

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Raisa Soares dos Santos Costa

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM ESPACIAL DA EROÇÃO FLUVIAL NO RIO SOLIMÕES, ESTADO DO AMAZONAS

Belo Horizonte

2023

Raisa Soares dos Santos Costa

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM ESPACIAL DA EROÇÃO FLUVIAL NO RIO
SOLIMÕES, ESTADO DO AMAZONAS**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências– IGC da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do grau de mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Úrsula Ruchkys de Azevedo (UFMG)

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho (UFAM)

Belo Horizonte

2023

C837c
2023

Costa, Raisia Soares dos Santos.

Caracterização e modelagem espacial da erosão fluvial no Rio Solimões, estado do Amazonas [manuscrito] / Raisia Soares dos Santos Costa. – 2023.
68 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Úrsula Ruchkys de Azevedo.

Coorientador: Rogério Ribeiro Marinho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Bibliografia: 61-65.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Erosão – Solimões, Rio (AM) – Teses. 3. Geomorfologia – Solimões, Rio (AM) – Teses. I. Ruchkys, Úrsula de Azevedo. II. Marinho, Rogério Ribeiro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6(811.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO PROGRAMA EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM ESPACIAL DA EROSÃO FLUVIAL NO RIO SOLIMÕES, ESTADO DO AMAZONAS

RAISA SOARES DOS SANTOS COSTA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 18 de abril de 2023, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dra. Úrsula Ruchkys de Azevedo (UFMG)

Prof. Rogério Ribeiro Marinho (Universidade Federal do Amazonas)

Prof. Helder Lages Jardim (UFMG)

Prof. Vagner Braga Nunes Coelho (UFMG)

Belo Horizonte, 18 de abril de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Úrsula Ruchkys de Azevedo, Professora do Magistério Superior**, em 02/06/2023, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vagner Braga Nunes Coelho, Professor do Magistério Superior**, em 02/06/2023, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Helder Lages Jardim, Membro**, em 02/06/2023, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Ribeiro Marinho, Usuário Externo**, em 12/06/2023, às 23:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Agradecimentos

Os agradecimentos especiais são direcionados ao meu pai (Laurivaldo Costa), marido (André Viana), amigos (Thamyres Fascin, Isabelle Moreira, Nayara Duailibi, Eliza Sena, Natália Dias, Gabriela Rausse, Thaisa Nogueira e Fernanda Bicalho) e a minha psicóloga (Zaíra Ramos) que sempre estiveram ao meu lado durante este período, dando apoio e suporte frente às dificuldades de ser mulher, preta, pobre, nortista e estudante de universidade pública.

Gostaria de agradecer também a minha orientadora Dra. Úrsula Ruchkys que sempre me apoiou e incentivou os meus sonhos, nunca me deixando desistir, a Coordenadora Sônia Carvalho Ribeiro, a Universidade Federal de Minas Gerais, ao Instituto de Geociências, a Pós-Graduação de Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a todos os funcionários, por todo o apoio, investimento e disponibilidade de tempos e de profissionais que colaboraram com o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Por último e mais importante ao meu Coorientador Prof. Dr. Rogério Marinho (UFAM), que foi o meu principal mentor durante a escrita dessa dissertação. Além de excelente professor, pesquisador, coorientador é uma pessoa de coração incrível que me ofereceu suporte não só acadêmico, mas como pessoa, durante todos esses nossos encontros. Para quem não sabe, eu sofro de alguns problemas psicológicos, logo concluir um mestrado foi um grande desafio perante o meu quadro clínico e crises, digo com toda a certeza que sem ele esta dissertação não teria acontecido e eu não estaria hoje realizando um dos meus sonhos, ser a primeira de minha família a ser mestra.

A todos o meu sincero obrigada. Vocês não apenas me ajudaram a realizar um sonho, vocês incentivaram inúmeras pessoas pretas, famílias pobres e mulheres a lutarem por seus espaços nas universidades públicas e aperfeiçoamento para o mercado de trabalho, como também incentivaram a educação e a ciência do nosso país,

“Nem todos que tentaram, conseguiram mas todos que conseguiram, tentaram.”

Clodovil.

RESUMO

O fenômeno terras caídas ou erosão fluvial marginal está entre os processos mais dinâmicos da paisagem amazônica, resultante da relação entre as características hidrodinâmicas a composição das margens, envolvendo aspectos físicos e morfométricos de encostas, onde os aspectos determinantes das taxas de erosão são diretamente influenciados pela geomorfologia do canal, como também pelos aspectos geológicos, pedológicos e climáticos entre outros. Entender os fenômenos hidrológicos nas margens da microrregião do Alto Solimões, Amazonas, é essencial para planejar obras seguras de infraestrutura, como orlas, portos e cidades. Assim, este trabalho teve como objetivo geral caracterizar e modelar os processos de erosão nas margens do alto curso do rio Alto Solimões, com o propósito de criar um mapa das áreas de risco para o fenômeno de terras caídas nessa região. Ao longo do trabalho foi possível observar os locais mais propensos a erosão de acordo com um conjunto de variáveis do meio físico, como também a correlação existente entre elas. Após a análise e conexão dos fatores foi elaborado um mapa de área de risco contendo as principais zonas erodidas até 2020 e também um mapa de simulação de erosão para o ano de 2025, com intuito de estimar as principais áreas que podem ser afetadas pelo fenômeno terras caídas.

Palavras-chave: erosão marginal; geomorfologia fluvial; rio Solimões.

ABSTRACT

The phenomenon of landslides or marginal fluvial erosion is among the most dynamic processes in the landscape, resulting from the relationship between the hydrodynamic characteristics added to the characteristics of the banks, involving physical and morphometric aspects of the slopes, where the aspects that determine the erosion rates are directly influenced by the geomorphology of the channel, as well as by the geological, pedological and climatic aspects among others. The importance of understanding the hydrological phenomena, contacting the dynamics and interaction between the elements that compose the erosion on the margins of the micro-region of Above Solimões, Amazonas State, is to help in the elaboration of infrastructure and safety works for the coastline, ports, cities and others. Thus, this work has the objective of characterizing and modeling marginal erosive processes for the upper course of the Above Solimões River, having as a final product a map of risk areas to the fallen land phenomenon for the region. Throughout the work it is possible to observe the places more prone to erosion according to each explored variable, as well as the correlation between them. After the analysis and connection of the factors, a risk area map containing the main eroded zones was elaborated, as well as an erosion simulation map for the year 2025, in order to speculate the main areas affected by the phenomenon of landslides.

Keywords: marginal erosion; fluvial geomorphology; Solimões river.

Lista de figuras

Figura 1 - Mapa da microrregião Alto Solimões, Estado do Amazonas	17
Figura 2-Área de Estudo.....	18
Figura 3 - Fluxograma dos métodos aplicados.....	24
Figura 4 - Passos simplificados do modelo de simulação de mudanças do uso e cobertura da terra	28
Figura 5 - Área de estudo dividida por trecho.....	30
Figura 6 - Mapa de Solo.....	32
Figura 7 - Mapa de lineamento estruturais	34
Figura 8 - Padrão de canal Anabrangin	35
Figura 9 - Mapa de elevação.....	36
Figura 10 - Mapa de declividade da água	38
Figura 11 - Mapa de vazão.....	39
Figura 12 - Mapa de largura.....	41
Figura 13 - Mapa de Meandros	43
Figura 14 - Meandros abandonados observados no trecho 2.....	44
Figura 15 - Mapa de bancos de areia e ilhas.....	45
Figura 16 – Exemplo de meandro na área de estudo	46
Figura 17 – Exemplo de meandro abandonado	46
Figura 18 - Mapa de sinuosidade.....	48
Figura 19 - Gráfico de correlação linear de Pearson.....	49
Figura 20 - Gráfico de erosão de 1985 a 2020	50
Figura 21 - Gráfico de taxas de erosão e acreção por trecho	52
Figura 22 - Gráfico dos pesos e evidências de erosão e acreção, gerados no Dinamica EGO	53
Figura 23 - Mapa de áreas de risco.....	56
Figura 24 - Mapa contendo áreas mais afetadas	57
Figura 25 - Mapa de simulação de áreas de risco para o ano de 2025.....	58

Lista de Quadros

Quadro 1 - Dados avaliados	25
Quadro 2 - Programas utilizados.....	26
Quadro 3 - Tabela de máximas, mínimas e médias das variáveis para a área total.....	66
Quadro 4 - Tabela de máximas, mínimas das variáveis por trecho	68
Quadro 5 - Percentual de erosão e acreção de 1985 a 2020	69

Lista de abreviaturas e siglas

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
Dinamica EGO	<i>Environment for Geoprocessing Objects</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GRLW	<i>Global River Widths from Landsat</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LI	Linhas de Instabilidade
MDE	Modelo Digital de Elevação
QWBM	Vazão
SAR	Radar de Abertura Sintética
Sensor OL	<i>Operational Land Imager</i>
TOPODATA	Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil.
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	Introdução	9
2	Referencial Teórico.....	12
2.1	Morfologia e Dinâmica Fluvial.....	12
2.2	Erosão Fluvial.....	13
2.3	Terras Caídas e o Sistema Fluvial Amazônico	15
3	Área de Estudo.....	17
3.1	Localização.....	17
3.2	Aspectos do meio natural	18
3.3	Aspectos Econômicos.....	21
4	Materiais e Métodos	24
4.1	Revisão Bibliográfica.....	24
4.2	Aquisição e padronização dos Dados.....	25
5	Resultados e Discussão	29
5.1	Caracterização e processos físico-naturais	29
5.2	Erosão.....	50
5.2.1	Taxas anuais de Erosão (1985 - 2020).....	50
5.3	Áreas de risco.....	52
6	Considerações Finais.....	59
	Referências.....	61
	Apêndices.....	66

1 Introdução

A região amazônica abrange uma complexa e extensa rede hidrográfica por sua extensão, caracterizada por um mosaico de ambientes hidrográficos, definido não apenas pela heterogeneidade de seus ecossistemas, mas pelo processo de ocupação e desenvolvimento (Azevedo Filho, 2013), sendo caracterizada por várzeas, encostas convexas, tabuleiros interfluviais, baixos e ampla faixa de planícies divididas por relevo residual (Shubart, 1983). Os quais apresentam características naturais de erosão altas, denominadas regionalmente de “Terras Caídas”.

A bacia do rio Amazonas drena uma área estimada em 6,5 milhões de quilômetros quadrados, apresentando entre outras características, um complexo e dinâmico sistema flúvio-lacustre formado na imensa planície de inundação que chega a 100 km de largura (Carvalho et al., 2009).

Um dos aspectos importantes na caracterização da bacia hidrográfica do rio Amazonas são os variados tipos de rios contribuintes. Sioli (1985), tomando como parâmetro a cor das águas e suas características biogeoquímicas, classificou os rios amazônicos em rios de água preta, rios de água clara e rios de água branca. Os rios de água preta, como o rio Negro, Jutai, Tefé, nascem no embasamento cristalino das guianas e em áreas mais planas no interior da bacia, tendo o rio Negro como principal representante. Os rios de água clara, como o rio Tapajós, nascem no embasamento cristalino brasileiro e desaguam no curso médio e inferior do rio Amazonas. Enquanto os rios de água branca, como Solimões, Juruá e Purus, nascem na cordilheira andina e pré-andina de onde transportam grande quantidade de sedimentos que são depositados em grande parte nos cursos médios e inferior desses rios, e nas áreas de transbordamento dos mesmos, formando a atual planície de inundação (Carvalho et al., 2009).

A rede hidrográfica amazônica contribui de forma direta para a ocorrência de fenômenos naturais de transformação da paisagem devido aos processos de erosão e deposição fluvial. Um deles, diz respeito aos movimentos de blocos de terras nas margens dos canais conhecido localmente de “Terras Caídas, processo comum em rios de água branca, como os observados nos rios Solimões, Madeira e Amazonas.

A erosão às margens dos cursos d'água é uma das manifestações mais visíveis do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de um reequilíbrio dinâmico e das

alterações na dinâmica do sistema fluvial, ocorrendo um trabalho contínuo de escavação na base da margem côncava e de deposição na parte convexa (Cunha, 2007).

A erosão nas margens está entre os processos mais dinâmicos da paisagem, resultante da relação das características hidrodinâmicas somadas às características da margem, envolvendo aspectos físicos e morfométricos de encostas onde os aspectos determinantes das taxas de erosão são diretamente influenciados pelo uso da terra nas adjacências do canal.

Dentre as variáveis primárias que influenciam a erosão marginal do solo, a cobertura e a rugosidade superficial são as mais importantes, sendo responsáveis pela contenção do processo erosivo, armazenagem e retenção dos sedimentos da erosão da face de encostas (Kamphorst et al., 2000). Isso evidencia a importância dos processos de infiltração como mecanismo subsidiário à erosão marginal.

O fenômeno pode acontecer de maneira natural, mas as ações humanas têm intensificado o processo de erosão e assoreamento dos rios brasileiros. O desmatamento é um dos maiores agravantes desse processo. Sem árvores, arbustos ou até mesmo grama, o solo fica exposto e menos resistente a ação do clima, ou seja, mais propício para ser arrastado pela chuva ou pelo vento. A falta de matas ciliares também ocasiona a erosão da encosta dos rios. Dificultando a navegação, principal meio de transporte da região norte do Brasil.

A erosão fluvial pode causar perdas e destruições, que afetam questões sociais, ambientais e econômicas. Esse fenômeno pode alterar a biodiversidade do rio, uma vez que a vegetação subaquática, os peixes e outros animais podem ser comprometidos, levando, inclusive, em casos mais extremos, ao desaparecimento de algumas.

O fenômeno "terras caídas" corresponde à terminologia regional amazônica utilizada para designar erosão fluvial nas margens da calha do rio Solimões-Amazonas e de seus afluentes de água branca e englobam processos como: escorregamento, deslizamento, desmoronamento e desabamentos. O pacote sedimentar deslocado das margens varia em tamanho, atingindo grandes extensões de terras, ou às vezes, dimensões quase imperceptíveis. Nas margens do rio Solimões- Amazonas e seus grandes afluentes esse processo é intenso em função da configuração de um complexo sistema flúvio-lacustre (Carvalho, 2006).

Trata-se de um fenômeno complexo, multicausal e que acontece em escala quase que imperceptível, pontual, recorrente e muitas vezes é catastrófico. A modalidade de erosão de "Terras Caídas" é desencadeada por uma combinação de diferentes fatores, onde se destaca os

altos níveis pluviométricos desta região, estimados na ordem de 2.600 mm/ano (Freitas, 2009). Outros aspectos, como a fragilidade do material das margens e a própria dinâmica que a água do rio exerce sobre esse material merecem ser destacados. Carvalho (2006) elenca como fatores responsáveis pelo fenômeno: pressão hidrodinâmica; pressão hidrostática; composição do material das margens; neotectônica; fatores climáticos; fatores antropogênicos. Ainda que em escala diferente, quase todos esses fatores acima citados contribuem para os eventos.

Pelo exposto, fica evidente a complexidade do processo das Terras Caídas nas margens do rio Amazonas e seus afluentes, como discutido por Carvalho et al., 2009, Freitas e Albuquerque (2012), Nascimento e Filizola (2016), Bandeira et al (2018).

Nesse contexto, esse trabalho tem como principal objetivo: caracterizar e modelar processos erosivos marginais no alto curso do rio Solimões (entre os municípios de Tabatinga, Benjamin Constant, São Paulo de Olivença, Amaturá e Santo Antônio do Içá,), estado do Amazonas. Os objetivos específicos são: (i) investigar os processos físico-naturais envolvidos; (ii) caracterizar as mudanças na paisagem ocasionadas pela erosão fluvial; (iii) gerar um mapa de áreas de risco ao fenômeno terras caídas.

2 Referencial Teórico

2.1 Morfologia e Dinâmica Fluvial

Em geral, a dinâmica dos sistemas fluviais apresenta alto grau de complexidade, sendo influenciada pelos diferentes contextos geológicos de cada região, o que dificulta ainda mais a compreensão geomorfológica e hidrodinâmica (Hayakawa, 2011). Um sistema fluvial dinâmico apresenta mudanças de regimes de fluxo que o modificam e remodelam suas margens e leito ao longo dos anos, em função das variações do relevo, declividade, clima, rugosidade do leito do canal, largura, profundidade, sinuosidade, fluxo da corrente (vazão e velocidade), cobertura vegetal, resistência do substrato e outras (Schumm, 1985; Mial, 1981). Essas variáveis influenciam diretamente nos processos de erosão e deposição, que, quando em desequilíbrio, geram mudanças no estilo fluvial em um determinado intervalo de tempo (Fernandez, 1990).

Dentro desse contexto, a morfologia fluvial desempenha um papel fundamental na compreensão dos sistemas fluviais. Suguio (2003) descreve algumas das principais características gerais sobre as principais formas de canais fluviais. Os canais meandantes são caracterizados principalmente por sua sinuosidade, que reflete a intensidade de meandramento do canal. A sinuosidade aumenta, em geral, de montante para a jusante, em consonância com a diminuição da declividade e o aumento da carga sedimentar transportada.

Leopold e Wolman (1957) definiram três tipos morfológicos clássicos de estilos fluviais: retilíneo, meandrante e entrelaçado. Posteriormente, Knighton (1998) acrescentou as morfologias transicionais e anastomosadas. No entanto, a aplicação dessas definições simples de tipos de canais, como retilíneos, meandantes e entrelaçados, é difícil em grandes rios (Latrubesse et al., 2005).

No estilo fluvial retilíneo, os canais percorrem seu leito quase que em linha reta, apresentando uma sinuosidade desprezível em relação à sua largura. A erosão ocorre ao longo das margens mais profundas, e esses canais podem ter origem tectônica e/ou condicionamento topográfico (Leopold e Wolman, 1957).

Já o estilo fluvial meandrante é geralmente associado a regiões de clima úmido e se caracteriza pela alta sinuosidade dos canais ($> 1,5$) e pela relação largura/profundidade > 40

(Rust, 1978). Os meandros são comuns em rios que fluem em declives suaves de planícies e terras baixas, cortando sedimentos inconsolidados, como areia fina, silte ou argila, ou substrato rochoso facilmente erodível. Nesse estilo fluvial, ocorrem migração lateral pela erosão gradual nas margens côncavas e deposição nas margens convexas. Além disso, apresenta barras em pontal (com estratificação heterolítica inclinada) e planícies de inundação bem desenvolvidas (Tucker, 1973; Clifton Phillips, 1980; Thomas et al., 1987) (Suguió, 2003).

No estilo fluvial entrelaçado, ocorrem múltiplos canais estáveis e entrelaçados, geralmente em regiões de subsidência em relação ao nível de base regional. A presença de vegetação nas margens e ilhas confere maior estabilidade aos canais, reduzindo a migração. Esse estilo fluvial apresenta transporte predominantemente por suspensão e misto, podendo chegar a sedimentos grosseiros (Smith e Smith, 1980; Miall, 1981) (Suguió, 2003).

Outro estilo fluvial é o anabranching, caracterizado por canais múltiplos de baixa energia, com bancos resistentes e estáveis, separados por ilhas que possuem altitudes semelhantes às da planície de inundação (North et al., 2007). Esse estilo ocorre em regiões de clima úmido e seco. Os canais anabranching apresentam predominantemente carga em suspensão e sedimentos de fundo variando entre cascalho e areia. Esses canais possuem migração lateral, carga mista e ocorre a formação de barras por acreção vertical (Nanson Knighton, 1996). Esse estilo é caracterizado pela estabilidade dos canais e é comumente observado em grandes sistemas fluviais ao redor do mundo (Latrubesse, 2008).

De acordo com Nanson (2013), canais de rios com ilhas aluviais estáveis, vegetadas ou de outra natureza, que dividem o fluxo das águas, são denominados anabranching, e esse padrão é dominante entre os maiores rios do mundo, como o sistema fluvial Solimões-Amazonas (Latrubesse et al., 2005; Latrubesse, 2008, 2012). Estudos compilados por Nanson Knighton (1996) constataram que parâmetros como hidráulica, geologia, botânica e aspectos fisiográficos desempenham um papel importante nas variações desse estilo fluvial.

2.2 Erosão Fluvial

A erosão fluvial está relacionada ao transporte de sedimentos, que são removidos e transportados pelo curso d'água. Esses sedimentos podem ser carregados em suspensão ou no leito do rio. Além disso, a erosão marginal em rios pode ocorrer devido a processos como

escorregamento, desmoronamento e desabamento (Carvalho, 1994).

A erosão marginal em rios, de acordo com Carvalho (2006), resulta de um processo complexo que envolve diferentes fenômenos: i) O escorregamento é caracterizado pelo deslizamento rápido de um corpo coeso, como rocha, regolito ou sedimentos, ao longo de superfícies curvas de ruptura. Esse movimento ocorre quando o centro de gravidade da massa em movimento avança de fora para baixo. Na região de Miracauera/AM, o escorregamento é observado de forma mais lenta durante a vazante do rio. ii) O desmoronamento é um movimento rápido de um bloco de solo ou rocha, que ocorre quando há um vazio criado na parte inferior da vertente devido ao solapamento. Esse fenômeno é comumente encontrado nas margens fluviais e pode ocorrer devido à saturação do solo durante períodos de cheia. O desmoronamento é caracterizado por um plano de ruptura próximo a 90°. O desabamento é uma forma abrupta de deslizamento de massa, que ocorre de maneira randômica e não possui uma superfície de deslizamento definida. Nesse caso, a gravidade é responsável pelo deslocamento da massa, não havendo uma forma específica para a massa desprendida.

No âmbito de estudos sobre erosão fluvial, é essencial considerar diversos elementos do canal fluvial que desempenham um papel fundamental nesse processo, tais como: feições associadas aos canais fluviais, transporte de sedimentos, sinuosidade, tipos de movimento da água, variáveis geométricas do canal fluvial, declividade, altitude, cota, vazão, velocidade e escoamento superficial .

No caso das feições associadas a canais fluviais, Bigarella (1990) identifica as seguintes unidades morfológicas aluvionares: (i) os depósitos de Barra de Meandro, que consistem em sedimentos arenosos, silticos ou conglomeráticos e são formados dentro de canais sinuosos pela deposição de material erodido na margem côncava de uma curva de meandro, e na margem convexa da curva seguinte, à jusante; (2) os depósitos de Barras Longitudinais e Transversais que ocorrem em rios entrelaçados e são formados pela carga de fundo durante fases de escoamento rápido. Vale ressaltar os depósitos que ocorrem fora dos canais, como os (iii) Diques Naturais, que são cordões sinuosos com seção transversal grosseiramente triangular, com maior altura próxima à margem do canal, formando bancos íngremes e altos que afinam em direção à planície de inundação, e os (iv) Depósitos de Planície de Inundação, que consiste em sedimentos finos, como areia fina, silte e argila, formados por um processo semelhante à formação dos diques naturais. Além disso, é importante mencionar os(v) Depósitos de Rompimento de Diques, formados quando uma grande quantidade de água e

sedimentos transborda sobre os diques durante uma enchente, causando o rompimento e a formação de um depósito aluvionar. A compreensão desses elementos contribuirá significativamente para uma análise abrangente da erosão fluvial e para a implementação de medidas eficazes de manejo e mitigação.

2.3 Terras Caídas e o Sistema Fluvial Amazônico

Em algumas áreas nos rios Amazônicos, ocorre um processo erosivo chamado "terras caídas". Esse fenômeno é caracterizado pelo desmoronamento das margens fluviais, resultando no deslizamento de grandes quantidades de sedimentos. Essas erosões modificam a paisagem amazônica, especialmente na planície de inundação, também conhecida como área de várzea, onde os rios transportam e depositam grandes quantidades de sedimentos ao longo de seu curso. Segundo Carvalho (2006), as terras caídas são resultado de processos erosivos que podem variar desde os mais simples até os altamente complexos, envolvendo escorregamento, deslizamento, desmoronamento e desabamento, com impactos que podem ser imperceptíveis, pontuais, recorrentes ou até mesmo catastróficos, afetando distâncias consideráveis.

Esse fenômeno é influenciado por vários fatores naturais e ocorrem principalmente nos rios de várzea da região amazônica, conforme destacado por Cruz e Azevedo Filho (2017). O processo transforma as feições da paisagem ribeirinha, podendo ser observado em todos os rios da região em grande área ou em pequenas áreas. E afetando os modos de vidas dos moradores pelas ocorrências de perdas de bens materiais. Segundo Albuquerque (2012) "As margens do rio Amazonas não são estáveis, tanto o canal principal ou de seus paranás sofrem intenso processo erosivo, causado pelo deslocamento do rio em sua trajetória dentro da planície até atingir a foz".

A erosão fluvial desempenha um papel fundamental na degradação do solo, sendo uma das formas mais importantes de erosão na região amazônica, como afirmado por Zachar (1982). Esse processo é causado pela ação da água dos rios, que escava vales mais profundos em comparação com as áreas circundantes. Além disso, a falta de vegetação nas margens dos cursos d'água leva à erosão das margens pelos fluxos de água, contribuindo para o assoreamento e alargamento do leito dos rios.

A ocorrência da erosão fluvial está relacionada a diversos fatores, como pressão

hidrodinâmica, pressão hidrostática, composição do material das margens, neotectônica, fatores climáticos e fatores antropogênicos. A pressão hidrodinâmica é causada pela velocidade e descarga fluvial, exercendo pressão nas margens dos rios. Já a pressão hidrostática refere-se à água retida no pacote sedimentar. A composição do material das margens, geralmente constituído por areia, silte e argila inconsolidada, também influencia a erosão fluvial.

As terras caídas na região amazônica são influenciadas por diversos fatores naturais e climáticos. Além dos elementos naturais, como ventos, intensidade das chuvas e aumento do nível do rio, a ação humana também desempenha um papel, principalmente por meio do desmatamento da vegetação ciliar e da movimentação de embarcações potentes, que aumentam a capacidade de solapamento das margens. Carvalho (2006) destaca a atuação conjunta dos seguintes fatores no fenômeno das terras caídas: pressão hidrodinâmica, relacionada à velocidade e descarga fluvial; pressão hidrostática, decorrente da retenção de água no pacote sedimentar; composição do material das margens, que oferece pouca resistência devido à presença de areia, silte e argila inconsolidada; neotectônica, com relação direta entre fatores estruturais e processos fluviais; fatores climáticos, como os ventos gerais que produzem ondas (banzeiros) que solapam e desbarrancam as margens; e fatores antropogênicos, onde a ação humana contribui para o fenômeno, principalmente através do desmatamento e da movimentação de embarcações. Essa combinação de fatores resulta no desmoronamento das margens fluviais, deslocamento de sedimentos e formação de falésias íngremes (Carvalho, 2006; Sternberg, 1998; Tricart, 1977; Igreja, 1998; Meis, 1968).

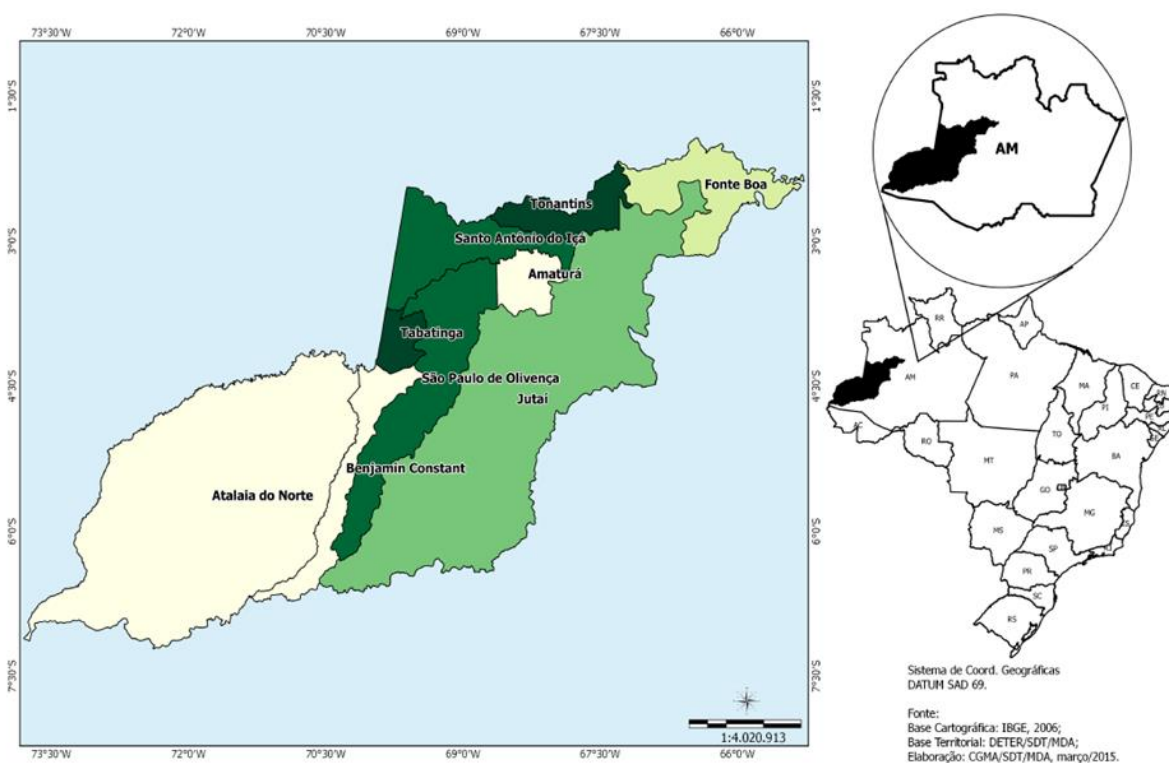
No contexto do sistema fluvial amazônico, a localização geográfica e a geometria da bacia de drenagem do rio Amazonas são fatores-chave que influenciam as características da rede de drenagem e a tipologia dos rios. Sioli (década de 1950) propôs uma classificação inicial dos corpos d'água amazônicos em três tipos: rios de água preta, rios de água clara e rios de água branca. No entanto, estudos mais recentes, como o de Junk et al. (2020), expandiram essa classificação, propondo seis categorias de rios: água branca, água preta, água clara, intermediária tipo A, intermediária tipo B e água salobra. Essas categorias levam em consideração parâmetros como carga de sedimentos em suspensão, pH, condutividade elétrica e composição química.

3 Área de Estudo

3.1 Localização

O Alto Solimões é uma microrregião do Estado do Amazonas, composto por nove municípios (Tabatinga, Benjamin Constant, São Paulo de Olivença, Santo Antônio do Içá, Atalaia do Norte, Tonantins, Fonte Boa, Jutai e Amaturá), estabelecidos na região oeste do estado (Figura 1). Esta microrregião compreende 213.277,24 km², com 224.094 habitantes, sendo sua maioria residente nas sedes municipais, que por sua vez encontram-se às margens do Rio Solimões (CGMA, 2015).

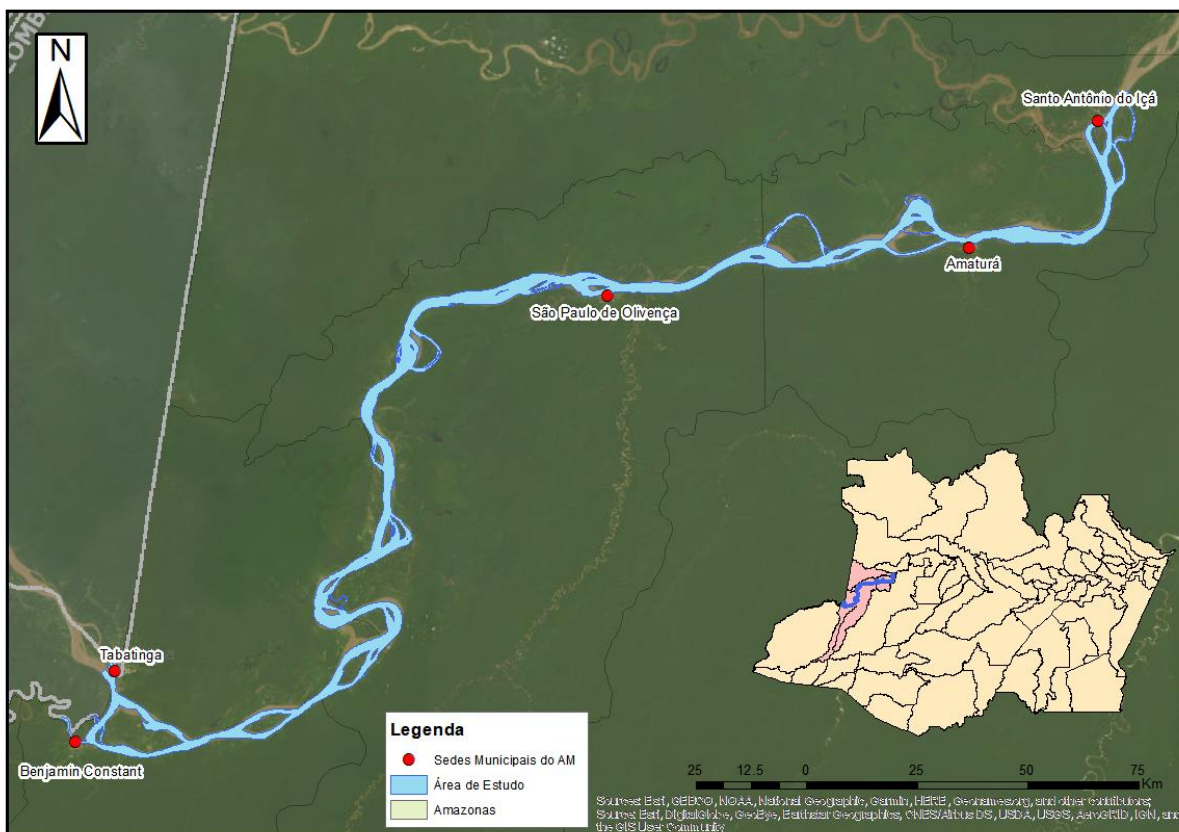
Figura 1 - Mapa da microrregião Alto Solimões, Estado do Amazonas



Fonte: IBGE, 2006.

A área de estudo compreende os cinco principais municípios da microrregião do alto Alto Solimões, Tabatinga, Benjamin Constant, São Paulo de Olivença, Amaturá e Santo Antônio do Içá (Figura 2). Municípios de destaque populacional e econômico, os quais detêm as principais rotas e portos da região.

Figura 2-Área de Estudo



Fonte: Copilação do autor, 2023.

3.2 Aspectos do meio natural

A Bacia Amazônica possui duas estações climáticas bem definidas: uma estação seca de maio a setembro e uma estação chuvosa de novembro a março, com abril e outubro como meses de transição entre os regimes climáticos. Durante a estação seca, o clima na bacia Amazônica é permanentemente quente e úmido, com temperatura média de aproximadamente 30°C, enquanto na estação chuvosa a temperatura média é de 26°C (Sioli, 1991).

A região da Bacia Amazônica sofre influência das variações climáticas globais, especialmente dos fenômenos "El Niño" e "La Niña", que resultam em seca ou vazante acentuada e cheias intensas, respectivamente. Esses fenômenos contribuem para uma distribuição não uniforme das chuvas na região (Welcomme, 1985; Richey et al., 1989; Barros, 2001).

A distribuição heterogênea das chuvas na área influencia a subida e descida anual das águas na região Amazônica (Filizola et al., 2002). Diversos fatores desempenham um papel

significativo no regime pluvial da Bacia Amazônica, incluindo o deslocamento meridional (norte-sul) da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), processos de convecção associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), brisa fluvial, circulação geral da alta troposfera, anomalias na temperatura da superfície do mar no Pacífico tropical (El Niño e La Niña), eventos de Linhas de Instabilidade e configuração do Dipolo do Atlântico nos últimos 10 anos (Marengo, 2009; Alcântara, 2010).

A recarga hídrica da bacia hidrográfica do rio Solimões é influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), aglomerados convectivos e sistemas frontais. A variação sazonal das águas na região Amazônica é uma resposta à heterogeneidade na distribuição das chuvas (Serrão et al., 2015).

O rio Solimões faz parte da rede hidrográfica do rio Amazonas, cuja nascente está localizada na Cordilheira oriental dos Andes peruanos, próximo ao rio Apurímac, perto de Cuzco. A jusante, o rio Ucayali recebe contribuições do rio Pachitea antes de sair dos Andes. Na Amazônia peruana, o rio Ucayali recebe os rios Marañón e Napo em sua margem esquerda, originários da Cordilheira Central peruana e dos Andes equatorianos, respectivamente. Após a confluência Ucayali-Maranhón, o rio é chamado de Amazonas no Peru e recebe o nome Solimões quando entra no Brasil (Filizola et al., 2002).

No Brasil, o rio Solimões recebe contribuições dos rios Putumayo-Içá e Caquetá-Japurá, afluentes andinos da Colômbia, em sua margem esquerda. Em sua margem direita, recebe importantes contribuições dos rios Juruá e Purus, cujas nascentes estão localizadas na fronteira entre Peru e Brasil. Próximo a Manaus, o rio Solimões encontra o rio Negro, formando o rio Amazonas no Brasil.

No que diz respeito ao regime hidrológico, os rios da região são classificados em quatro tipos de regimes, de acordo com Jean Rodier (1964). O regime tropical austral apresenta um pico de cheia no primeiro semestre do ano e é representado pelos rios do hemisfério sul, como o Purus, Madeira, Xingu e Tapajós. O regime tropical boreal, representado pelo rio Branco, tem um pico de cheia bem marcado no segundo semestre do ano. O regime equatorial, representado pelo rio Negro, Içá e Japurá, possui um pico de cheia mais acentuado no meio do ano, podendo apresentar até dois picos de máxima em um ano. O regime equatorial alterado é representado pelo Solimões e pelo Amazonas, sofrendo influência dos regimes anteriores ((Molinier et al., 1995, Santos e Matos 2013).

O canal do rio Solimões no Brasil é caracterizado como anabranching, com um sistema

de canais múltiplos de baixa energia, bancos de areia resistentes e estáveis, e fluxo variando de laminar a turbulento. A planície de inundação é controlada por arcos estruturais, que afetam a largura, sinuosidade e gradiente dos rios. O rio Solimões é classificado como um rio de água branca. (Filizola et al., 2002).

Durante o período de águas altas (abril a junho), a largura do rio varia de 1000 m a 2000 m, com profundidade entre 20 a 8 metros. No período de estiagem, a profundidade mínima pode variar de 10 a 3 metros. A variabilidade da descarga líquida e a distribuição das vazões específicas (Q em $l.s-1.km^2$) no rio Solimões são influenciadas por diversas componentes regionais, variando de 34 a 50 $l.s-1.km^2$ (Franzielle, 2011 e Machado, 2014). O rio é de grande importância por promover a integração com outros países sul-americanos, como Peru e Colômbia, sendo navegável desde sua foz até o encontro com o rio Negro (MMA, 2005).

Considerando os dados da EMBRAPA (2018), na área de estudo, são encontrados três tipos predominantes de solo: argissolos, plintossolos e gleissolos. Os argissolos possuem uma sequência de horizontes A-B-C, sendo o horizonte B textural o diagnóstico, caracterizado pela acumulação de argila em relação ao horizonte A. A fração de argila é composta principalmente de caulinita e óxidos de ferro e alumínio. A formação desses solos está relacionada a diferentes materiais de origem, sendo mais comum em rochas cristalinas do Arco Carauari.

Os plintossolos são solos minerais com uma sequência de horizontes diversificada. Em subsuperfície, podem conter materiais mosqueados ou até mesmo uma couraça ferruginosa, resultado da segregação de óxido de ferro. Esses solos também podem apresentar alterações do aquífero ou do substrato rochoso pré-existente.

Os gleissolos são solos minerais hidromórficos desenvolvidos em sedimentos recentes. Eles ocorrem em relevo plano e possuem como característica diagnóstica a presença de um horizonte glei, que é formado em ambientes hidromórficos e apresenta cores de redução de ferro, como cinza, preto ou esverdeado. Esses solos são encontrados na área do canal Solimões e em sua planície de inundação (Guerra, 2003).

Além disso, os limites marginais do rio Solimões também estão em contato com argissolos, que podem ser superficiais ou apresentar horizonte B, após os gleissolos e plintossolos.

Ocorrendo na área do canal Solimões e em sua planície de inundação. São os solos argilosos com sequências de horizontes A e C, são desenvolvidos por sedimentos fluviais. Os

Gleissolos apresentam subgrupos o qual o Háplico Eutróficos contém argilas de atividade alta e saturação por bases alta (V 50%), ambas na maior parte dos horizontes B e/ou C (inclusive BA ou CA) dentro de 100 cm a partir da superfície do solo. Corresponde aos Depósitos Aluvionares, são detritos ou sedimentos de qualquer natureza, carregados e depositados pelos rios. Este material é retirado das margens e das vertentes, sendo levado em suspensão pelas águas dos rios que o acumulam em bancos, constituindo os depósitos aluvionares (Guerra, 2003). No entanto alguns dos limites marginais do rio Solimões estão em contatos com argissolos, que além de superficiais também se apresentam no horizonte B, após os gleissolos e plintossolos.

Geologicamente, a área de estudo está localizada na Bacia Sedimentar Solimões, que abrange 500.000 km² no estado do Amazonas. Essa bacia faz parte do Cráton Amazônico, dividido em Escudo das Guianas ao norte e Escudo Brasil-Central ao sul. A Bacia do Solimões faz limite com a Bacia do Acre a oeste, através do Arco de Iquitos, e com a Bacia do Amazonas a leste, através do Arco de Purus (Caputo, 1984; Cordani et al., 1984). A bacia possui sequências sedimentares que datam desde o Ordoviciano até o Cenozoico, incluindo rochas detríticas, pelíticas, conglomerados, arenitos, siltitos e folhelhos.

A Bacia do Solimões está dividida em dois compartimentos tectônicos distintos, cujo Arco de Carauari a separa na Sub-bacia do Juruá (a leste), e a Sub-bacia de Jandiatuba (a oeste), ambas sotopostas por rochas metamórficas e ígneas (Eiras et al., 1994).. A Bacia do Solimões é composta por cinco sequências estratigráficas e inclui formações como Benjamin Constant, Jutaí, Marimari, Tefé, Javari e Solimões, com diferentes tipos de rochas e características. A Formação Solimões é composta por argilitos vermelhos e cinzas, com presença de conchas, linhito e fósseis vegetais e animais. (CPRM, 2003).

3.3 Aspectos Econômicos

A região do Alto Solimões, possui uma localização estratégica em relação ao Arco Norte da Faixa de Fronteira, nela encontra-se a principal porta de entrada da parte ocidental da Bacia Amazônica, constituindo-se um dos principais corredores de integração sul-americano, o do Rio Marañon-Solimões Amazonas. Nesta Sub-região da Faixa de Fronteira encontram-se unidos os territórios dos maiores países amazônicos: Brasil, Peru e Colômbia. Além disso, cabe

salientar que se trata da região mais preservada da floresta amazônica e onde se localiza uma das maiores comunidades indígenas da Amazônia, a comunidade dos Ticuna. Distribuídas ao longo das margens do Solimões e seus principais afluentes, os Ticuna estão presentes nos três países fronteiriços, marcando fortemente a identidade da Sub-região.

A microrregião Alto Solimões possui uma área total de 214.217,80 Km², abrigando uma população estimada em 240 mil habitantes (IBGE, 2010) e cerca de 123 mil habitantes indígenas (Cortés et al., 2020), distribuído em 150 comunidades indígenas demarcadas ou em processo de demarcação, em sua maioria localizada ao longo dos rios. A maior concentração está em Tabatinga, com quase 10 mil indígenas, seguido de São Paulo de Olivença com 7.722 indígenas, sendo estes um dos municípios que mais sofrem com o fenômeno terras caídas.

A despeito da baixa densidade populacional (0,93 hab/km²), verifica-se o crescimento médio da população rural de cerca de 4% ao ano, sendo que a proporção de população urbana ficou estável. Em Tabatinga e Benjamin Constant observa-se uma população urbana consideravelmente maior que a rural (60%), que junto a São Paulo de Olivença e Santo Antônio do Içá constituem os maiores núcleos urbanos regionais. A população rural é bastante significativa, correspondendo a mais de 50% da população dos municípios do Alto Solimões. Ela é formada basicamente de indígenas e ribeirinhos, sendo que os índios Ticunas concentram-se na beira dos rios ou em reservas próximas às cidades.

O índice de densidade social (composto de índice de analfabetismo, chefes de domicílio abaixo da linha de pobreza, renda per capita, unidades de ensino e unidades de saúde, entre outros) apontou uma grave situação no Alto Solimões, onde quase todos os municípios apresentaram densidade social muito baixa, sendo que apenas Benjamin Constant apresentou densidade social média (IBGE, 2010).

Com vastos territórios e carência de infraestrutura de transportes, predominantemente, ou exclusivamente fluvial, o acesso da população da região aos serviços de saúde, saneamento, educação, comunicações se vê altamente dificultado, além de haver permanente escassez de recursos humanos para a saúde. A ocupação espaçada e as margens do rio representam uma dificuldade a mais para a vida das pessoas no Alto Solimões, pois dificulta o acesso aos benefícios da infraestrutura moderna e serviços. Mesmo as populações das principais cidades da região carecem de serviços básicos, como água potável (tratada ou de poço artesiano controlado), gerando um círculo vicioso de doenças de veiculação hídrica e falta de saneamento que acaba por minar ainda mais a saúde e os escassos recursos

municipais.

A base produtiva do Alto Solimões está calcada no extrativismo (madeira em toras, castanha e frutas), pesqueiro, na agricultura da mandioca e da banana, com artesanato e turismo. O setor industrial é inexpressivo, com serrarias, pequenas movelarias e olarias com produção destinada ao mercado regional/local. O poder aquisitivo da população é baixo, estima-se que grande parte da renda provém de salários do funcionalismo público municipal e em torno de 10% de transferências governamentais (aposentadorias, pensões e programas oficiais de auxílio, como a renda mínima, bolsa-escola e seguro-desemprego), apontando um baixo nível de atividades produtivas em geral.

4 Materiais e Métodos

Para o cumprimento dos objetivos, a pesquisa foi desenvolvida em etapas conforme figura 3.

Figura 3 - Fluxograma dos métodos aplicados



Fonte: Copilação do autor, 2023.

4.1 Revisão Bibliográfica

Levantamento de acervo bibliográfico foi realizado por meio de livros didáticos, trabalhos acadêmicos (monografia, dissertação e tese), além de artigos publicados em periódicos internacionais e nacionais sobre os temas de erosão lateral, hidrografia, geomorfologia fluvial, pedologia, clima, geologia e outros.

4.2 Aquisição e padronização dos Dados

Os dados utilizados na caracterização, análise e modelagem das mudanças na superfície de água e estimativas de erosão margens do rio Solimões estão apresentados na Quadro 1. Os softwares utilizados estão apresentados na quadro 2, acompanhada de uma breve descrição dos mesmos.

Quadro 1 - Dados avaliados

DADOS/ANO	FORMA	FONTE	ESCALA
Massa D'água (Rio Solimões)/2020	Arq. Vetorial	IBGE	1:100.000 e 1:250.000
Ilhas/2020	Arq. Vetorial	IBGE	1:100.000 e 1:250.000
Bancos de Areia/2020	Arq. Vetorial	IBGE	1:100.000 e 1:250.000
Declividade da margem	Arq. Vetorial	TOPODATA	1:100.000 e 1:250.000
Elevação	Arq. Vetorial	Frasson, R.P. de M.; Pavelsky, T.M.; Fonstad, M.A.; Durand, M.T.; Allen, G.H.; Schumann, G.; et al. 2019. Global Relationships Between River Width, Slope, Catchment Area, Meander Wavelength, Sinuosity, and Discharge. Geophysical Research Letters 46: 3252–3262	Escala Global
Largura			
Meandro			
Sinuosidade			
Declividade da água			
Vazão			
Fluxo por largura			
Fluxo por área			
Distância de lineamentos	Arq. Vetorial	Costa.R., 2023	1:100.000
Dados de superfície da água (1985 - 2020)	Arq. Raster	MapBiomas	1:250.000

Quadro 2 - Programas utilizados

PROGRAMA	FORMATO	RESULTADO
ArcGis e QGis	Arq. Vetorial e Raster	Caracterização, análise e resultados estatísticos
Dinamica EGO	Arq. Raster	Mapa de área de risco e Mapa de simulação
Past	Dados numéricos	Correlação de variáveis

Os dados cartográficos utilizados foram reprojetados para o sistema de coordenadas e Datum: UTM Fuso 19 Sul e Sirgas 2000 Sistema de Informações Geográficas (SIG), Arcgis 10.8 e posteriormente delimitados para a área de estudo, arquivos de largura, elevação, vazão, declividade da margem, declividade da água, meandro, sinuosidade, distância linear. Posteriormente os arquivos vetoriais foram padronizados em formato raster, para serem inseridos nos programas Dinamica EGO e/ou Past.

Nos resultados os dados se apresentarem de forma segmentada devido à origem dos dados serem de modelagem em escala global e por trecho. Essa situação acarreta um nível de escala regional (menor que 1:250.000), o qual acaba apresentando alguns padrões diferentes quando projetados para escalas mais finas.

Na caracterização da geometria fluvial foram utilizados os dados Frasson et al., 2019, onde cada linha central é definida por conjuntos de pontos localizados aproximadamente a cada 30 m com base no banco de dados *Global River Widths*. Cada linha descreve um trecho do canal e apresenta os seguintes atributos:

- Número de identificação do segmento do rio (segmentos são partes de um rio delimitadas por confluências).
- Largura média no meandro, desconsiderando pequenas larguras de rios atribuídas a locais não detectados por imagens Landsat, mas conhecidos por serem inundados. Os locais onde nenhuma largura pode ser produzida são marcados como valor -9999.
- Elevação média deriva da missão SRTM (90 m) por trecho do rio. Os pixels SRTM são atribuídos a pontos igualmente espaçados (a cada 30m) sobre as linhas centrais do rio usando a abordagem do vizinho mais próximo. A elevação média de todos os pontos válidos por trecho é relatada aqui. Os locais onde nenhuma elevação pode ser produzida são marcados

como valor -9999.

- Declividade da superfície da água em centímetros por quilômetro. A inclinação é calculada inicialmente em trechos de 10 km, então usada para calcular comprimentos de alcance ótimos usando uma versão modificada da equação proposta por LeFavour e Alsdorf (2005) na forma de $RL=2/S$, onde RL é o comprimento de alcance ótimo, é a incerteza da altura (5,51 m de LeFavour e Alsdorf, 2005) e S a estimativa inicial da inclinação. As inclinações finais são calculadas sobre os comprimentos de alcance ótimos usando elevações atribuídas aos pontos de 30 m do rio usando regressão linear clássica ou o estimador de *Theil-Sen*, dependendo de qual método produz o melhor coeficiente de determinação. Locais onde nenhuma inclinação pode ser produzida são marcados como -9999.

- Comprimento de onda meandro, calculado primeiro suavizando as linhas centrais do rio com resolução de 30 m usando uma média móvel de 5 pontos e, em seguida, identificando os pontos de inflexão nas linhas centrais do rio suavizadas. Finalmente, o comprimento de onda do meandro assume o valor de duas vezes a distância entre pontos de inflexão consecutivos de acordo com a definição dada por Leopold e Wolman (1960).

- Sinuosidade: A sinuosidade é uma medida adimensional de cada meandro do rio calculou a razão do comprimento entre as extremidades dos meandros medidos ao longo da linha central do rio para metade do comprimento de onda do meandro, conforme definido por Leopold e Wolman (1960).

- Vazão média anual estimada com o modelo de balanço hídrico WBMsed (Cohen et al., 2014).

- Potencial de fluxo normalizada pela largura(W/m).

- Potencial de fluxo normalizada por área(W/m²).

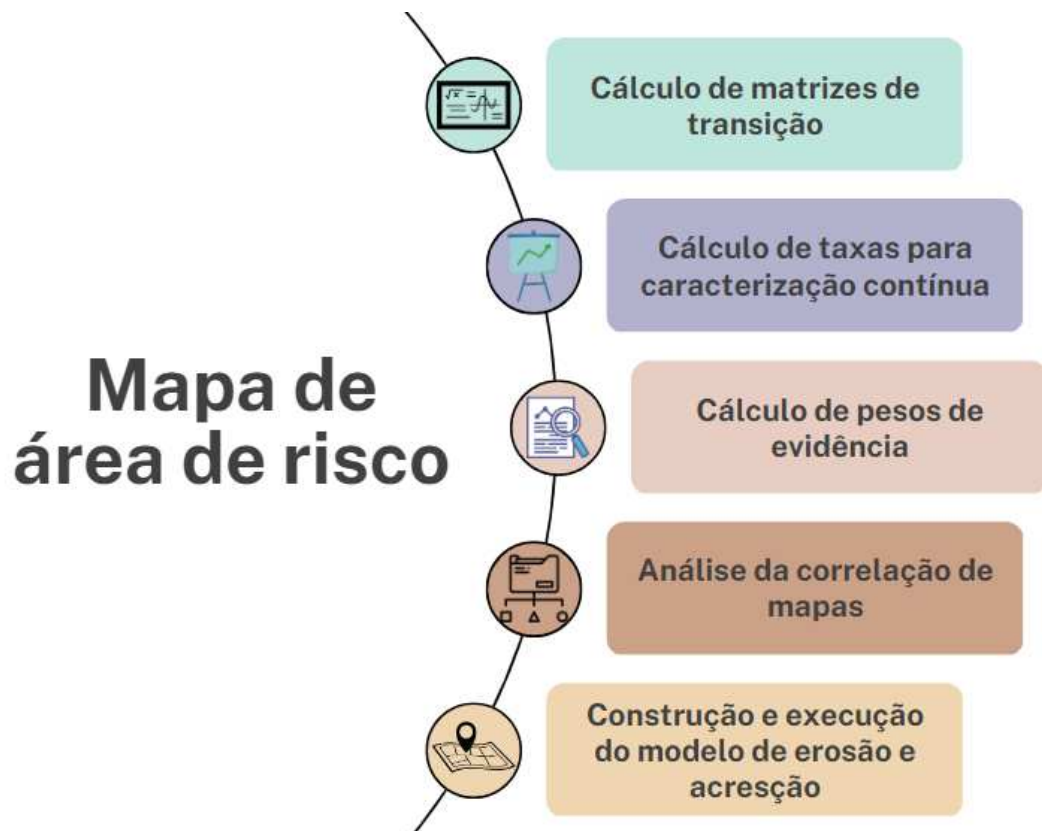
A partir dos dados do Projeto MapBiomias Água(dinâmica de água superficial e de corpos hídricos) foi possível extrair dos dados anuais (1985 – 2020) e produzir uma análise temporal de erosão e acreção (incremento) das margens do rio Solimões na microrregião do Alto Solimões.

Para a produção dos dados de erosão do canal por m², entre os anos de 1985 e 2020, foram extraídos da plataforma MapBiomias - Dados de superfície de água anual, em formato raster. A partir da extração foi calculada a área ocupada por água e não água para cada ano, analisando a série temporal em gráfico de linha, construído em excel.

O uso dos SIG's *ArcGis* e *QGIS* ocorreu para padronizar, aquisição de dados estatísticos, taxa de erosão entre os anos de 1985 a 2020, e elaboração dos mapas temáticos.

A modelagem e simulação das mudanças na paisagem fluvial foram realizadas no *Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objects)*, resultando na integração dos dados do *Global River Widths* para elevação, lineamentos, meandros, profundidade, sinuosidade e largura. A figura 4 mostra os passos seguidos para a modelagem espacial das mudanças na paisagem fluvial.

Figura 4 - Passos simplificados do modelo de simulação de mudanças do uso e cobertura da terra.



Fonte: Fonte: Copilação do autor, 2023.

O *software Past* é um software livre para análise de dados científicos, com funções para manipulação de dados, plotagem, estatística univariada e multivariada, séries temporais, entre outras. Neste trabalho ele foi usado para avaliar correlações entre variáveis através citados no quadro 1 e as taxas de mudança.

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização e processos físico-naturais

A área de estudo tem 2.192,38 km² inserida no rio Solimões, se estendendo desde a sede municipal Benjamin Constant/AM e Tabatinga, na tríplice fronteira Brasil-Peru-Colombia, até a sede municipal de Santo Antônio do Içá/AM. Esta área foi dividida em 4 trechos (Figura 5): Trecho 01 (Sede de Benjamin Constant até Comunidade de Belém do Solimões), Trecho 02 (Comunidade de Belém do Solimões até Comunidade Santa Rita do Weil), Trecho 03 (Comunidade Santa Rita do Weil até Comunidade Novo Paraíso) e Trecho 04 (Comunidade Novo Paraíso até sede de Santo Antônio do Içá).

Figura 5 - Área de estudo dividida por trecho

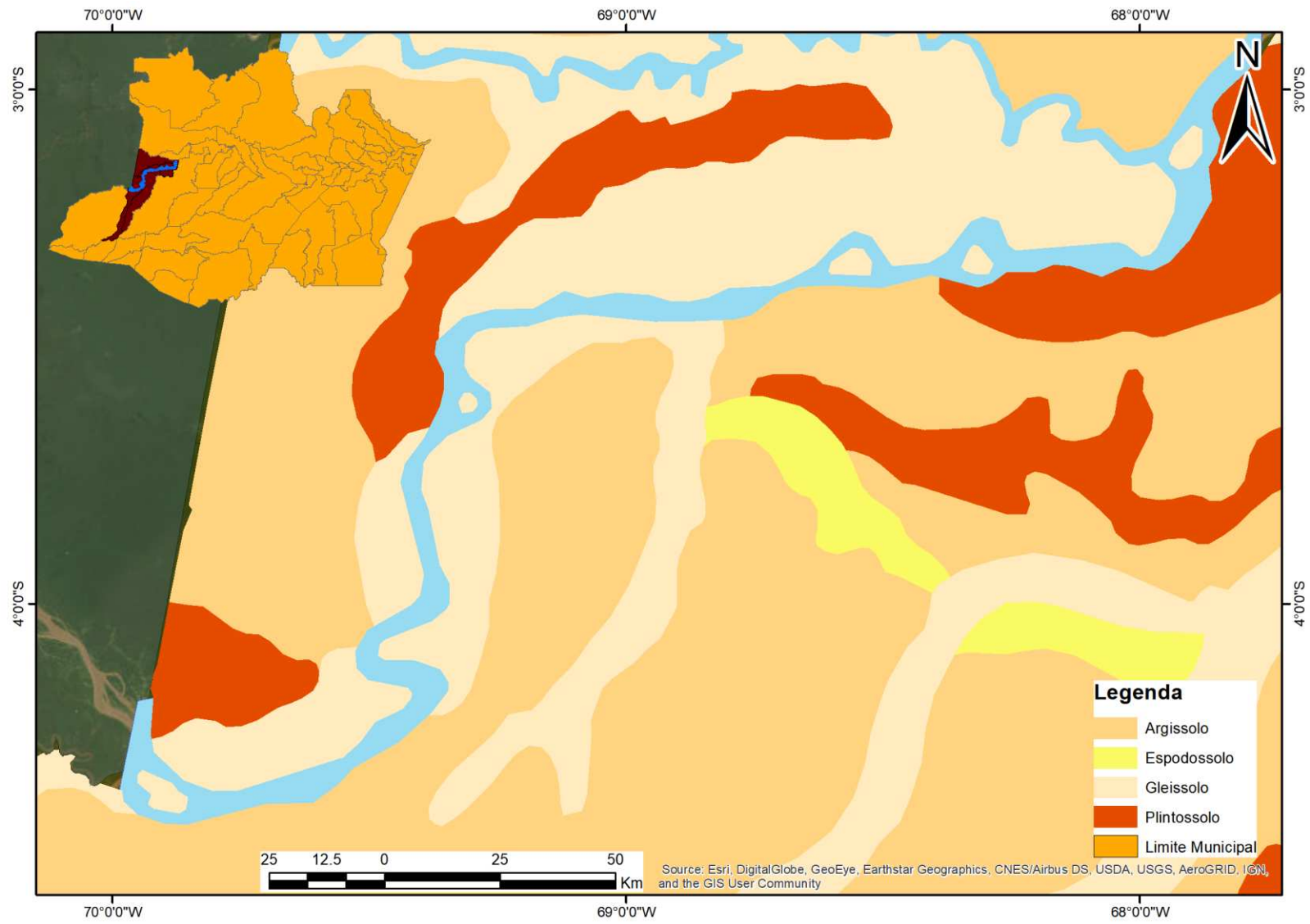


Fonte: Copilação do autor, 2023.

Como abordado por vários autores (Croke, 1992; Knighton, 1998, Miall, 1996; Fielding, 2007), existe uma relação estreita entre o tipo de padrão e forma do canal, as variáveis envolvidas e as características desenvolvidas no canal e na planície de inundação. As diferentes morfologias e a arquitetura sedimentar que caracterizam uma planície de inundação podem estar diretamente relacionadas às dinâmicas hidrogeomorfológicas dos padrões de canais associados. citados abaixo.

No que diz respeito à geologia do local, a área de estudo compreende as Formações Icó e Solimões e ao final do canal, na porção do trecho 04 observa-se a presença dos Terraços Fluviais (Figura 7). Como se pode observar na figura 6, no que diz respeito ao solo o canal como todo e sua área de inundação estão inseridos dentro dos Depósitos Aluvionares, que é um material retirado das margens e das vertentes, caracterizados como detritos ou sedimentos de qualquer natureza, carregados e depositados pelos rios. De acordo com a base de dados da EMBRAPA o material sedimentar, explicitado anteriormente, é caracterizado como Gleissolo, com contribuição dos Argissolos e Plintossolos, nas porções mais distantes do canal.

Figura 6 - Mapa de Solo



Fonte: Copilação do autor, 2023.

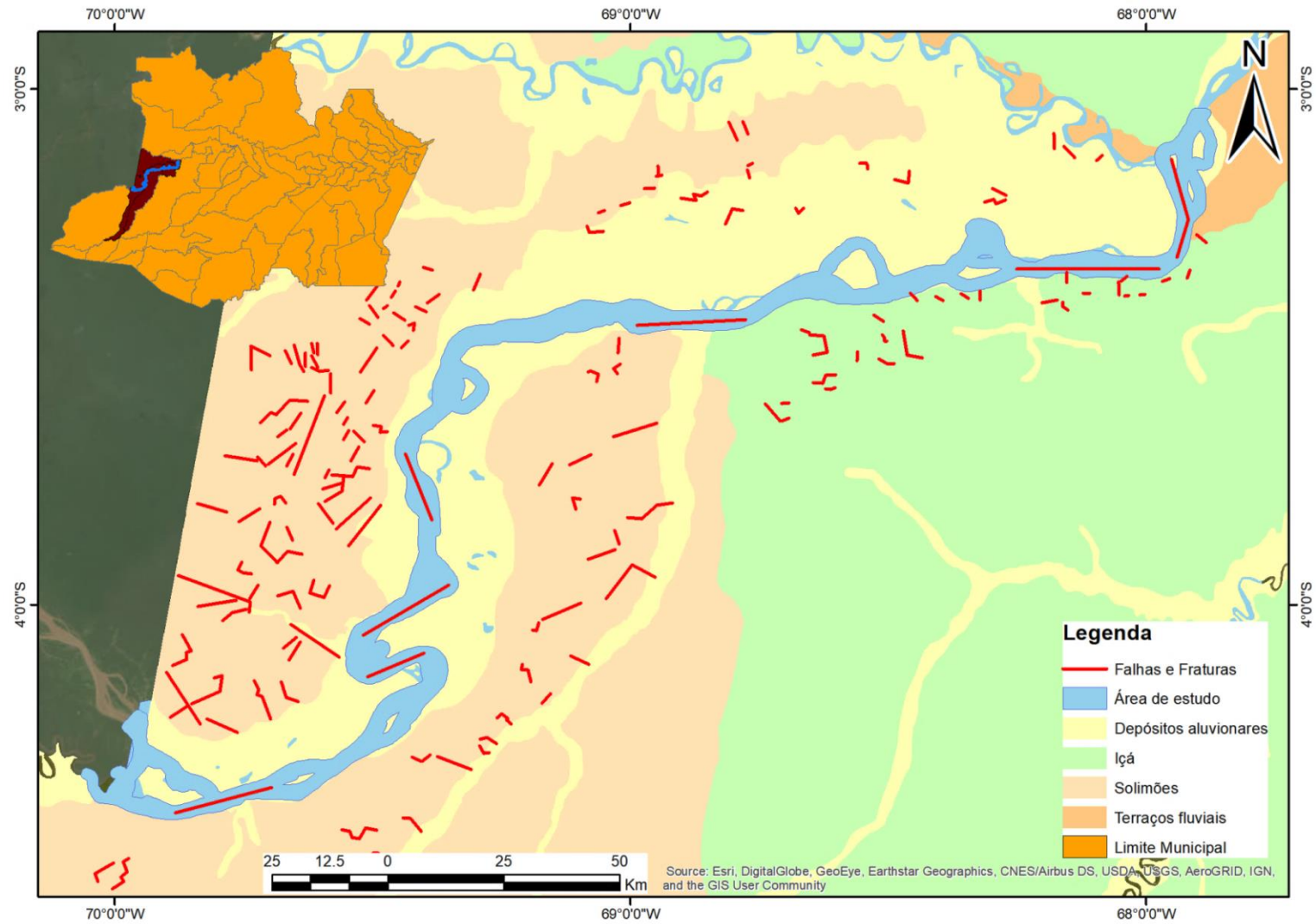
Ocorrendo na área do canal Solimões e em seu entorno, na planície de inundação, encontram-se solos minerais hidromórficos, argilosos com sequências de horizontes A e C, desenvolvidos de sedimentos fluviais recentes. Ocupam relevo plano, tendo como característica diagnóstica a presença de um horizonte glei, formado em ambiente hidromórfico caracterizado por cores de redução de ferro (cinza, preto, esverdeado).

Os Gleissolos contém argilas de atividade alta e saturação por bases alta, ambas na maior parte dos horizontes B e/ou C, dentro de 100 cm a partir da superfície do solo. Geologicamente corresponde aos Depósitos Aluvionares, citados anteriormente, sendo estes detritos ou sedimentos de qualquer natureza, carregados e depositados pelos rios.

Em observação aos lineamentos, gerados por meio de interpretação de imagem de satélite, as principais estruturas lineares encontram-se sob a Formação Solimões as quais melhor as preservaram ao longo dos anos devido a sua estrutura mais rochosa do que sedimentar. Quando comparado ao mapa de solo, tendo como base a classificação disponibilizada pela EMBRAPA, constatamos que as estruturas lineares se sobrepõem majoritariamente sobre os argissolos, principalmente aos que se encontram na margem esquerda (Formação Solimões). Junto a esses solos estão os Plintossolos, faixas mais estreitas que pela sua características de conter concreções ferruginosas acabam preservando tais estruturas lineares, tanto na Formação Solimões quanto na Formação Icó.

No canal principal observamos os lineamentos em suas zonas mais retilíneas. De acordo com a figura 7 não se observa, de maneira expressiva, lineamentos nos Depósitos Aluvionares devido às constantes mudanças no ambiente, devido ao aporte de sedimento, tipo de material, posicionamento do canal principal e variação do nível da água.

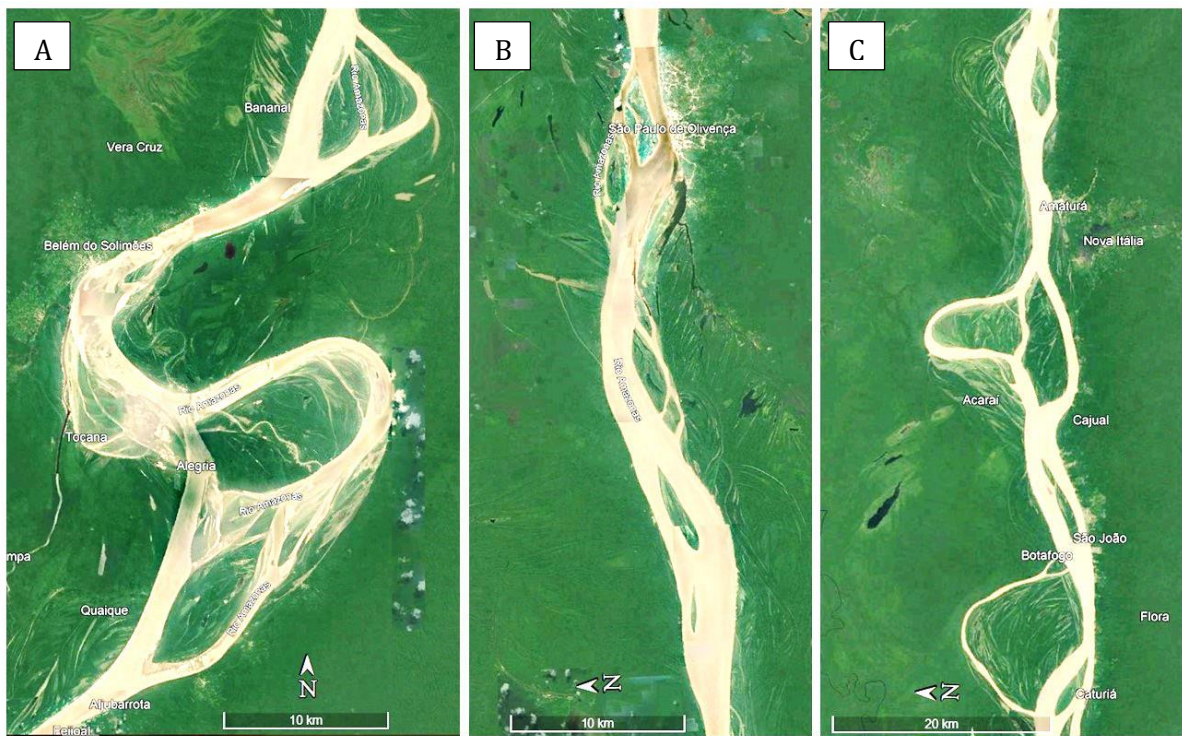
Figura 7 - Mapa de lineamento estruturais



Fonte: Copilação do autor, 2023.

O Canal como um todo apresenta padrão de drenagem anabranching (Figura 8), sendo um sistema de canais múltiplos com baixa velocidade, apresentando bancos de areia resistentes e estáveis, sendo lentamente migratórios separados por ilhas com altitudes semelhantes a da planície de inundação, típico de regiões de clima úmido com rio de água branca ou turva.

Figura 8 - Padrão de canal Anabranching, observados na área de estudo, sob as coordenadas. A) 4° 6'44.10"S/ 69°27'13.92"W B) 3°27'23.51"S/ 68°57'19.45"W C) 3°21'11.05"S/ 68°15'59.38"W

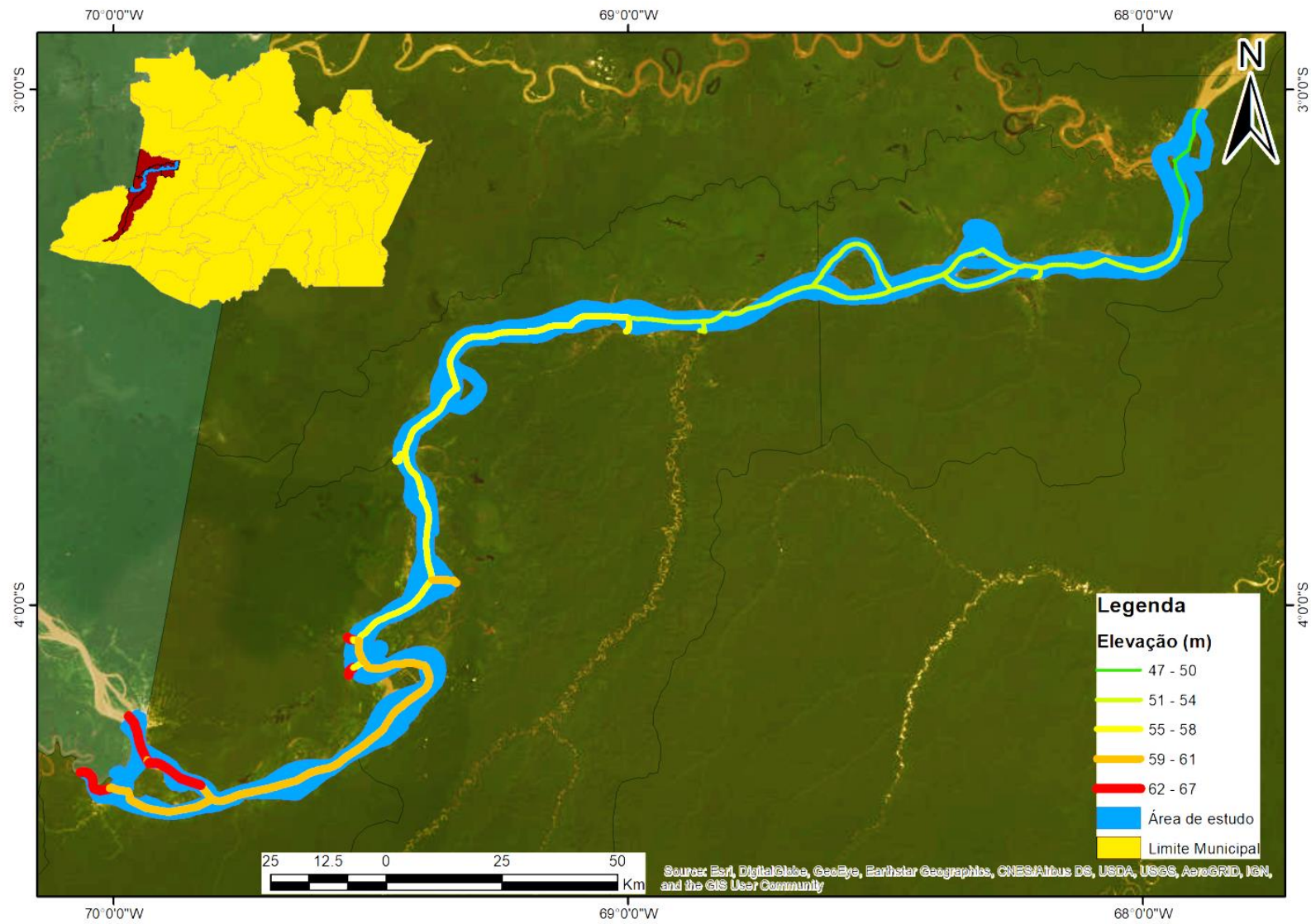


Fonte: Imagens do Google Earth, 2023.

Por ter origem nos Andes este tipo de rio tem sua cor turva ou branca devido à alta carga de sedimentos em suspensão, indicadas pela alta condutividade elétrica que varia entre 30 – 140 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Junk, et al., 2020). Estes sólidos são ricos em nutrientes e seu pH é quase neutro, devido a estas características os rios de águas brancas são os mais ricos em peixes, comparado a baciado rio Negro.

De acordo com os dados de elevação, a média é de 56,51m, apresentando variações entre 47 a 64 m. Dentre os trechos, o de número 2 tem a elevação com menor variação e média de 56,53m. A elevação (figura 9), está muito associada a variáveis como a declividade da água, vazão pois exerce forte influência devido a mudança da altitude.

Figura 9 - Mapa de elevação



Fonte: Copilação do autor, 2023.

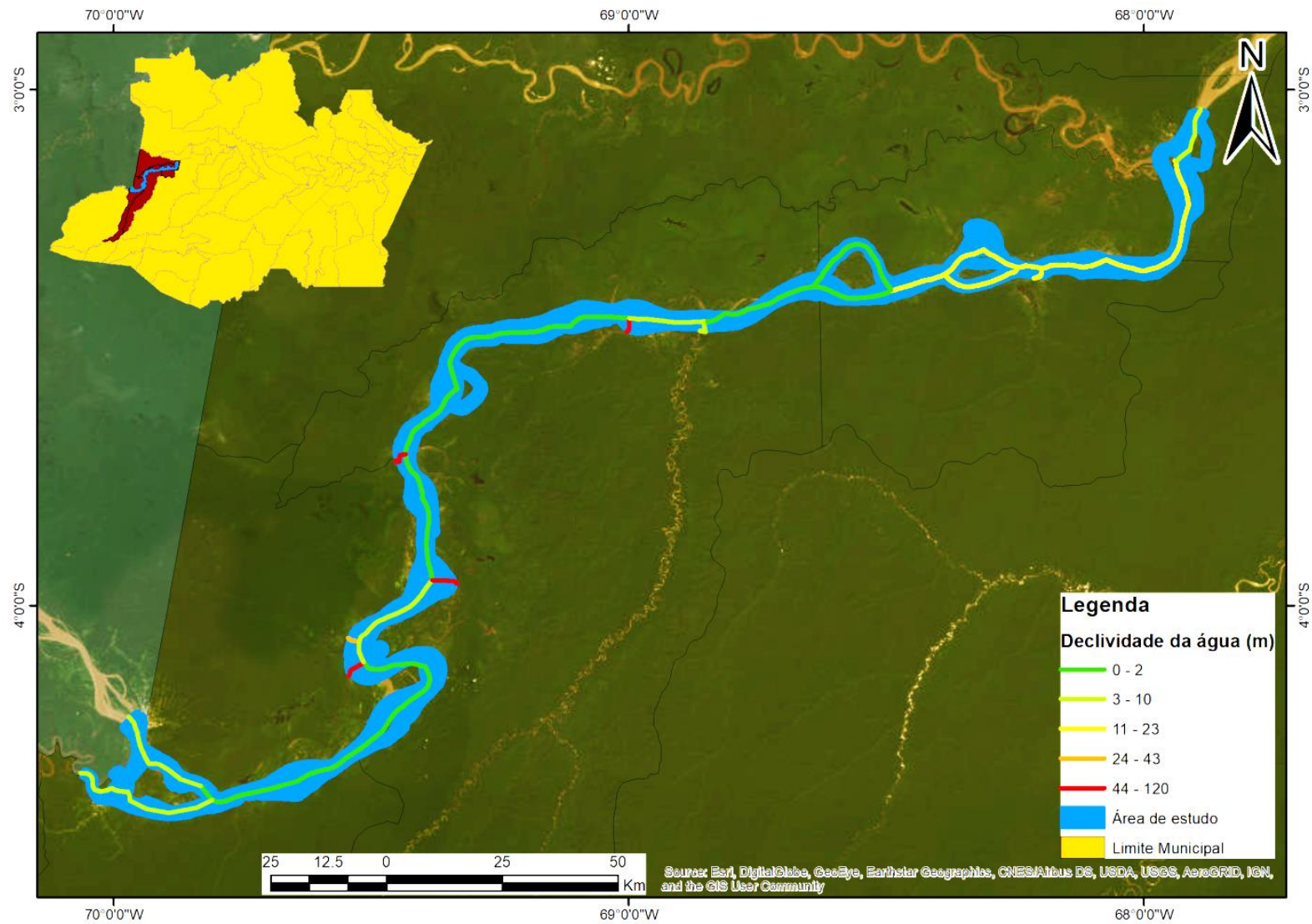
Como destacado anteriormente, a declividade da superfície d'água está muito associada à elevação do terreno, pois a partir da variação que se pode calcular a declividade. Os dados de elevação mostraram que não houve grandes variações, considerando a declividade do canal como um todo, com caimento suave e de baixa declividade.

No entanto, há porções onde a esta variação apresenta-se de forma mais expressiva. No final do trecho 02, por exemplo, constatamos uma a elevação de 56 m e adiante a elevação torna-se de 52m, no mapa de declividade da água essa mudança é evidenciada com uma inclinação mais expressiva (Figura 10).

Uma mudança na elevação influencia diretamente a declividade da água e conseqüentemente sua vazão, como visto nos trechos 3 e 4. Ainda, nesses trechos de maior vazão, observamos que o canal tende a ter porções mais retilíneas e estreitas, traços que corroboram para uma maior vazão.

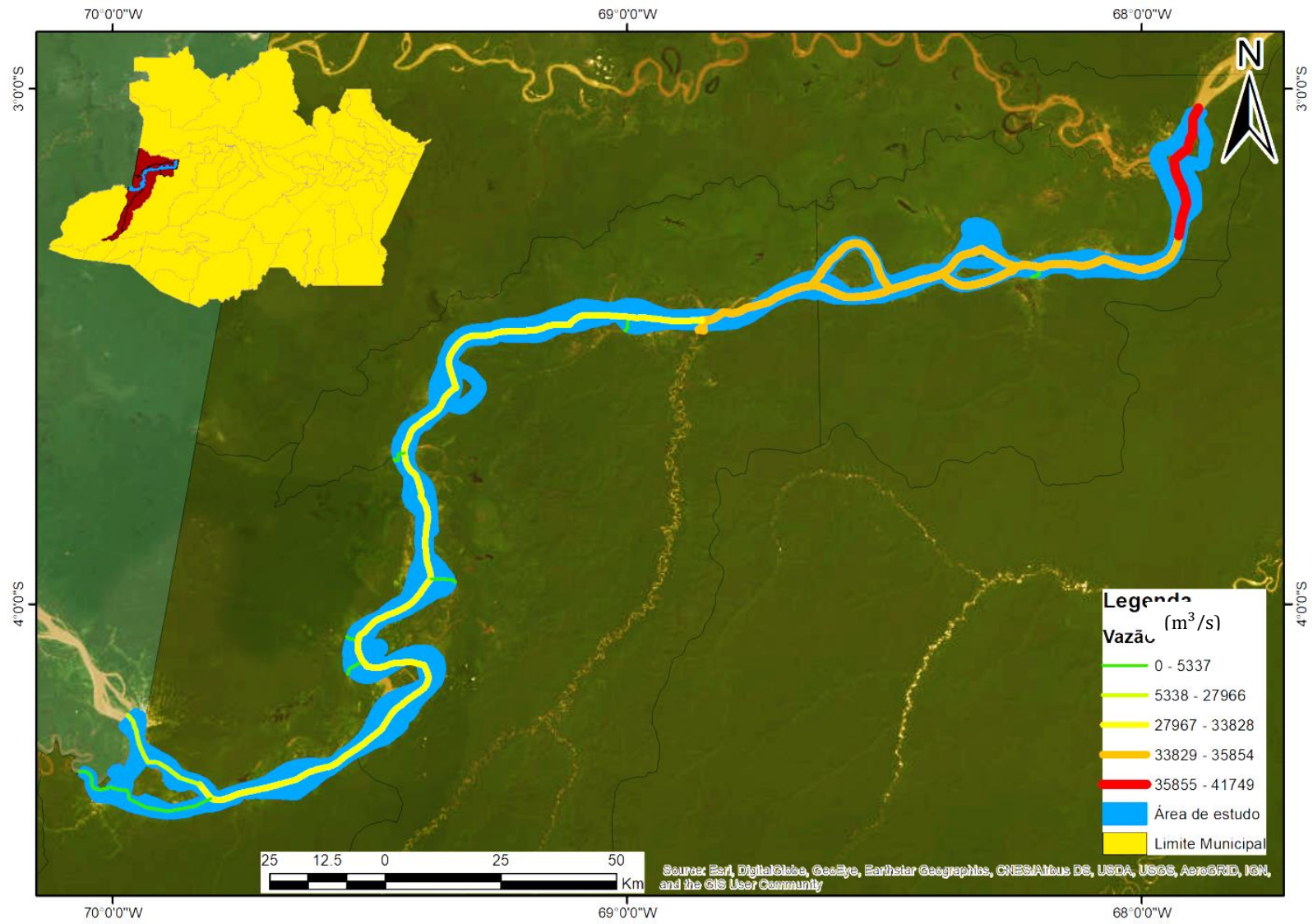
Ao analisar todas as particularidades descritas ao longo do estudo, conclui-se que em trechos com canal largo, o fluxo é lento, enquanto em trechos mais estreitos, o fluxo é mais rápido.

Figura 10 - Mapa de declividade da água



Fonte: Copilação do autor, 2023.

Figura 11 - Mapa de vazão



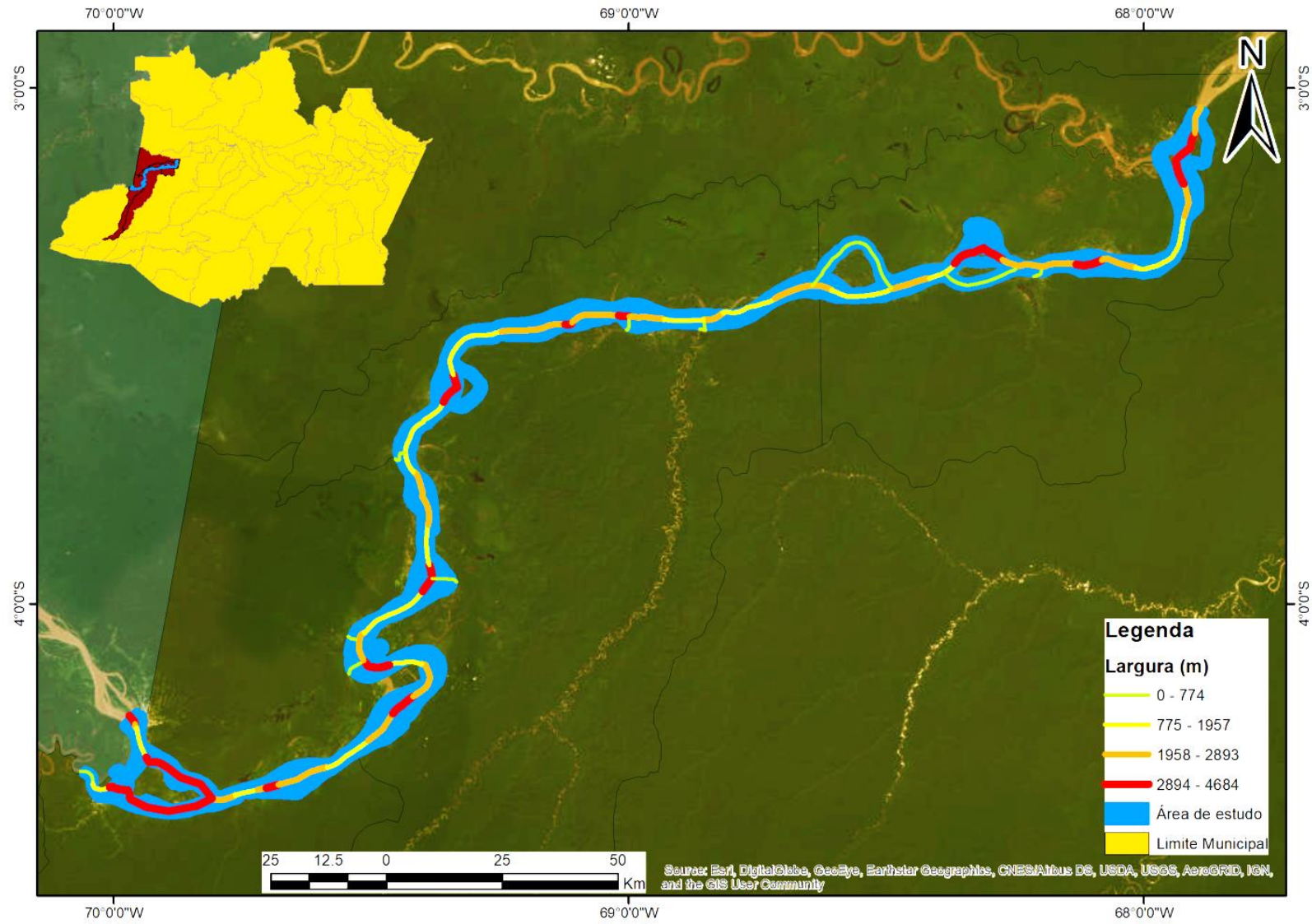
Fonte: Copilação do autor, 2023.

Em resposta a ação da gravidade as águas se movem para as partes mais baixas do terreno. Considerando a baixa viscosidade da água, o fluxo no canal, ele ocorre de duas maneiras: fluxo laminar e fluxo turbulento. Além da viscosidade, a rugosidade do leito, a velocidade do fluxo e a profundidade e sinuosidade do canal, podem influenciar o tipo de fluxo. As moléculas de água formam padrões caóticos de movimentação, podendo, por vezes seguir por breve período, em sentido contrário ao fluxo principal. O fluxo turbulento predomina em boa parte do canal, tanto ao longo da seção longitudinal, quanto na seção transversal do canal, levando-se em consideração profundidade e largura. No Sistema Coletor dos rios, por exemplo, predominam leitos rochosos com alta rugosidade, induzindo o fluxo à turbulência. Mesmo nos grandes canais do Sistema Transportador, o fluxo turbulento se desenvolve em resposta às variações de velocidade do fluxo e ao atrito da água com as margens e o leito do canal. O desenvolvimento do fluxo turbulento aumenta o poder erosivo dos rios, provocando desmoronamento de suas margens em períodos de cheia.

No que diz respeito à declividade da margem, esta não apresenta grande variação, com valor mínimo de 0° e máxima de 87° . Em áreas de maior sinuosidade é possível encontrar uma maior declividade desta margem. Devido aos valores de taxa de erosão e acresção no canal em conjunto com a declividade da margem e meandro, pode-se observar uma correlação entre as variáveis, concluindo que em zonas mais meandrantas, com margens mais inclinadas, ocorre uma maior taxa de erosão do que em áreas meandrantas e com margens suaves.

O rio é composto majoritariamente por larguras medianas, próximas de 2.500 m. Onde há larguras maiores constatam-se velocidades menores, conseqüentemente menor vazão e em largura menores há velocidades maiores, com vazões maiores (Figura 12).

Figura 12 - Mapa de largura



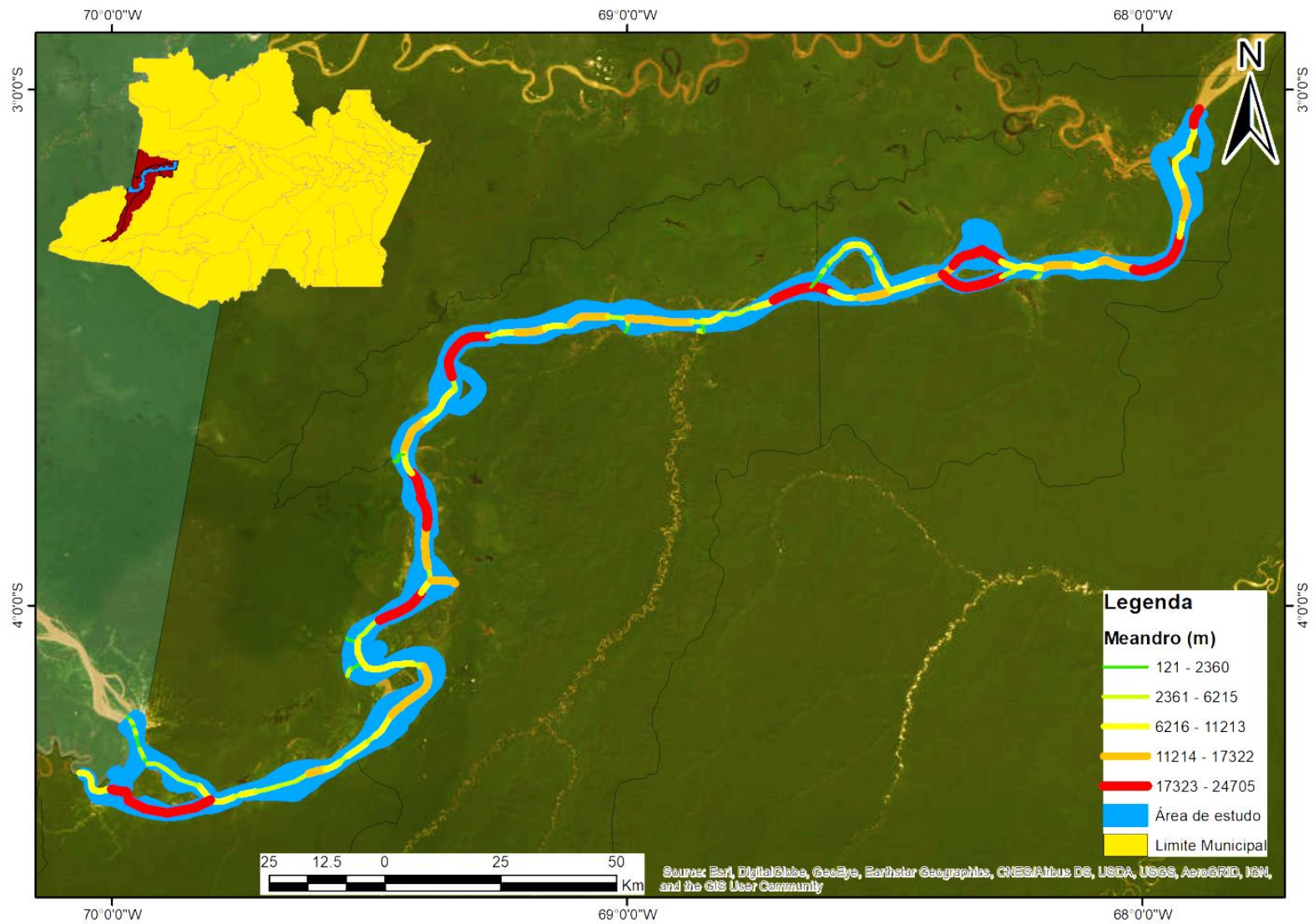
Quando se trata do fluxo pela área, de modo geral é considerado baixo, com média de $156,62 \text{ m}^3/\text{s}$. E o fluxo por largura, também, com média de $14.635,24 \text{ m}^3/\text{s}$. Porém ao final do trecho 3 e todo o trecho 4 o fluxo se torna médio a alto, atingindo $56.697,94 \text{ m}^3/\text{s}$, isso ocorre devido a mudança de altitude. Para os trechos 1, 2 e início do trecho 3 a altitude é superior a 55 m, com fluxos mais lentos, posteriormente o aumento do fluxo se dá pela diminuição da declividade, chegando até 47m (Figura 9). Outro ponto importante é a largura do rio que em trechos onde o rio corre com maior velocidade o seu canal apresenta menor largura.

Observa-se que a largura está diretamente associada à magnitude do comprimento de onda do meandro e à área de captação. Além disso, pode-se observar que partes mais estreita do rio apresentam uma variação maior de valores de declividade e sinuosidade, comparados a regiões mais largas.

O trecho do Rio Solimões em estudo apresenta características meandantes com valores de comprimento de onda (λ) máximos de 24.705 m e mínimo de 120 m, demonstrando uma grande variação, durante o percurso. Os comprimentos de onda associado a barras de meandro apresentam valores medianos a altos, tendo em suas extremidades (início e fim do meandro) comprimentos baixos, com características retilíneas (Figura 13).

Em áreas de meandro é muito comum observar movimento de massa do tipo desabamento, devido à remoção das partículas na zona côncava do canal.

Figura 13 - Mapa de Meandros



Fonte: Copilação do autor, 2023.

O canal apresenta depósitos do tipo em barra de meandros com tamanhos variando entre 4 a 10 km e de acordo com Suguio e Bigarella (1990), são classificados os depósitos formados fora do canal como diques naturais, com formato de ferradura (Figura 14). Foi observado que com o passar dos anos o canal tende a modificar a sua área de passagem, sempre dentro da área de inundação, logo é possível observar suas mudanças ao longo dos anos e a formação e abandono de suas barras e meandros.

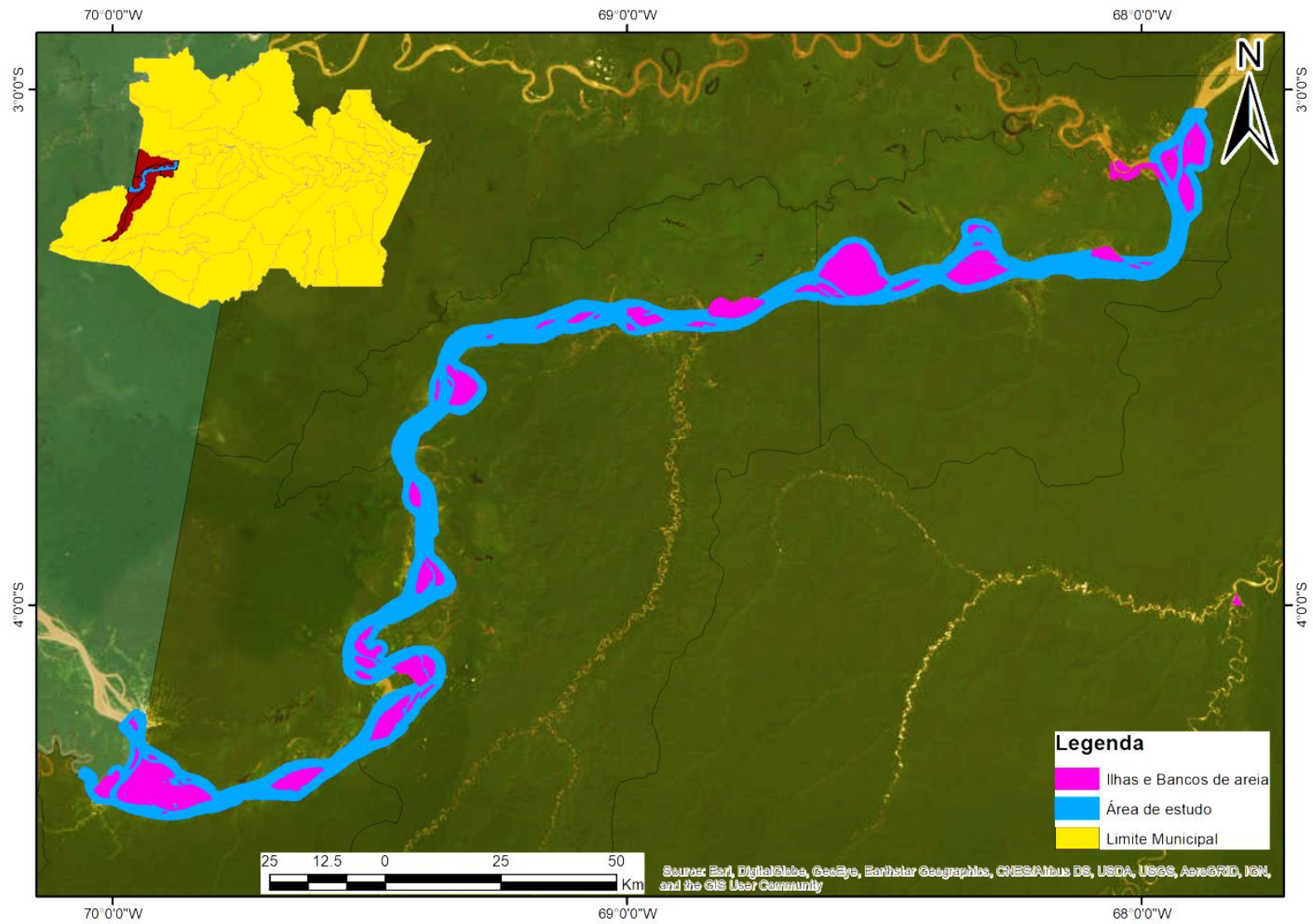
Figura 14 - Meandros abandonados observados no trecho 2



Fonte: Imagens do Google Earth, 2023.

Os meandros em uma planície de inundação migram em períodos de muitos anos, erodindo a margem externa das curvas, onde a corrente é mais forte, geralmente em áreas mais estreitas. Os meandros alternam sua posição de um lado para o outro no sentido jusante, num movimento serpenteante, algo parecido com aquele de uma longa corda que está sendo ondulada. A medida que o lado externo da margem é erodido, barras curvas de areia, chamadas de barras de meandro ou de pontal, são depositadas ao longo da margem interna (Figura 15 e 16), onde a corrente é mais lenta, em curvas mais apertadas as barras de pontal são maiores. À medida que os meandros migram, de modo a originarem as barras de pontal, formam uma acumulação de areia e silte sobre a parte da planície de inundação, através do qual o canal migrou.

Figura 15 - Mapa de bancos de areia e ilhas



Fonte: Copilação do autor, 2023.

Figura 16 – Exemplo de meandro na área de estudo, latitude 4° 6'50.38"S, longitude 69°26'38.80"W



Fonte: Imagens do Google Earth, 2023.

Durante uma grande inundação, quando a velocidade e o volume da água aumentam, o rio assume um curso novo e mais curto, cortando caminhos através de laço. O laço abandonado permanece como um lago em crescente, vulgarmente chamado de “ferradura”, devido a sua semelhança (Figura 17).

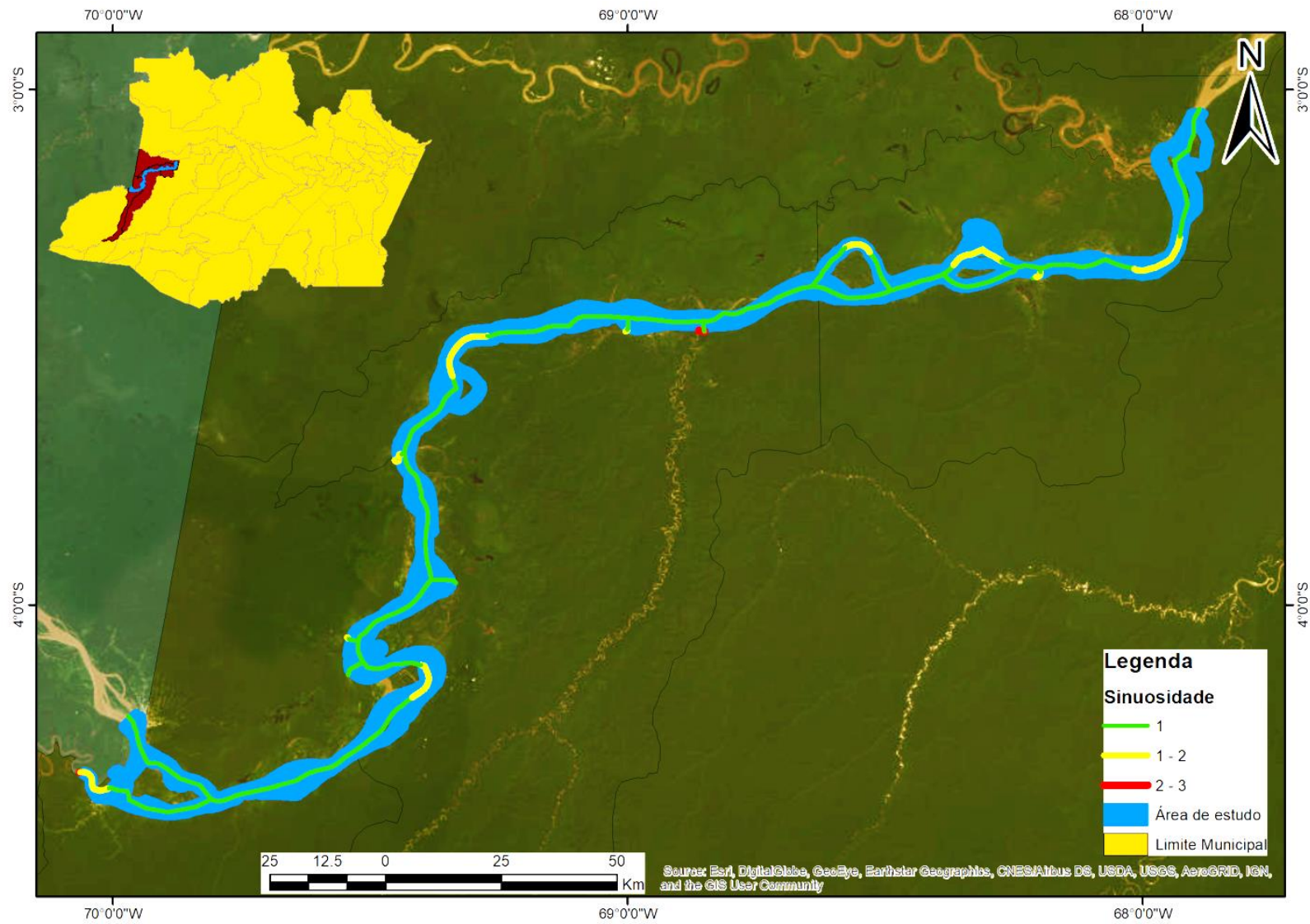
Figura 17 – Exemplo de meandro abandonado



Fonte: Imagens do Google Earth, 2023.

O comprimento de onda do meandro e a sinuosidade do canal, respectivamente, quando comparados às larguras, ilustram o aumento do comprimento de onda e a diminuição da sinuosidade à medida que a largura aumenta. O aumento do comprimento de onda do meandro com a largura é esperado, pois observamos correlações positivas entre o comprimento de onda e a largura. No que diz respeito à sinuosidade, o canal como um todo, apresenta sinuosidade baixa com valores médios de 1.05, como é de se esperar, em trechos de maior curvatura sua máxima é de 2 e mínimas de 1,00 (Figura 18).

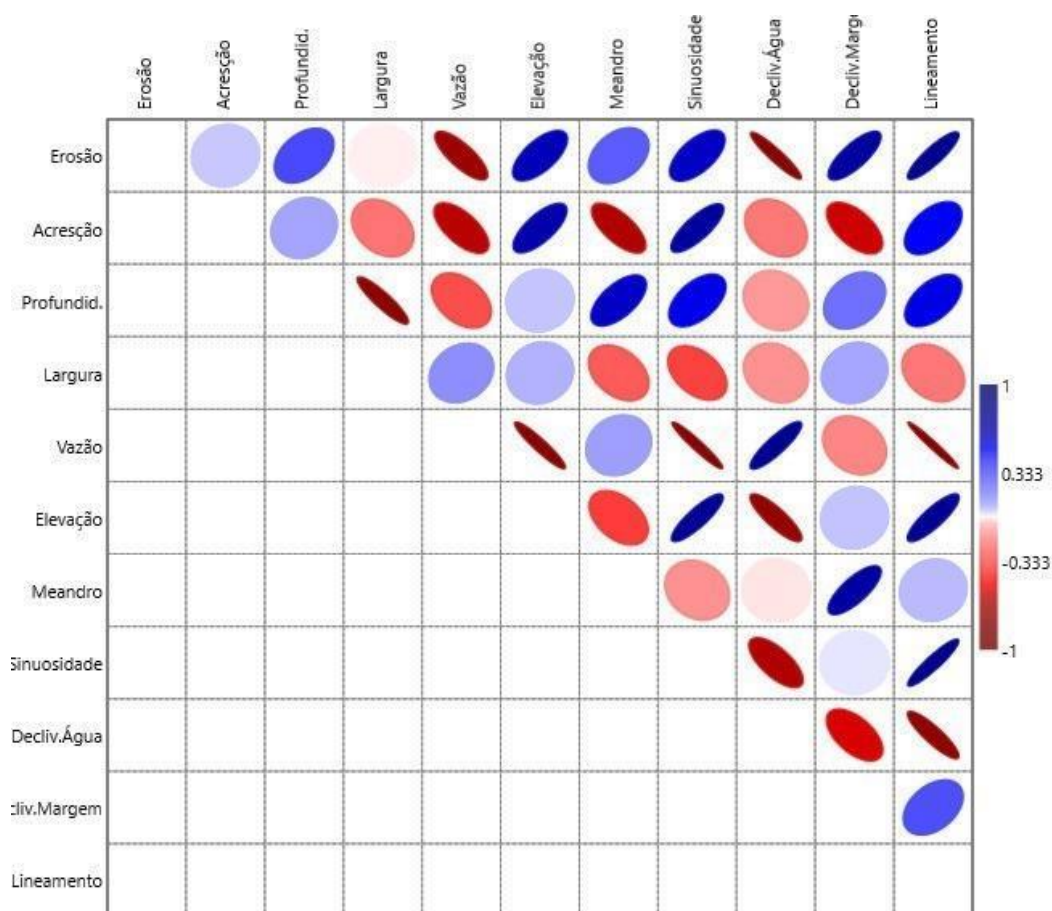
Figura 18 - Mapa de sinuosidade



Fonte: Copilação do autor, 2023.

Por meio da análise do gráfico de correlação linear (Figura 19) realizado no *software Past*, observamos que existem correlações entre as variáveis analisadas. As que apresentam coloração azul são positivas, e quanto mais azuis e próximas do valor 1, mais forte será a correlação, as de coloração vermelha são negativas e quanto mais próximas de -1, mais forte é a correlação. Em relação às formas entende-se que quanto mais elíptica, maior é a correlação e as mais esféricas evidenciam uma baixa correlação. Quando a coloração é branca indica que não há correlação entre as variáveis.

Figura 19 - Gráfico de correlação linear de Pearson entre dados de erosão, acreção e variáveis morfométricas e hidrológicas da área de estudo



Fonte: Copilação do autor, 2023..

Observando o gráfico de variáveis para a área de estudo entende-se que as variáveis de, profundidade, elevação, meandro, sinuosidade, declividade da margem e lineamento tem uma correlação positiva com a incidência de erosão no trecho. Contribuindo também para a acreção de material em determinados pontos, no entanto, a acreção tem forte correlação negativa com o comprimento de onda do meandro e declividade das margens. A variável largura apresenta uma menor correlação com as outras variáveis. Todas as correlações

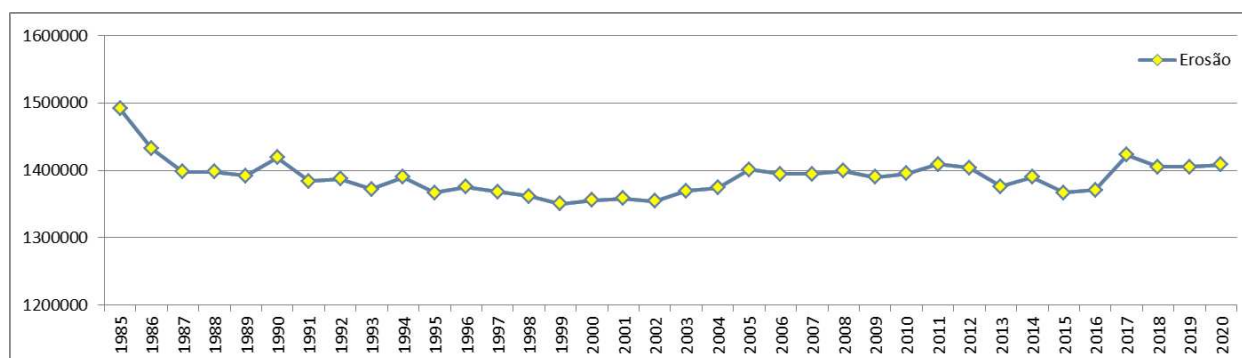
realizadas ao longo dos resultados foram confirmadas por meio do teste de correlação realizado pelo *software Past*.

5.2 Erosão

5.2.1 Taxas anuais de Erosão (1985 - 2020)

A figura 20 apresenta, a partir dos dados disponibilizados na plataforma MapBiomass!, a variação da erosão por área ao longo de 35 anos. Constatamos que nos anos 1985, 1990, 2005, 2011 e 2017 houve as maiores taxas. De modo geral, a média foi de 1.389.776 m², equivalente a 0,06 % da área total do canal.

Figura 20 - Gráfico de erosão de 1985 a 2020



Fonte: Copilação do autor, 2023.

De acordo com Souza et al., (2007) o fator erosão pode ser associado a diversas causas tais como: aumento da temperatura no Oceano Atlântico como ocorreu em 2005, o qual as temperaturas do Atlântico estavam 0,5 a 5º C a mais do que a média, aumento das queimadas e desmatamento, diminuição da velocidade de formação de chuvas, efeito maior para a região oeste da Amazônia, onde as chuvas dependem do uso da terra na região leste e outros fenômenos climáticos. E diversas variáveis como, sinuosidade, declividade, elevação, profundidade, largura entre outros, estão intrinsecamente envolvidas, como explicitadas nos tópicos acima.

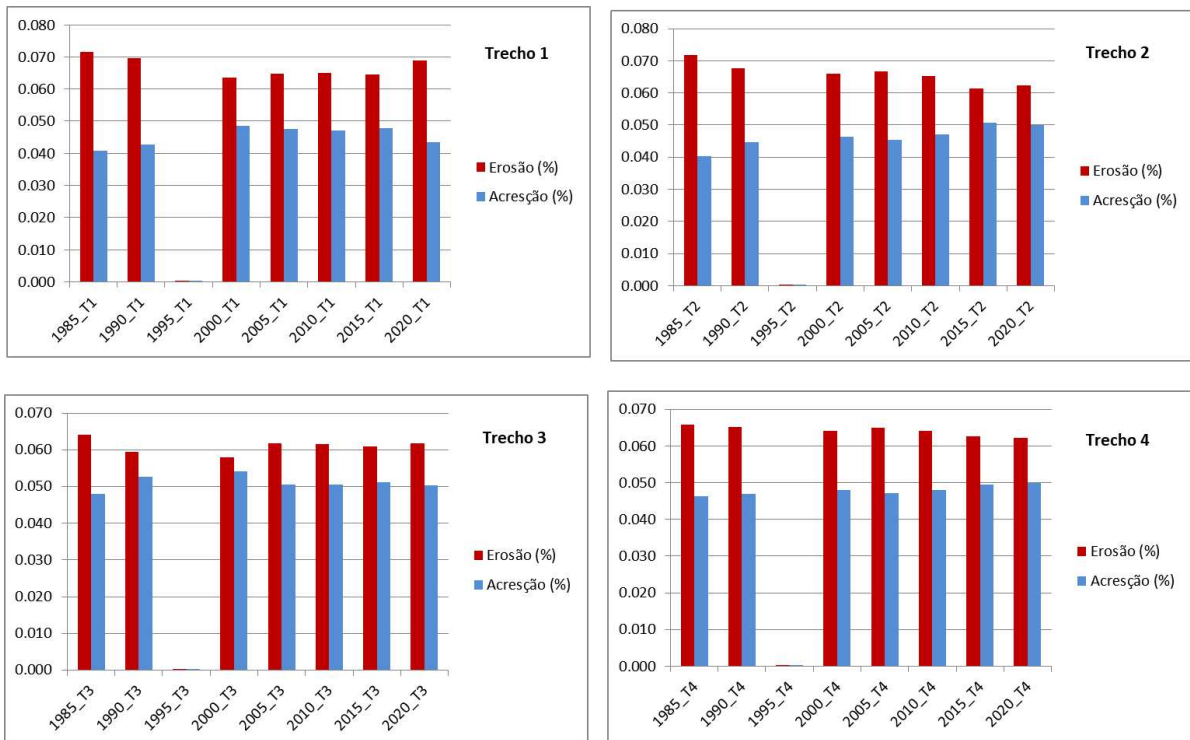
A partir da figura 20 foi observada uma correlação entre os anos de maior erosão e os anos de seca. Através de reportagens, portais de notícias e estudos como o do site do INPE¹, Globo Natureza², e Borma e Nobrega (2013) e outros, identificou-se que as maiores secas no período analisando, ocorreram em 1997, 2005, 2010 e 2017, os mesmos anos de maior taxa de erosão, estabelecendo assim uma possível relação entre seca e erosão.

Souza (2019) destaca sobre a atuação do fenômeno Terras Caídas na modificação da paisagem, o qual envolve simultaneamente escorregamento, desmoronamento e desabamento, devido a ocorrência dos ciclos de cheias/vazante, explicando que a entrada de água em períodos de cheia leva a ocupação dos espaços vazios com material (água) de peso e densidade distinto do modo anterior (espaço vazio), saturando o material de encosta, trazendo uma sobrecarga as camadas abaixo e muitas vezes perfurando solo. A partir deste momento pode-se deduzir duas situações:

- A saída da água nos períodos de vazante e o forte intemperismo da região, influenciam na ocorrência de uma desestruturação das camadas, aumentando os espaços vazios e trazendo um alívio de pressão em locais pré-dispostos. A desestruturação e o alívio de pressão levam a menor resistência do material como um todo e conseqüentemente ao rompimento.
- O mesmo pode permanecer ainda saturado e com peso específico maior, rompe pelo acréscimo de tensão.

Quando observamos os dados do MapBiomas para erosão e acreção (%) de 1985 a 2020, com um intervalo de 5 anos para cada trecho, percebemos que o ano de 1995 não apresentou dados consistentes, provavelmente devido a alta cobertura de nuvens, impedindo o imageamento. Ao longo dos 35 anos o trecho 1 teve a maior porcentagem de erosão e o trecho 3 a menor, no que diz respeito a acreção o trecho 3 obteve os maiores valores e o trecho 1 os menores (Figura 21).

Figura 21 - Grafico de taxas de erosão e acreção por trecho



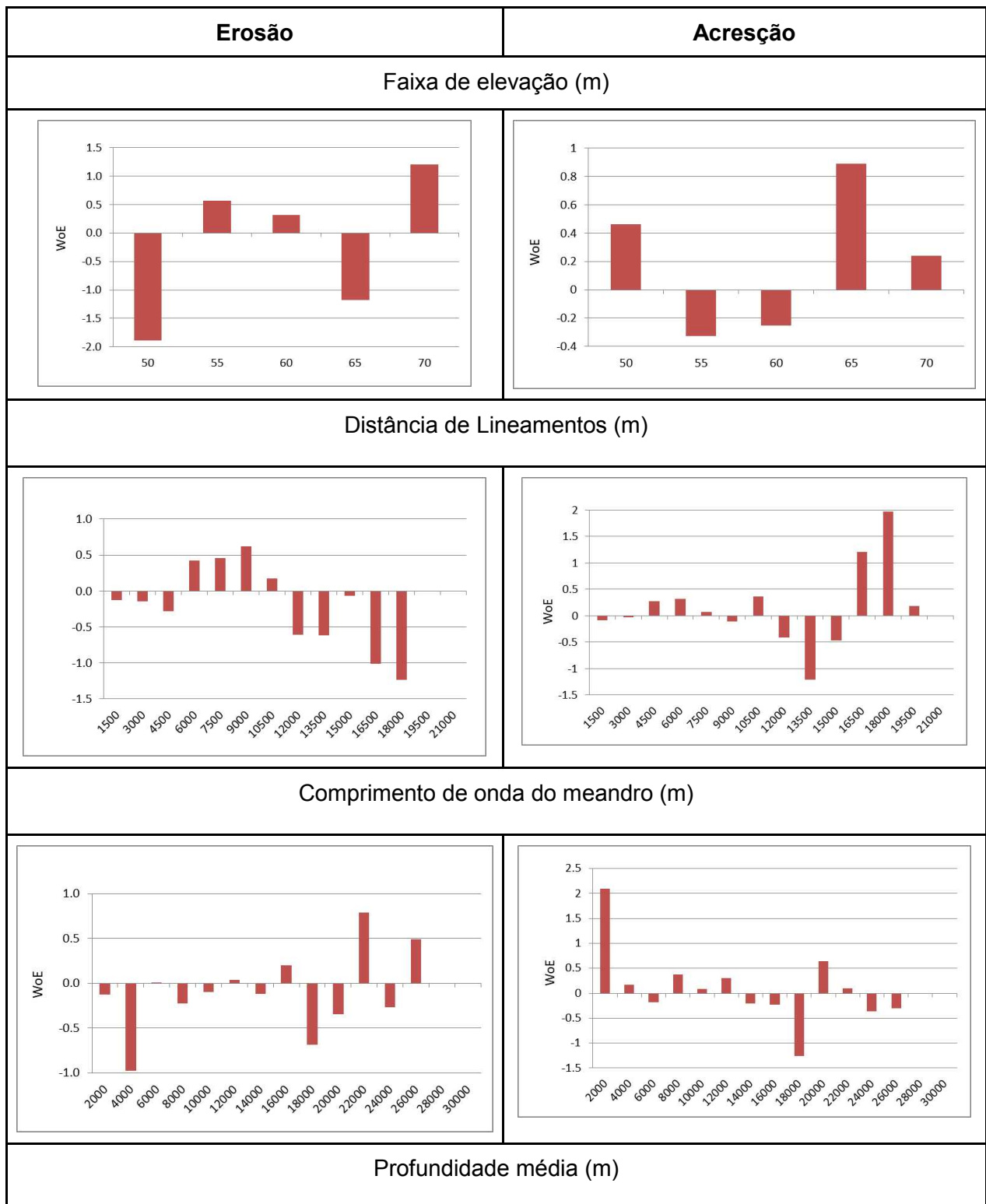
Fonte: Copilação do autor, 2023.

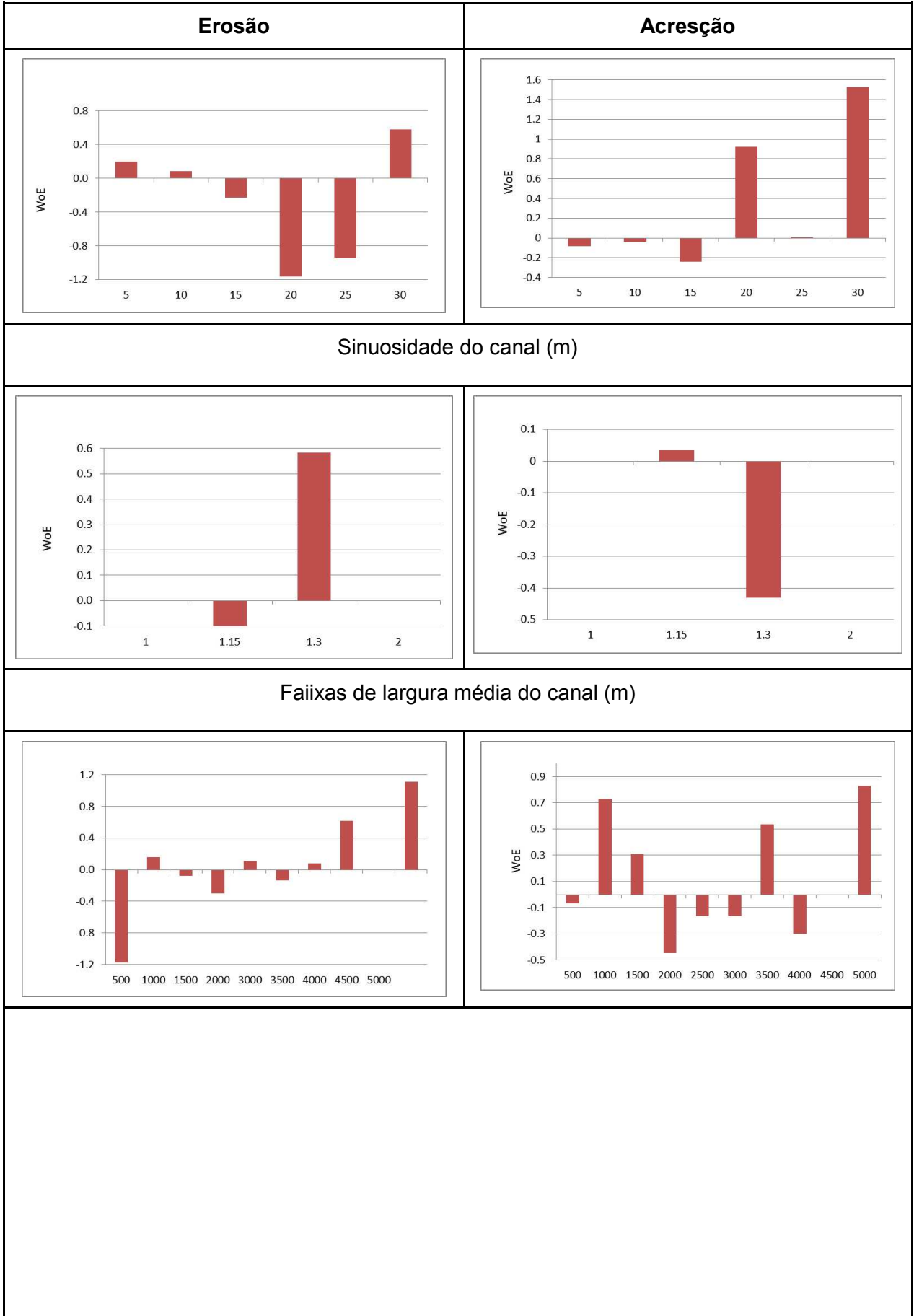
5.3 Áreas de risco

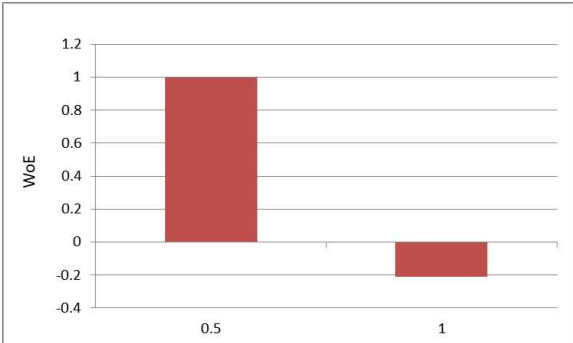
Na elaboração do mapa de áreas de risco a erosão marginal, ocorreu as etapas de cálculo de matrizes de transição, cálculo de pesos de evidências e análise de correlação de mapas. Todas as etapas utilizaram os dados de elevação, distância de lineamentos, profundidade média, comprimento de onda de meandro, sinuosidade, largura e declividade da margem. O não uso das outras variáveis se dá pela não mudança ou mudança pouco significativa, principalmente entre os anos de 1990 – 2016, utilizado para calibração do modelo.

Uma das etapas importantes e foi o cálculo de pesos e evidências (WoE) para as mudanças relacionadas á erosão e acreção, o qual pode-se apresentar como gráficos para cada variável (Figura 22), onde os valores negativos são de menor influência e os positivos de maior influência. Para as variáveis de elevação e sinuosidade os dados de erosão e acreção são inversamente proporcionais, pois quando os dados são positivos para erosão, para a acreção eles são negativos, e vice-versa.

Figura 22 - Gráfico dos pesos e evidências de erosão e acreção, gerados no Dinamica EGO.



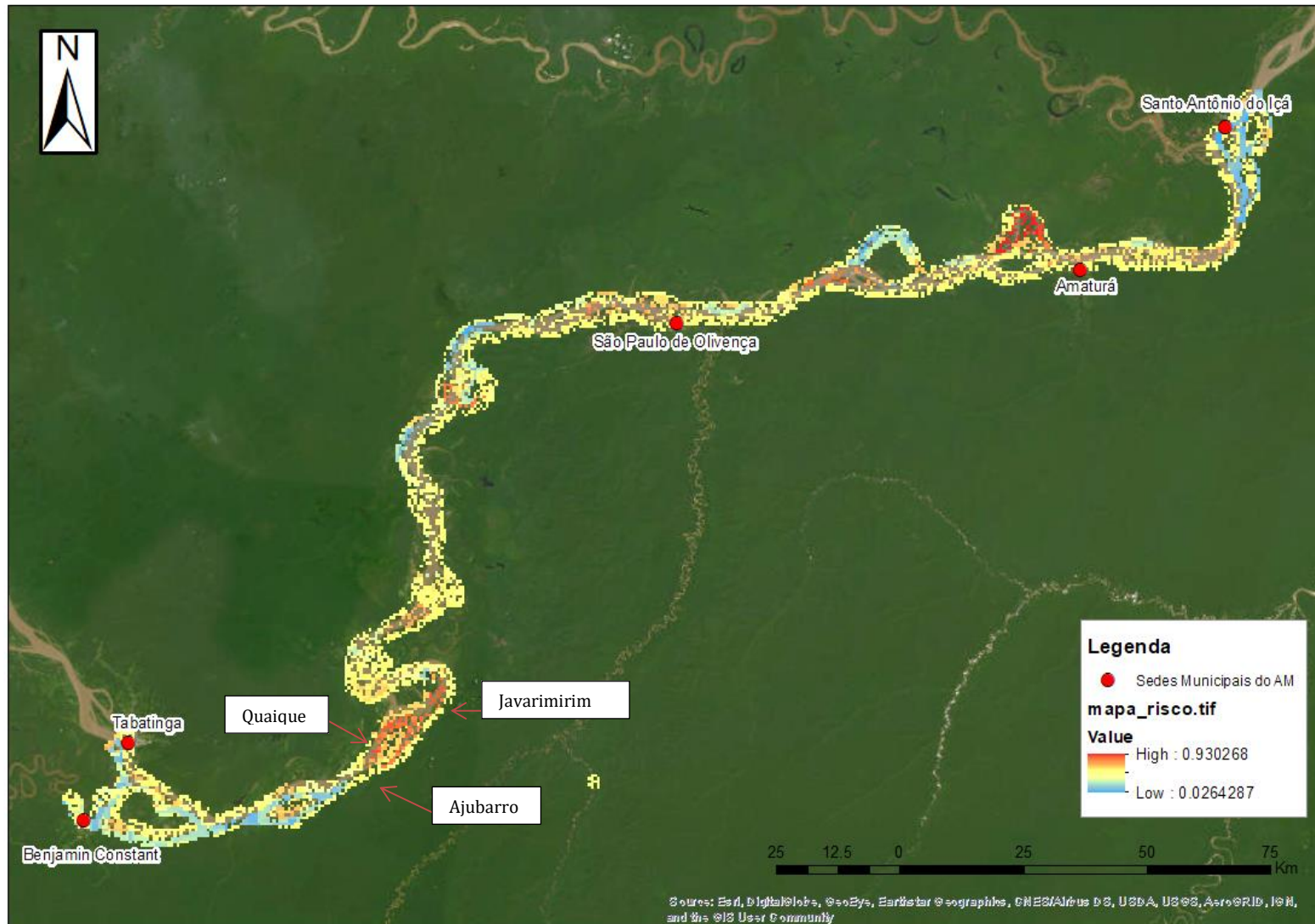


Erosão	Acréscimo						
Declividade da margem (graus)							
 <table border="1"><thead><tr><th>Declividade (graus)</th><th>WoE</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.5</td><td>1.0</td></tr><tr><td>1</td><td>-0.2</td></tr></tbody></table>	Declividade (graus)	WoE	0.5	1.0	1	-0.2	
Declividade (graus)	WoE						
0.5	1.0						
1	-0.2						

Fonte: Copilação do autor, 2023.

Após a finalização das etapas de calibração e correlação dos dados, obteve-se o mapa contendo as áreas mais suscetíveis a erosão marginal, através do software Dinamica EGO. No mapa constatou-se três áreas de maior risco, a primeira corresponde às comunidades Aljubarrota, Quaique e Javarimirin (trecho 1), seguidas da sede municipal de São Paulo de Olivença e Sede municipal de Amaturá (trecho 3) (Figura 23).

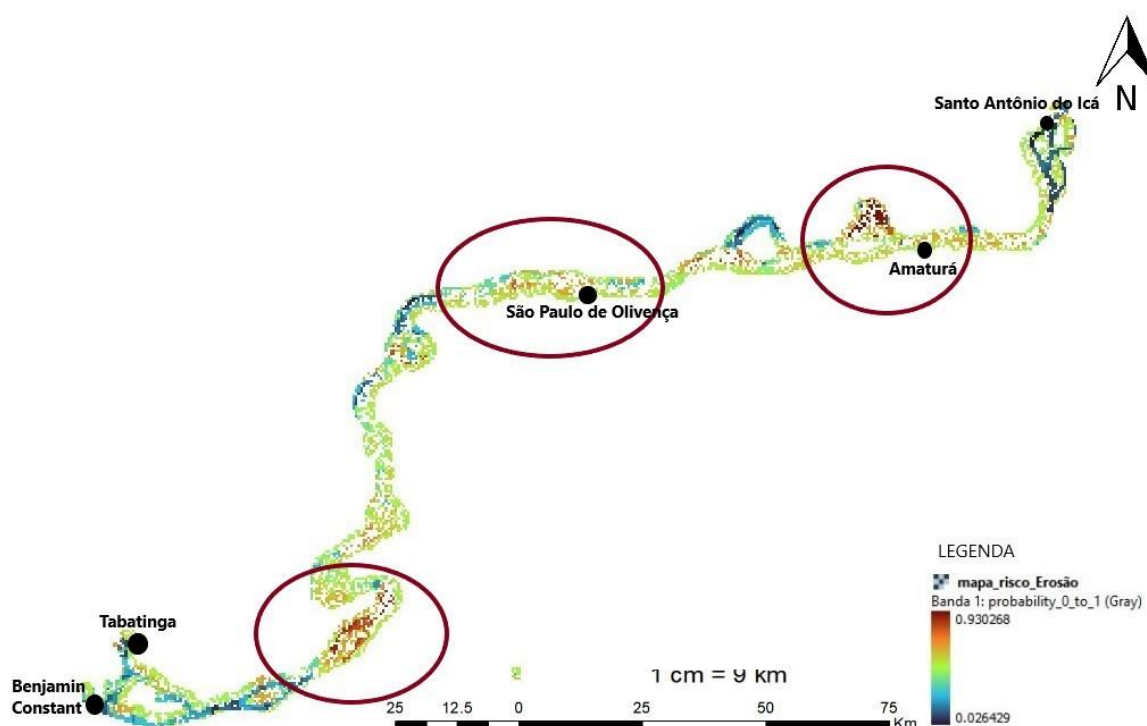
Figura 23 - Mapa de áreas de risco



Fonte: Copilação do autor, 2023.

Ao longo dos resultados e discussões apresentou-se as variáveis, correlações, influências e contribuições para a ocorrência da erosão marginal ao longo do rio Solimões. Percebe-se que os locais destacados com maior suscetibilidade à erosão são os mesmo de destacados ao longo do trabalho (Figura 24).

Figura 24 - Mapa contendo áreas mais afetadas

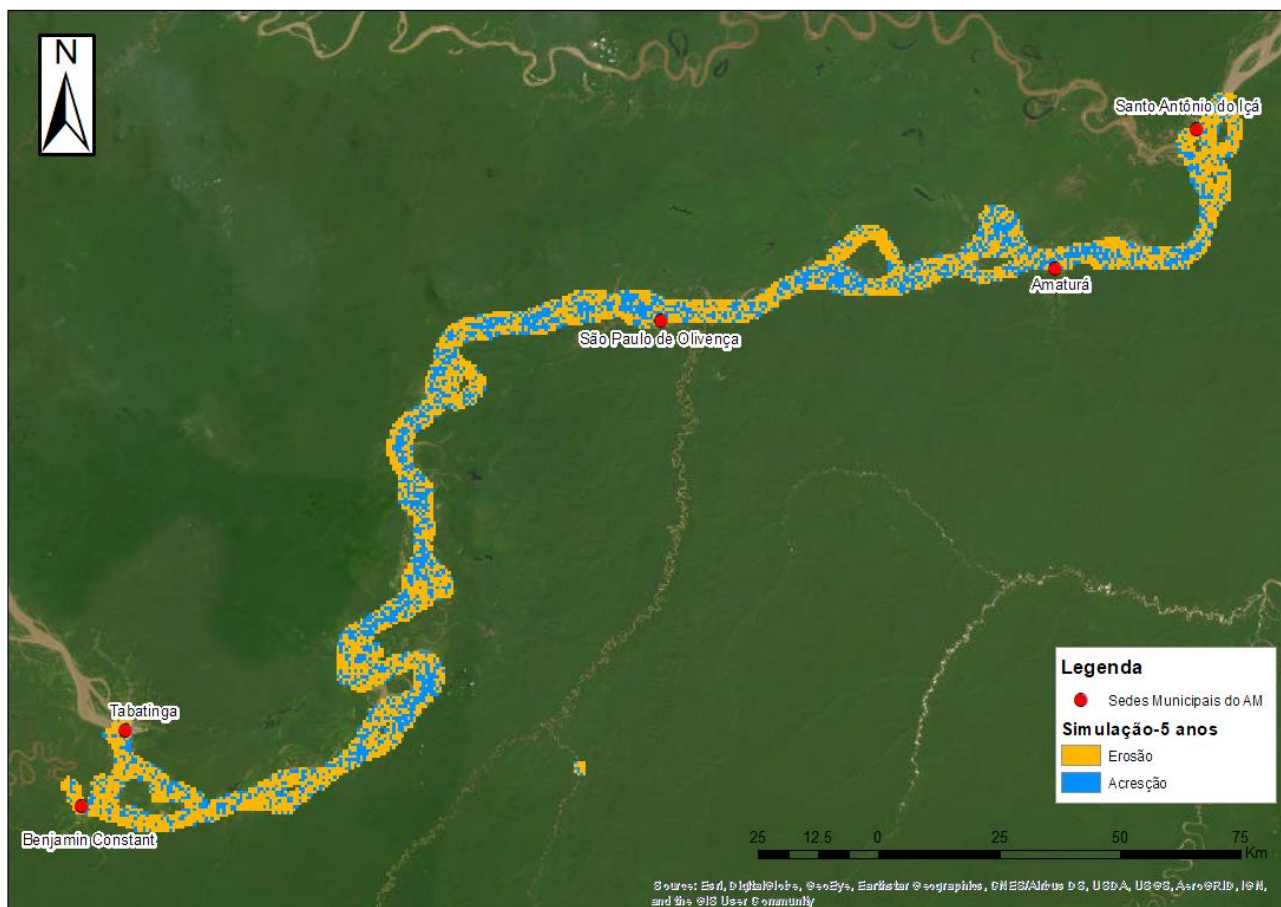


Fonte: Copilação do autor, 2023.

Apesar dos três locais citados acima terem o maior risco de ocorrência de erosão marginal, é importante frisar que locais com coloração amarela e laranja também são áreas mapeadas com mais de 50% suscetíveis à erosão.

Posterior à criação do mapa de risco de erosão, realizou-se uma simulação para áreas suscetíveis aos riscos para o ano de 2025 (Figura 25), apresentando os locais mais propícios à erosão e acreção.

Figura 25 - Mapa de simulação de áreas de risco para o ano de 2025



Fonte: Copilação do autor, 2023.

O mapa da figura 25 apresenta as áreas mais meandrantessão as que podem sofrer maior incidência erosiva, o canal como um todo tende-se a deslocar e conseqüentemente erodir mais para o lado direito (sentido o fluxo) logo, o lado esquerdo terá maior acreção dos sedimentos.

6 Considerações Finais

Na Bacia Amazônica, o complexo processo de erosão das margens do rio Amazonas, fenômeno conhecido regionalmente por terras caídas, tem afetado não apenas as populações dispersas ao longo de sua calha, mas também comunidades ribeirinhas, vilas, cidades e portos.

A migração lateral dos canais resulta de processos que envolvem inúmeros fatores que atuam em conjunto dentro do canal fluvial. A erosão de margens é uma das manifestações do reajustamento da morfologia do canal em busca de um equilíbrio dinâmico e alterações no sistema fluvial.

A erosão marginal de um rio está entre os processos mais dinâmicos da paisagem, resultante da relação das características hidrodinâmicas somadas às características da margem, envolvendo aspectos físicos e morfométricos de encostas onde os aspectos determinantes das taxas de erosão são diretamente influenciados pelo uso da terra nas adjacências do canal.

O rio Solimões não foge dessa premissa, tendo a microrregião do Alto Solimões um alto índice de erosão fluvial. Apesar deste problema ocorrer em todo o Amazonas não existem muitos estudos sobre a área de pesquisa.

A pesquisa desenvolvida teve como principal objetivo a caracterização e modelagem de processos erosivos marginais e elaboração de mapa de risco no alto curso do rio Solimões.

Destaca-se a importância desse estudo em relação: (i) a estratégia militar da microrregião do Alto Solimões que se localiza no arco norte da faixa de fronteira, sendo a principal porta de entrada ocidental da Bacia Amazônica, unida aos territórios internacionais da Colômbia e Peru; (ii) sua importância para o escoamento de produtos de forma hídrica (principal meio de transporte da região) trazendo o desenvolvimento e modernização para o local e incentivando o desenvolvimento econômico e social da região, conseqüentemente trazendo maiores investimentos econômicos e científicos; (iii) preservação de uma das regiões mais conservadas da floresta Amazônica a qual detém o maior número de comunidades indígenas.

O estudo realizado apresentou diversas variáveis e fatores, como também caracterizou a ação e identificou os locais mais favoráveis de acordo com cada

variável. Como produto final ocorreu à produção do mapa de área de risco, contendo os principais pontos atingidos pela erosão fluvial e simulou, por meio da modelagem, os locais mais suscetíveis da erosão para o ano de 2025. É importante que hajam maiores estudos e acompanhamento dos locais afim de evitar possíveis movimentos de massa, preservando a vida dos ribeirinhos afetados.

O traalho traz como principal contribuição à elaboração de um estudo específico sobre erosão marginal na região, que é carente de pesquisas nessa temática, com maiores informações sobre o fenômeno terras caídas no intuito de auxiliar na elaboração de obras de infraestrutura em orla, portos e outros, além da possibilidade da replicação do método para outras áreas com problemas relacionados ao fenômeno terras caídas.

As principais dificuldades encontradas foram, a disponibilidade, qualidade e apresentação de dados mais atualizados, os quais tenham passado por métodos mais modernos de produção e o baixo número de publicações sobre a região.

As recomendações para trabalhos futuros é que estes possam explorar mais a área, se possível realizar pesquisa de campo e que abordem outros tópicos que envolvam esta vertente.

Referências

- ALBUQUERQUE, C. C. **Análise geoecológica da paisagem de várzea na Amazônia Central: um estudo estrutural e funcional no Paraná de Parintins-AM.** 226 p. (Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia). Fortaleza, 2012.
- ALCANTARA, E. H.; SOUZA, A. **Produção de sedimentos na Zona Costeira da Bahia – Brasil.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 62, n. 2, p. 199-205. 2010.
- AMAZONAS ATUAL, **Secas dos rios deixa em alerta 11 municípios do Amazonas,** publicado em 14 de agosto de 2017, Disponível em < <https://amazonasatual.com.br/seca-dos-rios-deixa-em-alerta-11-municipios-doamazonas/>>, acesso em 27/12/2022.
- AZEVEDO FILHO, J. D. M: **A produção e a percepção do turismo em Parintins, Amazonas.** Tese (Doutorado) pela Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. S.P Páginas. 212. 2013.
- AZEVEDO FILHO, J. D. M: **O fenômeno das terras caídas uma mudança natural na paisagem e suas implicações aos moradores da comunidade da Barreira do Andirá no município de Barreirinha AM.** Repositório Institucional da Universidade Estadual do Amazonas – UEA, 2017.
- BANDEIRA, I. C. N.; et al. **Terras Caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon?** Springer Environmental Earth Sciences. In: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-74057>. 2018.
- CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil.** University of California, Santa Barbara, USA. Tese de Doutorado, 586 p. 1984.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática. Brasil, Ministério de Minas e Energia,** Cia Pesq. Rec. Minerais, Rio de Janeiro, 372 p. 1994.
- CARVALHO, José Alberto Lima de. **Terras Caídas e consequências sociais: Costa do Miracauera – Paraná Trindade, Município de Itacoatiara – AM, Brasil.** Manaus: Universidade Federal do Amazonas – UFAM. (Dissertação de Mestrado em Sociedade e Cultura na Amazônia), 2006.
- CARVALHO, J. A. L.; IGREJA, H. L. S.; CUNHA, S. B.; CARNEIRO, D. S.; - **Episódio de Terras Caídas no Rio Amazonas: caso Costa da Áhuia, Parintins-AM.** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- CLIFTON, H.E.; PHILLIPS, R.L. **Lateral trends and vertical sequences in estuarine sediments, Willapa Bay, Washington.** In: M.E. Field et al. (Editors), Quaternary Depositional Environments of the Pacific Coast. Soc. Econ. Paleontol. Miner., Pac. Sect., Pac. Coast Paleogeogr. Symp. v. 4, p. 55-71. 1980.
- CORDANI, U.; NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras.** (PETROBRÁS, Ed.) Série Ciência- Técnica- Petróleo , n. 15, 1984.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil – **Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores**. Brasília, 2003.

CRUZ, E. T.; AZEVEDO FILHO, J. D. M. **O fenômeno das terras caídas: uma mudança natural na paisagem e suas implicações aos moradores da comunidade da barreira do andirá no município de barreirinha-AM**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Programa de Pós Graduação em Geografia, 2017.

CUNHA, P.R.C., GONZAGA, F.G., COUTINHO, L.F.C., Feijó, F.J. **Bacia do Amazonas**. Boletim de Geociências da PETROBRAS, 8(1):47-55. 2007.

EIRAS, J. F.; KINOSHITA, E. M. **Evidências de movimentos transcorrentes na bacia do Tacutu**. Boletim de Geociências da Petrobrás, 2, pp. 193-208, 1988.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. – **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p. : il. color. ; 16 cm x 23 cm.

FILIZOLA, N.; GUUOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E.; Freitas, M. A. II **Caracterização Hidrológica da Bacia amazônica**, In: RIVAS, A.; FREITAS, C. (ORG). *Amazônia: Uma perspectiva Interdisciplinar*, Manaus, EDUA, 2002.

FRAZINELLE, E. **Características morfológicas da confluência dos Rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil)**. Revista Brasileira de Geociências, 41(4): 587-596, dezembro de 2011.

FRASSON, R.P. DE M.; PAVELSKY, T.M.; FONSTAD, M.A.; DURAND, M.T.; ALLEN, G.H.; SCHUMANN, G.; **Global Relationships Between River Width, Slope, Catchment Area, Meander Wavelength, Sinuosity, and Discharge**. Geophysical Research Letters 46: 3252–3262. 2019.

FREITAS F. T. - **Multi-temporal analysis of the erosive modality of “Terra Caída” in the Médio Solimões region—Coari/AM**, Dissertation, Faculty of Humanities, Federal University of Amazonas, Manaus. 2009.

FREITAS, F. T.; ALBUQUERQUE, A. R. **Análise temporal sobre as “Terras Caídas” no médio Solimões/Coari (AM)**. Mercator, Fortaleza, v. 11, n. 25, p- 129-140, mai./ago. 2012.

GLOBO NATUREZA, **Amazônia enfrentou em 2010 a maior seca da história, diz cientista do INPE**, publicado em 20 de janeiro de 2013, Disponível em <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2013/01/nasa-mostra-que-seca-de-2005-afetou-area-da-amazonia-por-anos.html>>. Acessado dia 26/12/2022.

GUERRA, A. J. T.; GUERRA, A. T. **Novo dicionário Geológico-Geomorfológico**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 652p.

HAYAKAWA, E. H. **Paleogeofomas e sistemas de drenagem da Bacia do Baixo Rio Madeira, AM: Interpretação de dados de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP. 191 p. 2011.

IGREJA, H.L.S. **Aspectos do Modelo Neotectônico da Placa Sul-Americana na Província Estrutural Amazônica, Brasil**. Tese para acesso à classe de Professor Titular da Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM. 155 p. 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, **Seca de 2010 na Amazônia foi a mais frástica já registrada**, publicada em 24 de agosto de 2011, Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2639#:~:text=A%20partir%20da%20an%C3%A1lise%20de,considerada%20a%20maior%20do%20s%C3%A9culo> Acessado em 27/12/2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE (2016). **TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em . Acesso em: 09 fev. 2018.

JUNK, W. J., **Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável**. Manaus: Editora do INPA, 310 p. ISBN: 978-65-5633-005-1. 2020.

KNIGHTON, A. D. **Fluvial formns and processos: a new perspectvie**. New York. 383 p.1998.

LATRUBESSE, E. M., STEVAUXB, J. C., SINHA, R. (2005a). **Tropical rivers**. Geomorphology, 70, 187-206. 2005.

LATRUBESSE, E.M., SILVA, S.A.F. DA, COZZUOL, M., Absy, M.L., **Late Miocene continental sedimentation in southwestern Amazonia and its regional significance: Biotic and geological evidence**. Journal of South American Earth Sciences 23, 61-80. 2008.

LATRUBESSE, E. M. **Patterns of anabranching channels The ultimate end-member adjustment of mega rivers**. Elsevier Science B. V. Geomorphology, 101, 130-145. 2012.

LEOPOLD, LB, E MG WOLMAN, **River meanders**, Geological Society of America Bulletin , 71 (6), 769-793, doi: 10.1130/0016-7606(1960)71[769:RM]2.0.CO;2. Ano 1960.

MACHADO, P. C. **Segurança da navegação em hidrovias: fator fundamental para o desenvolvimento da região amazônica**. Rio de Janeiro. 2014.

MARENCO, J. A. **Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s**. Hydrological Processes, v. 23, n. 22, p. 3236-3244, 2009.

MEIS, M. R. M de **Considerações geomorfológicas sobre o Médio Amazonas**. Rev. Bras. De Geografia. Rio de Janeiro, 2: 3-20. 1968.

MIALL, A. D. **The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology**. Springer-Verlag. p. 582, 1996.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Agência Nacional de Águas – ANA. **A navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos**. Brasília. 2005.

NASCIMENTO, A. Z.; FILIZOLA, N. P.; **Caractetísticas Hidro-Geomorfológicas do baixo curso dos Rio Solimões e Negro, e sua confluência, Amazônia, Brasil**. Dissertação de mestrado, 2016.

NANSON, G. C., KNIGHTON, A. D. **Anabranching rivers: their cause, character and classification**. Earth Surface Process and Landforms, 21, 217-239. 1996.

NANSON, G.C., **Anabranching and Anastomosing rivers**. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, vol. 9, Fluvial Geomorphology, p. 330–345. 2013.

NORTH, C.P.; NANSON, G.C.; FAGAN, S.D. **Recognition of the sedimentary architec- ture of**

dryland anabranching (anastomosing) rivers. v. 77, p. 925-938. 2007.

SANTOS., F. M. M. S. ; MATOS, J. A. **Análise da variabilidade do regime fluvial (1972-2011) e de transporte de carga de sedimentos do Rio Solimões (1971-2011). Um estudo de caso na estação fluviométrica do município de Manacapuru/AM.** In: Encontro de Geógrafos da América Latina (EGAL), 2013. Reencuentro de saberes territoriales latinoamericanos., 2013.

SCHUBART, H. O. R **Ecologia e utilização. em florestas. In: Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia.** Brasília, CNPq/Brasiliense. p. 101-143. 1983.

SCHEIDEGGER, A. E. **Hydrogeomor-phology.** Journal of Hydrology, n. 20, p. 193-215, 1973.

SCHUMM, S. A. **Alluvial river response to active tectonics. Active tectonics, studies in geophysics, National.** Academy Press, p. 80-94, 1985.

SERRÃO, E.; SANTOS, C.; WANZELER, R.; GONÇALVES, L.; LIMA, A. - **Avaliação**

da seca de 2005 e 2010 na Amazônia: análise da bacia hidrográfica do rio Solimões. Rev. Geogr.Acadêmica v.9, n.2 ISSN 1678-7226 (xii.2015).

SIOLI H. **Amazônia Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais.** 3.ed., Petrópolis, Edit. Vozes, 72 p. 1991.

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

SMITH, D.G.; SMITH, N.D. **Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta: Journal of Sedimentary Petrology,** 50:157-16. In: SCHERER, CLAITON M. S. Sedimentologia e estratigrafia de sistemas fluviais e eólicos. Instituto de Geociência – UFRGS. 1980.

SMITH, D.G.; SMITH, N.D. **Sedimentation in anastomosed rivers systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta.** Journal of. Sedimentary Petrology, v. 50, n. 1, p. 157-164. 1980.

SOARES-FILHO, B. S.; et al. **DINAMICA – A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier.** Ecological Modelling, v. 154, n. 3, p. 217-235. Sep 1, 2002.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais.** Florianópolis, EDUFSC, 181p. 1990.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar.** São Paulo: Blucher, 2003.

STERNBERG, H.O'R. **A água e o homem na várzea do Careiro.** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. 1998.

THOMAS, R.G.; SMITH, D.G.; WOOD, J.M.; VISSER, J.; CALVERLEY-RANGE, E.A.;

KOSTER, E.H. **Inclined Heterolithic Stratification – Terminology, description, Interpretation and significance.** Sedimentary Geology, v. 53, p. 123-179. 1987.

TRICARD, J.L.F. **Tipos de planícies aluviais e de leitos fluviais na Amazônia brasileira.** Revista de Geografia. 1977.

TUCKER, M.E. **The sedimentary environments of tropical African estuaries: Freetown**

Peninsula, Sierra Leone. Geol. Mijnbouw, v. 52, p. 203-215. 1973.

WELCOMME, R.L. 1985. **River fisheries**. FAO Fish. Tech. Pap., (262): 330.1985.

APÊNDICE A - Quadro 3 - Tabela de máximas, mínimas e médias das variáveis para a área total

Trecho		Profundidade (m)	Vazão (m³/s)	Largura (m)	Elevação (m)	Meandro (m)	Sinuosidade (m)	Declividade da água (m)	Declividade margem (m)
Total	Máx	29.11	41748	4684	63	24705	2	23.16	0.866
	Mín	-12.76	5337	430	47	120	1	0	0.002
	Média	8.175	23542.5	2557	55	12412.5	1.5	11.58	0.434

Fonte: Copilação do autor, 2023.

APÊNDICE B - Quadro 4 - Tabela de máximas, mínimas das variáveis por trecho

Trecho		Profundidade (m)	Vazão (m ³ /s)	Largura (m)	Elevação (m)	Meandro (m)	Sinuosidade (m)	Declividade da água (m)	Declividade da margem (m)
Trecho 01 - Benjamin Constant a Belém do Solimões	Max	15.5	33607.7	5103.08	63	21289.6	2	9.47	0.103
	Min	-10.87	5337.15	1067.53	60	497.81	1	2.21	0.002
Trecho 02 - Belém do Solimões a Santa Rosa	Max	24.6	33828	4684.02	60.55	23813.2	1.29	9.47	0.865
	Min	-8.49	32807.9	1571.07	55.94	5758.86	1	0.5	0.027
Trecho 03 - Santa Rosa a Novo Paraíso	Max	29.11	311110.52	3643.55	60.55	28888.9	1.24	23.15	0.134
	Min	-12.76	35.68	232.66	50.61	1413.56	1	0	0.007
Trecho 04 - Novo Paraíso a Santo Antônio do Içá	Max	17.79	311110.52	3333.28	50.61	24181.8	1.14	22.45	0.132
	Min	-5.56	24129.8	1	47	864.41	1	4.59	0.004

Fonte: Copilação do autor, 2023.

APÊNDICE C - Quadro 5 - Percentual de erosão e acreção de 1985 a 2020

Ano	Erosão (m ²)	Acreção (m ²)	Erosão (%)	Acreção (%)
1985	1491817	967281	0.0680	0.0441
1986	1432244	1026854	0.0653	0.0468
1987	1398140	1060958	0.0638	0.0484
1988	1397964	1061134	0.0638	0.0484
1989	1392216	1066882	0.0635	0.0487
1990	1419313	1039785	0.0647	0.0474
1991	1383967	1075131	0.0631	0.0490
1992	1387174	1071924	0.0633	0.0489
1993	1371960	1087138	0.0626	0.0496
1994	1389776	1069322	0.0634	0.0488
1995	1366568	1092530	0.0623	0.0498
1996	1375336	1083762	0.0627	0.0494
1997	1368424	1090674	0.0624	0.0497
1998	1361749	1097349	0.0621	0.0501
1999	1350244	1108854	0.0616	0.0506
2000	1355586	1103512	0.0618	0.0503
2001	1357940	1101158	0.0619	0.0502
2002	1354117	1104981	0.0618	0.0504
2003	1369722	1089376	0.0625	0.0497
2004	1374221	1084877	0.0627	0.0495
2005	1400995	1058103	0.0639	0.0483
2006	1394263	1064835	0.0636	0.0486
2007	1394333	1064765	0.0636	0.0486
2008	1399462	1059636	0.0638	0.0483
2009	1390247	1068851	0.0634	0.0488
2010	1395091	1064007	0.0636	0.0485
2011	1409339	1049759	0.0643	0.0479
2012	1403966	1055132	0.0640	0.0481
2013	1376250	1082848	0.0628	0.0494
2014	1389776	1069322	0.0634	0.0488
2015	1366568	1092530	0.0623	0.0498
2016	1371087	1088011	0.0625	0.0496
2017	1423227	1035871	0.0649	0.0472
2018	1405221	1053877	0.0641	0.0481
2019	1405447	1053651	0.0641	0.0481
2020	1408172	1050926	0.0642	0.0479

Fonte: Copilação do autor, 2023.