



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

WILLIAM HENRIQUE KURUNCZI FERREIRA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À FRAGILIDADE
AMBIENTAL:
DA ANÁLISE REGIONAL AO ESTUDO LOCAL DE
VOÇOROCA COM DRONE NO NOROESTE DO PARANÁ**

Londrina
2026

WILLIAM HENRIQUE KURUNCZI FERREIRA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À FRAGILIDADE
AMBIENTAL:
DA ANÁLISE REGIONAL AO ESTUDO LOCAL DE
VOÇOROCA COM DRONE NO NOROESTE DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Nardini Gomes.
Coorientador: Prof. Dr. Marciel Lohmann.

Londrina
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Ferreira, William Henrique Kurunczi.

Geotecnologias aplicadas à Fragilidade Ambiental: da análise regional ao estudo local de voçoroca com drone no Noroeste do Paraná / William Henrique Kurunczi Ferreira. - Londrina, 2026.
128 f.

Orientador: Luciano Nardini Gomes.

Coorientador: Marciel Lohmann.

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Aeronave Remotamente Pilotada - Tese. 2. Conservação de solos - Tese. 3. Estudo de voçorocas - Tese. 4. Noroeste do Paraná - Tese. I. Gomes, Luciano Nardini. II. Lohmann, Marciel. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. IV. Título.

CDU 91

WILLIAM HENRIQUE KURUNCZI FERREIRA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À FRAGILIDADE
AMBIENTAL:
DA ANÁLISE REGIONAL AO ESTUDO LOCAL DE
VOÇOROCA COM DRONE NO NOROESTE DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título Mestre em Geografia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Luciano Nardini Gomes
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Marciel Lohmann
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Vinicius Vasconcelos de Souza
Universidade de Brasília - UnB

Londrina, 27 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, por sempre me sustentar com sua mão, me abençoando com muita saúde e derramando da sua luz e infinito amor sobre a minha vida.

Agradeço profundamente à minha família, em especial aos meus pais, Sonia e Aparecido, e ao meu irmão Vitor, que são pilares fundamentais em minha vida. Sou imensamente grato pelo amor incondicional, por todos os esforços e sacrifícios realizados ao longo dos anos, bem como por todo o suporte e apoio oferecidos em cada etapa da minha trajetória.

À minha noiva, Beatriz, expresso minha profunda gratidão por todo o amor, companheirismo e cuidado por mim. Obrigado por trazer leveza em todos os momentos meu amor, por me incentivar constantemente e por caminhar ao meu lado na construção e no compartilhamento de todos os sonhos do nosso futuro juntos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Nardini Gomes, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Marciel Lohmann, agradeço pela confiança depositada ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato pelas valiosas trocas de conhecimento, pelas orientações e pelo constante incentivo durante a realização desta dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), agradeço pelos ensinamentos, discussões e reflexões que enriqueceram minha formação acadêmica e muito contribuíram para o meu desenvolvimento como pesquisador.

Aos meus amigos que a Geografia me proporcionou, que me acompanham desde os tempos da graduação e ao longo da pós-graduação, meu sincero agradecimento pelas conversas, pelos momentos de descontração e pela parceria durante toda a trajetória deste projeto de pesquisa.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo apoio fundamental à realização da pesquisa. *O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.*

RESUMO

FERREIRA, William Henrique Kurunczi. **Geotecnologias aplicadas à fragilidade ambiental: da análise regional ao estudo local de voçoroca com drone no Noroeste do Paraná.** 2026. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciência Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

A degradação dos solos por erosão hídrica representa um desafio contínuo para o desenvolvimento sustentável, com perdas expressivas de solos agricultáveis e elevados custos econômicos. Essa problemática é particularmente agravada em contextos históricos de degradação, como no Noroeste do Paraná. Nesse cenário, o conhecimento aprofundado do meio físico, é fundamental para a elaboração de estratégias eficazes de controle e prevenção de feições erosivas. Diante disso, a presente pesquisa teve como objetivos analisar a fragilidade ambiental em escala regional na Região Imediata de Cianorte (RIC) e investigar, em escala local, os mecanismos de gênese e evolução de uma voçoroca localizada no município de Guaporema, PR. A metodologia baseou-se na articulação entre as escalas de análise, empregando técnicas de geoprocessamento para o mapeamento da fragilidade ambiental da RIC, a partir de adaptações da metodologia de Ross (1994, 2012), integrando dados geológicos, pedológicos e topográficos de declividade e formas de vertentes, além de dados de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomias. A validação do modelo foi realizada por meio da correlação espacial de feições erosivas na área de estudo, que se concentram em setores de fragilidade alta e muito alta. A partir da análise regional, desenvolveu-se o estudo de caso da voçoroca em Guaporema, PR, em área de alta fragilidade ambiental, conduzido por meio do processamento de imagens de aerolevante com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) e análises de amostras de solo em topossequência. Os resultados evidenciam que as feições erosivas ocorrem predominantemente sobre os arenitos das formações do Grupo Caiuá, especialmente em áreas de Argissolos Vermelhos típicos ou abruptos, sobre relevos declivosos e vertentes convergentes ou retilíneas, cujo comportamento morfodinâmico favorece a fragilização do ambiente, sobretudo em usos do solo com menor capacidade de proteção, como a cana-de-açúcar e pastagens plantadas. No estudo de caso, a voçoroca foi interpretada como produto da alta fragilidade do sistema pedogeomorfológico e o manejo inadequado, com volume de solo erodido estimado em 10.126,2 m³. A granulometria dos solos e a identificação da transição lateral Latossolo–Argissolo são determinantes para explicar a incisão mais profunda da feição, uma vez que essa zona de contato atua como uma descontinuidade hidráulica e mecânica, com redução da coesão do solo e o aumento da suscetibilidade à erosão. Em síntese, a pesquisa destaca a importância da integração entre as escalas de análise, evidenciando a necessidade de um planejamento territorial que considere os limites pedogeomorfológicos da paisagem e práticas de manejo na mitigação de feições erosivas, contribuindo para a conservação ambiental e a sustentabilidade das atividades agrícolas no Noroeste do Paraná.

Palavras-chave: Aeronave Remotamente Pilotada; Conservação de solos; Estudo de voçorocas; Noroeste do Paraná; Sistemas pedogeomorfológicos.

ABSTRACT

FERREIRA, William Henrique Kurunczi. **Geotechnologies applied to environmental fragility: from regional assessment to local drone study of gully erosion in Northwestern Paraná.** 2026. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciência Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

Soil degradation caused by water erosion represents a continuous challenge to sustainable development, resulting in significant losses of arable land and high economic costs. This issue is particularly aggravated in historical contexts of environmental degradation, such as in Northwestern Paraná, Brazil. In this scenario, a thorough understanding of the physical environment is essential for the development of effective strategies for the control and prevention of erosive landforms. Accordingly, this research aimed to analyze environmental fragility at a regional scale in the Immediate Geographic Region of Cianorte (RIC) and to investigate, at a local scale, the mechanisms of genesis and evolution of a gully located in the municipality of Guaporema, Paraná State. The methodology was based on the articulation between analytical scales, employing geoprocessing techniques to map environmental fragility in the RIC through adaptations of the methodology proposed by Ross (1994, 2012). This approach integrated geological, pedological, and topographic data, including slope and hillslope forms, as well as land use and land cover data from the MapBiomass project. Model validation was carried out through the spatial correlation of erosive features within the study area, which are predominantly concentrated in sectors classified as high and very high fragility. Based on the regional analysis, a case study of the gully in Guaporema, located in an area of high environmental fragility, was developed using the processing of aerial survey images acquired by a Remotely Piloted Aircraft (RPA) and soil sample analyses along a toposequence. The results indicate that erosive features occur mainly over sandstones of the Caiuá Group formations, especially in areas occupied by typical or abruptic Red Argisols, on steep relief and convergent or rectilinear slopes, whose morphodynamic behavior enhances environmental fragility, particularly under land uses with lower protective capacity, such as sugarcane cultivation and planted pastures. In the case study, the gully was interpreted as the result of high fragility within the pedogeomorphological system combined with inadequate land management, with an estimated eroded soil volume of 10,126.2 m³. Soil texture and the identification of the lateral Latosol–Argisol transition are decisive factors in explaining the deeper incision of the gully, as this contact zone functions as a hydraulic and mechanical discontinuity, reducing soil cohesion and increasing susceptibility to erosion. In summary, the research highlights the importance of integrating analytical scales and underscores the need for territorial planning that considers the pedogeomorphological limits of the landscape and appropriate management practices to mitigate erosive features, thereby contributing to environmental conservation and the sustainability of agricultural activities in Northwestern Paraná.

Key-words: Remotely Piloted Aircraft; Soil conservation; Gully erosion study; Northwest Paraná; Pedogeomorphological systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitação dos municípios da Região Imediata de Cianorte/PR.	34
Figura 2 – Mapa de hipsometria da Região Imediata de Cianorte/PR.	36
Figura 3 – Mapa de unidades litoestratigráficas da Região Imediata de Cianorte/PR.....	37
Figura 4 – Mapa geomorfológico da Região Imediata de Cianorte/PR.	38
Figura 5 – Mapa pedológico da Região Imediata de Cianorte/PR.	40
Figura 6 – Mapa de precipitação na Região Imediata de Cianorte /PR (1991-2023).....	42
Figura 7 – Mapa fitogeográfico da Região Imediata de Cianorte/PR.	44
Figura 8 – Morfologia de classes e subclasse de vertentes.	51
Figura 9 – Organograma de sequência de procedimentos metodológicos.	54
Figura 10 – Mapa de fragilidade de declividade da RIC.....	55
Figura 11 – Mapa de fragilidade de unidades litoestratigráficas da RIC.	57
Figura 12 – Mapa de fragilidade de tipos de solos da RIC.....	58
Figura 13 – Mapa de fragilidade de formas de vertente da RIC.....	61
Figura 14 – Mapa de Fragilidade Ambiental Potencial da RIC.....	63
Figura 15 – Mapa de fragilidade das classes de uso e cobertura do solo na RIC.....	66
Figura 16 – Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente da RIC.	67
Figura 17 – Área Ocupada por Classe de Fragilidade Potencial e Emergente na RIC.....	68
Figura 18 – Pontos amostrados de fragilidades potencial e emergente na RIC.....	71
Figura 19 – Pontos amostrados de feições erosivas na RIC.....	72
Figura 20 – Mapa de localização da voçoroca em zona rural de Guaporema/PR.	77
Figura 21 – Imagem panorâmica da voçoroca.	78
Figura 22 – Detalhamento a montante da voçoroca.....	78
Figura 23 – Croqui de reconstituição histórica da voçoroca em Guaporema/PR.	80
Figura 24 – Sequência metodológica para realização do estudo de caso da	

voçoroca.....	82
Figura 25 – Pontos de controle e base estacionária para o georreferenciamento.	83
Figura 26 – RPA DJI Mavic 3 Enterprise e controle DJI RC Pro Enterprise.....	84
Figura 27 – Planos de voos das missões 1 e 2 para estudo da voçoroca.....	85
Figura 28 – Correção do marcador e georreferenciamento das imagens.	89
Figura 29 – Parâmetros da ferramenta “ <i>Classify Ground Points</i> ”.....	91
Figura 30 – Processo complementar de classificação manual da nuvem de pontos.	91
Figura 31 – Opções de geração da malha tridimensional.	92
Figura 32 – Distinção entre o MDS e MDT da voçoroca em estudo.....	93
Figura 33 – Polígono para cálculo de volume e localização dos pontos de controle.	94
Figura 34 – Coleta de solo com trado holandês e organização de amostras.....	96
Figura 35 – Sequência de procedimentos para a análise das amostras de solo.....	97
Figura 36 – Pesagem e preparo das amostras com solução dispersante (NaOH).....	98
Figura 37 – Organização das amostras em agitador rotativo do tipo Wagner.	99
Figura 38 – Fração areia e argila das amostras de solo nas placas de petri.	100
Figura 39 – Preparo de provetas e placas de petri para quantificação da fração argila.	101
Figura 40 – Classificação por tipo e formas das voçorocas.	104
Figura 41 – Aporte de sedimentos a jusante da voçoroca em um dos tributários da Bacia Hidrográfica da Água do Cascavel.	104
Figura 42 – Perfis topográficos longitudinal e transversais da voçoroca.....	105
Figura 43 – Profundidade e alargamento da calha da voçoroca em média vertente.	106
Figura 44 – Dados de referência e elevação para o cálculo de volume da voçoroca.....	108
Figura 45 – Sulcos e processos de ravinamento em áreas adjacentes da voçoroca.....	109
Figura 46 – Triângulo textural das amostras em topossequência da área da	

voçoroca..... 111

Figura 47 – Mapa de frações granulométricas e classes de solo da área da

voçoroca..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Área, população e características dos municípios da RIC.	35
Tabela 2	– Graus de fragilidade e classes de declividade.	47
Tabela 3	– Graus de fragilidade e tipos de rochas.	48
Tabela 4	– Graus de fragilidade e tipos de solos.	49
Tabela 5	– Classes e fragilidade de perfil (vertical) e plano (horizontal) de curvatura.	50
Tabela 6	– Graus de fragilidade e classes de formas de vertente	51
Tabela 7	– Pesos das variáveis de Fragilidade para RIC.	52
Tabela 8	– Área das classes de fragilidade de declividade da RIC.	55
Tabela 9	– Área das classes de fragilidade de unidades litoestratigráficas da RIC.	57
Tabela 10	– Área das classes de fragilidade de tipos de solos da RIC.	58
Tabela 11	– Área das classes de fragilidade de formas de vertente da RIC.	61
Tabela 12	– Área das classes de Fragilidade Ambiental Potencial da RIC.	63
Tabela 13	– Área das classes de fragilidade de uso e cobertura do solo na RIC.	66
Tabela 14	– Área das classes de Fragilidade Ambiental Emergente da RIC.	68
Tabela 15	– Coordenadas e altitude da estação base e pontos de controle.	83
Tabela 16	– Classificação das voçorocas por tamanho pelo volume erodido em m ³	107
Tabela 17	– Proporções das frações granulométrica das amostras de solo.	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estações pluviométricas e médias mensais de precipitação na Região Imediata de Cianorte/PR (1991-2023).	43
Quadro 2 – Pontos amostrados de feições erosivas e condições de fragilidade na Região Imediata de Cianorte/PR.	73
Quadro 3 – Etapas de processamento dos aerolevantamentos com RPA nos softwares Agisoft Matashape e QGIS.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANADEM	Modelo Digital de Terreno para a América do Sul
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APP	Área de Preservação Permanente
BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGG/UEL	Departamento de Geologia e Geomática da Universidade Estadual de Londrina
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EVLOS	<i>Extended Visual Line of Sight</i>
FES	Floresta Estacional Semidecidual
FOD	Floresta Ombrófila Densa
FOM	Floresta Ombrófila Mista
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTP	Geossistema-Território-Paisagem
IAT	Instituto Água e Terra do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas

ITR	Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural
Ma	Milhões de anos
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NaOH	Hidróxido de Sódio
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
PIB	Produto Interno Bruto
PPGEO/UEL	Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
RIC	Região Imediata de Cianorte
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UC	Unidade de Conservação
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	<i>Visual Line of Sight</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral	17
1.2	Objetivos específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Paisagem e a abordagem geossistêmica em estudos ambientais	18
2.2	A fragilidade ambiental e as unidades ecodinâmicas	21
2.3	Os processos erosivos no Noroeste do paraná e Região imediata de Cianorte	24
2.4	Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) e legislao	27
2.5	Geotecnologias e RPAs para a recuperao de áreas degradadas	29
3	FRAGILIDADE AMBIENTAL DA REGIÃO IMEDIATA DE CIANORTE	33
3.1	Localizao e aspectos socioeconômicos da área de estudo	33
3.2	Caracterizao físico-natural da área de estudo	36
3.3	Material e métodos	45
3.4	Procedimentos metodológicos	47
3.5	Resultados e discussões	54
3.5.1	Fragilidade Ambiental Potencial da Região Imediata de Cianorte	54
3.5.2	Fragilidade Ambiental Emergente da Região Imediata de Cianorte	65
3.5.3	Validao do modelo de fragilidade ambiental	70
4	ESTUDO DE CASO DE VOÇOROCA EM GUAPOREMA/PR	77
4.1	Material e métodos	81
4.2	Procedimentos metodológicos	81

4.2.1	Georreferenciamento da poligonal de base e pontos de controle	82
4.2.2	Levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada - RPA.....	84
4.2.3	Processamento das fotos dos aerolevantamentos com RPA.....	86
4.2.4	Coletas de amostras de solo	95
4.2.5	Ensaio Granulométrico das amostras de solo	97
4.3	Resultados e discussões do estudo de caso	102
4.3.1	Caracterização e cálculo de volume da voçoroca	102
4.3.2	Granulometria e classificação dos solos na área afetada pela voçoroca.....	110
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
	REFERÊNCIAS	121

1 INTRODUÇÃO

Os processos erosivos integram a dinâmica natural do ambiente, atuando como agentes modeladores do relevo por meio do desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo. A intensidade do desgaste e a mobilização dos sedimentos variam em função das características naturais de cada área, como fatores climáticos, geológicos, pedológicos e topográficos. Contudo, essa dinâmica é intensificada em decorrência de formas inadequadas de uso e ocupação do solo, transformando-se ação antrópica, promovendo alterações significativas na paisagem e contribuindo para o surgimento e evolução de feições erosivas, configurando-se em processos de degradação ambiental (Beckauser, 2020; Gomes, Gomes e Alves Junior, 2023).

O controle e a prevenção dos processos erosivos representam um desafio contínuo, especialmente diante da expansão dos núcleos urbanos e desenvolvimento das atividades econômicas. De acordo com Bahr e Carvalho (2012), o conhecimento aprofundado do meio físico, incluindo suas características, dinâmicas e limitações, é fundamental para a elaboração de estratégias eficazes tanto para o controle quanto para a prevenção de feições erosivas na paisagem. Tal conhecimento possibilita uma ocupação territorial mais segura e compatível com as potencialidades e restrições naturais, favorecendo um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável.

A Região Imediata de Cianorte (RIC), sobre a abrangência da porção Noroeste do estado do Paraná e que constitui um dos recortes espaciais do presente estudo, é historicamente afetada por intensos processos erosivos. Segundo Telles, Guimarães e Dechen (2011), estima-se que o Brasil perca aproximadamente 600 milhões de toneladas de solo agricultável por ano em decorrência da erosão hídrica, com custos econômicos na ordem de 242 milhões de dólares, com perdas no estado do Paraná estimadas de 20 toneladas de solo por hectare ao ano.

Em estágios mais avançados de degradação dos solos por erosão hídrica, estão as ravinas e as voçorocas, que segundo Marchioro, Andrade e Oliveira (2016), ditas como as formas erosivas mais severas do solo devido ao seu grande poder destrutivo, lenta recuperação e difícil controle. As voçorocas causam diversos prejuízos, afetando negativamente aspectos ambientais, econômicos e sociais, levando à degradação ambiental e dos sistemas agrícolas, poluindo e assoreando cursos hídricos, além de comprometer infraestruturas urbanas, evidenciando a necessidade de ações preventivas e de um manejo mais sustentável.

Diante desse cenário, a evolução das geotecnologias tem possibilitado a coleta e o processamento de dados essenciais para a elaboração de diversos estudos ambientais, contribuindo para o ordenamento e planejamento ambiental. Dentre eles, destaca-se a análise da Fragilidade Ambiental, que no Brasil, foi inicialmente proposto por Ross (1994, 2012), com o objetivo de minimizar os impactos sobre os recursos naturais e, conseqüentemente, reduzir os impactos dos processos erosivos. O estudo consiste em uma abordagem sistêmica dos elementos naturais e das atividades antrópicas, identificando áreas de menor ou maior fragilidade, com restrições de usos.

No âmbito das geotecnologias para a recuperação de áreas degradadas, os equipamentos e as técnicas de mapeamento apresentaram avanços significativos, especialmente no que se refere ao sensoriamento remoto. Nesse contexto, destaca-se a utilização de pequenas plataformas aéreas não tripuladas, denominadas como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), popularmente conhecidas como drones. A evolução dos softwares de processamento de imagens obtidas por RPAs, permitem que o usuário realize todas as etapas, desde o planejamento do voo até a geração dos produtos cartográficos finais com nível elevado de detalhe.

Diante do exposto, a presente pesquisa foi desenvolvida em duas partes principais. A primeira, teve como objetivo analisar a fragilidade ambiental da Região Imediata de Cianorte (RIC), no contexto histórico de degradação ambiental por feições erosivas na porção Noroeste do estado do Paraná. Para isso, utilizou-se adaptações da metodologia proposta por Ross (1994, 2012), consolidadas e ampliadas por estudos como os de Oliveira (2023) e Silva e Bacani (2023), ao integrarem a avaliação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas à identificação de conflitos de uso do solo em APPs. Também foram consideradas as contribuições de Molinari Júnior (2024), que incorporou variáveis de litologia e formas de vertentes na análise da fragilidade ambiental potencial em bacias hidrográficas no estado de Goiás, bem como de Sousa (2024), que propôs a automatização de classificações ecodinâmicas e análises espaço-temporais em escala estadual para São Paulo.

Conforme objetivos da primeira parte do trabalho, realizou-se a integração de dados geológicos, pedológicos e topográficos, incluindo o processamento das variáveis de declividade e formas de vertentes, para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental potencial. Em seguida, foram utilizados dados de uso e cobertura do solo do Projeto MapBiomass, para a construção do mapa de fragilidade ambiental emergente, possibilitando a identificação, em escala regional, das áreas mais

suscetíveis à ocorrência de processos erosivos.

De forma complementar, para fins de discussão e validação dos resultados, foram identificadas diversas feições erosivas ao longo da área de estudo, com maior concentração nas áreas classificadas como de alta fragilidade ambiental. Essa análise contribuiu para o entendimento da distribuição espacial dos processos erosivos e pode fornecer subsídios importantes para o planejamento ambiental e a tomada de decisões na área de estudo.

Por sua vez, na segunda parte do trabalho, foi realizado um estudo de caso de uma voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR, a qual se destacou entre as feições erosivas previamente identificadas na etapa de validação do modelo de fragilidade ambiental. O estudo de caso foi conduzido a partir da geração cartográfica técnica com dados precisos de campo, obtidos por meio de aerolevantamento com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), além da coleta e análise de amostras de solo em topossequência.

A sequência de procedimentos adotados na segunda etapa da pesquisa possibilitou a caracterização da feição erosiva, o cálculo de volume de solo erodido e a discussão dos principais condicionantes de degradação e evolução da voçoroca. Essa análise foi fundamentada, sobretudo, nos estudos de Couto (2015), em análise da evolução denudacional de longo prazo e as relações solo-relevo no Noroeste do estado do Paraná; de Oliveira (2020), em tese sobre os condicionantes geomorfológicos de erodibilidade em fragmentos ambientais de Mata Atlântica; de Gomes, Gomes e Alves Junior (2023) na avaliação da eficácia dos produtos de aerolevantamento por RPA com técnicas de topografia tradicional em estudos de voçorocas; e de Nóbrega *et al.* (2023), que discutiram os locais preferenciais de ocorrência de voçorocas na paisagem do Noroeste do estado do Paraná.

Embora os trabalhos citados apresentem contribuições valiosas em análises ambientais, seja em escala regional quanto em estudos locais de feições erosivas, a presente pesquisa diferencia-se em sua proposta de integração entre essas duas escalas de análise. A partir da articulação entre os resultados da análise da fragilidade ambiental da Região Imediata de Cianorte (RIC) e o estudo de caso da voçoroca no município de Guaporema/PR, espera-se contribuir para o meio científico e, ao mesmo tempo, oferecer subsídios para um uso mais sustentável dos elementos naturais, ao identificar áreas de maior fragilidade ambiental e discutir os principais condicionantes da degradação dos solos associados à intensificação dos processos erosivos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, em escala regional, o grau de fragilidade ambiental da Região Imediata de Cianorte (RIC) frente à ocorrência de processos erosivos, articulando o mapeamento regional com a análise detalhada, em escala local, de uma voçoroca situada em área de alta fragilidade ambiental no município de Guaporema/PR, por meio de um estudo de caso a partir de aerolevanteamento com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) e análises de solo em topossequência.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a fragilidade ambiental em escala regional da Região Imediata de Cianorte (RIC) a partir de adaptações da metodologia proposta por Ross (1994, 2012);
2. Correlacionar a ocorrência de feições erosivas com os diferentes graus de fragilidade ambiental ao longo da área de estudo para validação e discussão do mapeamento em escala regional;
3. Integrar as escalas de análises regional e local por meio da elaboração de um estudo de caso de uma voçoroca localizada no município de Guaporema/PR, em área previamente classificada como de alta fragilidade ambiental;
4. Caracterizar a voçoroca e calcular o volume de solo erodido a partir de aerolevanteamento realizado com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), bem como discutir os principais condicionantes da degradação da paisagem com apoio de análises de amostras de solo em topossequência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como ponto de partida de uma pesquisa, a delimitação de suas bases teóricas é essencial. Portanto, neste capítulo, trata-se a paisagem como categoria de análise geográfica, sendo um importante instrumento de leitura do espaço aplicado em estudos ambientais numa abordagem geossistêmica. Em seguida, são apresentados os principais fundamentos teóricos relacionado aos estudos de fragilidade ambiental, com destaque para o modelo proposto por Ross (1994, 2012). Posteriormente, discute-se a ocorrência de feições erosivas e a consequente degradação ambiental histórica resultante da exploração intensiva do Noroeste paranaense, incluindo a Região Imediata de Cianorte (RIC). Por fim, são tratados os aspectos legais relacionados à utilização das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) e sua aplicação para estudo de voçorocas e recuperação de áreas degradadas.

2.1 PAISAGEM E A ABORDAGEM GEOSSISTÊMICA EM ESTUDOS AMBIENTAIS

A paisagem, enquanto categoria de análise geográfica, configura-se como uma unidade de investigação de grande relevância para os estudos ambientais, com contribuições significativas à compreensão do ambiente em toda a sua complexidade. Contudo, como destacado por Maximiano (2004), a paisagem representa uma forma de apreensão do espaço geográfico e não deve ser confundida como o todo deste, pois o objeto de estudo da Geografia é o espaço. Assim, a paisagem constitui uma medida multidimensional de interpretação de uma determinada área, sendo frequentemente adotada como método de pesquisa em estudos ambientais aplicados.

Tal aplicação do conceito de paisagem em estudos ambientais, segundo Braz e Neto (2021), decorre de transformações interpretativas no arcabouço teórico da Geografia, acompanhando as formas de interação da sociedade com a natureza. A consolidação da paisagem como categoria de análise geográfica ocorreu por meio de um processo gradual de amadurecimento conceitual, especialmente a partir da segunda metade do século XX, com o reconhecimento do dinamismo dos processos naturais e antrópicos que moldam a paisagem. Nesse processo, destaca-se a influência da Teoria Geral dos Sistemas e Geossistemas, fundamentados nas relações sistêmicas dos fluxos de energia (Oliveira, 2020).

De acordo com Oliveira (2020), foi em 1937 que o biólogo alemão Ludwig von

Bertalanffy formulou os princípios da Teoria Geral dos Sistemas, os quais, entretanto, só alcançariam maior difusão e aceitação a partir do final da década de 1960. Entre os principais conceitos estruturantes dessa teoria, destacam-se os princípios de interdependência, interação e totalidade, os quais possibilitam a análise integrada dos elementos constituintes de um sistema.

Ainda segundo Oliveira (2020), no âmbito da Geomorfologia, a abordagem sistêmica tem se consolidado como um dos pressupostos fundamentais para a compreensão da morfodinâmica. No contexto dos sistemas abertos em Geomorfologia, Strahler (1952), pode ser considerado um dos pioneiros na formulação de uma base epistemológica sólida, ao propor uma leitura dinâmica das feições morfológicas pautada na atuação simultânea de múltiplas forças naturais ao longo do tempo. Essas forças interagem e moldam o relevo em um estado denominado equilíbrio dinâmico, conceito que teve papel central na difusão da abordagem sistêmica nos estudos geomorfológicos.

Posteriormente, Tricart (1977), ao sistematizar as análises ambientais e incorporar elementos provenientes da ecologia, introduziu um subsistema de grande relevância nos fluxos de entrada e saída de energia: o fator antrópico. Esse avanço conceitual resultou na formulação da chamada Abordagem Ecodinâmica, a qual passou a compreender a paisagem por meio das Unidades Ecodinâmicas. Tal abordagem considera não apenas os elementos naturais, mas também as interferências humanas como parte integrante dos processos dinâmicos que se manifestam na paisagem.

Como resultado, a incorporação de elementos da ecologia às categorias de análise sistêmica da Geomorfologia, passam a constituir uma metodologia voltada à interpretação das dinâmicas ambientais sob a ótica das intervenções antrópicas. Essa perspectiva permite compreender de maneira mais ampla as alterações nos fluxos de energia e matéria decorrentes da ação humana em diferentes escalas temporais. Tal concepção também teve grande influência na formulação do conceito de fragilidade ambiental empírica proposto por Ross (1994, 2012), ao reconhecer a fragilidade dos sistemas naturais frente à ação antrópica, estabelecendo uma base teórico-metodológica sólida para a análise integrada da paisagem e dos processos erosivos.

Por sua vez, conforme destacam Cavalcanti e Corrêa (2017), no contexto da Geografia brasileira, o termo geossistema passou a ser amplamente empregado como aplicação da teoria dos sistemas ao estudo do meio físico. Tal aplicação encontrou

respaldo teórico em trabalhos de geógrafos estrangeiros, especialmente franceses e soviéticos. A introdução do conceito no Brasil se deu, inicialmente, a partir do artigo “*Paysage et géographie physique globale: esquisse méthodologique*”, do geógrafo francês Georges Bertrand, publicado em 1968 e traduzido para o português em 1972 por Olga Cruz. Posteriormente, em 1975, apresenta maior alcance no Brasil o trabalho do geógrafo soviético Viktor B. Sochava, intitulado “*The Study of Geosystems*”, com forte impacto na formulação de unidades da paisagem.

No entanto, a incorporação do conceito pela Geografia brasileira foi, por vezes, marcada por uma sobreposição interpretativa entre as perspectivas de Bertrand e Sochava, desconsiderando suas diferenças epistemológicas e metodológicas fundamentais. Observa-se, com frequência, a adoção da concepção francesa como equivalente à soviética, especialmente no que diz respeito à dimensão espacial e temporal dos geossistemas, compreendidos como entidades de grande abrangência de área. Tal entendimento, embora coerente com a proposta de Bertrand, não corresponde inteiramente à concepção desenvolvida por Sochava. Desse modo, torna-se necessário discutir as divergências entre essas abordagens, de modo a qualificar a apropriação crítica do conceito de geossistema na Geografia brasileira (Cavalcanti; Corrêa, 2017; Oliveira, 2020).

Bertrand, em seu artigo de 1968, utilizou o termo geossistema para se referir a uma das escalas espaço-temporais da paisagem, bem delimitadas, abrangendo a 4ª e 5ª ordem de grandeza na classificação de Cailleux e Tricart, com escalas espaciais na ordem de 10 a 100 km² e temporais de 10⁶ a 10⁷ anos. Posteriormente, Bertrand reformulou sua compreensão do termo, passando a defini-lo como uma entidade natural resultante das inter-relações entre os componentes da natureza e impactada pelas ações da sociedade. Essa nova concepção serviu de base para a elaboração do seu modelo Geossistema-Território-Paisagem (GTP), no qual são articuladas diferentes dimensões da análise geográfica, integrando aspectos naturais e sociais (Cavalcanti; Corrêa, 2017).

Por outro lado, a origem do conceito de geossistema remonta à Escola Eslavo-Soviética de Geografia, que buscava uma unificação terminológica dos conceitos da geografia física. Nesse processo, Viktor B. Sochava, propôs em 1963, a substituição do termo “paisagem”, considerado ambíguo devido à sua polissemia e ao uso em diversas disciplinas, pelo conceito de geossistema. Sochava propôs o geossistema como uma categoria de análise com grande amplitude capaz de subsidiar uma gestão

territorial integrada. Para ele, os geossistemas poderiam apresentar uma vasta gama de escalas espaciais, desde as fácies físico-geográficas até o envelope geográfico, ou seja, a totalidade da superfície terrestre (Cavalcanti; Corrêa, 2017; Oliveira, 2020).

Diante do exposto, a paisagem é frequentemente concebida como um conceito unificador na pesquisa ambiental, servindo como ferramenta interpretativa para a compreensão da complexidade ambiental. Segundo Simensen, Halvorsen e Erikstad (2018), não existe um método único e universal para a caracterização da paisagem, cujo as abordagens metodológicas variam conforme os objetivos da pesquisa, a escala e a disponibilidade de dados para a área de estudo. Assim, a escolha do método de caracterização, incluindo a escala espacial, influencia diretamente a efetividade e aplicabilidade dos resultados obtidos, reforçando a necessidade de um delineamento metodológico compatível com os propósitos investigativos.

A partir das considerações apresentadas, evidencia-se que a paisagem, enquanto categoria de análise geográfica, articulada às abordagens teóricas e metodológicas da perspectiva geossistêmica, é de grande importância para os estudos voltados ao planejamento ambiental e ao ordenamento territorial, incluindo os estudos de fragilidade ambiental. Por consequência, conforme destacam Braz e Neto (2021), tais concepções envolvem tanto a compreensão da estrutura dinâmica da paisagem, quanto a análise da intensidade das interferências antrópicas no sistema ambiental, bem como a capacidade de resiliência desses sistemas diante das pressões humanas. Tais aplicações objetivam uma gestão territorial como prática disciplinadora das ações antrópicas e o uso mais equilibrado do meio, objetivos esses diretamente relacionados com os estudos de fragilidade ambiental.

2.2 A FRAGILIDADE AMBIENTAL E AS UNIDADES ECODINÂMICAS

Diante dos impactos negativos decorrentes das atividades antrópicas sobre o ambiente, Dors *et al.* (2021) ressaltam a relevância de análises integradas que considerem tanto os elementos naturais quanto as formas de uso e ocupação do solo. Com efeito, a análise integrada dos componentes ambientais possibilita um planejamento mais eficiente das intervenções humanas, com o objetivo de mitigar os impactos sobre os recursos naturais. Sendo assim, evidencia-se a importância dos estudos de fragilidade ambiental, possibilitando uma melhor compreensão das inter-relações entre os componentes do meio físico e as ações humanas na paisagem.

O conceito de fragilidade ambiental, conforme Ross (1994, 2012), refere-se à suscetibilidade do ambiente às intervenções ou alterações, sejam elas decorrentes de processos naturais ou de ações antrópicas. Quando o estado de equilíbrio dinâmico de um sistema é perturbado, pode ocorrer sua desestabilização, o que pode levar a situações de risco e até mesmo o seu colapso. Assim, a análise sistêmica dos elementos físicos e socioeconômicos, de acordo com Pericatto e Souza (2019), possibilita a identificação de áreas com maior ou menor potencial de desestabilização, de maneira que os estudos de fragilidade ambiental configuram-se como instrumentos essenciais ao planejamento ambiental e à gestão do território, fornecendo subsídios técnicos para a definição de diretrizes e ações mitigadoras.

No Brasil, sob uma perspectiva geossistêmica, os estudos de fragilidade ambiental tiveram origem na proposta de Ross (1994, 2012), fundamentada na Abordagem Ecodinâmica e no conceito de Unidades Ecodinâmicas desenvolvido por Tricart (1977). Como destaca Oliveira (2020), Tricart estabeleceu duas categorias analíticas baseadas no grau de instabilidade do sistema: as Unidades Ecodinâmicas Estáveis, que correspondem às áreas em equilíbrio dinâmico, pouco alteradas por ação antrópica e com fluxos de energia e matéria em relativa harmonia; e as Unidades Ecodinâmicas Instáveis, associadas a áreas fortemente modificadas por ações antrópicas, como o desmatamento e atividades econômicas inadequadas, resultando em alterações significativas nos ambientes naturais e fluxos de energia dos sistemas.

Da mesma forma, Ross (1994, 2012) ressalta que o planejamento ambiental não deve se basear apenas em uma análise estática, que isola os elementos naturais da paisagem, mas sim, deve considerar suas interrelações sistêmicas, articuladas ao processo histórico de ocupação do território. Essa perspectiva visa orientar o desenvolvimento socioeconômico de forma integrada à gestão dos recursos naturais. Com base nesse princípio, o autor amplia o escopo da Abordagem Ecodinâmica ao introduzir as categorias de Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial e de Instabilidade Emergente, classificadas em diferentes níveis de fragilidade ambiental que variam de muito fraca a muito forte.

A metodologia proposta por Ross (1994, 2012) pressupõe de que a natureza apresenta funcionalidade intrínseca entre seus elementos físicos e bióticos, como a geologia, o clima, os tipos de solos e a cobertura vegetal. Assim, mesmo as Unidades Ecodinâmicas Estáveis, embora em um estado de equilíbrio dinâmico, podem apresentar uma Instabilidade Potencial qualitativamente previsível devido às suas

características naturais e à possibilidade sempre presente de intervenção humana, compondo o quadro de Fragilidade Potencial. Por outro lado, a Fragilidade Emergente, expressa a susceptibilidade natural de uma área à degradação ambiental, decorrente da intensificação de processos por ações antrópicas e as formas inadequadas de uso e ocupação do solo praticadas pela sociedade (Ross, 1994, 2012).

Em conformidade, Sousa (2024), discorre que a classificação ecodinâmica do ambiente deve envolver a compreensão das relações entre os elementos da paisagem que compõem os sistemas naturais e dos atributos capazes de representá-los de forma mais adequada. Entre esses elementos, destacam-se a geologia, a geomorfologia, a pedologia, a hidrodinâmica, a climatologia e as informações de uso e ocupação do solo. Ainda, para o planejamento territorial, a utilização de dados que abrangem grandes extensões espaciais, obtidos por meio de sensores remotos ou de disponibilizadas por institutos de pesquisa, possibilita uma coleta de informações de forma padronizada e periódica, visando uma gestão territorial efetiva e continuada.

Da mesma forma, Bahr e Carvalho (2012), destacam a importância do conhecimento aprofundado dos componentes da paisagem para o planejamento territorial e ambiental, uma vez que a identificação de suas características representam o ponto de partida para a prevenção de situações problemáticas e impactos negativos futuros. Esse diagnóstico deve abarcar tanto as potencialidades e qualidades ambientais quanto as fragilidades intrínsecas de uma determinada área. Nesse sentido, os estudos de fragilidade ambiental, fornecem subsídios para o ordenamento territorial, especialmente no que diz respeito aos processos erosivos, que historicamente trazem diversos transtornos socioambientais para a porção Noroeste do estado do Paraná, incluindo a Região Imediata de Cianorte (RIC).

Por fim, como ressaltam Dors *et al.* (2021), a análise da fragilidade ambiental assume papel estratégico ao identificar potenciais problemas ambientais e fornecer base técnica para a formulação de políticas públicas em diferentes escalas geográficas. Essa análise se apoia em ferramentas avançadas, particularmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem o mapeamento das território conforme seus níveis de fragilidade. Como resultado, os mapas de fragilidade ambiental permitem a distinção de áreas com menores graus de fragilidade e, portanto, com maiores opções de uso e ocupação, das áreas com graus de fragilidade mais elevados, que demandam maior restrição de uso e medidas conservacionistas, orientando a tomada de decisões para um desenvolvimento mais sustentável.

2.3 OS PROCESSOS EROSIVOS NO NOROESTE DO PARANÁ E REGIÃO IMEDIATA DE CIANORTE

O conceito de erosão refere-se ao processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo e do subsolo, implicando diretamente no conjunto de ações que modelam uma paisagem e influenciam a dinâmica de formação dos solos. Os processos erosivos podem ser diferenciados tanto em erosão natural ou geológica, quando ocorrem em condições de equilíbrio com a taxa de formação do solo, quanto em erosão acelerada ou antrópica, caracterizada por uma intensidade superior à capacidade de reposição natural, inviabilizando a recuperação espontânea dos solos (Iwasa; Fendrich, 1998; Guerra; Guerra, 2008).

Dessa maneira, os processos erosivos fazem parte da dinâmica natural do ambiente, atuando como agentes modeladores do relevo em diferentes escalas espaciais e temporais. A intensidade do desgaste e o transporte de sedimentos variam em função das características naturais de cada área, especialmente em relação aos fatores climáticos, geológicos, topográficos e pedológicos. Entretanto, conforme Beckauser (2020), tais dinâmicas podem ser intensificadas ou mesmo ocasionadas por interferências antrópicas que alteram o equilíbrio dos ecossistemas. Entre as principais ações humanas que agravam os processos erosivos, destacam-se o desmatamento, a expansão urbana desordenada, a pecuária extensiva e os sistemas agrícolas com manejo inadequado do solo, cuja ausência de prática conservacionistas, reduzem a infiltração da água no solo e aumentam a concentração do escoamento superficial, resultando em situações de degradação ambiental.

Nesse contexto, segundo Santos, Mangueira e Oliveira (2023), as erosões encontradas em ambientes urbanos não diferem daquelas situadas em ambiente com menor pressão antrópica, no que diz respeito aos mecanismos que atuam para a sua evolução em diferentes escalas temporais e espaciais. Tais processos decorrem, principalmente, do escoamento concentrado de água, tanto em superfície quanto em subsuperfície, que converge para locais sem ou com pouca interferência antrópica, denominada com erosão hídrica.

Segundo Mangueira (2017), entre os principais mecanismos envolvidos no processo erosivo, destacam-se o deslocamento de partículas do solo exposto pela ação do impacto das gotas de chuva (*splash*), o transporte de sedimentos por fluxos concentrados de água, a erosão por queda d'água, a liquefação de materiais do solo, o arraste de partículas pela percolação e por fluxos subterrâneos concentrados, com

a formação de túneis ou dutos (*piping*). Adicionalmente, são frequentes o solapamento da base de taludes e a ocorrência de movimentos de massa localizados, especialmente em áreas urbanas mal planejadas ou em expansão desordenada, agravando quadros de degradação ambiental.

De acordo com Bertol *et al.* (2019), a erosão hídrica configura-se como uma das principais causas da degradação dos solos, podendo ser classificada como laminar ou linear. A erosão laminar ocorre quando o fluxo de água na superfície é difuso, promovendo o arraste de partículas superficiais do solo como um todo, reduzindo a fertilidade e o empobrecimento da camada superficial dos sistemas agrícolas. Por sua vez, a erosão linear caracteriza-se pelo processo de remoção do solo com maior intensidade em alinhamentos específicos, chamados de sulcos, cuja a evolução dessas feições variam em função da intensidade das chuvas e das características morfopedológicas do terreno.

Ainda segundo Bertol *et al.* (2019), entre as formas mais complexas da erosão linear estão as ravinas e, em estágios evolutivos mais críticos, estão as voçorocas. As ravinas correspondem ao aprofundamento e alargamento dos sulcos formados pelo escoamento superficial, com profundidades que variam entre 50 cm e 1,5 m, geralmente apresentando um crescimento progressivo (de montante para jusante) ou mesmo regressivo (de jusante para montante). Quando esse processo se intensifica, pode dar origem às voçorocas, que apresentam maior profundidade, instabilidade nas margens, ocorrência de quedas de blocos de solo e, frequentemente, o afloramento do lençol freático ou surgência de água.

A diferença morfológica fundamental entre ravinas e voçorocas reside na forma da calha de escoamento que se apresentam na paisagem: enquanto as ravinas apresentam perfis em “V”, típicos de cortes recentes e ainda não estabilizados, as voçorocas possuem perfil transversal em “U”, com margens mais instáveis e presença de fundo plano, indicando um estágio avançado de erosão e degradação ambiental. As voçorocas causam transtornos e prejuízos significativos para a população local, afetando aspectos ambientais, econômicos e sociais, devido ao seu grande poder destrutivo, lenta recuperação e o seu difícil controle (Viera, 2008; Marchioro; Andrade; Oliveira, 2016).

No estado do Paraná, conforme destaca Beckauser (2020) observa-se um aumento expressivo de feições erosivas à medida que a ocupação do território se intensificou. A partir do século XX, a ocupação das porções Norte e Noroeste do

estado seguiram um modelo imediatista, marcado pela substituição das matas nativas por atividades agrícolas, com destaque inicial para a cafeicultura. Com o tempo, o parque cafeeiro foi gradualmente substituído por pastagens destinadas para a pecuária de corte e por monoculturas de cana-de-açúcar e soja, atividades fortemente associadas à mecanização agrícola e à expansão dos complexos agroindustriais do setor sucroenergético, provocando alterações significativas no meio físico e nas dinâmicas socioeconômicas regionais.

No caso específico do Noroeste paranaense e, conseqüentemente nos municípios inseridos na Região Imediata de Cianorte (RIC), a fragilidade dos solos tem papel preponderante no desencadeamento dos processos erosivos. Essa situação foi agravada pelo modelo de ocupação rural e urbana implementados a partir da década de 1940, o qual não considerou as condições pedológicas locais, notadamente a predominância de solos arenosos e suscetíveis à erosão. As cidades foram estabelecidas sobre os divisores de águas, conhecidos como espigões, e planejadas, em termos de traçado urbano, para a otimização da circulação de mercadorias. Como consequência, muitas cidades nas décadas de 1940 e 1950, já apresentavam sérios problemas de degradação ambiental associados aos processos erosivos, comprometendo áreas agricultáveis, aparelhos viários e demais infraestruturas urbanas (Santos; Mangueira; Oliveira, 2023).

Em vista disso, os locais preferenciais para a ocorrência de voçorocas no Noroeste do estado do Paraná, incluindo a Região Imediata de Cianorte, distribuem-se, segundo Nóbrega *et al.* (2023), em três principais tipos de localização. O primeiro corresponde aos vales em forma de berço (concavizados) e suas cabeceiras, situados principalmente no interflúvio entre os rios Paranapanema e Ivaí, onde ocorrem voçorocas de grandes dimensões. O segundo tipo está associado aos setores de média e baixa encosta, com declividades moderadas a fortes, predominantemente em áreas rurais ocupadas por cultivos sazonais, como a cana-de-açúcar e a mandioca, apresentando voçorocas mais curtas, menos profundas e ramificadas. O terceiro tipo refere-se a área com morfologia de cabeceiras em forma de grandes anfiteatros, delimitadas por rupturas marcadas de declividade, nas quais estão instaladas várias nascentes de pequenos cursos d'água, com voçorocas conectadas ou não da rede de drenagem com dimensões e formas variadas.

Diante do exposto, evidencia-se a problemática histórica dos processos erosivos na área de estudo, responsáveis por inúmeros transtornos e prejuízos que

afetam os âmbitos ambiental, econômico e social em diferentes escalas. Entre os impactos negativos, são notórias as perdas de solos, a contaminação da água, o assoreamento dos cursos hídricos e de reservatórios de abastecimento urbano, além da degradação e a diminuição da produtividade sistemas agrícolas. Nesse sentido, ressalta-se a importância da análise da fragilidade ambiental da RIC, bem como a realização do estudo de caso da voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR, conduzido por meio da geração cartográfica técnica com dados precisos de campo obtidos por aerolevanteamento com RPA e pela coleta e análise laboratorial de amostras de solo.

2.4 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPAS) E LEGISLAÇÃO

As Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), conforme Roque, Brunetto e Santos (2023) no Brasil são regulamentadas por diferentes órgãos, sendo o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017, da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o principal instrumento legal, complementado pelas normas operacionais do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela regulamentação de frequências e comunicações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Desse modo, segundo Ferreira (2025) a sigla RPA, originada do inglês *Remotely Piloted Aircraft*, tem se consolidado como a terminologia mais comum em pesquisas acadêmicas e adotada como padrão pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). No entanto, ainda é possível encontrar outros termos, como VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), tradução do inglês UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), anteriormente utilizado por órgãos reguladores brasileiros, mas atualmente considerado como obsoleto pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional). Destaca-se também o termo “drone”, amplamente difundido nos EUA e popularizado tanto em contextos profissionais quanto recreativos, porém trata-se de uma denominação informal.

De acordo com Carvalho (2023), os RPAs podem ser empregados em duas categorias distintas de atividade: o aeromodelismo, voltado para fins recreativos, e o aerolevanteamento, destinado para aplicações comerciais. Nesta última, as operações aéreas têm como finalidade a medição, coleta e registro de dados do terreno, por meio do uso de câmeras e/ou sensores especiais, gerando produtos com elevada resolução

espacial. Os produtos processados de aerolevantamentos são ideais para aplicações que exigem alta precisão, como o mapeamento detalhado e o monitoramento ambiental, permitindo análises mais eficazes e tomadas de decisão baseadas em dados geoespaciais de alta qualidade.

Quanto às plataformas dos RPAs, segundo Carvalho (2023), elas se dividem basicamente em duas plataformas principais: asa fixa e multirotor. Os RPAs de asa fixa se assemelham com um avião, geralmente contendo um único motor, comumente utilizados para aerolevantamentos em grandes áreas, devido à alta autonomia de bateria (de 2 a 3 horas de operação por bateria), além da capacidade de atingir altas velocidades. Podem ser pilotados manualmente ou de forma automatizada, embora sejam mais difíceis de pilotar do que os multirotores. Contudo, essa plataforma possui algumas desvantagens, como a necessidade de maior área para os procedimentos de decolagem e pouso, apresentar menor capacidade de embarque de equipamentos e possibilitar a obtenção de imagens apenas de forma vertical.

Por outro lado, os RPAs multirotores recebem esse nome por possuírem mais de um rotor. A maioria dos modelos disponíveis no mercado possui 4 rotores, mas existem versões com até 12 rotores, aumentando a capacidade de carga dos equipamentos embarcados durante a decolagem. Entre as principais vantagens, destacam-se o menor custo de investimento em comparação aos modelos de asa fixa, facilidade de decolagem e pouso, bem como maior versatilidade nos ângulos de captura de imagens. No entanto, suas desvantagens incluem a baixa autonomia de voo (20 a 40 minutos de operação por bateria), menor velocidade e menor cobertura de área por voo em comparação aos modelos de asa fixa (Carvalho, 2023).

A regulamentação das operações de RPAs voltadas ao aerolevantamento é estabelecida pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA 100-40), conforme DECEA (2023). Essa norma viabiliza o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas, assegurando a segurança operacional e a proteção das pessoas em solo.

Por sua vez, as operações com RPAs são categorizadas conforme o nível de visibilidade da aeronave pelo piloto durante o voo, sendo:

- Operação BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*): Quando o piloto não consegue manter a aeronave dentro do alcance visual direto, mesmo com auxílio de um observador;
- Operação VLOS (*Visual Line of Sight*): Quando o piloto mantém contato visual direto com a RPA, sem o uso de lentes ou equipamentos auxiliares;

- Operação EVLOS (*Extended Visual Line of Sight*): Quando o piloto consegue manter contato visual com a RPA apenas com o auxílio de lentes, equipamentos ou observadores.

Segundo Alves Junior (2020), entre os principais produtos gerados por meio do uso de RPAs destacam-se a geração do ortomosaicos e de Modelo Digitais de Elevação (MDE). O ortomosaico consiste em um mosaico de ortofotos, ou seja, imagens aéreas corrigidas geometricamente que preservam a escala e permitem medições precisas. Por sua vez, o MDE é uma representação da superfície terrestre em que cada pixel possui um valor correspondente à altitude do terreno modelado. Esses produtos servem como base para obtenção de medidas planimétricas e altimétricas, sendo amplamente utilizados no planejamento urbano e ambiental, no planejamento e monitoramento dos sistemas agrícolas, atividades da mineração, monitoramento de barragens, estudos ambientais e outros.

2.5 GEOTECNOLOGIAS E RPAs PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

A recuperação de áreas degradadas sobre efeito de processos erosivos, conforme destacam Roque, Brunetto e Santos (2023), pode se beneficiar significativamente do uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), proporcionando ganho de tempo nas etapas de diagnóstico e elaboração de projetos. As imagens obtidas por aerolevantamentos são processadas em softwares específicos, permitindo a geração de produtos cartográficos de alta qualidade, com erros médios na casa de milímetros para a determinação da topografia do terreno.

Nesse sentido, muitos são os trabalhos que demonstram a aplicação de RPAs em conjuntos de outras geotecnologias na caracterização de processos erosivos e na proposição de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), bem como em projetos de recomposição florestal. Dessa maneira, são importantes exemplos os estudos de Souza, Salim e Antunes (2019), Julian e Nunes (2020), Garbelini (2021); Magalhães (2021), Silva *et al.* (2021), Weis *et al.* (2022), Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), Leinig (2024) e Santos (2024).

No que tange à recuperação de áreas degradadas, trata-se de uma ação prevista no Art. 225 da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988), bem como nos Artigos 2º e 4º da Política Nacional de Meio Ambiente de Lei nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), os quais estabelecem o dever de assegurar um meio ambiente ecologicamente

equilibrado para as presentes e futuras gerações. As ações de recuperação visam o restabelecimento da integridade física, química e biológica de áreas degradadas, buscando a restituição da capacidade funcional dos ecossistemas, seja por meio da recuperação ambiental, seja pela restauração dos serviços ecossistêmicos. Conforme Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), para a efetiva implementação dessas ações de recuperação, torna-se obrigatória a elaboração de projetos técnicos, bem como a suas formas de execução e monitoramento, onde se faz necessário a emissão de ato autorizativo do órgão ambiental competente com base na análise do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD).

De acordo com Silva *et al.* (2021), entre as etapas de recuperação de áreas degradadas, o monitoramento ambiental se destaca como uma etapa fundamental, pois permite avaliação contínua das técnicas implantadas e dos resultados obtidos ao longo do tempo. Portanto, o uso de geotecnologias e técnicas provenientes Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a Fotogrametria, contribuem significativamente para a coleta, manipulação, análise e edição de dados espaciais.

Ainda segundo Silva *et al.* (2021), tais técnicas e ferramentas permitem quantificar e qualificar os avanços dos processos de restauração, por meio da geração de ortomosaicos, modelos tridimensionais e mapas temáticos de uso e cobertura do solo. A coleta de imagens aéreas, organizadas em blocos fotogramétricos, possibilita uma visão detalhada da área em recuperação, permitindo identificar alterações na paisagem, avaliar a efetividade das ações realizadas e apoiar diagnósticos ambientais quanto à existência de passivos ambientais e riscos naturais de perda de solo, essenciais para a preservação e restauração de áreas degradadas.

De acordo com Julian e Nunes (2020), a forma mais convencional de monitoramento dos processos erosivos, considera a evolução espacial e temporal de uma voçoroca pelo método de estaqueamento, que consiste na instalação de estacas próximas às bordas das voçorocas, em distâncias previamente determinadas para mensurar a sua evolução. Com o avanço das geotecnologias, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) em alto nível de detalhe têm se mostrado ferramentas eficazes para análises das dinâmicas erosivas. A escolha entre as diferentes tecnologias de imageamento da superfície depende das necessidades do estudo, destacando-se as RPAs pela alta eficiência e acurácia, bem como um custo relativamente baixo, quando comparado a outras técnicas com resoluções espaciais similares.

Conforme Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), a versatilidade de sensores passíveis de acoplamento às RPAs e outras plataformas de voo, como câmeras RGB e multiespectrais, sensores LiDAR, entre outros, podem proporcionar resultados pertinentes na gestão e implementação em projetos de recuperação de áreas degradadas. Em solos que apresentam um estágio avançado de degradação, onde os processos erosivos promoveram alterações significativas da paisagem, o processamento das imagens obtidas por meio de RPAs pode fornecer informações atualizadas e de alta resolução, tais como a extensão e o volume da área impactada, o tipo de uso e ocupação do solo e informações para o entendimento da dinâmica de evolução das feições erosivas e da morfologia do terreno.

Para tanto, conforme Magalhães (2021), a tridimensionalidade de objetos, associada ao conceito de estereoscopia, é amplamente conhecida e estudada desde antes da invenção das primeiras câmeras fotográficas. Com o advento dos aviões e das câmeras fotogramétricas, esse princípio passou a ser aplicado em maiores proporções na restituição cartográfica, especialmente por meio de aerolevantamentos sistemáticos, ainda na primeira metade do século XX.

Ainda segundo Magalhães (2021), a percepção em relevo dos elementos da superfície terrestre possibilitou a realização de mapeamentos topográficos em escalas mais detalhadas, a partir da introdução de radares e satélites. Atualmente, novos métodos de coleta e processamento de dados são utilizados, destacando-se a modelagem tridimensional a partir de imagens obtidas por RPAs, por meio do método conhecido como *Structure from Motion* (SfM). Essa técnica permite a geração de modelos tridimensionais a partir de fotografias bidimensionais capturadas em diferentes posições, orientações e sobreposições, possibilitando que os algoritmos dos softwares especializados detectem automaticamente elementos correspondentes nas imagens. A partir disso, é gerada uma nuvem de pontos por meio de um processo de triangulação, representando com precisão a geometria da superfície mapeada.

No contexto da representação digital do relevo e da superfície terrestre por aerolevantamento por RPAs, segundo Ferreira (2025), distingue-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual constitui um modelo matemático que descreve a superfície terrestre, servindo de base para a derivação de dois outros modelos: o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDT representa o relevo real do terreno, excluindo elementos naturais e antrópicos como vegetação e edificações, enquanto o MDS inclui tais elementos, refletindo a superfície visível a

partir da elevação total registrada. O processamento e análise desses modelos são fundamentais para os estudos voltados à dinâmica do relevo e à mitigação de processos erosivos, por permitirem uma compreensão mais precisa da morfologia, o escoamento superficial e das interferências antrópicas na paisagem.

3 FRAGILIDADE AMBIENTAL DA REGIÃO IMEDIATA DE CIANORTE

Tendo em vista os objetivos propostos pela pesquisa, este capítulo apresenta os aspectos que compõem a primeira etapa da dissertação, voltada à análise em escala regional da fragilidade ambiental da Região Imediata de Cianorte (RIC). São abordadas a localização e a caracterização da área de estudo, descritos os materiais e métodos, bem como a metodologia aplicada, além da discussão e validação dos resultados obtidos, tanto em relação à fragilidade potencial quanto à fragilidade emergente, associada à ocorrência de feições erosivos na área de estudo.

3.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA ÁREA DE ESTUDO

A Região Imediata de Cianorte (RIC), que compõe o recorte espacial de análise da fragilidade ambiental, é resultado dos esforços históricos de regionalização e delimitação territorial propostos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com o objetivo de promover uma melhor compreensão e planejamento do território brasileiro a partir de um conhecimento sistematizado. Nesse contexto, a atual proposta de divisão regional foi publicada em 2017 pelo IBGE, considerando as transformações ocorridas na dinâmica econômica mundial e nacional, substituindo as antigas microrregiões e mesorregiões, definidas em 1990, por Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias (IBGE, 2017)

Essa mudança teve como propósito representar de forma mais precisa as interações e os fluxos existentes entre os municípios, tendo a rede urbana como principal elemento de referência, assim como os deslocamentos populacionais. As Regiões Geográficas Imediatas são formadas por agrupamentos de municípios com forte integração entre si, geralmente organizados em torno de um centro urbano que exerce papel de polarização regional, refletindo as conexões cotidianas da população, de deslocamentos para trabalho, estudo e acesso aos serviços de saúde e comércio. Já as Regiões Geográficas Intermediárias são compostas por conjuntos de Regiões Imediatas e têm como referência centros urbanos de maior porte, como capitais estaduais ou cidades com significativa influência regional, articulando-se em níveis mais amplos do território (IBGE, 2017).

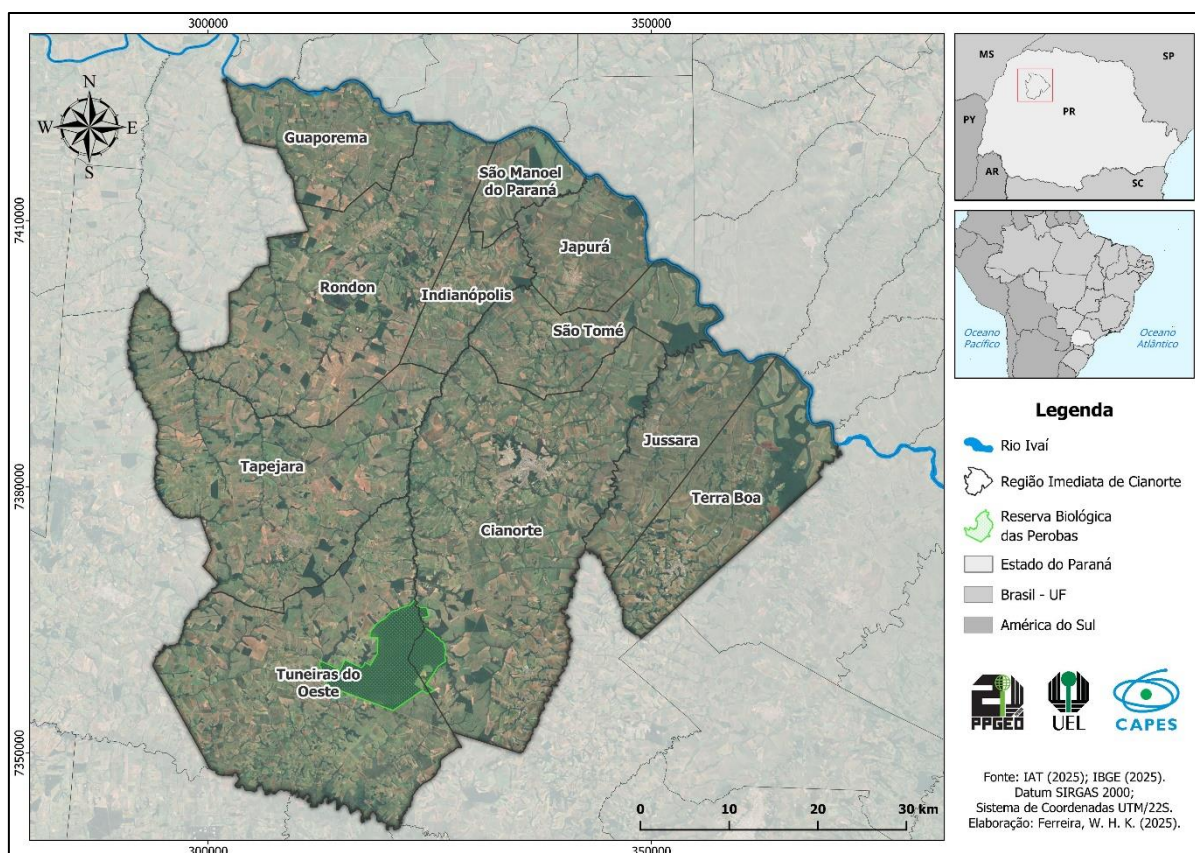
Diante do exposto, a Região Imediata de Cianorte (RIC) está localizada na porção Noroeste do estado do Paraná, situada no interflúvio entre os rios Ivaí (ao

norte) e do Rio Piquiri (ao sul), integrando a atual Região Intermediária de Maringá. A RIC é composta por um total de 11 municípios, abrangendo uma área de aproximadamente 3.996 km².

Na abrangência da área de estudo, entre os municípios de Tuneiras do Oeste e Cianorte, localiza-se a Reserva Biológica das Perobas, uma importante Unidade de Conservação (UC) criada em 2006 pelo Governo Federal, com área de 8.716 hectares. Como objetivos desta UC, destaca-se a proteção sobre os remanescentes de Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como floresta com araucária ou pinheiro-do-Paraná, abrigando exemplares de perobas com mais de 30 metros de altura, além de diversas espécies de aves e outros animais (Tuneiras do Oeste, 2025).

A localização da RIC e a distribuição dos municípios de sua abrangência podem ser visualizadas no mapa da Figura 1, enquanto o contingente populacional e alguns dados socioeconômicos de seus municípios são apresentadas na Tabela 1.

Figura 1 – Delimitação dos municípios da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Tabela 1 – Área, população e características dos municípios da RIC.

Município	Área (km ²)	População (2022)	População ocupada (2022) - %	PIB per capita (2021) – R\$
Cianorte	807,3	79.527	39,5	35.771,57
Guaporema	201,3	2.191	18,85	34.904,03
Indianópolis	123,76	4.448	33,16	113.474,61
Japurá	165,48	9.144	30,64	33.552,33
Jussara	207,85	6.690	44,16	57.314,41
Rondon	557,78	9.097	38,42	36.225,59
São Manoel do Paraná	94,41	2.138	28,81	28.799,62
São Tomé	218,13	5.232	20,78	28.293,49
Tapejara	591,67	15.869	35,43	30.138,80
Terra Boa	324,14	17.568	30,86	32.908,97
Tuneiras do Oeste	704,32	8.067	12,72	27.492,50
Total	3.996,14	159.971	Média 30,30	Média 41.715,99

Fonte: IBGE (2025).

Conforme os dados apresentados na Tabela 1, com base no Censo Demográfico de 2022, o município de Cianorte registra o maior contingente populacional, com 79.557 habitantes, seguido pelos municípios de Terra Boa, com 17.568 habitantes, e Tapejara, com 15.869 habitantes. Por outro lado, municípios como Guaporema, Indianópolis e São Manoel do Paraná apresentaram populações inferiores a 5.000 habitantes, totalizando, um contingente populacional de 159.971 habitantes na RIC no ano 2022.

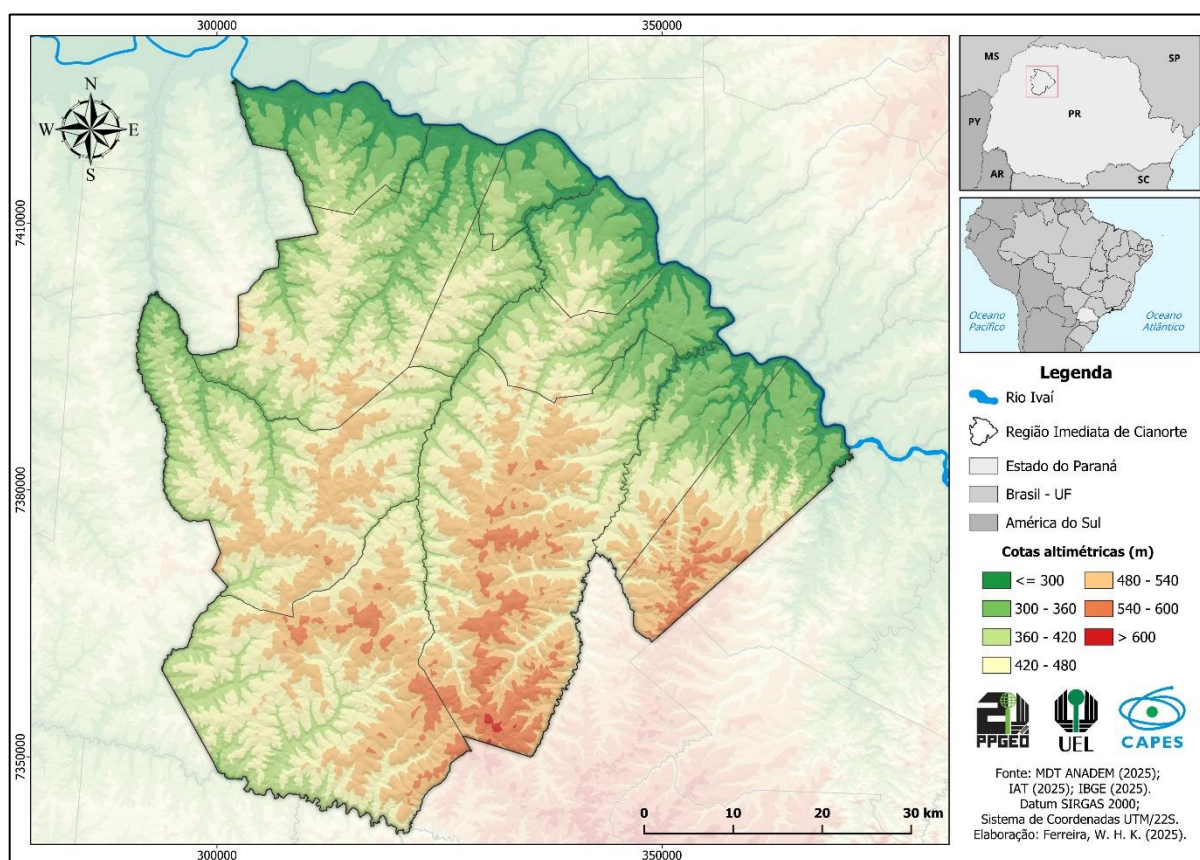
A média de população ocupada nos municípios da área de estudo foi de 30,30%, com destaque para o município de Jussara, que registrou 44,16% de ocupação. No que se refere ao Produto Interno Bruto (PIB) per capita, que representa a riqueza média por habitante, os municípios da RIC apresentaram uma média de R\$ 41.715,99, destacando-se o município de Indianópolis, com R\$ 113.476,61.

De acordo com Ferreira, Lohmann e Nabarro (2024), predominam na RIC atividades econômicas voltadas ao setor agrícola, com forte concentração de monoculturas, como a cana-de-açúcar, a soja e pastagens plantadas para a pecuária de corte. Além disso, a região abriga diversas usinas do setor sucroenergético, promovendo uma acentuada homogeneização econômica. No entanto, o município de Cianorte, por sua maior centralidade regional, destaca-se como um importante polo industrial e comercial, especialmente no setor de confecções de vestuário e calçados, além de uma maior oferta de bens e serviços (Cianorte, 2025).

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-NATURAL DA ÁREA DE ESTUDO

No que se refere às características físico-naturais da Região Imediata de Cianorte (RIC), essenciais para o entendimento da fragilidade, nos mapas das Figuras 2 a 7 são apresentados os aspectos altimétricos, geológicos, geomorfológicos, pedológicos, pluviométricos e fitogeográficos da área de estudo.

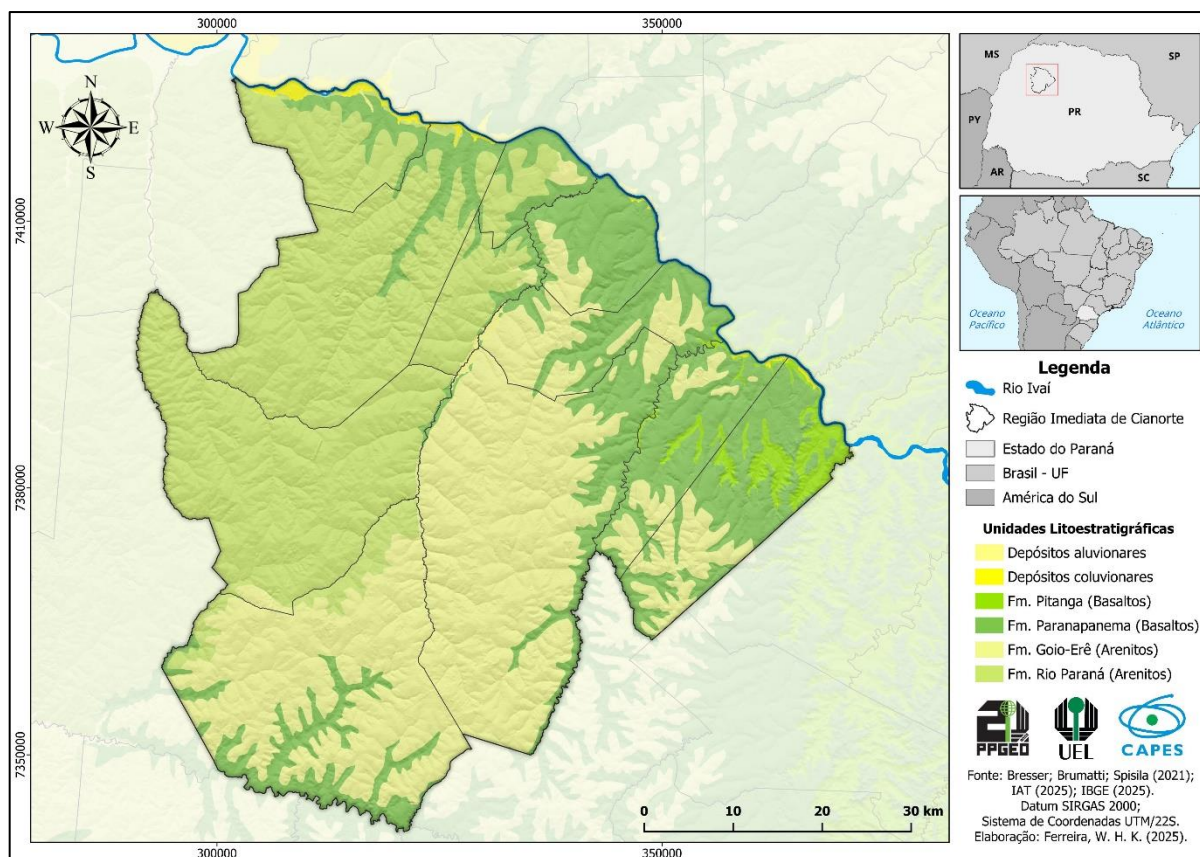
Figura 2 – Mapa de hipsometria da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Em relação à variação altimétrica da RIC, a menor cota identificada é de 241 m, situada na porção norte no vale do Rio Ivaí, enquanto a maior cota, de 619 m, ocorre na porção sudeste da área de estudo, próximo ao distrito de São Lourenço no município de Cianorte, resultando em um gradiente altimétrico de 378 m. Desse modo, as faixas de altitude mais representativas na região situam-se entre 420 a 480 m, seguida pela faixa de 480 a 540 m, concentrando-se nos divisores de água e nas cabeceiras de drenagem das bacias hidrográficas da região, correspondendo também aos locais históricos de ocupação e desenvolvimento dos núcleos urbanos.

Figura 3 – Mapa de unidades litoestratigráficas da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Referente aos aspectos geológicos da área de estudo, conforme mapa da Figura 3, a RIC desenvolve-se majoritariamente sobre as Formações Rio Paraná e Goio-Erê, pertencentes ao Grupo Caiuá, onde predominam rochas sedimentares areníticas, sobrepostas por rochas vulcânicas, principalmente basaltos.

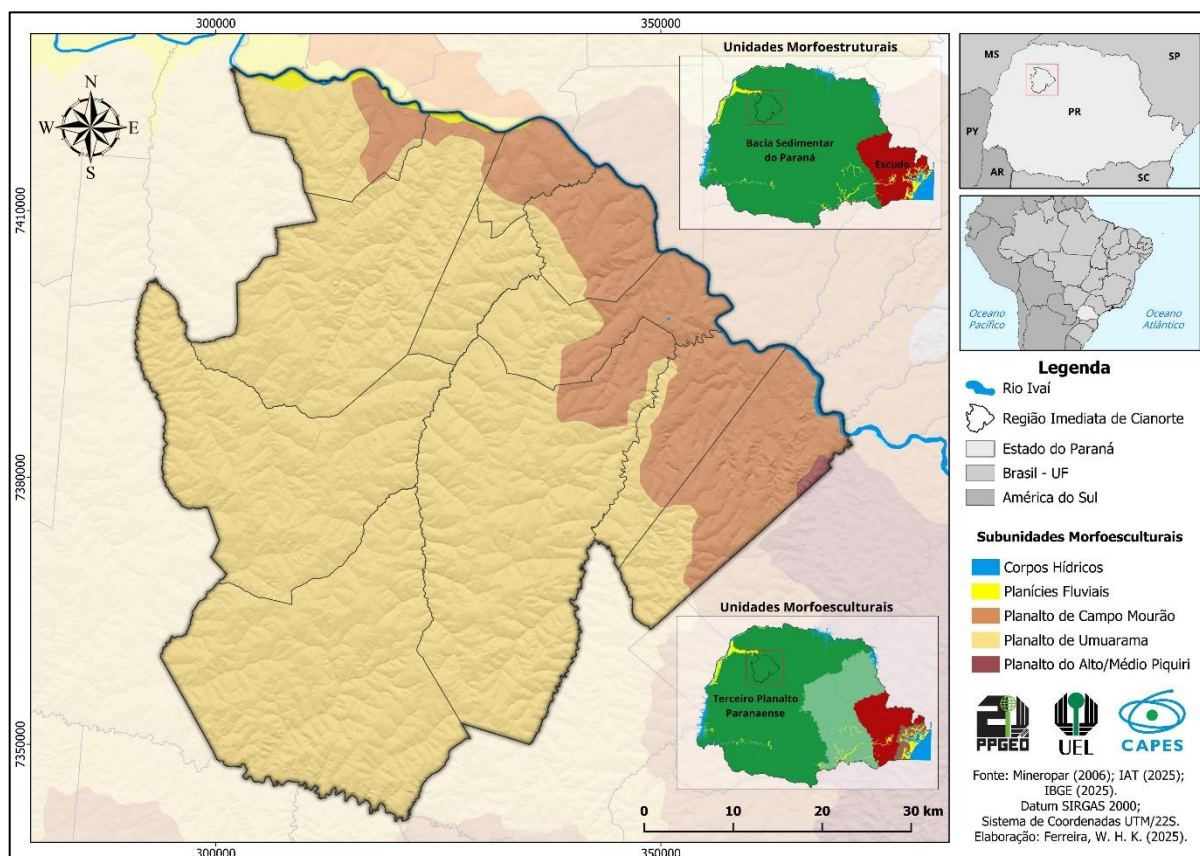
De acordo com Nóbrega *et al.* (2023), a Formação Rio Paraná é constituída por arenitos marrom-avermelhados a arroxeados, finos a médios, quartzosos e, secundariamente, subarcoseanos, apresentando estratificação cruzada de médio a grande porte. Já a Formação Goio-Erê é composta por arenitos marrom-avermelhados a cinza-arroxeados, finos a muito finos quartzosos e subarcoseanos, com estratificação cruzada de médio e pequeno porte. Ambas as formações são datadas do Cretáceo Inferior, com idades variando entre 100 e 145 milhões de anos (Ma).

Na porção oeste da RIC, bem como em alguns pontos ao norte no vale do Rio Ivaí e ao sul, no vale do Rio Piquiri, ocorrem as Formações Pitanga e Paranapanema, do Grupo Serra Geral. Tais formações são caracterizadas por extensos derrames de

rochas ígneas, sobretudo basaltos e andesitos (Besser; Brumatti; Spisila, 2021).

Além dessas unidades litoestratigráficas, na abrangência da RIC também se desenvolvem depósitos coluvionares de sedimentos cenozóicos, compostos por areias feldspáticas, lamas e cascalhos, com morfologia total ou parcialmente preservada de leques e cones aluviais, associados a fluxos de lama, detritos e fluxos trativos fluviais, especialmente ao longo do vale do Rio Ivaí. Também estão presentes depósitos aluvionares de sedimentos areno-argilosos inconsolidados, finos a médios, relacionados a planícies de inundação, margens, barras de canal e canais fluviais atuais, tanto ao longo do Rio Ivaí quanto no percurso do Rio Ligeiro, entre os municípios de Indianópolis, São Tomé e Cianorte (Besser; Brumatti; Spisla, 2021).

Figura 4 – Mapa geomorfológico da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Em relação aos aspectos geomorfológicos da RIC, conforme pode ser visualizado pelo mapa da Figura 4 e considerando o levantamento Geomorfológico do estado do Paraná (Mineropar, 2006), a área de estudo está inserida na grande unidade estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, que possui área superior de

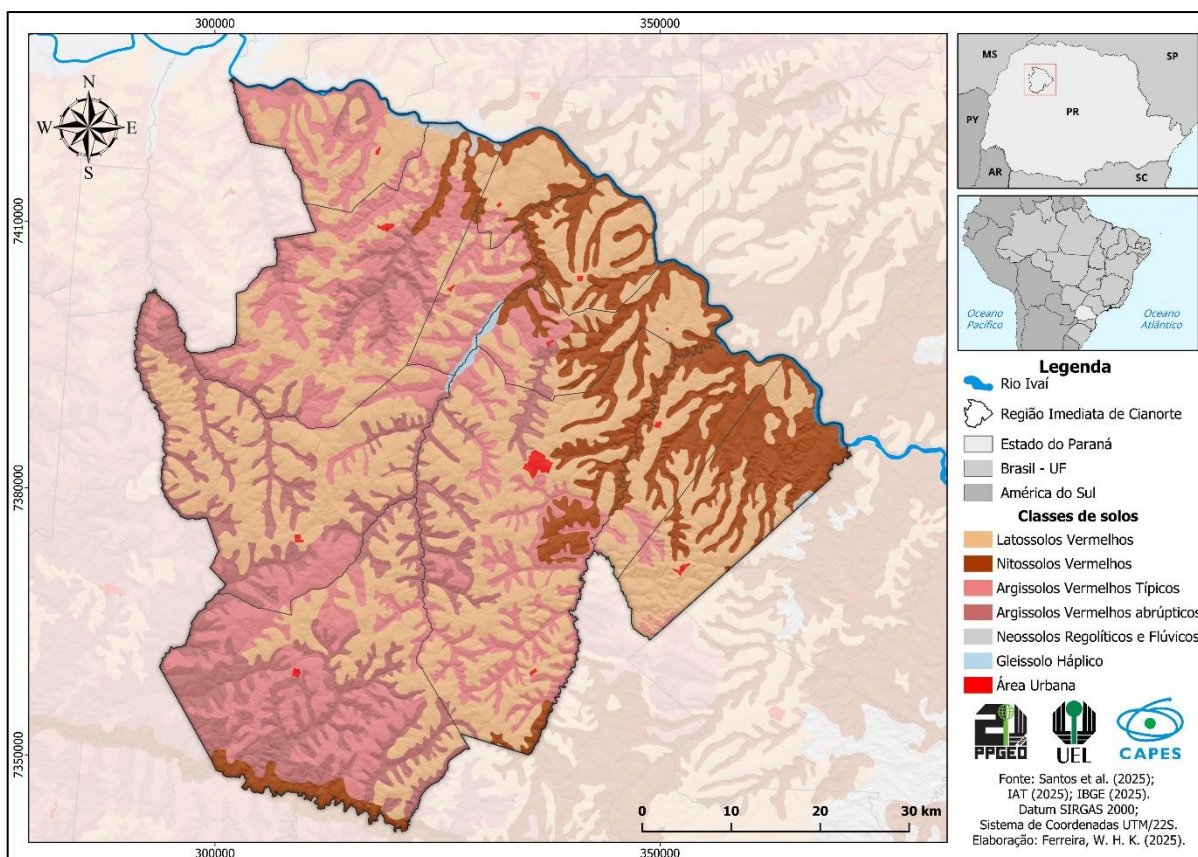
1.600.000 km², abrangendo os estados de Minas Gerais, Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, além de partes da Argentina, Paraguai e Uruguai. A bacia sedimentar em geral é constituída por rochas cristalinas, preenchida por depósitos marinhos e continentais, formados durante o Período Devoniano, há cerca de 400 Ma.

Sobre a Bacia Sedimentar do Paraná (unidade morfoestrutural), distinguem-se três grandes unidades morfoesculturais: o Primeiro, Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses, sendo que a RIC está situada sobre o Terceiro Planalto Paranaense. Essa unidade ocupa mais de 60% do território do Paraná, caracterizando-se por extensos derrames de rochas eruptivas básicas, além da presença de rochas sedimentares de origem continental (Mineropar, 2006).

Dentro do Terceiro Planalto, a maior parte da RIC está inserida na subunidade morfoescultural do Planalto de Umuarama, caracterizado por relevos planos a suavemente ondulados, com declividades predominantes inferiores a 6% e altitudes variando entre 380 e 500 m. Suas formas predominantes incluem topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, desenvolvidos sobre rochas areníticas das Formações Rio Paraná e Goio-Erê, pertencentes ao Grupo Caiuá. Já porção oeste da RIC encontra-se sob a influência da subunidade morfoescultural do Planalto de Campo Mourão, marcada por baixa dissecação e declividades também inferiores a 6%, com altitudes entre 260 e 520 m. Nessa área predominam topos aplainados, vertentes retilíneas e côncavas na base, bem como vales em calha, modelados em rochas basálticas do Grupo Serra Geral (Mineropar, 2006).

Além disso, a área de estudo compreende trechos da subunidade morfoescultural das Planícies Fluviais, localizadas ao longo do vale do Rio Ivaí, onde ocorrem sedimentos inconsolidados do Período Quaternário, relacionados a depósitos aluvionares e coluvionares. Por fim, uma pequena porção da RIC, situada no município de Terra Boa, está inserida na subunidade do Planalto do Alto/Médio Piquiri, caracterizada por dissecação média, relevos ondulados com declividades de até 12%, e altitudes variando entre 280 e 540 m. Suas formas predominantes incluem topos alongados e isolados, vertentes convexas e convexo-côncavas, e vales em “V”, modelados em rochas basálticas das formações do Grupo Serra Geral, datadas do Período Jurássico (Mineropar, 2006).

Figura 5 – Mapa pedológico da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Quanto às características pedológicas da RIC, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2025), a classe de solo de maior relevância na área de estudo são os Latossolos Vermelhos. Esses solos são caracterizados pela presença do horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico (Bw), formados em estágio avançado de intemperismo, por meio dos processos pedogenéticos de dessilicação e ferralitização. De uma maneira geral, os Latossolos ocorrem em relevos planos a suavemente ondulados, situando-se em topos de encostas e se estendendo até os setores de média vertente. Além disso, os Latossolos são considerados os solos de maior ocorrência tanto no estado do Paraná quanto no Brasil, abrangendo cerca de 32% do território nacional (Pinheiro Junior *et al.*, 2020).

Na sequência, os Argissolos Vermelhos típicos e abruptos representam a segunda classe de solos de maior expressão na RIC, assim como no território nacional, onde ocupam área de cerca de 24%. Os Argissolos são caracterizados pela presença de um horizonte subsuperficial de acúmulo de argila (Bt), precedido por um horizonte de eluviação (E). Essa configuração resulta do processo de argiluviação,

que consiste na translocação de partículas finas de argila em suspensão das camadas superficiais para camadas mais profundas do perfil do solo. Essa dinâmica pedogenética gera diferenciações texturais marcantes entre o conteúdo de argila do horizonte B textural e o dos horizontes A ou E, sendo os Argissolos comumente encontrados em áreas de relevo mais ondulado. Nos Argissolos Abrúpticos, essa mudança de textura entre os horizontes é ainda mais acentuada, influenciando diretamente na suscetibilidade aos processos erosivos (Pinheiro Junior *et al.*, 2020).

Por sua vez, os Nitossolos Vermelhos também ocupam uma área significativa na RIC, especialmente na porção oeste da área de estudo, assim como em trechos dos vales do Rio Ivaí (ao norte) e do Rio Goio-erê (ao sul), no município de Tuneiras do Oeste, sob a abrangência dos basaltos das formações Pitanga e Paranapanema do Grupo Serra Geral, principalmente em áreas de relevo mais acidentado. Os Nitossolos são reconhecidos pela presença do horizonte B nítico (Bt), sendo caracterizados como solos profundos e bem drenados, com textura argilosa ou muito argilosa desde a superfície, estrutura bem desenvolvida em blocos ou prismas, e expressiva cerosidade, decorrente do recobrimento dos agregados por argila translocada na subsuperfície (Pinheiro Junior *et al.*, 2020).

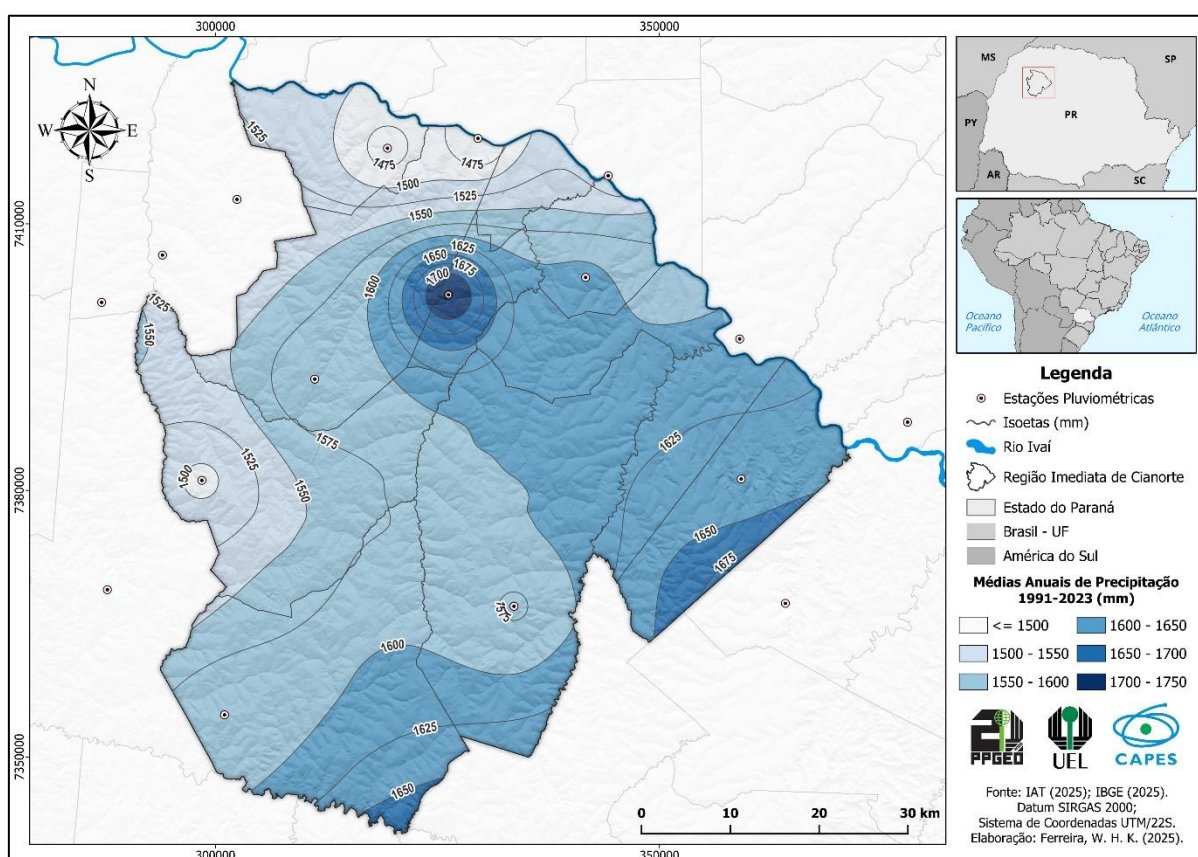
Por fim, na RIC ainda são encontrados Neossolos Regolíticos e Flúvicos próximos ao vale do Rio Ivaí, os quais apresentam pequeno grau de desenvolvimento pedogenético em relação ao material de origem no qual se formaram. Esses solos geralmente apresentam uma sequência de horizonte A diretamente sobre rocha pouco alterada, rocha sã ou sedimentos diversos, com ausência ou reduzida espessura do horizonte B, quando este se faz presente (Santos *et al.*, 2025).

Além disso, identifica-se a presença da classe de Gleissolos Háplicos em um trecho ao longo do percurso do Rio Ligeiro, entre os municípios de Indianópolis, São Tomé e Cianorte. Esses solos são formados a partir do processo pedogenético de gleização, caracterizado pela redução e remoção do ferro sob condições de saturação hídrica, promovidas pela atividade de micro-organismos em ambientes anaeróbicos (Pinheiro Junior *et al.*, 2020).

No que refere às características climáticas da RIC, com base no Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche *et al.*, 2019) e na classificação climática de Köppen, o tipo de clima predominante na área de estudo é o Cfa. Segundo essa classificação, trata-se de um clima temperado chuvoso e moderadamente quente, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e verões quentes. A temperatura média do mês mais frio

é inferior a 18 °C, enquanto a do mês mais quente ultrapassa 22 °C. A maior concentração de chuvas ocorre durante o verão, sem definição de uma estação seca, e com ocorrência pouco frequente de geadas (Mendonça; Danni-Oliveira, 2007). Se tratando de características de precipitação, o mapa da Figura 6 apresenta a espacialização das médias anuais de pluviosidade da RIC entre os anos de 1991 e 2023, enquanto o Quadro 1 apresenta as médias mensais e as estações pluviométricas utilizadas de referência.

Figura 6 – Mapa de precipitação na Região Imediata de Cianorte /PR (1991-2023).



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Em relação às médias de precipitação nos municípios da RIC, no período de 1991 a 2023, a menor média anual foi registrada na estação de Porto Paraíso do Norte, localizada no município de Rondon, com 1.455,22 mm. Por outro lado, a maior média anual foi observada na estação de Saltinho, no município de Engenheiro Beltrão, com 1.731,93 mm, embora essa estação extrapole os limites da área de abrangência da RIC.

Quadro 1 – Estações pluviométricas e médias mensais de precipitação na Região Imediata de Cianorte/PR (1991-2023).

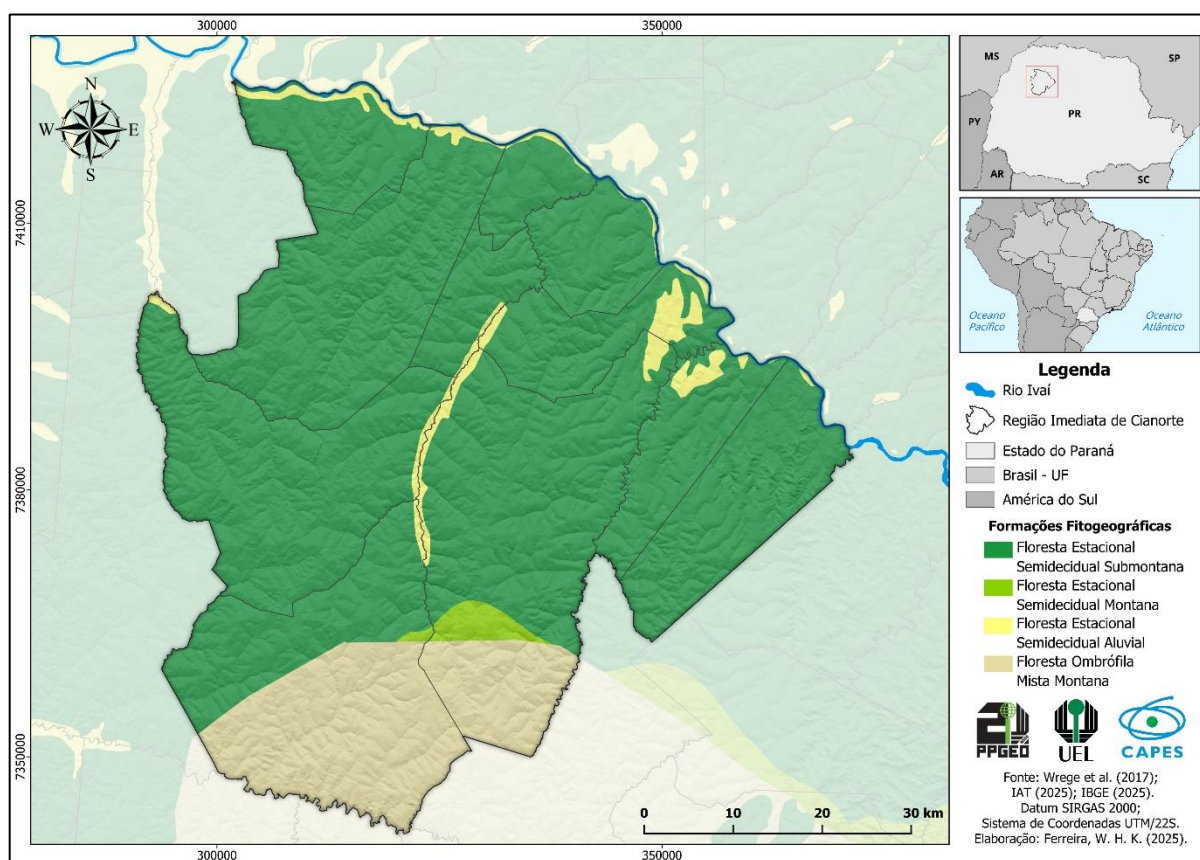
Município	Estação	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total	X	Y
Cianorte	Igarité	205,18	153,44	131,60	102,44	122,89	102,89	72,74	68,84	111,16	187,21	143,60	171,44	1.573,42	333624,7	7366958,9
Cidade Gaúcha	Cidade Gaúcha	213,62	179,40	131,98	100,62	111,35	90,04	64,62	64,82	104,99	174,70	132,08	162,18	1.530,41	302430,6	7412747,1
Cidade Gaúcha	Santa Mônica	185,22	168,87	121,39	88,19	125,74	90,83	66,00	55,92	106,56	165,26	129,08	161,95	1.465,00	294031,3	7406484,2
Cruzeiro do Oeste	Cruzeiro do Oeste	168,85	139,26	112,62	99,05	130,48	103,82	67,86	68,97	120,31	172,77	145,10	171,39	1.500,47	287823,4	7368818,8
Engenheiro Beltrão	Saltinho* (2016)	232,79	196,28	159,57	112,13	130,58	117,98	89,58	54,43	134,90	173,95	145,90	183,84	1.731,93	364191,9	7367278,3
Farol	Farol	198,92	156,89	128,41	112,25	141,68	130,53	83,76	77,38	130,56	213,39	146,42	188,40	1.708,58	335186,6	7334790,7
Guaporema	Guaporema* (2012)	238,42	165,76	106,60	95,99	110,59	86,12	61,87	52,20	111,76	165,27	120,76	152,14	1.467,47	319373,4	7418502,2
Indianópolis	Indianópolis* (2015)	253,29	182,69	141,92	107,02	126,98	120,50	90,50	66,27	131,85	164,07	165,32	175,15	1.725,56	326246,7	7402004,6
Ivatuba	Sítio Floresta	190,17	201,51	143,82	98,43	125,05	105,35	72,81	67,14	118,63	163,45	162,05	198,19	1.646,61	377949,3	7387676,4
Janiópolis	Janiópolis	192,34	166,88	146,97	112,77	141,76	121,49	81,45	80,90	130,61	212,00	145,16	181,55	1.713,88	320473,6	7329883,3
Japurá	Japurá	219,61	186,23	136,48	97,31	118,67	102,12	69,38	68,78	112,38	187,96	141,60	167,11	1.607,64	341691,7	7403962,3
Nova Olímpia	Nova Olímpia	217,33	168,53	143,29	101,88	123,06	94,98	64,63	66,68	109,83	199,03	132,09	174,99	1.596,32	287178,4	7401157,8
Rondon	Bernadelli* (2011)	211,88	187,40	99,43	103,25	123,30	87,60	79,23	81,12	114,23	178,53	157,37	174,27	1.597,59	311187,4	7392525,4
Rondon	Porto Paraíso do Norte	210,90	152,27	120,59	96,71	114,98	88,48	66,94	64,25	98,52	169,39	119,69	152,51	1.455,22	329567,6	7419608,9
São Carlos do Ivaí	Porto São Carlos* (2010)	212,05	177,29	109,04	93,91	115,82	87,03	58,43	59,76	124,58	156,94	132,17	187,13	1.514,12	344237,2	7415407,3
São Jorge do Ivaí	Copacabana do Norte	209,14	176,70	152,50	103,47	118,61	100,50	70,69	63,72	110,80	172,14	148,72	173,01	1.600,00	359043,5	7397040,7
Tapejara	Ouro Verde	190,27	156,40	119,21	92,94	121,82	99,30	65,85	64,04	103,25	181,68	135,50	166,10	1.496,34	298469,4	7381123,1
Terra Boa	Malu* (2021)	220,24	197,72	147,79	86,78	131,37	105,10	70,84	65,75	117,20	171,36	147,01	181,29	1.642,45	359216,0	7381283,9
Tuneiras do Oeste	Canaã	179,31	152,13	121,91	107,07	135,63	108,09	75,93	70,50	118,77	192,46	141,18	187,47	1.590,45	301016,2	7354727,1

* Estações com ausência de dados de precipitação no período total de análise.

Fonte: IAT (2025); Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Considerando apenas as estações localizadas dentro da área de estudo, a maior média anual foi identificada na estação do município de Indianópolis, com 1.725,56 mm, o que representa uma variação de aproximadamente 270 mm em relação à menor média registrada. Os menores valores mensais de precipitação ocorrem, de forma geral, entre os meses de junho a agosto, enquanto os maiores índices pluviométricos concentram-se entre dezembro e fevereiro.

Figura 7 – Mapa fitogeográfico da Região Imediata de Cianorte/PR.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

No que refere às características fitogeográficas da área de estudo, de acordo com (Wrege *et al.*, 2017), atualmente, no estado do Paraná, as principais fitofisionomias se dividem em Floresta Ombrófila Mista (FOM), Floresta Ombrófila Densa (FOD) e Floresta Estacional Semidecidual (FES), todas predominantemente sobre o domínio da Mata Atlântica, podendo ser subdivididas em formações. Dessa maneira, conforme o mapa da Figura 7, na RIC são identificadas as seguintes formações: Floresta Estacional Semidecidual Montana, Submontana e Aluvial e Floresta Ombrófila Mista Montana.

As formações derivadas da Floresta Estacional Semidecidual (FES), ocorrem em regiões de clima mais quente e altitudes mais baixas, geralmente abaixo de 500 metros, com baixo risco de geadas e chuvas abundantes no verão, embora apresentem períodos de estiagem durante o inverno. Essa sazonalidade no regime de chuvas provoca a perda de cerca de 20% a 50% das folhas na estação mais seca, tendo como uma de suas principais espécies, a peroba-rosa ou peroba-comum (*Aspidosperma polyneuron*) (Wrege *et al.*, 2017).

Por sua vez, as formações associadas à Floresta Ombrófila Mista (FOM), também conhecida como Floresta com Araucária, são definidas principalmente pela presença natural do pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*), ocorrendo em regiões de clima pluvial subtropical, entre faixas altimétricas de 500 a 1.200 m (Wrege *et al.*, 2017). Logo, a Floresta Ombrófila Mista Montana, encontra-se, na RIC, nas áreas mais elevadas da porção sudoeste da área de estudo.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o tratamento dos dados e elaboração dos mapas temáticos relacionados à análise da fragilidade ambiental da RIC, foram utilizados os softwares QGIS 3.34.11 e ArcGIS 10.5.2 (aplicativo ArcMap), além das plataformas do *Google Earth Engine* e o *Google Earth Pro*, com estruturas matriciais e vetoriais derivadas de banco de dados públicos, contendo informações de municípios, dados altimétricos, tipos de solo, geologia, geomorfologia, hidrografia, clima, precipitação e de uso e cobertura do solo da área de estudo.

Para tanto, foram adquiridas base cartográficas contendo a delimitação dos municípios do estado do Paraná para o ano de 2024, na escala 1:50.000, disponibilizados pelo Instituto Água e Terra (IAT, 2025). Esses dados foram organizados para delimitar a Região Imediata de Cianorte (RIC), tendo como referência a proposta de divisão regional vigente do Brasil, de regiões geográficas imediatas e intermediárias, divulgada pelo IBGE (2017).

Para obtenção dos dados altimétricos, optou-se pela utilização do ANADEM versão 1.0, um Modelo Digital do Terreno (MDT) derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus GLO-30, com correção do viés causado pela vegetação. O ANADEM foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

O ANADEM apresenta uma resolução espacial de 30 metros e foi calibrado para aprimorar sua precisão na América do Sul, utilizando aprendizado de máquina e informações multiespectrais dos satélites Landsat e Sentinel, além de perfis de elevação do GEDI (Laipelt *et al.*, 2024). O download do ANADEM é realizado por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), através do AssetID: *projects/et-brasil/assets/anadem/v1*.

Os dados referentes aos tipos de solos foram obtidos a partir do arquivo vetorial produzido no ano de 2020 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), disponível na Plataforma GeoInfo, bem como os dados de caracterização do mapa fitogeográfico (IAT, 2025). Já os dados geológicos foram adquiridos por meio do Repositório Institucional de Geociências do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, na escala 1:600.000 (Besser; Brumatti; Spisila, 2021), enquanto os dados geomorfológicos são relativos ao levantamento morfoestrutural-morfoescultural do estado do Paraná na escala 1:250.000, realizado pela Mineropar (2006).

Em relação aos dados climáticos da área de estudo, adotou-se a classificação climática desenvolvida por Köppen, amplamente reconhecida e utilizada na literatura. Essa classificação baseia-se na correlação entre os elementos climáticos e a vegetação natural, sendo expressa por letras correspondentes a determinados climas. As informações referentes a essa classificação foram obtidas no Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche *et al.*, 2019). Para a análise da precipitação na RIC, foram utilizados dados provenientes de 19 estações pluviométricas, abrangendo os relatórios de totais mensais de precipitação no período de 1991 a 2023, disponibilizados pelo Sistema de Informações Hidrológicas do Paraná (IAT, 2025).

Para os dados de uso e ocupação do solo da área de estudo, foram utilizados dados disponibilizados pelo Projeto MapBiomas coleção 9.0, com abrangência de todo o território do estado do Paraná e em formato matricial (*raster*), por intermédio da plataforma *Google Earth Engine*. Todos os mapas anuais de cobertura e uso do solo do MapBiomas são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, apresentando resolução espacial de 30 metros e com uma série temporal de mais de 30 anos. O processo é feito com algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) e o classificador *Random Florest* através da plataforma do *Google Earth Engine* (MapBiomas, 2025).

3.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a avaliação da fragilidade ambiental da Região Imediata de Cianorte (RIC), foi aplicada uma adaptação da metodologia proposta por Ross (1994, 2012). Conforme o modelo, inicialmente são categorizadas as variáveis intrínsecas do meio físico para a elaboração do mapa de Fragilidade Potencial, que na sequência são integradas com as informações de uso e ocupação do solo para a elaboração do mapa de Fragilidade Emergente, que por sua vez ilustra o grau de transformação do ambiente pelas atividades antrópicas.

O modelo de fragilidade ambiental desenvolvido por Ross (1994, 2012) e adaptado neste estudo, propõe a hierarquização das variáveis do meio físico em cinco classes, de acordo com seus níveis de fragilidade e graus de proteção. Assim, as variáveis mais estáveis recebem valores próximos de 1, as intermediárias em torno de 3 e as mais frágeis se aproximam do valor 5. As variáveis empregadas para a análise da fragilidade ambiental na área de estudo foram: I) declividade; II) unidades litoestratigráficas; III) tipos de solos; IV) formas de vertente; V) uso e cobertura do solo.

Em relação aos dados de fragilidade de declividade, que segundo Silveira *et al.* (2014), correspondem à inclinação do terreno em relação ao plano horizontal, expressa como a variação de elevação ao longo de determinada distância, é um importante atributo topográfico na identificação de processos erosivos e de movimentação de massa. Esses dados foram processados a partir do MDT do ANADEM v1.0, no software QGIS, utilizando-se a ferramenta “Declividade”, com os valores expressos em porcentagem, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Graus de fragilidade e classes de declividade.

Valor	Graus de Fragilidade	Classes de Declividade
1	Muito baixa	0 a 6%
2	Baixa	6 a 12%
3	Média	12 a 20%
4	Alta	20 a 30%
5	Muito Alta	> 30%

Fonte: Ross (1994, 2012). Org. Ferreira, W. H. K. (2025).

No que se refere aos dados geológicos para a análise da fragilidade ambiental da RIC, de acordo com Crepani *et al.* (2001), a ponderação das unidades geológicas deve considerar aspectos como a história evolutiva do ambiente geológico e o grau

de coesão das rochas, ou seja, a intensidade das ligações entre os minerais ou partículas que as compõem. Assim, a relação da fragilidade ambiental aos diferentes tipos de rocha e litologias é apresentada pela Tabela 3.

Tabela 3 – Graus de fragilidade e tipos de rochas.

Valor	Graus de Fragilidade	Tipos de rochas	Litologias
1	Muito baixa	Metamórficas	Quartzitos ou metaquartzitos.
		Ígneas	Riolito, Granito e Dacito.
		Ígneas intrusivas	Granodiorito e Granulitos.
		Metamórficas	Migmatitos e Gnaisses.
2	Baixa	Ígneas	Andesito, Diorito e Basalto.
		Ígneas intrusivas	Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito, Anortosito, Gabro e Peridotito.
		Metamórficas	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita-xisto e Clorita xisto.
3	Média	Ígneas	Homblenda, Tremolita e Actinolita xisto.
		Ígneas e Metamórficas	Piroxenito, Anfíbolito Kimberlito e Dunito.
		Metamórficas	Estaurolita xisto, xistos granatíferos, Filito, Metassiltito, Ardósia e Metargilito.
4	Alta	Metamórficas	Mármore
		Sedimentares	Arenitos quartzosos ou Ortoquartzitos, Conglomerados, Subgrauvacas, Grauvacas e Arcózios.
5	Muito Alta	Sedimentares	Siltitos, Argilitos, Folhelhos, Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos e Sedimentos Inconsolidados: Aluviões e Colúvios.

Fonte: Crepani *et al.* (2001); Dors *et al.* (2021) ; **Org.** Ferreira, W. H. K. (2025).

Para o mapeamento dos tipos de solos da Região Imediata de Cianorte, foi realizada a conversão da camada base produzida pela EMBRAPA no ano de 2020, originalmente no formato vetorial (*shapefile*), para o formato matricial (*raster*), necessária para integração com as demais variáveis de fragilidade ambiental na área de estudo no ambiente do software QGIS.

Após a conversão da camada, os tipos solos classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2025), foram agrupados e categorizados conforme os graus de fragilidade, tendo como base as adaptações metodológicas apresentadas por Storto e Cocato (2018). Esse reagrupamento foi realizado por meio da ferramenta “Reclassificar por tabela” do QGIS. A relação entre os tipos de solos e graus de fragilidade é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Graus de fragilidade e tipos de solos.

Valor	Graus de Fragilidade	Tipos de Solos - SiBCS
1	Muito baixa	Latossolos de textura argilosa ou muito argilosa.
2	Baixa	Latossolos de textura média.
3	Média	Nitossolos.
4	Alta	Argissolos não abrupticos e Cambissolos Alumínicos.
5	Muito Alta	Argissolos abrupticos, Cambissolos Flúvicos, Chernossolos, Gleissolos, Luvisolos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos e Neossolos Regolíticos.

Fonte: Storto e Cocato (2018); **Org.** Ferreira, W. H. K. (2025).

Na sequência, o mapeamento das formas de vertente da área de estudo consiste em um produto síntese obtido a partir da associação entre a curvatura vertical e a curvatura horizontal do relevo. Essa integração permite a análise das vertentes como geometrias tridimensionais, possibilitando sua relação com os processos de concentração, distribuição e escoamento da água, fatores que influenciam diretamente a dinâmica dos processos erosivos do solo (Silva Neto, 2013).

Em vista disso, a curvatura vertical, ou perfil de curvatura, refere-se à forma da vertente observada em perfil, podendo ser classificada como convexa, côncava ou retilínea. De acordo com Capoane *et al.* (2015), esse parâmetro exerce influência direta na aceleração ou desaceleração do fluxo superficial da água ao longo das encostas, contribuindo tanto para processos denudacionais quanto para processos agradacionais. Por sua vez, a curvatura horizontal, ou plano de curvatura, expressa o comportamento da vertente em projeção horizontal, relacionada à variação da orientação do relevo ao longo de uma determinada distância. Conforme Valeriano (2008), a curvatura horizontal condiciona o caráter convergente ou divergente dos fluxos de água e de material tanto em superfície e quanto subsuperfície.

Inicialmente, adotaram-se como referência para a definição da curvatura horizontal os limites (*thresholds*) de valores inferiores a $-0,02$ para planos convergentes, entre $-0,02$ e $0,02$ para vertentes planares e superiores a $0,02$ para planos divergentes, conforme Silveira *et al.* (2014), em estudo voltado ao mapeamento da suscetibilidade natural a movimentos de massa na Serra do Mar paranaense, um ambiente de alta energia. Entretanto, MacMillan e Shary (2009) destacam que não existem valores universais, cujo os limites de curvatura devem ser ajustados de acordo com a resolução espacial do modelo de elevação de referências e com os processos geomorfológicos estudados.

Diante disso, optou-se por adotar, para ambas as curvaturas, o intervalo de $-0,05$ a $0,05$ para a classificação das vertentes retilíneas ou de comportamento planar. A definição desses limites resultou de sucessivos testes exploratórios, realizados com o objetivo de identificar valores mais compatíveis com a realidade topográfica da área de estudo. As curvaturas foram processadas a partir do MDT ANADEM, utilizando o software *ArcMap* e a ferramenta “*Curvature*”. Essa escolha permitiu a redução de ruídos nos dados, ao mesmo tempo em que manteve a sensibilidade necessária para a identificação de setores de convergência e divergência de fluxo, tendo como referência estudos de mapeamento digital de solos e análise da fragilidade ambiental (Valeriano, 2008; Chagas *et al.*, 2010). Os parâmetros de curvaturas adotados nesse procedimento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Classes e fragilidade de perfil (vertical) e plano (horizontal) de curvatura.

Valor	Graus de Fragilidade	Classes de Perfil de Curvatura (Vertical)
2	Baixa	$> 0,05$ (Convexa)
3	Média	$-0,05$ a $0,05$ (Retilínea)
5	Muito Alta	$< -0,05$ (Côncava)
Valor	Graus de Fragilidade	Classes de Plano de Curvatura (Horizontal)
2	Baixa	$-0,05$ a $0,05$ (Planar)
3	Média	$> 0,05$ (Divergente)
5	Muito Alta	$< -0,05$ (Convergente)

Fonte: Valeriano (2008); Chagas *et al.*, (2010); Capoane *et al.* (2015). Org. Ferreira, W. H. K. (2025).

A partir dos dados processados de perfil e plano de curvatura da área de estudo, foi possível estabelecer nove classes distintas de formas do terreno, as quais refletem as dinâmicas de transporte de sedimentos ao longo das vertentes. Para tanto, utilizou-se a ferramenta “Calculadora *Raster*” no ambiente do software QGIS, permitindo a sobreposição das camadas de curvaturas com os seus valores de referência, conforme a expressão:

```

if("Perfil_Curvatura" > 0.05 AND "Plano_Curvatura" < -0.05, 1, -- Convexa +
Convergente
  if("Perfil_Curvatura" > 0.05 AND "Plano_Curvatura" >= -0.05 AND "Plano_Curvatura"
<= 0.05, 2, -- Convexa + Planar
    if("Perfil_Curvatura" < -0.05 AND "Plano_Curvatura" > 0.05, 3, -- Convexa + Divergente

      if("Perfil_Curvatura" >= -0.05 AND "Perfil_Curvatura" <= 0.05 AND "Plano_Curvatura"
< -0.05, 4, -- Retilínea + Convergente
        if("Perfil_Curvatura" >= -0.05 AND "Perfil_Curvatura" <= 0.05 AND "Plano_Curvatura"
>= -0.05 AND "Plano_Curvatura" <= 0.05, 5, -- Retilínea + Planar

```

```

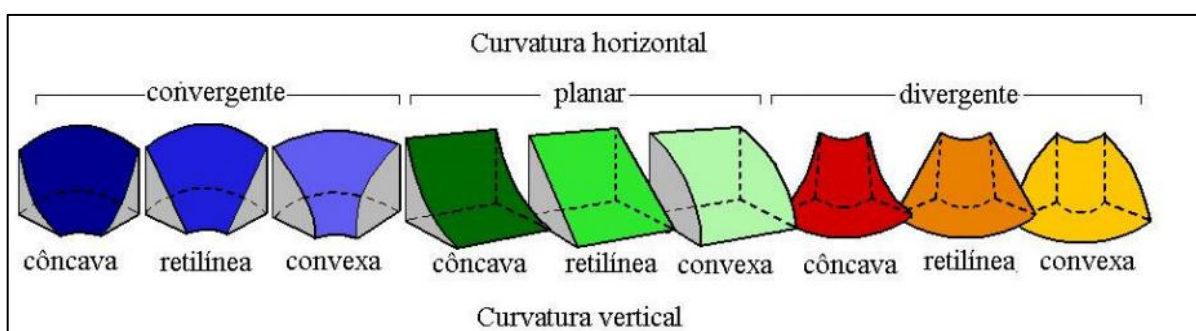
if("Perfil_Curvatura" >= -0.05 AND "Perfil_Curvatura" <= 0.05 AND "Plano_Curvatura"
> 0.05, 6, -- Retilínea + Divergente

if("Perfil_Curvatura" < -0.05 AND "Plano_Curvatura" < -0.05, 7, -- Côncava +
Convergente
if("Perfil_Curvatura" < -0.05 AND "Plano_Curvatura" >= -0.05 AND "Plano_Curvatura"
<= 0.05, 8, -- Côncava + Planar
if("Perfil_Curvatura" < -0.05 AND "Plano_Curvatura" > 0.05, 9, -- Côncava +
Divergente
0)))))))))

```

O procedimento resultou em um novo *raster* categorizado em 9 formas elementares, cada uma representando uma combinação específica entre as curvaturas verticais (perfil) e horizontais (plano) das vertentes (Figura 8), com impactos no potencial erosivo. Já correspondência entre as formas de vertente e seus respectivos graus de fragilidade ambiental, é apresentada na Tabela 6.

Figura 8 – Morfologia de classes e subclasse de vertentes.



Fonte: Valeriano (2008).

Tabela 6 – Graus de fragilidade e classes de formas de vertente

Valor	Graus de Fragilidade	Formas de vertentes
1	Muito baixa	Convexo-Divergente
2	Baixa	Côncavo-Divergente Convexo-Planar
3	Média	Retilíneo-Planar Retilíneo-Divergente Côncavo-Planar
4	Alta	Convexo-Convergente
5	Muito Alta	Retilíneo-Convergente Côncavo-Convergente

Fonte: Molinari Júnior (2024). Org. Ferreira, W. H. K. (2025).

Diante do exposto, o mapa de Fragilidade Potencial da Região Imediata de Cianorte (RIC), foi elaborado com base na combinação das variáveis de declividade,

unidades litoestratigráficas, tipos de solos e formas de vertentes. Vale destacar, em razão da baixa variabilidade espacial dos dados de precipitação identificados para a área de estudo, que resultaria na classificação em única classe de fragilidade, optou-se por não incluir essa variável ao modelo final.

Nesse sentido, todas as variáveis foram categorizadas de acordo com os graus de fragilidade ambiental, variando de 1 (Muito Baixa) a 5 (Muito Alta), utilizando-se a ferramenta “Reclassificar por tabela” no software QGIS. Após a classificação das variáveis, utilizou-se a “Calculadora *Raster*” para realizar a sobreposição das camadas temáticas, resultando na geração de um novo plano de informação correspondente ao mapa de Fragilidade Ambiental Potencial da Região Imediata de Cianorte (RIC).

Os pesos atribuídos no processo de integração das variáveis foram definidos em conjunto com a etapa final de validação e testes exploratórios, considerando a correspondência entre as áreas classificadas com maior fragilidade e a ocorrência de situações de degradação ambiental por feições erosivas, com atribuição de maior peso para a variável de declividade, seguida por tipo de solos e de formas de vertentes, no entendimento de maior contribuição dessas variáveis no desencadeamento de erosões hídricas aceleradas, especialmente lineares. Dessa forma, os pesos adotados para a integração das variáveis de fragilidade são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Pesos das variáveis de Fragilidade para RIC.

Variáveis de Fragilidade	Pesos
Unidades litoestratigráficas	0,5
Declividade	4
Tipos de solos	3
Formas de vertentes	2,5

Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Na sequência, os dados de uso e cobertura do solo para a elaboração do mapa de Fragilidade Emergente, foram obtidos por meio do projeto MapBiomas coleção 9.0 referentes ao ano de 2023, que corresponde ao último conjunto de dados disponível na plataforma durante o desenvolvimento da pesquisa. Os dados foram adquiridos com abrangência de todo o território do estado do Paraná e em formato matricial (*raster*), por intermédio da plataforma *Google Earth Engine*. Os dados do projeto MapBiomas são produzidos a partir de imagens de satélites Landsat, com resolução

espacial de 30 m. De posse dos dados, os mesmos foram recortados para a área de estudo e reprojeto para o sistema de coordenadas UTM, Datum SIRGAS 2000, Zona 22S, compatibilizando todos os dados no mesmo sistema de referência.

Os dados de uso e cobertura do solo também foram categorizados por meio da ferramenta “Reclassificar por tabela” e atribuído os graus de fragilidade, com base nas adaptações metodológicas apresentadas por Oliveira (2023). Por fim, para a elaboração do mapa de Fragilidade Emergente, utilizou-se novamente a ferramenta “Calculadora *Raster*” para a integração dos dados das variáveis físicas de Fragilidade Potencial com os dados de uso e cobertura do solo, empregando-se média simples e elaborando o mapa de Fragilidade Emergente.

Com o objetivo de obter os valores de área correspondentes a cada classe de fragilidade ambiental, foi realizado o processo de vetorização dos dados, convertendo as informações em formato matricial (*raster*) para o formato vetorial (*shapefile*), possibilitando a quantificação de área. Em seguida, todos os produtos gerados foram espacializados em mapas temáticos, ilustrando as áreas de maior e menor grau de fragilidade ambiental potencial e emergente, bem como elaborados diferentes tabelas e gráficos, fundamentando a discussão dos resultados.

Para validação dos modelos de Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente elaborados para a RIC, bem como dos pesos atribuídos às variáveis no processo de integração, realizou-se uma análise da correspondência espacial entre as áreas classificadas com maior fragilidade e a ocorrência de situações reais de degradação ambiental. Para tanto, foram amostrados pontos representativos de feições erosivas ao longo de toda a área de estudo, a partir da interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução espacial, disponibilizadas pela plataforma Google, por meio do plugin *QuickMapServices*, no ambiente do software QGIS.

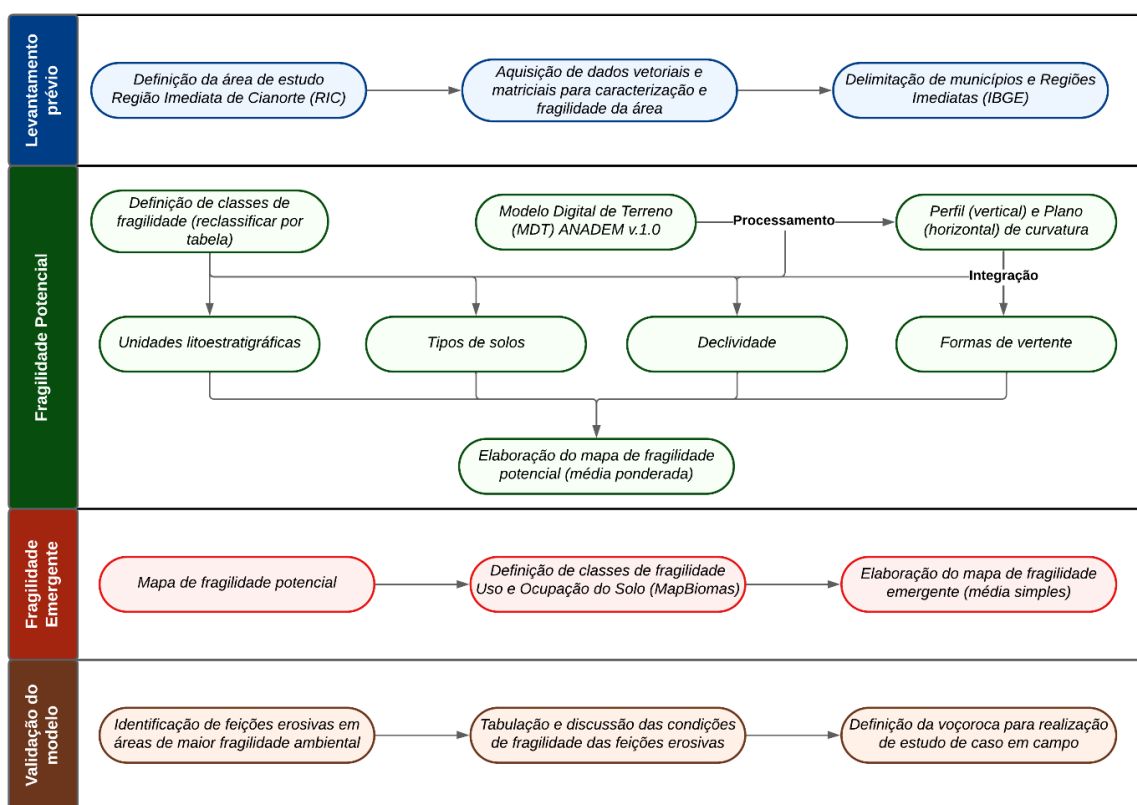
Durante essa etapa, foram identificadas mais de 700 ocorrências de processos erosivos, abrangendo tanto feições associadas à erosão hídrica laminar, caracterizada pelo escoamento difuso da água sobre a superfície e pela remoção das partículas superficiais do solo, quanto feições relacionadas à erosão hídrica linear, marcada pela remoção concentrada do solo ao longo de alinhamentos específicos.

Dentre os processos erosivos mapeados, destacaram-se 32 feições mais expressivas, identificadas como ravinas ou voçorocas, em função de sua extensão e elevado grau de degradação da paisagem. Entre essas feições, inclui-se a voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR, selecionada para o estudo

de caso desenvolvido na segunda parte da pesquisa, a partir do aerolevanteamento realizado por RPA e na coleta de amostras de solo em topossequência.

Para o mapeamento e correlação dos 32 pontos amostrais mais relevantes na área de estudo, foram considerados o ponto central de cada feição e identificados de forma pontual os graus de fragilidade de cada variável empregada para os modelos Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente da RIC. Esse procedimento permitiu a validação dos modelos e a discussão dos resultados obtidos. Dessa maneira, a sequência completa dos procedimentos metodológicos adotados encontra-se sintetizada no organograma da Figura 9.

Figura 9 – Organograma de sequência de procedimentos metodológicos.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

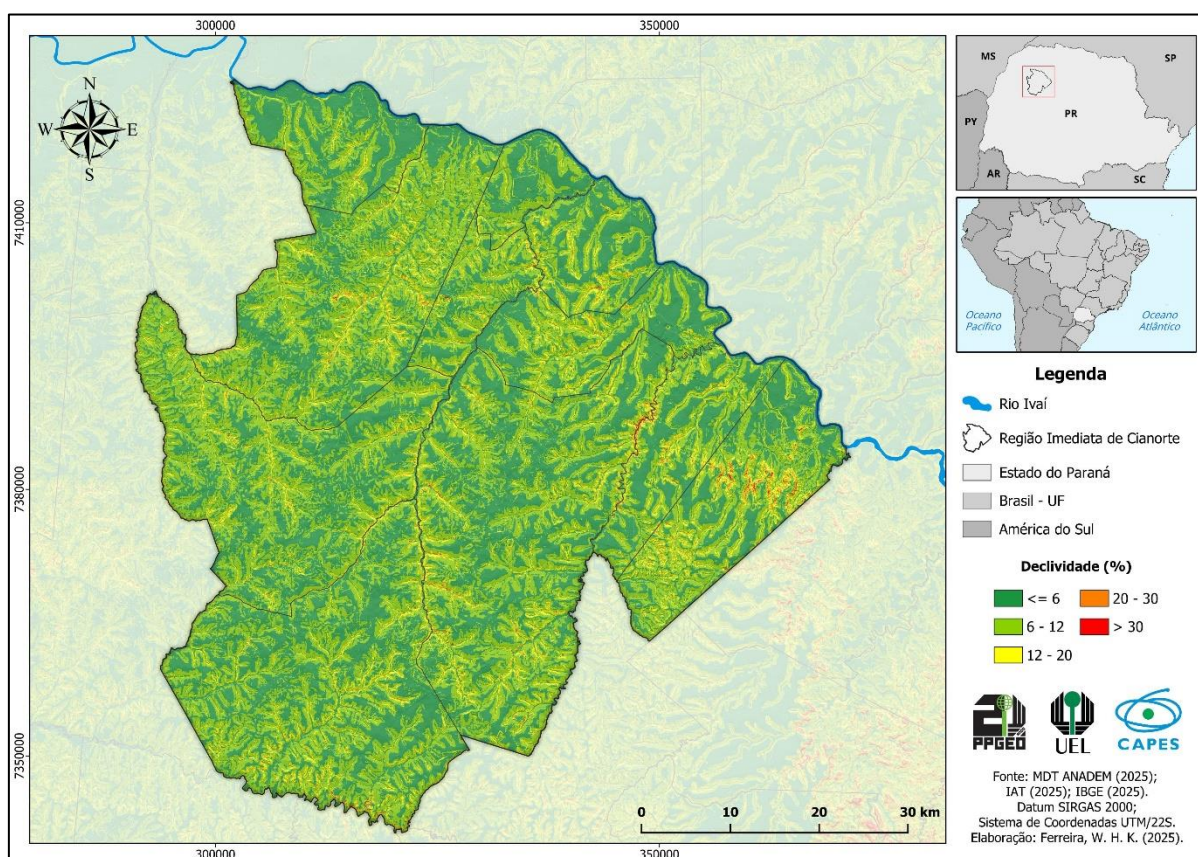
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Fragilidade Ambiental Potencial da Região Imediata de Cianorte

Estabelecidos os procedimentos metodológicos e de posse dos dados referentes às variáveis físicas da Região Imediata de Cianorte (RIC), todas as

informações foram analisadas de forma integrada, gerando um produto síntese que expressa os diferentes graus de fragilidade ambiental. Portanto, as Tabelas 8 a 11 apresentam as classes de fragilidade e os respectivos valores de área para cada uma das variáveis que compõem a análise da fragilidade potencial da área de estudo. Por sua vez, os mapas das Figuras 10 a 13 ilustram a espacialização das respectivas variáveis de fragilidade.

Figura 10 – Mapa de fragilidade de declividade da RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 8 – Área das classes de fragilidade de declividade da RIC.

Classes de Declividade	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
0 a 6%	Muito baixa	1.765,00	44,17
6 a 12%	Baixa	1.872,53	46,86
12 a 20%	Média	323,20	8,09
20 a 30%	Alta	31,92	0,8
> 30%	Muito Alta	3,30	0,08

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Com base nos dados da Figura 10 e valores de área da Tabela 8, observa-se

que, em relação à declividade da área de estudo, predominam as classes de fragilidade muito baixa (0 - 6%) e baixa (6 - 12%), com áreas de 1.765 km² (44,17%) e 1.872,53 km² (43,33%), respectivamente. Esse padrão reflete as características geomorfológicas do Terceiro Planalto Paranaense, em especial da subunidade morfoescultural do Planalto de Umuarama, marcada por relevos planos e suavemente ondulados sobre rochas areníticas do Grupo Caiuá (Mineropar, 2006).

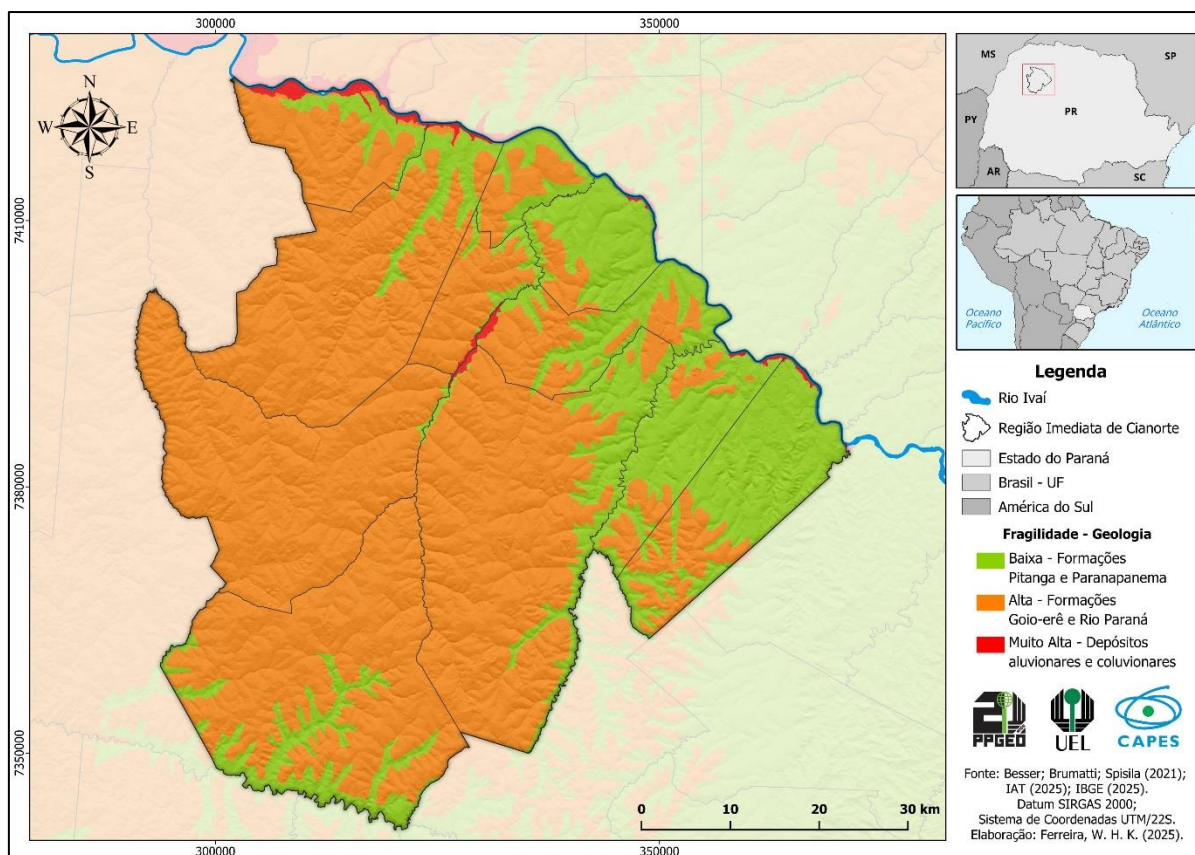
No entanto, a soma de 355,12 km² (8,89%) se enquadram nas classes de fragilidade média e alta, com declividades entre 12 a 30%. Essas áreas estão localizadas principalmente próximo aos canais de drenagem, com destaque para o trecho do Rio Ligeiro entre os municípios de Cianorte e Jussara, bem como no município de Terra Boa, na porção oeste da área de estudo, sendo locais inseridos na subunidade morfoescultural do Planalto de Campo Mourão.

Devido à maior declividade, essas áreas apresentam tendência à ocorrência de solos menos desenvolvidos, com menor capacidade de infiltração de água e maior tendência ao escoamento superficial. Ressalta-se que, em tais locais, é fundamental a manutenção da cobertura vegetal nativa e a restrição de atividades que possam comprometer sua integridade, atuando como fatores de estabilização do solo e reduzindo a intensidade dos processos erosivos. Portanto, o uso e ocupação dessas áreas devem ser conduzidos de forma planejada e compatível com sua fragilidade ambiental, a fim de garantir a conservação dos recursos naturais e a sustentabilidade da paisagem. Por sua vez, o mapa da Figura 11 e dados da Tabela 9, apresentam as informações de fragilidade das unidades litoestratigráficas da área de estudo.

No tocante à fragilidade relacionada às características geológicas da Região Imediata de Cianorte (RIC), observa-se um contraste marcante na distribuição espacial das unidades litoestratigráficas, que condicionam significativamente outros elementos da fragilidade ambiental, especialmente no que diz respeito à ocorrência de solos mais arenosos na predominância de rochas sedimentares, especialmente os arenitos.

A classe de fragilidade alta é a mais expressiva na área de estudo, correspondendo às Formações Goio-Erê e Rio Paraná, pertencentes ao Grupo Caiuá. Essas unidades totalizam área de 2.889,19 km² (72,46%) e são compostas, predominantemente, por arenitos quartzosos muito finos a finos, bem como maciços de origem eólica, de coloração avermelhada e arroxeadada, transportados e depositados em ambientes pretéritos áridos e semiáridos (Mineropar, 2005).

Figura 11 – Mapa de fragilidade de unidades litoestratigráficas da RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 9 – Área das classes de fragilidade de unidades litoestratigráficas da RIC.

Unidades Litoestratigráficas	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
Formação Pitanga (basaltos) e Formação Paranapanema (basaltos) - Grupo Serra Geral	Baixa	1.063,74	26,68
Formação Goio-Erê (arenitos) e Formação Rio Paraná (arenitos) - Grupo Caiuá	Alta	2.889,19	72,46
Depósitos aluvionares (Q2a); Depósitos coluvionares quaternários (Qco).	Muito Alta	34,45	0,86

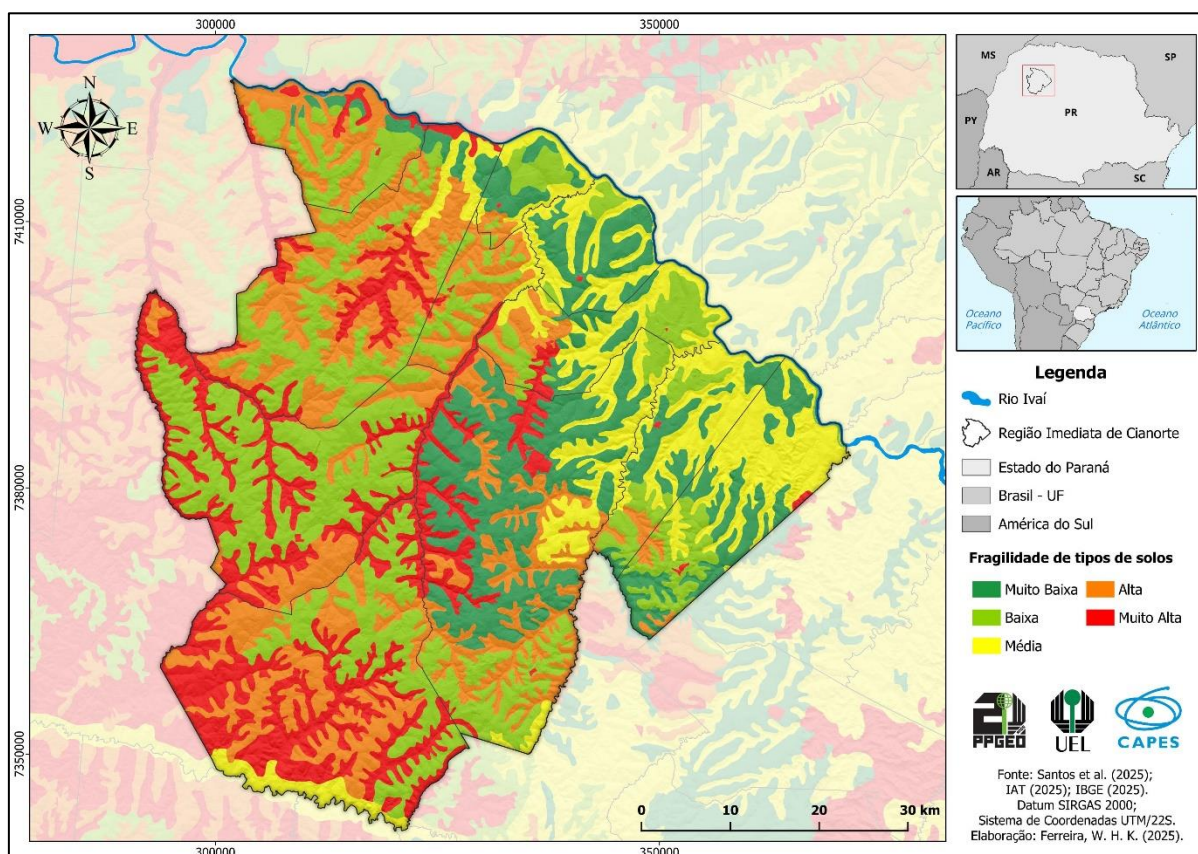
Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Em contraste, a classe de fragilidade baixa, associada às Formações Pitanga e Paranapanema do Grupo Serra Geral, concentra-se nas porções norte e oeste da área de estudo, além de uma porção ao sul do município de Tuneiras do Oeste. Essas unidades litoestratigráficas totalizam área de 1.063,74 km² (26,68%) e são constituídas por derrames de rochas ígneas básicas, especialmente basaltos, de maior resistência à denudação, como intemperismo e erosão (Mineropar, 2005).

Por fim, a classe de fragilidade muito alta referente os depósitos aluvionares e coluvionares quaternários, abrangem uma área de 34,45 km² (0,86%). Esses

depósitos são compostos principalmente por sedimentos areno-argilosos inconsolidados e areias feldspáticas, localizados em pequenas porções ao norte, no vale do Rio Ivaí, e entre os municípios de Cianorte e Jussara, ao longo do curso do Rio Ligeiro. Na sequência, a Figura 12 e a Tabela 10 retratam as informações de fragilidade dos tipos de solos da RIC.

Figura 12 – Mapa de fragilidade de tipos de solos da RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 10 – Área das classes de fragilidade de tipos de solos da RIC.

Tipos de solos (SiBCS)	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
Latossolos vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa (LVd18, LVd2, LVd9, LVdf13, LVe1, LVef1)	Muito Baixa	655,78	16,41
Latossolos vermelhos de textura média (LVd15, LVd19, LVe2)	Baixa	1.083,07	27,10
Nitossolos vermelhos (NVdf1, NVef2, Nvef3)	Média	621,97	15,57
Argissolos típicos (PVd1, PVd2, PVd5, PVe1, PVe3)	Alta	931,22	23,30
Argissolos abrupticos (PVd4, PVe2), Gleissolo Háptico (GX1), Neossolo Regolítico (RRe10) e Neossolo Flúvico (RYbd)	Muito Alta	703,89	17,62

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Em relação à fragilidade ambiental associada aos diferentes tipos de solos, Alves *et al.* (2021) destacam que a resistência do solo à erosão, também denominada erodibilidade, varia de forma significativa conforme suas características intrínsecas, especialmente a textura. Entretanto, os diferentes tipos de cultivos agrícolas e as práticas de manejo adotadas também exercem influência direta nas taxas de erosão, sobretudo na remoção de partículas finas, como argila, silte e matéria orgânica, que correspondem às frações mais reativas e ricas em nutrientes.

De acordo com Telles, Guimarães e Dechen (2011), estima-se que o Brasil perca aproximadamente 600 milhões de toneladas de solo agricultável por ano em decorrência da erosão hídrica. No estado do Paraná, essa perda é estimada em cerca de 20 toneladas de solo por hectare ao ano, considerando uma área aproximada de 6 milhões de hectares ocupados por culturas anuais, o que resulta em custos econômicos da ordem de 242 milhões de dólares, condições estas que se tornam ainda mais críticas ao considerar a degradação histórica dos solos do Noroeste do Paraná e conseqüentemente, da Região Imediata de Cianorte.

Diante dessas expressivas perdas ambientais e econômicas associadas à erosão hídrica, observa-se, a partir dos dados apresentados na Figura 12 e na Tabela 10, que a classe de fragilidade dos solos mais representativa na RIC corresponde à fragilidade baixa. Essa classe está associada principalmente aos Latossolos Vermelhos de textura média, que ocupam uma área de 1.083,07 km², equivalente a 27,1% da área total. Por sua vez, os Latossolos Vermelhos de textura argilosa e muito argilosa, classificados na classe de fragilidade muito baixa, abrangem uma área de 655,78 km² (16,41%), caracterizando-se por solos mais coesos e bem estruturados, o que lhes confere maior resistência ao desprendimento das partículas.

Os Latossolos, conforme Santos *et al.* (2025) são considerados solos altamente evoluídos e profundos, caracterizados pela presença do horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico (Bw). São formados a partir de um avançado estágio de intemperismo, geralmente ocorrendo em áreas com relevos planos a suave ondulados, em topos de encostas e estendendo-se até os setores de média vertente. Em razão dessas características, apresentam menor suscetibilidade à erosão quando realizado o manejo correto. Na área de estudo, sua espacialização ocorre predominantemente em zonas de declividade entre 0% e 12%.

Por sua vez, os Nitossolos Vermelhos, classificados na classe de fragilidade média, abrangem uma área de 621,97 km² (15,57%). Esses solos, de acordo com

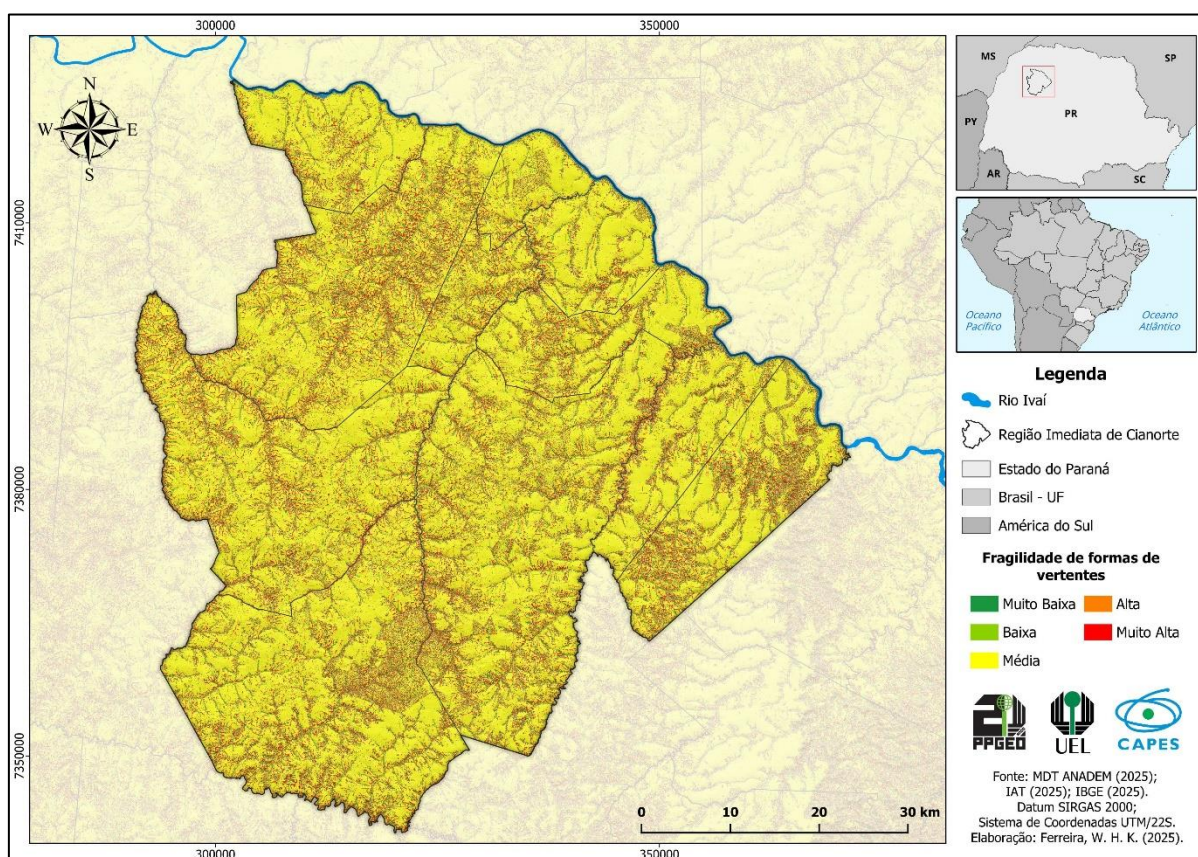
Pinheiro Junior *et al.* (2020), apresentam textura argilosa ou muito argilosa desde as camadas superficiais, estrutura bem desenvolvida em blocos ou prismas, com expressiva cerosidade decorrente do recobrimento dos agregados de argila translocada em subsuperfície, sendo identificados pelo horizonte diagnóstico subsuperficial B nítico (Bt). Em geral, os Nitossolos são solos profundos, bem drenados e predominam em áreas de relevo suave ondulado. Na RIC, sua espacialização concentra-se na porção oeste da área de estudo, bem como em trechos dos vales do Rio Ivaí (ao norte) e do Rio Goioerê (ao sul) no município de Tuneiras do Oeste, sob influência dos basaltos das formações Pitanga e Paranapanema do Grupo Serra Geral.

Por fim, as classes de fragilidade alta e muito alta também apresentaram valores expressivos de área, totalizando, respectivamente 931,22 km² (23,30%) e 703,89 km² (17,62%), associadas, principalmente, à presença de Argissolos Vermelhos típicos e abruptos. Os Argissolos, segunda ordem de maior ocorrência no Brasil, caracterizam-se pela presença de um horizonte subsuperficial de acúmulo de argila (Bt), antecedido por um horizonte eluvial (E), formado a partir do processo de argiluviação. Esse processo consiste na translocação de partículas finas de argila, em suspensão, das camadas superficiais para camadas mais profundas do perfil do solo, resultando em um gradiente textural mínimo de 1,5. Essa dinâmica resulta em diferenciações texturais marcantes entre os horizontes do solo, ocorrendo geralmente em áreas de relevo mais ondulado e sob a influência de rochas sedimentares, como os arenitos das formações Goio-Êrê e Rio Paraná do Grupo Caiuá (Firmino, 2016).

No caso específico dos Argissolos abruptos, observa-se uma suscetibilidade ainda maior aos processos erosivos, em razão da mudança abrupta no teor de argila entre os horizontes superficiais e subsuperficiais do solo. Nessas condições, o contraste textural pode resultar no dobro do teor de argila no horizonte B em relação aos horizontes A ou E, ou ainda em um incremento absoluto de, no mínimo, 20% de argila no horizonte B, quando os horizontes superficiais apresentarem menos de 20% de argila (Santos *et al.*, 2025). Tal configuração favorece a concentração de fluxos hídricos subsuperficiais, potencializando processos de instabilidade e podem resultar no fenômeno de *piping* nas paredes de voçorocas, contribuindo para o avanço regressivo e a ramificação dessas feições erosivas, o que demanda práticas de manejo mais adequadas, bem como práticas conservacionistas mais rigorosas para o controle da erosão (Nóbrega *et al.*, 2023).

Além dos Argissolos Vermelhos abruptos, a classe de fragilidade muito alta também engloba, embora em menor proporção, Neossolos Regolíticos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos, que quando em condições de textura arenosa sob o cultivo de cana-de-açúcar, tendem a acentuar a fragilidade ambiental pela falta de coesão natural, o que facilita o desprendimento das partículas. Na sequência, o mapa da Figura 13 e a Tabela 11, retratam a fragilidade das formas de vertentes da RIC.

Figura 13 – Mapa de fragilidade de formas de vertente da RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 11 – Área das classes de fragilidade de formas de vertente da RIC.

Formas de Vertente	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
Convexo-Divergente	Muto baixa	54,5	1,36
Côncavo-Divergente	Baixa	594,09	14,87
Convexo-Planar			
Retilíneo-Planar	Média	2.755,7	68,96
Retilíneo-Divergente			
Côncavo-Planar	Alta	294,75	7,38
Convexo-Convergente			
Retilíneo-Convergente	Muito Alta	296,93	7,43
Côncavo-Convergente			

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

No que se refere à fragilidade associada às formas de vertentes na área de estudo, observa-se o predomínio da classe de fragilidade média na RIC, relacionada às vertentes retilíneas de comportamento divergente ou planar, bem como às vertentes côncavas com comportamento planar, totalizando área de 2.755,7 km² (68,96%). Já as vertentes côncavas de comportamento divergente, em conjunto das de vertentes convexas de comportamento planar, classificadas como de fragilidade baixa, constituem a segunda maior ocorrência na área de estudo, com abrangência de área de 594,09 km² (14,87%), apresentando menor tendência de concentração de fluxo de água e dissipação da energia do escoamento hídrico.

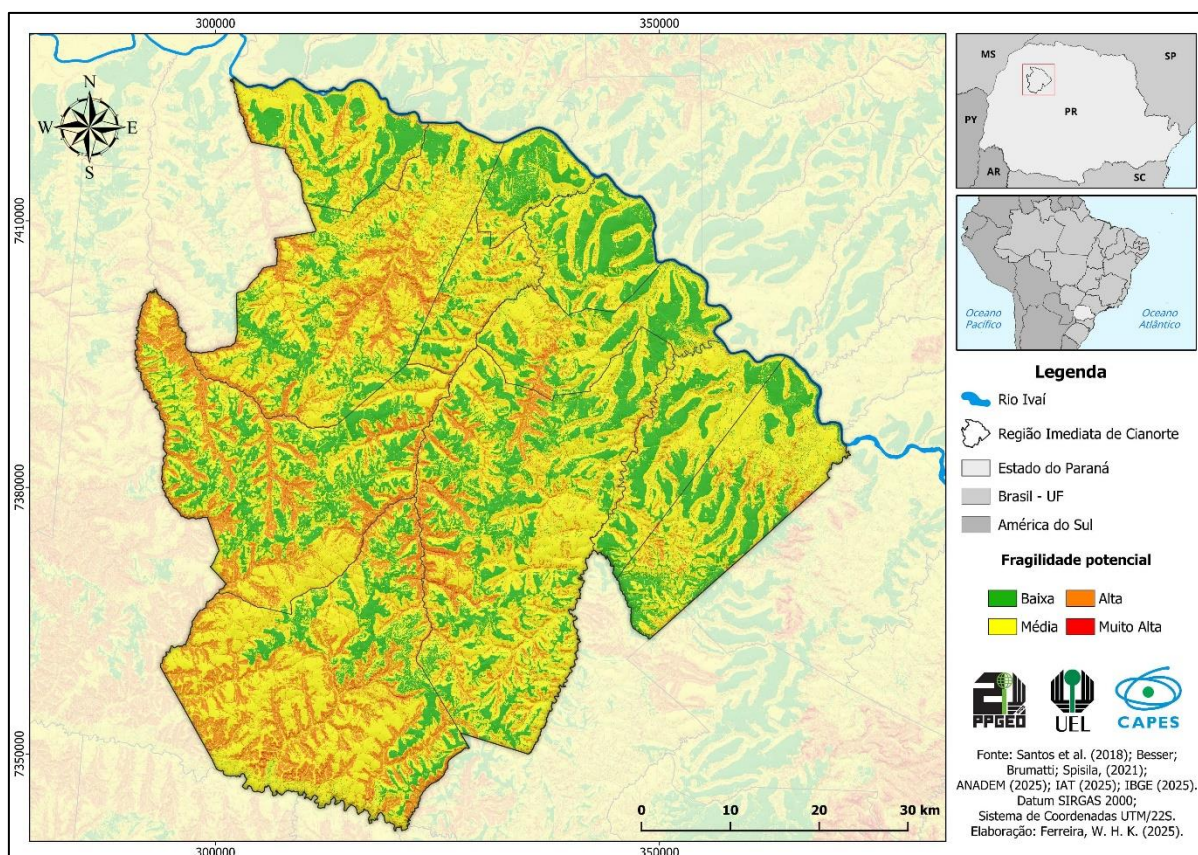
Por outro lado, as vertentes retilíneas ou côncavas de comportamento convergente, enquadradas na classe de fragilidade muito alta, totalizam uma área de 296,36 km² (7,43%), valor ligeiramente superior àquele observado para as vertentes convexo-convergentes, classificadas como de fragilidade alta, que abrangem 294,75 km² (7,38%). A soma dessas duas classes de maior fragilidade corresponde a uma área de 591,68 km² (14,81%) do território da RIC. Tais formas de relevo ocorrem predominantemente em áreas com declividades mais acentuadas, superiores a 12%, especialmente nas proximidades de canais de drenagem, onde há maior tendência à concentração do fluxo de água e sedimentos, tanto em superfície quanto em subsuperfície, favorecendo a intensificação dos processos erosivos lineares.

Essa distribuição espacial das classes de fragilidade das formas de vertentes encontra-se em consonância com os níveis de dissecação do relevo, predominantemente baixos a médios, observados nas subunidades morfoesculturais do Planalto de Umarama e do Planalto de Campo Mourão. Essas unidades geomorfológicas caracterizam-se por topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em “V”, além da presença de vertentes retilíneas e côncavas na base das encostas, associadas à ocorrência de vales em calha (Mineropar, 2006).

A partir da análise integrada das variáveis físico-naturais da área de estudo, foi elaborado o mapa de Fragilidade Ambiental Potencial da RIC (Figura 14), por meio da utilização da ferramenta “Calculadora *Raster*”, com atribuição de pesos diferenciados às variáveis consideradas. Nesse processo, a variável declividade recebeu peso 4, por representar o principal condicionante morfodinâmico dos processos erosivos, enquanto os tipos de solo e as formas de vertentes foram ponderados com pesos 3 e 2,5, respectivamente. A variável unidades litoestratigráficas foi ponderada com peso 0,5, por exercer influência indireta sobre a dinâmica superficial. Como resultado dessa

integração, foram identificadas quatro classes de fragilidade ambiental potencial na área de estudo, variando de baixa a muito alta, cujos valores de área correspondentes são apresentados na Tabela 12.

Figura 14 – Mapa de Fragilidade Ambiental Potencial da RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 12 – Área das classes de Fragilidade Ambiental Potencial da RIC.

Valores de Fragilidade Potencial	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1,4 - 2	Baixa	1.065,31	26,72
2 - 3	Média	2.210,12	55,44
3 - 4	Alta	695,71	17,45
4 – 4,8	Muito alta	15,18	0,38

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Conforme evidenciado pelo mapa da Figura 14 e dados da Tabela 12, observa-se o predomínio da classe de fragilidade potencial média na área de estudo, totalizando área de 2.210,12 km² (55,44%). Essa classe resulta, principalmente, da associação entre Argissolos Vermelhos típicos, predominantes nas áreas sob influência dos arenitos das Formações Goio-Erê e Rio Paraná, pertencentes ao Grupo

Caiuá, e Nitossolos Vermelhos, desenvolvidos sob a abrangência dos basaltos do Grupo Serra Geral. Tais classes de solos ocorrem, em sua maioria, em áreas com declividades de até 12%, associadas ao predomínio de vertentes retilíneas, tanto de comportamento planar quanto divergente, além de vertentes côncavas de comportamento planar.

A classe de fragilidade potencial baixa também apresentou forte expressividade espacial na RIC, abrangendo uma área de 1.065,31 km² (26,72%), relacionada sobretudo, à ocorrência de Latossolos Vermelhos com textura variando de média a muito argilosa, os quais se desenvolvem preferencialmente em áreas de topo das vertentes, com declividades inferiores a 6%. Nesses setores, observa-se o predomínio de vertentes convexas de comportamento divergente ou planar, bem como de vertentes côncavas-divergentes, condições que favorecem a maior estabilidade superficial e menor concentração do escoamento hídrico.

Por outro lado, destaca-se a presença significativa da classe de fragilidade ambiental potencial alta, que totaliza uma área de 695,71 km² (17,45%), e, em menor proporção, da classe de fragilidade potencial muito alta, com área de 15,18 km² (0,38%). Essas classes estão associadas, principalmente, à presença de Argissolos Vermelhos típicos ou abruptos, em áreas com declividades mais acentuadas, superiores a 12%, e à presença de vertentes côncavas ou retilíneas de comportamento convergente. Tais características favorecem a concentração dos fluxos superficial e subsuperficial, intensificando a suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos lineares, o que reforça a necessidade de maior atenção quanto ao uso e à ocupação do solo, bem como à adoção de práticas conservacionistas adequadas nos sistemas agrícolas.

Em consonância com esses resultados, Couto (2015), ao analisar a evolução denudacional de longo prazo e as relações solo-relevo no Noroeste do estado do Paraná, destaca que as elevadas taxas de denudação observadas na região estão associadas, principalmente, à friabilidade dos materiais de origem, caracterizados por arenitos pouco diagenizados e solos de textura arenosa.

Ainda segundo Couto (2015), mesmo em um contexto geomorfológico marcado por topografia suave, com médias de declividade em torno de 6%, o Noroeste paranaense apresenta taxas de denudação comparáveis àquelas observadas em ambientes mais elevados e declivosos. Ao considerar a compartimentação do Noroeste a partir das margens do rio Ivaí, observa-se que a margem esquerda, na

qual se insere a RIC, apresenta uma distribuição dos solos intimamente relacionada ao grau de entalhe da rede de drenagem e ao comprimento das vertentes. Nesse contexto, a transformação lateral Latossolo–Argissolo atua como um importante fator de desestabilização geomorfológica, uma vez que as rupturas de declive associadas às zonas de transição pedológica configuram-se como locais preferenciais para a deflagração de processos erosivos, melhor explorados na etapa de validação do modelo de fragilidade ambiental da RIC.

3.5.2 Fragilidade Ambiental Emergente da Região Imediata de Cianorte

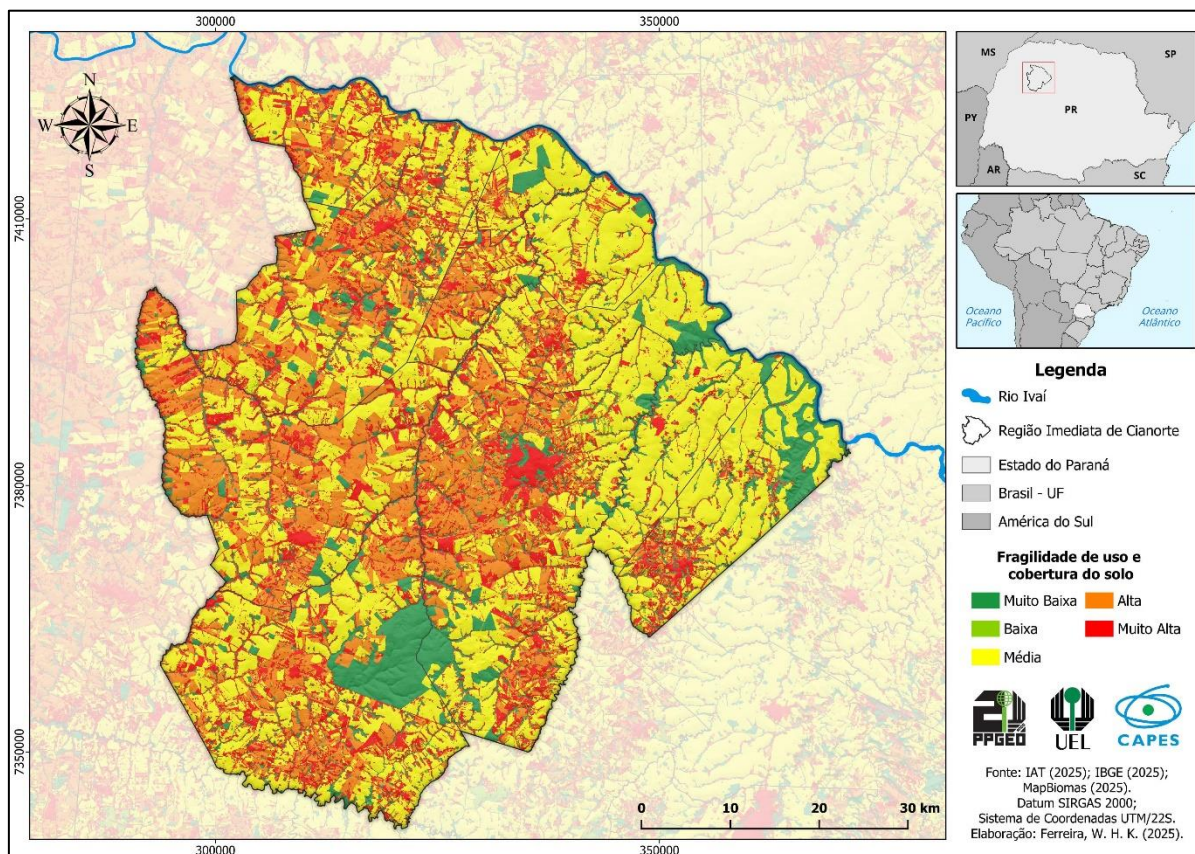
No que se refere à Fragilidade Ambiental Emergente da Região Imediata de Cianorte (RIC), entendida como a suscetibilidade natural de uma área à degradação ambiental em decorrência de processos intensificados pela ação antrópica, o mapa da Figura 15 e os dados da Tabela 13 retratam a distribuição das classes de fragilidade relacionadas ao uso e cobertura do solo na área de estudo, para o ano de 2023 e obtidas a partir do projeto MapBiomias. Por sua vez, o mapa da Figura 16 e a Tabela 15 apresentam os dados da Fragilidade Ambiental Emergente na RIC, permitindo a análise integrada entre os fatores naturais e as atividades antrópicas.

No tocante ao uso e cobertura do solo, um estudo anterior sobre a evolução desses aspectos na RIC, no período entre 1985 a 2023 (Ferreira; Lohmann; Nabarro, 2024), são apontadas transformações significativas de caráter predominantemente agrícola na região. Essas transformações incorporam e moldam a atual dinâmica do espaço agrário da RIC, marcado pela concentração de monoculturas e pela consolidação de complexos agroindustriais do setor sucroenergético, que resultam na homogeneização da economia, da produção e do uso do solo.

Dessa forma, segundo Ferreira, Lohmann e Nabarro (2024) as alterações mais expressivas na RIC, entre 1985 e 2023, ocorreram nas áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar, que se desenvolve majoritariamente sobre solos derivados dos arenitos das formações do Grupo Caiuá, ocupando uma área de 996,32 km² (24,93%), e de soja, cultivada predominantemente em zonas de domínio de solos derivados dos basaltos das formações do Grupo Serra Geral, com uma área total de 674,91 km² (16,89%). Essas expansões ocorreram em detrimento, principalmente, das áreas anteriormente ocupadas por pastagens plantada para a pecuária de corte, que, apesar da redução, ainda representam parcela significativa do território, com 781,32 km²

(19,37%). Tais condições evidenciam processos históricos que contribuem para a intensificação da fragilidade ambiental na RIC.

Figura 15 – Mapa de fragilidade das classes de uso e cobertura do solo na RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 13 – Área das classes de fragilidade de uso e cobertura do solo na RIC.

Uso e Cobertura do Solo – MapBiomas 2023	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
Formação Florestal; Rio, Lago e Oceano	Muito Baixa	528,93	13,24
Silvicultura; Café; Outras Lavouras Perenes	Baixa	52,33	1,31
Soja; Cana-de-açúcar; Outras Lavouras Temporárias; Campo Alagado e Área Pantanosa	Média	1.799,48	45,03
Pastagem; Mosaico de Usos	Alta	1.555,25	38,92
Área Urbanizada; Outras Áreas não Vegetadas	Muito alta	59,94	1,50

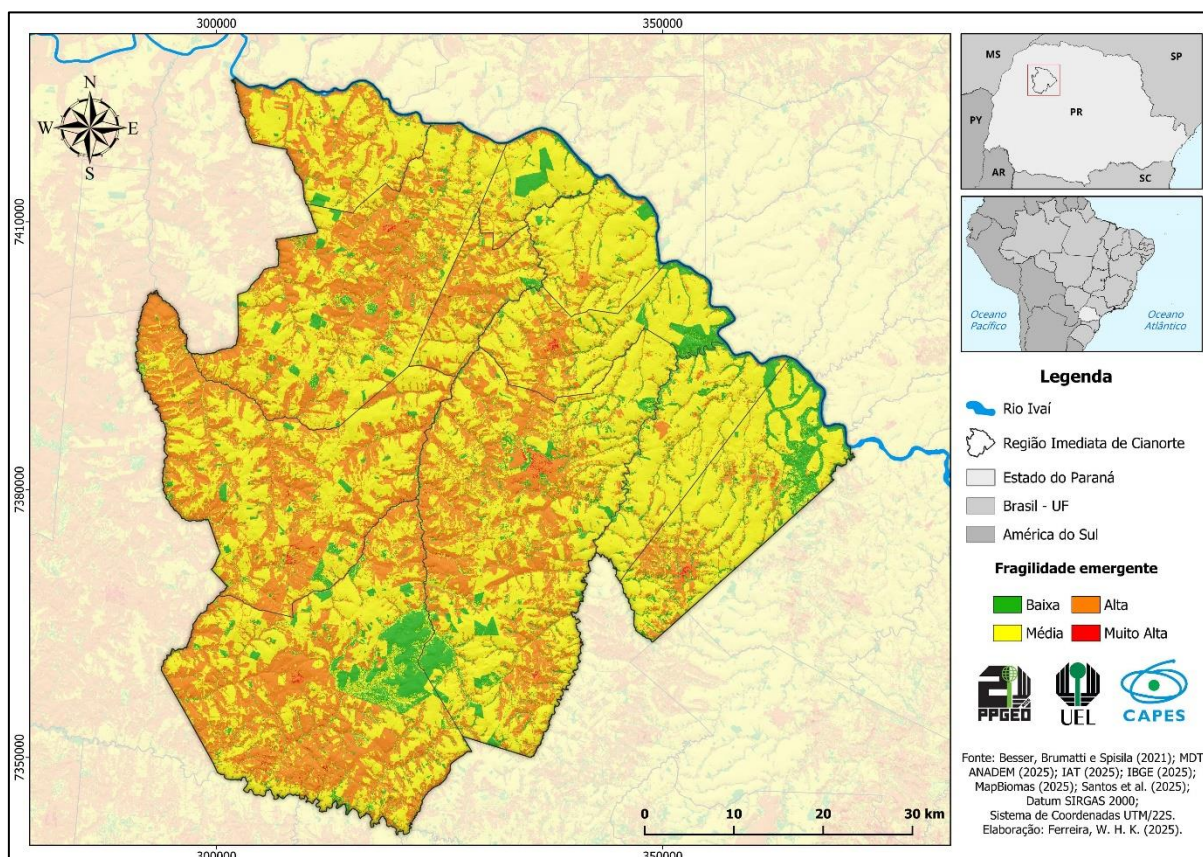
Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Diante do exposto, conforme o mapa da Figura 15 e dados da Tabela 13, observa-se que a classe de fragilidade média é a mais expressiva na RIC, totalizando área de 1.799,48 km² (45,03%). Essa classe é composta, majoritariamente, por monoculturas de cana-de-açúcar e soja, e em menor número, de outras lavouras

temporárias, campos alagados e áreas pantanosas. Entretanto, a classe de fragilidade alta também é bastante representativa, totalizando área de 1.555,25 km² (38,92%), correspondendo às áreas ocupadas por pastagens plantadas e mosaicos de uso, que são área de uso agropecuário sem distinção clara entre pastagens e agricultura, além de áreas de ocupação periurbana, como chácaras e condomínios (MapBiomas, 2025).

Por sua vez, a classe de fragilidade muito baixa, associados aos corpos hídricos e à formação florestal, abrange área de 528,93 km² (13,24%). No entanto, essa classe encontra-se fortemente concentrada nos remanescentes florestais da Reserva Biológica das Perobas, localizada entre os municípios de Cianorte e Tuneiras do Oeste, bem como na porção oeste da RIC, especialmente no município de Terra Boa e ao longo do curso do Rio Ligeiro. Esses dados evidenciam os impactos de processos históricos de ocupação territorial marcados pela retirada intensiva da cobertura vegetal nativa e sua substituição por usos agropecuários. Na sequência, são apresentadas as informações de Fragilidade Ambiental Emergente da RIC com o mapa da Figura 16 e dados da Tabela 15, além de gráfico comparativo na Figura 17.

Figura 16 – Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente da RIC.

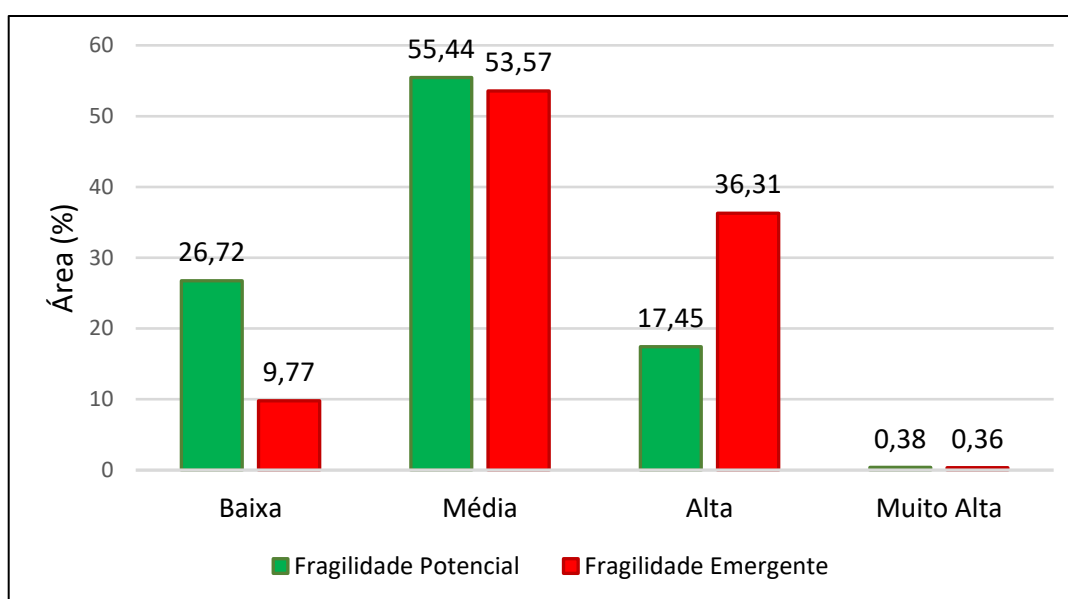


Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Tabela 14 – Área das classes de Fragilidade Ambiental Emergente da RIC.

Valores de Fragilidade Emergente	Graus de Fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1,5 - 2	Baixa	389,50	9,77
2 - 3	Média	2.135,34	53,57
3 - 4	Alta	1.447,27	36,31
4 - 5	Muito alta	14,19	0,36

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Figura 17 – Área Ocupada por Classe de Fragilidade Potencial e Emergente na RIC.

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Em relação à fragilidade ambiental emergente na RIC, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 17, observa-se aumento expressivo de área da classe de fragilidade emergente alta, que passou de 695,71 km² (17,45%) para 1.447,27 km² (36,31%). Esse aumento está associado, principalmente, à redução de área do grau de fragilidade potencial baixa, passando de 1.065,31 km² (26,72%) para 389,50 km² (9,77%). Essa dinâmica reflete, sobretudo, a correspondência entre áreas de maior fragilidade potencial e os padrões de uso e ocupação do solo marcados pela presença de pastagens plantadas para a pecuária de corte e de mosaicos de usos, que oferecem menor grau de proteção.

No que se refere à classe de fragilidade ambiental emergente muito alta, observa-se uma variação pouco significativa na área ocupada, totalizando 14,19 km² (0,36%), com maior concentração sobre áreas urbanizadas e superfícies não vegetadas, em associação com zonas previamente classificadas como de alta fragilidade potencial, o que reforça a baixa capacidade de proteção do solo e elevada

suscetibilidade a processos de degradação ambiental.

Em contrapartida, a classe de fragilidade emergente média, embora tenha apresentado redução em sua extensão territorial, permanece como a categoria predominante na RIC, abrangendo 2.135,34 km² (53,57%) da área de estudo. Essa classe está diretamente relacionada à forte presença das lavouras temporárias, com destaque para as monoculturas de cana-de-açúcar, cultivadas predominantemente sobre solos derivados dos arenitos das formações do Grupo Caiuá, e da soja, cuja distribuição se concentra na porção oeste da RIC, sobre solos derivados dos basaltos das formações do Grupo Serra Geral.

Em conformidade com Alves *et al.* (2021), ao considerar as taxas de perdas de solo sob diferentes tipos de cultura e cobertura vegetal, submetidos aos mesmos eventos pluviométricos, observa-se que as áreas de cultivo de cana-de-açúcar apresentam vulnerabilidade variável à erosão hídrica. Essa vulnerabilidade é especialmente acentuada durante a renovação do canavial e nos períodos de entressafra, quando o solo permanece exposto ou com baixa cobertura vegetal, resultando em um aumento expressivo das taxas de perda de solo. À medida que a cultura se desenvolve ao longo do ciclo produtivo, ocorre um incremento na proteção da superfície, reduzindo a remoção de partículas mais grossas, mas ainda permitindo a mobilização de sedimentos finos.

Ainda segundo Alves *et al.* (2021), as áreas de pastagem quando bem manejadas, favorecem a formação de uma cobertura vegetal densa e permanente, capaz de proteger o solo, promover a agregação das partículas e aumentar a estabilidade estrutural, resultando em menores taxas de perda de solo sob condições ideais. Entretanto, na ausência de práticas conservacionistas, as áreas de pastagem tornam-se altamente suscetíveis à degradação, sobretudo em razão da compactação do solo e da vegetação provocada pelo pisoteio do gado. A formação de trilhas preferenciais expõe o solo à ação direta das gotas de chuva, favorecendo o escoamento superficial concentrado e a formação de sulcos, os quais podem evoluir para processos de ravinamento e voçorocamento, especialmente em setores com maiores declividades, próximas aos fundos de vale (Dias; Thomaz, 2011).

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de adoção de estratégias mais eficientes de manejo do solo e do fortalecimento de práticas conservacionistas, particularmente em áreas ocupadas por lavouras temporárias e pastagens plantadas, que tendem a intensificar a fragilidade ambiental quando mal manejadas. Tais

medidas são fundamentais para mitigar a intensificação dos processos erosivos e promover a sustentabilidade dos sistemas produtivos regionais, destacando-se práticas como o plantio direto, os sistemas consorciados, o cercamento de áreas ambientalmente sensíveis e a rotação do gado. Essas estratégias contribuem para a manutenção da cobertura vegetal, que atua como uma barreira física ao dissipar a energia das gotas de chuva e reduzir a velocidade do escoamento superficial.

3.5.3 Validação do modelo de fragilidade ambiental

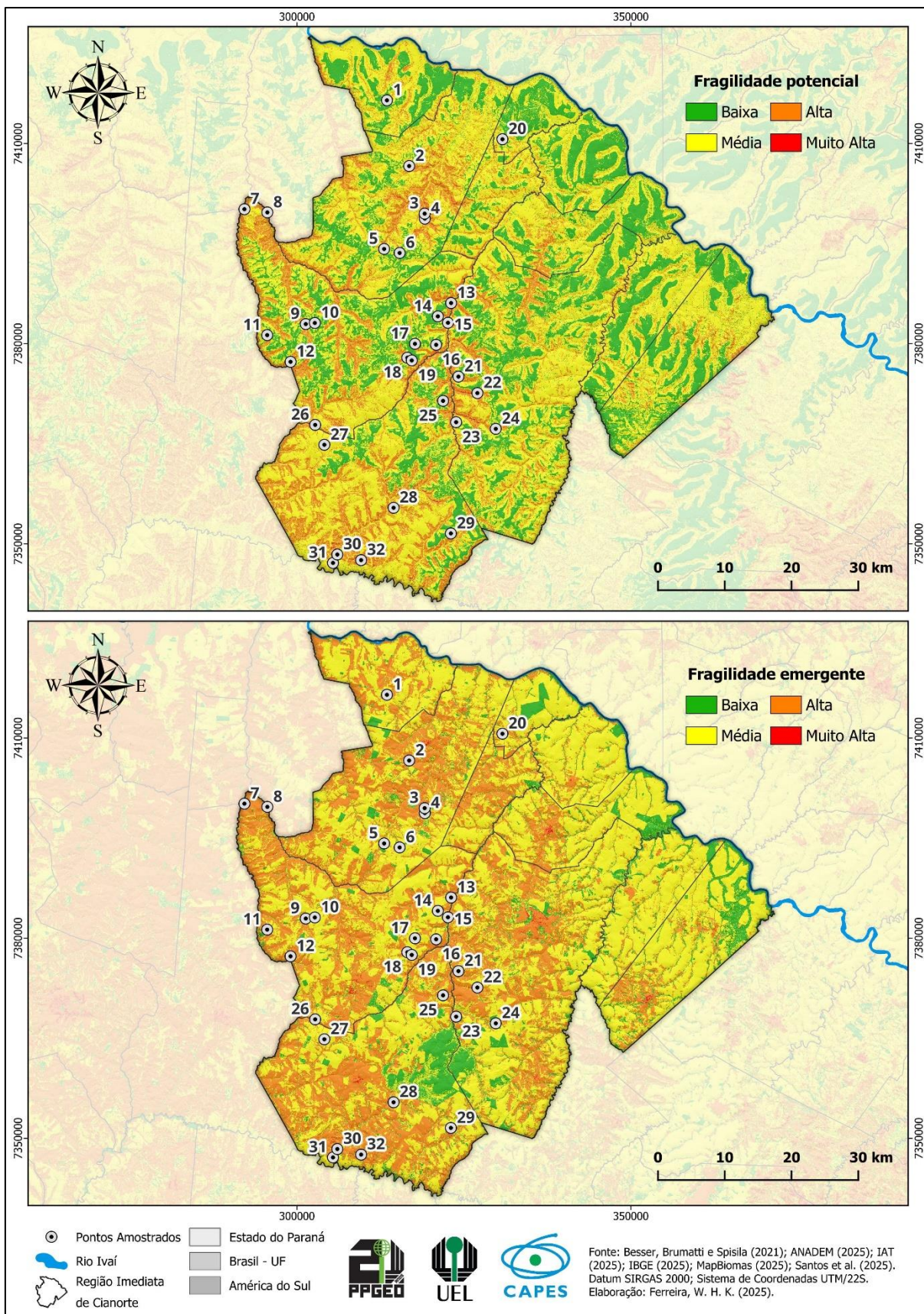
Com o objetivo de validar os modelos de Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente elaborados para a Região Imediata de Cianorte (RIC), realizou-se uma análise da correspondência espacial entre os locais de maior fragilidade e a ocorrência de situações de degradação ambiental. Para isso, foram amostrados pontos de feições erosivas ao longo da área de estudo, por meio de interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução espacial, disponibilizadas pela plataforma do Google, utilizando-se o plugin *QuickMapServices*, no ambiente do software QGIS.

Durante essa etapa, foram identificadas mais de 700 situações de processos erosivos distribuídos ao longo da área de estudo, considerando tanto feições decorrentes de erosão laminar, promovidas escoamento difuso da água sobre a superfície e consequente remoção das partículas superficiais do solo como um todo, quanto feições associadas à erosão linear, caracterizada por uma remoção concentrada do solo ao longo de alinhamentos específicos.

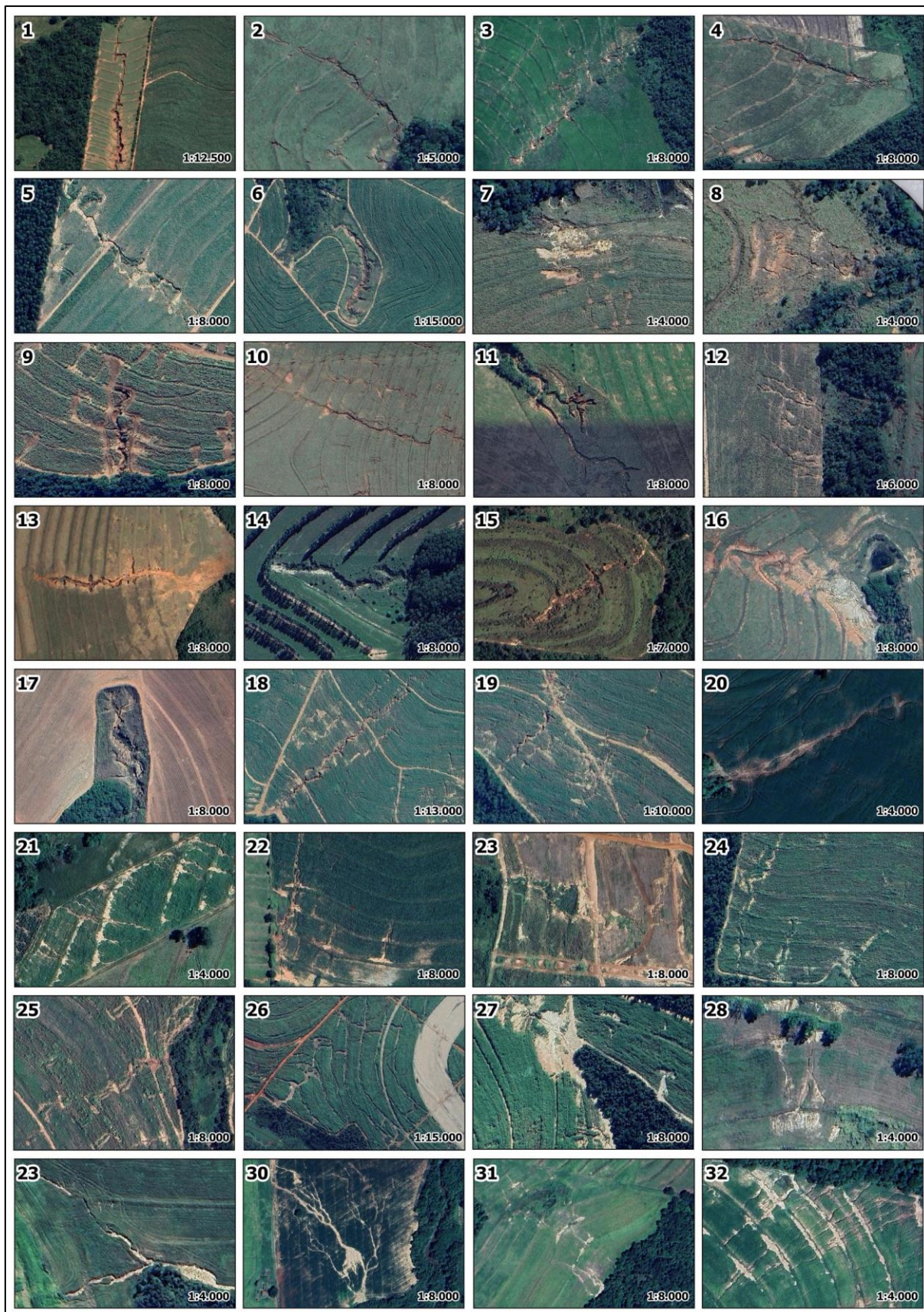
Dentre todos os processos erosivos mapeados, destacaram-se 32 feições erosivas mais expressivas, classificadas como ravinas ou voçorocas, em razão de sua maior extensão e degradação da paisagem, incluindo a voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema (ponto 1), objeto de análise no estudo de caso desenvolvido na segunda parte do trabalho.

Nesse contexto, a espacialização dos 32 pontos destacados, resultantes de processos de ravinamento e voçorocamento na RIC, assim como sua correlação com os modelos de fragilidade ambiental potencial e emergente, é apresentada nos mapas da Figura 17 e pelas imagens da Figura 18. Além disso, as coordenadas no sistema UTM, bem como a descrição das variáveis de fragilidade ambiental observadas nos locais de ocorrência e utilizadas como base para a elaboração dos mapas de fragilidade ambiental, estão sistematizadas no Quadro 2.

Figura 18 – Pontos amostrados de fragilidades potencial e emergente na RIC.



Elaboração: Ferreira, W. H. K. (2025).

Figura 19 – Pontos amostrados de feições erosivas na RIC.

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Quadro 2 – Pontos amostrados de feições erosivas e condições de fragilidade na Região Imediata de Cianorte/PR.

Ponto	Município	Formação Litoestratigráfica	Declividade	Tipo de Solo – SiBCS	Forma de Vertente	Fragilidade Potencial	Uso e Cobertura do Solo	Fragilidade Emergente	X	Y
1	Guaporema	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho típico – PVd2	Retilínea-Convergente	Alta	Pastagem	Alta	7416481	313473
2	Rondon	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-Planar	Alta	Pastagem	Alta	7406633	316799
3	Rondon	Rio Paraná	12-20%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-Planar	Alta	Pastagem	Muito Alta	7399495	319121
4	Rondon	Rio Paraná	12-20%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-Convergente	Alta	Pastagem	Alta	7398750	319147
5	Rondon	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho típico – PVd2	Retilínea-Convergente	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7394202	313049
6	Rondon	Rio Paraná	0-6%	Argissolo Vermelho típico – PVd2	Côncava-planar	Alta	Pastagem	Alta	7393606	315374
7	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Alta	Pastagem	Alta	7400164	292130
8	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Convexa-Convergente	Média	Pastagem	Alta	7399681	295564
9	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Côncava-planar	Média	Cana-de-açúcar	Alta	7382946	301315
10	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Latossolo Vermelho de textura média – LVd15	Retilínea-planar	Média	Pastagem	Alta	7383112	302674
11	Tapejara	Rio Paraná	0-6%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Pastagem	Alta	7381291	295539
12	Tapejara	Rio Paraná	12-20%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Côncava-planar	Alta	Mosaico de usos	Muito Alta	7377289	299039
13	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Côncava-planar	Alta	Pastagem	Alta	7386099	323081
14	Tapejara	Rio Paraná	0-6%	Latossolo Vermelho de textura média – LVd15	Retilínea-convergente	Média	Pastagem	Alta	7384101	321099
15	Tapejara	Goio-Erê	12-20%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Mosaico de usos	Muito Alta	7383139	322610
16	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Pastagem	Alta	7379840	320836
17	Tapejara	Rio Paraná	0-6%	Latossolo Vermelho de textura média – LVd15	Retilínea-planar	Média	Outras áreas não vegetadas	Alta	7379989	317668
18	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7377902	316525
19	Tapejara	Rio Paraná	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7377496	317191
20	São Manoel do Paraná	Rio Paraná	12-20%	Argissolo Vermelho típico – PVe1	Convexa-convergente	Alta	Outras lavouras temporárias	Alta	7410647	330769
21	Cianorte	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Alta	Mosaico de usos	Alta	7375071	324176
22	Cianorte	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Alta	Soja	Alta	7372603	327015
23	Cianorte	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7368243	323833
24	Cianorte	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7367246	329769
25	Tuneiras do Oeste	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-convergente	Alta	Cana-de-açúcar	Alta	7371437	321879
26	Tapejara	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Retilínea-planar	Média	Cana-de-açúcar	Alta	7367839	302723
27	Tuneiras do Oeste	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho típico – PVd2	Côncava-planar	Média	Cana-de-açúcar	Alta	7364855	304097
28	Tuneiras do Oeste	Goio-Erê	6-12%	Argissolo Vermelho típico – PVd5	Retilínea-planar	Média	Soja	Alta	7355413	314469
29	Tuneiras do Oeste	Goio-Erê	0-6%	Latossolo Vermelho de textura média – LVd15	Retilínea-convergente	Média	Outras lavouras temporárias	Alta	7351569	323046
30	Tuneiras do Oeste	Paranapanema	6-12%	Nitossolo Vermelho – Nvef2	Côncava-planar	Média	Mosaico de usos	Alta	7348407	306043
31	Tuneiras do Oeste	Paranapanema	6-12%	Nitossolo Vermelho – Nvef2	Retilínea-planar	Média	Pastagem	Alta	7347146	305392
32	Tuneiras do Oeste	Goio-Erê	12-20%	Argissolo Vermelho abruptico – PVe2	Côncava-planar	Alta	Mosaico de usos	Muito alta	7347567	309604

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Em relação às variáveis de fragilidade ambiental potencial, foram identificadas diversas características físico-naturais que favorecem a intensificação de impactos negativos e consequente degradação ambiental, a partir da maior fragilização do ambiente. Por consequência, observa-se que os pontos amostrados de feições erosivas ocorrem, predominantemente, sobre arenitos das formações Rio Paraná e Goio-Erê, pertencentes ao Grupo Caiuá, especialmente sobre a abrangência de Argissolos Vermelhos típicos ou com mudanças texturais abruptas e associados a declividades mais elevadas, variando entre 6% e 20%, além de formas de vertente de caráter convergente ou retilínea, com comportamento planar ou convergente.

Tais condições físico-naturais, quando associadas a atividades antrópicas desenvolvidas sem manejo adequado e ao predomínio de usos do solo com menor capacidade de proteção da superfície, favorecem de forma significativa a ocorrência de processos erosivos hídricos, tanto de natureza laminar quanto linear. Assim, observa-se uma relação direta entre as feições erosivas de maior expressividade identificadas na área de estudo e os mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente elaborados.

Dos 32 pontos amostrados, 21 encontram-se inseridos em áreas classificadas com fragilidade ambiental potencial alta ou muito alta, enquanto os 11 pontos restantes ocorrem em áreas de fragilidade média. Essa distribuição espacial evidencia a coerência dos pesos utilizados para cada uma das variáveis de fragilidade, bem como da capacidade explicativa e de predição de áreas mais suscetíveis do modelo de fragilidade proposto, ao demonstrar correspondência entre os setores de maior fragilidade ambiental e a ocorrência reais de processos de degradação do solo.

Essa configuração encontra-se em conformidade com a dinâmica regional descrita por Couto (2015), segundo a qual a margem esquerda do Rio Ivaí, setor no qual se insere a Região Imediata de Cianorte (RIC), apresenta taxas de denudação de longo prazo superiores às observadas na margem oposta, indicando um desequilíbrio estrutural na relação solo-relevo. Desse modo, a elevada fragilidade potencial identificada no mapeamento não se limita apenas às condições físicas atuais da paisagem, mas reflete uma suscetibilidade litopedológica herdada, fortemente condicionada pela transição textural na distribuição dos solos, associada ao grau de entalhe da rede de drenagem e ao comprimento das vertentes.

Ainda segundo Couto (2015), a transformação lateral Latossolo–Argissolo configura-se como um importante fator de desestabilização geomorfológica, uma vez

que as rupturas de declive associadas às zonas de transição pedológica constituem os principais setores de deflagração dos processos erosivos. Essas áreas apresentam maior propensão à concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais, potencializando a evolução de feições erosivas lineares.

Em concordância com Thomaz e Fidalski (2020), ao considerar à natureza dos materiais geológicos locais, observa-se que a erodibilidade entressulcos (*interrill erodibility*) nos solos desenvolvidos sobre os arenitos das formações do Grupo Caiuá, é elevada mesmo em vertentes planas e suavemente onduladas. Na área de estudo, identificaram-se cinco feições erosivas de maior destaque em setores com declividades entre 0% e 6%, evidenciando que, nesses ambientes, a baixa coesão dos solos arenosos facilita o desprendimento de partículas ainda nas fases iniciais do processo erosivo. Nesses casos, a resistência do solo atua como fator limitante, exigindo a adoção de práticas conservacionistas rigorosas para evitar que a erosão laminar evolua para processos erosivos lineares de maior magnitude.

Na sequência, ao considerar o mapa de fragilidade ambiental emergente, observa-se que todas as feições erosivas destacadas estão inseridas em áreas classificadas com fragilidade alta ou muito alta. Esse resultado evidencia a influência direta das classes de uso e ocupação do solo, predominantemente de caráter agrícola, na intensificação da fragilidade dessas áreas.

Quanto à distribuição das feições erosivas em relação às classes de uso e cobertura do solo, com base nos dados do Projeto MapBiomias para o ano de 2023, verifica-se que 18 feições ocorrem sobre áreas de pastagem ou mosaico de usos. Outras 9 feições estão associadas a áreas de cultivo de cana-de-açúcar, 2 feições ocorrem sobre a classe de outras lavouras temporárias, possivelmente relacionadas ao cultivo de mandioca, considerando o histórico agrícola da região, 2 feições situam-se em áreas de cultivo de soja e, por fim, uma feição encontra-se sobre a classe de outras áreas não vegetadas (ponto 17).

Esses resultados corroboram os apontamentos de Alves et al. (2021), que identificam a ocorrência de feições erosivas de maior extensão em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, especialmente durante os períodos de renovação do canavial e de entressafra, quando há maior exposição do solo e aumento das taxas de perda e mobilização de sedimentos. Da mesma forma, as áreas de pastagem mostram-se suscetíveis à erosão, sobretudo na ausência de práticas conservacionistas adequadas. Nessas condições, conforme Dias e Thomaz (2011), a compactação do

solo e da vegetação causada pelo pisoteio do gado favorece a formação de trilhas preferenciais, favorecendo o escoamento superficial concentrado e promovendo a formação de sulcos, que podem evoluir para processos de ravinamento e voçorocamento.

Dessa forma, a análise da distribuição espacial das classes de fragilidade ambiental na RIC, evidencia a necessidade de maior atenção quanto ao uso e à ocupação do solo, sobretudo nas áreas mais suscetíveis aos processos erosivos. Essa configuração reflete a interação entre os fatores físico-naturais analisados, como unidades litoestratigráficas, declividade, tipos de solo e formas de vertentes, combinados com as formas de uso e ocupação do solo, que podem atuar como condicionantes fundamentais na dinâmica dos processos morfogenéticos.

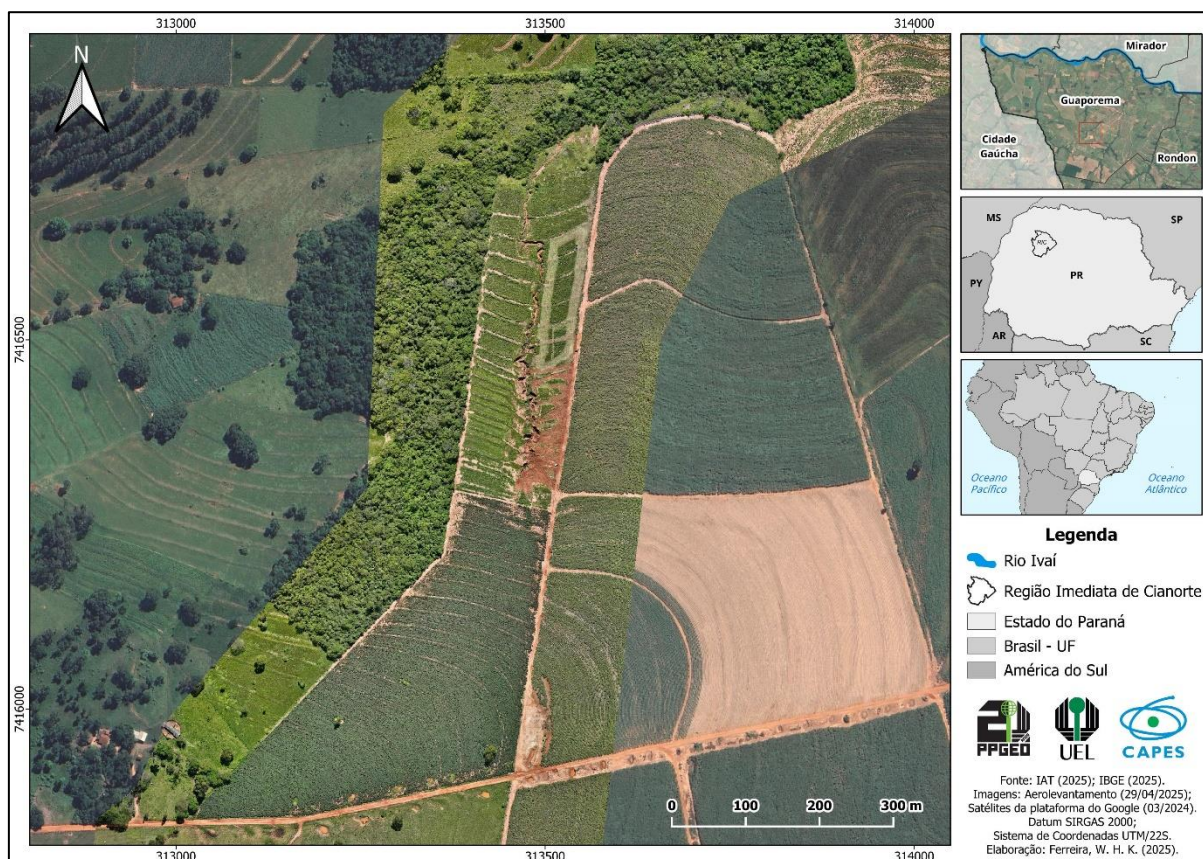
Assim, os resultados obtidos, em conjunto com a etapa de validação do modelo de fragilidade ambiental elaborado, oferecem subsídios técnicos relevantes para o planejamento territorial e ambiental, ao permitir a identificação de áreas prioritárias para a conservação do solo, a recuperação de áreas degradadas e a adoção de práticas de manejo mais efetivas e sustentáveis. Além disso, os estudos de fragilidade ambiental mostram-se essenciais para a compreensão das dinâmicas do espaço geográfico e das interações entre os diferentes fatores que atuam sobre a paisagem, contribuindo diretamente para o estabelecimento de melhores práticas para o planejamento ambiental e ordenamento territorial, visando à preservação dos recursos naturais e à mitigação de riscos ambientais.

4 ESTUDO DE CASO DE VOÇOROCA EM GUAPOREMA/PR

Na segunda etapa da dissertação, realizou-se um estudo de caso em uma voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR (Figura 20), a qual se destacou entre as feições erosivas identificadas no processo de validação dos modelos de fragilidade ambiental elaborados para a Região Imediata de Cianorte (RIC), apresentando uma grande extensão linear (cerca de 560 metros) e estágio evolutivo bem avançado, conforme ilustrado pelas imagens das Figuras 21 e 22.

O estudo de caso teve como base a geração cartográfica técnica resultante de dados precisos em campo, por meio de imagens de elevada resolução espacial capturadas durante aerolevantamento com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA). Complementarmente, foram realizadas coletas de solo em topossequência, seguidas de análises granulométricas para caracterização dos atributos físicos do solo. As atividades de campo ocorreram no dia 29 de abril de 2025, mediante autorização prévia dos proprietários da área e dos órgãos ambientais da Prefeitura Municipal.

Figura 20 – Mapa de localização da voçoroca em zona rural de Guaporema/PR.



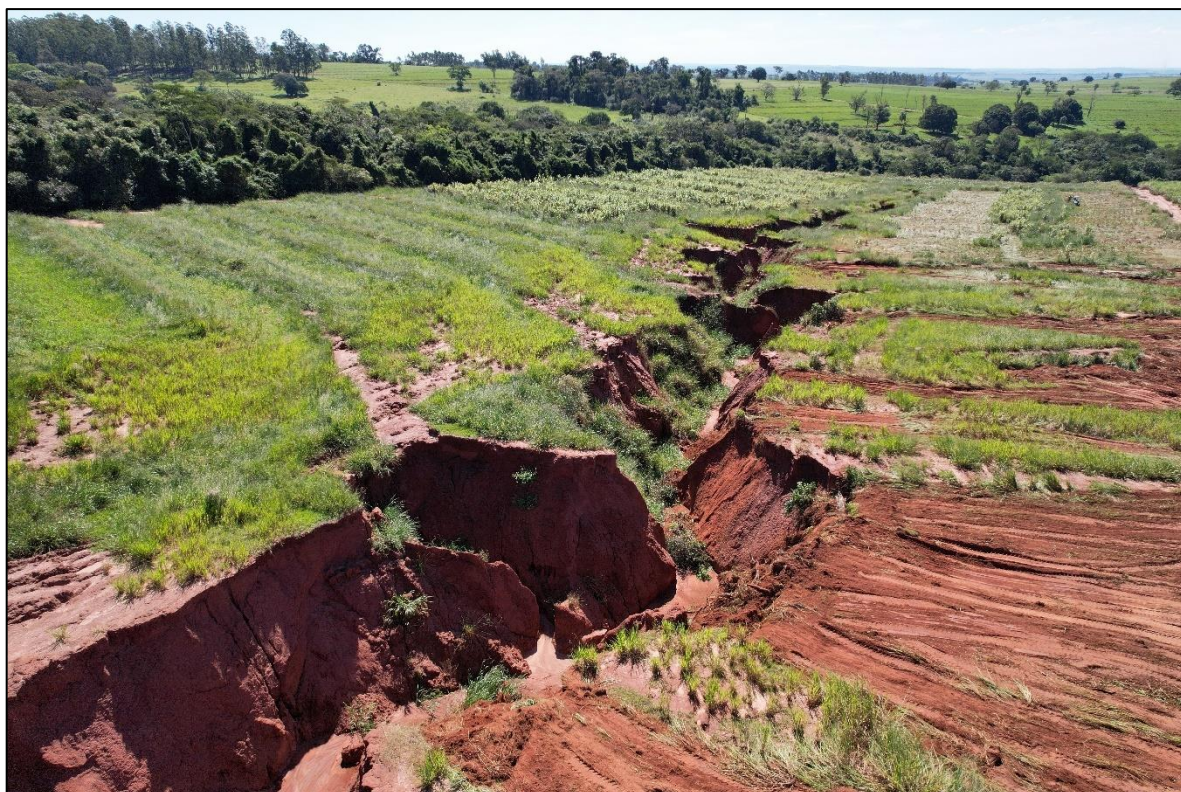
Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Figura 21 – Imagem panorâmica da voçoroca.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Figura 22 – Detalhamento a montante da voçoroca.



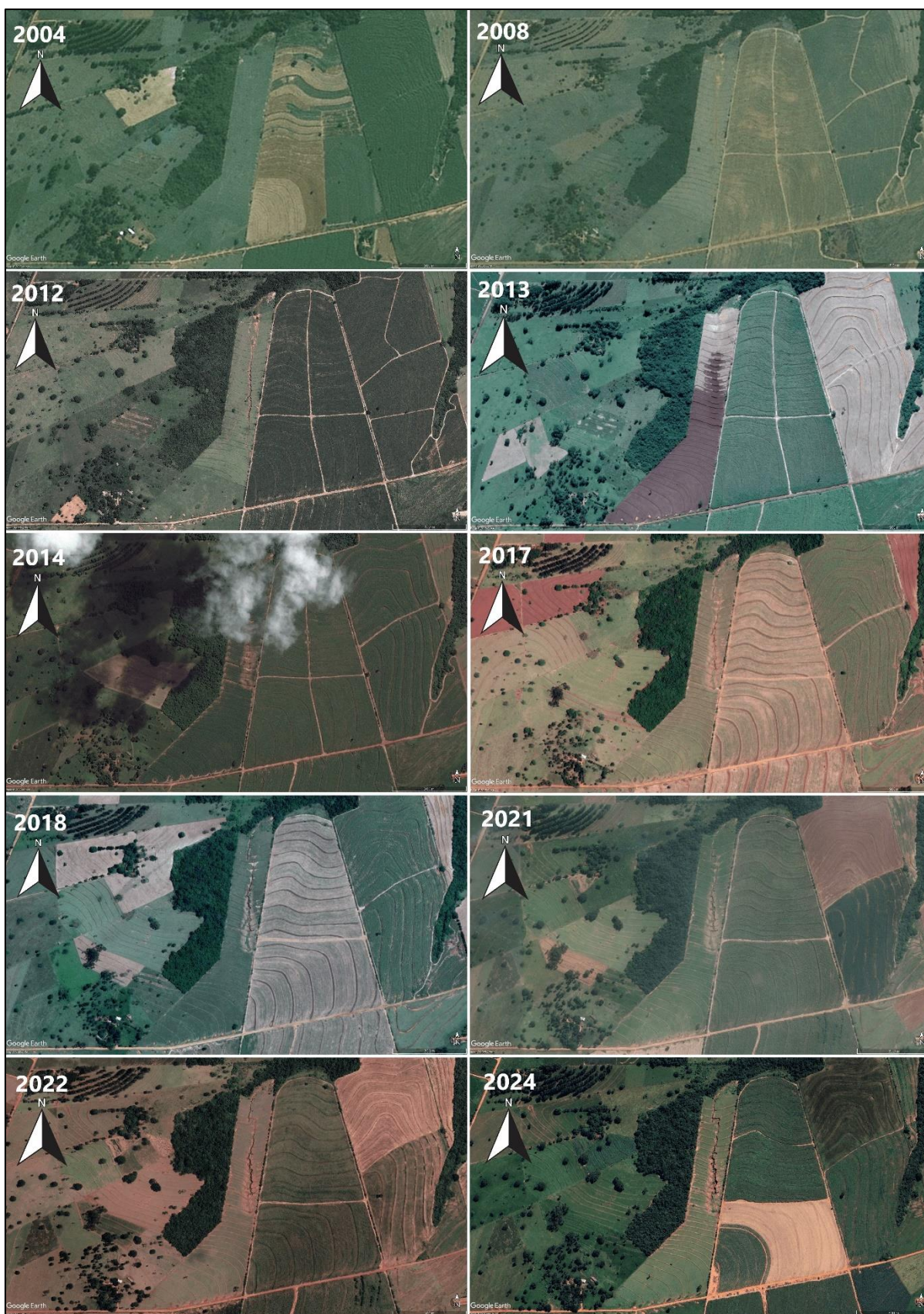
Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

Dessa maneira, conforme os dados retratados pelo Quadro 1, referentes aos pontos amostrados e às condições de ocorrência das feições erosivas na Região Imediata de Cianorte (RIC), a voçoroca do estudo de caso localiza-se entre as coordenadas UTM (Datum SIRGAS 2000, Zona 22S) de latitude 7.416.481 m e longitude 313.473 m. Dentre as condições físico-naturais da área, a mesma se encontra sobre a abrangência da formação litoestratigráfica Rio Paraná, com declividades entre 6% e 12%, solo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico de textura arenosa/média (PVd2) e forma de vertente retilínea-convergente, fatores que resultam em sua classificação como uma área de Fragilidade Potencial Alta. Quanto ao uso e cobertura do solo, conforme os dados do MapBiomas para o ano de 2023, a área é ocupada por pastagem, que em combinação com as condições físico-naturais, resulta em uma classificação da área de Fragilidade Emergente Alta.

A escolha da voçoroca em questão para o estudo de caso, deve-se não apenas à combinação de condições físicos-naturais e do uso do solo voltado para pastagem, que resultam em elevados graus de fragilidade potencial e emergente conforme identificado na análise regional da RIC, mas também em razão de uma tentativa prévia e mal sucedida de recuperação da área degradada. Por meio de análise multitemporal com imagens do software *Google Earth Pro*, constatou-se que o início do processo erosivo ocorreu entre os anos de 2004 e 2008, com evolução progressiva da voçoroca. Em 2013, foi realizada uma tentativa de recuperação por meio do preenchimento da feição erosiva, no entanto sem sucesso, uma vez que o processo erosivo já se tornou visível nas imagens do ano de 2014. Sendo assim, as imagens históricas da área em estudo são apresentadas na Figura 23.

Diante do exposto, essa etapa do trabalho teve como principais objetivos fazer a caracterização da voçoroca com análises qualitativas e quantitativas, realizar o cálculo de volume do material erodido, discutir os principais condicionantes que levaram ao surgimento e a evolução da feição erosiva. Os produtos elaborados nesta etapa visam auxiliar tanto os proprietários da área quanto órgãos ambientais municipais e estaduais na gestão e recuperação da área degradada pela voçoroca, cuja evolução dos processos erosivos até o estágio atual de voçoroca relaciona-se às interações entre a morfologia, os sistemas pedológicos e as dinâmicas hidrológicas locais.

Figura 23 – Croqui de reconstituição histórica da voçoroca em Guaporema/PR.



Fonte: Google Earth Pro (2025); **Elaboração:** Ferreira, W. H. K (2025).

4.1 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do estudo de caso da voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR com trabalho de campo realizado na data de 29/04/2025, como equipamentos foram utilizados:

- Receptor GNSS Ruide R90T L1/L2 – base, rover e acessórios;
- Gabarito para alvos fotovisíveis;
- RPA DJI Mavic 3 Enterprise;
- Controle DJI RC Pro Enterprise;
- GPS Garmin eTrex 20x
- Trado holandês para coletas de solo;
- Computador Workstation com processor AMD Ryzen 7 5700X, placa de vídeo AMD Radeon RX 7700 XT, 32GB de memória RAM e SSD 2 TB.

Para a etapa de processamento dos dados na geração cartográfica técnica com dados precisos de campo, foram utilizados os softwares:

- GNSS Solutions (Licença profissional);
- RINEX Converter 4.7.2;
- Junção 3.2;
- Agisoft Metashape Professional 2.2.1 (Licença profissional);
- Autocad 2025 (Licença educacional);
- QGIS 3.34.11 Prizren;

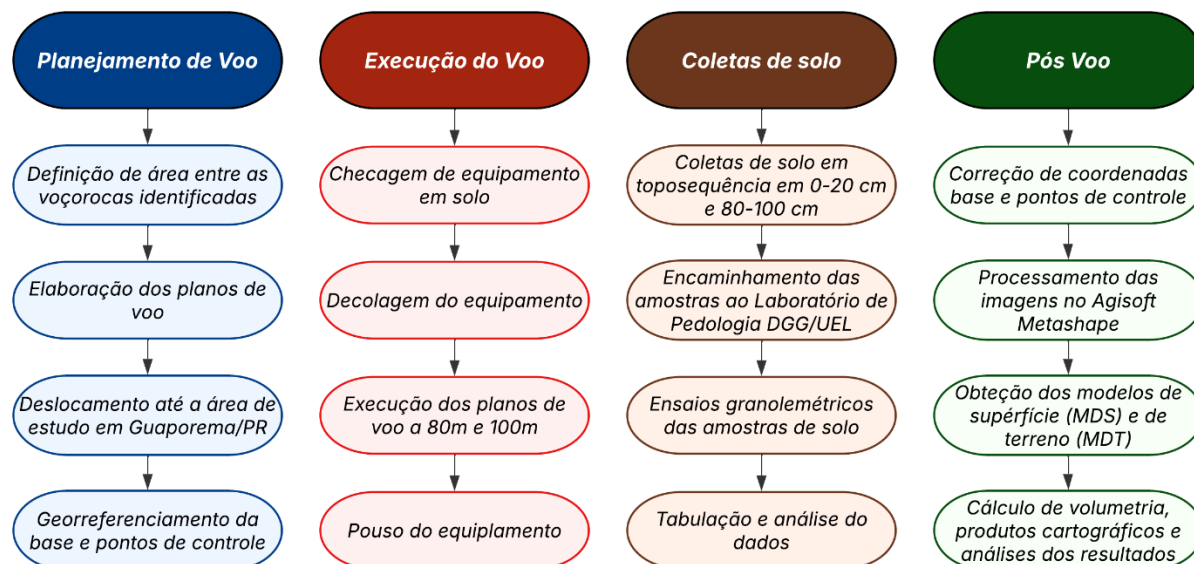
Para a construção e compatibilização do banco de dados usados nesta etapa do trabalho, todo o material processado foi georreferenciado no sistema de coordenadas UTM, Datum SIRGAS 2000, Zona 22S.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A partir da definição do local para o estudo de caso, a metodologia adotada, fundamentou-se principalmente nos trabalhos Oliveira (2020), Gomes, Gomes e Alves Junior (2023) e Nóbrega *et al.* (2023), a partir da integração de técnicas de aerolevantamento com RPA e coletas de amostras de solo, cujo a sequência das

etapas da metodologia pode ser visualizada pelo organograma da Figura 24.

Figura 24 - Sequência metodológica para realização do estudo de caso da voçoroca.



Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

4.2.1 Georreferenciamento da poligonal de base e pontos de controle

O georreferenciamento constitui um processo fundamental de atribuição de coordenadas precisas aos elementos observados em campo, sendo essencial para a acurácia de produtos cartográficos derivados de aerolevantamentos. Para o estudo de caso, foram georreferenciados seis pontos de controle fotovisíveis, utilizando-se o método de Posicionamento Relativo Estático Rápido. O levantamento foi realizado com o receptor GNSS Ruide R90T, com tempo de ocupação de 7 minutos em cada ponto de controle, enquanto a estação base permaneceu em operação por 2 horas e 20 minutos. Os pontos foram demarcados em campo com um gabarito de madeira e cal, facilitando sua identificação nas fotografias aéreas (Figura 25).

Para obtenção das coordenadas com alta precisão, os dados provenientes da estação base foram submetidos ao sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), disponível na homepage do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), possibilitando a correção das órbitas e relógios dos satélites utilizando efemérides finais. Na sequência, os dados de campo foram convertidos no formato RINEX por meio do software RINEX Converter 4.7.2, de modo a viabilizar a interoperabilidade entre diferentes softwares. Com as linhas de base corrigidas, foi

feita a correlação entre os dados da estação base e do rover por meio do software GNSS Solutions, proporcionando assim qualidade em todos os pontos coletados pelo receptor rover ao longo da área de estudo.

Figura 25 – Pontos de controle e base estacionária para o georreferenciamento.



Fonte: Ferreira, W. H. K (2025).

Os pontos de controle foram então corrigidos a partir da estação de base e convertidos no software Junção 3.2, sendo posteriormente integrados em arquivos dos softwares AutoCAD 2025 (versão educacional) e QGIS 3.34.11, compondo o banco de dados cartográficos do estudo de caso, cujo as coordenadas dos pontos de controle e da estação base são visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Coordenadas e altitude da estação base e pontos de controle.

Ponto	Coordenadas		
	X – Latitude (m)	Y – Longitude (m)	Z – Altitude (m)
Estação base	7416336,706	313506,472	385,425
PC 1	7416269,756	313504,019	391,653
PC 2	7416294,479	313381,763	391,979
PC 3	7416452,111	313406,033	378,196
PC 4	7416642,739	313438,793	360,467
PC 5	7416705,639	313563,210	355,735
PC 6	7416503,065	313533,890	372,237

Elaboração: Ferreira, W. H. K (2025).

4.2.2 Levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada - RPA

A aerofotogrametria com uso de RPA apresenta diversas vantagens técnicas e econômicas em relação aos métodos convencionais de obtenção de imagens aéreas, especialmente em áreas de menor extensão. Os produtos gerados a partir dessa técnica são de grande utilidade para diagnósticos ambientais, subsidiando ações voltadas à recuperação de áreas degradadas.

Nesse contexto, o RPA utilizado foi um DJI Mavic 3 Enterprise (Figura 26), classificado como um equipamento profissional se tratando de drones multirotores comerciais de pequeno porte. O RPA é equipado com um sensor CMOS de 20 megapixels, obturador mecânico e zoom de até 56x, além de sistemas de posicionamento por satélite GPS, Galileo, BeiDou e GLONASS, com peso máximo de decolagem de 1.050 g. O drone também apresenta um sistema de estabilização da câmera (*Gimbal*), que contribui significativamente para a qualidade das imagens obtidas durante os voos (DJI, 2025). O equipamento encontra-se devidamente homologado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e cadastrado na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), atendendo todas às exigências legais para operações de aerolevantamento no Brasil.

Figura 26 – RPA DJI Mavic 3 Enterprise e controle DJI RC Pro Enterprise.



Fonte: Ferreira, W. H. K (2025).

Para a construção do banco de dados do estudo de caso, foram realizados dois voos, denominados Missão 01 e Missão 02 (Figura 27), elaborados no software do controle do equipamento DJI RC Pro Enterprise, configurando-se parâmetros de altura, direção, velocidade de voo e taxas de sobreposição das imagens capturadas.

Dessa maneira, ambas as missões foram elaboradas com 80% de sobreposição frontal e 70% de sobreposição lateral entre as imagens capturadas. A Missão 01 foi realizada a uma altura de 100 metros, totalizando 409 fotos capturadas, enquanto a Missão 02 foi realizada a 80 metros de altura, com um total de 567 fotos capturas. Os voos foram conduzidos sob a categoria de operação VLOS (*Visual Line of Sight*), na qual o piloto mantém contato visual direto com o RPA, sem o uso de lentes ou equipamentos auxiliares, sobrevoando uma área de 50,6275 hectares, cobrindo tanto a área diretamente afetada pela voçoroca quanto a suas adjacências.

Figura 27 – Planos de voos das missões 1 e 2 para estudo da voçoroca.



Fonte: Ferreira, W. H. K (2025).

Contudo, foram observadas condições contrastantes em campo no dia do aerolevanteamento (29/04/2025) em relação àquelas previamente estimadas com base nas imagens da plataforma *Google Earth Pro*, datadas de março de 2024. Entre as principais divergências, destacam-se: o arrendamento da parte mais elevada do talhão para o cultivo de mandioca; a presença de vegetação herbácea com altura significativa destinada à produção de forragem, que estava sendo prensada mecanicamente com trator durante os voos; o descarte de entulhos e de solo removido por retroescavadeira na margem direita da voçoroca e o crescimento de vegetação arbustiva e de árvores nas paredes da feição erosiva.

Diante desse cenário, para garantir a qualidade dos produtos gerados, optou-se por processar integralmente apenas as imagens da Missão 1, realizadas a 100 metros de altura em relação ao ponto de decolagem. Já na Missão 2, foram processadas as imagens apenas da área diretamente afetada pela voçoroca, totalizando 146 fotos. Adicionalmente, foram aplicadas etapas de classificação da nuvem densa de pontos e geração de malha, para assegurar um cálculo mais apurado de volume do material erodido.

4.2.3 Processamento das fotos dos aerolevanteamentos com RPA

O processamento das fotos capturadas nos aerolevanteamentos das Missões 1 e 2 com RPA, constitui uma das etapas fundamentais para a geração dos produtos cartográficos que subsidiaram o estudo de caso da voçoroca localizada na zona rural do município de Guaporema/PR. A correta execução dessa rotina, aliada ao maior rigor técnico adotado em cada uma de suas fases, contribuiu diretamente para a qualidade e a precisão dos produtos gerados, garantindo uma melhor representação da realidade observada em campo.

Para o processamento das fotos, foi utilizado o software *Agisoft Metashape 2.2.1* (licença educacional), comumente chamado apenas de *Metashape*, responsável pelo alinhamento das fotos, georreferenciamento dos pontos de controle, modelagens tridimensionais e geração dos ortomosaicos. Na sequência, todos os mapas temáticos que corroboram para a discussão dos resultados do estudo de caso foram elaborados no software QGIS. Toda a sequência metodológica adotada e os rigores utilizados no processamento das imagens obtidas pelo aerolevanteamento com RPA, é sintetizada nas informações do Quadro 3.

Quadro 3 – Etapas de processamento dos aerolevantamentos com RPA nos softwares Agisoft Metashape e QGIS.

Etapa	Software	Processo	Parâmetros	Descrição	Produto
1	Metashape	Alinhamento de fotos	<i>Highest</i> - Indicado para conferir maior fidelidade e qualidade aos processamentos subsequentes	Correlação entre as imagens por meio de pontos de amarração da coloração dos pixels e coordenadas geográficas	Base para o modelo 3D
2	Metashape	Georreferenciamento	Sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)	Associação de coordenadas geográficas corrigidas ao banco de dados	Base 3D georreferenciado
3	Metashape	Geração da Nuvem Densa de Pontos	<i>High</i> – Indicado para assegurar maior acurácia nos produtos derivados de seu processamento	Representação inicial do terreno através dos pontos georreferenciados	Visualização preliminar da superfície do terreno
4	Metashape	Classificação da Nuvem Densa de Pontos	Classificações automatizada e manual da nuvem densa de pontos	Identificação e classificação de pontos associados ao nível de solo exposto	Visualização preliminar do terreno ao nível do solo
5	Metashape	Geração da Malha	<i>Low</i> - Redução da quantidade de triangulações e linhas altimétricas suavizadas	Refinamento da nuvem e triangulação de pontos em uma superfície 3D	Modelo 3D de triangulação do terreno
6	Metashape	Suavização da Malha	Força de suavização 3	Suavização do modelo tridimensional de terreno	Modelo 3D suavizado
7	Metashape	Modelo Digital de Terreno (MDT)	Processado a partir da malha suavizada da nuvem densa de pontos classificada ao nível de solo	Modelo de representação do relevo ao nível do solo, excluindo os elementos naturais e antrópicos	Arquivo <i>Raster</i> de alta resolução com valores de altitude
8	Metashape	Cálculo de Volume da Voçoroca	Delimitação de polígono dos limites visuais da voçoroca e uso da ferramenta <i>Measure</i>	Relatório de informações de área, perímetro, perfil e volume de voçoroca com base no MDT e delimitação da voçoroca	Relatório em formato PDF
9	Metashape	Ortomosaico	Elaborado a partir dos modelos digitais de elevação (MDE)	Imagem aérea corrigida geometricamente	Mosaico de imagens aéreas ortoretificadas
10	QGIS	Elaboração dos mapas temáticos	-	Criação de mapas temáticos para discussão dos resultados	Mapas de localização, perfis transversais da voçoroca e de frações granulométricas e classes de solo

Fonte: Gomes, Gomes e Alves Junior (2023); Ferreira (2025). **Org.** Ferreira, W. H. K. (2025).

Ao iniciar um novo projeto no *Metashape*, o fluxo de trabalho (aba *Workflow*) é apresentada de forma simples e intuitiva, com as ferramentas sendo disponibilizadas a partir de uma sequência lógica e pré-estabelecida. A primeira etapa consiste na inserção das fotos capturadas no aerolevanteamento. Após a importação das fotos, foi realizada a etapa de alinhamento das imagens (*Align*), na qual o software determina automaticamente a posição e orientação da câmera para cada foto obtida. Essa etapa gera a chamada nuvem de pontos esparsa (*sparse cloud*), utilizando-se o rigor máximo “*highest*”, e que assegura maior acurácia e qualidade aos produtos gerados nas etapas subsequentes do processamento.

Com o devido alinhamento das imagens realizado, a próxima etapa consiste no georreferenciamento dos pontos de controle, iniciando pela conversão do sistema de coordenadas do projeto para o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas – SIRGAS 2000, sistema métrico Zona UTM 22S (EPSG:31982), utilizando-se a ferramenta “*Convert*” na aba “*Reference*”. Tal procedimento visa a padronização e comparação com os demais produtos elaborados na dissertação, bem como para a realização do cálculo de volume da voçoroca.

Em seguida, ainda na aba “*Reference*”, os pontos de controle foram inseridos ao projeto por meio da ferramenta “*Import reference*”, a partir de um arquivo de texto (.txt) contendo as coordenadas corrigidas dos seis pontos georreferenciados em campo. Para cada ponto de controle inserido, o *Metashape* cria um marcador que deve ser posicionado manualmente ao centro dos alvos fotovisíveis nas imagens (Figura 28). Em conjunto com as ferramentas “*Reference Settings*” e “*Optimize Camera Alignment*”, também é realizado a correção da geometria do alinhamento e do georreferenciamento da “*Sparce cloud*”, proporcionando maior refinamento de todo o banco de dados.

Após as correções das coordenadas com base nos pontos de controle, foi possível observar uma redução significativa do erro médio nos processamentos. Para o processamento das fotos da Missão 1, que abrange toda a área sobrevoada, o erro médio foi reduzido de 1,336 m para apenas 0,008 m. Já para a Missão 2, referente à área diretamente afetada pela voçoroca, o erro médio passou de 1,909 m para 0,009 m. Esses resultados asseguram uma elevada acurácia e precisão, conferindo alta confiabilidade às etapas subsequentes de processamento.

Figura 28 – Correção do marcador e georreferenciamento das imagens.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Após os georreferenciamento e o refinamento do banco de dados, foi utilizada a ferramenta “*Build Point Cloud*”, responsável pela geração da nuvem densa de pontos e que serve de base para a geração de modelos 3D de alta qualidade. Além disso, a nuvem densa de pontos também é usada como base para análises mais detalhadas, como medições de áreas, volumes e avaliações topográficas.

Em conformidade com Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), o nível de rigor adotado no processamento da nuvem densa de pontos influencia diretamente no tempo de processamento, no tamanho dos arquivos gerados e na resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) resultante, cujo o rigor utilizado deve ser coerente com os objetos de pesquisa.

Considerando que um dos objetivos centrais do estudo de caso é o cálculo do volume do material erodido pela voçoroca, foi necessário adotar um tratamento com rigor mais elevado. Ainda segundo Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), ao comparar diferentes tratamentos de um mesmo aerolevanteamento com técnicas convencionais de topografia como tratamento testemunha, visando o cálculo de volume de uma voçoroca na área rural do município de Anhembi/SP, constatou-se que a redução do rigor de processamento desta etapa acarreta em redução dos valores, indicando uma relação direta entre o grau de detalhamento da nuvem densa de pontos e a precisão do volume erodido estimado.

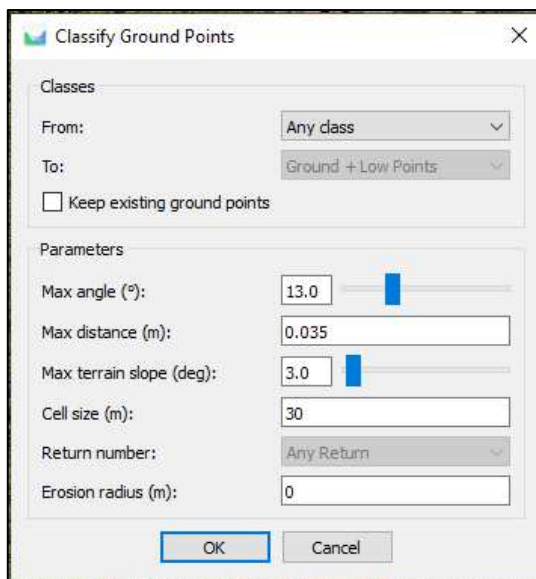
Dessa forma, optou-se pela geração da nuvem densa de pontos com nível de rigor “*High*”, assegurando maior acurácia nos produtos derivados, além de maior confiabilidade na quantificação do volume de material removido. Para a Missão 1, foram gerados um total de 283.700.386 pontos, enquanto para a Missão 2, foram gerados 105.210.279 pontos.

Todavia, devido à significativa discrepância já comentada entre as condições observadas em campo no dia do aerolevanteamento (29/04/2025) em relação àquelas previamente estimadas a partir da última imagem disponibilizada pela plataforma *Google Earth Pro*, datadas de março de 2024, tornou-se necessária a realização de uma etapa adicional de classificação da nuvem densa de pontos para o processamento das fotos da Missão 2.

Nesse contexto, a classificação da nuvem densa de pontos teve como objetivo identificar e classificar os pontos correspondentes ao solo exposto dentro, visando reduzir os ruídos na modelagem tridimensional do terreno e na representação da superfície. Tais ruídos, podem comprometer diretamente a precisão da análise planialtimétrica da área e o cálculo do volume, provocados principalmente pela vegetação mais densa e copa das árvores, especialmente no interior da voçoroca. Além disso, essa classificação também é fundamental para a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT), uma vez que permite a exclusão de elementos naturais (como a vegetação) e elementos antrópicos (como entulhos, edificações e cultivos agrícolas), assegurando uma representação mais fiel do relevo ao nível do solo.

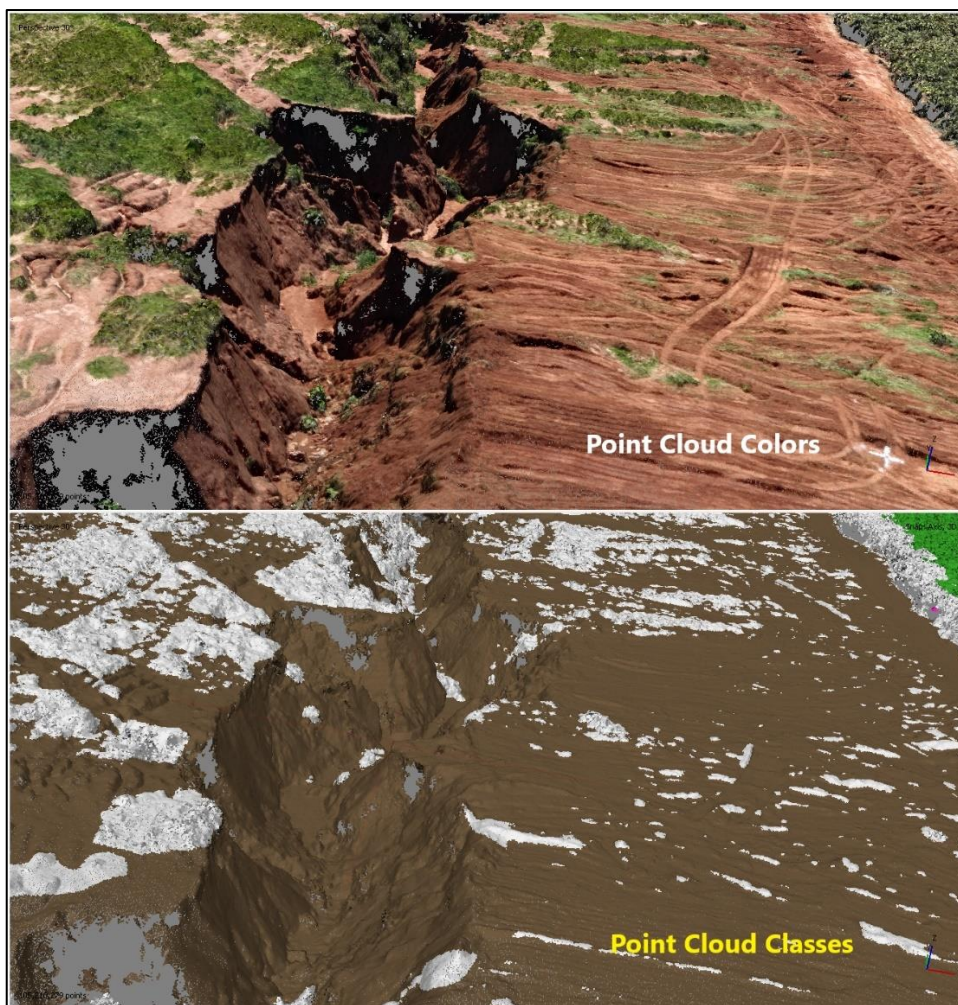
Para tanto, foi utilizada a ferramenta “*Classify Ground Points*”, localizada na aba *Tools*, na opção *Point Cloud*. O uso dessa funcionalidade permite a classificação prévia e automatizada dos pontos correspondentes ao solo exposto, sendo os parâmetros adotados nessa etapa apresentados na Figura 29, definidos a partir de sucessivos testes até a sua definição. Contudo, devido às condições contrastantes observadas em campo, foi necessária uma etapa complementar de classificação manual de pontos de solo exposto que não foram identificados automaticamente, especialmente no interior da voçoroca (Figura 30). Essa etapa foi realizada por meio da ferramenta de seleção “*Free-Form Selection*”, e, após a seleção dos pontos, foi acessada a funcionalidade “*Assign Class*”, ainda na aba *Tools* e na opção *Point Cloud*, definindo-se os parâmetros como “*From: Any Class*” e “*To: Ground*”.

Figura 29 – Parâmetros da ferramenta “Classify Ground Points”.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

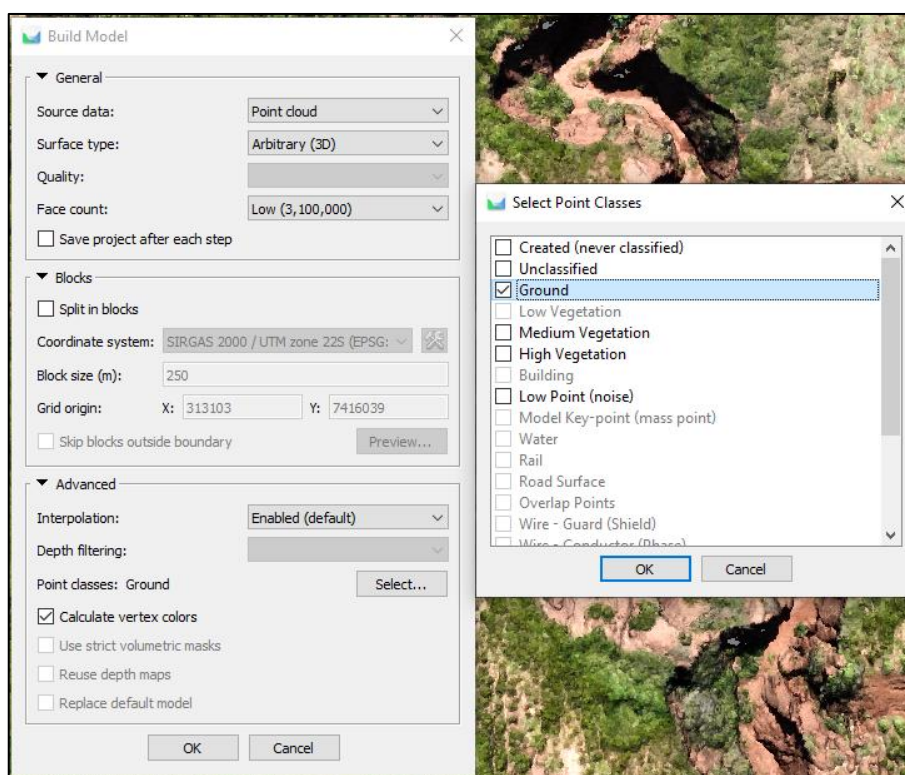
Figura 30 – Processo complementar de classificação manual da nuvem de pontos.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Com base nas informações obtidas a partir da classificação da nuvem densa de pontos, a etapa seguinte consistiu na geração da malha tridimensional (*Model*) e do modelo 3D da área de estudo. Para isso, foi utilizada a ferramenta “*Build Model*”, selecionando-se como entrada de referência a opção *Point Cloud*. Nas configurações avançadas (*Advanced*), foi definida apenas a classe de pontos *Ground*, conforme ilustrado na Figura 31. Na sequência, foi aplicada a ferramenta “*Smooth Model*”, com o nível de suavização ajustado para força 3, com o objetivo de reduzir a quantidade de triangulações e suavizar as curvas de nível.

Figura 31 – Opções de geração da malha tridimensional.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

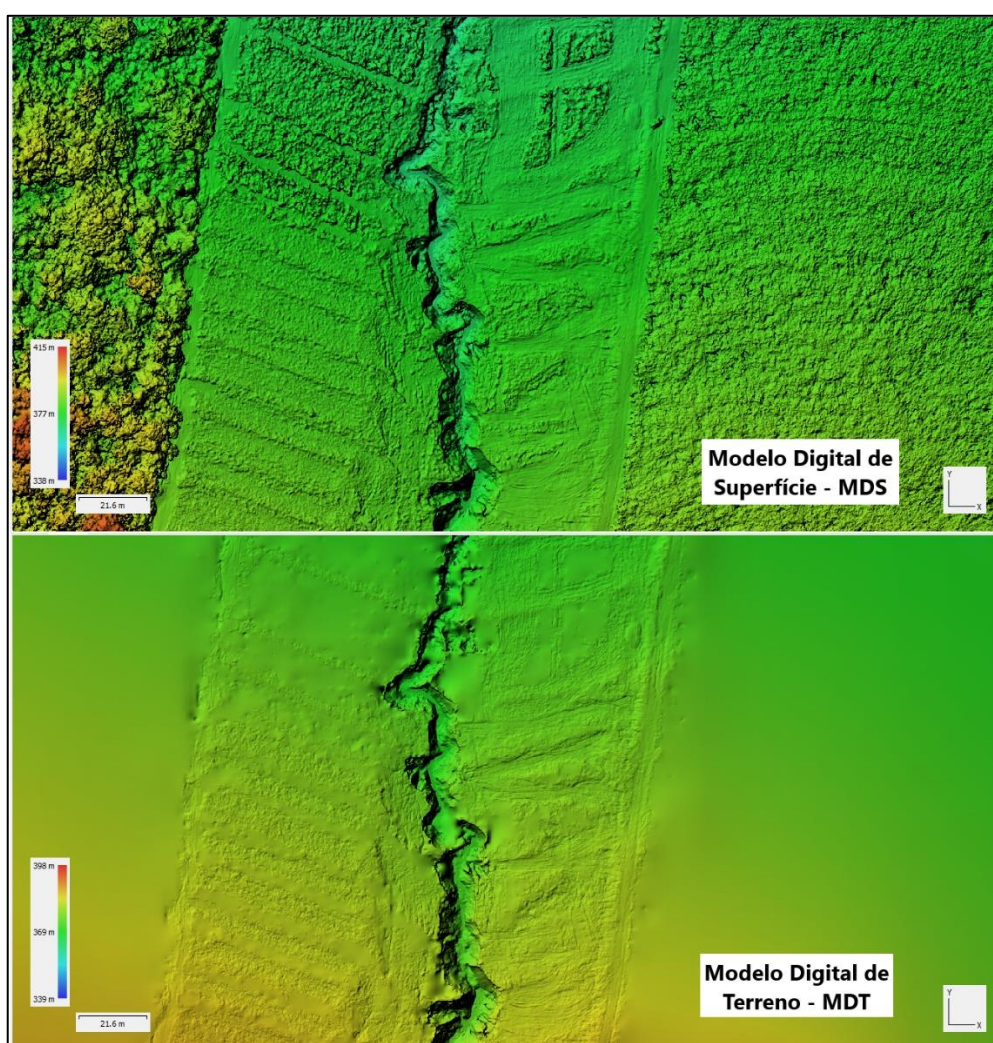
Na sequência, foi realizada a geração do modelo digital de elevação (MDE), ou na língua inglesa, *Digital Elevation Model* (DEM), o qual representa uma modelagem matemática da superfície terrestre, estruturada como uma grade regular de valores altimétricos. No *Metashape*, o MDE pode ser gerado a partir da nuvem densa de pontos, da nuvem de pontos esparsos ou de uma malha tridimensional, sendo utilizado como base para medições planialtimétricas, como cálculo de área e volume.

No caso do processamento da Missão 1, o modelo foi gerado diretamente a partir da nuvem densa de pontos, sem a realização prévia da classificação dos pontos

ou da geração da malha tridimensional, resultando, portanto, em um Modelo Digital de Superfície (MDS), incluindo elementos naturais e antrópicos como a vegetação e culturas agrícolas, refletindo a superfície visível com base na elevação total registrada. A resolução espacial obtida do MDS foi de 7,13 cm/pixel.

Por sua vez, o modelo gerado para a Missão 2 corresponde a um Modelo Digital de Terreno (MDT), processado por meio da malha tridimensional suavizada e representando com maior precisão o relevo ao nível do solo, excluindo os elementos naturais e antrópicos por meio da classificação da nuvem densa de pontos. O MDT apresentou resolução espacial de 6,35 cm/pixel, sendo mais apropriado para o cálculo do material erodido nas condições da realidade de campo, seguido da geração de curvas de nível (*Generate Contours*) com equidistância de 1 m. Sendo assim, a distinção entre o MDS e o MDT é melhor observada nas imagens da Figura 32.

Figura 32 – Distinção entre o MDS e MDT da voçoroca em estudo.

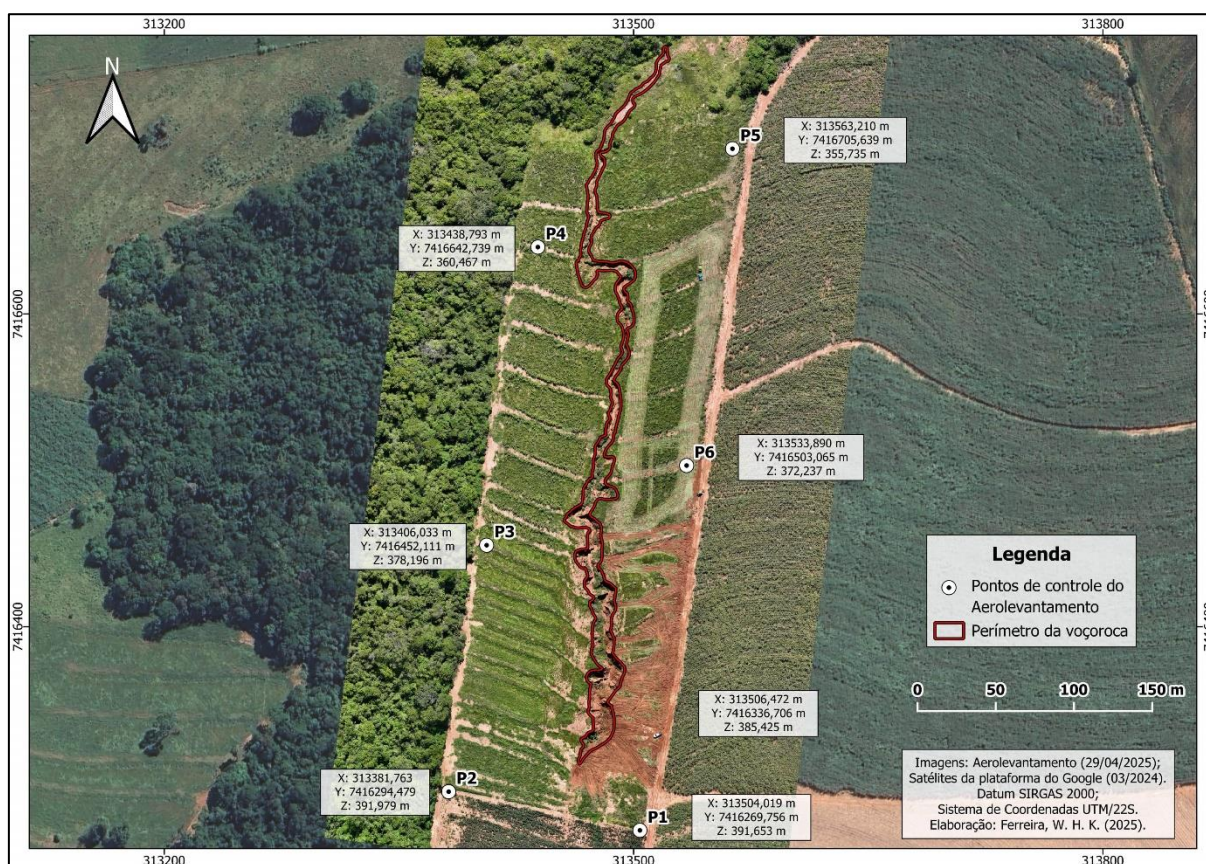


Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Após o processamento dos modelos de elevação para cada uma das missões, foram gerados os ortomosaicos, com resolução espacial de 3,57 cm/pixel para a Missão 1 e de 3,18 cm/pixel para a Missão 2. Essa diferença entre as resoluções deve-se às diferentes alturas de voo a partir do mesmo ponto de decolagem, de 100 metros para a Missão 1 e de 80 metros para a Missão 2, influenciando um pouco sobre o nível de detalhamento das imagens.

Por fim, para a estimativa do volume de material erodido da voçoroca, com base no processamento das imagens da Missão 2, foi delimitado um polígono contendo 856 vértices, com perímetro de 1.214,60 m e área de 4.375,80 m², correspondentes aos limites visíveis da feição erosiva, conforme apresentado na Figura 33. O cálculo de volume da voçoroca foi realizado por meio da ferramenta "Measure.", clicando com o botão direito do mouse sobre o traçado do polígono no *Metashape*, a qual fornece um relatório contendo informações como área, perímetro, perfil e volume de voçoroca com base no MDT processado e o polígono definido.

Figura 33 – Polígono para cálculo de volume e localização dos pontos de controle.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Para uma estimativa mais precisa do volume de solo erodido da voçoroca, conforme destacam Gomes, Gomes e Alves Junior (2023), o uso de produtos cartográficos de alta resolução espacial, obtidos por meio de aerolevantamentos com RPA, permite uma representação do relevo mais fiel às condições reais de campo. Quando esses produtos são processados a partir de uma rotina metodológica adequada e com elevado rigor na definição dos parâmetros, tornam-se especialmente eficientes para a análise de áreas afetadas por voçorocas, caracterizadas por variações abruptas e mudanças acentuadas em relação ao relevo original. Esse procedimento, adotado na presente pesquisa, contribui de forma significativa para a confiabilidade da estimativa do volume de material erodido e melhor explorada na etapa de discussão dos resultados.

4.2.4 Coletas de amostras de solo

Para melhor entendimento dos condicionantes pedológicos relacionados à evolução da voçoroca estudada no município de Guaporema/PR, a análise granulométrica do solo também constituiu uma etapa fundamental. Nesse sentido, destaca-se a realização de levantamentos de solos em topossequência, que possibilita maior representatividade da realidade de campo e melhor compreensão das variações nos atributos pedológicos ao longo da vertente, fundamentado principalmente pelos trabalhos de Oliveira (2020) e Nóbrega *et al.* (2023).

A metodologia da topossequência, adotada para o estudo de caso, fundamenta-se nos critérios estabelecidos por Boulet *et al.* (1982), os quais definem que o respectivo método consiste na seleção de três pontos ao longo de um transecto no topo, na meia encosta e na baixa vertente, com o objetivo de analisar as variações verticais do perfil do solo. Essa abordagem minimiza a generalização do relevo entre os pontos, permitindo uma avaliação mais precisa das variações granulométricas ao longo da vertente, o que contribui para a compreensão da erodibilidade dos solos e da incidência de processos erosivos, como ravinas e voçorocas.

Dessa forma, foram coletadas amostras compostas de solo em duas profundidades próximas aos seis pontos de controle que foram georreferenciados para o aerolevantamento com RPA, totalizando 12 amostras. As coletas foram realizadas com um trado holandês, instrumento que possibilitou a obtenção de amostras deformadas em pontos com coordenadas geográficas e cotas altimétricas

previamente conhecidas. As amostragens foram feitas em duas profundidades padronizadas: de 0 a 20 cm (camada superficial) e de 80 a 100 cm (camada subsuperficial), com o intuito de permitir a caracterização textural dos horizontes e classificar os tipos de solos ao longo da vertente onde se desenvolve a voçoroca. As amostras foram devidamente rotuladas e encaminhadas ao Laboratório de Pedologia do Departamento de Geologia e Geomática da Universidade Estadual de Londrina (DGG/UEL), conforme ilustrado na Figura 34.

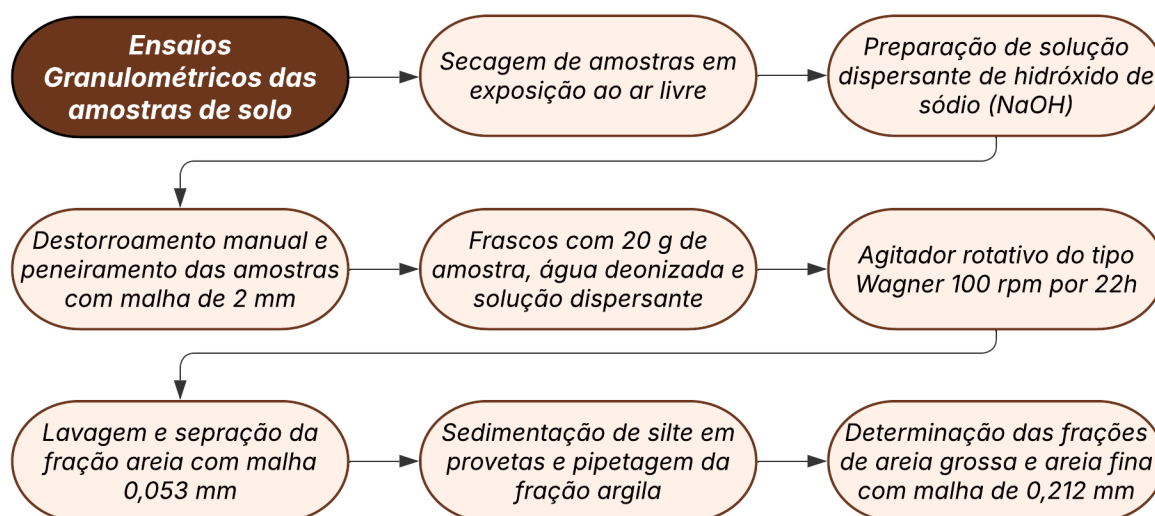
O principal objetivo dessa etapa foi a análise granulométrica, que visa a quantificação da distribuição por tamanho das partículas individuais de minerais do solo, um importante atributo para caracterização de solos e de sua susceptibilidade aos processos erosivos, feita em topossequência. As análises seguiram os procedimentos metodológicos estabelecidos no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2018), cujas as etapas encontram-se sistematizadas no organograma da Figura 35.

Figura 34 – Coleta de solo com trado holandês e organização de amostras.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Figura 35 – Sequência de procedimentos para a análise das amostras de solo.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

4.2.5 Ensaios Granulométricos das amostras de solo

Conforme destacado por Teixeira *et al.* (2018), o procedimento operacional de ensaios granulométricos visa a desagregação e a individualização das partículas de solo, utilizando uma combinação de energia mecânica e ação química. Esse processo resulta na formação de uma suspensão estabilizada, a partir da qual as frações granulométricas são quantificadas por meio de peneiramento (fração areia) e sedimentação (frações silte e argila), empregando-se no caso, o Método da Pipeta.

Para a realização dos ensaios granulométricos, inicialmente destaca-se a preparação da solução dispersante que foi aplicada em cada uma das amostras. Em solos muito intemperizados, como Latossolos e Argissolos, para essa solução o reagente indicado é o hidróxido de sódio (NaOH). Para sua composição, foram pesados 40 gramas de NaOH e dissolvidos em 1 litro de água deionizada, utilizando um Erlenmeyer e realizando a agitação da mistura com bastão de vidro até a completa dissolução do reagente. A utilização do reagente junto à água deionizada tem como função dispersar os íons presentes nos coloides da fração argila, promovendo a suspensão das partículas mais finas do solo, essencial para a análise granulométrica.

Após a coleta, as amostras foram abertas e deixadas para secagem ao ar livre por uma semana, sendo submetidas ao preparo inicial de destorroamento manual dos materiais. Esse preparo visa a adequação e homogeneização das amostras aos

procedimentos analíticos no laboratório, a partir da desagregação dos torrões maiores de solo e tendo a cautela para não fragmentar concreções ou fragmentos de rocha inconsolidados. Em seguida, foi realizado o peneiramento com uma malha de 2 mm, com o objetivo de remover materiais grosseiros e restos de matéria orgânica, como raízes e outros fragmentos vegetais. No caso das amostras analisadas, não foram identificadas concreções, o que facilitou o preparo para as etapas subsequentes.

A partir das amostras destorroadas e peneiradas, foram pesadas 20 gramas de solo por meio de uma balança de precisão de quatro dígitos em placas de petri. Em seguida, o material foi colocado em frascos de vidro, aos quais foram adicionados 100 mL de água deionizada e 10 mL da solução dispersante de hidróxido de sódio (NaOH). Também foi preparada uma amostra de controle (13ª amostra), utilizando as mesmas proporções, porém sem a adição de solo. Todos os frascos foram inseridos em um agitador rotativo do tipo Wagner, operando a 100 rpm por 16 horas, com o objetivo de promover a completa dispersão dos coloides presentes nas amostras, conforme ilustrado nas imagens da Figura 36 e 37.

Figura 36 – Pesagem e preparo das amostras com solução dispersante (NaOH).



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Figura 37 – Organização das amostras em agitador rotativo do tipo Wagner.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Após o término do período de agitação das amostras, foi iniciado o procedimento de lavagem do material para separação das frações que foram dispersas. Para isso, o conteúdo de cada frasco foi passado para uma peneira com malha de 0,053 mm (nº 270), posicionada sobre um funil e uma proveta milimetrada de 1 litro. Durante a lavagem, foram aplicados jatos de água deionizada sobre o material retido na peneira até que o material que passava pela malha deixasse de apresentar turbidez. Em seguida, utilizando-se uma pisseta, a proveta foi completada com água deionizada até o volume exato de 1 litro.

O material retido na peneira durante o processo de lavagem corresponde à fração areia das amostras. Esse material foi transferido para placas de petri previamente rotuladas e pesadas, sendo posteriormente dispostas em estufa a 105 °C por tempo suficiente para garantir a completa secagem. Após esse procedimento, foi realizada a pesagem final das placas de petri contendo o material seco, permitindo a determinação da fração de areia por meio da diferença entre as massas das placas com e sem o solo. Observou-se uma quantidade expressiva de fração areia em todas as amostras, o que reflete a predominância de solos arenosos e altamente suscetíveis à erosão na área de estudo, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Fração areia e argila das amostras de solo nas placas de petri.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Objetivando identificar as frações de silte e argila das amostras, foram preparadas 12 provetas com as respectivas amostras já separadas da fração areia, bem como a 13ª amostra de controle em branco. Para tanto, utilizou-se um agitador para homogeneizar o material em suspensão por 1 minuto, anotando-se o horário final de agitação de cada proveta. Em seguida, foi inserido um termômetro na proveta da amostra de controle, sendo registrada a temperatura da suspensão em 21 °C, conforme ilustrado na Figura 39.

Com base, nos parâmetros da Tabela 1 do Manual de Métodos de Análise de Solo (Teixeira *et al.*, 2018, p.110), que apresenta os tempos de sedimentação da fração silte (0,053 mm a 0,002 mm) em função da temperatura da suspensão e da profundidade de coleta (5 cm), foi determinado um tempo de espera de 3 horas e 36 minutos para a sedimentação do silte a 21 °C.

Passado o tempo estipulado de sedimentação, foi iniciado o processo de pipetagem de cada uma das amostras, utilizando-se uma pipeta de 50 mL com marcação a 5 cm da extremidade, a fim de coletar a fração de argila (> 0,002 mm) ainda em suspensão. O material coletado foi transferido para placas de petri rotuladas e pesadas, sendo dispostas em estufa a 105 °C até sua secagem completa. Após esse

processo, foi realizada a pesagem final correspondente à fração de argila das amostras. A partir da determinação das frações de areia e argila, a fração de silte foi estimada por diferença, considerando o total da massa das amostras.

Figura 39 – Preparo de provetas e placas de petri para quantificação da fração argila.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Por fim, para determinação das frações de areia grossa (entre 0,212 mm e 2,0 mm) e de areia fina (entre 0,212mm a 0,053 mm) nas amostras de solo, que representam um importante parâmetro para melhor entendimento do comportamento de retenção e disponibilidade de água no solo, procedeu-se com a separação dessas frações, as quais possuem implicações diretas no manejo agrícola adequado e na mitigação de processos erosivos.

Para isso, a areia total, obtida no processo anterior de lavagem e secagem, foi transferida para uma peneira de malha de 0,212 mm, acoplada a uma bandeja coletora. O material foi então peneirado, de modo que a fração de areia grossa ficou

retida na peneira, enquanto a fração de areia fina foi recolhida na bandeja. A areia fina foi transferida para as mesmas placas de petri em que estavam armazenadas a areia total, sendo submetidas à pesagem em balança analítica de precisão. Assim, a massa de areia de grossa foi determinada pela diferença do peso total e o peso de areia fina.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ESTUDO DE CASO

Estabelecidos os procedimentos metodológicos tanto para o processamento das imagens obtidas por aerolevantamento com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) da voçoroca em estudo, quanto para os ensaios granulométricos das amostras de solo coletadas em topossequência, torna-se fundamental, para a estruturação e discussão dos resultados, uma caracterização inicial da voçoroca por meio de análises qualitativas e quantitativas. Na sequência, procedeu-se ao cálculo do volume de material erodido e a discussão dos condicionantes que contribuíram para o surgimento e a evolução da feição erosiva.

4.3.1 Caracterização e cálculo de volume da voçoroca

Os produtos gerados a partir do processamento das imagens obtidas pelos aerolevantamentos com RPA da voçoroca em estudo, especialmente os ortomosaios, o Modelo Digital de Terreno (MDT) referente à área diretamente afetada e o Modelo Digital de Superfície (MDS), que abrange todo o talhão e suas adjacências, permitiram uma caracterização morfológica da feição erosiva. Dessa maneira, foi possível identificar fatores como o posicionamento da voçoroca na vertente, a descrição de sua forma em planta e de perfis transversais da calha erosiva em diferentes setores da voçoroca, bem como o cálculo do volume do material erodido. Tais características são essenciais para a identificação dos principais condicionantes físicos e antrópicos que contribuíram para o surgimento da feição erosiva, possibilitando inferir sobre o crescimento da erosão.

Portanto, conforme tipologia proposta por Oliveira (1989), as voçorocas podem ser agrupadas em três tipos principais (Figura 40a):

- Conectadas, que estão associadas ao escoamento subsuperficial e/ou subterrâneo, geralmente localizadas nas partes baixas das encostas e integradas à rede de drenagem, podendo ser consideradas como canais de primeira ordem;

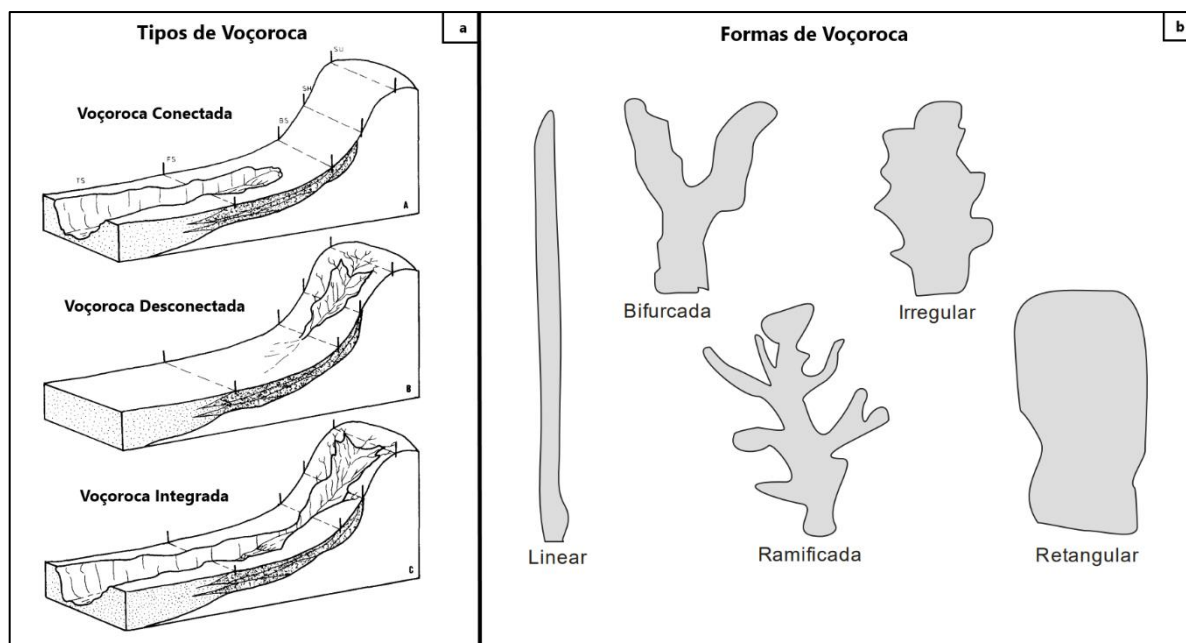
- Desconectadas, localizadas na parte superior das encostas e associadas ao escoamento superficial e/ou a movimentos de massa, porém sem conexão com redes de drenagem definidas;
- Integradas, que representam a junção entre voçorocas conectadas e desconectadas, compondo uma única incisão erosiva mais complexa.

Complementarmente, outra forma de classificação importante refere-se à morfologia da incisão erosiva, como proposto por Vieira (2008), a qual considera os processos específicos e as condições ambientais da área de ocorrência, tais como a geologia (litologia e estrutura), o relevo (forma e declividade), solo, cobertura vegetal e sistema de drenagem superficial ou subsuperficial, de maneira que as voçorocas podem ser agrupadas em cinco formas principais (Figura 40b):

- Lineares, associadas a zonas principais de convergência de drenagem e a condições de maior resistência ou controle estrutural do substrato;
- Bifurcadas, apresentando duas zonas de contribuição de fluxos superficiais concentrados;
- Ramificadas, com vários canais de drenagem superficial, ocorrendo geralmente sobre solos com declividade do terreno relativamente baixa;
- Irregulares, formas que se apresentam como intermediárias entre as anteriores, relacionadas a múltiplos fluxos superficiais concentrados;
- Retangulares, que podem representar o estágio final de expansão e evolução das formas anteriores, assumindo uma geometria mais definida.

Em vista disso, com base nos modelos de classificação propostos por Oliveira (1989) e Vieira (2008), a voçoroca analisada neste estudo de caso pode ser caracterizada como uma voçoroca do tipo conectada, uma vez que toda a sua extensão se desenvolve sobre as porções de baixa e média vertente, conectando-se diretamente ao sistema de drenagem da área. O material erodido proveniente da voçoroca é transportado até um dos afluentes do Córrego Água da Cascavel, contribuindo para processos de assoreamento e poluição desse corpo hídrico, configurando-se em um impacto ambiental negativo de efeitos *off-site*, ilustrado pela imagem da Figura 41, com forte coloração da água pelo aporte de sedimentos.

Figura 40 – Classificação por tipo e formas das voçorocas.



Fonte: Oliveira (1989); Vieira (2008); Org. Ferreira, W. H. K. (2025).

Figura 41 – Aporte de sedimentos a jusante da voçoroca em um dos tributários da Bacia Hidrográfica da Água do Cascavel.

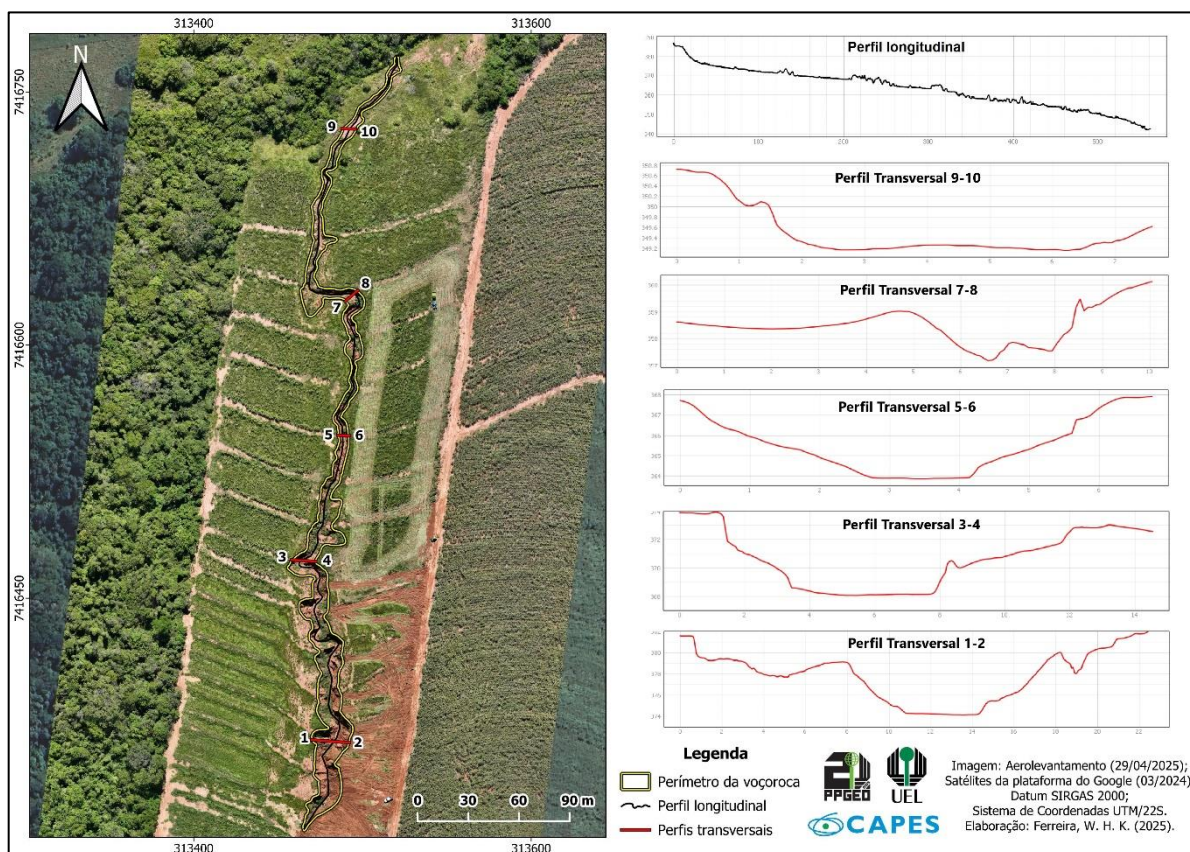


Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Quanto à sua forma em planta, a feição erosiva pode ser categorizada com uma voçoroca linear, apresentando características morfológicas que evidenciam a atuação de uma zona principal de convergência de fluxo superficial concentrado. Observa-se, contudo, um leve desvio no direcionamento da calha erosiva em baixa vertente, decorrente da compactação do solo e do redirecionamento do escoamento superficial ocasionados por um dos terraços, os quais permaneceram inalterados mesmo após a tentativa de recuperação da área degradada por meio do preenchimento da erosão realizada no ano de 2013.

Considerando o perfil longitudinal (S-N) e os perfis transversais (O-L) em diferentes setores da voçoroca (Figura 42), observa-se uma transição morfológica da seção transversal da calha erosiva em baixa vertente, passando de um formato em “V”, especialmente no perfil 7-8, típico de estágios intermediários de erosão, para calha da erosão em “U” com fundo plano em média vertente, conforme visualizado nos perfis 1-2, 3-4 e 5-6, os quais são indicativos de estágios mais avançados do processo erosivo, especialmente em trechos de surgências de água do lençol freático.

Figura 42 – Perfis topográficos longitudinal e transversais da voçoroca.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Além disso, verifica-se um maior aprofundamento e alargamento da calha a montante da voçoroca, resultado de seu crescimento progressivo em direção a jusante, com remoção de materiais de menor coesão e pelo alargamento lateral das paredes da voçoroca, conforme ilustrado pelas imagens da Figura 43, cujo o gabarito de referência de escala nas imagens apresenta uma altura de 1,50 m.

Figura 43 – Profundidade e alargamento da calha da voçoroca em média vertente.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Ainda sobre as possibilidades de classificação das voçorocas, Vieira (2008) propõe que as feições erosivas também podem ser classificadas quanto ao seu tamanho, a partir do volume de material erodido em m^3 . Essa abordagem permite dimensionar a magnitude da feição erosiva e o volume de solo removido, o que pode contribuir para o assoreamento de canais de drenagem próximos, tal como observado com a voçoroca do estudo de caso. Além disso, essa classificação pode colaborar como subsídio técnico para projetos de contenção e recuperação de área degradada, uma vez que, conhecendo-se o volume de material aportado, torna-se possível calcular as reposições necessárias. A classificação de tamanho por volume de material erodido é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Classificação das voçorocas por tamanho pelo volume erodido em m³.

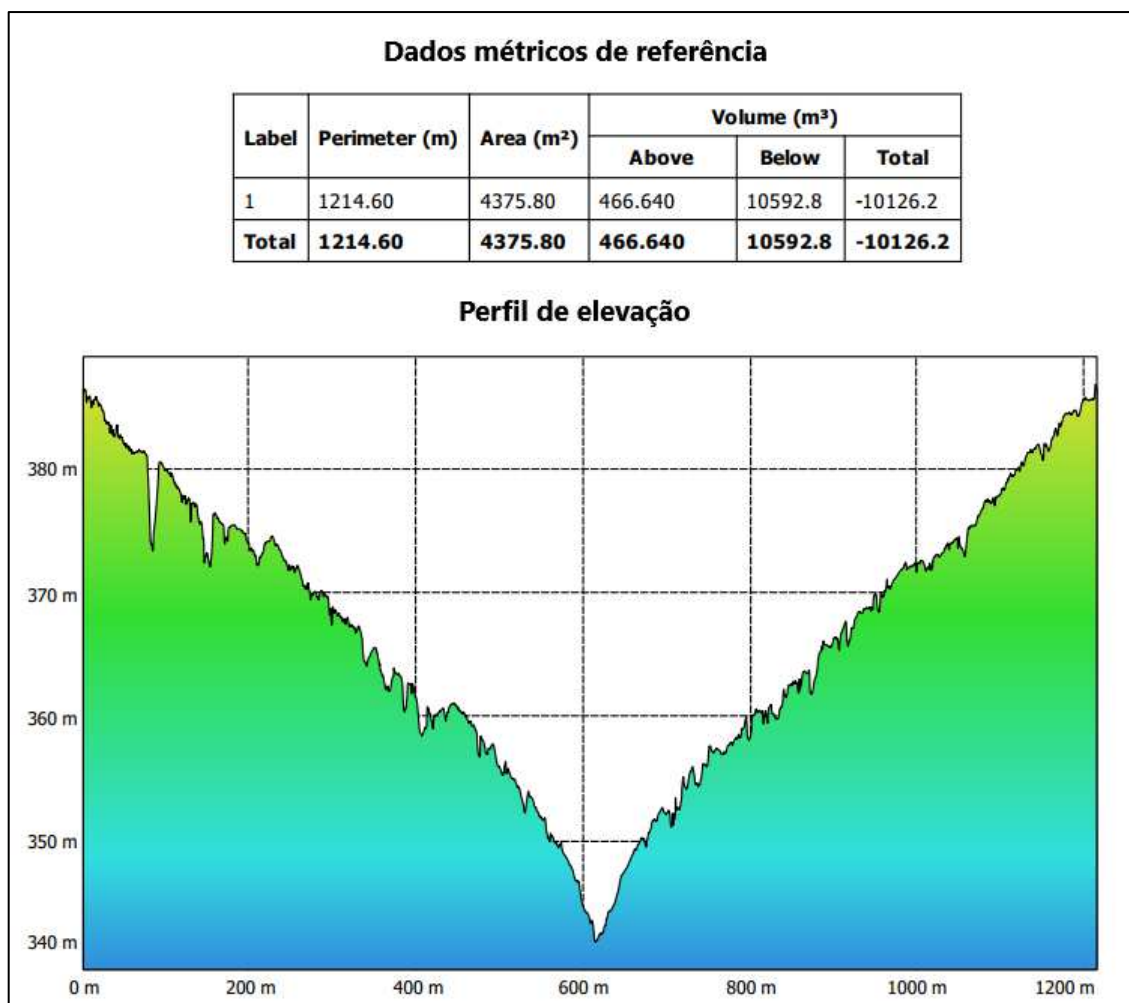
Classificação por tamanho	Volume erodido (m ³)
Muito pequena	<= 999
Pequena	1.000 – 9.999
Média	10.000 – 19.999
Grande	20.000 – 40.000
Muito grande	> 40.000

Fonte: Vieira (2008); Org. Ferreira, W. H. K. (2025).

Para essa classificação, considerando-se o cálculo de volume de uma voçoroca, Gomes, Gomes e Alves Junior (2023) destacam que a utilização de produtos cartográficos com elevada resolução espacial obtidos por aerolevanteamento com RPA, processados a partir de uma rotina correta, permitem representações do relevo condizentes com a realidade de campo. Isso é particularmente relevante em áreas impactadas por voçorocas, onde as curvas de nível sofrem variações abruptas em sua equidistância horizontal, refletindo mudanças intensas em relação ao relevo natural. Nessas circunstâncias, os levantamentos topográficos convencionais dificilmente representariam com fidelidade o relevo, dado as limitações decorrentes das características topográficas com muitas alterações abruptas das feições erosivas.

Diante do exposto, a voçoroca analisada é classificada como uma voçoroca de tamanho médio com volume de material erodido estimado em 10.126,2 m³. Esse valor representa o aporte direto de sedimentos ao curso hídrico localizado a jusante da feição erosiva, contribuindo significativamente para o assoreamento e degradação da qualidade ambiental da área e da respectiva bacia hidrográfica do córrego Água da Cascavel. Essa estimativa teve como base o Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado para a área de estudo, a partir da nuvem densa de pontos processada com o rigor “*high*”, somada às demais etapas metodológicas de classificação da nuvem densa de pontos ao nível do solo, geração da malha tridimensional e o uso da ferramenta “*Measure*” no software *Agisoft Metashape*, conferindo elevada confiabilidade técnica ao resultado obtido. Assim, a Figura 44 apresenta os dados métricos obtidos do polígono base utilizado para o cálculo de volume.

Figura 44 – Dados de referência e elevação para o cálculo de volume da voçoroca.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Como forma de dimensionar os impactos ambientais negativos causados pela voçoroca, estima-se que seriam necessárias 3.531 caçambas convencionais de entulho de 3 m³ para transportar todo o volume de solo removido, o que evidencia a magnitude da degradação associada à dinâmica erosiva. Como consequências, são notórios os prejuízos ambientais, sociais e econômicos associados à diminuição da produtividade dos sistemas agrícolas e das perdas de solo, bem como da contaminação e do assoreamento dos cursos hídricos.

Ainda durante o diagnóstico em campo, constatou-se a o desenvolvimento de diversos sulcos conectados à voçoroca, resultantes do fluxo concentrado de água proveniente das porções mais elevadas, especialmente na área arrendada ao plantio de mandioca. Dessa maneira, a ausência de práticas de contenção nesse setor pode favorecer o avanço regressivo da voçoroca a montante. No entanto, de forma ainda

mais crítica, observou-se a ocorrência de sulcos mais profundos e até mesmo processos de ravinamento ao longo do carreador, nas proximidades da cobertura florestal na porção oeste da propriedade, ambas situações ilustradas pelas imagens da Figura 45. Esse cenário revela grande preocupação, dado o risco de conexão direta com a voçoroca já existente, o que reforça a necessidade de medidas de mitigação voltadas à contenção dos processos erosivos nas áreas adjacentes.

Figura 45 – Sulcos e processos de ravinamento em áreas adjacentes da voçoroca.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

4.3.2 Granulometria e classificação dos solos na área afetada pela voçoroca

No tocante às condições pedológicas voçoroca do recorte do estudo de caso, com base no levantamento pedológico do estado do Paraná e produzido pela EMBRAPA em 2020 na escala de 1:250.000 (IAT, 2025), utilizado como base para a análise da fragilidade ambiental em escala regional da Região Imediata de Cianorte (RIC), foram identificadas duas classes de solos predominantes na área de estudo: Argissolo Vermelho típico (PVd2), presente nas porções de baixa e média vertente, e Latossolo Vermelho de textura média (LVd19), sobre as áreas de alta vertente.

Nesse contexto, os ensaios granulométricos foram conduzidos tanto para verificar a compatibilidade entre os solos efetivamente presentes na área da voçoroca indicados pelo mapeamento pedológico, quanto para subsidiar uma discussão a respeito dos atributos físicos dos tipos de solos que possam estar relacionados à gênese e evolução da feição erosiva.

Para o ensaio granulométrico das 12 amostras, foi empregado o Método da Pipetagem, conforme descrito na metodologia. Identificados os valores proporcionais das frações de areia, silte e argila das amostras, realizou-se a sua representação em forma de um triângulo textural, como um parâmetro gráfico de interpretação para os pontos amostrados na topossequência, conforme demonstrado pela Figura 46 e dados da Tabela 17. A nomenclatura das amostras se remete aos pontos de controle utilizados no aerolevanteamento e à sua profundidade de coleta, enquanto a aplicação do triângulo textural, segue os fundamentos estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), na definição de 13 classes texturais com base nas proporções relativas entre as frações granulométricas (Santos *et al.*, 2025).

Para a análise dos resultados dos ensaios granulométricos das amostras, destaca-se a importância de considerar a posição topográfica e a profundidade de coleta na topossequência, bem como as proporções e comportamento das frações de areia grossa e areia fina, especialmente pela baixa proporção da fração de silte das amostras, sobretudo em subsuperfície, possibilitando também a classificação dos pontos de coleta até o segundo nível categórico.

Outra importante questão a respeito da análise textural do solo, segundo Centeno *et al.* (2017), é a sua influência em fatores como a resistência à infiltração, a densidade, a porosidade, a dinâmica da água e a capacidade de troca de cátions (CTC). A textura constitui uma característica intrínseca do solo, sendo alterada apenas quando ocorre mistura com materiais de diferentes texturas. Dessa forma, o entendimento da textura do solo é essencial para definição do uso e das práticas de manejo, especialmente em áreas de alta fragilidade ambiental e historicamente afetadas por intensos processos erosivos, como a RIC e o Noroeste do Paraná.

Dessa maneira, com base nos dados apresentados na Tabela 17 e na Figura 46, verificou-se a predominância da fração areia nos solos da área de estudo, com valores variando entre 74,80% e 86,80%, destacando-se a amostra P6-20, coletada em média vertente. Em todas as amostras analisadas, a proporção de areia fina foi mais representativa em relação à areia grossa, superando 50% na maioria dos casos e atingindo o valor máximo de 69,60% para a amostra P6-20. Tal predominância da fração areia são características texturais e mineralógicas derivadas da forte presença de quartzo no material de origem, relacionado aos arenitos da Formação Rio Paraná do Grupo Caiuá, que oferece maior resistência ao intemperismo químico, limitando a transformação de minerais secundários por processos de hidrólise e oxidação, comumente presentes na fração argila em outros contextos geológicos, como dos solos derivados dos basaltos das formações litoestratigráficas do Grupo Serra Geral.

Por sua vez, os teores de argila das amostras variaram de 10,0% a 24,0%, enquanto a fração silte apresentou baixa representatividade, com valores entre 1,20% e 7,70%. Essas características granulométricas resultaram, predominantemente, na classificação textural franco arenosa, registrada em seis amostras, enquanto as demais amostras enquadraram-se nas classes areia franca e franco argilo arenosa, com três amostras cada, de acordo com a posição das coletas ao longo da vertente.

Essa configuração textural em topossequência implica em baixa coesão estrutural dos solos na área de estudo, associada a uma redução de superfície específica e menor capacidade de retenção de água e nutrientes. Além disso, são observadas elevada proporção de areia fina nas amostras, especialmente em baixa vertente nos pontos P4 e P5, e em média vertente com no ponto P6.

Nesses casos, a areia fina apresenta comportamento próximo ao silte, com capacidade de retenção de umidade um pouco maior do que em relação à areia grossa, porém com efeito não suficiente para compensar a ausência de argila e

matéria orgânica, resultando em baixa estabilidade estrutural. Tais configurações indicam maior susceptibilidade à erosão linear por concentração do escoamento superficial, principalmente devido à menor agregação e à facilidade de mobilização das partículas tanto de areia fina quanto areia grossa.

Quanto à classificação dos solos em topossequência, nas posições de alta vertente (P1 e P2), considerando-se a fração argila, foram identificados os teores mais elevados, variando entre 18% e 24%. Em média vertente, o gradiente textural resultante do incremento de argila do horizonte A para o horizonte B, apresentou valor de 1,57 no ponto P3, classificando-o como Argissolo Vermelho típico, enquanto o ponto P6, com gradiente textural de 1,5, cujo maiores proporções da fração areia nas amostras, indica uma área de transição de Argissolo Vermelho típico para o Neossolo Quartzarênico em baixa vertente. Por sua vez, as amostras P1 e P2 em alta vertente, apresentaram gradiente textural de 1,34 e 1,22, respectivamente, indicando a presença de Latossolos Vermelhos de textura média.

Assim, os Latossolos Vermelhos de textura média, assim como aqueles de textura argilosa e muito argilosa, constituem solos altamente evoluídos e profundos, resultantes de um avançado estágio de intemperismo e com presença do horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico (Bw). Em geral, ocorrem em áreas de relevo plano a suavemente ondulado ou em topos de encostas (Santos *et al.*, 2025). Contudo, a textura média observada na área de estudo, é associada ao material de origem sedimentar e ao quartzo, proveniente das rochas areníticas da Formação Rio Paraná do Grupo Caiuá. Na área de estudo, são solos de coloração avermelhada, baixa fertilidade natural e estrutura granular, cujo a ausência de cobertura vegetal pode aumentar a suscetibilidade à erosão desse tipo de solo.

Por sua vez, os Argissolos, conforme Firmino (2016), caracterizam-se pelo contraste textural entre os horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B), decorrente do processo de argiluviação. Nessas condições, ocorre a translocação vertical de partículas da fração argila, transportadas em suspensão do horizonte A para horizontes inferiores, formando um horizonte B textural (Bt), antecedido por um horizonte eluvial (E), resultando em um gradiente textural mínimo de 1,5 em Argissolos típicos como no caso da área do estudo de caso. Esse contraste reduz a taxa de infiltração vertical da água e favorece sua acumulação nas camadas superficiais, aumentando a susceptibilidade à erosão em sulcos e à evolução regressiva da voçoroca em média vertente.

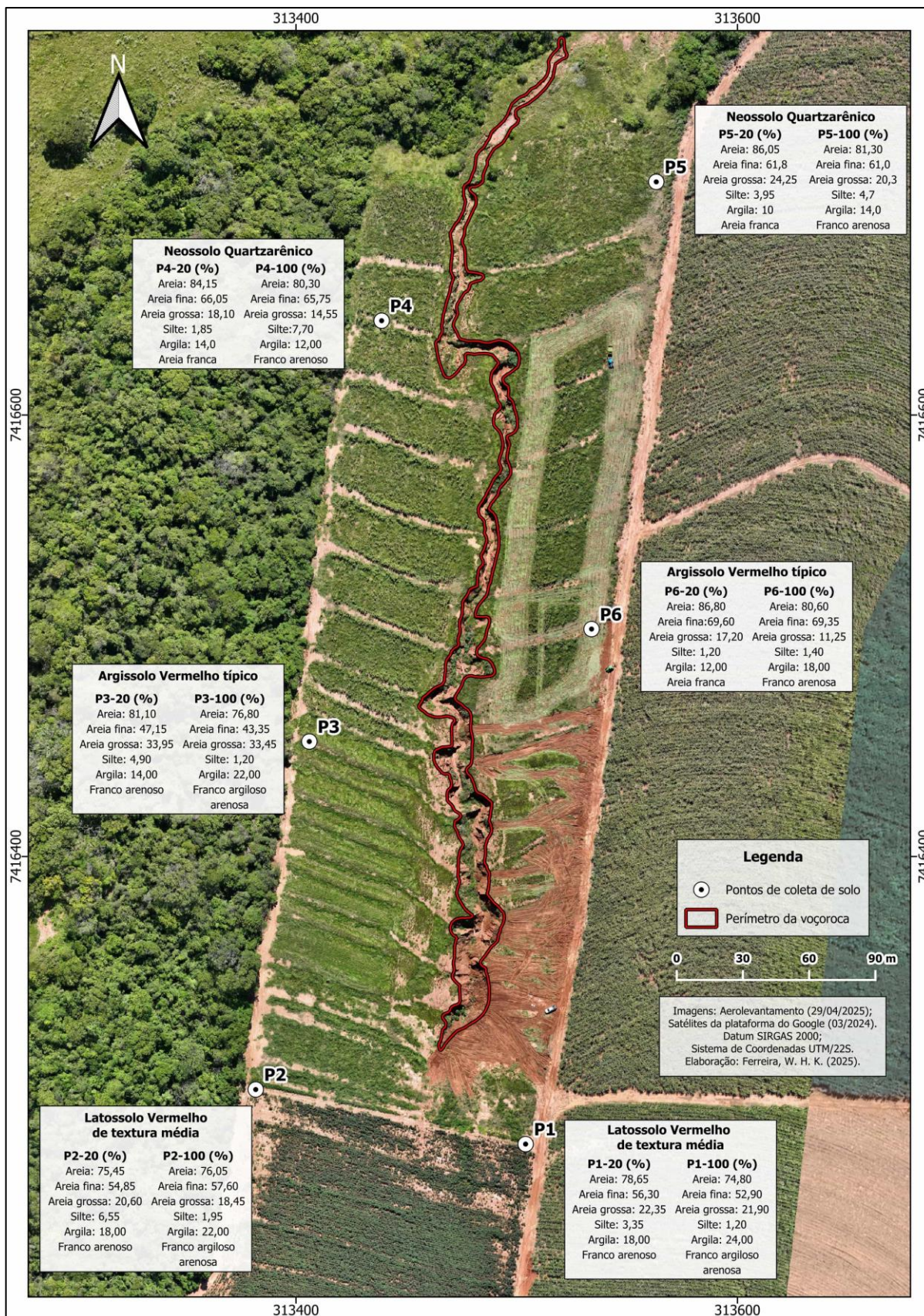
Em baixa vertente (pontos P4 e P5), os teores de argila identificados são inferiores a 12%, e o material apresenta textura arenosa com maior homogeneidade em profundidade. Essa condição pode ser resultado da acumulação do material erodido da fração areia das posições mais elevadas da vertente, implicando em alta taxa de infiltração inicial de água, porém com baixa capacidade de retenção hídrica e resistência mecânica, tornando o material mais vulnerável ao colapso estrutural em saturação ou submetido a fluxos concentrados.

Tal classificação textural das amostras indicam solos arenosos nos pontos P4, P5 e na transição do ponto P6, compreendendo as classes texturais de areia franca em superfície e franco arenoso em subsuperfície, que de acordo com Melo e Ramos (2025), correspondem à solos cujo o teor de areia subtraídos pelo teor de argila, apresentam resultado superior a 700 g Kg⁻¹ (70%). Dessa maneira, a fração sólida mineral desses solos é constituída quase que exclusivamente de mineral primário, sobretudo quartzo, apresentando elevada suscetibilidade à erosão e baixa CTC. Dessa maneira, a classe que se enquadra na definição de solos arenosos são os Neossolos Quartzarênicos.

Diante dessas considerações, a análise granulométrica das amostras de solo coletadas em topossequência na área de estudo, indicam a presença de Latossolo Vermelho de textura média em setores de alta vertente, Argissolo Vermelho típico em setores de média vertente e transição para Neossolo Quartzarênico em baixa vertente até atingir o fundo de vale de um dos afluentes da Bacia Hidrográfica Água da Cascavel, conforme pode ser melhor visualizado pelo mapa da Figura 47, que apresenta de forma sintetizada os resultados dos ensaios granulométricos e a classificação dos tipos de solos nos pontos de coleta.

Conforme os dados sintetizados na Figura 47, observa-se o predomínio da fração areia nos pontos P4, P5 e P6, na transição entre a média e a baixa vertente, evidenciando a perda progressiva de coesão dos solos ao longo da topossequência, característica típica dos solos desenvolvidos sobre os arenitos das formações do Grupo Caiuá. Em consonância com Thomaz e Fidalski (2020), ao analisarem a erodibilidade em entressulcos (*interrill erodibility*) em uma catena semelhante no Noroeste do Paraná, verifica-se que a resistência do solo diminui gradativamente de montante para jusante. Nesse contexto, os solos da baixa vertente apresentam menor coesão natural comparados aos Latossolos do topo, tornando-se estruturalmente mais suscetíveis à erosão quando submetidos a fluxos hídricos concentrados.

Figura 47 – Mapa de frações granulométricas e classes de solo da área da voçoroca.



Fonte: Ferreira, W. H. K. (2025).

Entretanto, a fragilidade intrínseca dos solos arenosos, por si só, não explica a magnitude da feição erosiva observada. Um aspecto determinante evidenciado pela análise espacial é a coincidência entre o trecho de maior incisão da voçoroca e a zona de transição pedológica lateral Latossolo-Argissolo. Conforme discutido por Couto (2015), especialmente na margem esquerda do rio Ivaí, onde se insere a área de estudo e predominam taxas positivas de denudação, a passagem do Latossolo, mesmo que de textura média e geralmente situado no topo da vertente, como na área de estudo, para o Argissolo, presente nas porções de média vertente, representa não apenas uma mudança de classe de solo, mas uma descontinuidade física e hidrológica relevante na paisagem. Enquanto os Latossolos tendem a apresentar estrutura granular, elevada permeabilidade e boa drenagem, favorecendo a rápida infiltração da água, os Argissolos são caracterizados pelo aumento do teor de argila em subsuperfície (horizonte B textural), o que reduz a permeabilidade e altera o comportamento mecânico do perfil do solo.

Do ponto de vista hidrológico, ainda segundo Couto (2015), essa zona de transição atua como uma barreira parcial ao fluxo vertical da água no sistema. A água que infiltra com maior facilidade nos setores de Latossolos em alta vertente, ao atingir o horizonte B mais denso dos Argissolos, pode favorecer a formação de fluxos subsuperficiais laterais (*throughflow*). Nessa interface, ocorre a saturação dos poros do solo, reduzindo a coesão entre as partículas e criando condições favoráveis a processos de exfiltração e ao *piping*, que corresponde à erosão interna em forma de túneis, mesmo que não observados na voçoroca em questão. Esse mecanismo fragiliza a base da vertente, aumentando a suscetibilidade ao colapso de massas e ao avanço regressivo da erosão linear, na tentativa de reequilíbrio do perfil da encosta.

No caso da voçoroca analisada no município de Guaporema, cuja incisão mais profunda se desenvolve exatamente sobre essa faixa de transição granulométrica, a presença de horizontes superficiais arenosos em média vertente, sobrepostos a camadas menos permeáveis, cria condições favoráveis à concentração da energia erosiva dos fluxos hídricos provenientes das porções mais elevadas da vertente, além da contribuição do carreador localizado a leste da propriedade. Dessa forma, a voçoroca deve ser interpretada como a resposta de um sistema pedogeomorfológico instável, no qual a ruptura de declive associada à transição Latossolo–Argissolo constitui um nível de base local de fragilidade, onde a resistência do material é superada pela força hidráulica dos fluxos concentrados.

De modo semelhante, Nobrega *et al.* (2023), ao discutirem os locais preferenciais de ocorrência de voçorocas na paisagem do Noroeste paranaense, tem como um dos exemplos as feições que se desenvolvem em vales em berço no interflúvio entre as bacias hidrográficas dos rios Ivaí e Piquiri, ou seja, a margem esquerda do rio Ivaí. Nessa porção, predominam colinas médias, associadas a uma rede de drenagem mais densa, com os sistemas pedológicos típicos compostos pela sequência Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos, cuja a formação de voçorocas, é inicialmente favorecida pela retirada da vegetação original e pela degradação das áreas de nascentes.

De acordo com Nobrega *et al.* (2023), esse processo é intensificado pela concentração e pelo aumento do volume dos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais ao longo do eixo dos vales, sobretudo em função da ampla área de captação da drenagem. A evolução das voçorocas, em geral, ocorre de forma regressiva, acompanhando os eixos côncavos do relevo, mesmo em áreas com declividades relativamente baixas, alcançando progressivamente setores mais elevados da paisagem.

Ainda conforme Nóbrega *et al.* (2023), o uso do solo, aliado ao comportamento dos fluxos hídricos, à morfologia das vertentes e às características da cobertura pedológica, constitui o principal conjunto de fatores que controla o surgimento e a evolução das voçorocas. Entre os usos do solo mais associados a essas feições, destacam-se as pastagens e as culturas de cana-de-açúcar e mandioca, geralmente implantadas em nível. Nessas condições, técnicas de contenção baseadas na instalação de barragens ao longo do eixo dos vales em berço têm se mostrado eficientes ao longo do tempo, especialmente em áreas rurais, atuando de forma preventiva no controle da erosão, também levando à formação de áreas úmidas a montante dessas estruturas, bem como o surgimento de pequenas lagoas. Observa-se também que, ao longo do tempo, parte dessas barragens pode ser rompida ou degradada, resultando na reativação dos processos erosivos e na continuidade da evolução das voçorocas.

Dessa forma, a voçoroca analisada no estudo de caso no município de Guaporema, inserida sobre o mesmo contexto regional de ocorrência da margem esquerda do Rio Ivaí, pode ser compreendida como resultado de uma elevada fragilidade ambiental potencial, associada à configuração morfológica do relevo, às características dos sistemas pedológicos e às dinâmicas hidrológicas locais, com

práticas inadequadas de conservação dos solos da área, rompendo o equilíbrio já precário da vertente. A feição erosiva decorre, sobretudo, da interação entre uma zona de fragilidade pedológica relacionada à textura arenosa dos solos e a presença de uma faixa de transição lateral Latossolo–Argissolo, marcada por menor resistência mecânica, diretamente agravada pela atuação de fluxos hídricos concentrados, que funcionam como vetores de força e energia na retirada das partículas do solo.

Nesse contexto, com discutido anteriormente e ilustrado pela Figura 45, a presença de sulcos na alta vertente, em área atualmente arrendada para o cultivo de mandioca, bem como o direcionamento das águas pluviais por meio da configuração dos carregadores na propriedade, podem atuar como fatores catalisadores do processo erosivo, intensificando a concentração do escoamento superficial e favorecendo a evolução regressiva da voçoroca.

Assim, evidencia-se a necessidade de adoção de práticas de manejo mais adequadas, voltadas à estabilidade da vertente e à conservação dos solos, de modo a controlar a erosão acelerada, especialmente na zona de transição lateral Latossolo–Argissolo situada na média vertente. Tais medidas são fundamentais para evitar a reincidência da feição erosiva em futuras intervenções de recuperação da área. Essa preocupação é reforçada pelo histórico local, uma vez que já foi registrada uma tentativa anterior de recuperação da área degradada pela voçoroca, realizada no ano de 2013, a qual não obteve êxito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da presente pesquisa permitiu compreender a complexa interação entre a fragilidade ambiental intrínseca do meio físico e as formas de uso e ocupação do solo, que intensificam os processos erosivos no contexto histórico de degradação do Noroeste do Paraná, a partir da integração de duas escalas de análise complementares. A investigação partiu de um diagnóstico em escala regional na Região Imediata de Cianorte (RIC) e, posteriormente, aprofundou-se na análise dos mecanismos de degradação por meio de um estudo de caso detalhado de uma voçoroca localizada no município de Guaporema/PR. Esse percurso metodológico evidenciou que a compreensão da dinâmica erosiva demanda uma abordagem multiescalar, articulando diferentes procedimentos técnicos e analíticos.

A partir da discussão dos resultados e da validação do modelo de fragilidade ambiental, por meio da correspondência espacial com situações reais de degradação associadas a feições erosivas em âmbito regional, constatou-se que a RIC apresenta elevada vulnerabilidade à erosão hídrica acelerada, tanto de caráter laminar quanto linear. Logo, as feições erosivas concentram-se predominantemente sobre os arenitos das formações Rio Paraná e Goio-Erê, pertencentes ao Grupo Caiuá, especialmente em áreas ocupadas por Argissolos Vermelhos típicos ou com mudanças texturais abruptas, associados a relevos mais declivosos e a vertentes de caráter convergente ou retilínea, com comportamento planar ou convergente, cujo comportamento morfodinâmico favorece a fragilização do ambiente.

Entretanto, tais condições físico-naturais, quando associadas a atividades antrópicas sem um manejo adequado, especialmente no predomínio de usos do solo na região com menor capacidade de proteção, potencializam significativamente os processos erosivos. Destacam-se, nesse sentido, os cultivos sazonais, como a cana-de-açúcar e a mandioca, além das pastagens plantadas, que contribuem para a intensificação da erosão e para o desencadeamento de ravinas e voçorocas. Esse cenário demonstra a necessidade de adoção de práticas conservacionistas mais eficientes do solo, sobretudo em áreas situadas na margem esquerda do Rio Ivaí, no interflúvio com o Rio Piquiri, onde predominam maiores taxas de denudação e uma tendência acentuada de desestabilização geomorfológica associada, principalmente à transformação lateral Latossolo–Argissolo.

Por sua vez, o estudo de caso da voçoroca no município de Guaporema/PR, a

pesquisa avançou para a escala de detalhe, discutindo a feição erosiva como produto da convergência entre a alta fragilidade do sistema pedogeomorfológico e o manejo inadequado do ambiente. Com o apoio de produtos cartográficos de elevada resolução espacial obtidos por aerolevanteamento com RPA, aliados às análises laboratoriais de amostras de solo coletadas em topossequência, foi possível caracterizar a voçoroca, estimar um volume de 10.126,2 m³ de solo removido, equivalente a 3.531 caçambas convencionais de entulho com capacidade de 3,0 m³, bem como discutir os condicionantes de surgimento e evolução da voçoroca.

Dessa maneira, a caracterização granulométrica dos solos e a identificação da transição lateral Latossolo–Argissolo mostraram-se fundamentais para explicar a localização da incisão mais profunda da calha da voçoroca. Essa zona de transição atua como uma descontinuidade hidráulica e mecânica na vertente, cujo contraste textural entre os solos do topo e da média vertente favorece a concentração de fluxos subsuperficiais, a redução da coesão entre as partículas e o aumento da suscetibilidade à erosão, especialmente em sistemas pedológicos compostos pela sequência Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos.

Sob essas circunstâncias, embora a fragilidade dos condicionantes físico-naturais desempenhe forte papel no desencadeamento dos processos erosivos, o direcionamento inadequado das águas pluviais decorrente da configuração de estradas e carreadores, associado à baixa proteção do solo proporcionada por culturas sazonais e pastagens plantadas, bem como à ausência de práticas conservacionistas mais eficazes, constitui fator determinante para a intensificação e progressão da feição erosiva.

Em síntese, a presente pesquisa conclui que o manejo dos solos, especialmente de textura arenosa como do Noroeste paranaense, não pode se restringir apenas aos talhões agrícolas. É imperativo que o planejamento territorial e agrícola considere os limites pedogeomorfológicos da paisagem, reconhecendo estradas, carreadores e zonas de transição entre classes de solo como pontos críticos de intervenção. Espera-se que os resultados deste estudo contribuam como subsídio técnico-científico para a implementação de práticas de manejo mais efetivas e que consideram a dinâmica natural das vertentes, visando a mitigação e a expansão de feições erosivas, que comprometem tanto a viabilidade econômica das atividades agrícolas quanto a integridade ambiental, não apenas na Região Imediata de Cianorte (RIC), mas em todo o Noroeste do estado do Paraná.

REFERÊNCIAS

- ALVES JUNIOR, A. P. **Qualidade de modelos de representação altimétricos e planimétricos em imagens obtidas com aeronave remotamente pilotadas (RPA)**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/handle/123456789/9797>.
- ALVES, E. A. C.; MORAES, I. C.; LUPINACCI, C. M.; PINTO, S. D. A. F. PERDAS DE SOLO E DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DO MATERIAL TRANSPORTADO POR EROSÃO HÍDRICA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR E PASTAGEM. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 19, n. 3, p. 109–126, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/16138>.
- BAHR, G. C.; CARVALHO, S. M. IDENTIFICAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO UVARANAL, COMO SUBSÍDIO AO PROJETO DE EXPANSÃO URBANA DE TELÊMACO BORBA – PR. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 26, 2012. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/raega/article/view/30155>.
- BECKAUSER, M. C. **Os solos e a dinâmica erosiva ao longo de uma voçoroca no distrito de Sumaré em Paranaíba – PR**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6259>.
- BERTOL, I; CASSOL, E. A.; MERTEN, G. H. Modelagem e modelos utilizados para estimar a erosão do solo. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. da S. (ed.). Manejo e conservação do solo e da água. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 462-494.
- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. **Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Paraná**. Curitiba: 2021. Escala 1:600.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22492>.
- BOULET, R.; CHAUVEL, A.; ARMAND, F.-X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie. I: Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. **Cahiers ORSTOM.Série Pédologie**, v. 19, n. 4, p. 309–321, 1982. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/3251.PDF.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.
- BRASIL. **Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm.
- BRAZ, J. S.; NETO, R. M. As Unidades de Paisagem no município de Areado, sul de

Minas Gerais: uma proposta de estudo ambiental integrado a partir da concepção geossistêmica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3406–3421, 2021.

CAPOANE, V.; SANTOS, L. J. C.; SANTOS, D. R. D.; TIECHER, T. USO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PARA PREDIÇÃO DE ÁREAS PROPENSAS A PERDA E A DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO PLANALTO DO RIO GRANDE DO SUL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, 2015. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/733>.

CARVALHO, B. T. B. **Utilização de aeronave remotamente pilotada na aferição de prática mecânica de conservação de solo**. 2023. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023. Disponível em: <https://pos.uel.br/geografia/teses-dissertacoes/utilizacao-de-aeronave-remotamente-pilotada-na-afericao-de-pratica-mecanica-de-conservacao-de-solo/>.

CAVALCANTI, L. C. D. S.; CORRÊA, A. C. D. B. Geossistemas e Geografia no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 61, n. 2, p. 3, 2017. Disponível em: <https://rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/82>.

CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUSA, R. O. DE; TIMM, L. C. TEXTURA DO SOLO: CONCEITOS E APLICAÇÕES EM SOLOS ARENOSOS. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/RBES/article/view/11576>.

CHAGAS, C. D. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CARVALHO JÚNIOR, W. D. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 497–507, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2010000500009&lng=pt&tlng=pt.

CIANORTE. Prefeitura Municipal. **História**. 2025. Disponível em: https://cianorte.pr.gov.br/pagina/8_Historia-do-Municipio.html.

COUTO, E. V. do. **Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no Noroeste do Paraná**. 2015. 112 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/40607>.

CREPANI, E.; DE MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial. (INPE-8454-RPQ/722). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

DECEA. **Departamento de Controle do Espaço Aéreo**. Portaria DECEA Nº928/DNOR8, de 15 de maio de 2023. Aprova a reedição da ICA 100-40, Instrução sobre “Aeronaves não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. Publicado no BCA nº 103, de 6 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/drone/docs/ICA%20100-40%20->

%20Aeronaves%20n%C3%A3o%20Tripuladas%20e%20o%20Acesso%20ao%20Espaço%20A7o%20A%C3%A9reo%20Brasileiro%202023%20-%20BCA%20103%2006.06.23.pdf.

DJI. Dà-Jiāng Innovations Science and Technology. **Specs - DJI Mavic 3 Enterprise**. 2025. Disponível em: <https://enterprise.dji.com/pt-br/mavic-3-enterprise/specs>.

DIAS, W. A.; THOMAZ, E. L. Avaliação dos efeitos do pastoreio sobre a erosão em margens de canal fluvial em sistema de faxinal. **Sociedade & Natureza**, v. 23, n. 1, p. 23–35, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/dCcqff3bDyPwxpP7nkPRFTD/?lang=pt>.

DORS, G.; LEANDRO, D.; CECCONELLO, S. T.; CASTRO, A. S.; NADALETI, W. C.; HUINCA, S. C. M. DELIMITAÇÃO DOS ÍNDICES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO LOURENÇO DO SUL/RS: SUBSÍDIO PARA O PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 74, 2021. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/9721.

FERREIRA, L. F. R. **Drones e geotecnologias para avaliação da aptidão agrícola e enquadramento tributário do imposto sobre a propriedade territorial rural – ITR**. 2025. 84 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025. Disponível em: <https://pos.uel.br/geografia/teses-dissertacoes/drones-e-geotecnologias-para-avaliacao-da-aptidao-agricola-e-enquadramento-tributario-do-imposto-sobre-a-propriedade-territorial-rural-itr/>.

FERREIRA, W. H. K.; LOHMANN, M.; NABARRO, S. A. (org.). Uso e ocupação do solo e dinâmicas do espaço agrário na Região Imediata de Cianorte - PR. *In*: **Produzindo saberes: experiências e legados da 40ª Semana de Geografia da UEL**. Londrina, 2024.

FIRMINO, F. H. T. Gênese de lamelas em uma litotoposequência no semiárido brasileiro. **Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife**, p. 157, 2016. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/5107>.

GARBELINI, L. **Aplicação de geotecnologias na caracterização de processos erosivos: estudo de uma voçoroca em Anhembi-SP**. 2021. 51 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/003069362>.

GOMES, L. N.; GOMES, E. N.; ALVES JUNIOR, A. P. Determinação do volume de material erodido em processos de ravinamento com base no uso de fotografias obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). **Cadernos de Geografia**, v. 47, p. 55–69, 2023. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/cadernosgeografia/article/view/12786>.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6. ed.ed. Rio de Janeiro, Brazil: Bertrand Brasil, 2008.

IAT. Instituto Água e Terra do Paraná. **GeoPR - Catálogo de Dados**. Curitiba, 2025. Disponível em: <https://www.geoparana.pr.gov.br/Pagina/Catalogo-de-Dados>.

IBGE., I. B. de G. e E. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100600>.

IWASA, O. Y.; FENDRICH, R. Controle da Erosão Urbana. *In*: GEOLOGIA DE ENGENHARIA. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, 1998. p. 67–89.

JULIAN, C.; NUNES, J. O. R. USO DE VANT E GEOPROCESSAMENTO PARA CÁLCULO DE SOLO ERODIDO EM VOÇOROCA LOCALIZADA NO DISTRITO DE AMADEU AMARAL. MARÍLIA/SP - BRASIL. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1818>.

LAIPELT, L.; COMINI DE ANDRADE, B.; COLLISCHONN, W.; DE AMORIM TEIXEIRA, A.; PAIVA, R. C. D. D.; RUHOFF, A. ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2321>.

LEINIG, F. Z. **Uso de ortomosaicos obtidos por voos de RPA para estudo de caso de recomposição florestal**. 2024. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2024. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34510>.

MAGALHÃES, D. M. de. **Uso de drones como suporte ao planejamento territorial: da coleta de dados à geovisualização**. 2021. 257 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/36455>.

MANGUEIRA, C. G. **Proposta de classificação do nível de criticidade dos processos erosivos da região Noroeste do Paraná**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/49116>.

MAPBIOMAS. **Downloads**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE VOÇOROCAS NO ESPÍRITO SANTO: ESTUDO DE CASO NOS MUNICÍPIOS DE AFONSO CLÁUDIO E ALEGRE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, 2016. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/712>.

MAXIMIANO, L. A. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCEITO DE PAISAGEM. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 8, 2004. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3391>.

MELO, R. S. de; RAMOS, M. R. Solos de textura arenosa: uma revisão acerca do uso e manejo no estado do Tocantins. **Revista Sapiência: sociedade, saberes e**

práticas educacionais, v. 14, n. 1, p. 1–22, 2025. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/sapiencia/article/view/15157>.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções Básicas E Climas Do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MINEROPAR, M. do P. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. Curitiba: 2006. Escala 1:250.000. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-04/atlas_geomorforlogico_parana_2006.pdf.

MINEROPAR, M. do P. **Potencialidades e Fragilidades das Rochas do Estado do Paraná**. Curitiba: 2005. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mineropar_2006.pdf.

MOLINARI JÚNIOR, E. **Fragilidade ambiental na alta bacia do Rio Vermelho (Goiás-GO): uma proposta de adaptação metodológica**. 2024a. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2024. Disponível em: <http://www.bdt.d.ueg.br/handle/tede/1500>.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. [S. l.]: [s. d.], 2019. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/atlas-climatico/atlas-climatico-do-parana-2019.pdf>.

NÓBREGA, M. T. D.; SILVEIRA, H.; CUNHA, J. E. D.; BECKAUSER, M. C.; BONIFÁCIO, C. M.; BALDO, M. C. As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. Disponível em: <https://www.rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2367>.

OLIVEIRA, D. P. de. **Avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão Vermelho (PR) e identificação de conflito de uso do solo em Áreas de Preservação Permanente**. 2023. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023. Disponível em: <https://pos.uel.br/geografia/teses-dissertacoes/avaliacao-da-fragilidade-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-ribeirao-vermelho-pr-e-identificacao-de-conflito-de-uso-do-solo-em-areas-de-preservacao-permanente/>.

OLIVEIRA, G. A. de. **Condicionantes geomorfológicos de erodibilidade em fragmentos ambientais de mata atlântica: análises e restauração da estabilidade física em áreas fragilizadas**. 2020. 258 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/handle/123456789/9580>.

OLIVEIRA, M. A. T. de. Erosion disconformities and gully morphology: A threedimensional approach. **CATENA**, v. 16, n. 4–5, p. 413–423, 1989. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0341816289900246?via%3Dihub>.

PERIÇATO, A. J.; SOUZA, M. L. D. O Estudo da Fragilidade Potencial e Emergente

na Bacia Hidrográfica do Rio das Antas, Noroeste do Paraná. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1064–1082, 2019. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/19826>.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C. D.; ANJOS, L. H. C. D.; FONTANA, A. SOLOS DO BRASIL: GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO E LIMITAÇÕES AO USO. *In*: JÚLIO CÉSAR RIBEIRO. **Ciências Exatas e da Terra: Conhecimentos Estratégicos para o Desenvolvimento do País**. 1. ed. [S. l.]: Atena Editora, 2020. p. 183–199. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-ebook/3284>.

ROQUE, A. A. de O.; BRUNETTO, S. C. do N.; SANTOS, G. B. dos. AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA) NO AUXÍLIO A PROJETO DE RECUPERAÇÃO DE VOÇOROCAS. *In*: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO: XX BRAZILIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2023.

ROSS, J. L. S. ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. **Geography Department, University of Sao Paulo**, p. 63–74, 1994. Disponível em: https://revistas.usp.br/rdg/pt_BR/article/view/47327.

ROSS, J. L. S. LANDFORMS AND ENVIRONMENTAL PLANNING: POTENTIALITIES AND FRAGILITIES. **Geography Department, University of Sao Paulo**, p. 38–51, 2012. Disponível em: https://revistas.usp.br/rdg/pt_BR/article/view/53841.

SANTOS, D. M. dos. **Estimativa de erosão hídrica a partir de aerolevanteamento remotamente pilotado**. 2024. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/34272>.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBREERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SANTOS, L. J. C.; MANGUEIRA, C. G.; OLIVEIRA, J. G. de. Proposta de classificação do nível de criticidade dos processos erosivos aplicada na região Noroeste do Paraná. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 4, 2023. Disponível em: [//williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/232](http://williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/232).

SILVA, T. M. D.; CALDEIRA, C. R. T.; CALDEIRA, M. C. O.; BALIEIRO, C. P. P.; FERREIRA, M. E. Classificação de uso e cobertura da terra e o monitoramento de áreas em restauração florestal por RPAS. **Revista Cerrados**, v. 19, n. 01, p. 84–112, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/2324>.

SCHIAVO, B. N. D. V.; HENTZ, Â. M. K.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Caracterização da fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica urbana no município de Santa Maria - RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e**

Tecnologia Ambiental, v. 20, n. 1, p. 464, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/19981>.

SILVA, E. M. da; BACANI, V. M. ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO JATOBÁ-MS. **GEOFRONTER**, v. 9, 2023. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/GEOF/article/view/7537>.

SILVA NETO, A. da. ZONEAMENTO AMBIENTAL COMO SUBSÍDIO PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SALOBRA, SERRA DA BODOQUENA – MS. **Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação**, p. 291, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105078>.

SILVEIRA, C. T. D.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. MAPEAMENTO PRELIMINAR DA SUSCETIBILIDADE NATURAL A MOVIMENTOS DE MASSA DA SERRA DO MAR PARANAENSE APOIADO NA ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/366>.

SIMENSEN, T.; HALVORSEN, R.; ERIKSTAD, L. Methods for landscape characterisation and mapping: A systematic review. **Land Use Policy**, v. 75, p. 557–569, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717314072>.

SOUSA, A. D. S. **Workflow científico aplicado à modelos ambientais: automatização das classificações ecodinâmicas e análise espaço-temporal**. 2024. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18022025-121027/>.

SOUZA, R. M.; SALIM, D. H. C.; ANTUNES, J. D. UAV Photogrammetry: Land Survey and Soil Loss Estimation of Gully Erosion in Ouro Branco, MG, Brasil. p. 1749–1756, 2019.

STORTO, C.; COCATO, G. P. Análise de Fragilidade Ambiental a partir de Técnicas de Geoprocessamento: Área de Influência da Hidrelétrica de Mauá - PR (Analysis of Environmental Fragility from Geoprocessing Techniques: Area of Influence of the Mauá Hydroelectric Plant – PR). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1694–1708, 2018.

STRAHLER, A. N. DYNAMIC BASIS OF GEOMORPHOLOGY. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 9, p. 923, 1952.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085209/1/ManualdeMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf>.

TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. D. F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 287–298, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/RRLkxZ5tzXjVc86GDKHcm5x/abstract/?lang=pt>.

THOMAZ, E. L.; FIDALSKI, J. Interrill erodibility of different sandy soils increases along a catena in the Caiuá Sandstone Formation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0190064, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/xTS6xdNV9KYwW95HJS566nC/?lang=en>.

TRICART, J. Ecodinâmica. 1977. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~edugeo/GB082/Bibliografia/Tricart_Ecodinamica.pdf.

TUNEIRAS DO OESTE. Prefeitura Municipal. **Sobre a Reserva Biológica das Perobas**, 2025. Disponível em: <https://tuneirasdoeste.pr.gov.br/perobas/>.

VALERIANO, M. de M. TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOLÓGICOS LOCAIS. 2008. Disponível em: https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/api/records/75c14312-6bb9-47c2-ad0f-ce36d48ecaf3/attachments/guia_utilizacao_dados_topodata.pdf.

VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. 2008. 223 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91352>.

WEIS, G. M.; MATOS DA SILVA, N.; PESSI, D. D.; SÁVIO BARBOSA, D.; MARTINS MOREIRA, R.; BUENO LUIZ, R.; PARANHOS FILHO, A. C. IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS ATRAVÉS DE MODELOS HIDROLÓGICOS E IMAGENS AÉREAS DE ALTA RESOLUÇÃO. **Nativa**, v. 10, n. 3, p. 391–399, 2022. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/13543>.

WREGE, M. S.; GARRASTAZU, M. C.; SOARES, M. T. S.; FRITZSONS, E.; SOUSA, V. A. D.; AGUIAR, A. V. D. Plant vegetation types in the state of Paraná and the new scenarios defined by global climate change. **Ambiência**, v. 13, n. 3, 2017. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/4367/pdf>.