por fim, foi utilizado a expressão algébrica inserida na ferramenta *raster calculator* do software ARCGIS 10.5: (“DECLIVIDADE” * 0,30) + (“GEOLOGIA” * 0,15) + (“SOLOS” * 0,25) + (“USOEOCUPAÇÃO” * 0,35). Resultando em um arquivo *raster* com a carta de susceptibilidade geotécnica e erosão para a área de estudo.

3. Resultados e discussão

A área de estudo apresenta geologia essencialmente sedimentar, inserida no contexto Meso-Cenozoico, localizada entre o Noroeste da Bacia do Grajaú e a porção meridional da Plataforma Bragantina (KOTSCHOUBEY et al., 2005).

Na base, o arranjo litoestratigráfico corresponde aos depósitos estuarino-lagunar do Grupo Itapecuru (ANAISSÉ et al., 2001; CUNHA et al., 2019), onde foram descritos conglomerados com seixos de argila e quartzo, arenitos médios a grossos, friáveis e intercalados com argilitos.

Essas rochas são sobrepostas por depósitos de sistema flúvio-estuarinos pertencente a Formação Ipiruna (SANTOS JR.; ROSSETTI, 2002), caracterizada pela intercalação entre arenitos caulínicos e argilitos. Os arenitos são bem estratificados e exibem, por vezes, diferentes padrões de anéis de *Liesegang*, promovidos pela dispersão do ferro por meio de fluxos da água através dos sedimentos (TUCKER, 2014), e argilitos maciços. O limite do depósito é marcado por uma espessa crosta laterítica ferruginosa/aluminosa.

No topo, ocorrem depósitos de ambiente litorâneo dominado por correntes de maré da Formação Barreiras (GÓES et al., 1990; SANTOS JR.; ROSSETTI, 2003), foram descritos arenitos médios a finos, friáveis e intercalados com argilitos estratificados (Figura 2).

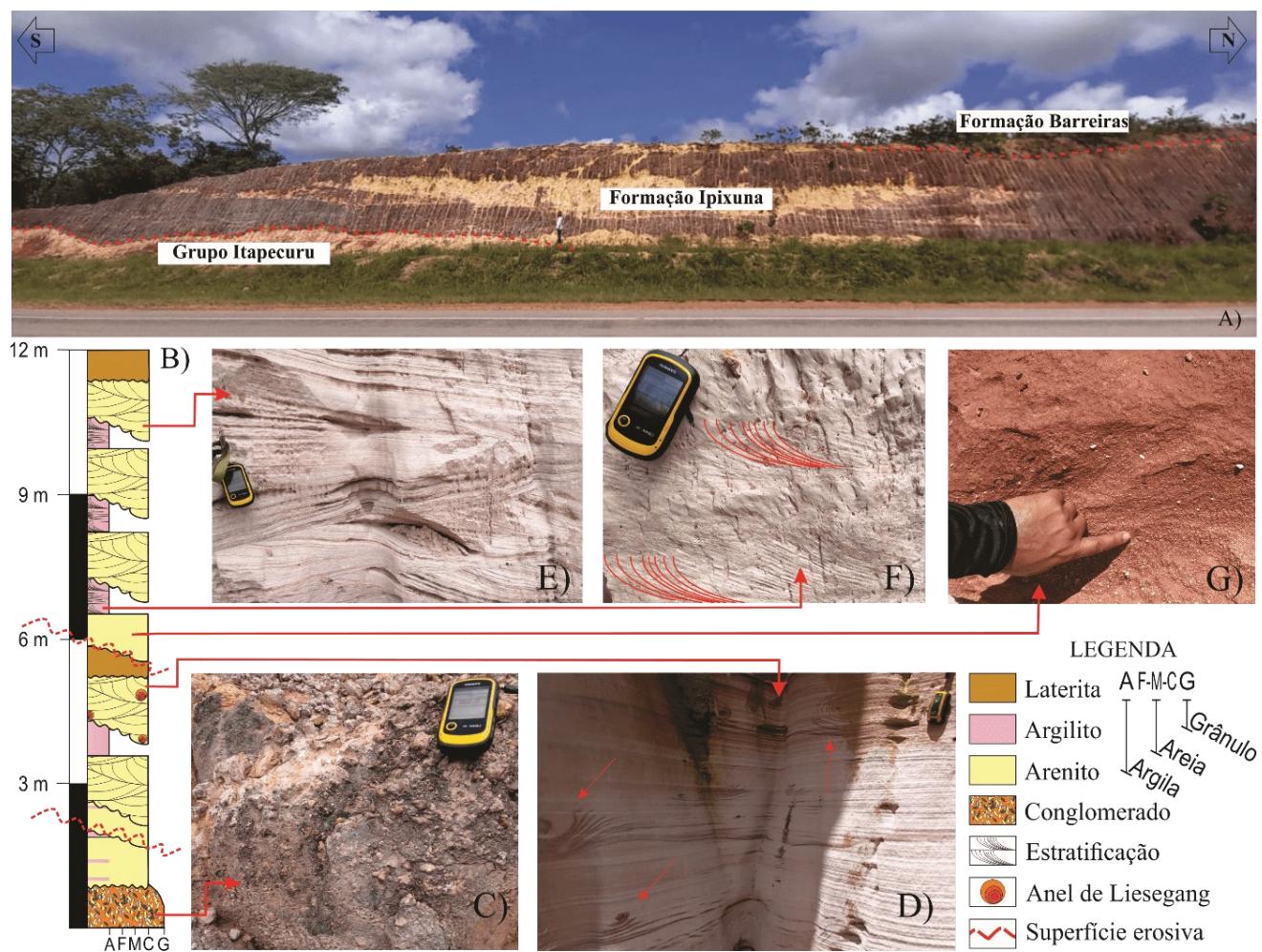


Figura 2 – Configuração geológica da área de estudo. A) Sucessão vertical e relação de contato entre as unidades, definido pelas superfícies erosivas (tracejado); B) Perfil litoestratigráfico simplificado da área de estudo; C) Conglomerado com matriz arenosa e clastos de arenito e argilito; D) Arenito exibindo feições de anéis de Liesegang; E) Arenito estratificado; F) Argilito estratificado; G) Arenito maciço médio a grosso.

Fonte: Autores (2024).

Para a implantação da rodovia BR-010 diversos platôs tiveram que ser totalmente ou parcialmente removidos, e este material foi usado como aterro nos pontos de declividade. Esta tarefa promoveu a remoção de boa parte da cobertura vegetal, que desempenha uma função primordial na proteção do solo contra erosão, reduzindo o impacto das gotas da chuva e oferecendo resistência ao escoamento superficial (SILVA et al., 2020). Houve ainda a alteração do comprimento e inclinação dos taludes, que podem se tornar, após a execução do corte, mais suscetíveis à erosão (RIZZO et al., 2022).

A Amazônia vem experimentando a ocorrência recorrente de episódios climáticos extremos (FERREIRA et al., 2020), sendo os excessos pluviométricos os mais prejudiciais à estabilidade dos taludes. Segundo Lira et al. (2020), o estado do Pará é caracterizado pela alta variabilidade da pluviosidade, em função de diferentes sistemas atmosféricos, possui clima tropical com altos índices pluviométricos e predominantemente quente e úmido. As médias de chuvas anuais estão próximas dos 3.000 mm, concentradas no período de dezembro a maio (SEMAS, 2022).

Os dados meteorológicos da série histórica para os últimos dez anos (2011 a 2020), comprovam os altos índices pluviométricos para a região da pesquisa (Figura 3).

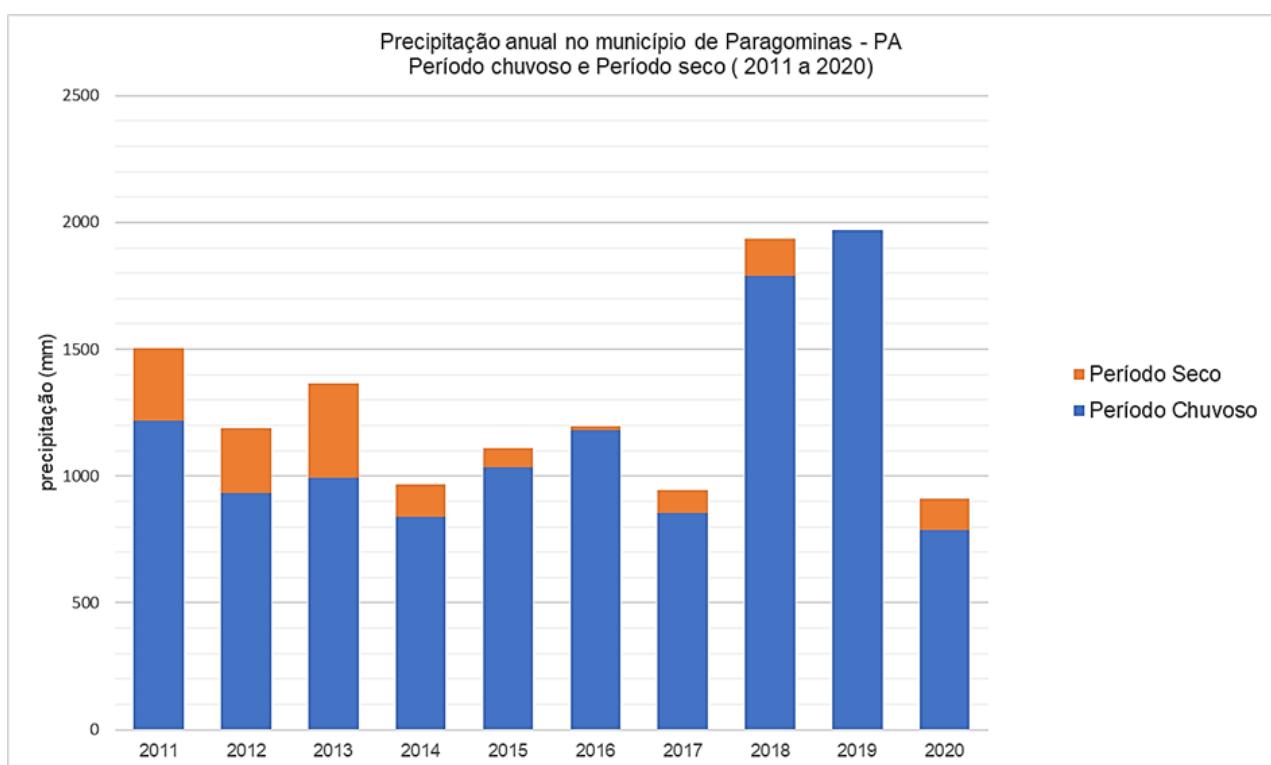


Figura 3 – Série histórica de pluviometria nos municípios de Paragominas e Irixuna do Pará entre 2011 e 2020. Notar a falta de informações do período seco no ano de 2019 pela ausência de dados neste período na estação meteorológica. Fonte: INMET (2011-2020).

O volume de chuva acumulado em um determinado período compromete a competência de escoamento da água. Segundo Fredlund e Xing (1994), o teor de umidade volumétrica na condição saturada e o valor de entrada de ar geralmente aumentam com a plasticidade do solo.

A infiltração no terreno depende do material, por exemplo, em solos arenosos a infiltração é facilitada, enquanto em solos argilosos a água promove a expansão das argilas, que passam a agir como uma camada impermeável (SHENG, 1990; SHI *et al.*, 2002; YILMAZ, 2008). A depender do tipo de solo, da taxa de infiltração e da velocidade do escoamento superficial, a água pode desencadear uma série de processos erosivos e de movimentos gravitacionais de massa (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Os taludes analisados não apresentam proteção vegetal contra a ação do impacto das gotas de chuva, assim favorecem a implantação dos processos erosivos nos períodos chuvosos, erosão hídrica (GUERRA e JORGE, 2012). O impacto das gotas desempenham a função de desagregação das partículas do solo que, nos eventos de chuvas torrenciais, pode significar a perda de um volume significativo de solo (JEMAI *et al.*, 2021).

Os fortes e prolongados períodos chuvosos da Amazônia promovem a saturação dos solos da região. As litologias analisadas em campo são essencialmente sedimentares o que favorecem a infiltração da água. A presença de alguns horizontes argilosos podem conferir algum grau de impermeabilidade, no entanto com o aumento do índice pluviométrico, essa barreira é vencida aumentando a pressão interna das camadas.

Os movimentos gravitacionais de massa em solos são geralmente resultado da infiltração da água da chuva. Esses movimentos ocorrem em função da saturação do solo, acompanhado pelo aumento da pressão neutra e da consequente redução dos valores da sucção, podendo haver, em alguns casos, a elevação do nível freático (CALVELLO *et al.*, 2008). A depender da capacidade de retenção da água do solo, da condutividade hidráulica, do perfil geotécnico do talude e das condições pluviométricas como, duração e intensidade das chuvas, esses movimentos podem ocorrer imediatamente ou logo após o término do evento pluviométrico (SANTOS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019).

A estabilidade de taludes representa um fator relevante na segurança, os riscos de instabilidades em maciços de solos e rochas devem ser pormenorizados ao máximo, pois em caso de deslizamento podem provocar acidentes com graves

consequências (GERSCOVICH *et al.*, 2011). Em determinadas situações, especialmente em construção de rodovias, é inevitável que alguns taludes apresentem fatores de segurança abaixo do desejado (WESLEY, 2011), sendo nestas ocasiões, imperativo adotar o máximo medidas de engenharia de modo a minimizar os riscos.

No Brasil, o fator de segurança (FS) de estabilidade de taludes é baseado em métodos de equilíbrio limite (NBR-11.682/2009), o qual classifica o grau de segurança em: baixo (FS= 1,15); médio (FS= 1,30); alto (FS= 1,50).

Dos seis taludes mapeados (**Figura 1**), dois foram selecionados para realizar o cálculo do ponto crítico de estabilidade (**Tabela 3**). Estes foram selecionados por já apresentarem avançadas feições aparentes de instabilidade.

Tabela 3 – Taludes mapeados na área de estudo selecionados para o cálculo de estabilidade.

TALUDE Nº	CONDIÇÃO
5	Apresenta erosão e movimento gravitacional de massa do tipo escorregamento em cunha
2	Apresenta erosão e movimento gravitacional de massa do tipo escorregamento planar

Fonte: Autores (2024).

As análises de estabilidade dos taludes foram embasadas no método de equilíbrio limite, que resulta encontrar um fator de segurança, alicerçadas nos seguintes parâmetros (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros analíticos para os cálculos dos fatores de segurança.

LITOLOGIA	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	COESÃO EFETIVA (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO (º)
Arenito caulínico	21	15	30
Arenito argiloso	23	18	30
Argilito	20	18	30
Laterita	30	20	30

*Fonte: Adaptado de Vaz *et al.* (2018); Araújo (1992); Futai *et al.* (2012); Braida *et al.* (2007); Morais *et al.* (2020).*

O modelamento matemático aplicado nos taludes nº 2 e nº 5 indicou um FS de 1.489 e 1.441, respectivamente, ou seja, representa um fator de segurança médio conforme estabelece a NBR-11.682/2009 (Figura 4). Entretanto, a adoção da regra é cercada incertezas e divergências, principalmente, quanto as condições do substrato e das propriedades geológicas.

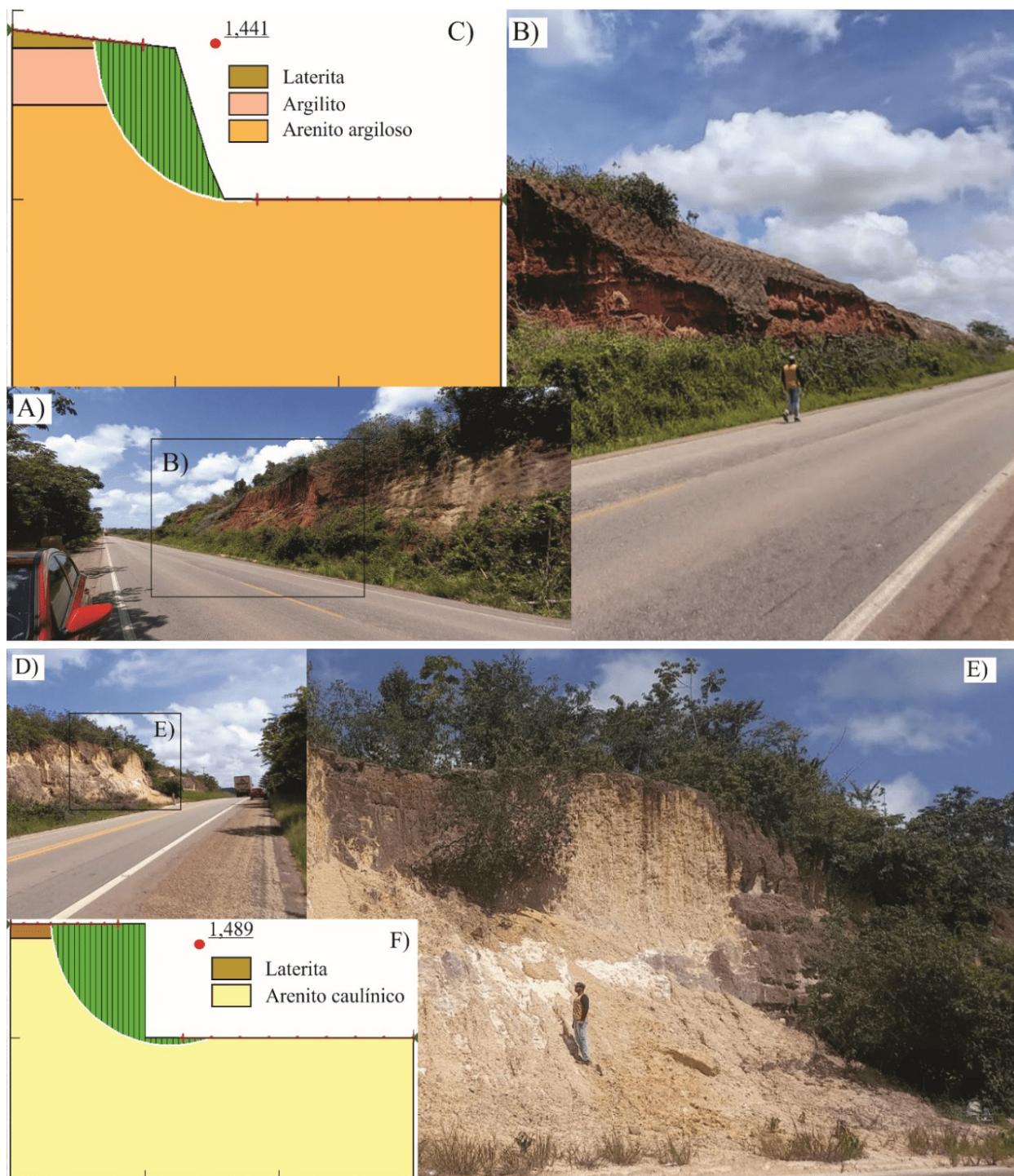


Figura 4 – Deslizamento de taludes na rodovia BR-010. A-B) Visão geral e de detalhe do talude 5, notar que apresenta risco de deslizamento em cunha; C) Modelamento matemático do fator de segurança, $FS= 1,441$; D-E) Visão geral e de detalhe do talude 2, notar que o deslizamento planar atingiu a pista de acostamento; F) Modelamento matemático do fator de segurança, $FS= 1,489$.

Fonte: Autores (2024).

Fatores como mineralogia, saprolito, lixiviação, intemperismo químico e físico, podem atribuir uma condição heterogênea ao solo, especialmente em regiões de clima tropical como na Amazônia, gerando incertezas em estimar as resistências ao cisalhamento e na identificação das prováveis superfícies de deslizamento (EL-RAMLY *et al.*, 2005).

De acordo com a NBR-11.682/2009, o fator de segurança é definido pelo valor da razão entre a tensão cisalhante máxima e a tensão cisalhante atuante na superfície de ruptura (Eq. 1). Porém esse valor pode variar em função da condição do talude e em casos de perigo a vida humana, riscos ambientais e econômicos, ou seja, não é um método objetivo devido estar sujeito a interpretações diversas.

$$F.S = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento disponível}}{\text{Tensões de cisalhamento atuantes}} \quad (\text{Eq.1})$$

Outra opção é atribuir um fator de segurança admissível ($F.S_{adm}$), o qual é obtido em função do tipo de obra e sua vida útil (Eq. 2), e considera as perdas humanas e/ou econômicas em caso de uma eventual ruptura (GERSCOVICH, 2016).

$$F.S = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \begin{cases} > 1 \rightarrow \text{obra estável} \\ = 1 \rightarrow \text{ocorre ruptura} \\ < 1 \rightarrow \text{sem significado físico} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

Mesmo apresentando valores de estabilidade que atendem a normatização dada pela NBR-11.682/2009, esses taludes exibem significativos problemas de movimentos de massa e erosões. Em solos argilosos como o da área de estudo, é fundamental adotar medidas de prevenção para mitigar os efeitos da contração-expansão das argilas, que aliadas com o efeito da pluviometria e a gravidade, levam ao deslizamento dos taludes (JIANG *et al.*, 2013). A presença marcante de caulinita na fração argila nos arenitos da Formação Ipixuna (KOTSCHOUBEY *et al.*, 2005; SANTOS JR.; ROSSETTI, 2002), possivelmente tem influência no padrão da coesão dos taludes analisados.

Os arenitos intercalados com argila com teores elevados de óxido de ferro apresentam predomínio de estrutura maciça, o que favorece os processos de erosões e escorregamentos em cunha como observado no talude 5, e estão intimamente ligados as condições pluviométricas (HUANG *et al.*, 2021). Na área de estudo, esse padrão é mais comum nas rochas da Formação Barreiras, a exceção é quanto as camadas de laterita, seja aluminosa ou ferruginosa, que por apresentar forte coesão e resistência ao intemperismo, contribuem para o aumento da estabilidade dos taludes (COSTA, 1991; MELFI, 1997).

O ajuste das placas da caulinita contribui para o desenvolvimento de estruturas em blocos, de modo a aumentar a coesão das rochas (FERREIRA *et al.*, 1999), sendo mais frequente os processos de erosões e os movimentos de escorregamento planar, conforme observa-se no talude 2.

As análises combinadas dos mapas temáticos (Figura 5) de solo, geologia, uso e ocupação do solo e declividade demonstram a disponibilidade da área de estudo para a instalação dos processos erosivos.

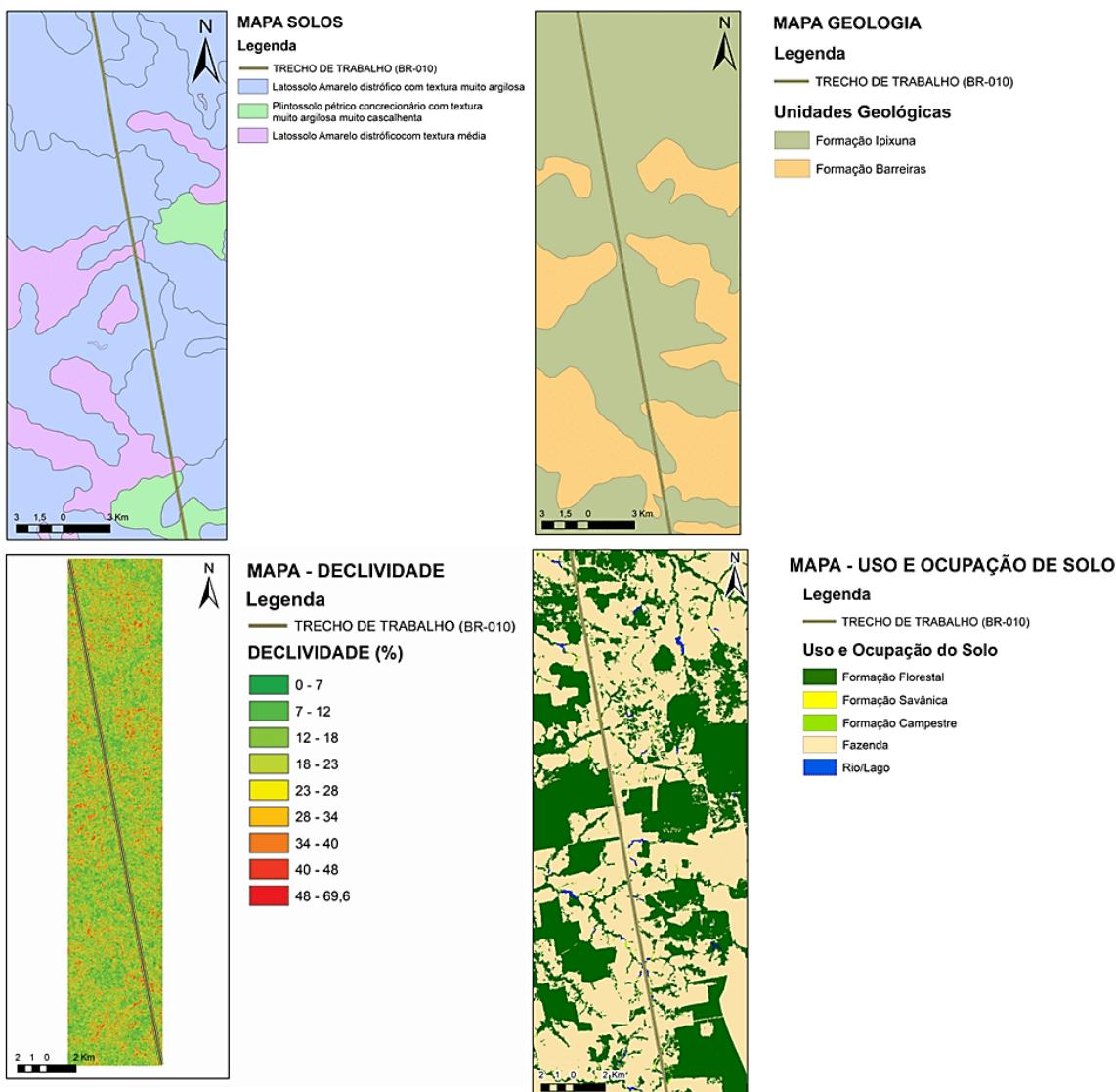


Figura 5 – Mapas temáticos da área de estudo.
Fonte: Autores (2024).

A carta geotécnica de susceptibilidade a erosão exibe zonas de baixo risco (azul), moderado risco (amarelo) e alto risco (vermelho) (Figura 6). O percurso da BR-010 analisado há pontos de risco moderado e pontos de alto risco. A carta de susceptibilidade mostra zonas predominantes, com risco geotécnico moderado, porém, há zonas com alto risco.

Os taludes 1, 2 e 5 foram considerados os mais críticos dentre os seis mapeados, estes são destacados na figura correlacionando as zonas de moderado e alto risco com locais de avançados processos erosivos e movimentos gravitacionais de massa, que são agravados nos períodos chuvosos.

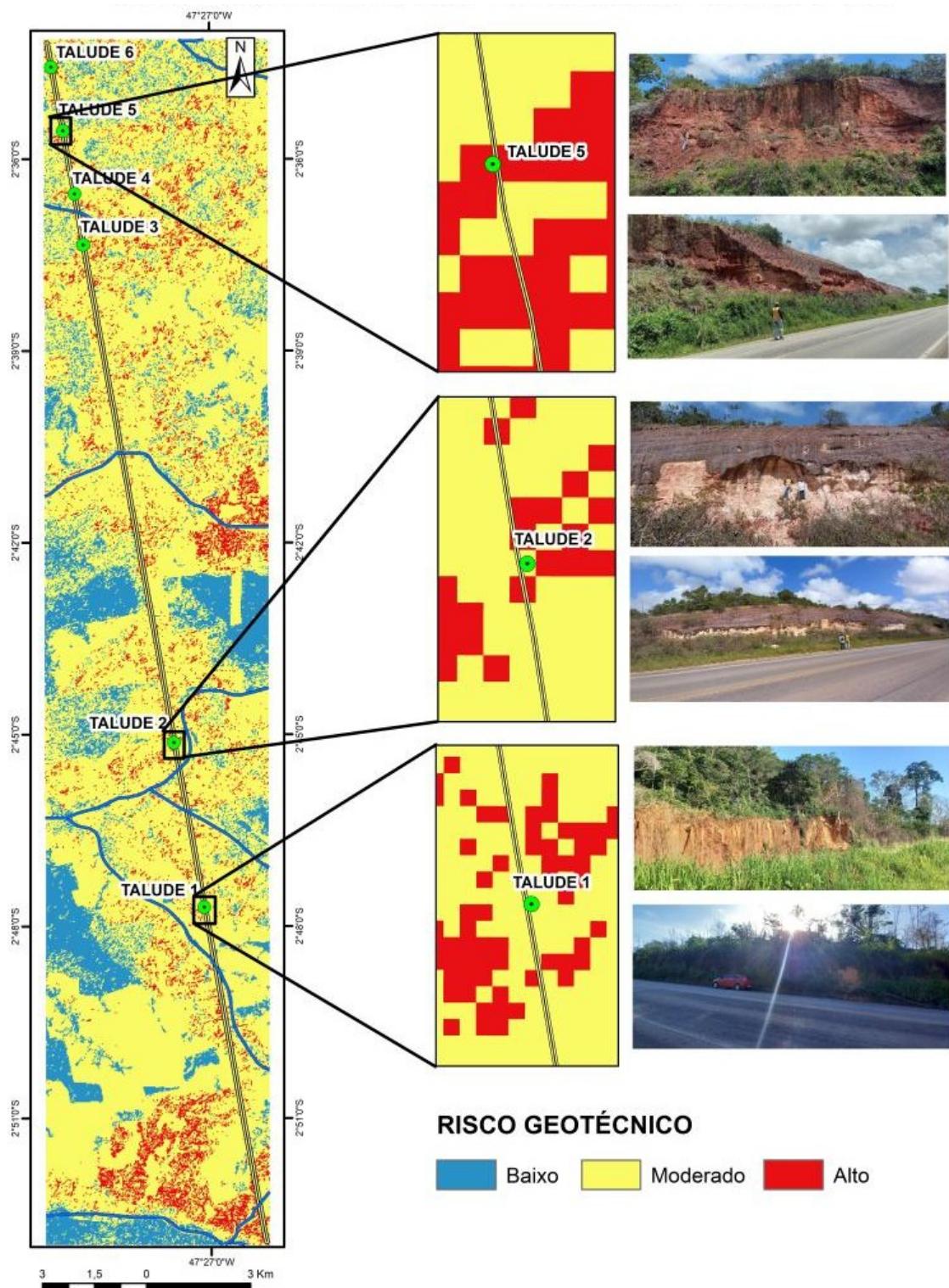


Figura 6 – Carta geotécnica de susceptibilidade a erosão da BR-010 entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará.

Fonte: Autores (2024).

4. Considerações finais

Os resultados mostram que as metodologias aplicadas nesta pesquisa foram eficientes para identificar os fatores de segurança e as zonas de risco a processos erosivos e movimentos de massa em taludes de corte.

Em síntese, os 36 Km da rodovia BR-010 entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará, apresentam problemas estruturais na estabilidade dos taludes. É necessário um planejamento integrado que permita a adoção de medidas mitigadoras, corretivas e/ou preventivas, a fim de permitir a segurança da trafegabilidade da rodovia BR-010, independentemente da estação climática.

A integração dos dados aqui apresentados e discutidos permitem tecer as seguintes considerações:

- Os fatores de segurança obtidos nos taludes nº 5 ($FS = 1,441$) e nº 2 ($FS = 1,489$) indicam moderada situação de estabilidade, de acordo com a NBR 11.682/2009;
- A carta geotécnica de susceptibilidade a erosão indica a presença de zonas críticas a erosão e taludes com elevado estágio de processos erosivos e movimentos gravitacionais de massa;
- Para aumentar o fator de segurança dos taludes sugere-se a implementação de algumas medidas como o escalonamento de taludes, grampeamento de solo e implantação de diferentes tipos de drenagem superficial, além de soluções de bioengenharia (Figura 7).

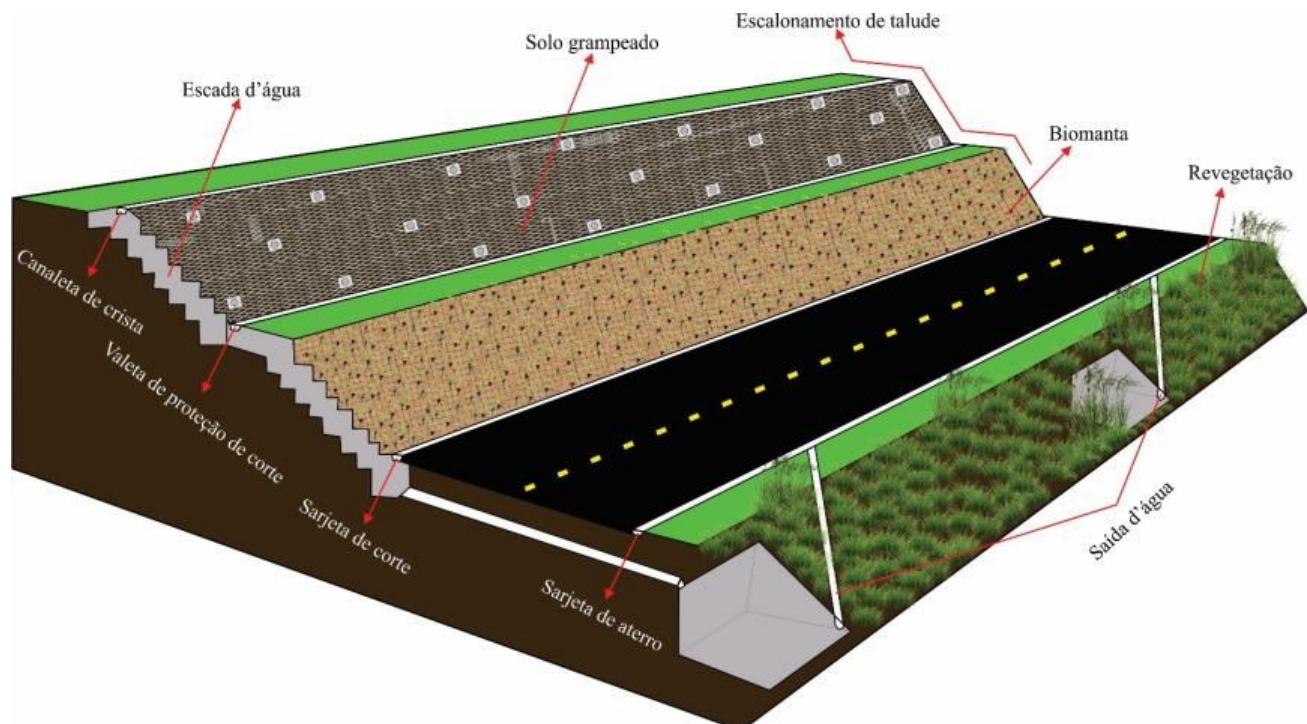


Figura 7 – Seção esquemática com algumas possíveis soluções a serem adotadas para aumentar o fator de segurança e diminuir a susceptibilidade a erosão dos taludes ao longo da rodovia BR-010 entre os municípios de Paragominas e Ipixuna do Pará.

Fonte: Autores (2024).

Referências

- ANAISSÉ JR., J.; TRUCKENBRODT, W.; ROSSETTI D. F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açaílândia/MA, Bacia do Grajaú. In: Rossetti, D. F.; Góes, A. M.; Truckenbrodt, W. (Eds.). O Cretáceo na Bacia de São Luis – Grajaú. **Museu Paraense Emílio Goeldi**. Belém, p. 119-150. 2001.
- ANDRADE, R. P. Vencidas a distância e floresta!: A Transbrasiliana e a Amazônia desenvolvimentista. **Tempo**, n. 2, v. 25, p. 363-381, 2019. DOI: 10.1590/tem-1980-542x2019v250204.

- ANTERO, R. Controvérsias sobre a rodovia Belém-Brasília no Tocantins. **Revista Tocantinense de Geografia**, n. 11, v. 6, p. 99-113, 2017. DOI: 10.20873/rtg.v6n11p99-113.
- ARAÚJO, A. G. M. As Propriedades físicas dos arenitos silicificados e suas implicações na aptidão ao lascamento. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, n. 2, v. 2, p. 63-74, 1992. DOI: 10.11606/issn.2448-1750.revmae.1992.108993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 11.689**. Rio de Janeiro, 2009. 39p.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, n. 6, v. 37, p. 1646-1653, 2007. DOI: 10.1590/S0103-84782007000600022.
- CALVELLO, M.; CASCINI, L.; SORBINO, G. A numerical procedure for predicting rainfall-induced movements of active landslides along pre-existing slip surfaces. **Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.**, n. 32, v. 4, p. 327-351, 2008. DOI:10.1002/nag.624.
- COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM. **GeoSGB**. 2021. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/>>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 21, v. 2, p. 146-160. 1991. DOI: 10.25249/0375-7536.1991146160.
- CUNHA, J. A. O.; SOUSA, D. C.; CÓRDOBA, V. C. Evolução estratigráfica dos depósitos cretáceos da porção norte da Bacia de São Luís-Grajaú (NE do Brasil). **Geologia USP - Serie Científica**, n. 19, v. 2, p. 151-170, 2019. DOI:10.11606/issn.2316-9095.v19-152654.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES-DNIT. **Manual de Custos Médios Gerenciais**. Brasília, DF, v. 1. 2019. 83p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES-DNIT. **Terminologias Rodoviárias Usualmente Utilizadas**. Brasilia, DF, 2007. 17p.
- EARTH DATA – NASA. **Modelo Digital de Elevação (MDE)**. Disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/>>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- EL-RAMLY, H.; MORGESTERN, N. R.; CRUDEN, D. M. Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. **Géotechnique**, n. 55, v. 1, p. 77-84, 2005. DOI:10.1680/geot.55.1.77.58590.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5^a ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-depublicacoes-/publicacao/1107206/sistemabrasileiro-de-classificacao-de-solos>>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- FERNANDES, F. M.; CERRI, L. E. S. Elaboração da carta geotécnica de suscetibilidade de um trecho da rodovia Marechal Rondon, SP-300 (SP, Brasil). **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 457-465, 2011.
- FERREIRA, D. B. S.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, J. V. Identificação de Extremos de Precipitação em Municípios do Estado do Pará e sua Relação com os Modos Climáticos Atuantes nos Oceanos Pacífico e Atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 197-222, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v27i0.64630.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 23, v. 3, p. 507-514, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000300003.
- FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 521-532, 1994. DOI: 10.1139/T07-117.

- FUTAI, M. M.; CECÍLIO, M. O.; ABRAMENTO, M. Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade de Solos Residuais da Região Metropolitana de São Paulo. **Anais... solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba.** p. 153-184, 2012.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** 2^a ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2016. 192p.
- GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JR., E. A.; CAMPOS, T. M. P. Back Analysis of a Landslide in a Residual Soil Slope in Rio de Janeiro, Brazil. **Soils and Rocks**, n. 2, v. 34, p. 139-149, 2011. DOI: 10.28927/SR.342139.
- GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F.; NOGUEIRA, A. C. R.; TOLEDO, P. M. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)**, n. 2, p. 3-15, 1990.
- GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Geomorfologia do cotidiano - a degradação dos solos. **Revista Geonorte**, Edição Especial, n. 7, v. 3, p. 116-135, 2012.
- HUANG, K.; RUI-LU, L.; QIN, L.; SONG, T.; ZHONG-XIAN, L.; LI, R. Effects of slope length on soil erosion of Karst slope under different rainfall conditions. **The journal of applied ecology**, n. 32, v. 1, p. 271-280. 2021. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202101.020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Geociências**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Estação: Paragominas (A212)**. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- JEMAI, S.; KALLEL, A.; AGOUBI, B.; HABIB, A. Soil Erosion Estimation in Arid Area by USLE Model Applying GIS and RS: Case of Oued El Hamma Catchment, South-Eastern Tunisia. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, n. 49, p. 1293-1305, 2021. DOI: 10.1007/s12524-021-01320-x.
- JIANG, H.; WANG, B.; INYANG, H. I.; LIU, J.; GU, K.; SHI, B. Role of expansive soil and topography on slope failure and its countermeasures, Yun County, China. **Engineering Geology**, n. 152, v. 1, p. 155-161, 2013. DOI:10.1016/j.enggeo.2012.10.020.
- KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W.; CALAF, J. M. C. Evolução Geológica da porção Meridional da Província Bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará e extremo Oeste do Maranhão). **Revista Brasileira de Geociências**, n. 35, v. 2, p. 263-272, 2005.
- LI, D.; ZHANG, L.; ZHOU1, C.; LUL, W. Risk-based stabilization planning for soil cut slopes. **Natural Hazards Earth System Sciences**, n. 4, v. 9, p. 1365-1379, 2009. DOI:10.5194/nhess-9-1365-2009.
- LIRA, B. R. P.; CRISPIM, D. L.; FERREIRA FILHO, D. F.; FERNANDES, L. L.; PESSOA, F. C. L. Agrupamento de precipitação no Estado do Pará, Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, e19. 2020. DOI:10.21168/rega.v17e19.
- LISLE, R. J.; BRABHAM, P. J.; BARNES, J. W. **Mapeamento Geológico Básico**. 5^a ed. Porto Alegre, Bookman, 2014. 231p.
- MELFI, A. J. **Lateritas e processos de laterização**. Publicação 093/94. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, São Paulo, 1997.
- MORAIS, A. D.; SANTOS JR., O. G.; FREITAS NETO, O. Propriedades geotécnicas de sedimentos da Formação Barreiras nas falésias de Barra de Tabatinga litoral oriental do Rio Grande do Norte/Brasil. **Holos**, n. 36, v. 7, p. 1-20, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.9560.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. **Géotechnique**, n. 15, v. 1, p. 79-93, 1965. DOI:10.1680/geot.1965.15.1.79.

- MOURA, A. C. M. Reflexões Metodológicas como Subsídio de Estudos Ambientais Baseados em Análise de Multicritérios. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Folianópolis. INPE, p. 2899-2906, 2007.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil Characterization of Mapping Units for Highway: Purposes in Tropical Areas. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, n. 19, v. 1, p. 196-199, 1979. DOI: 10.1007/BF02600475.
- OLIVEIRA NETO, T.; NOGUEIRA, R. J. B.; RAFAEL, C. E. S. S.; YANO, Y. S. Comércio em fronteira: os circuitos da economia urbana em Guajará-Mirim (Estado de Rondônia, Brasil) e Guayaramerín (Departamento de Beni, Bolívia). **Revista Geográfica de América Central**, n. 1, v. 66, p. 293-316, 2021. DOI: 10.15359/rgac.66-1.10.
- OLIVEIRA, L. A.; GONÇALVES, R. M.; MARTINS, F. P. Contraste de condutividade hidráulica em Solos de texturas Arenosa e Argilosa encontrados nos tributários da margem esquerda do rio Tijuco, Município de Ituiutaba, Estado de Minas Gerais, Brasil. **Caminhos de Geografia**, n. 33, v. 11, p. 230-243, 2010. DOI: 10.14393/RCG113316139.
- OLIVEIRA, V. P. V. Indicadores biofísicos de desertificação, Cabo Verde/África. **Mercator**. Fortaleza, n. 22, v. 10, p. 147-168, 2011. DOI:10.4215/RM2011.1022.0010.
- PACHÊCO, N. A.; SANTIAGO, A. V.; CASTRO, A. R. C. **Boletim agrometeorológico de 2017 para Belém**, PA. Embrapa Amazônia Oriental, 2023. 37p.
- PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O Processo de Planejamento e Desenvolvimento do Transporte Rodoviário no Brasil. **Caminhos de Geografia**, n. 40, v. 12, p. 26-45, 2011. DOI: 10.14393/RCG124016414.
- PFAFF, A.; BARBIERI, A.; LUDEWIGS, T. MERRY, F.; PERZ, S.; REIS, E. Road Impacts in Brazilian Amazonia. **Geophysical Monograph Series**, n. 186, p. 101-116, 2009. DOI:10.1029/2008GM000737.
- PROJETO MAP BIOMAS. **Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura do Solo do Brasil**. 2022. Disponível em <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- RIZZO, F. A.; SILVA, D. C. C.; TONELLO, P. S. Análise da vulnerabilidade dos solos quanto à erosão hídrica na bacia do Córrego Pequiá, Açaílândia, Maranhão. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 43, e192740. 2022. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.192740.
- SANTOS JR., A. E.; ROSSETTI, D. F. Influência estuarina na Formação Ipixuna, porção média do rio Capim, Sub-bacia de Cametá. **Boletim do IV SCB**, p. 1-5, 2002.
- SANTOS JR., A. E.; ROSSETTI, D. F. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, leste da Sub-bacia de Cametá. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 3, v. 33, p. 313-324, 2003. DOI:10.25249/0375-7536.2003333313324.
- SANTOS, D. L.; FRAGOSO JR., C. R.; SOUZA, V. C. B. Limiar de precipitação com potencial de gerar deslizamentos nos complexos de risco em uma zona urbana. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, e12, 2019. DOI:10.21168/rega.v16e12.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE – SEMAS. **Anuário Climatológico do Estado do Pará Ano 2021**. Belém/PA, 2022. 24p.
- SHENG, T. C. **Watershed management field manual: watershed survey and planning**. FAO Conservation Guide 13/6. Rome, 1990. 148p.
- SHI, B.; JIANG, H.; LIU, Z.; FANG, H. Y. Engineering geological characteristics of expansive soils in China. **Engineering Geology**, n. 37, v. 1-2, p. 63-71, 2002. DOI:10.1016/S0013-7952(02)00145-X.
- SILVA, E. F.; BENTO, D. F.; MENDES, A. C.; MOTA, F. G.; MOTA, L. C. S.; FONSECA, A. I. T.; ALMEIDA, R. M.; SANTOS, L. O. Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. **Environment Development and Sustainability**, n. 22, v. 2, p. 47-60, 2020. DOI:10.1007/s10668-018-0183-2.

-
- SILVA, F. A. A.; BARBOSA, B. G. S.; DUARTE, C. C. Análise da interação entre os eventos pluviométricos e ações antrópicas como agentes deflagradores de deslizamentos na Zona Norte do Recife. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 5, p. 01–11, 2019. DOI: 10.21680/2447-3359.2019v5n0ID17964.
- SUTEJO, Y.; GOFAR, N. Effect of Area Development on the Stability of Cut Slopes. **Procedia Engineering**, n. 125, p. 331-337, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.071.
- TRAN, T. V.; PHAM, H. D.; HOANG, V. H.; TRINH, M. T. Assessment of the influence of the type of soil and rainfall on the stability of unsaturated cut-slopes – a case study. **International Journal of GEOMATE**, n. 20, v. 77, p. 141-148, 2020. DOI:10.21660/2020.77.66560.
- TRAN, T. V.; TRINH, M. T.; LEE, G.; OH, S.; NGUYEN, T. H. V. Effect of Extreme Rainfall on Cut Slope Stability: Case Study in Yen Bai City, Viet Nam. **Journal of the Korean Geo-Environmental Society**, n. 4, v. 16, p. 23-32, 2015. DOI: 10.14481/jkges.2015.16.4.23.
- TUCKER, M. E. Rochas **Sedimentares: guia geológico de campo**. 4^a ed. Porto Alegre. Bookman, 2014. 324p.
- VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L.T. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará**. Belém, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2008. 328p.
- VAZ, A. P. M. S.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T. Métodos de obtenção de valores de ângulo de atrito e coesão: Comparação entre o ensaio de cisalhamento direto e cálculo baseado no SPT. **Boletim paranaense de geociências**, n. 74, v. 1, p. 1-10, 2018. DOI: 10.5380/geo.v74i1.38906.
- WESLEY, L. Stability of slopes in residual soils. **Obras y Proyectos**, n. 10, p. 47-61, 2011.
- YILMAZ, I. A case study for mapping of spatial distribution of free surface heave in alluvial soils (Yalova, Turkey) by using GIS software. **Computers & Geosciences**, n. 34, v. 8, p. 993-1004, 2008. DOI:10.1016/j.cageo.2007.06.008.
- ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 192p.