

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

KENYA CORREA DE SOUZA

EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DAS FALÉSIAS FLUVIAIS DA MARGEM DIREITA  
DO RIO NEGRO – IRANDUBA, AM

Manaus - AM

2024

KENYA CORREA DE SOUZA

EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DAS FALÉSIAS FLUVIAIS DA MARGEM DIREITA  
DO RIO NEGRO – IRANDUBA, AM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Domínio da Natureza na Amazônia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

Manaus - AM

2024

KENYA CORREA DE SOUZA

EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DAS FALÉSIAS FLUVIAIS DA MARGEM DIREITA  
DO RIO NEGRO – IRANDUBA, AM

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

---

Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho ´

---

Prof. Dr. Rubson Pinheiro Maia

Manaus – AM

2024

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729e Souza, Kenya Correa de  
Evolução morfológica das falésias fluviais da margem direita do  
rio Negro - Iranduba, AM / Kenya Correa de Souza . 2024  
110 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira  
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do  
Amazonas.

1. Falésia fluvial. 2. Amazônia. 3. Movimento de Massa. 4. Rio  
Negro. I. Vieira, Antonio Fábio Sabbá Guimarães. II. Universidade  
Federal do Amazonas III. Título



Por VOCÊ, para VOCÊ, Vovó Laura Chaves Correa (*In memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

À medida que concluiu esta dissertação, percebo o quão significativo foi o apoio que recebi ao longo deste percurso acadêmico. Gostaria de expressar meus agradecimentos às pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho:

Agradeço aos meus pais, Antônio e Valcileia, por serem os pilares da minha vida e por terem dedicado incansavelmente seu tempo e esforços para garantir minha educação e crescimento. As minhas irmãs (Valéria, Karol, Verônica) e irmão (Marcos) que me incentivaram nessa jornada.

Ao meu noivo, companheiro e parceiro de vida, Vinicius Cavalcante de Souza, que ao longo de todo o percurso me incentivou e apoiou o tempo todo, principalmente nos campos e análises em laboratório, mesmo não sendo da área de geografia (kkk). Muito obrigada, meu bem.

Aos meus “sogrinhos”, Valcimara e José, pelo apoio e incentivo, especialmente durante nossas longas conversas nos almoços de domingo. E ao meu cunhado Marcus. Vocês foram essenciais, obrigada por todo apoio.

Ao meu orientador, Antônio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, por aceitar me orientar nessa jornada e por seus inúmeros conselhos e discussões acadêmicas.

Ressalto uma pessoa de suma importância, sem a qual não haveria objeto de estudo. Agradeço imensamente ao meu ex-orientador, José Alberto Lima de Carvalho.

Aos amigos que a UFAM me presenteou e que sempre demonstraram apoio: Gabriel, Kelyan, Luciomar, Carla, Fernando.

Gostaria de destacar um trio de amigos que me acompanhou por toda essa jornada, desde o pré-projeto até a versão final desta dissertação: Gabriela Mendonça, obrigada por me incentivar a entrar no mestrado, por me auxiliar na escrita do pré-projeto e por ser minha confidente e ombro amigo nas horas difíceis. André Alves, obrigada pelo primeiro modelo de mapa de localização e pela grande ajuda com o mapa de análise multitemporal. Você é muito bom nisso. E Matheus Silveira, que escutou meus longos áudios, ajudou na escrita e na correção (corrigir

até demais) e sempre disse que daria certo, e deu. Muito obrigada mesmo, sem  
você não seria possível.

Aos professores da banca de qualificação e defesa: Rogério Marinho e  
Rubson Pinheiro.

Ao programa de Pós-Graduação em Geografia da UFAM por todo apoio  
nessa jornada. E a CAPES pelo incentivo a pesquisa.

## RESUMO

Este estudo investiga a morfometria e evolução das falésias fluviais ao longo da margem direita do baixo curso do Rio Negro, no Amazonas. As falésias fluviais são descritas como formações íngremes que se desenvolvem ao longo das margens dos grandes rios na região amazônica. O objetivo principal foi analisar a morfologia e evolução das falésias, com foco em suas características físicas e processos de alteração. Tendo como objetivos específicos: caracterizar a morfologia das falésias, descrever os principais processos, mecanismos e feições de alteração física, e mensurar a evolução das falésias ao longo do tempo. A pesquisa foi conduzida em cinco pontos distintos ao longo da margem direita do Rio Negro, onde foram realizadas observações de campo detalhadas e análises morfológicas das falésias. Utilizou-se mapeamento, análise de sedimentos e monitoramento das condições hidrológicas para obter dados sobre a morfometria e os processos de alteração das falésias. As falésias apresentam diversas características morfológicas que variam ao longo da margem direita do Rio Negro. Observou-se a formação de dutos (resultante de ação biológica) e sulcos nas paredes, resultantes do escoamento superficial de água durante períodos de chuva. Algumas falésias exibem escarpas expostas com vegetação escassa e diferentes estágios de laterização, enquanto outras possuem blocos colapsados na base devido à erosão hídrica. Os principais processos erosivos que impactam as falésias incluem a erosão fluvial, solapamento da base e movimentos de massa. A ação fluvial do Rio Negro, especialmente durante períodos de cheia, exerce pressão significativa na base das falésias, causando solapamento e remoção de material. A ação pluvial, por meio da infiltração de água da chuva, contribui para a saturação do solo e ocorrência de deslizamentos. A evolução das falésias ao longo do tempo é influenciada por fatores como a composição do material, a ação fluvial e pluvial, e a dinâmica dos movimentos de massa. A presença de solos argilosos, arenosos e crostas lateríticas varia entre os pontos estudados, influenciando a resistência das falésias à erosão. As evidências de solapamento durante eventos de cheias e vazantes do Rio Negro indicam a contínua alteração e instabilidade dessas formações. Este estudo destaca a importância de entender a morfometria e os processos erosivos das falésias fluviais na margem direita do baixo curso do Rio Negro. As variações morfológicas e a composição do material influenciam significativamente a resistência das falésias à erosão, contribuindo para seu retrocesso (perda de sedimentos). A compreensão detalhada da morfometria e evolução das falésias fluviais contribui para o conhecimento geocientífico da região amazônica e fornece informações para o planejamento e mitigação de riscos ambientais associados a processos erosivos e deslizamentos.

**Palavra-chave:** Falésia fluvial. Amazônia. Movimento de massa. Rio Negro.

## ABSTRACT

This study investigates the morphometry and evolution of river cliffs along the right bank of the lower course of the Rio Negro, in Amazonas. River cliffs are described as steep formations that develop along the banks of large rivers in the Amazon region. The main objective was to analyze the morphology and evolution of the cliffs, focusing on their physical characteristics and alteration processes. The specific objectives were to characterize the morphology of the cliffs, describe the main processes, mechanisms and features of physical alteration, and measure the evolution of the cliffs over time. The research was conducted at five different points along the right bank of the Rio Negro, where detailed field observations and morphological analysis of the cliffs were carried out. Mapping, sediment analysis and monitoring of hydrological conditions were used to obtain data on the morphometry and alteration processes of the cliffs. The cliffs have various morphological characteristics that vary along the right bank of the Rio Negro. The formation of ducts (resulting from biological action) and grooves in the walls, resulting from surface water runoff during periods of rain, were observed. Some cliffs show exposed escarpments with sparse vegetation and different stages of laterization, while others have collapsed blocks at the base due to water erosion. The main erosive processes impacting the cliffs include fluvial erosion, undermining of the base and mass movements. The fluvial action of the Rio Negro, especially during periods of flooding, exerts significant pressure on the base of the cliffs, causing undermining and removal of material. Rainwater infiltration contributes to soil saturation and the occurrence of landslides. The evolution of cliffs over time is influenced by factors such as the composition of the material, fluvial and pluvial action, and the dynamics of mass movements. The presence of clayey and sandy soils and laterite crusts varies between the sites studied, influencing the cliffs' resistance to erosion. Evidence of undermining during the Rio Negro's flood and ebb events indicates the continuous alteration and instability of these formations. This study highlights the importance of understanding the morphometry and erosion processes of the fluvial cliffs on the right bank of the lower course of the Rio Negro. Morphological variations and the composition of the material significantly influence the cliffs' resistance to erosion, contributing to their retreat (loss of sediment). A detailed understanding of the morphometry and evolution of river cliffs contributes to geoscientific knowledge of the Amazon region and provides information for planning and mitigating environmental risks associated with erosion and landslides.

**Keyword:** River cliff. Amazonia. Landslide. Black river.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 — Classificação das falésias costeiras em ativas, inativas e paleofalésias                                                                                                                                            | 19 |
| Figura 2 — Processo de erosão fluvial (solapamento) formando cavidades na parede da falésia 1 .....                                                                                                                            | 25 |
| Figura 3 — Principais tipos de movimentos de massa em falésias .....                                                                                                                                                           | 26 |
| Figura 4 — Processos subaéreos (fluxo superficiais verticais) e sulcos. ....                                                                                                                                                   | 28 |
| Figura 5 — Falésia fluvial à margem direita do rio Negro .....                                                                                                                                                                 | 33 |
| Figura 6 — Mapa de localização da área em estudo .....                                                                                                                                                                         | 34 |
| Figura 7 — Geologia do município de Iranduba e área adjacentes .....                                                                                                                                                           | 36 |
| Figura 8 — Presença de crostas lateríticas na Falésia 4.....                                                                                                                                                                   | 38 |
| Figura 9 — Geomorfologia do município de Iranduba e áreas adjacentes .....                                                                                                                                                     | 40 |
| Figura 10 — Vegetação do Município de Iranduba e áreas adjacentes.....                                                                                                                                                         | 42 |
| Figura 11 — Classificação dos solos no município de Iranduba e áreas adjacentes                                                                                                                                                | 43 |
| Figura 12 — Precipitação e Temperatura média da estação de Manaus .....                                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 13 — Hidrografia do município de Iranduba e áreas adjacentes .....                                                                                                                                                      | 47 |
| Figura 14 — Procedimentos metodológicos.....                                                                                                                                                                                   | 48 |
| Figura 15 — Registro do sobrevoo do VANT na falésia fluvial em estudo .....                                                                                                                                                    | 50 |
| Figura 16 — Registro do sobrevoo do VANT na falésia fluvial em estudo .....                                                                                                                                                    | 50 |
| Figura 17 — Processamento dos dados MDE.....                                                                                                                                                                                   | 51 |
| Figura 19 — Registo da falésia 1 com ocorrência de movimentos de massa e sulcos. ....                                                                                                                                          | 53 |
| Figura 20 — Teste de infiltração na falésia 5 .....                                                                                                                                                                            | 54 |
| Figura 21 — Ficha utilizada para o teste de infiltração .....                                                                                                                                                                  | 55 |
| Figura 22 — Ficha de teste de penetração .....                                                                                                                                                                                 | 56 |
| Figura 23 — Amostras coletadas na falésia 1 .....                                                                                                                                                                              | 57 |
| Figura 24 — Procedimentos da análise granulométrica (A. amostra em processo de decantação; B. amostra no agitador magnético; C. amostra sendo lavada com água destilada; D.Amostra de finos decantando para a pipetagem). .... | 58 |
| Figura 25 — Triângulo de Classes texturais do Solo.....                                                                                                                                                                        | 59 |
| Figura 26 — Falésia 1 processada no Agisoft Metashape .....                                                                                                                                                                    | 60 |
| Tabela 1 — Fluxo de trabalho do Agisoft Metashape .....                                                                                                                                                                        | 60 |
| Figura 27 — Fluxo de trabalho da Falésia 1. A. Alinhamento de fotos; B. Construção de nuvem densa; C. Modelo 3D; D. Modelo de Mosaico .....                                                                                    | 61 |
| Figura 28 — Plataforma Planet Explores .....                                                                                                                                                                                   | 62 |
| Figura 29 — Processamento das imagens no Qgis .....                                                                                                                                                                            | 63 |
| Figura 30 — Perfil Digital de Elevação e Perfil topográfico na área das Falésias (contorno rosa).....                                                                                                                          | 66 |
| Figura 32 — Estruturas da Tectônica na área em estudo .....                                                                                                                                                                    | 67 |
| Figura 33 — Perfil batimétrico 1.....                                                                                                                                                                                          | 69 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 — Perfil batimétrico 2 .....                                                                                                                                                                                                               | 70 |
| Figura 35 — Perfil batimétrico 3 .....                                                                                                                                                                                                               | 71 |
| Figura 36 — Falésia 01 no período da vazante .....                                                                                                                                                                                                   | 72 |
| Figura 37 — Perfil Falésia 01 .....                                                                                                                                                                                                                  | 73 |
| Figura 38 — Laterização próximo à margem da Falésia 01 .....                                                                                                                                                                                         | 73 |
| Figura 39 — Falésia 02 no período da vazante .....                                                                                                                                                                                                   | 74 |
| Figura 40 — Perfil da Falésia 02 .....                                                                                                                                                                                                               | 75 |
| Figura 41 — Falésia 03 no período da vazante .....                                                                                                                                                                                                   | 76 |
| Figura 42 — Perfil da Falésia 03 .....                                                                                                                                                                                                               | 77 |
| Figura 43 — Crostas lateríticas próximo a margem .....                                                                                                                                                                                               | 77 |
| Figura 44 — Falésia 04 no período da vazante .....                                                                                                                                                                                                   | 78 |
| Figura 45 — Perfil da Falésia 04 .....                                                                                                                                                                                                               | 79 |
| Figura 46 — Falésia 05 no período da vazante .....                                                                                                                                                                                                   | 79 |
| Figura 47 — Perfil da Falésia 05 .....                                                                                                                                                                                                               | 80 |
| Figura 48 — Processos erosivos Falésia 1. Material retido; 2. Movimento de massa;<br>3. Erosão por solapamento. ....                                                                                                                                 | 81 |
| Figura 49 — Processos erosivos falésia 2. A e B. Materiais retidos. ....                                                                                                                                                                             | 82 |
| Figura 50 — Feições resultantes dos processos erosivos. A. Movimento de massa e<br>material retido na base da falésia; B. Movimento de massa e dutos. ....                                                                                           | 83 |
| Figura 51 -Feições resultantes dos processos erosivos da falésia 4. A. crosta laterítica;<br>B. Lado A com ausência de vegetação; C. Lado B com presença de crostas lateríticas;<br>D. Falésia 4 com crostas lateríticas e movimentos de massa. .... | 84 |
| Figura 52 — Feições resultantes dos processos erosivos da falésia 5. Setas<br>vermelhas. Erosão por solapamento; Setas amarelas. Sulcos. ....                                                                                                        | 85 |
| Figura 53 — Análise granulométrica do perfil 1, falésia 1. ....                                                                                                                                                                                      | 87 |
| Figura 54 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do<br>solo. do perfil 1, falésia 1. ....                                                                                                                               | 88 |
| Figura 55 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 1, falésia 1. ....                                                                                                                                                                    | 89 |
| Figura 56 — Análise granulométrica do perfil 2, falésia 2. ....                                                                                                                                                                                      | 90 |
| Figura 57 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do<br>solo. do perfil 2, falésia 2. ....                                                                                                                               | 91 |
| Figura 58 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 2, falésia 2. ....                                                                                                                                                                    | 91 |
| Figura 59 — Análise granulométrica do perfil 3, falésia 3. ....                                                                                                                                                                                      | 92 |
| Figura 60 — Perfil 3, textura do solo falésia 3. ....                                                                                                                                                                                                | 93 |
| Figura 61 — Análise granulométrica do perfil 4, falésia 4. ....                                                                                                                                                                                      | 94 |
| Figura 62 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do solo.<br>do perfil 4, falésia 4. ....                                                                                                                               | 94 |
| Figura 63 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 4, falésia 4. ....                                                                                                                                                                    | 95 |
| Figura 64 — Análise granulométrica do perfil 3, falésia 3. ....                                                                                                                                                                                      | 96 |
| Figura 65 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do<br>solo. do perfil 5, falésia 5. ....                                                                                                                               | 97 |
| Figura 66 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 5, falésia 5. ....                                                                                                                                                                    | 98 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| Figura 67 — Modelo em 3D Falésia 1 .....    | 99  |
| Figura 68 — Modelo em 3D Falésia 2 .....    | 99  |
| Figura 69 — Modelo em 3D Falésia 3 .....    | 100 |
| Figura 70 — Modelo em 3D da Falésia 5 ..... | 101 |



## LISTA DE QUADROS

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Quadro1- Alguns autores que definiram falésias.....          | 16 |
| Quadro 2 — Definições dos tipos de movimentos de massa ..... | 17 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 — Fluxo de trabalho do Agisoft Metashape..... | 51 |
|--------------------------------------------------------|----|

## SUMÁRIO

|     |                                                                                                                |                                  |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1   | INTRODUÇÃO .....                                                                                               | 15                               |
| 2   | PRESSUPOSTO TEÓRICO-CONCEITUAL SOBRE FALÉSIAS.....                                                             | 18                               |
| 2.1 | Morfologia, Litologia e Tectônica.....                                                                         | 20                               |
| 2.2 | Clima e Evolução das falésias.....                                                                             | 22                               |
| 2.3 | Processos erosivos fluviais e subaéreos .....                                                                  | 24                               |
| 2.4 | Tectônica regional e Rio Negro .....                                                                           | 29                               |
| 3   | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....                                                                         | 34                               |
| 3.1 | Geologia.....                                                                                                  | 35                               |
| 3.2 | Geomorfologia.....                                                                                             | 39                               |
| 3.3 | Vegetação .....                                                                                                | 40                               |
| 3.4 | SOLOS.....                                                                                                     | 42                               |
| 3.5 | Clima .....                                                                                                    | 44                               |
| 3.6 | Hidrografia .....                                                                                              | 46                               |
| 4   | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....                                                                              | 48                               |
| 4.1 | Caracterização morfológicas das Falésias.....                                                                  | 49                               |
| 4.2 | Descrição dos principais processos, mecanismos e feições<br>relacionados a alteração física das Falésias ..... | 52                               |
| 4.3 | Mensuração da evolução das Falésias .....                                                                      | 53                               |
| 5   | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                                                  | 64                               |
| 5.1 | Tendências e Variações Morfológicas nas Falésias: Uma Análise<br>Detalhada dos Resultados .....                | 64                               |
| 5.2 | Processos, Mecanismos e Feições: Uma Análise da Alteração Física<br>das Falésias.....                          | Erro! Indicador não definido.    |
| 5.3 | Estudo da Mensuração das Falésias: Técnicas e Resultados .....                                                 | Erro!<br>Indicador não definido. |
| 6   | CONCLUSÃO .....                                                                                                | 103                              |
|     | REFERÊNCIAS.....                                                                                               | 105                              |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas margens dos imponentes rios amazônicos, é possível encontrar formações de relevo que remetem a ambientes marinhos, conhecidos como Falésias Fluviais. Estas são descritas como formações íngremes que se desenvolvem ao longo das margens dos grandes rios na região amazônica, resultado da erosão provocada pela ação fluvial e pluvial. Apresentando encostas abruptas e paredes expostas, que se elevam acima do leito do rio.

O termo "Falésia Fluvial" foi cunhado pelo geomorfólogo Pierre Gourou (1946), que, durante uma de suas expedições à região amazônica observou a existência de formas semelhantes às encontradas nas áreas litorâneas. Ab'Saber (1956), ao explorar as falésias fluviais ao longo do rio Negro, destaca suas semelhanças com os vales suspensos, visando a orientação suave da parte posterior do planalto. Ele observa que essas formações foram gradualmente erodidas, começando nas nascentes e avançando em direção à foz.

As cinco Falésias em estudo localizam-se na margem direita do Rio Negro, no município de Iranduba. O rio Negro, um vasto afluente de águas escuras, abrange uma área de 712.000 km<sup>2</sup> e se estende por parte do Brasil (MARINHO, 2019), originando-se na Colômbia e destacando-se como o sexto maior rio do mundo em termos de volume de água, sendo também o segundo maior afluente do rio Amazonas (LATRUBESSE et al., 2005).

Filizola e Guyot (2009) enfatizam que, apesar da vazão significativa, o rio Negro transporta uma quantidade reduzida de material em suspensão, totalizando, em média, 8 milhões de toneladas por ano, que são despejadas no Rio Amazonas. No entanto, Carvalho (2006) sugere que os rios de águas pretas demonstram menor eficácia na remoção de material consolidado nas margens, assim como uma capacidade limitada de transporte. Essa condição resulta em uma menor influência da ação erosiva da água em movimento, a menos que o material das margens seja menos resistente. Portanto, nos eventos de cheias e vazantes, considerando também a composição do material presente nas margens, o rio Negro pode desempenhar um papel significativo na gestão das falésias fluviais, induzindo a erosão através do solapamento da base.

As falésias podem ser classificadas em três categorias: ativas, que frequentemente sofrem processos erosivos e apresentam alto risco; inativas, que não estão mais sujeitas a grandes processos erosivos e são moderadamente erodidas; e paleofalésias, que passaram por regressão e estão agora distantes da linha de margem (MICCADEI et al., 2019).

O interesse pelo estudo das falésias é recente, especialmente nas últimas décadas, refletindo a preocupação em compreender o funcionamento desses ambientes e suas características. A escassez de pesquisas e literaturas sobre falésias fluviais, especialmente no rio Negro, contrasta com o extenso conjunto de trabalhos sobre falésias costeiras. Compreender as condições geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, pedológicas e climatológicas dessas falésias é expressiva, principalmente por ser um estudo pioneiro na região. A investigação das falésias fluviais não apenas amplia o conhecimento científico em diversas áreas, mas também tem implicações práticas para a gestão de recursos naturais, a conservação ambiental, a prevenção de desastres e o planejamento urbano.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar a morfometria e a evolução das Falésias Fluviais na margem direita do baixo curso do Rio Negro (AM). Para atingir o objetivo geral, foram definidos objetivos específicos, tais como: caracterizar a morfologia das falésias; descrever os principais processos, mecanismos e feições relacionados à sua alteração física; mensurar a evolução das falésias.

Em função dos objetivos delineados, surgiram questionamentos sobre as falésias em estudo, tais como: Quais são as características morfológicas dessas formações? Há uma variação significativa na morfologia das falésias ao longo da margem? Quais são os principais processos erosivos que impactam essas formações rochosas? Como a ação fluvial e pluvial contribui para a erosão? Existem evidências de solapamento da base das falésias durante eventos de cheias e vazantes do Rio Negro? Qual é a composição do material nas margens e como essa composição influencia na resistência às ações erosivas? Existem variações na resistência do material ao longo da margem direita do Rio nos pontos das falésias? Partindo deste a pesquisa buscou responder a esses questionamentos.

Este trabalho é composto por quatro capítulos. O primeiro capítulo, refere-se ao Referencial Teórico, concentra-se na conceituação de Falésias Costeiras e nos Aspectos das Falésias Fluviais. O segundo capítulo dedica-se à Caracterização da

Área de Estudo, explorando principalmente os aspectos Geológicos, Geomorfológicos, Pedológicos, Hidrológicos e Climatológicos. Já o terceiro capítulo desenvolve os Procedimentos Metodológicos, oferecendo exemplos e detalhando as abordagens técnicas aplicadas ao longo da pesquisa. Por último, o quarto capítulo aborda os Resultados e Discussões, apresentando e analisando os achados encontrados durante o estudo.

## 2 PRESSUPOSTO TEÓRICO-CONCEITUAL SOBRE FALÉSIAS

Falésia é um termo de origem geomorfológica utilizado para descrever paredões abruptos de alturas variáveis que se encontram na interface entre a terra e o mar (AB'SABER, 1975). Além disso, as falésias também podem ser conhecidas por diferentes termos, como costas erosivas, formações abruptas ou costas abruptas, costas escarpadas, barreiras e arribas. Existem vários autores que forneceram definições do termo "falésias" e a maioria deles está em diálogo uns com os outros. O **Quadro 1** a seguir apresenta alguns desses autores e suas conceituações:

Quadro 1 — Alguns autores que definiram falésias

| AUTOR                  | CONCEITUAÇÃO                                                                                                                                  |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AB'SABER, (1975)       | Paredões abruptos de alturas variáveis na linha de contato terra e mar                                                                        |
| CHRISTOFOLETTI, (1980) | Ressalto não coberto pela vegetação, com declividades acentuadas e de alturas variadas, localizado na linha de contato entre a terra e o mar. |
| SMITH et al., (1989)   | Vertentes costeiras íngremes que se elevam acima do nível do mar                                                                              |
| JONES, (1997)          | Formações rochosas escarpadas e verticais ao longo da costa                                                                                   |
| SUGUIO, (1998)         | Alcantilado de faces abruptas formado pela ação erosiva (abrasão) das ondas sobre as rochas                                                   |
| IBGE, (1999)           | Escarpa originada pela erosão marinha ou fluvial.                                                                                             |
| DAVIS, (2003)          | Desfiladeiros ou penhascos elevados que margeiam a costa                                                                                      |
| SUERTEGARAY, (2003)    | Uma escarpa costeira abrupta não coberta pela vegetação que se localiza na linha de contato entre a terra e o mar.                            |
| BIRD, (2008)           | As falésias são característica geográficas elevadas formadas pela erosão marinha ou fluvial em suas bases.                                    |
| GOMES et al., (2010)   | Escarpas íngremes e proeminentes que se desenvolvem nas margens costeiras                                                                     |

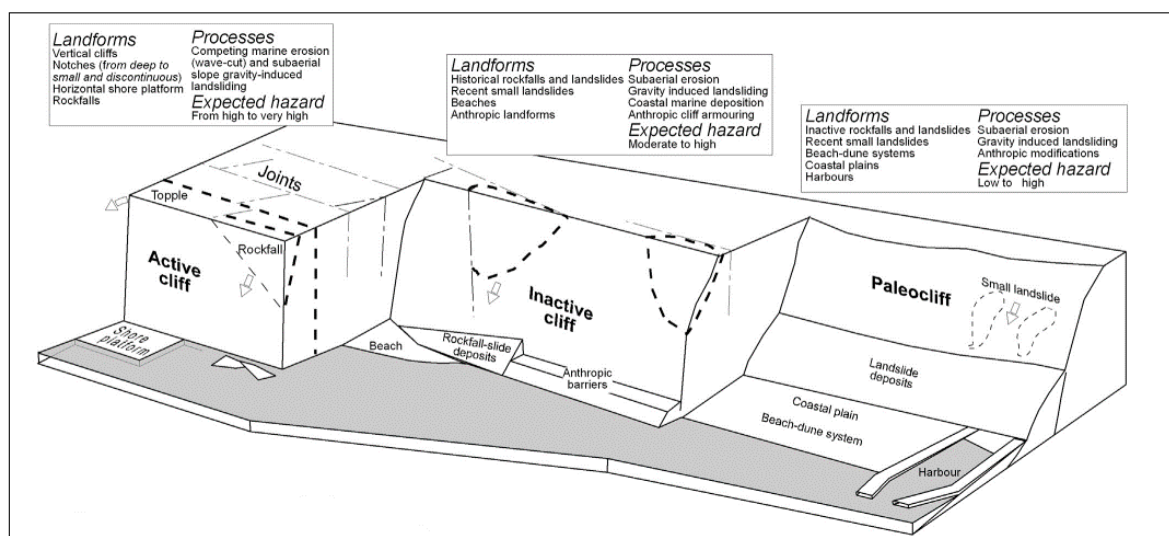
Fonte: O autor (2023).

Essas definições evidenciam a natureza íngreme e proeminente das falésias ao longo das margens costeiras, com características variáveis em relação à sua altura e formação rochosa. De acordo com Miccadei *et al.*, (2019), as falésias podem ser classificadas em três tipos principais: falésias ativas, falésias inativas e paleofalésias (**Figura 1**).

Conforme descrito por Miccadei et al., (2019), as falésias ativas são formações com alta inclinação que estão sujeitas à erosão causada pela água. Essa erosão desempenha um papel fundamental na modelagem das falésias, e suas escarpas exibem características e processos como solapamentos, desmoronamentos, sulcos e dutos. Além disso, a base das falésias ativas (*Active Cliff*) representa um fator de risco significativo.

As falésias inativas (*Inactive Cliff*), por sua vez, são aquelas que não estão mais sujeitas à erosão causada pela água. Elas são consideradas moderadamente estáveis e geralmente são cobertas por vegetação. Essa vegetação desempenha um papel importante na estabilização das falésias inativas, ajudando a protegê-las contra processos erosivos adicionais. Por fim, temos as paleofalésias (*Paleocliff*), que estão localizadas a certa distância da linha de margem e, portanto, não são influenciadas diretamente pela ação marinha ou fluvial. A dinâmica dessas formações pode ser resultado de variações no nível do mar e atividade neotectônica da região. Em comparação com as falésias ativas e inativas, as paleofalésias apresentam perfis mais suavizados, ou seja, suas características de declive são menos abruptas. Além disso, a vegetação nessas áreas é mais desenvolvida. Essas observações foram destacadas por Rosseti (2008) e Miccadei et al., (2019).

Figura 1 — Classificação das falésias costeiras em ativas, inativas e paleofalésias



Fonte: Miccadei et al. (2018).



Segundo Bird (2008), as falésias são características geográficas elevadas formadas pela erosão marinha em suas bases. Geralmente, essas falésias estão em processo de recuo devido à ação desses agentes erosivos, juntamente com a erosão subaérea que afeta a face do penhasco. Os diferentes processos observados nas falésias dependem da sua composição litológica.

Falésias compostas por rochas altamente resistentes, como granito, tendem a sofrer menos modificações erosivas ao longo do tempo. Por outro lado, encostas formadas por rochas menos resistentes, como as sedimentares, são mais propícias a processos erosivos. Nesses casos, é comum observar um padrão erosivo intenso, com taxas que podem ultrapassar vários metros por ano (BIRD, 2008 e MAIA, 2022).

Para entender completamente a morfologia atual das falésias, é essencial investigar seu passado, pois elas são influenciadas pela interação entre a litologia (tipo de material que as compõe) e os processos morfogenéticos que sofrem ao longo do tempo. A compreensão desses aspectos permite reconstruir a história geológica das falésias e identificar os fatores que moldaram sua forma e características atuais (MAIA, 2022).

## **2.1 Morfologia, Litologia e Tectônica**

A morfologia das falésias é distinta devido à topografia e à variação na resistência das formações rochosas que se expõem ao longo da costa. Em rochas altamente resistentes, os perfis das falésias tendem a ser acentuados e inclinados, enquanto em afloramentos menos resistentes, ou seja, em rochas menos resistentes, os perfis das falésias tendem a ser mais suaves (Clayton e Shamon, 1998).

Bird (2016), propõe uma classificação das falésias com base em sua morfologia, que inclui três categorias principais: mega falésias, falésias altas e micro-falésias.

As falésias altas são caracterizadas por terem uma altura que varia de 100 a 500 metros. Elas são impressionantes em termos de projeção e muitas vezes são vistas como características geográficas. As mega falésias, por sua vez, são ainda mais imponentes, com uma altura superior a 500 metros. Essas formações são extremamente imponentes e podem ser consideradas verdadeiros monumentos naturais. Por fim, as micro-falésias são caracterizadas por sua pequena altura,

geralmente menos de um metro. Embora sejam de menor escala, ainda apresentam características distintas e podem ser notáveis em determinados contextos.

Certamente, a estrutura geológica das falésias desempenha um papel crucial na sua morfologia. Características como o mergulho das camadas rochosas, a presença de juntas, falhas e dobras podem influenciar a forma e a aparência dos penhascos (BIRD, 2016).

O mergulho das camadas rochosas, que se refere à inclinação das camadas sedimentares ou rochas ígneas, pode resultar em declives com inclinações distintas, criando perfis e formas diferentes. As juntas, que são planos de fraqueza ou fraturas nas rochas, podem afetar a resistência da formação rochosa. A água e outros agentes erosivos tendem a se concentrar nessas juntas, acelerando o curso e moldando a morfologia das falésias. Falhas geológicas, que são rupturas nas rochas ao longo das quais ocorreram movimento, também podem influenciar a morfologia das falésias. As falhas podem gerar escarpas e criar diferenças de vibração ao longo das falésias. Além disso, dobras na estrutura geológica podem criar formas e padrões complexos nas falésias, adicionando variações na morfologia (BIRD, 2016).

A resistência da rocha é influenciada por vários fatores, como uma composição mineralógica, a coesão dos grãos, a porosidade e a compactação. Esses fatores podem afetar a durabilidade e a resistência da rocha à encosta, influenciando assim a morfologia das encostas (BIRD, 2016).

Portanto, a estrutura geológica e a resistência da rocha são elementos fundamentais que influenciam a morfologia das falésias, desempenhando um papel importante na sua formação e evolução ao longo do tempo. Rochas maciças tendem a ser mais resistentes à proteção do que formações rochosas sedimentares que possuem várias juntas, planos de estratificação, planos de clivagem e zonas de fraturas. Essas características facilitam a dissecação do declínio, tornando-o mais suscetível à interface (BIRD, 2016).

Bird (2016), comenta que formações rochosas sólidas e maciças geralmente são corroídas mais lentamente em comparação com formações que se desintegram facilmente, como arenitos friáveis, rochas com juntas espaçadas e planos de estratificação ou formações rochosas fragmentadas por falhas. A presença de juntas, planos de estratificação e fraturas cria pontos de fraqueza nas rochas, permitindo que

a água e outros agentes erosivos penetrem mais facilmente e acelerem o processo de salto.

Por outro lado, rochas maciças e sólidas oferecem maior resistência ao desgaste por sua composição. No entanto, é importante ressaltar que mesmo rochas maciças podem ser erodidas ao longo do tempo, especialmente por processos como intemperismo químico e ação de agentes erosivos, como a água e o vento (BIRD, 2016).

Bird (2008) classifica as falésias em dois tipos principais com base em processos tectônicos: escarpas de falha e linha de falha. Segundo o autor, a escarpa de falha é formada pelo soerguimento da margem de terra como resultado de atividade tectônica, mais especificamente, falhamento. Nesse tipo de falésia, a inclinação do penhasco está voltada para o mar ou rio e coincide com o plano de falha ao longo do qual a terra foi levantada. Esse levantamento pode ser causado pelo movimento vertical das rochas ao longo de uma falha geológica.

Já a linha de falha é caracterizada pela presença de uma falha geológica que corta perpendicularmente a linha de costa, que nesse caso, resulta numa falésia formada pela ação combinada de processos erosivos e o movimento relativo entre as massas de rochas ao longo da falha (BIRD, 2008). Para este, a linha de falha pode criar um deslocamento significativo nas formações rochosas ao longo da costa, resultando em uma morfologia específica.

Essas classificações, propostas por Bird (2008), permitem uma melhor compreensão das falésias em termos de sua origem tectônica e sua relação com os processos geológicos envolvidos na sua formação.

## **2.2 Clima e Evolução das falésias**

O clima desempenha um papel importante no intemperismo dos afloramentos rochosos, através de intemperismos físicos, químicos e biológicos.

Os processos físicos incluem a ação do vento, da água (chuva e ondas), do gelo e das mudanças de temperatura. A erosão causada pelo vento e pela água desgasta gradualmente as rochas, enquanto o congelamento e descongelamento repetidos da água nos poros das rochas podem levar à fragmentação delas. A ação

das ondas também é um fator relevante nas falésias costeiras, causando desgaste e recuo do penhasco (BIRD, 2016).

Bird (2016), comenta que os processos químicos envolvem reações químicas entre os minerais da rocha e substâncias presentes na água, como ácidos naturais ou produtos da decomposição orgânica. Essas reações podem resultar na dissolução de certos minerais e no enfraquecimento da estrutura da rocha. O autor ainda menciona que os processos biológicos desempenham um papel significativo na formação das falésias. A ação das raízes das plantas, dos organismos marinhos e das colônias de animais, como pássaros e moluscos, pode desencadear processos de erosão e desagregação das rochas.

Bird (2016) menciona que esses processos estão relacionados às condições subaéreas e à presença ou proximidade da água do mar ou de rios. Os diferentes elementos climáticos e as características do ambiente influenciam a velocidade e a intensidade dos processos de intemperismo e erosão, contribuindo para a formação das falésias em diferentes paisagens.

Com o processo de umedecimento e secagem, as rochas se decompõem ou se desintegram, resultando em detritos que caem na base do penhasco. Esses detritos, na maioria das vezes, são removidos pela ação das ondas (ROSSETI, 2008).

Os processos atuantes nas falésias ocorrem principalmente durante as tempestades. Durante esses eventos, a base do penhasco é rebaixada devido à pressão hidráulica causada pelo impacto das ondas, juntamente com o acúmulo das águas pluviais (SOUSA, 2020). Heeps (1985) também menciona que a recessão de um penhasco ocorre, na maioria das vezes, devido a quedas de rochas causadas por saturação após uma chuva intensa. Essa saturação resulta em um enfraquecimento das camadas rochosas, tornando-as mais propensas a desprendimentos e deslizamentos.

De acordo com Bird (2016: p.87), em uma obra publicada sobre falésias conclui que:

À medida que cresce, a face do penhasco torna-se instável, e uma massa rochosa saliente eventualmente desmorona (movimento de massa). Os entalhes na base do penhasco são mais bem desenvolvidos em formações rochosas relativamente resistentes porque um afloramento de rocha menos resistente não irá sustentá-los.

### 2.3 Processos erosivos fluviais e subaéreos

A origem das falésias pode estar relacionada tanto a ajustes tectônicos quanto a variações no nível de base do mar ou de rios, dependendo da localização específica. Além disso, quanto a morfologia, as falésias também são resultado da ação da erosão marinha, fluvial e/ou subaérea (NASCIMENTO, 2006). Esses processos combinados ao longo do tempo contribuem para a formação e evolução das falésias que se observa atualmente.

Silva (2005) comenta que os principais processos responsáveis pela taxa de recuo das falésias são os processos marinhos e fluviais, como solapamentos e desmoronamentos, processos subaéreos que pode resultar nas feições resultantes da erosão como: ravinas e voçorocas. Esses processos e feições atuam em conjunto e são responsáveis pelo transporte de sedimentos ao longo do tempo, contribuindo para a erosão e recuo das falésias.

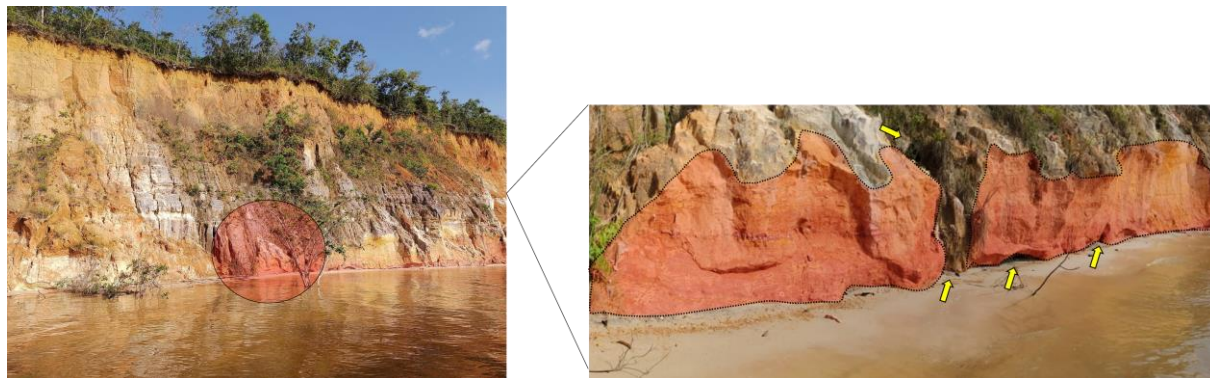
Conforme mencionado por Bird (2008), os processos que ocorrem nas falésias estão fortemente relacionados à composição litológica das rochas. Essa composição determina se as feições das falésias se desenvolverão mais rapidamente (no caso de rochas sedimentares mais vulneráveis) ou mais lentamente (no caso de rochas metamórficas e magmáticas). A resistência das rochas desempenha um papel crucial na taxa de erosão e recuo das falésias, com as rochas sedimentares sendo mais suscetíveis aos processos erosivos em comparação com as rochas de natureza metamórfica e magmática.

Em relação à erosão fluvial, conforme definido por Christofolletti (1980), refere-se aos processos que removem detritos do leito e das margens de um rio, incorporando-os à carga sedimentar. Além disso, Suguio e Bigarella (1990), destacam que a erosão fluvial pode ocorrer de forma vertical, quando há um rebaixamento do leito do rio, ou de forma lateral, quando há uma erosão nas margens.

A erosão vertical ocorre devido à ação abrasiva do material transportado no fundo do rio, resultando no entalhamento do leito. Por outro lado, a erosão lateral refere-se ao desgaste das margens do rio, especialmente pelo solapamento nas margens côncavas, que provoca o alargamento do canal (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esses processos desempenham um papel significativo na base das falésias, removendo sedimentos e formando processo de solapamento na base (**Figura 2**). A

constância erosiva nas regiões de integração entre a água e a falésia desempenha um papel de caráter evolutivo para sua modelagem.

Figura 2 — Processo de erosão fluvial (solapamento) formando cavidades na parede da falésia 1

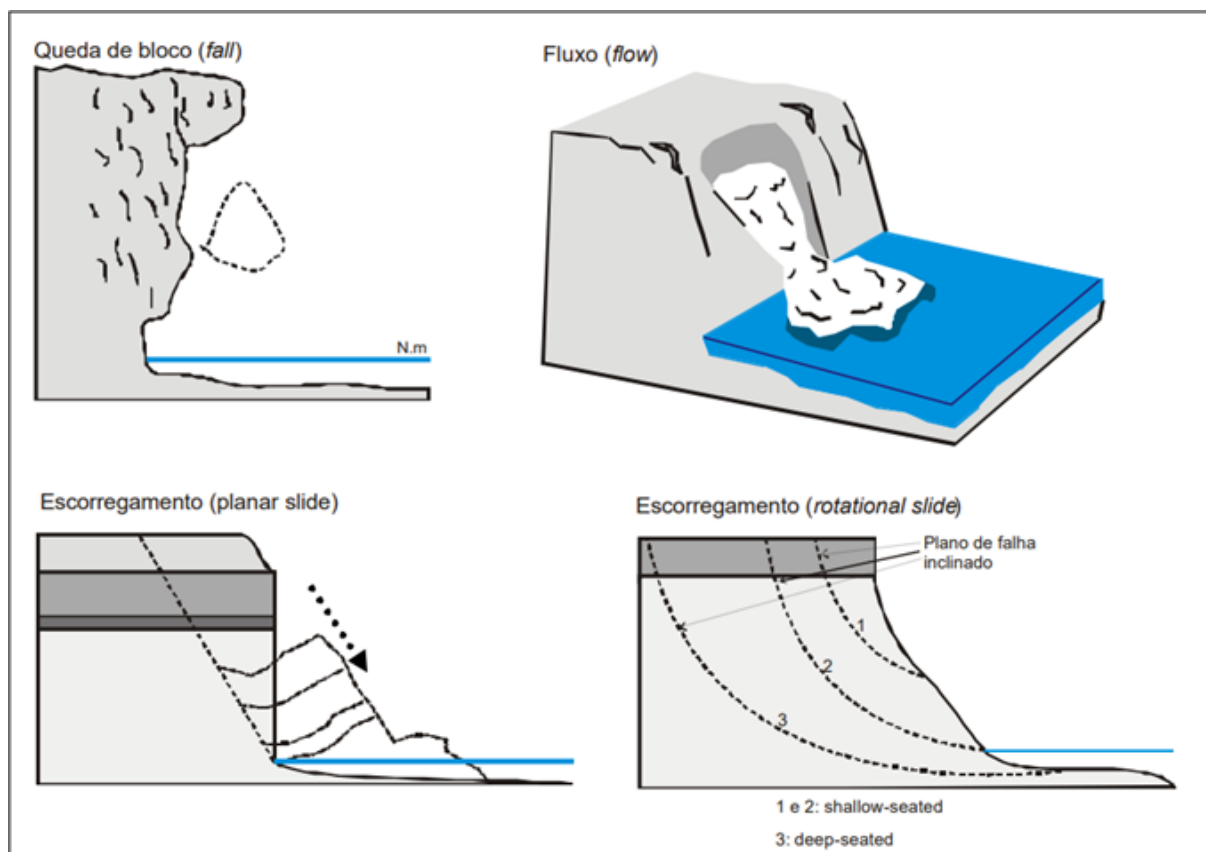


Fonte: O autor (2023).

De acordo com Suguio (2003), os solapamentos são escavações que ocorrem na base das falésias devido à ação abrasiva das ondas. Essas cavidades podem ser consideradas áreas de risco temporário, como mencionado por Silva (2005), pois indicam a possibilidade iminente de desmoronamentos dessa porção das falésias. A remoção dos solo/sedimentos por meio dos solapamentos é um fator que contribui para o aumento do risco de movimentos de massa nesses locais. Assim, as instabilidades geradas pela erosão na base das falésias desencadeiam os movimentos de massa, causando mudanças significativas nos seus perfis em um curto período (SUNAMURA, 1992).

Vale destacar que os movimentos de massa são naturais, contínuos de dinâmica externa que moldam a paisagem da superfície terrestre (FERNANDES e AMARAL, 2011). Vários estudos abordam movimentos de massa, abrangendo uma ampla variedade de materiais, processos e fatores condicionantes. Nascimento (2006) classifica esses movimentos em três categorias: queda de bloco (*fall*), fluxo (*flow*), escorregamento (*planar slide*) e escorregamento (*rotational slide*). Essa classificação contribui para a compreensão da diversidade dessas características e de suas características específicas (**Figura 3**).

Figura 3 — Principais tipos de movimentos de massa em falésias



Fonte: Nascimento (2006), adaptado de Sunamura (1992).

De acordo com a classificação de Nascimento (2006), os escorregamentos, representando um tipo de movimento de massa, caracterizam-se por serem movimentos rápidos de curta duração, com um plano de ruptura claramente definido, o que possibilita uma distinção nítida entre o material deslocado e o material que permanece imóvel. Esses escorregamentos podem ser subdivididos em duas categorias principais: *planar slides* e os *rotacional slides*. O **Quadro 2** apresenta as classificações de movimentos de massa conforme Nascimento (2006):

Quadro 2 — Definições dos tipos de movimentos de massa

| TIPO                    | DEFINIÇÃO                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FLUXOS ( <i>flows</i> ) | São movimentos rápidos nos quais os materiais se comportam como fluidos. Estão associados à concentração de águas superficiais e deflagração de um processo de fluxo contínuo de material. |

| TIPO                                            | DEFINIÇÃO                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ESCORREGAMENTOS<br>( <i>rotacional slides</i> ) | Possui uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dará o movimento rotacional do material, tem seu início associado a cortes na base.                          |
| ESCORREGAMENTOS ( <i>planar slides</i> )        | Possui superfície de ruptura com forma planar e são geralmente compridos e rasos.                                                                                                           |
| QUEDA EM BLOCOS ( <i>fall</i> )                 | São movimentos rápidos de blocos (de solo coeso ou rocha, dependendo do material da falésia) caindo pela ação gravitacional sem a presença de uma superfície de deslizamento (queda livre). |

Fonte: O autor (2023).

Sunamura (1992), observa que após ocorrerem os movimentos de massa, as falésias podem apresentar um perfil mais suavizado e relativa estabilidade. No entanto, o material depositado próximo ao sopé da falésia é removido pelas ondas, que retomam sua ação erosiva na base desta, tornando-a íngreme e instável novamente. Esse ciclo de deposição e remoção de sedimentos contribui para a contínua evolução das falésias ao longo do tempo.

Os processos subaéreos são desencadeados por fatores climáticos, como chuva, temperatura e vento, e estão relacionados a processos de desgaste e remodelagem das falésias. Entre os processos subaéreos estão os escoamentos superficiais e subsuperficiais da água, que promovem a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. (**Figura 4**). Esses processos contribuem para a erosão das falésias e moldam sua morfologia ao longo do tempo (NASCIMENTO, 2006).



Figura 4 — Processos subaéreos (fluxo superficiais verticais) e sulcos.



Fonte: O autor (2023).

O escoamento superficial ocorre durante episódios de chuva, quando a capacidade de infiltração do solo está esgotada, conforme Guerra (1994). Hudson (1961, citado por Guerra, 1994) confirma que, embora a erosão tenda a aumentar à medida que os níveis de erosão se elevam, esse parâmetro deve ser interpretado como um indicativo geral da relação entre chuva e erosão, uma vez que há diversos outros fatores em jogo. Quando a superfície da falésia não está protegida por vegetação, ocorre um fenômeno como conhecido "efeito splash" das gotas de chuva, o que provoca a desagregação do material e intensifica os efeitos erosivos do escoamento superficial.

O escoamento subsuperficial é um processo que pode desencadear ação erosiva quando ocorre em fluxos concentrados, levando ao colapso da superfície acima (GUERRA, 1994). Nas falésias em estudo, especificamente, o topo da falésia é composto por um material mais permeável, o que favorece a infiltração da água. No

entanto, ao entrar em contato com o material menos permeável na base, a água tende a se mover lateralmente. Esse processo gera instabilidade e promove o fluxo, resultando na perda de material e em um recuo diferenciado da face da falésia (Fernandez e Amaral, 1996; Emery e Kuhn, 1980; Dias e Neal, 1992).

Com efeito, a interação dos escoamentos de água, altas temperaturas e movimentos tectônicos instáveis podem constituir um papel na formação de fissuras nas falésias, que são referidas como sulcos, de acordo com Suguio (2003).

Guerra e Guerra (2010) explicam que o sulco é uma incisão específica que se forma no solo devido ao escoamento superficial concentrado, resultante de pequenas variações na orientação do terreno que facilitam o fluxo, o desprendimento e o transporte de materiais, conforme indicado por Bertoni e Lombardi Neto (2010). Os sulcos são canais superficiais escavados nas encostas, e sua profundidade está diretamente ligada à rapidez do processo de degradação. Embora sejam geralmente consideradas feições efêmeras, eles podem desempenhar diversos papéis no ciclo de erosão, evoluindo para se tornarem ravinas ou até mesmo voçorocas.

## 2.4 Tectônica regional e Rio Negro

Diversos estudos têm contribuído para entender melhor a relação entre a tectônica e a geomorfologia da Amazônia Central (Sternberg, 1950; Franzinelli; Igreja, 1990; 2002; Costa et al., 1996; Igreja, 1999; Latrubesse; Franzinelli, 2005; Silva, 2005; Almeida Filho, 2007, entre outros). Essas evidências incluem o paralelismo de rios (alinhamento), a presença de sistemas de falhas, capturas de rios, anomalias de drenagem, lineamentos estruturais e lineamentos magnéticos. Esses trabalhos têm fornecido importantes *ideias* sobre a interação entre os processos geológicos e a configuração da paisagem na região.

Sternberg (1950, 1953), discute a influência dos lineamentos na região próxima à cidade de Manaus, afirmando que essas estruturas têm controle sobre parte da rede de drenagem atual. Além disso, ele sugere que a incidência de terremotos em áreas extensas desempenhou um papel importante no surgimento de falésias, as quais são controladas por falhas localizadas nas margens dos principais rios. Essa associação entre lineamentos, terremotos e a formação de falésias indica uma relação direta entre a atividade tectônica e a configuração da paisagem na região.

Silva (2005), descreve que o rio Negro na região de Manaus segue um traçado ao longo de uma falha normal, que se estende por aproximadamente 70 km em linha reta. Essa falha exerce controle sobre ambas as margens do rio, e os afloramentos rochosos são facilmente observados em locais como Manaus e Iranduba, onde ocorrem as falésias. A presença desses afloramentos e a exposição de rocha e solo permitem uma melhor compreensão da natureza da falha e sua relação com a paisagem local.

Silva e Rossetti (2009), destacam que as falhas geológicas têm um papel significativo na modificação da morfologia da paisagem amazônica. Essas falhas causam o deslocamento de camadas rochosas e superfícies topográficas, resultando em características distintas nos locais de falha. É comum observar a formação de estruturas como espelhos de falha, estrias de atrito e brechas de falha, que são consequências da fricção entre os blocos de rocha durante o movimento das falhas.

De acordo com Silva e Rossetti (2009), o desenvolvimento das falhas geológicas na região amazônica está associado a atividades sísmicas ocorridas no passado. Há diversos registros de terremotos com epicentros situados na região, evidenciando que a região apresenta uma sismicidade natural recorrente.

Segundo os estudos de Silva (2005), a atuação das falhas geológicas na região amazônica tem impactos significativos na dinâmica fluvial dos rios. No caso do vale do Paraná do rio Ariaú, localizado entre Iranduba e Manacapuru, foi constatado que essa região compreende o antigo leito do rio Negro. A evidência desse antigo leito são os expressivos pacotes de sedimentos argilosos, com espessura de pelo menos 60 metros. Essa constatação reforça a influência das falhas geológicas na configuração dos rios e na deposição de sedimentos ao longo do tempo.

Conforme observado por Silva (2005), o encontro das águas entre o rio Negro e o rio Solimões ocorria aproximadamente 50 km a jusante de sua posição atual. Após o preenchimento sedimentar nessa área de confluência fluvial, o rio Negro teve seu curso desviado em direção a Manaus, devido à presença de zonas de fraquezas na direção Leste-Oeste. Essas mudanças repentinas nos cursos dos principais rios amazônicos deixam registros expressivos no relevo, como as falésias fluviais. Essas falésias são evidências das transformações geológicas e da dinâmica fluvial ao longo do tempo na região amazônica.

A região Amazônica abriga o sistema fluvial mais extenso e de maior massa líquida do planeta. O Rio Negro é um dos principais afluentes do Rio Amazonas e desempenha um papel fundamental na drenagem da região. Ele percorre uma extensa área de aproximadamente 700.000 km<sup>2</sup>, que é predominantemente coberta por floresta tropical não perturbada.

O Rio Negro nasce na região pré-Andina da Colômbia e percorre uma longa distância até encontrar-se com o Rio Amazonas próximo à cidade de Manaus, no Brasil. Durante seu curso, o Rio Negro atravessa diferentes paisagens e ecossistemas, passando por áreas de floresta densa, savanas e várzeas. A bacia do Rio Negro é conhecida por sua alta biodiversidade e importância ecológica. A floresta tropical que a envolve abriga uma rica variedade de espécies de plantas e animais, muitas das quais são endêmicas da região. Além disso, a bacia do Rio Negro desempenha um papel crucial na regulação do fluxo de água e na ciclagem de nutrientes na Amazônia (OLIVEIRA, 2007).

É correto afirmar que o Rio Negro apresenta características de acidez devido à baixa concentração de cálcio e magnésio em suas águas. Essa condição está relacionada às formações geológicas presentes em suas nascentes, que possuem baixa presença desses minerais (SIOLI, 1968).

Além disso, a contribuição significativa de substâncias húmicas provenientes de extensas áreas de Espodossolos na porção superior da bacia do Rio Negro também contribui para a acidez das águas. Os Espodossolos são solos caracterizados por uma alta concentração de matéria orgânica e drenagem deficiente, o que resulta na liberação de ácidos orgânicos (IVANISSEVICH, 1990).

Essas condições de acidez e baixa concentração de sais e nutrientes no Rio Negro influenciam sua química e ecologia. O pH ácido e a baixa disponibilidade de nutrientes podem limitar certos organismos aquáticos e influenciar a composição e diversidade biológica da região.

Conforme Carvalho (2006), os rios de água preta, como o Rio Negro, que escoam sobre rochas antigas e consolidadas, geralmente apresentam menor competência de remoção de material das margens e menor capacidade de transporte de sedimentos em comparação com rios que fluem sobre rochas mais recentes e menos consolidadas.

No entanto, quando os materiais das margens são menos resistentes à ação erosiva da corrente de água, como é o caso dos tenros sedimentos da Formação Solimões encontrados no Rio Negro, a dinâmica da erosão lateral por solapamento pode alterar significativamente as margens do rio. Nesse processo, a corrente de água remove os sedimentos das margens, causando o recuo das margens e a ampliação do canal fluvial.

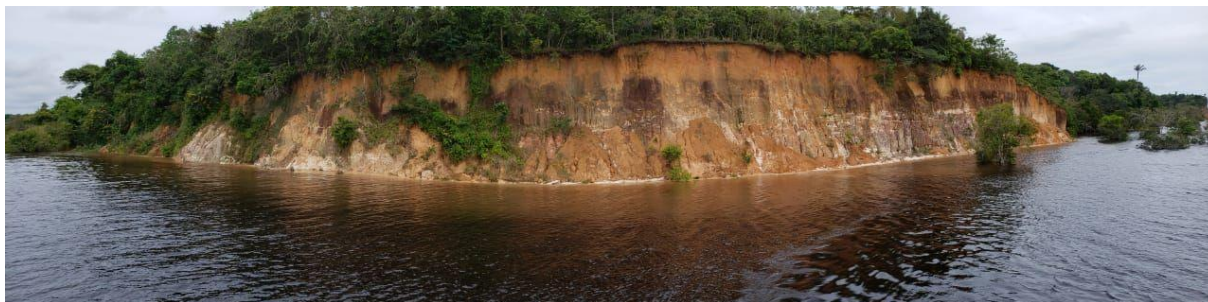
Essa erosão lateral por solapamento pode ser especialmente pronunciada em áreas onde o Rio Negro encontra materiais mais erodíveis, como os sedimentos da Formação Solimões. A ação contínua da corrente de água ao longo do tempo pode resultar em mudanças significativas na paisagem fluvial, com o desenvolvimento de falésias e desgaste das margens do rio.

Franzinelli e Igreja (2002), aponta que o Baixo Rio Negro, é influenciado pelo neotectonismo, a qual é controlada por um lineamento NW-SE, que faz parte de um sistema maior de falhas transcorrentes dextrais na Bacia Amazônica. A atividade tectônica pode influenciar a profundidade do rio, bem como a ocorrência de falésias escarpadas ao longo de certos trechos de suas margens. Essas falésias são resultantes do deslocamento e da deformação das camadas geológicas ao longo das falhas tectônicas.

Os estudos de Franzinelli e Igreja (2002) destacam a importância do controle tectônico na configuração do rio Negro e sua paisagem circundante. A compreensão desses processos neotectônicos é fundamental para a interpretação da evolução do rio, sua interação com a atividade tectônica e o desenvolvimento de sua forma atual.

As falésias fluviais constituem-se como formações íngremes que ocorrem ao longo das margens dos grandes rios na região amazônica, sendo modeladas tanto pela erosão pluvial como pela erosão fluvial, sendo caracterizadas por apresentar encostas abruptas e paredes expostas (solo e/ou rocha), que se elevam acima do leito do rio (**Figura 5**).

Figura 5 — Falésia fluvial à margem direita do rio Negro



Fonte: O autor (2023).

O termo foi adaptado pelo geomorfólogo Pierre Gourou (1946), que observou essas formas durante uma de suas viagens à região. Ab'Saber (1956) também mencionou a presença de falésias fluviais no rio Negro, descrevendo-as como verdadeiros vales suspensos que seguem a inclinação suave do reverso do tabuleiro e que foram gradualmente erodidas das cabeceiras para jusante.

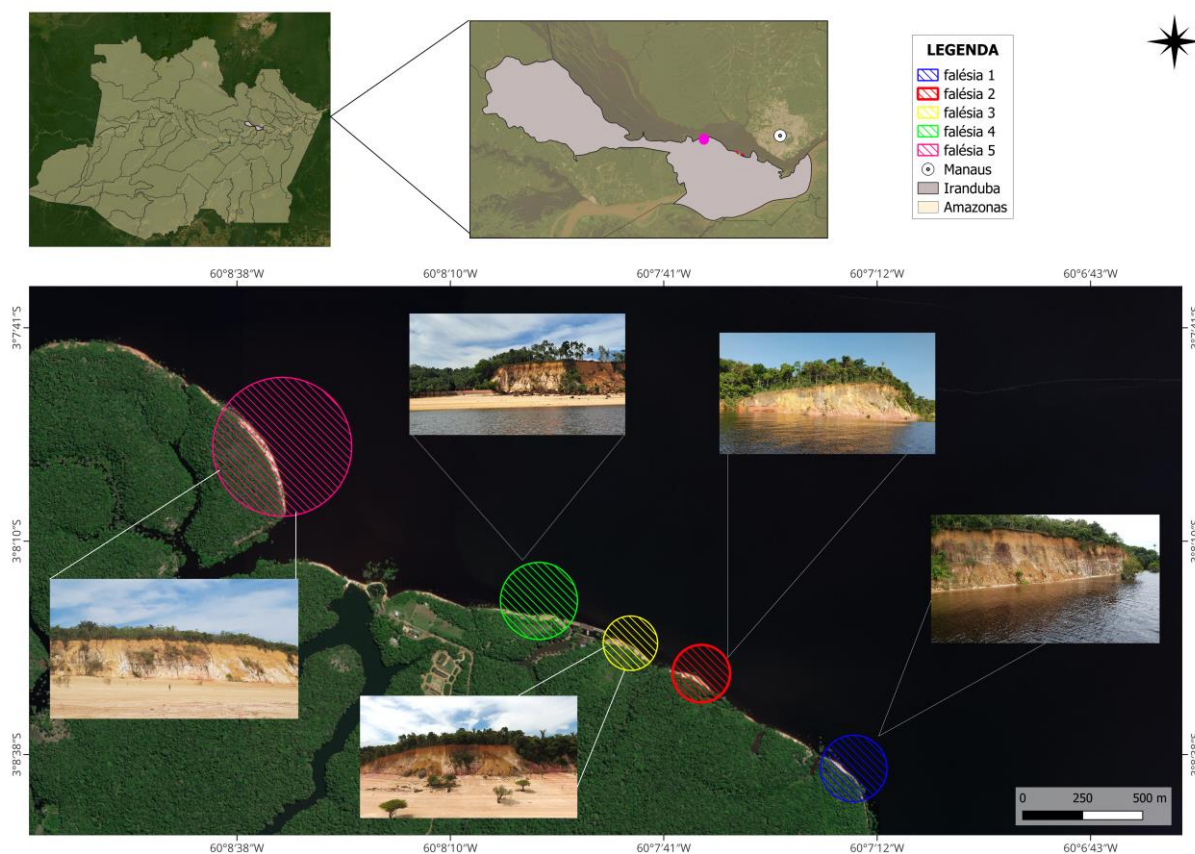


### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As falésias estudadas nesse trabalho, estão localizadas no município de Iranduba, o qual é um dos 62 municípios que compõem o estado do Amazonas. Fica situado a 27 km da capital do estado, Manaus, e foi criado em 09 de abril de 1963 por meio da Lei nº. 07/1963, possuindo uma área de 2.216,817 km<sup>2</sup>, fazendo limite com os municípios de Careiro, Manaquiri, Manacapuru, Novo Airão e Manaus (IBGE, 2018).

A área da pesquisa abrange a análise de cinco falésias fluviais localizadas no município de Iranduba, na margem direita do rio Negro, localizadas nas seguintes coordenadas: falésia 1 ( 3° 8'39.91"S, 60° 7'17.29"O); falésia 2 ( 3° 8'28.12"S, 60° 7'36.35"O); falésia 3 (3° 8'23.71"S, 60° 7'45.88"O); falésia 4 (3° 8'19.77"S, 60° 7'56.48"O); falésia 5 (3° 7'57.21"S, 60° 8'34.51"O) (**Figura 6**).

Figura 6 — Mapa de localização da área em estudo



Fonte: O autor (2023).

Neste capítulo, serão examinados os aspectos fisiogeográficos da área de estudo, englobando a Geologia, Geomorfologia, Solos, Hidrografia, Vegetação e Clima. Reconhece-se a importância de compreender esses elementos naturais para uma melhor compreensão das falésias em estudo.

### 3.1 Geologia

A Província Estrutural Amazônica está constituída por uma extensa área sedimentar entre o Escudo das Guianas e o Brasil Central, englobando quatro bacias: Bacia do Acre, Bacia do Solimões, Bacia do Amazonas e Bacia do Marajó.

De acordo com Silva (2005), as unidades geológicas presentes na área de estudo são os depósitos paleozoicos da Bacia do Amazonas. Esses depósitos são representados pela sequência Ordoviciano-Devoniano, que inclui as formações Nhamundá, Pitinga e Manacapuru. Além disso, há os sedimentos da sequência Cretáceo-Terciária, que compreendem a Formação Alter do Chão e a Formação Içá ou membro superior da Formação Solimões.

O substrato geológico do município de Iranduba está assentado na Bacia sedimentar Fanerozoica. Essa bacia compreende sedimentos e rochas sedimentares da formação Alter do Chão, além de depósitos quaternários e a Formação Içá. A área de estudo está totalmente situada na Formação Alter do Chão (**Figura 7**).

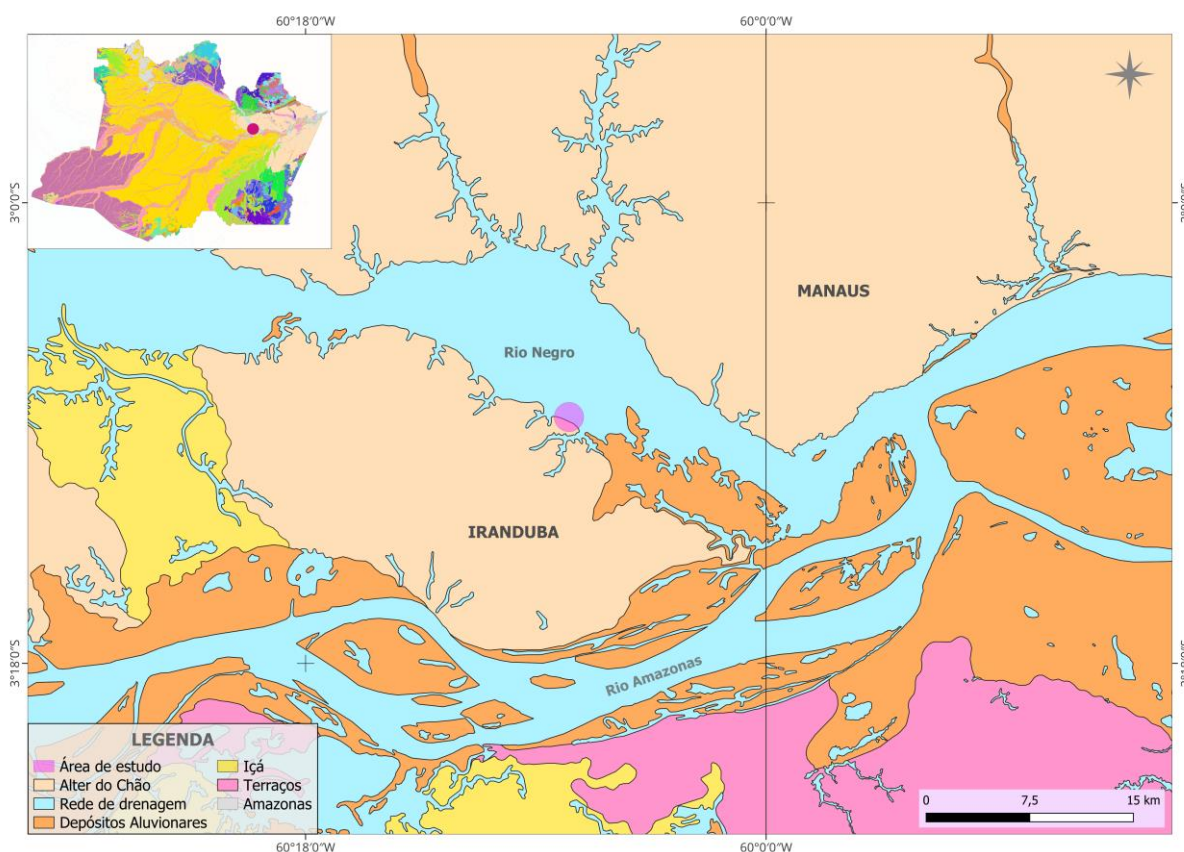
De acordo com IBGE (2023), os Depósitos Aluvionares Holocênicos são formações sedimentares depositadas durante o período de 12.000 anos, esses reservatórios são comumente encontrados em áreas próximas a rios e são formados pela deposição de sedimentos transportados pela água ao longo do tempo e geralmente constituídos por materiais grosseiros e conglomerativos como: areia, argila, silte e cascalho.

A Unidade Içá, recebe esse nome devido ao rio Içá, um importante curso d'água da região. É uma unidade geológica de idade Cenozoica, do período Neógeno entre o Mioceno e o Plioceno com uma grande área de abrangência (CAMPBELL JR. et al., 2006). Essa formação possui, em superfície, uma área que se estende de Boa União, no Rio Içá, até a confluência deste com o rio Solimões e possui características de deposição predominantemente fluvial (Reis et al., 2006).



Maia et al. (1977) afirma que a seção inferior é constituída por siltitos e/ou argilitos maciços e finamente laminados, lenticulares, intercalados com arenitos estratificados. Já a seção superior é composta por arenitos conglomeráticos e extratos cruzados acanalados de porte variados são comuns. Essa formação constitui predominantemente arenitos-avermelhados, de granulometria fina a conglomerática, friável e às vezes siltosas, argilosas e com características continentais.

Figura 7 — Geologia do município de Iranduba e área adjacentes



Fonte: O autor (2023).

Quanto a Formação Alter do chão, onde são encontradas as falésias, Daemon (1975) explica que ela foi descrita inicialmente a partir do poço 1-AC-1-PA (Alter do Chão), nas coordenadas geográficas de 2°31'15" de latitude Sul, e, em 54°58'38" de longitude Oeste, alcançando neste poço 545 metros de espessura. A litologia é composta por intercalações de arenitos e argilitos e, subordinadamente, conglomerados. Os conglomerados constituem paleocanais, com 2 a 5 metros de espessura, que gradam superiormente para arenitos. Nas porções centrais, essa

unidade jaz discordantemente sobre a Formação Andirá (Sucunduri), do Permiano Superior.

A partir de informações de subsuperfície (dados sísmicos e perfis elétricos), aliadas a informações em estratigrafia, paleontologia e sedimentologia, foram reconhecidas duas sucessões sedimentares na Formação Alter do Chão (MENDES et al., 2012):

- Sequência 1 (inferior) - caracterizada por influxo de terrígenos associados a um sistema fluvial meandrante que evolui para um sistema anastomosado, com retrabalhamento eólico, de idade neoaptiana/eoalbiana e;
- Sequência 2 (superior) - composta de ciclos progracional flúvio-deltaico-lacustre, de idade cenomaniano. Essa sequência contém arenitos avermelhados com icnofósseis e estruturas pedogenéticas (peds, slickensides), atribuídas e silcretas.

Estudos geoquímicos realizados na Formação Alter do Chão, nas camadas de arenitos vermelhos, indicaram que houve variações de rocha fonte e mudança na seleção granulométrica durante o transporte, deposição e pedogênese pós-deposicional. Estas variações ocorreram em paleoambiente de planícies abandonadas e rios entrelaçados sob condições de clima seco com tendência a úmido no Cretáceo na bacia do Amazonas (HORBE et al., 2006).

Kistler (1953), comenta que essa Formação é constituída de Arenitos avermelhados e esbranquiçados, finos a médios; siltitos e argilitos geralmente avermelhados e rosados, ferruginosos; conglomerados lenticulares, mal selecionados, com seixos arredondados a subarredondados.

Sua litologia é composta por arenitos, siltitos e conglomerados, sendo os arenitos avermelhados e esbranquiçados, demonstrando granulometria fina a média, com frações micro conglomeráticos; mostram estratificação cruzada de portes diversos, mas em muitos locais apresentam-se como conjuntos de estrutura maciça; são em geral feldspatos, com variáveis graus de caulinição (IBGE, 2010).

De acordo com Silva (2005), outra característica peculiar da Formação Alter do Chão é o predomínio de camadas arenosas estratificadas e caulificadas, que apresentam uma aparência esbranquiçada. Essas camadas mostram a ocorrência de processos de caulinição, que é uma transformação do feldspato em caulinita devido à ação de intemperismo.

Nas falésias em estudo, há um amplo predomínio de crostas lateríticas maduras, como mostrado na figura 8. Essas crostas lateríticas têm uma grande importância na evidência do controle tectônico na área e funcionam como formas de sustentação do relevo (**Figura 8**).

Figura 8 — Presença de crostas lateríticas na Falésia 4



Fonte: O autor (2023).

As crostas lateríticas encontradas na região amazônica são compostas principalmente por minerais de ferro e alumínio. Elas se desenvolveram ao longo do Cenozoico, em um ambiente de clima tropical. O processo de formação das crostas lateríticas está relacionado à intensa lixiviação dos solos tropicais, com a remoção dos elementos solúveis, como sílica e bases alcalinas, e o acúmulo de óxidos de ferro e alumínio (SILVA, 2005).

As formações lateríticas são de grande importância e servem de referência para os estudos neotectônicos. Costa et al. (1991), comenta que os lateritos na região amazônica desenvolveram-se em dois períodos distintos: Terciário Inferior e Terciário Superior.

Os lateritos mais antigos, chamados de Lateritos Maturos, possuem perfis bem evoluídos, profundos. São caracterizados por possuir topo horizonte ferruginoso,

ferro-aluminoso, bauxítico ou bauxítico-fosfático, que abriga a maioria dos depósitos de bauxita da região (COSTA et al., 1991). O autor ainda conclui que:

Essas crostas servem como referenciais na identificação de deslocamentos neotectônicos, manifestos em desníveis de platôs que podem ser observados em uma mesma área e entre áreas distintas. E a deformação desses lateritos indica que a neotectônica não atuou continuamente na região amazônica. Mas em pulsos, reconhecendo-se um primeiro que incidiu logo após a formação dos lateritos maduros, provavelmente no Mioceno, e um segundo, que sobreveio após a instalação dos lateritos imaturos, ainda no Pleistoceno. Adicionalmente, a deformação de stone lines derivadas de perfis imaturos serve como indicador de que a neotectônica se estendeu até os tempos recentes (p.26).

Uma outra sequência geológica encontrada no município de Iranduba são os reservatórios Quaternários, constituídos por arenito, areia quartzosa, cascalho, silte, argila e, localmente, turfa. Depósitos grossos a conglomeráticos representando resíduos de canais, depósitos arenosos relacionados a barras em forma de pontal, depósitos pelíticos representando transbordamentos e depósitos meândrico-lacustres, além de depósitos eólicos retrabalhados pelo vento (IBGE, 2010). As maiores acumulações desses reservatórios ocorrem nas extensões dos rios maiores, principalmente aqueles com cursos meândrico e sinuosos, como o rio Amazonas e seus tributários da margem direita (SILVA, 2005; IBGE, 2010).

### 3.2 Geomorfologia

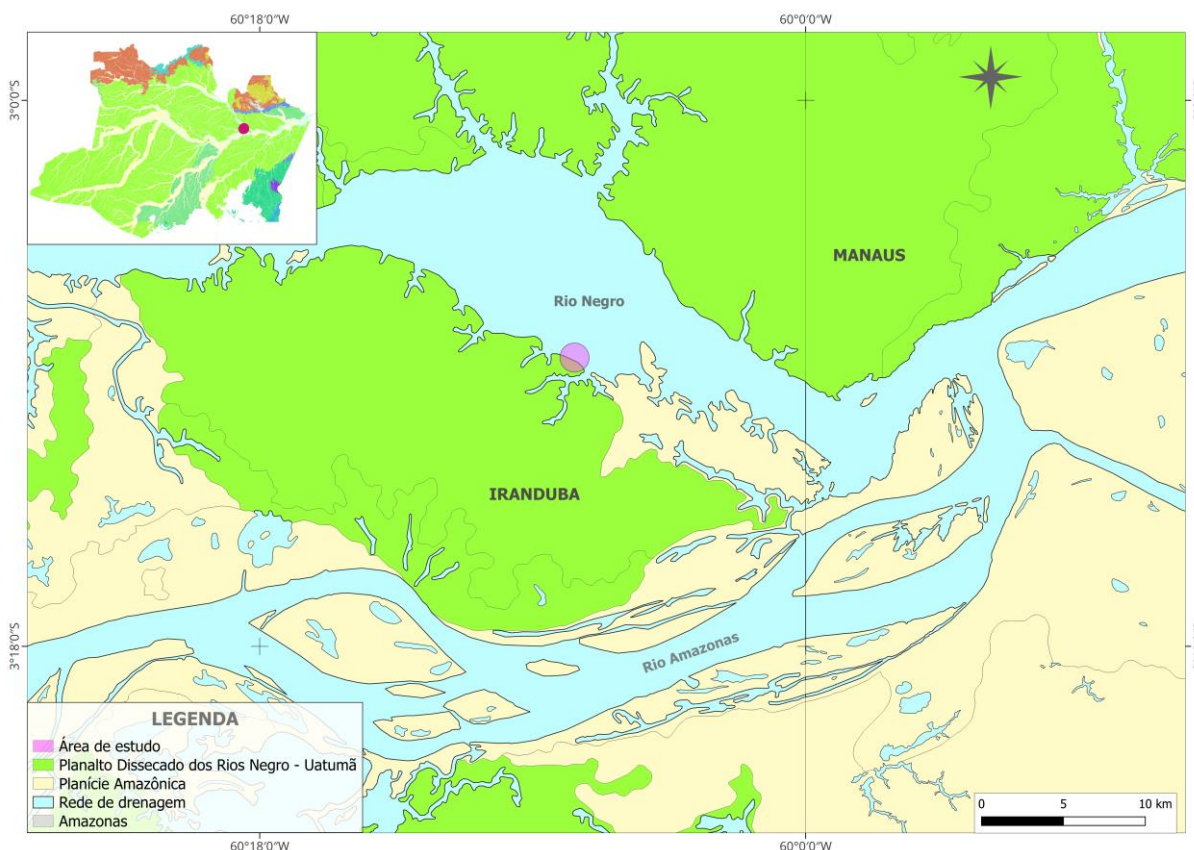
A geomorfologia do município de Iranduba é caracterizada pela presença dos Planaltos Dissecados do Rio Negro e Uatumã, além da Planície Amazônica (**Figura 9**). Em termos gerais, na Planície Amazônica, observa-se a predominância de vários níveis de terraços. As várzeas recentes apresentam características como diques e paleocanais, lagos de meandro e de barramento, bacias de decantação, furos, canais anastomosados e trechos de talwegues retinizados devido a fatores isolados (IBGE, 2023).

Os processos formadores dessa planície se baseiam na colmatagem de sedimentos em suspensão, os terraços orientados por ajustes tectônicos se aceleram pela evolução de meandros. Conforme o IBGE (2023), as Planície Amazônica



apresentam níveis de argilas, siltes e areias muito finas a grosseiras, estratificadas, localmente intercaladas por concentração ferruginosas e concentração orgânica.

Figura 9 — Geomorfologia do município de Iranduba e áreas adjacentes



Fonte: O autor (2023).

A área em estudo está localizada no Planalto Dissecado do Rio Negro e Uatumã. Essa região é caracterizada por apresentar uma topografia mais acidentada, com interflúvios tabulares de dimensões médias com topos convexos, separados por vales alargados, vertentes retilíneas ravinadas e com processos de movimentos de massa e desmoronamentos, (IBGE, 2023). Em relação às formações superficiais, conforme o IBGE (2023), a Unidade Planalto Dissecado do Rio Negro-Uatumã é caracterizada por uma elevada concentração de solos argilosos, que são facilmente desagregáveis e com a presença de laterita em seu perfil.

### 3.3 Vegetação

Os tipos de vegetações encontradas no município de Iranduba são: Floresta Ombrófila Densa Aluvial, Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, Floresta Ombrófila Aberta Aluvial além de vegetação característica de áreas onde se realiza a atividade de agricultura e pecuária (**Figura 10**) (IBGE, 2023).

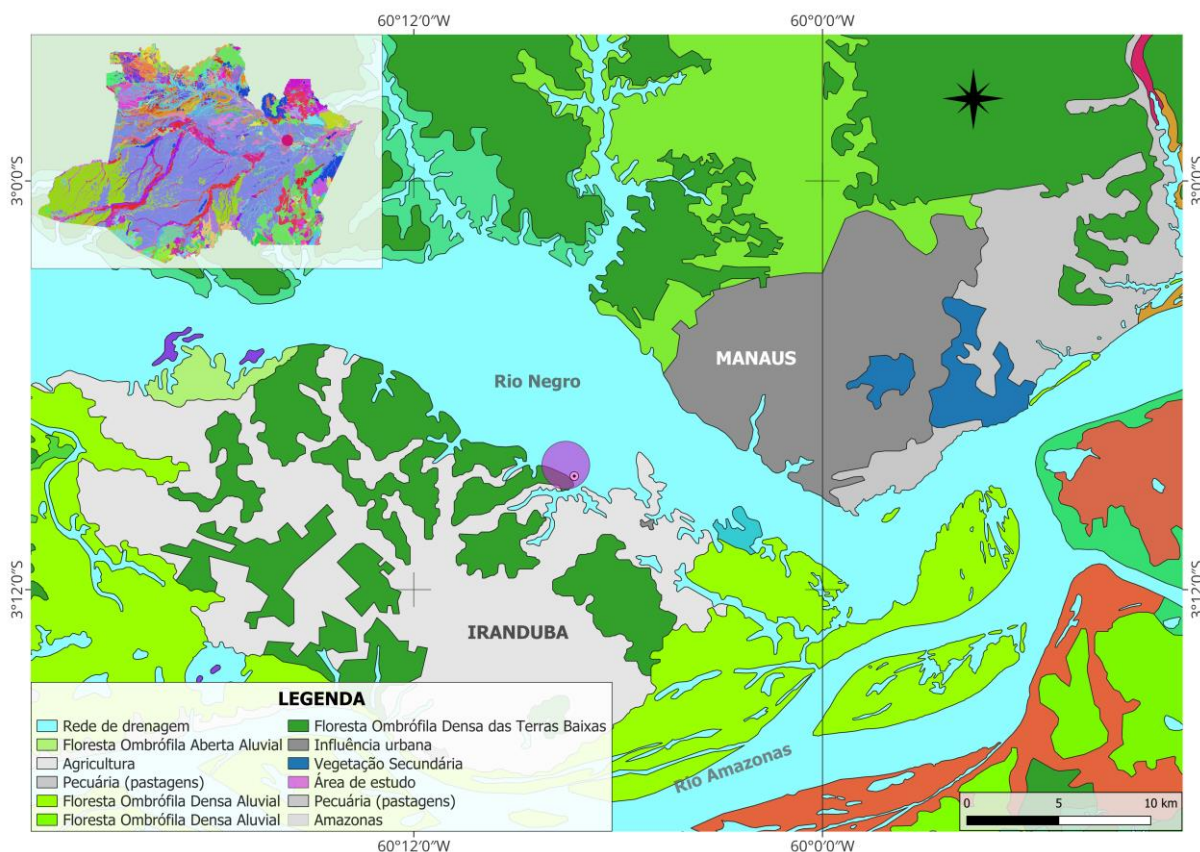
Na área adjacente às falésias, a vegetação predominante é a Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas. Como seu próprio nome indica, essa floresta é caracterizada por um clima ombrotérmico sem período biologicamente seco durante o ano, com mais de 2.300 mm de chuvas anuais e suas temperaturas médias oscilam entre 22° e 25°C, IBGE (1989).

Essa floresta é caracterizada por apresentar uma cobertura vegetal densa em um relevo ondulado, há um predomínio de árvores de grande porte e emergentes. Sua composição florística é variada em espécies arbóreas cujos indivíduos apresentam copas luxuriantes e troncos altos e retilíneos (IBGE, 1989). É comum encontrar uma submata com regeneração acentuada de espécies como breu e matamatá (IBGE, 2023).

É importante ressaltar que essa área enfrenta desafios relacionados à exploração seletiva e predatória, o que tem levado a uma descaracterização da floresta. Isso significa que a vegetação nativa tem sido impactada pela atividade humana, resultando em perda de biodiversidade e alterações no ecossistema.

Além dessas florestas, ocorrem também vegetações típicas de áreas onde são realizadas atividades agrícolas e pecuárias, provavelmente se referindo a áreas desmatadas ou com influência humana. Essas informações podem ser visualizadas no mapa da **Figura 10**.

Figura 10 — Vegetação do Município de Iranduba e áreas adjacentes



Fonte: O autor (2023).

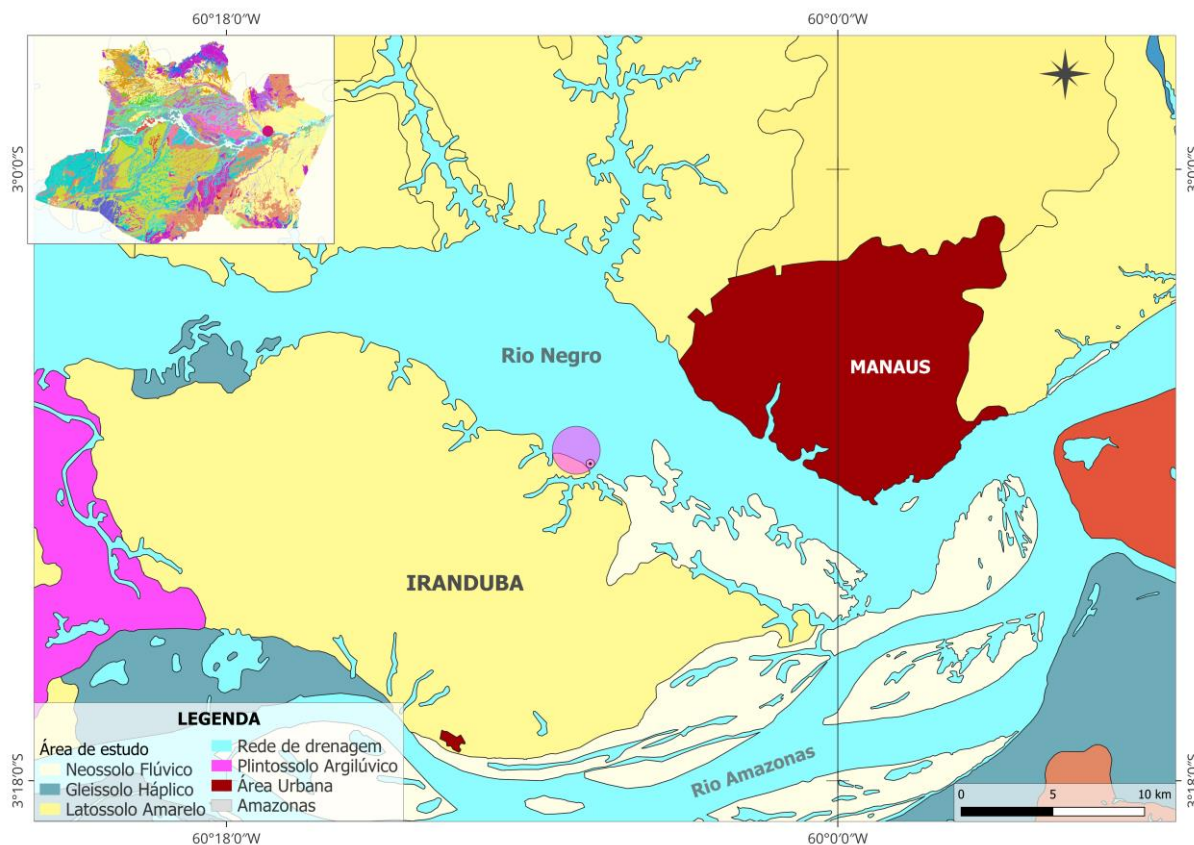
### 3.4 SOLOS

No município de Iranduba, de acordo com o IBGE (2010), são predominantes as seguintes classes de solos: Gleissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Neossolo Flúvico e Plintossolo Argilúvico (**Figura 11**).

Os Gleissolos Háplico são solos de áreas sujeitas à inundação, caracterizados por apresentarem teores de água elevados ao longo do ano. Geralmente, conforme IBGE (1989), os Gleissolos constituem-se de solos minerais pouco desenvolvidos, hidromórficos, com horizonte gel dentro de 60 cm da superfície, cujo desenvolvimento é fortemente ligado a oscilação do lençol freático próximo a superfície. Os Neossolos Flúvico são solos jovens, formados por sedimentos fluviais recentes, geralmente encontrados em áreas próximas a rios e córregos. Já os Plintossolo Argilúvico são solos resistentes, constituídos de plintitas, as quais podem afetar a drenagem e a penetração de raízes (EMBRAPA, 2020).

Na área em estudo, o solo predominante é o Latossolo Amarelo (**Figura 11**). Conforme a EMBRAPA (2020), são solos que se desenvolvem a partir de materiais sedimentares argilosos ou areno-argilosos da Formação Barreiras, que ocorre na região litorânea do Brasil, ou nos baixos platôs da região amazônica relacionados à Formação Alter-do-Chão.

Figura 11 — Classificação dos solos no município de Iranduba e áreas adjacentes



Fonte: O autor (2023).

Os Latossolos Amarelos são solos com matiz 7,5YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) que não se enquadram na classe anterior (EMBRAPA, 2018). Apresentam perfis muito homogêneos, com boa drenagem e baixa fertilidade natural. Ocupam grandes extensões de terras no Baixo em Médio Amazonas e Zonas Úmidas Costeiras (IBGE, 2007).

Distribui-se por amplas superfícies no Território Nacional, ocorrendo em praticamente todas as regiões, diferenciando-se entre si principalmente pela coloração e teores de óxidos de ferro, que determinaram a sua separação em quatro



classes distintas ao nível de subordem no Sistema brasileiro de classificação de solos (IBGE, 2007).

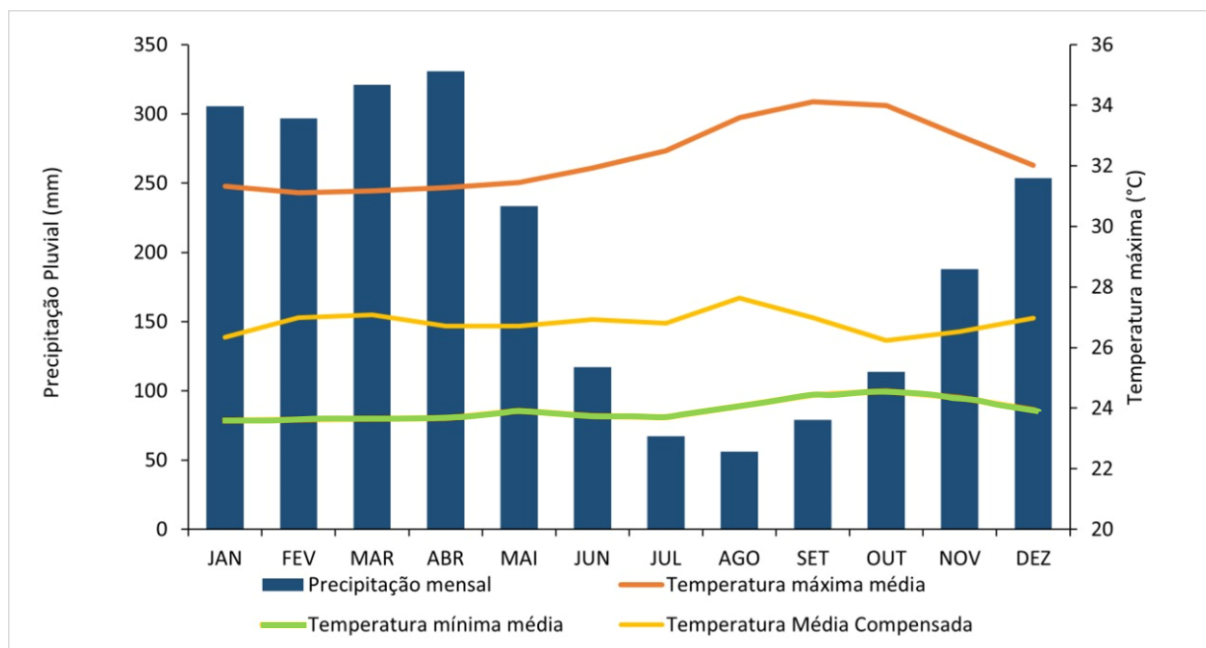
### 3.5 Clima

Com base em revisões de literatura como: Oliveira (1986); Figueroa (1999); e análise de dados do INMET; o estado do Amazonas, onde localiza-se a área em estudo, é influenciada pela Zona de convergência intertropical (ZCIT) e a Zona de convergência de Atlântico Sul (ZCAS). Oliveira (1986), comenta que a ZCIT é uma faixa de convergência de ventos localizados próximo à linha do Equador, onde os ventos alísios do hemisfério norte encontram os ventos alísios do hemisfério sul. Durante os meses de fevereiro a maio, a ZCIT se aproxima da costa do Brasil, o que resulta em um aumento da chuva no estado do Amazonas.

Já a ZCAS, conforme Figueroa (1999), é um sistema de circulação aérea que ocorre geralmente nas regiões norte e sudeste do Brasil. Ela forma um corredor de umidade que transporta grandes volumes de chuva para essas áreas. O período de atuação da ZCAS ocorre entre dezembro e março. Quando esse corredor de umidade se forma, é comum ocorrerem chuvas intensas e prolongadas.

O clima da Amazônia, de modo geral, é caracterizado como Equatorial Quente e Úmido. Conforme os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, com estação localizada em Manaus, mostram que na área de estudo, de maneira geral, há uma média anual de temperatura superior a 18°C e durante todos os meses do ano a média diária da amplitude térmica é de 4°C. Já o índice pluviométrico médio anual é de 2.000 a 2.300 mm e a umidade relativa do ar é alta, em torno de 88% no período chuvoso e de 77% no seco (**Figura 12**). (período de 1990-2020).

Figura 12 — Precipitação e Temperatura média da estação de Manaus



Fonte: O autor (2023).

As características do clima em Iranduba são semelhantes às do restante do estado (INMET, 2017), incluindo:

- **Temperaturas elevadas:** As temperaturas médias mensais variam entre 25°C e 30°C ao longo do ano, com pouca variação sazonal. As temperaturas mais altas geralmente são registradas durante a estação seca.
- **Umidade:** O município apresenta altos níveis de umidade atmosférica, com índices de umidade relativa do ar frequentemente acima de 80%. Isso ocorre devido à proximidade com a Floresta Amazônica, que contribui para a manutenção de uma atmosfera úmida.
- **Precipitação abundante:** Iranduba recebe uma quantidade significativa de chuvas durante todo o ano. A precipitação é bem distribuída, embora haja variações sazonais. A estação chuvosa geralmente ocorre de dezembro a maio, com intensas chuvas e tempestades tropicais. A estação seca ocorre de junho a novembro, com menor volume de chuvas.
- **Insolação:** Apesar da alta umidade e das chuvas frequentes, a insolação também é relativamente alta em Iranduba. Mesmo durante a estação chuvosa, ainda há períodos de sol e céu parcialmente nublado.

### 3.6 Hidrografia

De modo geral, na Amazônia são encontrados variados tipos de rios, os quais podem ser classificados de acordo com suas composições físicas, químicas, cor e origem (SIOLI, 1984). O autor classifica 3 tipos de rios: rios de águas brancas, rios de águas claras e rios de águas pretas. Os rios de águas brancas possuem grande quantidade de sedimentos de origem Andina e ricos em nutrientes (MARINHO, 2020).

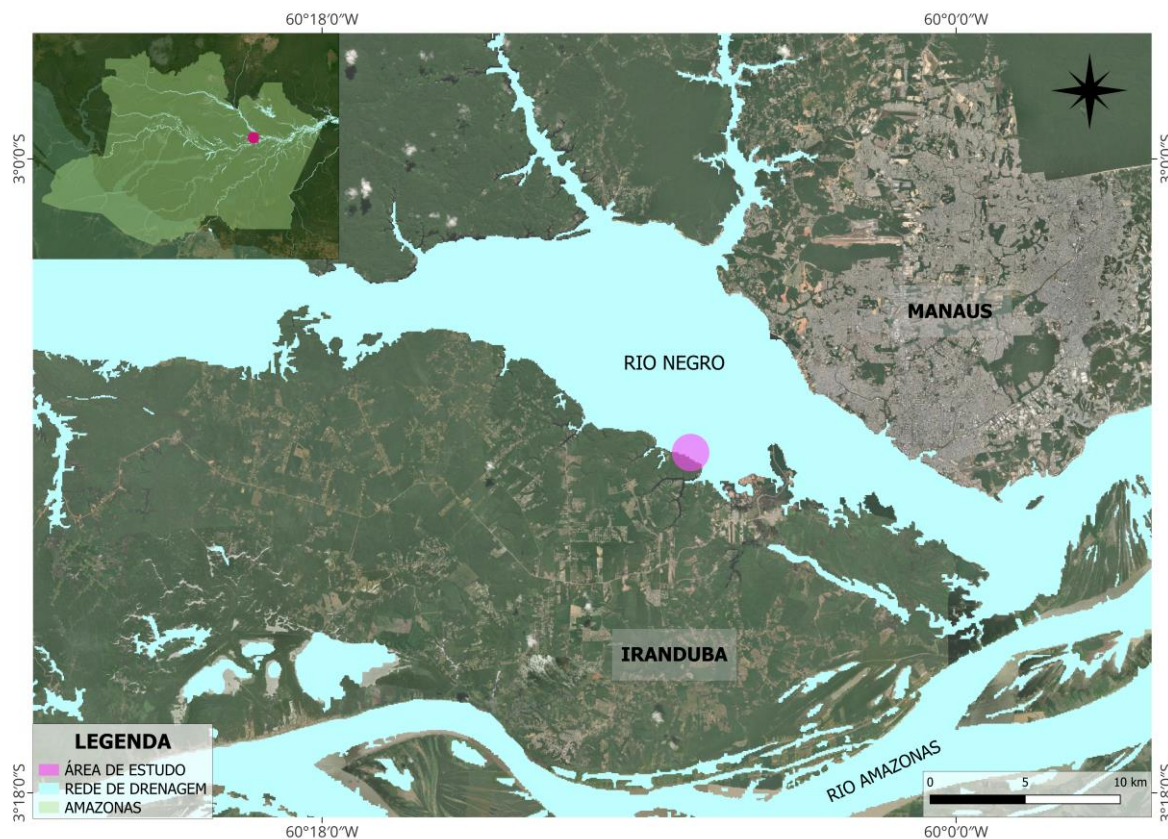
Junk (1983), comenta que os rios de águas brancas são áreas geologicamente com fortes probabilidades para erosões. Por causa disto são rios que mostram intenso gradiente no curso superior e carregam durante seu curso alta carga detrítica e dissolvida em suspensão, dando tonalidades amareladas, barrentas e turvas. A maioria dos sedimentos do Cretáceo estão localizadas nas áreas onde encontram-se as nascentes destes rios, os quais são materiais parcialmente ricos em sais minerais, e assim formando uma composição química da água praticamente neutra, com pH alterando de 6,5 a 7.

Os principais tipos de rios de águas brancas na Amazônia são: Amazonas, Madeira, Purus e Juruá. Eles têm suas margens inconstantes, especialmente quando são moldados por depósitos fluviais holocênicos. A vazão destes rios causa forte migração nas margens dos canais, quando acontece a associação da capacidade com a carga transportada (ALVES, 2019).

Os rios de águas claras indicam ausência de material em suspensão; alguns podem apresentar uma coloração esverdeada, como é o caso do rio Tapajós (SIOLI, 1985). Por outro lado, os rios de águas pretas são caracterizados pela pobreza em partículas em suspensão, como é o caso do rio Negro.

No município de Iranduba encontra-se na confluência de dois grandes sistemas fluviais: o Rio Solimões (Amazonas) e o Rio Negro (**Figura 13**). O rio Amazonas é o mais extenso e icônico do mundo, com uma vazão líquida média de 209.000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, o rio nasce na Cordilheira dos Andes, no Peru, e atravessa diferentes países, antes de desaguar no Oceano Atlântico (RILDO, 2017).

Figura 13 — Hidrografia do município de Iranduba e áreas adjacentes



Fonte: O autor (2023).

Os rios de águas pretas geralmente apresentam pouca competência para remover materiais consolidados das margens e pouca capacidade de transporte, no entanto, onde o material das margens é menos resistente a ação da água corrente muda (CARVALHO, 2006). No caso do rio Negro, ao adentrar na formação Solimões, as margens sofrem erosão lateral por solapamento, tal como observado na área desta pesquisa.

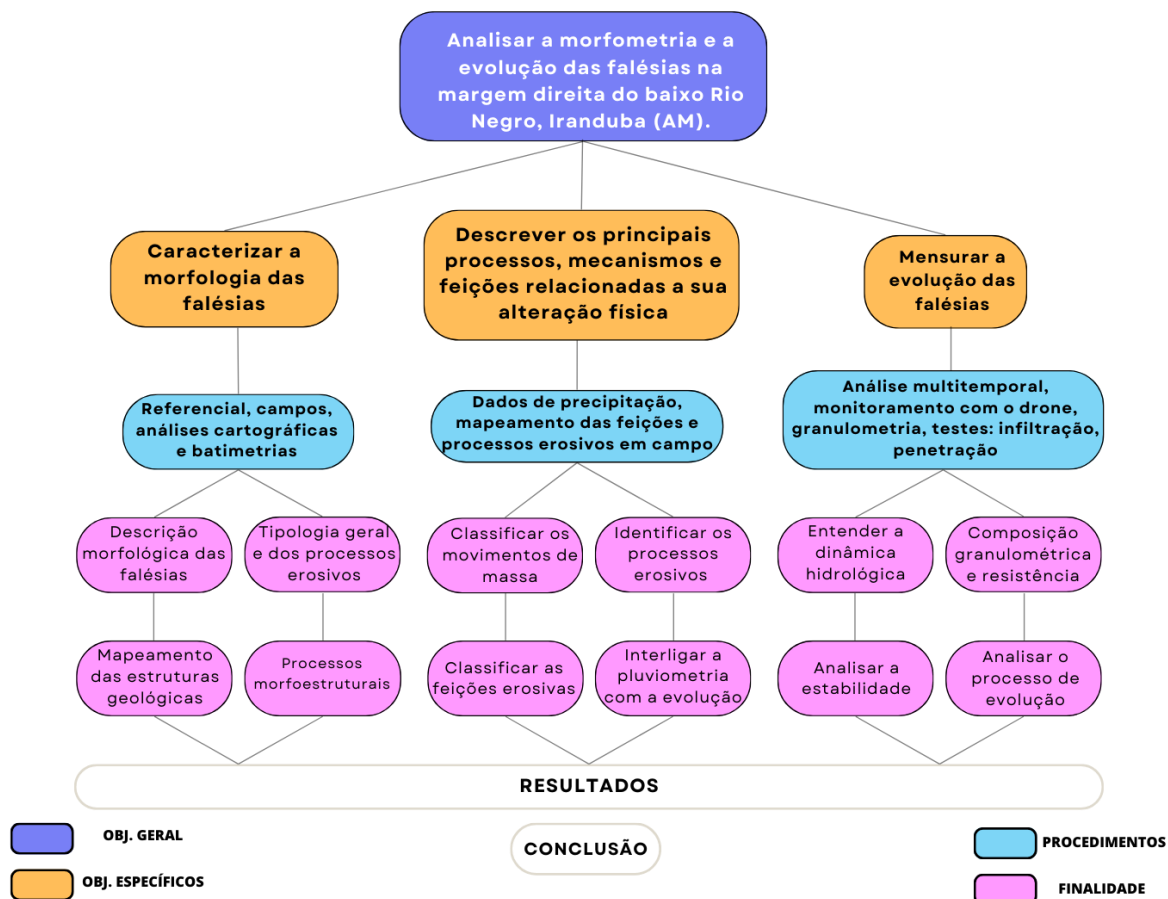
A rede hidrográfica do Rio Negro, segundo Marinho (2020), desenvolve-se na região de fronteira Brasil-Colômbia-Venezuela-Guiana até a confluência com o Rio Solimões, próximo a cidade de Manaus. Quanto ao sistema hidrológico da Bacia do rio Negro, o período de enchente ocorre entre dos meses de dezembro a junho, com pico em julho, e a vazante entre agosto-outubro e seca em novembro (MARINHO, 2020).

#### 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa compreende um estudo do espaço geográfico que agrega as interações naturais, que não visa somente o estudo da paisagem em si, mas as interligações entre as variáveis físicas como: solo, vegetação, hidrologia, clima. Para compreensão da dinâmica do relevo tomará como embasamento teórico conceitual a abordagem Sistêmica de Ludwig Von Bertalanffy (1901-1972).

Os procedimentos que foram executados na pesquisa foram subdivididos em três etapas: a primeira consistiu em um aparato teórico e bibliográfico em busca de fundamentos que visam validar os dados da pesquisa em teses, dissertações, livros e artigos; a segunda em trabalhos de campo, a fim de coletar dados e informações da área de estudo e; a terceira abrange o trabalho de gabinete, que incluem o emprego de dados cartográficos com o uso de imagens de satélites da área, cartas topográficas e imagens de alta resolução espacial oriundas de VANT (**Figura 14**).

Figura 14 — Procedimentos metodológicos



Fonte: O autor (2023).

#### 4.1 Caracterização morfológicas das Falésias

A caracterização da morfologia das falésias em estudo envolve análises de diversos aspectos, como forma, altura, inclinações, feições presentes, análise das rochas, estruturas geológicas, processos de formação e evolução das falésias ao longo do tempo.

No que diz respeito à descrição das características morfológicas e dos efeitos da tectônica, foi adotada a metodologia proposta por Santos et al. (2005). Essa abordagem incluiu um levantamento de referências teóricas sobre a geologia, litologia, hidrografia e geomorfologia da região amazônica, buscando compreender e obter respostas sobre os processos que ocorreram no passado, a fim de melhor compreender a formação do relevo atual.

Primeiramente, as cinco falésias em estudo foram identificadas utilizando imagens de satélite e a ferramenta Google Earth Pro. Com base nessa identificação, foram realizadas visitas de campo nos dias 10/11/2022 e 11/11/2022 para reconhecimento das falésias. Durante as visitas, as cinco falésias foram mapeadas utilizando um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e onde suas características, como dutos, sulcos e terraços, foram registradas (**Figura 15 e 16**).

Os trabalhos de campo realizados serviram para identificar a geomorfologia predominante e as características geológicas que podem ser observadas a olho nu nas falésias. Para esse fim, foram utilizadas fotografias aéreas com o intuito de obter uma visão panorâmica da área e um registro das dimensões das feições, assim como altura, largura, comprimento, inclinação e orientação. (**Figura 15 e 16**).



Figura 15 — Registro do sobrevoo do VANT na falésia fluvial em estudo



Fonte: O autor (2023).

Figura 16 — Registro do sobrevoo do VANT na falésia fluvial em estudo



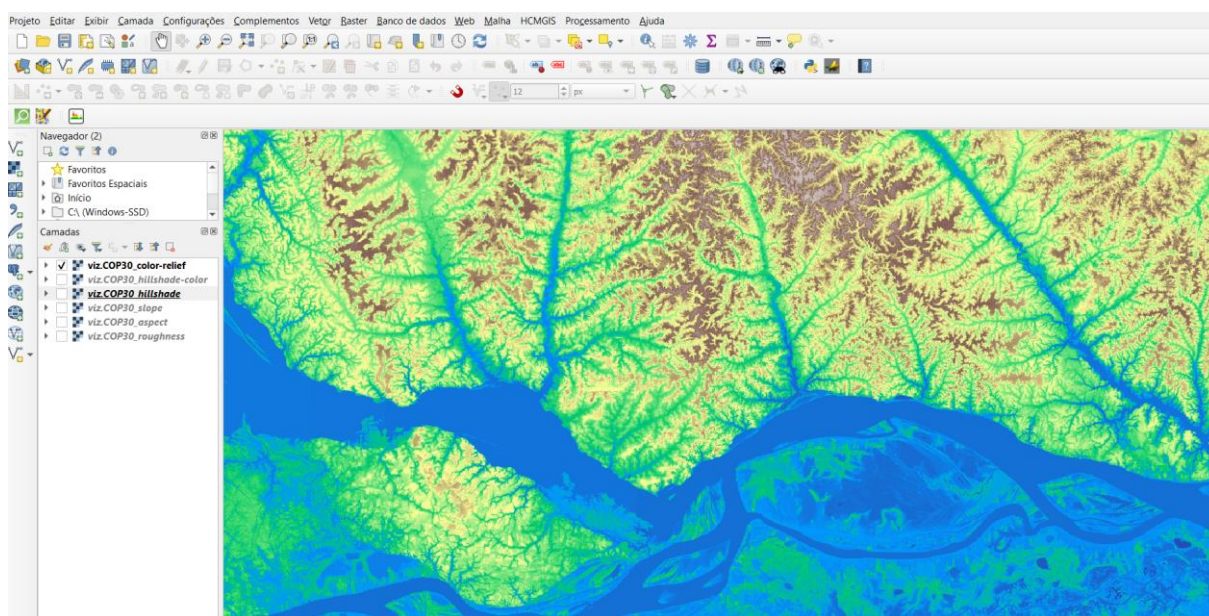
Fonte: O autor (2023).

Para estabelecer uma ligação abrangente com a área de estudo e a tectônica local, tornou-se essencial revisar literaturas relevantes relacionadas à tectônica da região amazônica, assim como aos grandes rios amazônicos e outros aspectos físicos. Dentre os estudos consultados, destacam-se as contribuições de Sternberg (1950), Costa et al. (1996), Forsberg et al. (2000), Latrubesse (2002), Franzinelli e Igreja (2002), Silva (2005) e Franzinelli (2011). Essas fontes forneceram uma base sólida para a compreensão dos processos tectônicos e das características físicas que influenciam diretamente a formação e evolução das falésias na região em questão.

Além disso, complementando essas informações, foram realizadas coletas de dados em campo. Um dos principais objetivos desse levantamento foi fornecer uma descrição e interpretação mais precisa da paisagem geomorfológica da região investigada, abrangendo tanto os elementos externos quanto as características climáticas. Através desse levantamento de dados cartográficos, foi possível realizar uma interpretação mais detalhada, incluindo o mapeamento do controle estrutural e a identificação da direção das falhas. Essas informações coincidiram com a localização das falésias que estão sendo estudadas, fornecendo uma base sólida para a análise da influência da tectônica local na formação dessas feições geológicas.

Para a coleta de dados cartográficos, foram utilizadas imagens de satélites, cartas topográficas fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pelo *Open Topography*. O *Open Topography* desempenhou um papel crucial ao facilitar o acesso a dados topográficos de alta resolução, disponibilizando-os online. Esse acesso permitiu a obtenção de modelos digitais de elevação (MDE) que, por sua vez, foram processados utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS 3.30 (**Figura 17**).

Figura 17 — Processamento dos dados MDE.



Fonte: O autor (2024).



Também foram realizadas medições batimétricas transversais em três pontos na área circundante das falésias. Para esse fim, utilizou-se um ecobatímetro GPS/sonar Garmin Echomap 52dv, instalado em uma embarcação de pequeno porte. Conforme Santos et al. (2001) explicam, a ecobatimetria é uma técnica que possibilita a medição da profundidade da água ao enviar pulsos de ondas sonoras do equipamento em direção ao leito do rio. Esses pulsos sonoros são refletidos de volta para o aparelho, o que permite fornecer informações relativas às profundidades ao longo do percurso d'água.

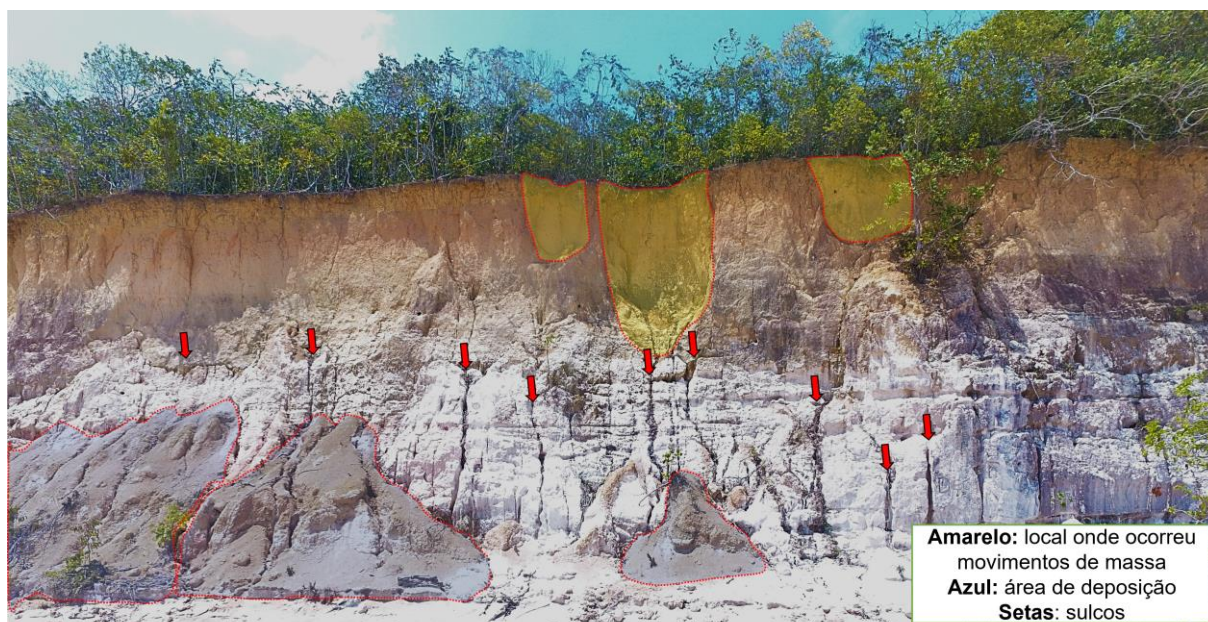
Foram construídos perfis batimétricos com base nos dados coletados pelo ecobatímetro digital. A cada intervalo de 10 segundos, um dado do visor era registrado em um caderno de campo. Esse dado correspondia à profundidade do rio naquela localização específica. As atividades de campo foram conduzidas durante o período de vazante, em 05 de dezembro de 2020.

#### **4.2 Descrição dos principais processos, mecanismos e feições relacionados a alteração física das Falésias**

Devido à escassez de trabalhos publicados sobre falésias na região amazônica, foi realizado um levantamento abrangente de literatura relacionada aos agentes e processos que atuam em falésias em geral. O objetivo foi obter um melhor entendimento dos processos envolvidos nesses ambientes e aplicá-los na análise das falésias na Amazônia. Essa revisão da literatura permitiu a obtenção de informações relevantes sobre os fatores geológicos, climáticos e biológicos que influenciam a formação e evolução das falésias, garantindo para um maior embasamento no estudo específico das falésias amazônicas.

Além disso, foram realizadas atividades de campo para realizar uma varredura das características erosivas e dos movimentos de massa ocorrentes (**Figura 19**), bem como para analisar suas interligações com a pluviometria na região. Com base nesses dados coletados em campo, foi elaborado um gráfico representativo da análise do nível da água da área em estudo. Para isso, os dados foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Porto de Manaus, fornecendo informações relevantes sobre os padrões hidrológicos locais.

Figura 19 — Registro da falésia 1 com ocorrência de movimentos de massa e sulcos.



Fonte: O autor (2023).

Com a combinação da revisão da literatura especializada e dos dados coletados em campo, foi possível identificar e mapear os principais feições erosivas (sulcos, dutos) e movimentos de massas atuantes nas falésias da região.

#### 4.3 Mensuração da evolução das Falésias

Para compreender a dinâmica hidrológica que influencia a estabilidade da falésia, foi crucial empregar uma abordagem multidisciplinar que envolve análises de dados pluviométricos, testes de campo, a utilização do drone, análise cartográfica e o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs). Essa combinação de métodos teve como objetivo alcançar uma compreensão completa e precisa dos processos erosivos e das características das falésias.

Foram realizados os seguintes testes em campo: teste de infiltração, teste de resistência à penetração, e coletas de solo. Conforme Coelho Neto (2009) descreve, o processo de infiltração no solo é uma interação complexa entre os mecanismos de entrada de água na superfície, o armazenamento e a transmissão da umidade no solo.

- Teste de infiltração

Para realizar o teste de infiltração, foi utilizado o infiltrômetro de Hills, seguindo a metodologia detalhada de Coelho Netto (2002), conforme ilustrado nas **Figuras 20 e 21**.

Figura 20 — Teste de infiltração na falésia 5



Fonte: O autor (2023).

Figura 21 — Ficha utilizada para o teste de infiltração



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
LABORATÓRIO DE ANÁLISE E TRATAMENTO DE SEDIMENTOS E SOLOS

**TESTE DE INFILTRAÇÃO**

No. \_\_\_\_\_

Local: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Responsáveis: \_\_\_\_\_

Altura inicial: \_\_\_\_\_

| Ord. | Tempo Min. | Altura na régua cm | Vol. Infiltrado mm | Vol. Acumulado mm | Tx. Infiltração mm/min. |
|------|------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|
| 1    |            |                    |                    |                   |                         |
| 2    |            |                    |                    |                   |                         |
| 3    |            |                    |                    |                   |                         |
| 4    |            |                    |                    |                   |                         |
| 5    |            |                    |                    |                   |                         |
| 6    |            |                    |                    |                   |                         |
| 7    |            |                    |                    |                   |                         |
| 8    |            |                    |                    |                   |                         |
| 9    |            |                    |                    |                   |                         |
| 10   |            |                    |                    |                   |                         |
| 11   |            |                    |                    |                   |                         |
| 12   |            |                    |                    |                   |                         |
| 13   |            |                    |                    |                   |                         |
| 14   |            |                    |                    |                   |                         |
| 15   |            |                    |                    |                   |                         |
| 16   |            |                    |                    |                   |                         |
| 17   |            |                    |                    |                   |                         |
| 18   |            |                    |                    |                   |                         |
| 19   |            |                    |                    |                   |                         |

Fonte: O autor (2023).

Para avaliar a capacidade de infiltração da água no solo, utilizou-se um dispositivo de medição conhecido como infiltrômetro de Hills, composto por um cilindro de anel simples. Esse instrumento permite monitorar o processo de infiltração da água de forma precisa. Seguindo a metodologia descrita por Soares (2022), O procedimento envolve a inserção do infiltrômetro a uma profundidade de 5 centímetros, com 10 centímetros expostos acima da superfície do solo. O solo ao redor do cilindro foi previamente umedecido, e a parte interna do cilindro foi preenchida com água.

O experimento foi considerado concluído quando a taxa de infiltração se tornou constante, ou seja, quando o valor da leitura da régua de água infiltrada se repetiu pelo menos três vezes. Isso ocorreu geralmente após o período inicial de 20 minutos. Essa abordagem permitiu determinar de forma confiável a capacidade de infiltração do solo em estudo.

- Teste de resistência a penetração

Trata-se de um método amplamente utilizado para avaliar a resistência do solo. Esse teste tem como objetivo determinar a capacidade de suporte do solo, identificar possíveis camadas distintas e avaliar a compactação do subsolo (SOARES, 2022). No caso específico do estudo das falésias, o teste de penetração do solo foi realizado utilizando um penetrômetro de impacto. Esse equipamento consiste em uma haste metálica que é inserida verticalmente no solo. A haste recebe impactos de uma massa conhecida, geralmente 1 kg, a uma altura fixa de 50 cm. Ao realizar o teste, a haste é empurrada no solo por meio dos impactos da massa. A resistência encontrada durante a penetração é medida e registrada (**Figura 22**).

Figura 22 — Ficha de teste de penetração



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
LABORATÓRIO DE ANÁLISE E TRATAMENTO DE SEDIMENTOS E SOLOS

**TESTE DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO**

No. \_\_\_\_\_

Local: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Responsáveis: \_\_\_\_\_

| Ord. | Altura<br>Cm | Batidas 1 | Batidas 2 | Batidas 3 | Média |
|------|--------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1    | 0 - 5        |           |           |           |       |
| 2    | 5 - 10       |           |           |           |       |
| 3    | 10 - 15      |           |           |           |       |
| 4    | 15 - 20      |           |           |           |       |
| 5    | 20 - 25      |           |           |           |       |
| 6    | 25 - 30      |           |           |           |       |
| 7    | 30 - 35      |           |           |           |       |
| 8    | 35 - 40      |           |           |           |       |
| 9    | 40 - 45      |           |           |           |       |
| 10   | 45 - 50      |           |           |           |       |

Fonte: O autor (2023).

Em cada uma das cinco falésias em estudo, foram realizadas três repetições (B1, B2 e B3) do teste de resistência do solo. Em cada teste, uma contagem do número de impactos foi registrada para avaliar a resistência do solo em diferentes pontos das falésias. Os resultados dessa precisão foram expressos em MPa, com a conversão sendo realizada automaticamente por meio da planilha da SondaTerra®.

- Coleta de amostras de solos



Durante as atividades de campo, além dos testes de infiltração e penetração, procedeu-se à coleta de amostras de solo das cinco falésias em estudo. Para isso, foi utilizado um trado holandês com haste ajustável. O processo de coleta consistiu em inserir o trado no solo e, a cada intervalo de 10 centímetros de profundidade, retirar uma amostra. Esse procedimento foi repetido sequencialmente até atingir uma profundidade de 100 centímetros (**Figura 23**). Após a coleta, as amostras de solo foram identificadas com base nas cores utilizando a tabela de *Munsell Soil Color Charts*.

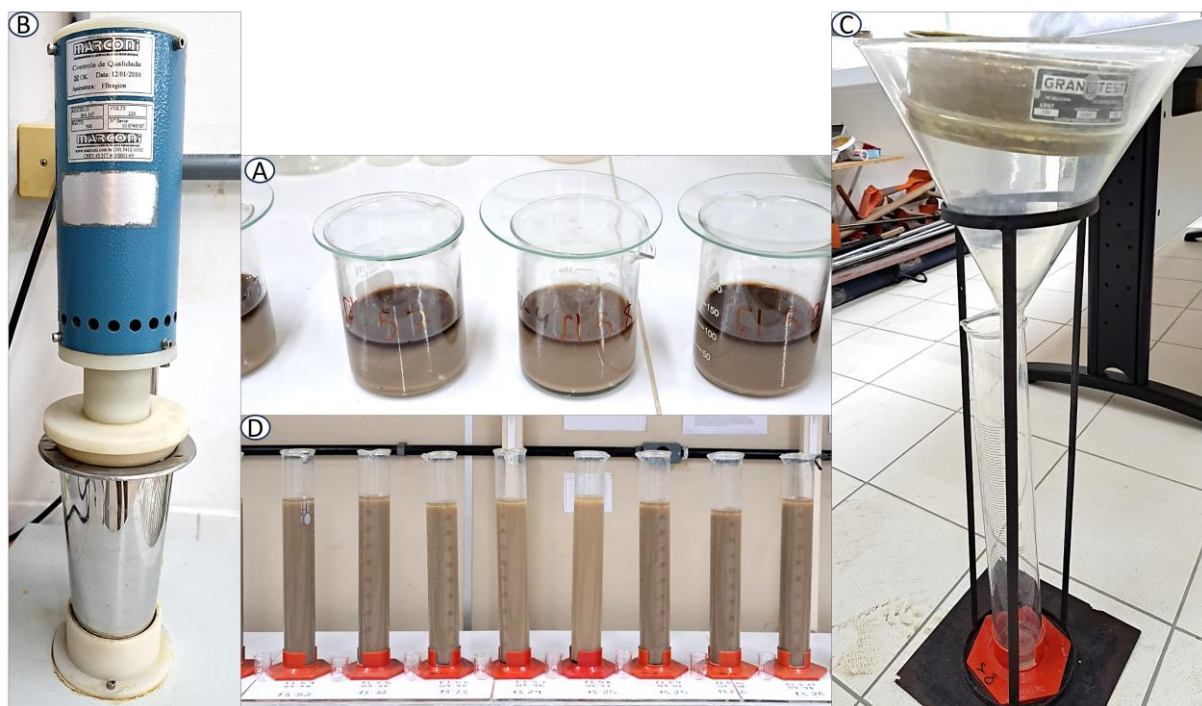
Figura 23 — Amostras coletadas na falésia 1



Fonte: O autor (2023).

Em laboratório foi realizada a análise granulométrica, que é a quantificação da distribuição por tamanho das partículas individuais de minerais do solo, cujo objetivo é determinar o tamanho em que se encontra um determinado material (EMBRAPA, 2017). As amostras coletadas seguiram os procedimentos (**Figura 24**) descritos pela EMBRAPA (1997) para granulometria, densidade de partículas, densidade do solo e porosidade total.

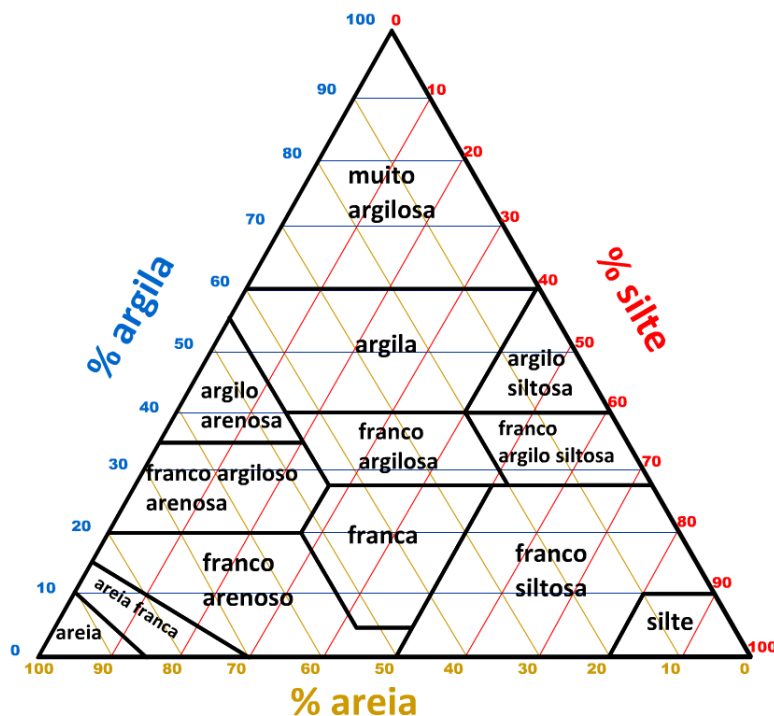
Figura 24 — Procedimentos da análise granulométrica (A. amostra em processo de decantação; B. amostra no agitador magnético; C. amostra sendo lavada com água destilada; D. Amostra de finos decantando para a pipetagem).



Fonte: O autor (2023).

Após determinar os percentuais de argila, silte e areia, as amostras foram definidas quanto à sua textura utilizando o Triângulo de Classes Texturais do Solo, um método amplamente adotado tanto pela Embrapa quanto pelo SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos). Esse método permite categorizar o solo com base na proporção desses três componentes, proporcionando uma maneira eficaz de descrever e classificar as características texturais do solo (**Figura 25**).

Figura 25 — Triângulo de Classes texturais do Solo



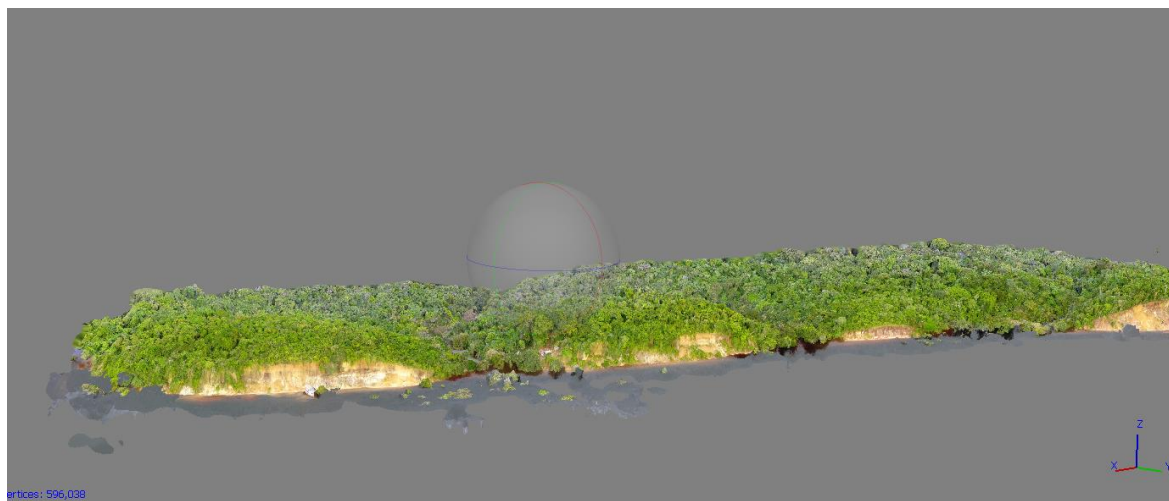
Fonte: O autor (2023).

- VANT

O mapeamento utilizando Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) teve como objetivo acompanhar as mudanças ocorridas nas falésias ao longo do período desta pesquisa. No entanto, enfrentou-se desafios relacionados às configurações de voo e às condições climáticas, o que impossibilitou a realização de um processo de estimativas das taxas de expansão das falésias. Uma alternativa viável foi a realização de um monitoramento, durante o qual foram criados modelos em 3D das cinco falésias por meio do software Agisoft (**Figura 26**).



Figura 26 — Falésia 1 processada no Agisoft Metashape



Fonte: O autor (2023).

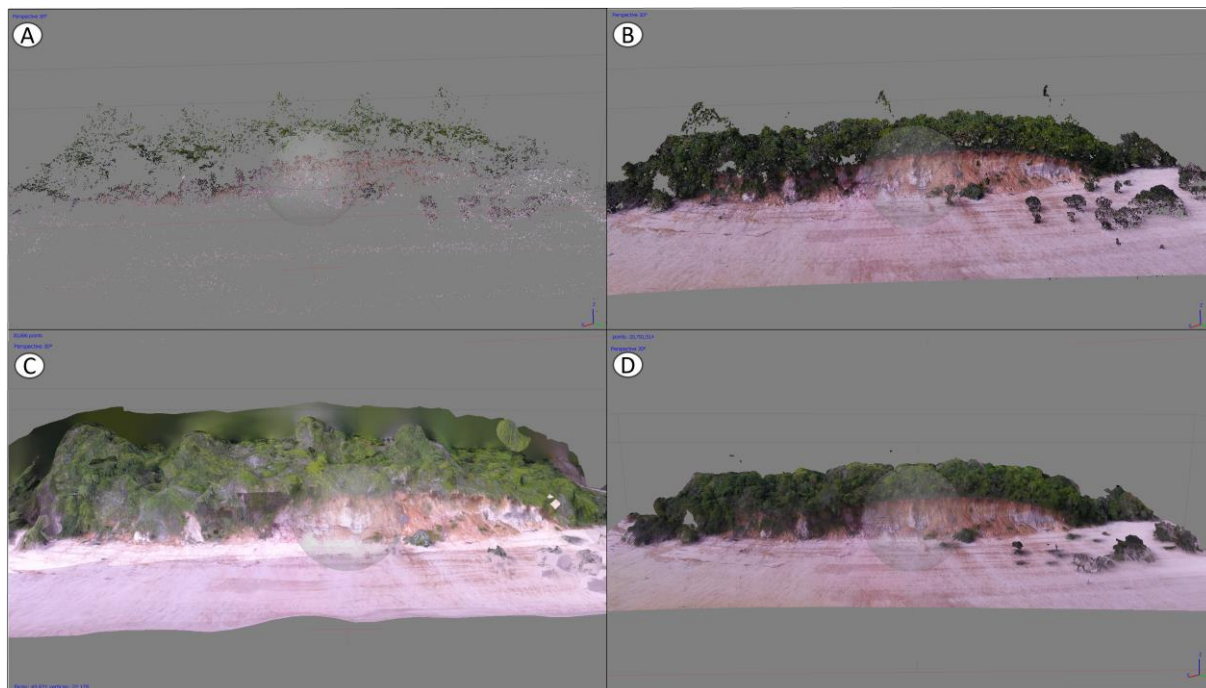
O *Agisoft Metashape* é um software de processamento de imagens que possibilita a criação de modelos tridimensionais do terreno (MDT) a partir de fotografias capturadas por drones ou outras fontes de imagem. Em sua interface, a barra de ferramentas abriga um fluxo de trabalho que reúne todas as etapas necessárias para o processamento das imagens, culminando na geração do ortomosaico. Essas etapas compreendem um total de seis fases, conforme detalhado na **Tabela 1** e ilustrado na **Figura 27**.

Tabela 1 — Fluxo de trabalho do Agisoft Metashape

| Procedimentos            | O que visa                                                                                                                                              |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alinhar fotos            | Determina as coordenadas do terreno                                                                                                                     |
| <i>Build Dense Cloud</i> | Construir nuvem densa, diminui os espaços vazios para representar uma área melhor mapeada                                                               |
| Construir Modelo         | Geração de superfícies tridimensionais ou modelos 3D                                                                                                    |
| Construir Textura        | Melhora o aspecto visual do projeto                                                                                                                     |
| Build DEM                | Representação em 2D em formato raster do MDS e MDT                                                                                                      |
| Build Orthomosaic        | As feições das imagens são projetadas ortogonalmente com escala constante, são apresentados os deslocamentos devido ao relevo e à inclinação da câmera. |

Fonte: O autor (2024).

Figura 27 — Fluxo de trabalho da Falésia 1. A. Alinhamento de fotos; B. Construção de nuvem densa; C. Modelo 3D; D. Modelo de Mosaico

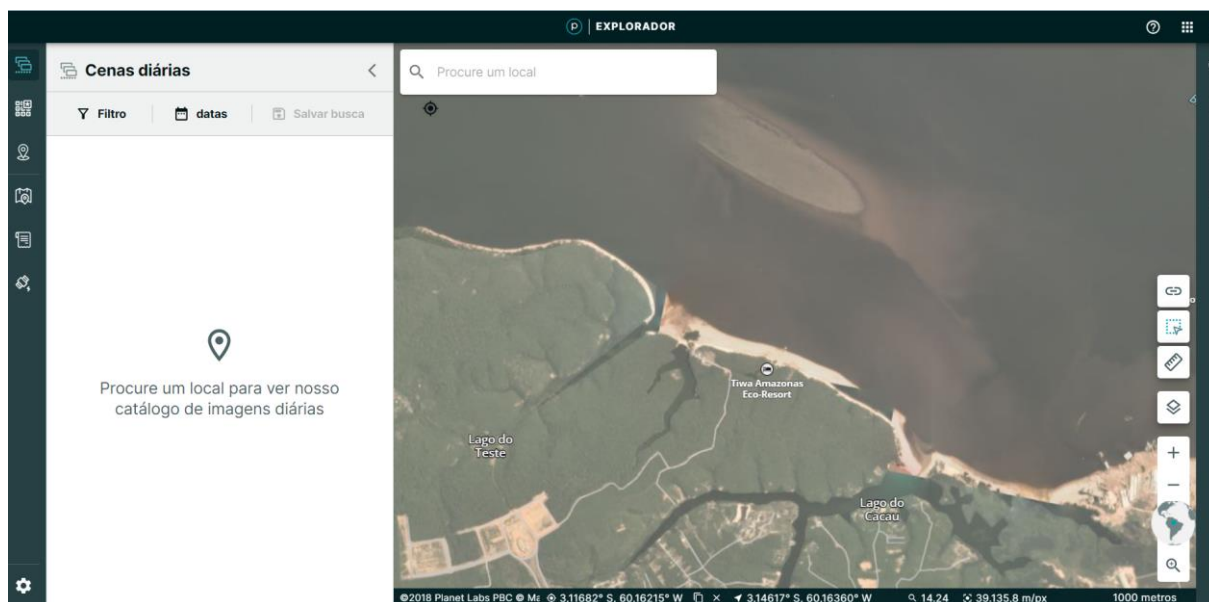


Fonte: O autor (2024).

Ao utilizar o *Agisoft Metashape*, as imagens obtidas das falésias podem ser processadas para gerar modelos em 3D. Esses modelos tridimensionais contêm informações detalhadas sobre a topografia e a geometria das falésias, proporcionando uma análise precisa e detalhada das alterações que ocorrem ao longo do tempo.

Para conduzir a análise de retração das cinco falésias, obtivemos duas imagens da plataforma *Planet.com*, capturadas em momentos distintos: uma em 08/09/2016 e outra em 28/10/2023. Essas imagens foram adquiridas por meio da plataforma Planet (<https://www.planet.com/explorer/>) para explorar as opções disponíveis de imagens de satélite adequadas para a análise (**Figura 28**).

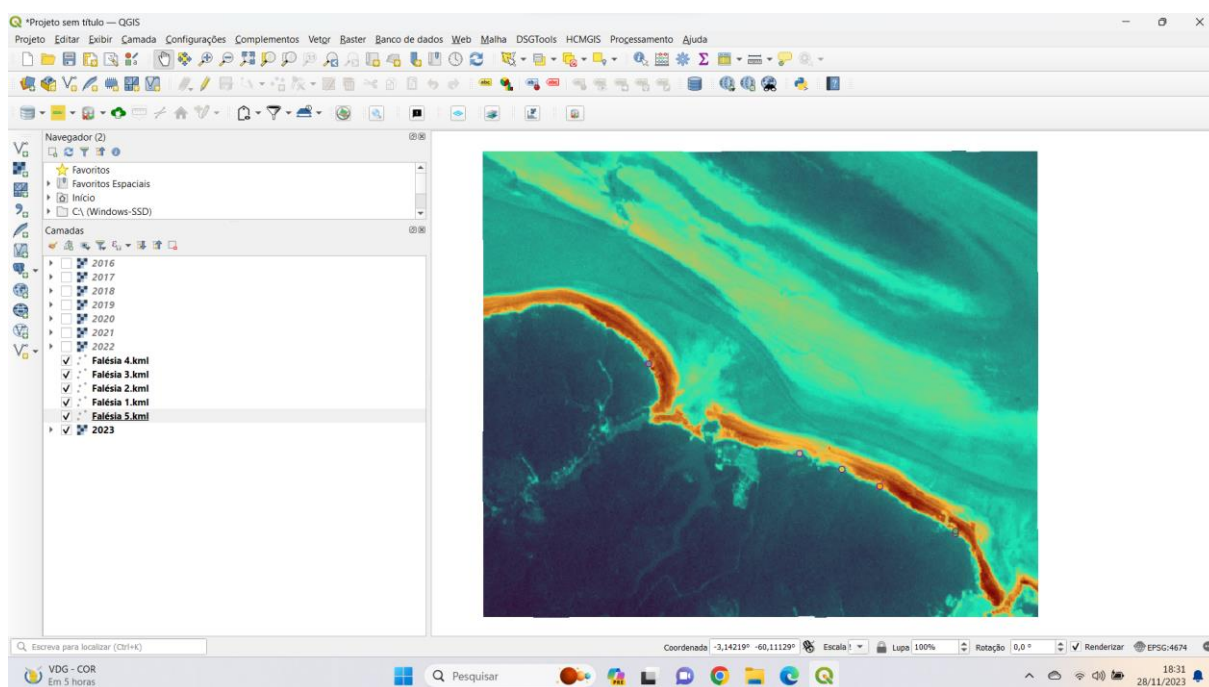
Figura 28 — Plataforma Planet Explores



Fonte: Planet Explorer, 2023.

As imagens PlanetScope foram analisadas e processadas no Sistema de Informação Geográfica (QGIS) para avaliar as representações das mudanças erosivas nas falésias ao longo do período em questão (**Figura 29**). O objetivo principal foi compreender as transformações ocorridas nas falésias ao longo do tempo e identificar padrões consistentes de erosão e desgaste.

Figura 29 — Processamento das imagens no QGIS



Fonte: O autor (2023).

A Planet disponibiliza gratuitamente imagens de sua série histórica com resolução espacial variando entre 3 a 5 metros para os participantes de seu programa de educação e pesquisa. Os sensores em órbita da Planet.com fazem parte da constelação que captura imagens diárias da área de estudo. (COSTA *et al.*, 2023).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste tópico consistem em informações e interpretações obtidas a partir de procedimentos já realizados nas falésias

### 5.1 Tendências e Variações Morfológicas nas Falésias

As falésias fluviais são predominantemente esculpidas pela ação dos rios e das chuvas, porém, sua formação e evolução são complexas e influenciadas por uma variedade de fatores. Além da interação com o meio ambiente, a litologia (seja ígnea, metamórfica ou sedimentar), morfologia, atividade tectônica, padrões de ventos, intervenção humana, variações nos níveis de água e índices pluviométricos desempenham papéis cruciais. Essa interação contínua e multifacetada molda progressivamente as falésias, desencadeando uma evolução constante e dinâmica ao longo do tempo.

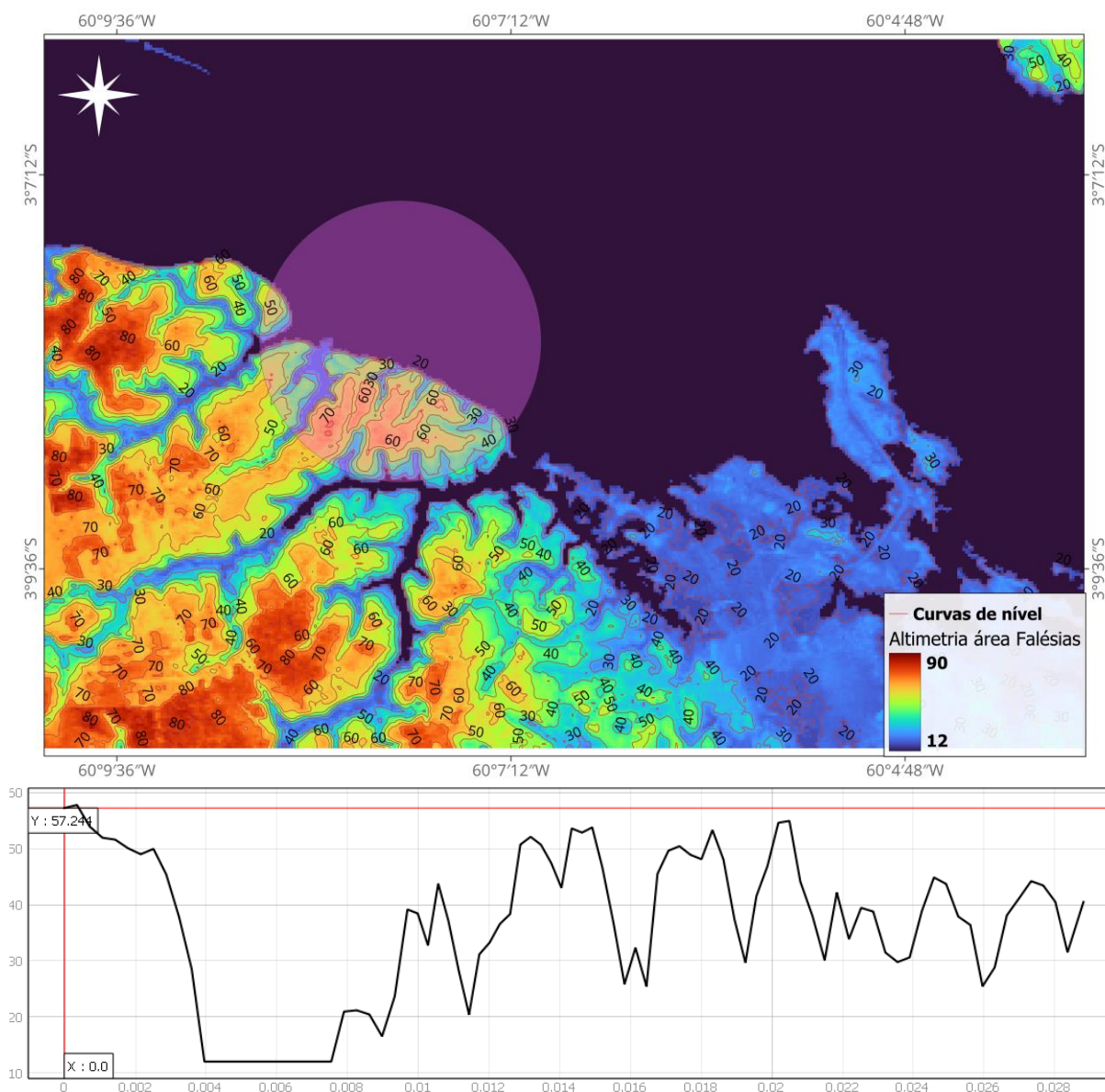
Essas feições acentuadas, quando expostas à água, são moldadas pela erosão na base da encosta, o que pode resultar no desmoronamento das camadas superiores. Esse processo de solapamento contribui significativamente para a escultura e evolução das falésias ao longo do tempo.

As cinco falésias em estudo encontram-se na margem direita do Rio Negro. Ambas estão localizadas na parte central da Bacia Sedimentar do Amazonas, onde afloram os depósitos da Formação Alter do Chão. Esta formação consiste em uma sequência de sedimentos clásticos de origem continental, intemperizados e inconsolidados (IBGE, 2010), inseridos dentro de uma geomorfologia característica do Planalto Dissecado do Uatumã. Quanto à litologia, as falésias são compostas por argilitos, folhelhos, arenitos e siltitos.

No que diz respeito à geomorfologia, de acordo com Franzinelli e Igreja (2002), a área das falésias faz parte do Planalto Planaltos Dissecados do Rio Negro e Uatumã, que é caracterizado por relevos que incluem interflúvios tabulares e colinas. Especificamente no baixo curso do Rio Negro, onde está localizada a área em estudo, as margens apresentam-se escarpadas, dando origem às falésias. Os autores também observam que a linearidade e o escarpamento dessas margens são características que sugerem uma origem tectônica.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) oferece uma representação tridimensional detalhada da superfície terrestre na área circundante às Falésias. A **Figura 30** destaca uma variação altimétrica significativa, indo de 12 a 90 metros, indicando a presença de diferentes características topográficas na região. Em contraste, as próprias falésias demonstram altitudes mais elevadas, variando de 9 a 57,2 metros, conforme ilustrado no perfil altimétrico. Essa diferença altimétrica destaca a imponência das falésias em relação ao terreno ao redor.

Figura 30 — Perfil Digital de Elevação e Perfil topográfico na área das Falésias (contorno rosa).



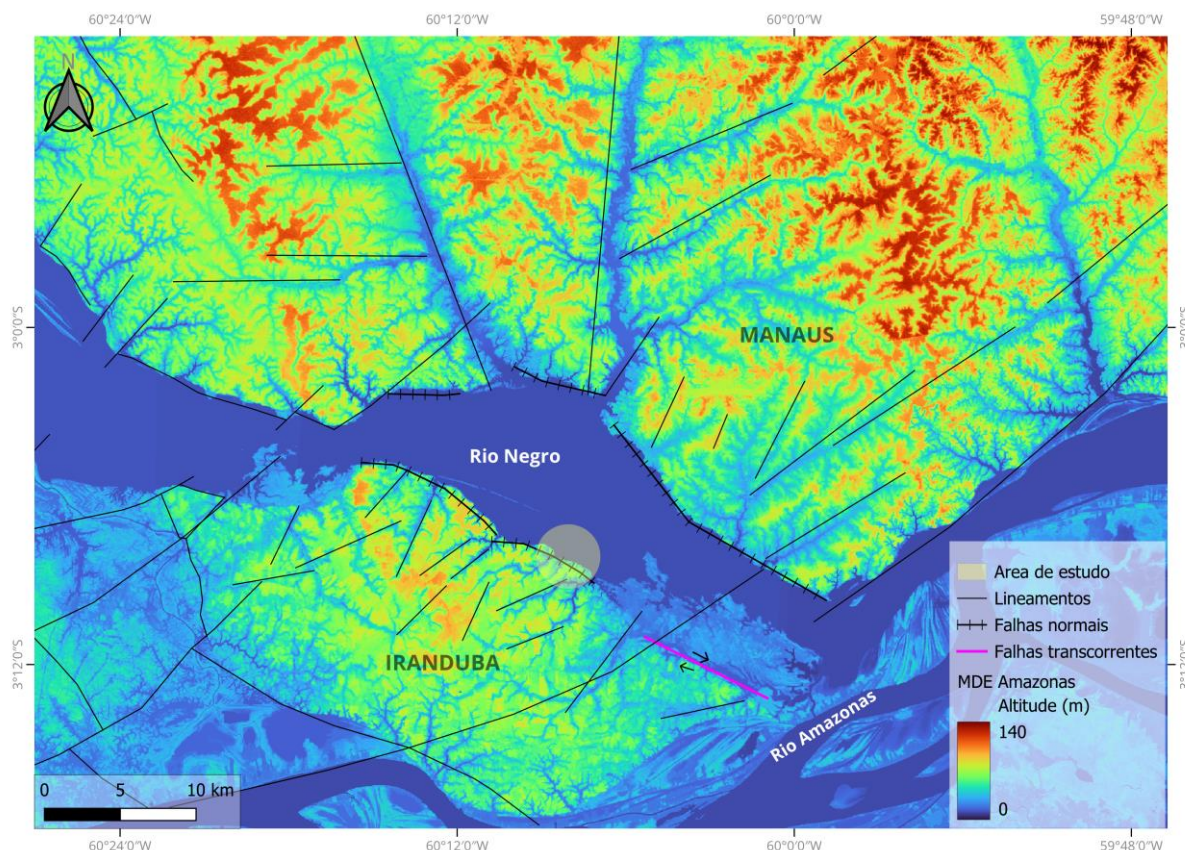
Fonte: COPDEM (2024). Org: O autor (2024).

Quanto à tectônica da área em estudo, a interpretação de imagens de satélite e cartas de sombreamento possibilitou a identificação de fotolineamentos, sugerindo atividade neotectônica. Vários autores, como Sternberg (1950), Forsberg (2000), Franzinelli e Igreja (2002), Sarges (2008) e Sarges et al. (2011), apontam para evidências da forte orientação NW-SE do canal principal do Rio Negro, assim como para os distintos padrões de drenagem retilínea encontrados em diversos rios adjacentes, como nos rios Unini e Carabinami. Essa análise sugere que a região em estudo faz parte de um lineamento estrutural de direção geral noroeste-sudeste, o que



evidencia uma interação direta das cinco falésias estudadas com a atividade tectônica local (**Figura 32**).

Figura 32 — Estruturas da Tectônica na área em estudo



Fonte: COPDEM (2024). Org: O autor (2024).

Os lineamentos, segundo O'Leary et al. (1976), são feições lineares simples ou compostas da superfície, na qual as partes alinhadas em arranjo retilíneo ou suavemente curvilíneo, que difere distintamente do padrão das feições adjacentes e que reflete um fenômeno da subsuperfície.

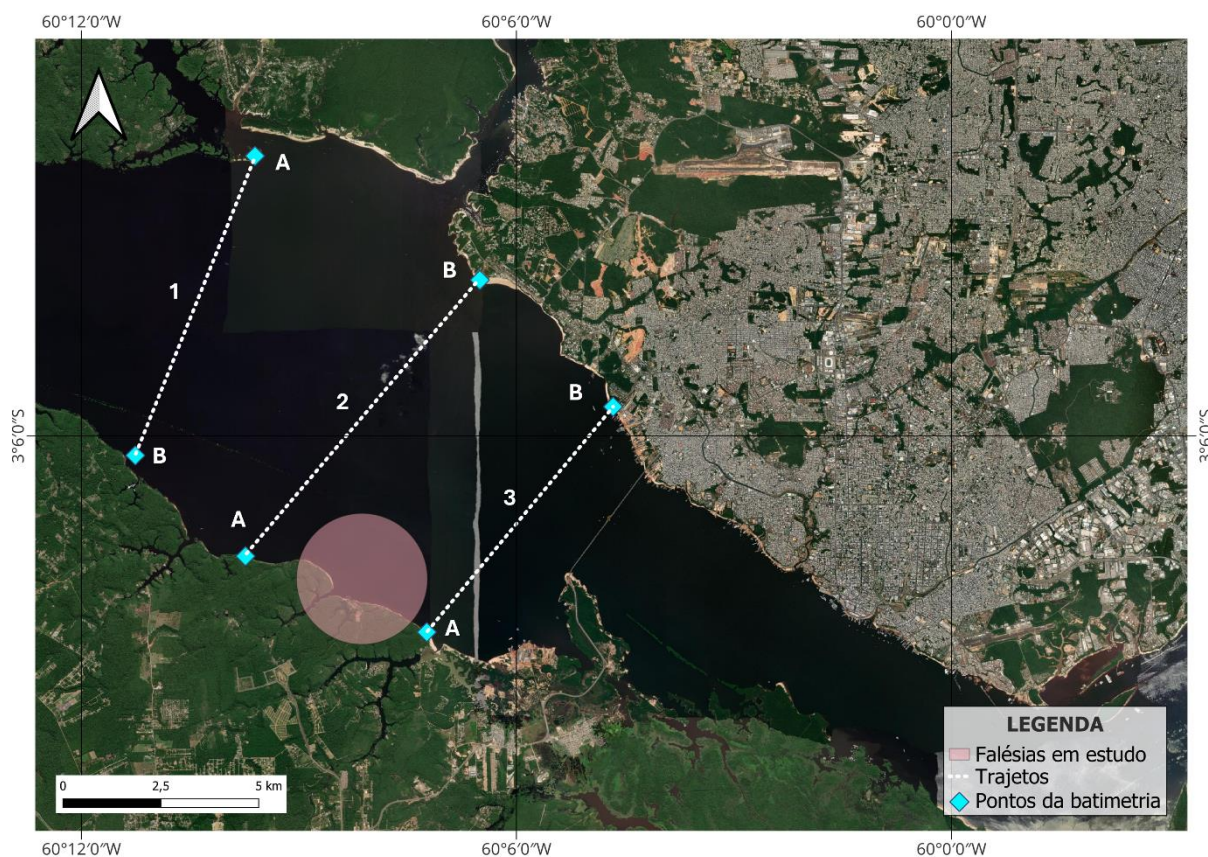
Como observado no mapa, na região sudoeste de Manaus e Iranduba, são identificados lineamentos com direção NW-SE. Silva (2005) observa que na zona oeste de Manaus, esses lineamentos são marcados por uma orientação contínua segundo N30-35W, associada à escarpa de falha da margem esquerda do Rio Negro. A área em estudo está situada em uma zona de falhas normais. Franzinelli e Igreja enfatizam que a retidão e o escarpamento das margens são características que evidenciam a orientação tectônica desses vales fluviais. É notável que a margem direita do baixo Rio Negro apresenta uma direção geral N45W, sugerindo uma falha



normal com mergulho para o nordeste, o que está em conformidade com outras falhas normais bem definidas na margem esquerda.

Também foram realizados 3 perfis batimétricos da área do entorno das falésias (Figura 33), com o objetivo, segundo Carvalho (2012), de produzir esquemas que ilustrem a morfologia dos canais e sua relação com as ilhas e processos de erosão e deposição.

Figura 33 - Trajetos batimétricos.

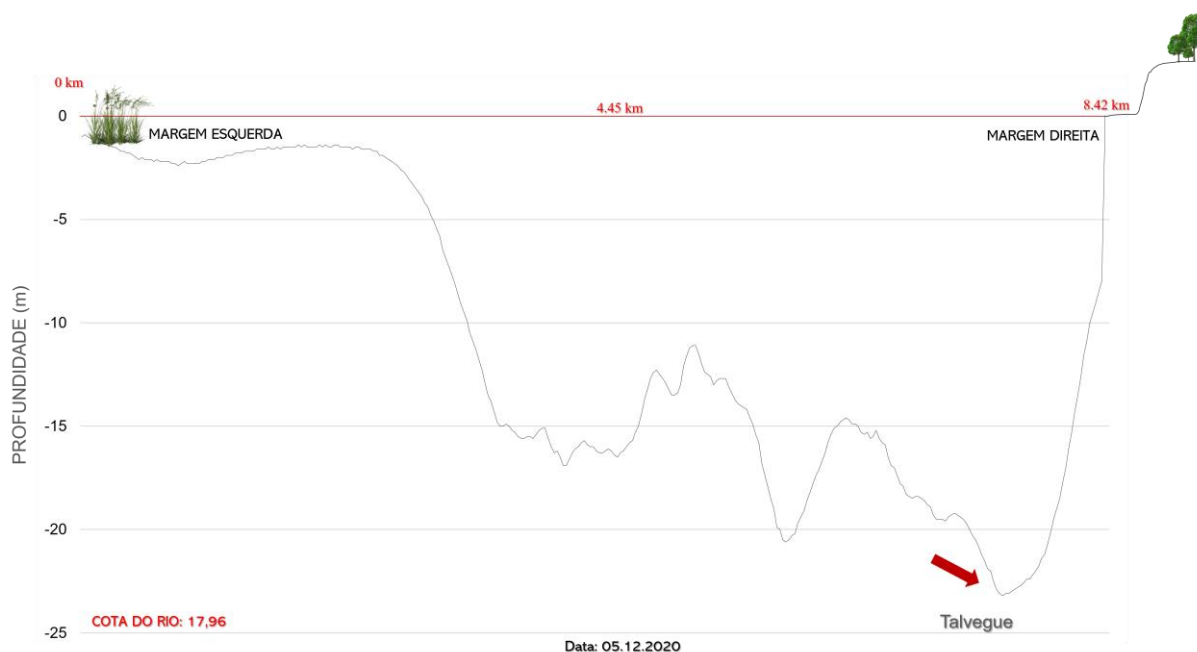


Fonte: O autor (2022)

O perfil batimétrico nº1 foi realizado a partir da Ilha da Vila do Livramento (margem esquerda do Rio Negro: 3° 2'7.76"S 60° e 9'36.12"O) em direção a uma falésia na margem direita do Rio Negro (3° 6'17.95"S e 60°11'24.48"O). Nesse ponto, de uma margem para a outra, o Rio Negro possui 8,42km de largura. A seção transversal mostra o canal com leito assimétrico e com maior profundidade junto à margem direita. Pode-se concluir que a área da falésia na margem direita está ameaçada pelos ajustes do canal, pois a relação entre forma, direção do fluxo e

posição do talvegue chega a atingir 23 metros a uma distância significativa da margem, o que promove condições para uma ocorrência de erosão lateral e vertical acelerada nas proximidades dessa área (**Figura 33**).

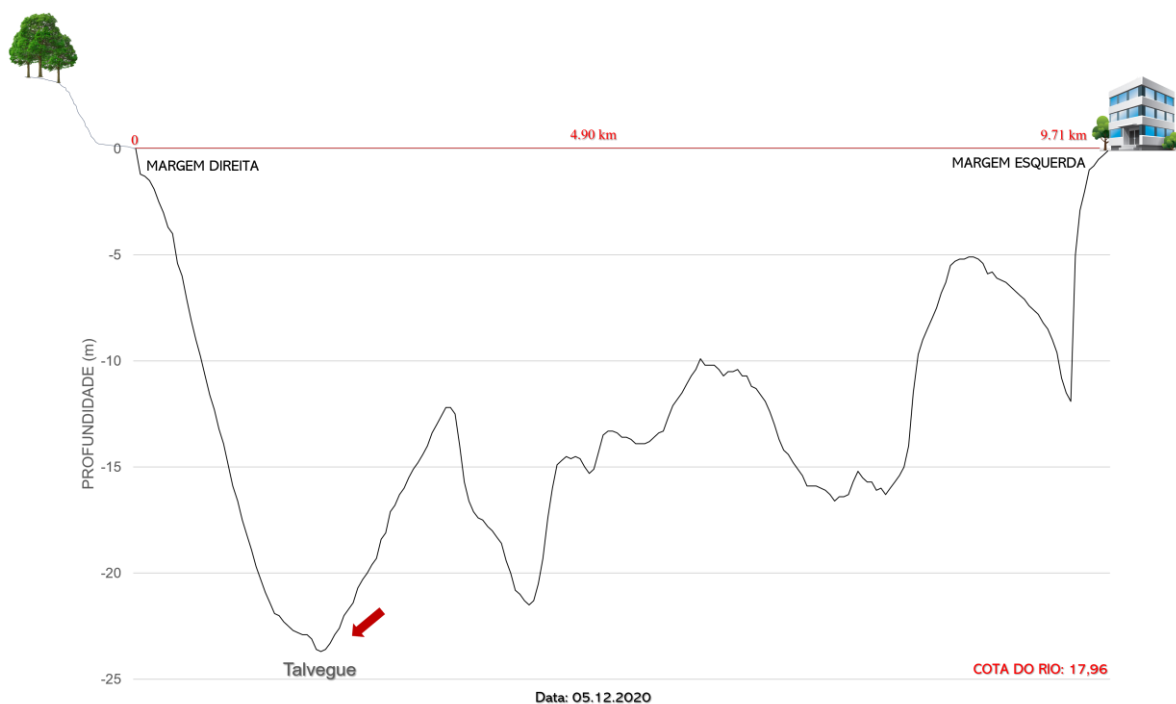
Figura 33 — Perfil batimétrico 1 (A-B)



Fonte: O autor (2024).

O perfil batimétrico nº2 foi realizado a partir da área entorno da Falésia (margem direita do Rio Negro: 3° 6'17.95"S e 60°11'24.48"O) até o Hotel Tropical (margem esquerda do Rio Negro: 3° 3'51.14"S e 60° 6'30.68"O). Neste ponto, o Rio Negro alcança uma largura de 9.71km, e o talvegue encontra-se encaixado na margem direita, com uma profundidade de 24 metros a uma distância significativa da margem direita, semelhante à do perfil nº1 (**Figura 34**).

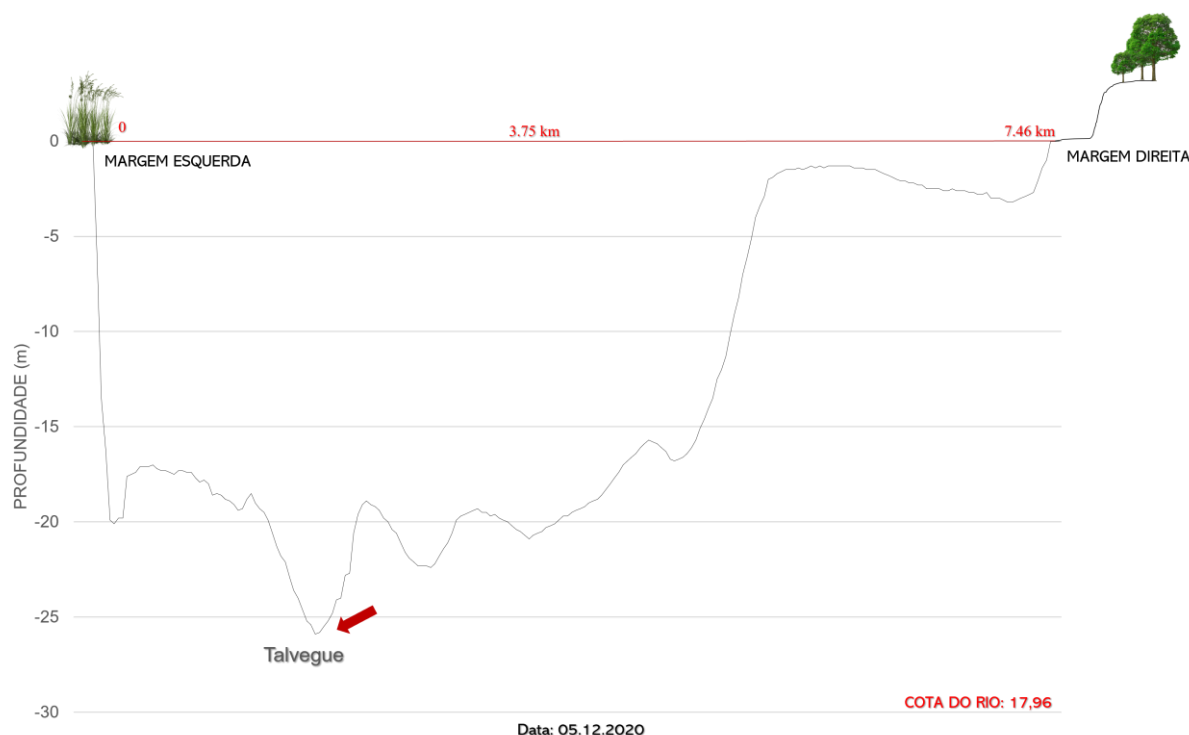
Figura 34 — Perfil batimétrico 2 (B-A)



Fonte: O autor (2024).

O perfil nº3 foi realizado entre o Centro de Construção (margem esquerda do Rio Negro: 3° 5'35.93"S e 60° 4'39.95"O) e a Falésia 1 de estudo (margem direita do Rio Negro: 3° 8'39.91"S e 60° 7'17.29"O). Nesse ponto, o canal atinge 7.46km, e o Talvegue chega a alcançar 27 metros a uma distância de significativa da margem esquerda. Próximo à margem direita, a seção transversal aponta a existência de um canal mais raso em comparação ao da margem esquerda, com sinuosidades que chegam a 20 metros (**Figura 35**).

Figura 35 — Perfil batimétrico 3 (A-B)



Fonte: O autor (2024).

Com base nos três perfis batimétricos coletados na área do entorno das Falésias, é possível observar uma variação na morfologia do canal ao longo das diferentes seções do rio, sugerindo diferentes processos de sedimentação, erosão e deposição ocorrendo em diferentes partes da região em estudo.

Além disso, as variações na largura e profundidade do rio Negro ao longo dos perfis indicam áreas de maior e menor dinâmica fluvial, onde áreas com maior largura e profundidade podem indicar maior transporte de sedimentos ou volume de água. Os perfis também indicam áreas potencialmente vulneráveis a processos erosivos, como as Falésias localizadas na área ao entorno onde os talvegues estão encaixados, sugerindo a ocorrência de erosão lateral e vertical acelerada devido à interação complexa entre a forma do canal, direção do fluxo e posição do talvegue.

A primeira falésia, localizada nas coordenadas 3° 8'39.91"S 60° 7'17.29"O (**Figura 36**), apresenta um perfil escarpado variando entre 13 e 18 metros de altura, revelando características distintas de solapamento fluvial e sinais evidentes de erosão pluvial. Sua composição litológica é marcada pela exposição de uma camada ferruginosa no topo, composta por sedimentos finos de coloração laranja escura. De acordo com a tipologia de falésias proposta por Maia et al. (2022), a falésia em

questão pode ser classificada como íngreme erosiva. Essa classificação sugere que a falésia apresenta uma inclinação acentuada e é caracterizada por processos de erosão que resultam em ravinas ou sulcos exibidos em sua superfície.

Figura 36 — Falésia 01 no período da vazante

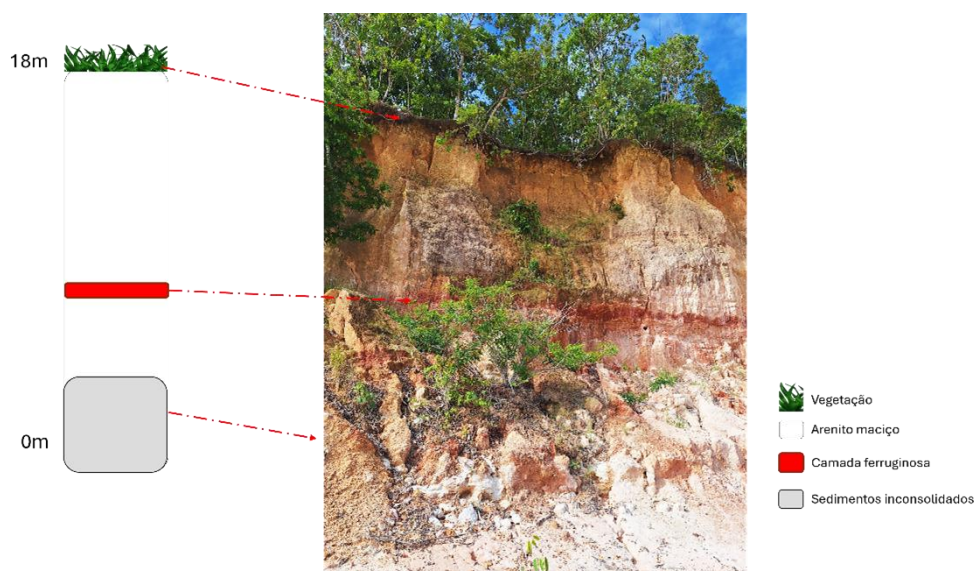


Fonte: O autor (2024).

Na região intermediária da falésia, predomina um arenito fino a médio, com uma aparência maciça e coloração que varia de amarelo a esbranquiçado, sendo composto principalmente por quartzo, com grãos arredondados e bem selecionados, também apresentando uma camada ferruginosa (**Figura 37**). Mais próximo à margem do rio, foram identificadas camadas ferruginosas de coloração avermelhada, com características de siltito e laminação plano-paralela (**Figura 38**). Essas características litológicas e estruturais contribuem para a formação e morfologia da falésia, sendo influenciadas pela interação complexa entre os processos fluviais e pluviais.



Figura 37 — Perfil Falésia 01



Fonte: O autor (2024).

Figura 38 — Laterização próximo à margem da Falésia 01



Fonte: O autor (2024).

A Falésia 2 está localizada nas coordenadas  $3^{\circ} 8'23.71''S$   $60^{\circ} 7'45.88''O$  e apresenta um perfil escarpado com uma variação de altura entre 12 e 27 metros. Evidências de processos erosivos, tanto pluviais quanto fluviais, são visíveis nesta formação. Além disso, há uma camada ferruginosa no meio da falésia, composta por sedimentos finos de coloração laranja escura, e sedimentos inconsolidados em sua

base. Esta falésia é classificada como íngreme erosiva de acordo com a tipologia estabelecida (**Figura 39**).

Figura 39 — Falésia 02 no período da vazante

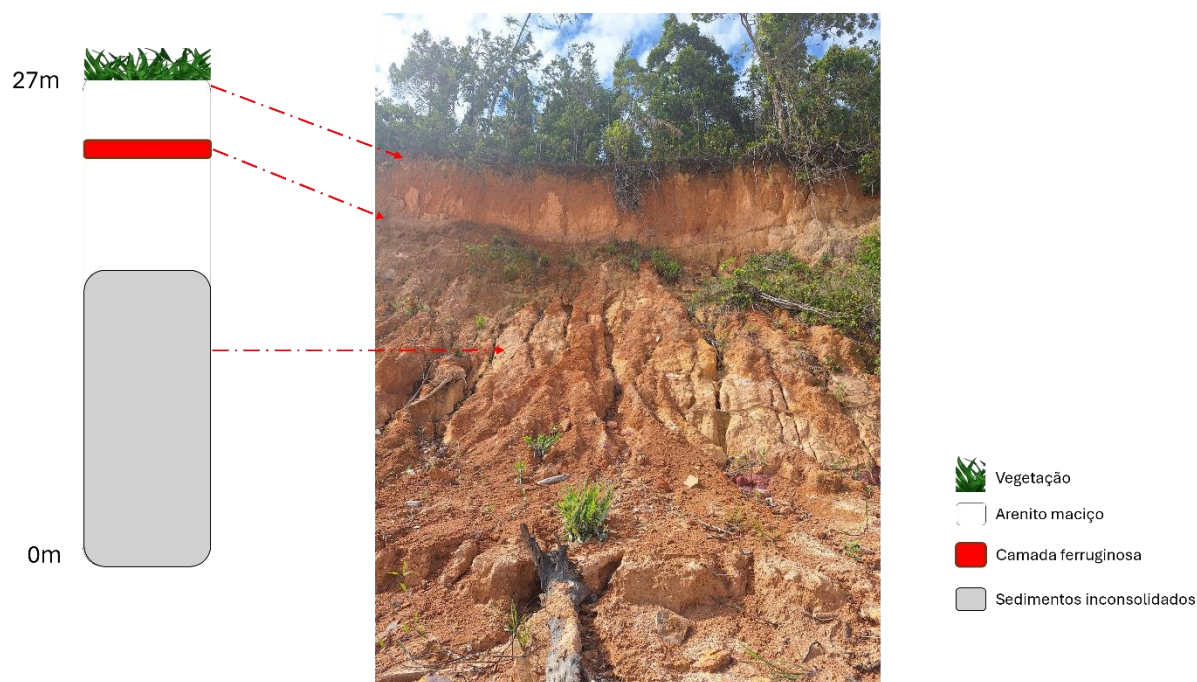


Fonte: O autor (2024).

Na região intermediária da falésia, é visível a presença de arenito fino a médio, com uma aparência maciça e uma coloração que varia de amarelo a esbranquiçado, sendo composto principalmente por quartzo. Logo abaixo, uma camada ferruginosa é evidenciada (**Figura 40**). Na base da falésia, observam-se materiais inconsolidados, frequentemente provenientes de sedimentos transportados por movimentos de massa. Além disso, é possível identificar vestígios de vegetação que foram transportados para essa área.



Figura 40 — Perfil da Falésia 02



Fonte: O autor (2024).

A Falésia 3 está situada nas coordenadas 3° 8'28.12"S 60° 7'36.35"O e apresenta uma variação de altura entre 11 e 21 metros, caracterizando-se como Íngreme Erosiva. Entre as cinco falésias estudadas, esta é a que possui menos vegetação em sua face, sugerindo a ocorrência de processos erosivos ativos. A coloração da falésia varia entre tons de laranja escuro e claro, com alguns trechos exibindo uma coloração vermelha clara, o que pode indicar a presença de oxidação na base da formação (**Figura 41**).

Figura 41 — Falésia 03 no período da vazante

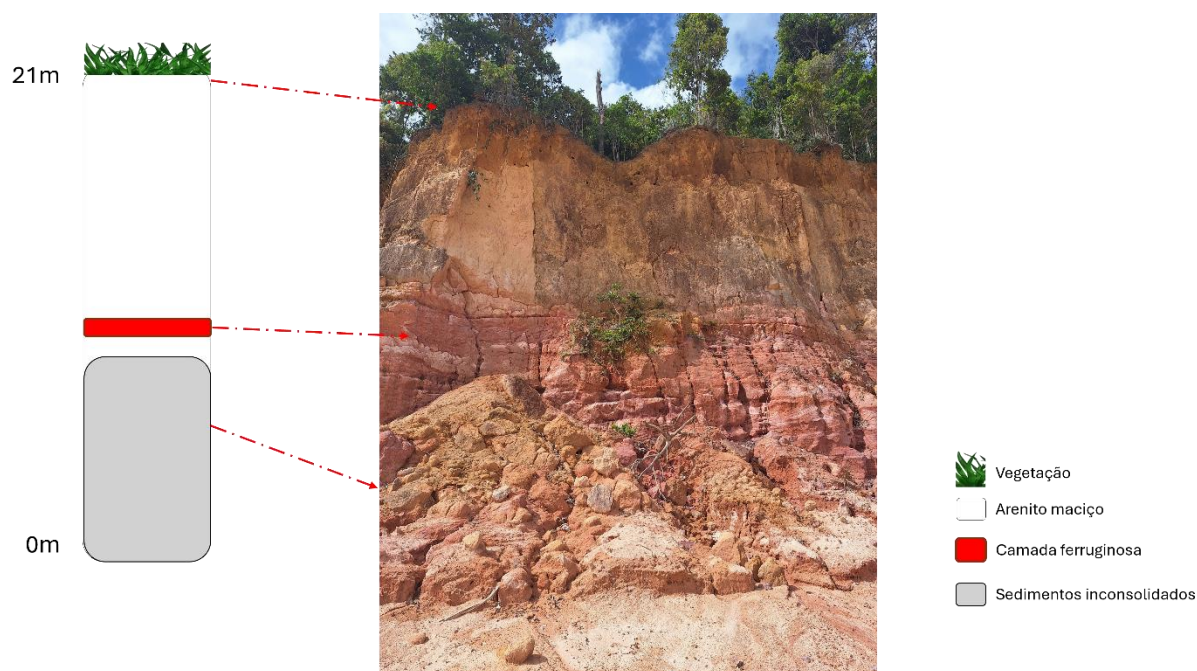


Fonte: O autor (2024).

No perfil (**Figura 42**), é evidente que a falésia 3 é composta por um arenito maciço, com uma transição para uma camada oxidada no meio, exibindo uma coloração laranja escura. Além disso, é visível uma extensa camada ferruginosa, composta por sedimentos finos com uma coloração vermelha clara. Na base das falésias, é notável a presença de vegetação caída, indicando movimentos de massa. Também foram identificados resquícios de crostas lateríticas na base. No entanto, próximo ao rio, observa-se a presença de crostas lateríticas de tamanho significativo (**Figura 43**).



Figura 42 — Perfil da Falésia 03



Fonte: O autor (2024).

Figura 43 — Crostas lateríticas próximas a margem



Fonte: O autor (2024).

A falésia que se destaca por sua singularidade, com duas faces distintas, é classificada pela tipologia Íngreme Erodida. Localizada nas coordenadas 3° 8'19.77"S 60° 7'56.48"O, apresenta uma faixa altimétrica que varia entre 19 e 28 metros. Esta formação exibe uma escarpa exposta, com uma vegetação escassa, revelando

diversos estágios de laterização. Além disso, são visíveis blocos colapsados na base da falésia (**Figura 44**).

Figura 44 — Falésia 04 no período da vazante

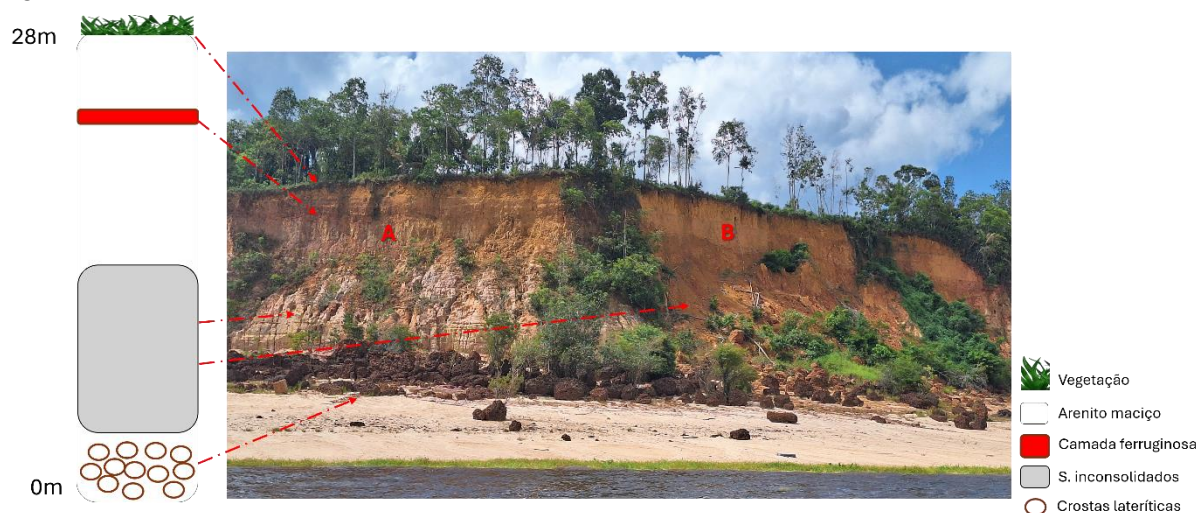


Fonte: O autor (2024).

O perfil (**Figura 45**) revela duas fácies distintas. A face A exibe um topo laterizado, com sedimentos finos de coloração laranja escuro. Na base, são evidenciados materiais com sedimentos inconsolidados de granulação grosseira, acompanhados por vegetação e uma abundância de crostas lateríticas. Por outro lado, a face B mostra evidências de um intenso processo erosivo, com materiais inconsolidados e vegetação caída, indicando movimento de massa. Embora a presença de crostas lateríticas seja notável, estas são menos abundantes do que na face A. Além disso, observa-se uma reduzida quantidade de vegetação no topo da formação, o que sugere atividades humanas na região, possivelmente relacionadas à agricultura ou outras formas de uso da terra.



Figura 45 — Perfil da Falésia 04



Fonte: O autor (2024).

A Falésia 5 está localizada nas coordenadas  $3^{\circ} 7'57.21''S$   $60^{\circ} 8'34.51''O$  e apresenta variações altimétricas que variam de 17 a 30 metros. Esta formação exhibe uma face com pouca vegetação e evidências claras de movimentos de massa. Ela é caracterizada pela tipologia íngreme erodida, indicando uma história de intensa erosão e modelagem pela ação dos elementos naturais (**Figura 46**).

Figura 46 — Falésia 05 no período da vazante



Fonte: O autor (2024).

O perfil da Falésia 5 revela uma porção do topo laterizado, com sedimentos finos de coloração laranja escuro. A formação exhibe uma coloração predominante de tonalidades laranja claro e esbranquiçadas na base, indicando a presença de

sedimentos inconsolidados. Além disso, são visíveis sinais notáveis de oxidação, resultado da ação fluvial ao longo do tempo (**Figura 47**).

Figura 47 — Perfil da Falésia 05



Fonte: O autor (2024).

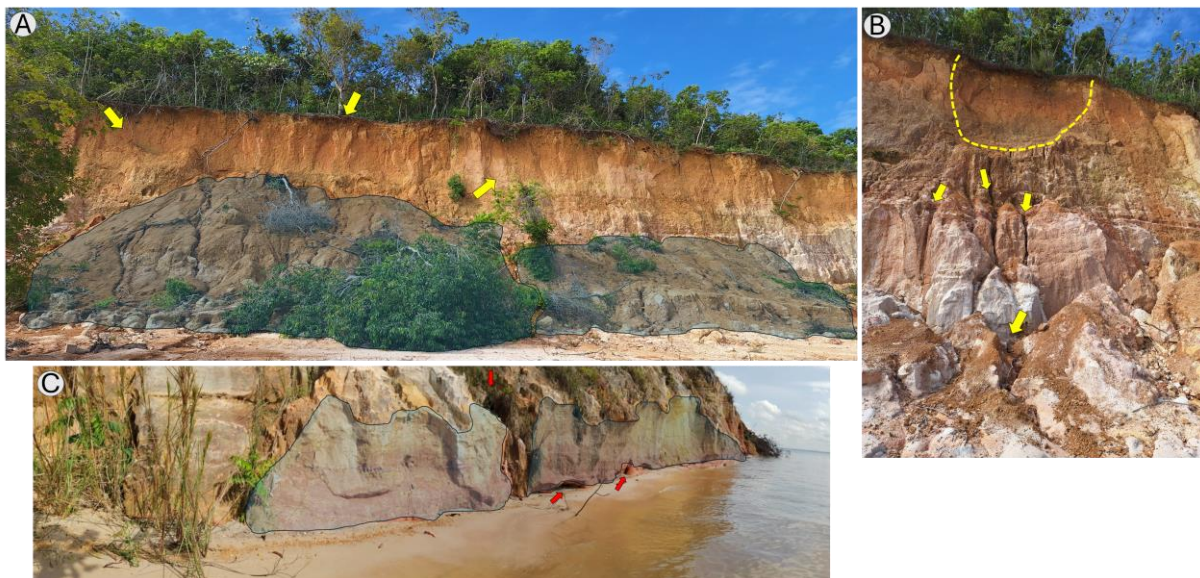
## 5.2 Processos, Mecanismos e Feições das falésias do rio negro

A área em análise está sujeita a diversos processos naturais que influenciam a estabilidade das falésias. Essas variações resultam na remoção de materiais e na deposição de sedimentos na praia, devido à ação dos rios e dos ventos. Observa-se que, quando os sedimentos são retirados das falésias, estes ficam retidos em sua base, contribuindo para a manutenção do equilíbrio e prevenindo a ocorrência de movimentos de massa. Entretanto, quando ocorre uma perda maior no volume anteriormente depositado na base da falésia, isso torna a base desta susceptível a novos movimentos de massa.

Nas observações de campo, foi possível notar a formação de dutos na parede da Falésia 01, os quais desempenham um papel significativo no contexto dos processos erosivos. Durante períodos de chuva, esses dutos atuam como condutores para o escoamento da água, canalizando-a para fora da falésia, muitas vezes em sua porção superior. Essa atividade sugere uma possível influência das águas pluviais na intensificação dos processos erosivos, contribuindo para a instabilidade da falésia (**Figura 48**).



Figura 48 — Processos erosivos Falésia 1. 1. Material retido; 2. Movimento de massa; 3. Erosão por solapamento; 4. Setas amarelas: sulcos; 5. Setas vermelhas: erosão fluvial.



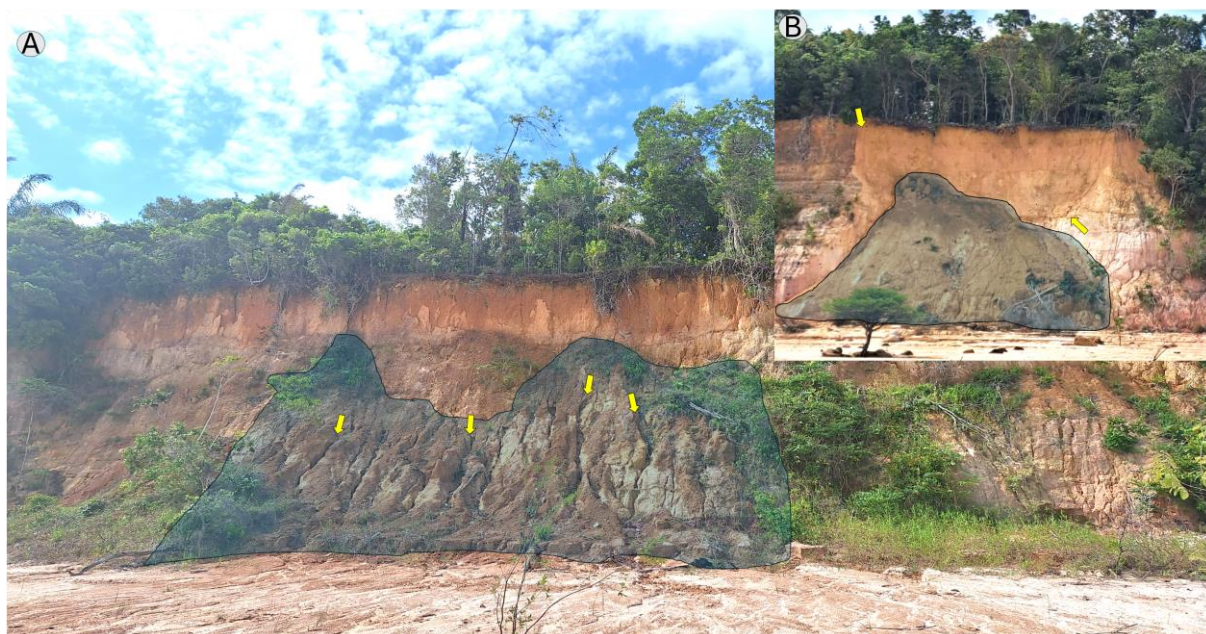
Fonte: O autor (2024).

Além disso, ao longo de toda a extensão da falésia, são visíveis formações de sulcos, variando em profundidade e extensão. A presença desses sulcos, alguns mais pronunciados do que outros, é indicativa do constante processo erosivo em curso. A diferenciação de alturas entre os sulcos sugere uma graduação no nível de erosão ao longo da falésia, fornecendo insights sobre a dinâmica desses processos ao longo do tempo.

Pode-se observar que a Falésia 01 está sujeita a uma influência contínua do Rio Negro, especialmente durante o período de cheia. Durante esse período, quando o rio atinge sua cota máxima, exerce uma pressão significativa na base da falésia. Essa pressão é resultante da ocorrência de sucessivos banzeiros, que consistem em ondas geradas pelo fluxo do rio. Esses banzeiros atuam de forma significativa no processo de solapamento e transporte do material da base da falésia.

Na Falésia 02, além da presença de vegetação em sua face, é perceptível a ocorrência de um acúmulo de material retido em sua base, o qual inclui vegetação caída, indicando movimento de massa do tipo escorregamento. Este fenômeno sugere uma dinâmica erosiva ativa na falésia, influenciada por fatores como a saturação do solo ou a instabilidade da vegetação ao longo do topo da falésia. A presença desse material retido e a vegetação caída na base também podem fornecer insights sobre os processos de sedimentação e transporte ao longo do tempo.

Figura 49 — Processos erosivos falésia 2. A e B. Materiais retidos.



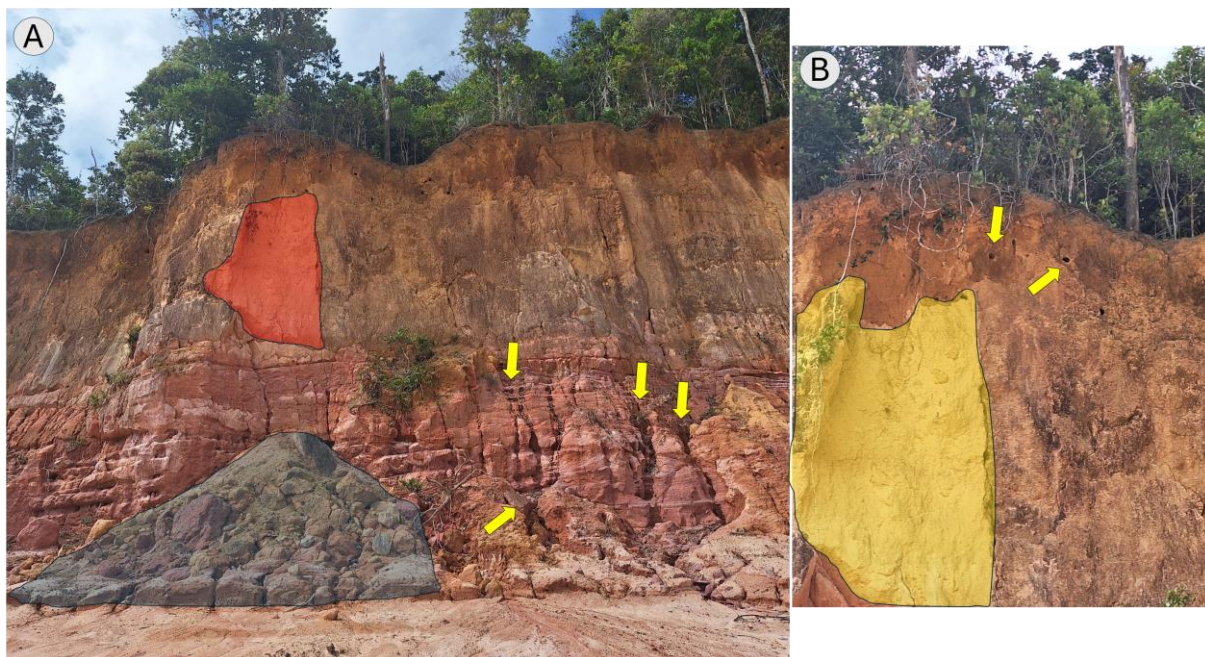
Fonte: O autor (2024).

Ademais, ao examinar o topo da falésia, é notável uma coloração mais clara de laranja, indicando que o material retido na base provavelmente se originou do topo. Esta observação sugere que o material está sendo transportado para baixo da falésia por meio de processos erosivos, como a ação da gravidade ou a infiltração de água nas camadas superficiais do solo.

A Falésia 03 exibe uma variedade de características erosivas distintas, incluindo a formação de dutos, resultante de um processo biológico sulcos resultantes da ação da água da chuva, bem como erosão fluvial, consequência do solapamento na base da formação. Os dutos desempenham um papel significativo na percolação da água da chuva, facilitando sua penetração no solo e contribuindo para processos de lixiviação e escoamento. Na área em questão, é possível observar árvores caídas com materiais retidos em sua base, evidenciando a ocorrência de movimentos de massa do tipo escorregamento ativos, os quais impactam a estabilidade da falésia. Além disso, a ausência de vegetação em sua face é notável, o que sugere ainda mais a vulnerabilidade da falésia à erosão e indica uma menor estabilidade nessa região.



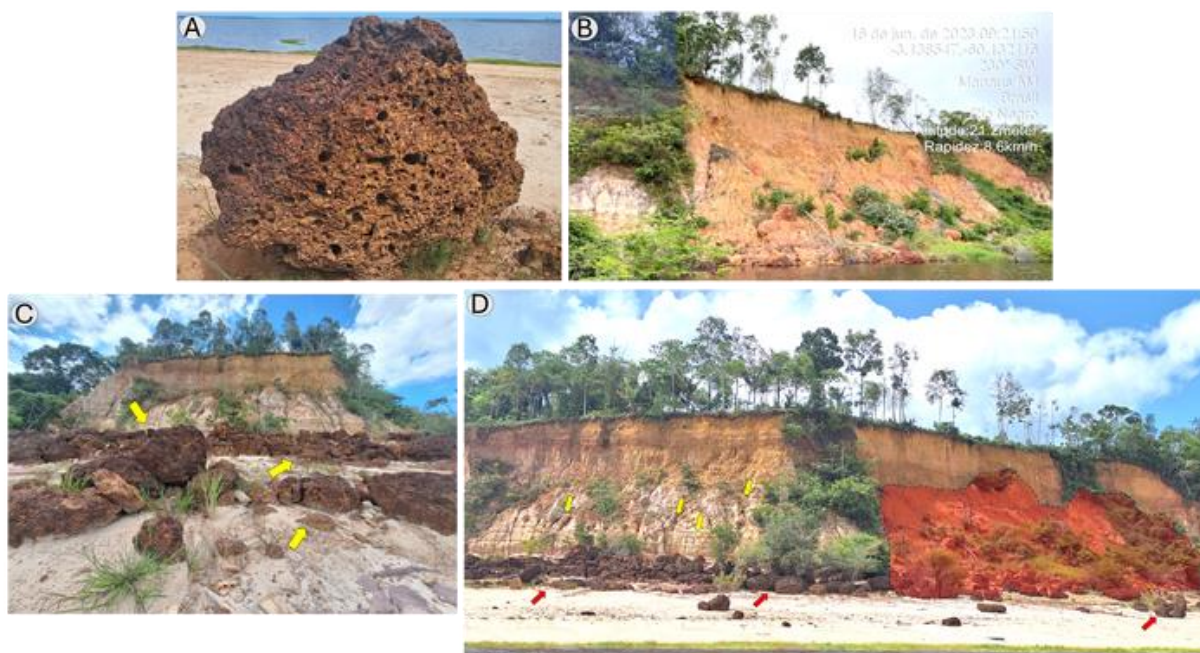
Figura 50 — Feições resultantes dos processos erosivos. A. Movimento de massa e material retido na base da falésia; B. Movimento de massa e dutos. Setas amarelas: formação de sulcos.



Fonte: O autor (2024).

A formação da Falésia 04 apresenta uma escarpa exposta com vegetação escassa, revelando diferentes estágios de laterização, além de blocos colapsados em sua base. O perfil 4 exhibe características singulares em comparação com outras falésias analisadas. Em uma parte do perfil, destacam-se crostas lateríticas na base, enquanto em outra ocorrem processos erosivos significativos e movimentos de massa em larga escala.

Figura 51 -Feições resultantes dos processos erosivos da falésia 4. A. crosta laterítica; B. Lado A com ausência de vegetação; C. Lado B com presença de crostas lateríticas; D. Falésia 4 com crostas lateríticas e movimentos de massa. Setas amarelas: crostas.



Fonte: O autor (2024).

A discussão de Maia et al. (2022) enfatiza que a presença dos blocos de lateritas na base da falésia desempenha um papel crucial na dispersão da energia causada pela água, resultando em uma redução nos efeitos erosivos na parte inferior da escarpa. Isso se traduz em um índice menor de solapamento nessa área específica. Por outro lado, na porção da falésia sem blocos lateríticos, ou com pouca presença deles, há um risco elevado. A ausência de proteção fornecida pela presença desses blocos, combinada com as reentrâncias originadas pelo processo de erosão, torna iminente o colapso das camadas sobrepostas.

É relevante ressaltar que a porção da falésia com presença limitada de laterita exibe uma coloração laranja claro e é caracterizada pela presença de árvores caídas, resultado dos frequentes movimentos de massa. Além disso, observa-se uma reduzida quantidade de vegetação no topo da formação, indicando atividades humanas na região, possivelmente relacionadas à agricultura ou outras formas de uso da terra.

A Falésia 5 apresenta sinais notáveis de oxidação nas características resultantes da ação fluvial. Sua escarpa revela uma superfície lisa e desprovida de vegetação, além de exibir indícios de movimentos de massa, com materiais retidos em sua base, sugerindo que esta falésia se encontra em atividade erosiva. Também é evidenciado o solapamento da base, caracterizado por uma coloração ferruginosa, indicativa da presença de óxidos de ferro.

Figura 52 — Feições resultantes dos processos erosivos da falésia 5. Setas vermelhas. Erosão por solapamento; Setas amarelas. Sulcos.



Fonte: O autor (2024).

Com base nas observações e na revisão de artigos, é evidente que os processos de erosão fluvial e subaérea desempenham papéis significativos na formação das falésias em estudo. Além disso, a pressão hidrostática emerge como um dos principais agentes no modelamento dessas formações. Essa pressão resulta da força exercida pela água sobre os estratos sedimentares, levando ao saturamento do solo e, em conjunto com a gravidade, contribuindo para o colapso do material (SOUSA et al., 2020).

Carvalho (2012) destaca que o aumento do volume de água retido no solo intensifica a pressão hidrostática, aumentando assim a probabilidade de escorregamentos e deslizamentos. Além disso, fatores como a composição geológica e a inclinação do terreno também desempenham papéis significantes na suscetibilidade das falésias à erosão e ao colapso.

Além disso, a infiltração da água do rio nas paredes do solo, combinada com a água pluvial que infiltra neste, resulta na saturação desse pacote de solo. Durante o

período de vazante, observa-se que a instabilidade da base e o saturamento do solo propiciam ocorrências de movimento de massa.

### 5.3 Morfometria das falésias da margem direita do Rio Negro.

Em cada falésia, foram conduzidos os seguintes procedimentos: coleta de amostras, realização de testes de infiltração, resistência à penetração, levantamento aéreo utilizando o VANT, análises cartográficas utilizando o *Planet*. A exceção foi observada na Falésia 3, onde o acesso ao topo desta, mostrou-se inacessível, conforme descrito na metodologia. Nesse caso, apenas foi possível realizar um levantamento aéreo; coleta de imagens.

Cada amostra de solo passou por análise granulométrica com o objetivo de determinar as proporções de argila, silte e areia. Após essa etapa, as amostras foram definidas de acordo com o triângulo textural. Esses dados foram de suma importância para a compreensão da dinâmica de formação e evolução das falésias ao longo do tempo, bem como para antecipar eventuais transformações futuras.

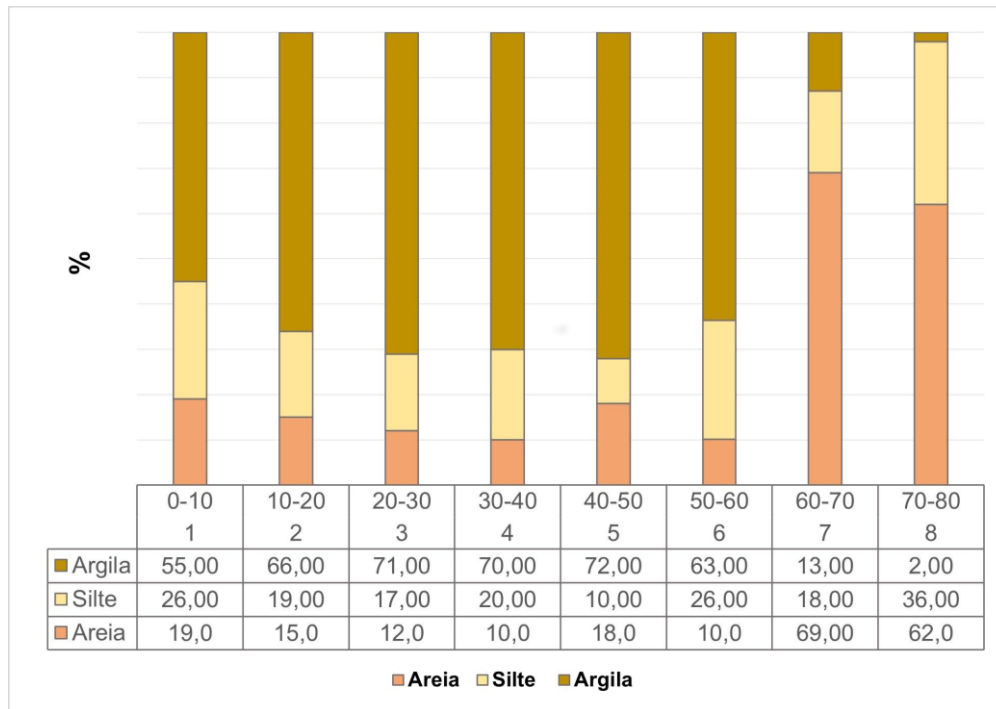
Solos com diferentes proporções de partícula têm comportamentos distintos em resposta a forças externas, como a ação da água e dos ventos. Falésias com sedimentos mais finos e mais coesos, como argila e silte, podem ser mais resistentes a processos erosivos. Por outro lado, falésias com sedimentos mais grossos e menos coesos, como areia, tendem a ser mais estáveis (MAIA et al., 2022).

#### I. FALÉSIA 1

Ao todo, foram coletadas 8 amostras de solos na falésia, sendo seis delas obtidas por meio de tradagem e duas na base das falésias, onde o acesso era mais viável. O gráfico e a tabela abaixo fornecem a caracterização granulométrica de cada amostra (Figura 53). É possível observar que as primeiras seis amostras apresentam uma alta concentração de argila em relação à areia e ao silte. Essa predominância de argila indica que esses solos são compostos principalmente por partículas finas, sugerindo um alto grau de coesão.



Figura 53 — Análise granulométrica do perfil 1, falésia 1.

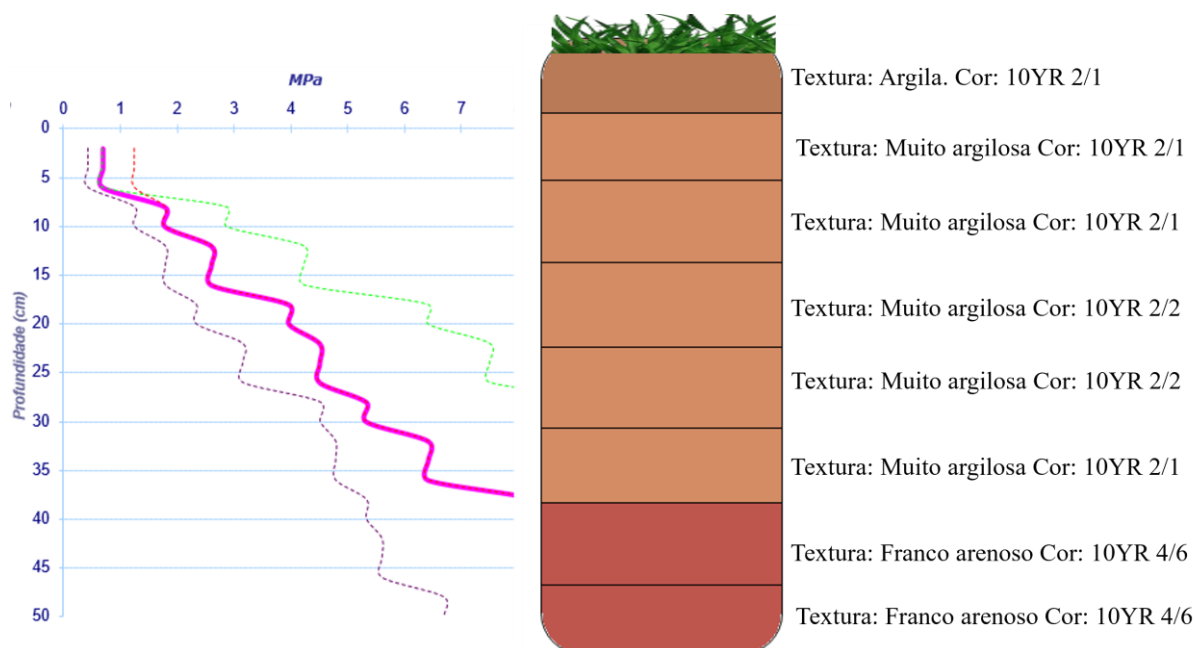


Fonte: O autor (2024).

A amostra 1 foi classificada como solo de textura "argilosa", sugerindo uma presença significativa de argila em relação às frações de areia e silte. Já as amostras de 2 a 6 foram classificadas como solos de textura "muito argilosa", indicando uma proporção ainda mais elevada de argila em relação à areia e ao silte. Por outro lado, as duas últimas amostras (amostra 7 e 8) foram classificadas como "franco-arenosas", caracterizando um tipo de solo com uma fração de areia relativamente alta em comparação com o silte e a argila, como mostrado na **Figura 54**.

Em relação à resistência de penetração no solo, a Falésia apresentou pouca resistência até os 5 cm, registrando 0,69 MPa. A partir desse ponto, observou-se uma elevada resistência à penetração, com o máximo de 9,68 MPa entre os intervalos de 46 a 50 cm (**Figura 54**). Isso indica que em profundidades maiores, o solo se torna consideravelmente mais difícil de penetrar, sugerindo uma maior compactação ou coesão nessa região.

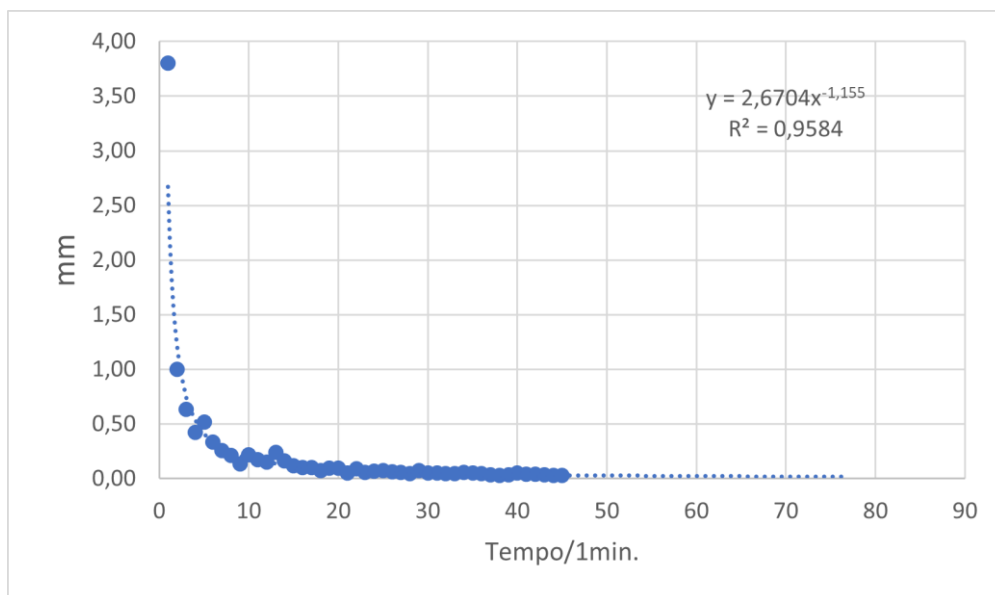
Figura 54 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do solo. do perfil 1, falésia 1.



Fonte: O autor (2024).

Quanto ao teste de infiltração, observou-se que a infiltração ocorreu de forma lenta, sendo realizada uma leitura a cada minuto, totalizando 45 leituras. A taxa de infiltração inicial foi de 3,8 mm/min, reduzindo-se gradualmente para 0,03 mm/min ao longo do teste. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi calculado como 0,95, indicando uma correlação estatisticamente significativa. Este valor de  $r^2$  supera o limiar de 0,51, considerado o mínimo para se atribuir significância estatística a um resultado (Figura 55).

Figura 55 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 1, falésia 1.

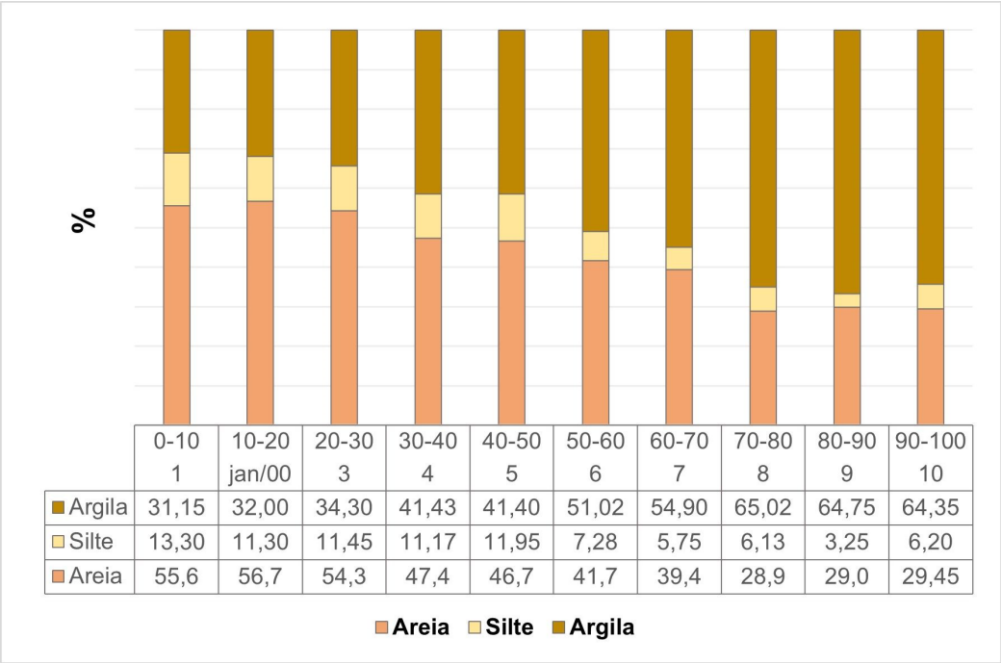


Fonte: O autor (2024).

## II. FALÉSIA 2

Foram analisadas dez amostras, e ao examinar o gráfico de composição granulométrica e a tabela com a caracterização das amostras em relação às texturas, observou-se que as amostras 1, 2 e 3 possuem uma taxa significativa de areia e foram classificadas como "franco-arenosas". Esse termo implica que o solo possui uma composição equilibrada, com uma mistura de partículas de diferentes tamanhos, porém, com uma presença mais notável de partículas de argila e areia. (**Figura 56**).

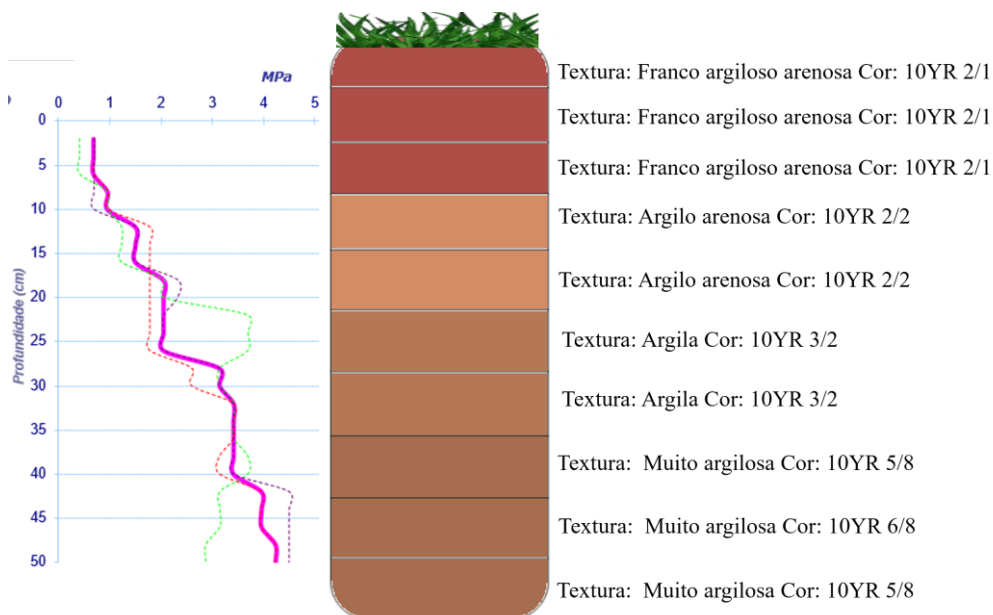
Figura 56 — Análise granulométrica do perfil 2, falésia 2.



Fonte: O autor (2024).

Já amostras de 2 a 4 foram classificadas como "Argilo-arenosas", indicando proporções significativas de partículas de areia e argila, com quantidades intermediárias de silte. Por outro lado, as amostras de 8 a 10 foram categorizadas como "muito argilosas", o que sugere uma proporção muito alta de argila em relação às outras frações. (**Tabela 2**).

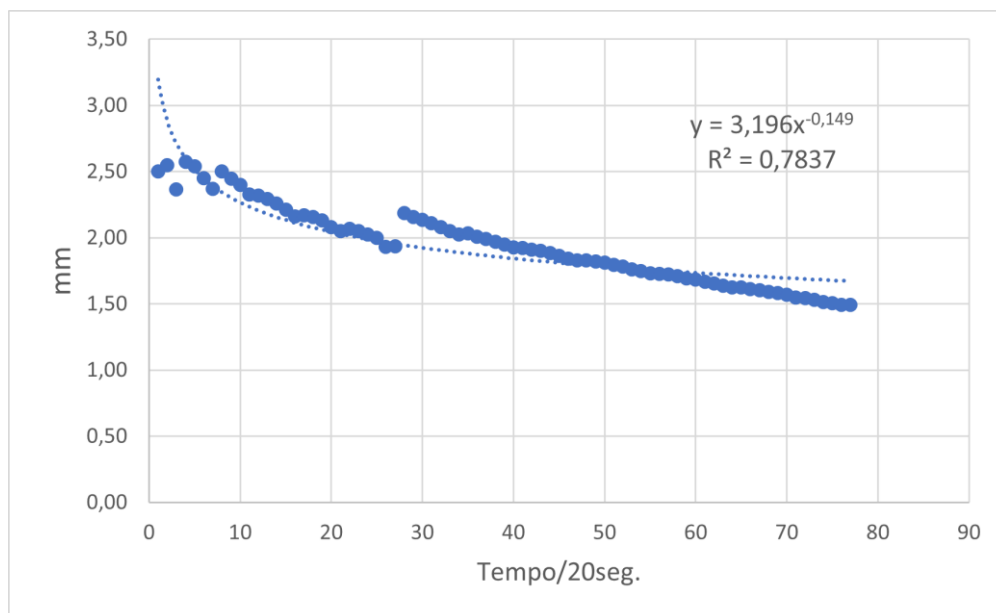
Figura 57 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do solo. do perfil 2, falésia 2.



Fonte: O autor (2024).

O teste realizado na Falésia 2 (Figura 58), teve sua leitura realizada a cada vinte segundos, a infiltração se deu de uma forma lenta, totalizando 77 leituras, sendo a taxa inicial de infiltração de 2,5 mm/s, enquanto a final de 1,49 mm/s. O valor de  $r^2$  foi de 0,78.

Figura 58 —Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 2, falésia 2.



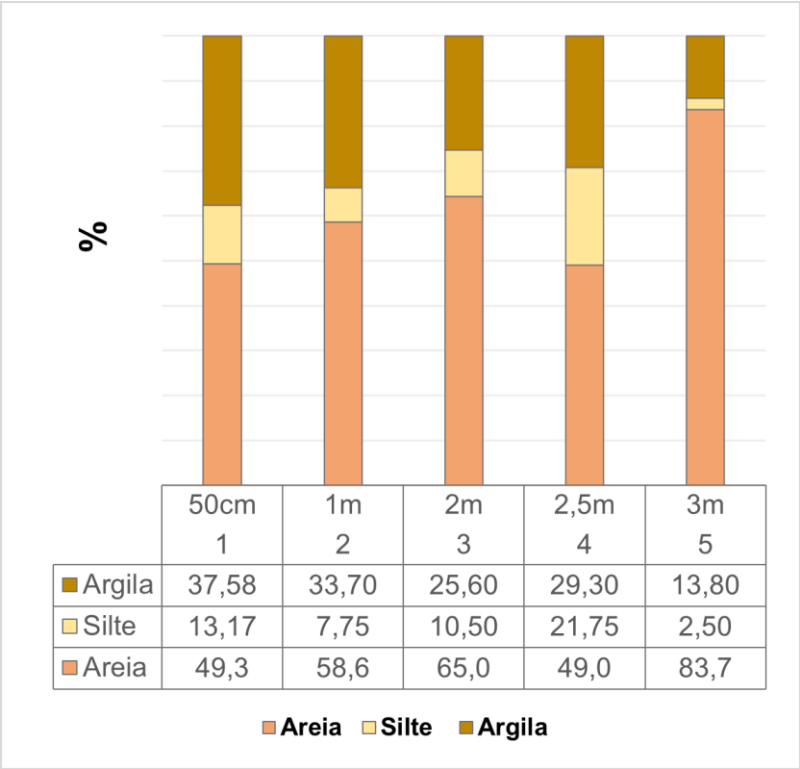
Fonte: O autor (2024).



III. FALÉSIA 3

Foram coletadas cinco amostras da falésia 3, e a maioria delas apresenta um percentual elevado de areia. A amostra 1, por sua vez, exibe uma textura "Argilo-arenosa", indicando uma composição que inclui tanto partículas de argila quanto de areia, com quantidades variáveis de silte. Essa combinação de características sugere que o solo possui propriedades intermediárias entre solos predominantemente argilosos e solos arenosos. (Figura 37).

Figura 59 — Análise granulométrica do perfil 3, falésia 3.

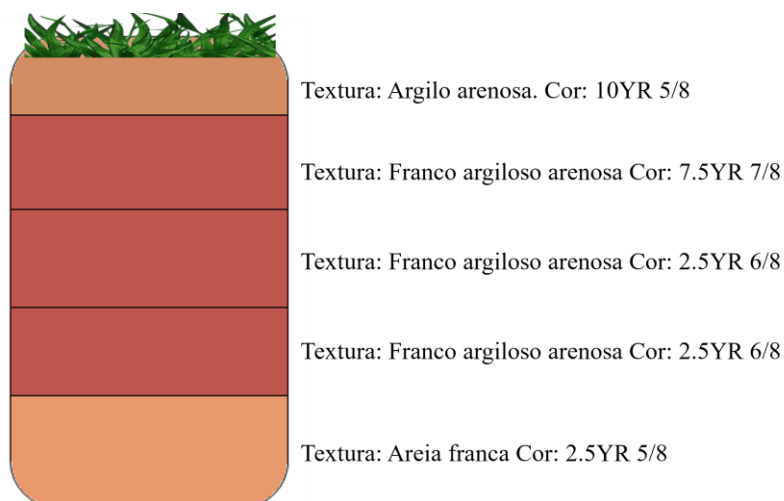


Fonte: O autor (2024).

As amostras 3 e 4 foram categorizadas como "Franco argiloso arenoso". Essa classificação sugere que o solo apresenta uma mistura equilibrada de partículas de diferentes tamanhos, incluindo quantidades significativas de argila e areia. Consequentemente, esse tipo de solo exibe um potencial moderado tanto para retenção de água e nutrientes quanto para drenagem e aeração adequadas. Já a amostra 5 recebeu a caracterização de "Areia franca". Essa descrição indica que o solo possui uma boa drenagem e aeração, graças à presença de partículas de areia.

No entanto, o componente "franco" também sugere que o solo tem um potencial razoável de retenção de água e nutrientes (**Tabela 3**).

Figura 60 —Perfil 3, textura do solo falésia 3.

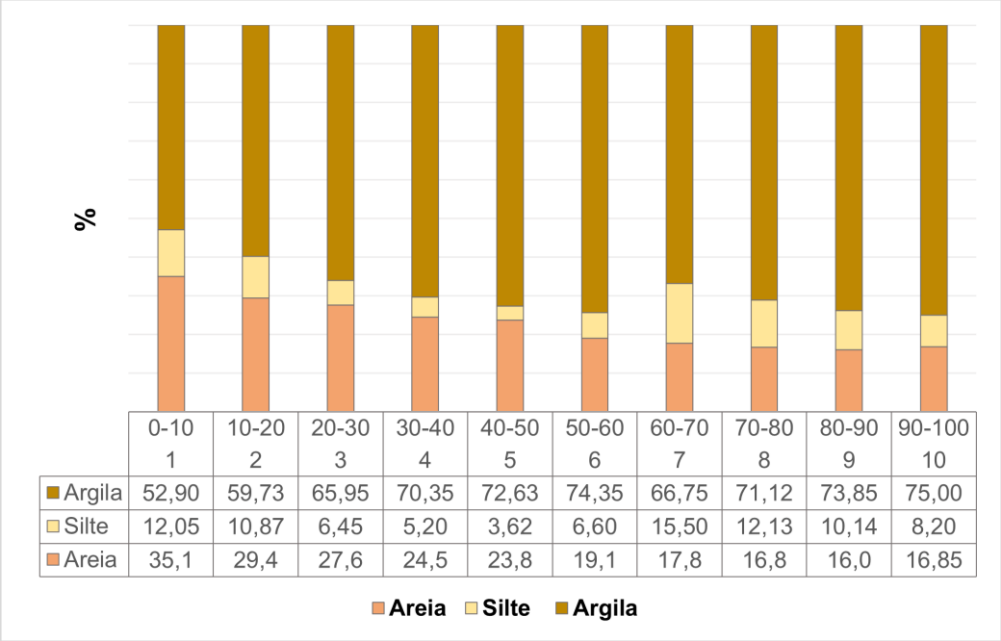


Fonte: O autor (2024).

#### IV. FALÉSIA 4

As dez amostras coletadas na falésia 4 revelaram um teor de argila elevado em comparação com as frações de silte e areia. As duas primeiras amostras foram categorizadas como "Argilosa", indicando uma predominância das partículas de argila em relação às outras duas frações. Isso aponta para a composição principal do solo como sendo composta principalmente por partículas finas de argila (**Figura 38**).

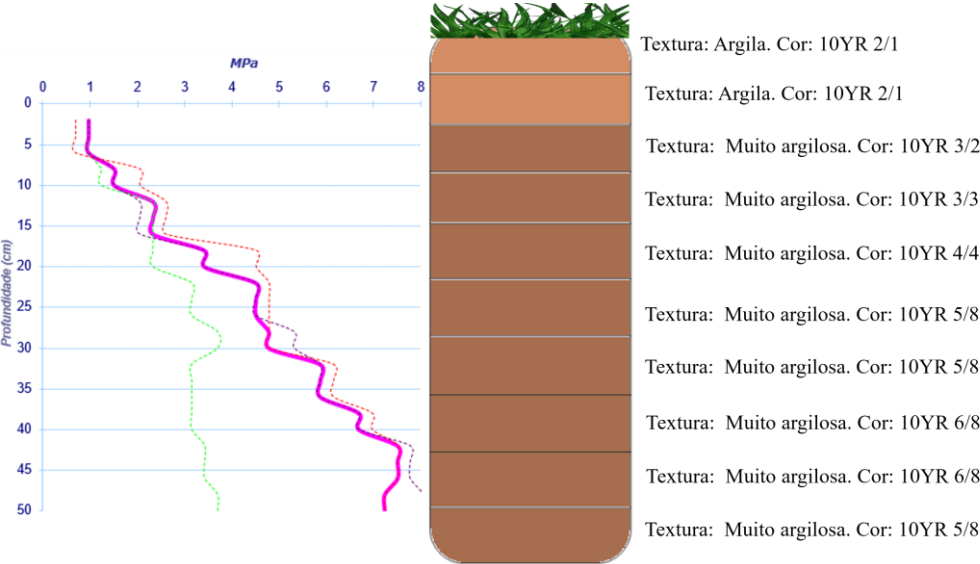
Figura 61 —Análise granulométrica do perfil 4, falésia 4.



Fonte: O autor (2024).

O restante das amostras foi categorizado como tendo a textura "muito argilosa". Essa classificação implica que o solo possui uma proporção extremamente alta de partícula de argila em relação às frações de areia e silte. Isso significa que o solo é predominantemente composto por partículas finas de argila (**Tabela 4**).

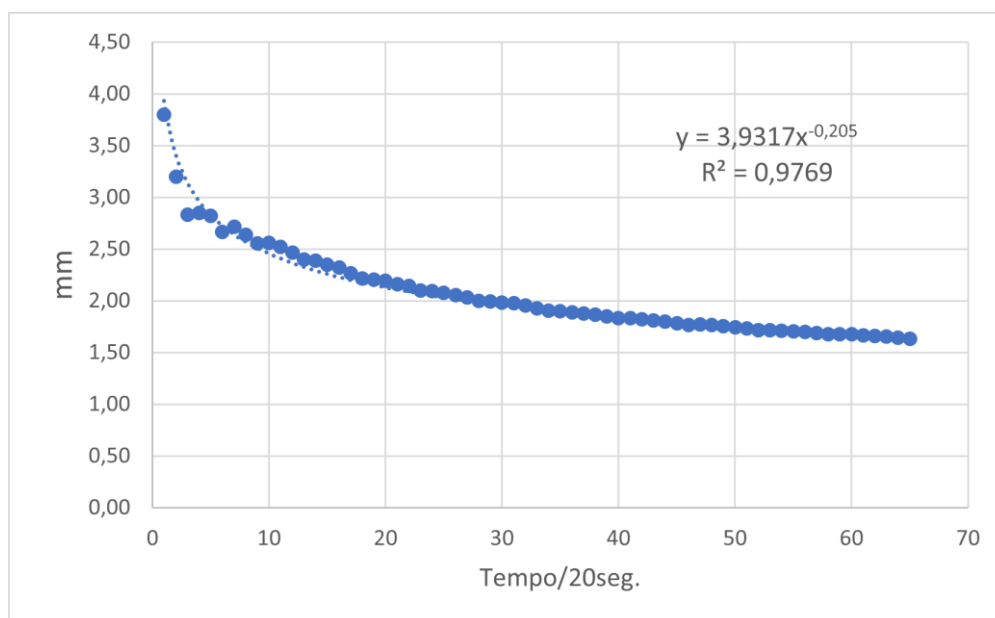
Figura 62 —Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do solo. do perfil 4, falésia 4.



Fonte: O autor (2024).

O teste de infiltração na falésia 4 teve uma leitura demorada, com uma taxa inicial de 10,5 mm/s, diminuindo para 1,6 mm/s ao final do teste. As leituras foram realizadas a cada vinte segundos, totalizando 66 medições. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi calculado como 0,88, indicando uma correlação estatisticamente significativa entre as variáveis analisadas. Esses resultados sugerem que, inicialmente, a água infiltrava no solo rapidamente, mas a taxa de infiltração diminuiu à medida que o solo se saturou ou a resistência à infiltração aumentou.

Figura 63 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 4, falésia 4

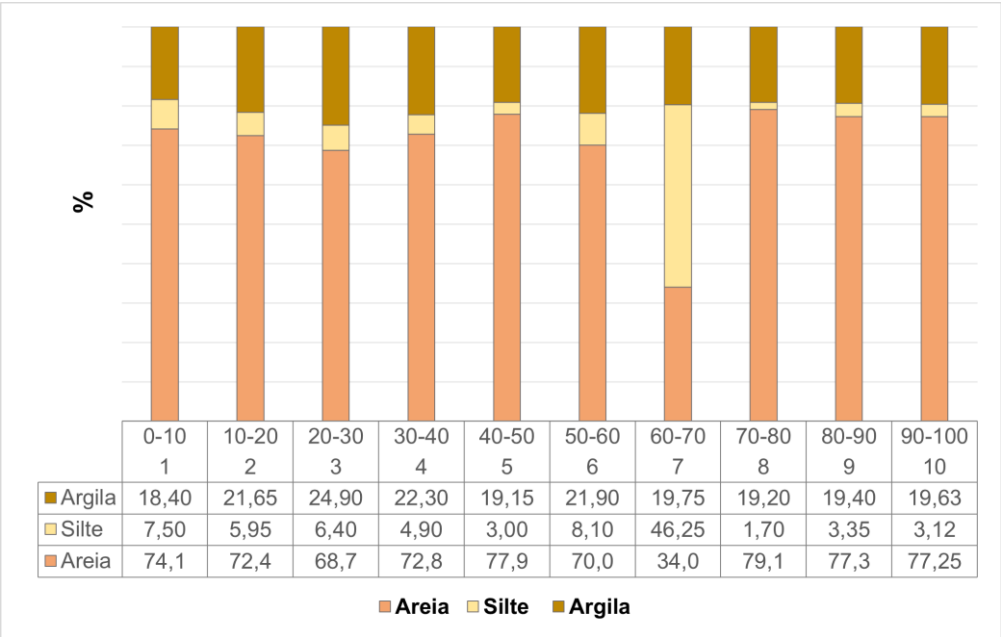


Fonte: O autor (2024).

## V. FALÉSIA 5

Na falésia 5, foram coletadas 11 amostras, revelando uma presença substancial de partícula de areia nas amostras coletadas. Especificamente, as amostras 1, 5, 8, 9 e 10 foram categorizadas como tendo a textura "Franco arenoso". Essa classificação destaca um tipo de solo que combina características das classes texturais "franco" e "arenoso". Isso implica uma mistura harmoniosa de partícula de diversos tamanhos, com uma leve predominância de partícula de areia (**Figura 39**).

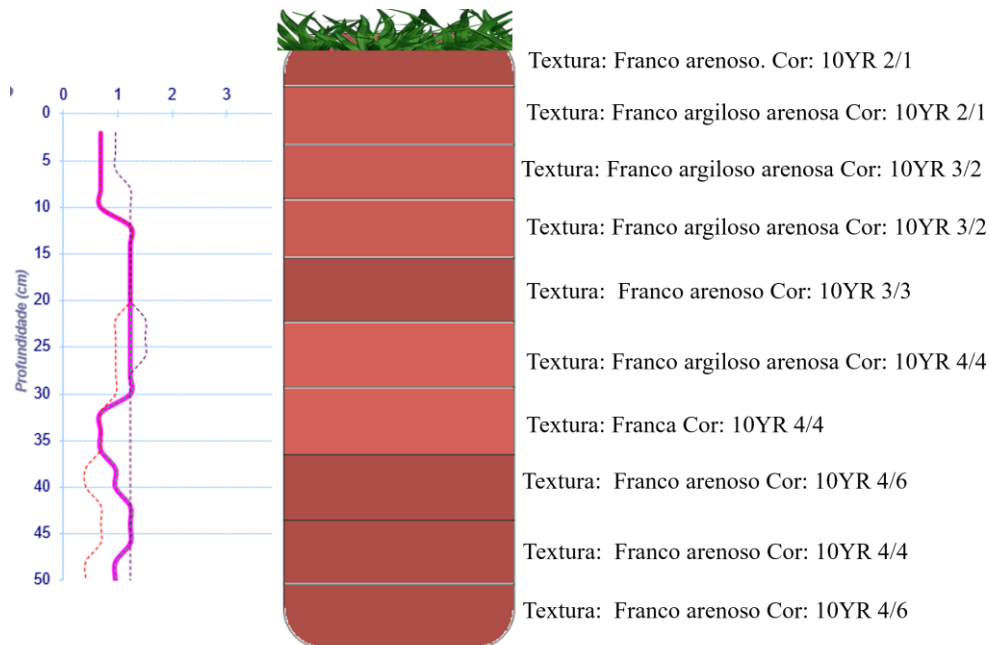
Figura 64 —Análise granulometrica do perfil 3, falésia 3.



Fonte: O autor (2024).

As amostras 2, 3, 4 e 6 foram categorizadas como "Franco argiloso arenoso", o que se refere a um tipo de solo que reúne características das classes texturais "franco", "argiloso" e "arenoso". Isso implica em uma mistura harmoniosa de partículas de diferentes tamanhos, incluindo proporções de areia, silte e argila. Já a amostra 7 foi classificada como "Franca", indicando um tipo de solo que exibe uma combinação equilibrada de partícula de diferentes tamanhos, com proporções semelhantes de areia, silte e argila. Isso resulta em um solo intermediário entre as classes texturais "arenosa" e "argilosa" (**Tabela 5**).

Figura 65 — Comparativo entre o teste de resistência à penetração e a textura do solo. do perfil 5, falésia 5.

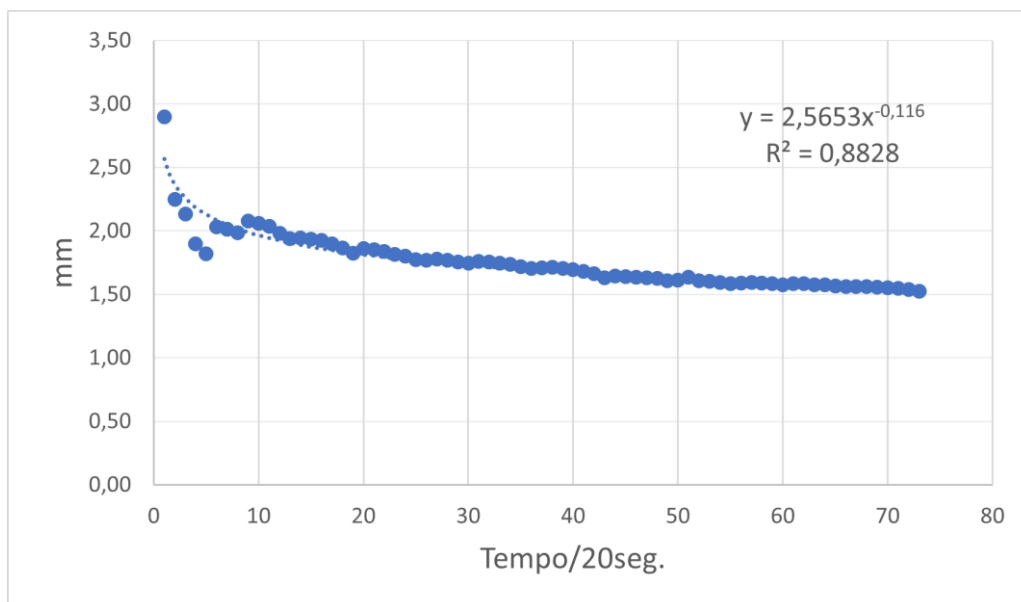


Fonte: O autor (2024).

O teste de infiltração realizado na Falésia cinco ocorreu de forma bastante demorada, evidenciada pela rápida absorção de água no solo logo no início do experimento. Devido a essa característica, as leituras foram realizadas a cada vinte segundos. Ao todo, foram obtidas 74 leituras, com uma taxa de infiltração inicial de 2,9 mm/s, diminuindo para 1,52 mm/s ao final do teste. O valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi calculado como 0,88.



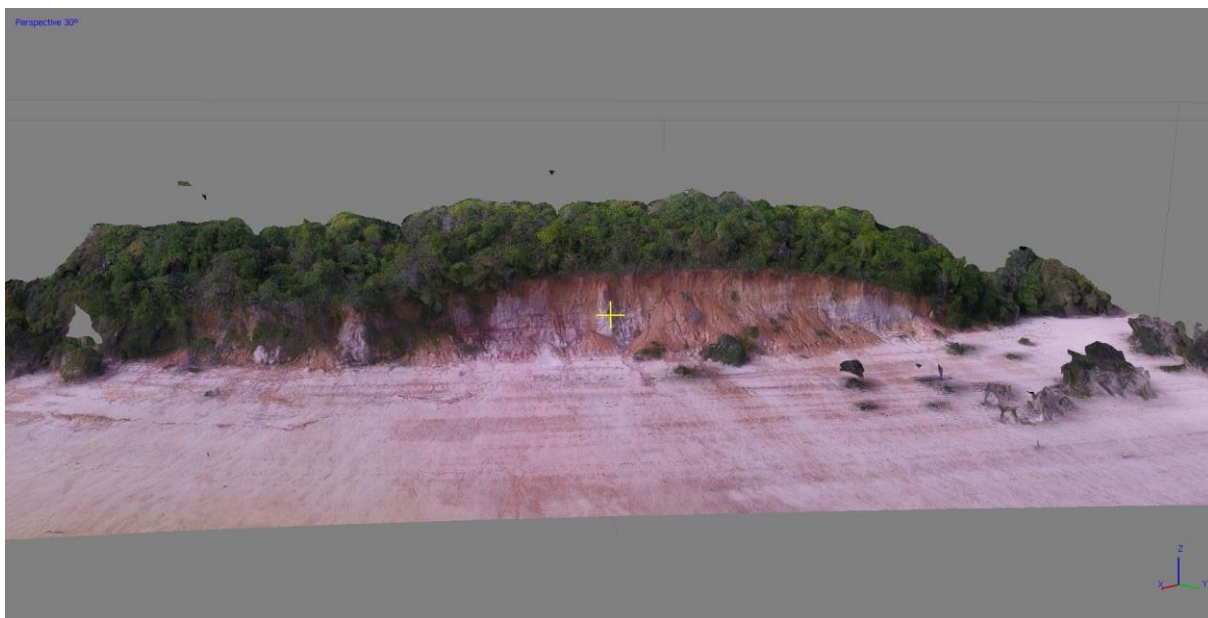
Figura 66 — Infiltração de água no solo. Proximidade do perfil 5, falésia 5



Fonte: O autor (2024).

Além de todos os processos descritos acima, foram realizadas varreduras com o uso do VANT para a construção de modelos em 3D, permitindo a visualização tridimensional de todo o terreno da falésia e a compreensão dos processos erosivos ativos e sua evolução. A falésia 1 exemplifica um processo notório de erosão, com material inconsolidado presente na base da falésia e árvores caídas. Durante o período da vazante, é evidente um grande acúmulo de sedimentos, formando uma praia (**Figura 67**). Isto deve-se à influência dos depósitos de areia provenientes do rio Negro.

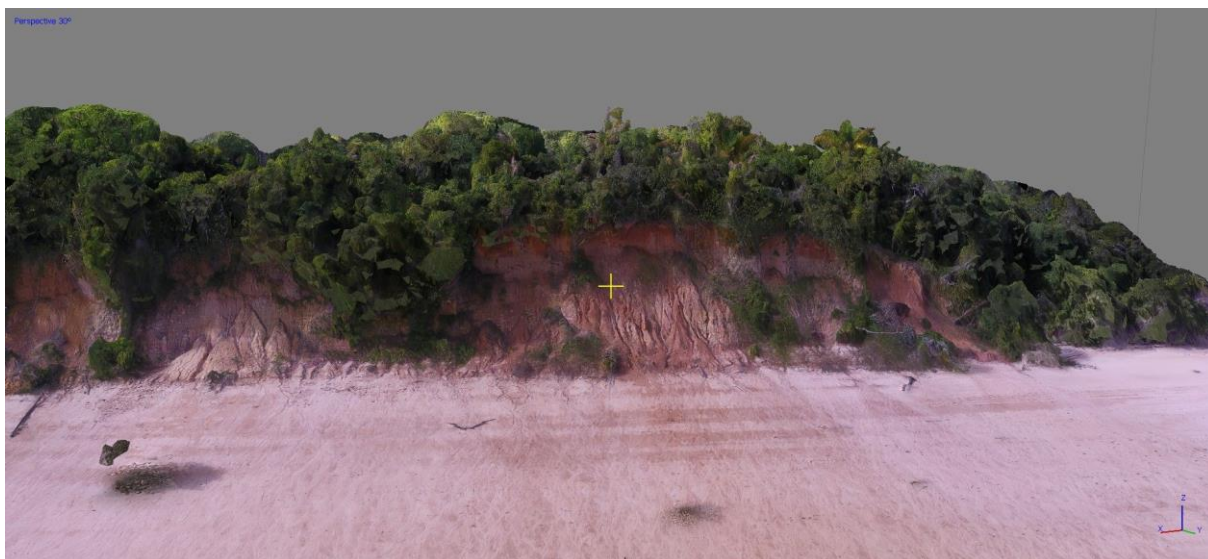
Figura 67 — Modelo em 3D Falésia 1



Fonte: O autor (2024).

A falésia 2, apesar da presença de vegetação, também apresenta processos erosivos evidentes, destacando um intenso processo de evolução da falésia, com a presença de movimentos de massa (evidenciada por árvores caídas), sulcos e dutos. Esses processos indicam que, mesmo com a cobertura vegetal, a falésia continua a sofrer mudanças significativas devido à erosão, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo.

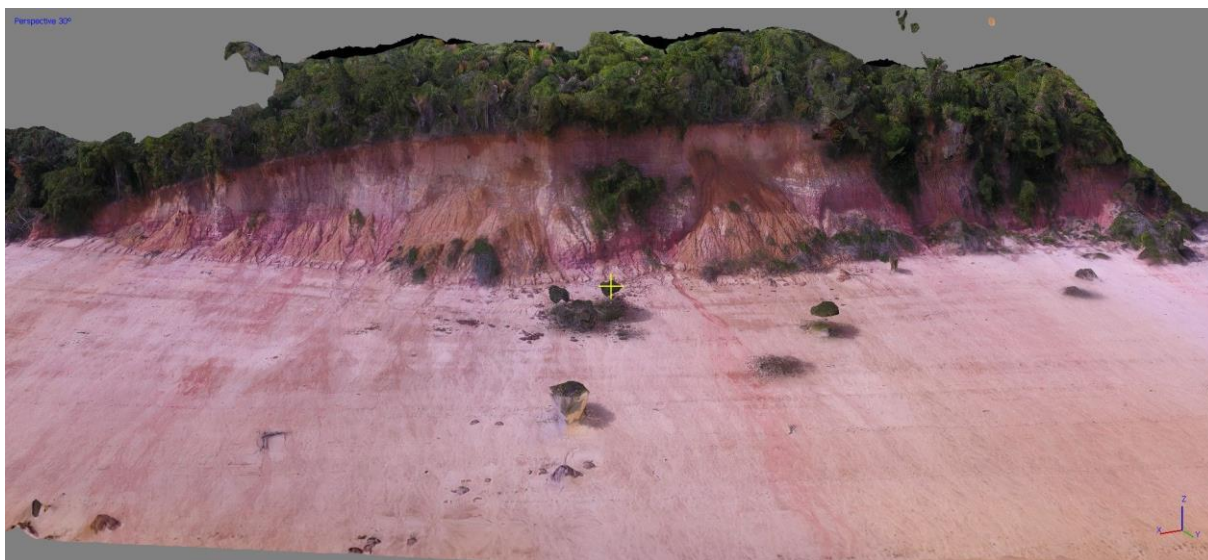
Figura 68 — Modelo em 3D Falésia 2



Fonte: O autor (2024).

A falésia 3 também evidencia um constante processo de evolução, caracterizado por movimentos de massa semelhantes aos observados nas demais falésias. Esses movimentos de massa são causados pela ação combinada da gravidade e da água, que desestabilizam o solo e as rochas, resultando em deslizamentos e quedas de blocos. Além disso, a formação de sulcos e dutos nas falésias indica a erosão hídrica, onde a água escoar superficialmente, removendo partículas do solo e criando canais profundos.

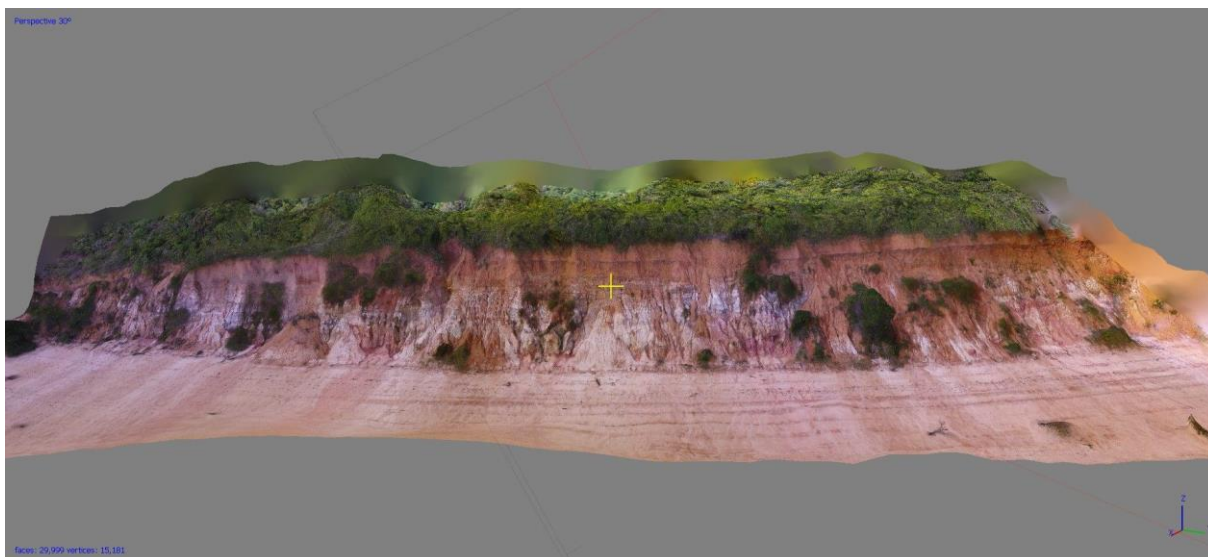
Figura 69 — Modelo em 3D Falésia 3



Fonte: O autor (2024).

Por último, a falésia 5 é caracterizada pela ação erosiva e pela presença de um intenso acúmulo de sedimentos em sua base, evidenciando o constante processo de movimentos de massa e a presença de vegetações caídas. Além disso, há a presença de uma praia formada pelos depósitos provenientes do rio Negro. Essa praia não só sublinha a redistribuição de sedimentos pela ação fluvial, mas também mostra como os processos erosivos podem criar novos ambientes geográficos ao longo do tempo.

Figura 70 — Modelo em 3D da Falésia 5



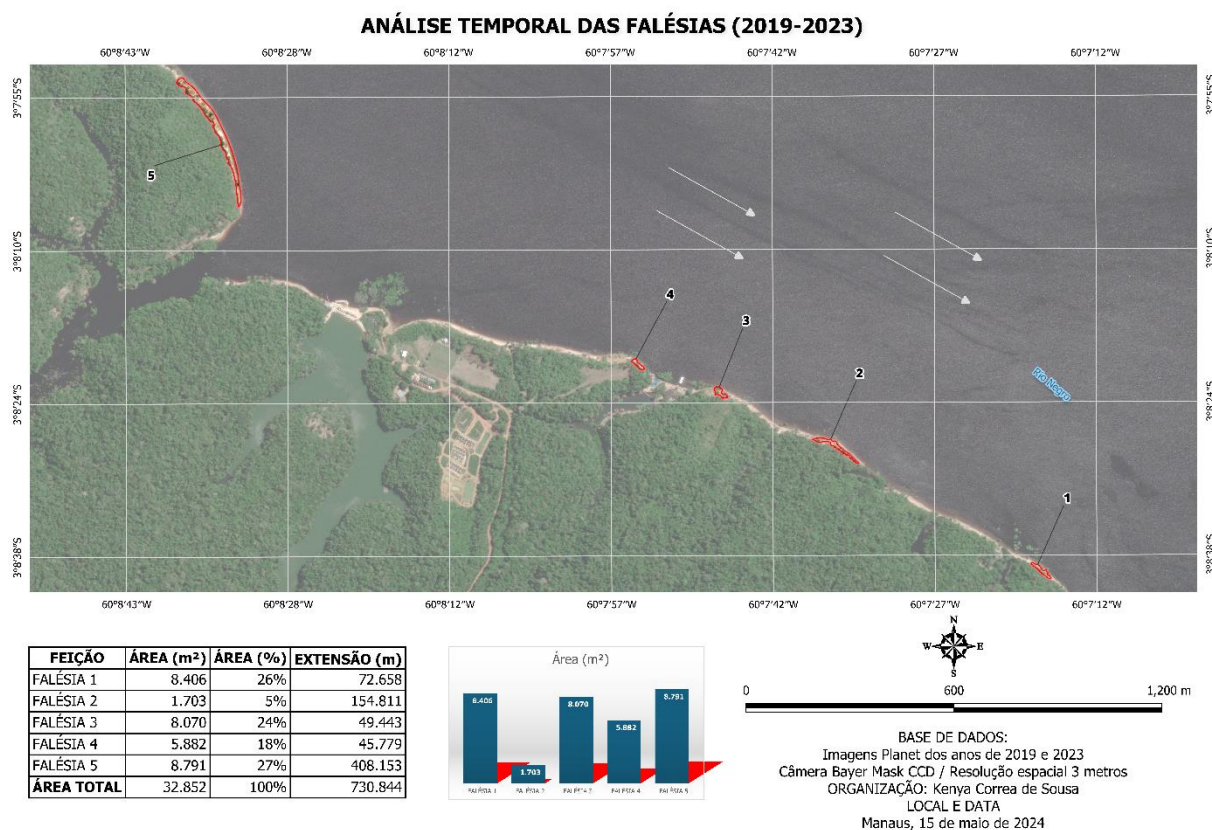
Fonte: O autor (2024).

Em última análise, foi realizada a análise temporal, que envolveu a seleção de imagens de satélite correspondentes aos anos de 2019 e 2023, provenientes da empresa Planet Lab, caracterizadas por uma resolução espacial de 3 metros. Para garantir a visibilidade adequada, foi aplicado um critério de filtragem, limitando a presença de cobertura de nuvens a até 10%. A escolha das imagens foi feita em função da ausência de nuvens na área das falésias, capturadas em 24 de julho de 2019 e 29 de julho de 2023 área perdida por m

Observa-se, na figura abaixo, as taxas de evolução das cinco falésias estudadas. Cada feição representa uma falésia analisada, enquanto a área em  $m^2$  indica a quantidade de área perdida entre os anos de 2019 e 2023. Destaca-se que a falésia 5 apresentou a maior evolução, com uma perda de  $8.791 m^2$  de área. Em seguida, a falésia 1 registrou uma perda de  $8.406 m^2$ , seguida pela falésia 3 com  $8.070 m^2$ . A falésia 4 perdeu  $5.882 m^2$  de área, enquanto a falésia 2 mostrou a menor perda, com  $1.703 m^2$ . Esses resultados indicam uma variação significativa na erosão das falésias ao longo do período analisado (**Figura 71**).



Figura 71. Análise Temporal das Falésias (2019-2023)



Fonte: O autor, 2024.

Com base nos dados apresentados, é possível observar uma variação significativa nas taxas de erosão entre as diferentes falésias analisadas. A falésia 5 destacou-se com a maior perda de área, seguida pela falésia 1, enquanto a falésia 2 apresentou a menor perda. Essa variação sugere diferenças na susceptibilidade à erosão entre as falésias, possivelmente influenciadas por fatores como geologia local, vegetação e exposição climática. Esses resultados ressaltam a importância da monitorização contínua das falésias para compreender os padrões de erosão ao longo do tempo e identificar áreas de risco potencial.

## 6 CONCLUSÃO

A análise das falésias em estudo revelou que a estabilidade dessas formações é influenciada por diversos processos naturais, incluindo a ação dos rios, ventos e chuvas. As variações resultantes desses processos causam a remoção e deposição de sedimentos, impactando diretamente a dinâmica das falésias. Quando os sedimentos são removidos das falésias e acumulados na sua base, contribuem para a manutenção do equilíbrio, prevenindo movimentos de massa. No entanto, a perda significativa desses sedimentos pode tornar a base das falésias suscetível a novos deslizamentos.

Durante as observações de campo, foram identificados dutos na parede de todas as falésias em estudo, que canalizam a água da chuva e intensificam os processos erosivos, contribuindo para a instabilidade das mesmas. Esses dutos, juntamente com a formação de sulcos, indicam a constante erosão ao longo do tempo. A pressão hidrostática do Rio Negro, especialmente durante o período de cheia, exerce uma força significativa na base das falésias, agravando o solapamento e o transporte de material.

A presença de vegetação e material retido na base das falésias sugere movimentos de massa do tipo escorregamento, influenciado pela saturação do solo e instabilidade da vegetação. A coloração laranja clara no topo indica transporte de material para a base, evidenciando a ação contínua de processos erosivos.

A Falésia 04 exibe uma escarpa exposta com vegetação escassa e blocos colapsados na base. A presença de crostas lateríticas na base ajuda a reduzir os efeitos erosivos, enquanto a ausência dessas crostas aumenta o risco de colapso das camadas sobrepostas. A coloração laranja clara e a presença de árvores caídas indicam frequentes movimentos de massa e atividades humanas na região.

Os dados apresentados destacam que os processos de erosão fluvial e subaérea, juntamente com a pressão hidrostática, são cruciais na formação e modelagem das falésias. A análise granulométrica das amostras de solo revelou a predominância de argila, contribuindo para a coesão e resistência à erosão. No entanto, a presença de sedimentos mais grossos, como areia, tende a resultar em maior estabilidade.



A análise temporal revelou variações significativas nas taxas de erosão entre as falésias, com a Falésia 5 apresentando a maior perda de área e a Falésia 2 a menor. Esses resultados ressaltam a importância da monitorização contínua das falésias para identificar áreas de risco e implementar medidas de mitigação adequadas.

As falésias ao longo da margem direita do Rio Negro apresentam variações significativas na morfologia e composição do material, influenciando sua resistência às ações erosivas. Os processos erosivos, intensificados pela ação fluvial e pluvial, causam solapamento e movimentos de massa, afetando a estabilidade das falésias. A presença de materiais como argila, areia e laterita desempenha um papel crucial na dinâmica erosiva e na susceptibilidade dessas formações a colapsos e deslizamentos.

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz. Formas de relevo: Texto básico. **FUNBEC/Edart**, São Paulo. 80 p, 1975.
- ALMEIDA FILHO, R; MIRANDA, F. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas Archipelago, Central Amazônia Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model. **Remote Sens. Environ**, v. 110, p. 387-392, 2007.
- ALVES, A. C. **Análise multitemporal e morfodinâmica no entorno da confluência do rio Solimões com o rio Negro**. Manaus, 2019 Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.
- BERTALANFFY, L. **General System Theory**: Foundations, Development, Applications. New York: GEORGE BRAZILLER, 1968.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7 ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355 p.
- BIRD, E. **Coastal Geomorphology**: Na Introduction. Australia: Second Edition, 2008, p. 67-106.
- BIRD, Eric. **Coastal Cliffs**: Morphology and Management. 1 ed. Australia: Department of Geography, University of Melbourne, Melbourne,, 2016. 92 p.
- CAMPBELL, E; FRAILEY, C; ROMERO-PITTMAN , L. The Pan-Amazonian Ucayali Peneplain, late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of the modern Amazon River system. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 239, p. 166-219, 2006.
- CAPRA, F. **A Teia da Vida**. São Paulo: Cultrix, 1997.
- CARVALHO, A. **Erosão Nas Margens do Rio Amazonas: o Fenômeno das Terras Caídas e suas Implicações na vida dos moradores**. Niterói/RJ, 2012 Tese (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal Fluminense.
- CARVALHO, A. **Terras caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera, Paraná da Trindade, Município de Itacoatiara-AM**. Manaus, f. 142, 2006 Dissertação (Programa de Pós-Graduação Sociedade e Cultura na Amazônia do Instituto de Ciências Humanas e Letras) - Universidade Federal do Amazonas.

CARVALHO, José Alberto. **Terras caídas e consequências sociais**: Costa do Miracauera, Paraná da Trindade, Município de Itacoatiara-AM. Manaus, 2006. 142 p Dissertação (Programa de Pós-Graduação Sociedade e Cultura na Amazônia do Instituto de Ciências Humanas e Letras) - Universidade Federal do Amazonas.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1980.

CLAYTON, K; SHAMOON, N. A new approach to the relief of Great Britain: A classification of rocks based on relative resistance to denudation. **Geomorphology**, v. II, p. 155-171, 1998.

COSTA, André; ROCHA, Thaís; FILHO, Sílvio. Dinâmica da abertura de canais de maré no flanco norte do delta do rio Paraíba do Sul -RJutilizando imagens orbitais PlanetScope. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, 2023.

COSTA, J *et al.* Neotectônica Da Região Amazônica: Aspectos Tectônicos, Geomorfológicos e Depositionais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 4, p. 23-44, 1996.

COSTA, J *et al.* Tectônica mesozóica-cenozóica da região norte do Brasil. **Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos**, Rio Claro, v. 1, p. 10-108, 1991.

CUNHA, S; GUERRA, A. **Geomorfologia: Exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

DAEMON, R. **Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas**. Revista Brasileira de Geociências, 1975, p. 78-84. Disponível em: <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12395>. Acesso em: 25 jul. 2023.

DIAS, J.M.A; NEAL, W.L. Sea cliff retreat in Southern Portugal: profiles, processes and problems. **Journal Coastal Research**, v. 8, p. 641-654, 1992.

EMBRAPA, EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, f. 153. 2005. 306 p.

EMBRAPA. **Centro de Pesquisa de solos, Sistema brasileiro de classificação de solos**. Distrito federal: EMBRAPA, 2018. 356 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília: Revisada e Ampliada. EMBRAPA, 2018.

EMERY, K.O; KUHN. Sea cliffs: theirs, processes, profiles, and classification. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93, p. 644-654, 1980.

FERNANDES, N *et al.* **Geomorfologia e meio ambiente**: Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. Rio de Janeiro, 1996, p. 123-194.

FERNANDES, N.F; AMARAL, C.P. **Geomorfologia e meio ambiente**: Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1994, p. 123-194.

FRANZINELLI, E; IGREJA, H. Utilização de sensoriamento remoto na investigação da área do Baixo Rio Negro e Grande Manaus. **VI Simp. Bras. Sens. Rem**, p. 641-648, 1990.

FROTA FILHO, Armando Brito. **Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM**. Manaus, 2016. 195 p Dissertação (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA) - Universidade Federal do Amazonas.

GOOGLE EARTH PRO. **Google earth pro**. 2023.

GOUROU, Pierre. OBSERVAÇÕES GEOGRAFICAS NA AMAZONIA . **REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA**, São Paulo, v. 2, 1950.

GUERRA, A, J, T; GUERRA, A. T. **Novo dicionário geológico- geomorfológico**. 8 ed. Rio de Janeiro: Betrand Brasil, 2010. 652 p.

GUERRA, A; GUERRA, A (Org.); CUNHA, S (Org.). **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**: Processos erosivos nas encostas. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1994, p. 139-156.

GUERRA, Antonio Teixeira; GUERRA, Antonio Teixeira (Org.); CUNHA, Sandra Batista (Org.). **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**: Processos erosivos nas encostas. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1994, p. 139-156.

HORBE, Adriana *et al.* A Laterização na gênese das superfícies de Aplanamento da Região de Presidente Figueiredo Balbina, Nordeste do Amazonas. *In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA*. 1999, p. 399-402.

IBGE. **Banco de Dados de Informações Ambientais**: Geologia - Sistema de Informações - SIG. 2010. Disponível em: . Acesso em: 24 mai. 2024.

IBGE. **Glossário Geológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 1999.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**: Cidades. 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/iranduba/panorama>. Acesso em: 21 jul. 2023.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. **Manual técnico de Geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE. **Manual técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br). Acesso em: 23 jun. 2023.

JUNK, W. As águas da região Amazônica. In: Amazônia. **Amazônia: desenvolvimento, integração, ecologia**, São Paulo, p. 45-100, 1983.

MAIA, Rubson; AMORIM, Rodrigo; MEIRELES, Antônio. **Falésias: Origem, Evolução e Risco**. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2022.

MARINHO, Rogério; MELO, Edileuza. Análise multitemporal da geomorfologia fluvial do rio Solimões entre dois períodos hidrológicos (cheia de 1999 e a vazante 2005). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2009. Anais [...] Natal, 2009, p. 4765-4772.

MARINHO, R.R. Integração de Dados de Campo e Sensoriamento Remoto no Estudo do Fluxo de Água e Matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro – Amazonas, Brasil. Tese (Programa de Pós-Graduação em Clima e ambiente – CLIAMB, UEA, INPA), Manaus, 2019.

MARINHO, R.R. Estudo Morfodinâmico em Ambiente Lacustre no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro, Bacia Amazônica. *Geotemas*, v. 10, n. 3, pp. 81- 105, 2020.

MARTINEZ, J *et al.* The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, p. 1274-1287, 2015.

MICCADEI, E *et al.* Geomorphology of soft clastic rock coasts in the mid-western Adriatic Sea (Abruzzo, Italy). **Geomorphology**, v. 324, p. 72-94.

MICCADEI, E *et al.* Geomorphology of soft clastic rock coasts in the mid-western Adriatic Sea (Abruzzo, Italy). **Geomorphology**, p. 72-94, 2018.

NASCIMENTO, KLEVERSON. **CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NAS FALÉSIAS DA PONTA DO RETIRO, LITORAL NORTE DO RJ..** Niterói - RJ, 2006 Dissertação (DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA) - Universidade Federal Fluminense.

REIS, N; RIKER, M; FERREIRA, A. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. **CPRM –Serviço Geológico do Brasil**, 2006.

RJ)., EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro,. **Sistema brasileiro de classificacao de solos**: 4. aproximacao, f. 85. 1996. 169 p.

ROSSETTI, D.F *et al.* Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 23, p. 121-135, 2008.

SILVA, Clauzionor. **ANÁLISE DA TECTÔNICA CENOZÓICA DA REGIÃO DE MANAUS E ADJACÊNCIAS**. Rio Claro – SP, 2005 Tese (Instituto de Geociências e Ciências Exatas) - Universidade Estadual Paulista.

SIOLI, Harald. **Amazônia - Fundamentos de ecologia da maior região de florestas tropicais**. Petrópolis-RJ: Vozes, 1985. 72 p.

SOARES, Ludmila Dutra. **ALTERAÇÕES PEDOLÓGICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE ABACAXI EM NOVO REMANSO, ITACOATIARA – AM.** . Manaus, 2022. 94 p Dissertação (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA) - Universidade Federal do Amazonas.

SOUSA, Kenya *et al.* Caracterização dos processos de erosão fluvial e movimento de massa na falésia fluvial do Rio Negro, Amazonas. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 103, p. 54-66, 2020.

STERNBERG, H. Vales Tectônicos na Planície Amazônica?. **Revista Brasileira de Geografia**, 1950.

SUERTEGARAY, Dirce (Org.). **Terra: feições ilustradas**. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2003.

SUGUIO, K. Tópicos De Geociências Para O Desenvolvimento Sustentável: As Regiões Litorâneas. **Revista do Instituto de Geociências**, Usp. São Paulo, v. 2. 1 p, 2003. Geologia USP: Série Didática.

SUGUIO, Kenitiro. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

SUGUIO, Kenitiro. Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2010.

SUNAMURA, T. **Geomorphology of Rocky Coasts**, Wiley. England, 1992. 302 p.



SUNAMURA. **Geomorphology of rocky coasts:** Measuring shore cliff top retreat, a coast land owners manual. Wiley, England, 1992. 302 p.