



UEM – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CCH – CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PGE – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

GUSTAVO HENRIQUE ANDRADE DA CRUZ

**A RELAÇÃO ENTRE A MORFOPEDOLOGIA, O MANEJO E A DINÂMICA
HIDROLÓGICA COM O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM
CONCAVIDADE: SUBSÍDIOS PARA CONSERVAÇÃO DE NASCENTES**

Maringá, 2024

GUSTAVO HENRIQUE ANDRADE DA CRUZ

**A RELAÇÃO ENTRE A MORFOPEDOLOGIA, O MANEJO E A DINÂMICA
HIDROLÓGICA COM O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM
CONCAVIDADE: SUBSÍDIOS PARA CONSERVAÇÃO DE NASCENTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PGE, da Universidade Estadual de Maringá – UEM, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Geografia.

Linha de pesquisa: Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Silveira.

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Francieli Sant’ana Marcatto.

Maringá, 2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

C957r

Cruz, Gustavo Henrique Andrade da

A relação entre a morfopedologia, o manejo e a dinâmica hidrológica com o desenvolvimento de processos erosivos em concavidade: subsídios para conservação de nascentes / Gustavo Henrique Andrade da Cruz. -- Maringá, PR, 2024.

175 f.: il. color., figs., tabs., mapas

Orientador: Prof. Dr. Hélio Silveira.

Coorientadora: Profa. Dra. Francieli Sant'Ana Marcatto.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2024.

1. Solo - Erosão. 2. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica. 3. Comportamento físico-hídrico. 4. Solo - Degradação. I. Silveira, Hélio, orient. II. Marcatto, Francieli Sant'Ana, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. IV. Título.

CDD 23.ed. 910

A RELAÇÃO ENTRE A MORFOPEDOLOGIA, O MANEJO E A DINÂMICA
HIDROLÓGICA COM O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM
CONCAVIDADE: SUBSÍDIOS PARA CONSERVAÇÃO DE NASCENTES

Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Estadual
de Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Geografia, área de concentração: Análise Regional
e Ambiental, linha de pesquisa Análise Ambiental

Aprovada em **01 de março de 2024.**

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Hélio Silveira
Orientador- PGE/UEM



Prof. Dr. José Edézio da Cunha
Membro convidado - UNIOESTE



Prof.ª Dr.ª Maria Teresa de Nobrega
Membro convidado - UEM

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

Tenho de destacar que, a meu ver, a realização de uma pesquisa fundamentada em méritos individuais é uma empreitada difícil de ser realizada. Na área da Pedologia essa característica não é menos acentuada. A alta demanda por custosos trabalhos de campo e de laboratório, tal qual contemplam parte desta pesquisa, por si já evidencia uma própria ação coletiva. Em consideração a isso, devo expor aqui, ainda que de maneira sucinta, meus agradecimentos a todos que contribuíram para a realização desta dissertação, seja atuando de forma direta ou indireta.

Devo, primeiramente, agradecer a Deus por me conceder a vida, saúde e conhecimento. Por ser meu refúgio nos momentos de aflição.

À minha mãe, Claudenice Gonçalves de Andrade, por sempre me incentivar a buscar conhecimento e por me conceder prontamente todo o apoio necessário durante esse processo, ainda que isso exigisse enfrentar diversas dificuldades, das mais diversas naturezas.

Aos meus irmãos, Emerson, João Gabriel e Maria Eloisa Andrade, pela força e companheirismo proporcionados ao longo de toda a minha vida, bem como por compreenderem meus momentos de ausência.

À toda a minha família, em especial à minha avó, Vera Lúcia Alves, e à minha tia, Claudineia Gonçalves de Andrade, que tanto me incentivam.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hélio Silveira, pelo acolhimento na Pedologia, por oportunizar o meu ingresso na pesquisa e pelo contínuo suporte prestado durante esse período. Suas orientações, desde a graduação, não se limitaram ao desenvolvimento desta dissertação. Seus conselhos, provenientes de uma longa experiência de vida, externalizados por meio de críticas construtivas e palavras de incentivo, também têm sido fundamentais para o meu crescimento pessoal.

À minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Francieli Sant'Ana Marcatto, pelo acolhimento junto ao meu orientador e a experiência acadêmica transmitida consequente. Além disso, agradeço o apoio, sugestões e orientações (que não foram poucas!), as quais foram essenciais para o amadurecimento das ideias e o desenvolvimento desta dissertação.

À Renata Vanessa Paz da Silva e família, por permitirem a realização da pesquisa em sua propriedade e por estarem sempre dispostos a ajudar. Igualmente, gostaria de agradecer ao Sr. Cido que, sem hesitar, concedeu todo o suporte durante os trabalhos de campo quando necessário.

À prefeitura do município de Cruzeiro do Sul, Paraná, que disponibilizou a máquina para a abertura das trincheiras, sem cobrar por isso.

À ONG Donna Floresta, pelo financiamento de parte das análises laboratoriais.

À Profª. Dr. Maria Teresa de Nóbrega, pelas valiosas contribuições no exame de qualificação e na defesa, bem como pela sugestão e auxílio no processamento dos dados para a confecção das cartas de índices hidrológicos, os quais foram fundamentais para o enriquecimento da pesquisa em termos metodológicos e conceituais.

Ao Prof. Dr. José Edézio da Cunha, por suas contribuições enquanto membro da banca de defesa.

À agência de fomento, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa por 24 meses - Código de financiamento 001.

As secretárias do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM), Miriam de Carlos e Josimeire Damásio, pela amizade, paciência e dedicação em esclarecer as frequentes dúvidas surgidas durante os processos burocráticos, além do suporte prestado para solucioná-los.

Aos amigos Thales Emanuel Moreira e Gabriel Valadares, pelo expressivo auxílio nos trabalhos de campo e de laboratório (que ajuda em!), que, assim como as palavras de incentivo ponderadas durante as conversas informais, foram fundamentais para o progresso do estudo.

Ao Guilherme Carmona e à Laura Egrijas, estagiários que passaram pelo laboratório de Pedologia do Departamento de Geografia (DGE/UEM), pelo auxílio nas análises laboratoriais (tiveram um trabalho!).

Ao Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente (GEMA/UEM), que, por intermédio do técnico Vanderlei Grzegorzcyk, realizou o empréstimo de equipamentos e reagentes químicos quando foram necessários.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM), em especial aos que ministraram as disciplinas cursadas durante os dois anos de pesquisa, por todo o conhecimento transmitido.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM), alguns conhecidos de longa data, nomeadamente a Isabella Beatrys Algarte, Jeane Maciel, Jenifer Lara, João Pedro Zambon, Leonardo Vicente, Mariana Manrique, Rodrigo Gavioli e Bruna Matos (PEU/UEM), pelos momentos de alegria compartilhados e pelas valiosas trocas de experiência e conhecimento. Além disso, não poderia deixar de expressar minha gratidão, em especial, à Amanda Honorato, Fernanda Domanski, João Antônio Cardoso e Larissa Menegassi, amigos que me acompanham desde a graduação e que, também, foram alguns dos principais incentivadores do meu ingresso na pesquisa.

À Luísa Mognol e ao Dalton Zeidan, que, assim como outros colaboradores já mencionados, auxiliaram nas amostragens de solos em campo na reta final da pesquisa.

À Bruna Parpinelli, Giovane da Silva, Renan Vicente, Vitor Hugo de Souza e ao Willian Wallace, amigos que entre um encontro e outro tanto me apoiaram.

Aos demais amigos e profissionais que cruzaram meu caminho durante os dois intensos anos de pesquisa. Embora todos não estejam citados individualmente devido à abundância, cada um de vocês foram fundamentais e seu apoio não passou despercebido ou foi menos valorizado.

“É preciso ter esperança, mas ter esperança do verbo esperançar; porque tem gente que tem esperança do verbo esperar. E esperança do verbo esperar não é esperança, é espera. Esperançar é se levantar, esperançar é ir atrás, esperançar é construir, esperançar é não desistir! Esperançar é levar adiante, esperançar é juntar-se com outros para fazer de outro modo...”

(Paulo Freire)

RESUMO

Embora tenha sido evidenciado o aumento de pesquisas que visam compreender a vulnerabilidade dos solos derivados de formações areníticas no Noroeste paranaense, por meio de estudos de topossequências em conjunto com análises físicas e de comportamento hídrico dos solos, ainda são escassos os estudos que buscam levantar, reconstituir e cartografar os volumes pedológicos em áreas com características topográficas consideradas favoráveis à ocorrência de incisões erosivas, assim como avaliar os impactos da degradação dos solos na dinâmica e na qualidade das nascentes. Diante desta premissa, o objetivo principal desta pesquisa é compreender a organização e o funcionamento tridimensional da cobertura pedológica, derivada de formação arenítica (Formação Goio Erê), em área de drenagem de uma nascente no Noroeste do Paraná. Além disso, buscou-se estabelecer relações entre seu funcionamento e a degradação dos solos e do sistema fluvial. Para tanto, foram confeccionados produtos cartográficos e perfis topográficos utilizando os softwares Qgis, Corel Draw, Surfer e AutoCAD. A Análise Estrutural da Cobertura Pedológica (AECp) foi adotada como base metodológica para os levantamentos e a reconstituição bidimensional dos volumes pedológicos de cinco topossequências, realizadas na área de contribuição da nascente. A conexão dos pontos de equivalência entre os levantamentos, onde os limites pedológicos foram mapeados e representados por meio de curvas de isodiferenciação, resultou na representação tridimensional da cobertura pedológica. Para a classificação e compreensão do comportamento físico-hídrico dos solos, abriu-se trincheiras ao longo de duas topossequências (transectos A e B), onde foi realizada a análise morfológica e a coleta de amostras dos horizontes pedológicos encontrados. As amostragens foram submetidas a análises físicas, químicas e de comportamento hídrico. Os resultados obtidos indicam que a área de drenagem da nascente denominada “Água da Fonte” apresenta um sistema pedológico com a continuidade lateral rompida devido a processos erosivos ocorridos na média vertente, o que gerou uma sucessão lateral de solos composta por Latossolo-Argissolo-Aterro-Argissolo-Neossolo Quartzarênico. A área que era ocupada por cana-de-açúcar, entre 2007 e 2016, exhibe horizontes superficiais e subsuperficiais (Ap, AB e E) com valores críticos de densidade do solo e taxas reduzidas de porosidade e infiltração, contribuindo para a formação de intensos escoamentos superficiais e subsuperficiais. Esse distúrbio hidrológico se torna ainda mais acentuado no “hollow”, a partir média/baixa encosta, alinhado à linha de fluxo da exfiltração. Nesse ponto, os atributos topográficos condicionam a convergência entre os fluxos superficiais e subsuperficiais, o que conseqüentemente favorecem a formação de incisões erosivas. Todavia, essa problemática não se restringe a este setor da vertente, pois o sopé da encosta, constituída por cobertura quartzarênica de baixo teor de argila e agregação, ao receber o volumoso fluxo hídrico advindo da montante, também desenvolve diversas feições erosivas, se refletindo diretamente na dinâmica e qualidade da nascente. Dessa maneira, conclui-se que a degradação dos solos da área de contribuição hídrica analisada resulta da integração de diversos fatores: a) as características intrínsecas dos solos; b) o manejo, sobretudo da cultura da cana-de-açúcar, que levou a mudanças substanciais na qualidade física e dinâmica hídrica dos solos; c) o aumento do volume de chuvas no ano de 2016 em virtude da ocorrência de um El Niño; d) as características topográficas, as quais controlam a dinâmica hidrológica da vertente. Assim, em contraposição à lei ambiental vigente, para garantir uma proteção eficaz das nascentes mediante a implementação das APPs, principalmente em ocorrência de eventos climáticos extremos, é essencial que o zoneamento seja delimitado levando em consideração as características geomorfológicas locais, bem como a hidrodinâmica do ambiente, a qual também é influenciada pelas características físicas dos solos.

Palavras-chave: Solo. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica. Comportamento físico-hídrico. Erosão. Área degradada.

ABSTRACT

Although there has been an increase in research aimed at understanding the vulnerability of soils derived from sandstone formations in the northwest of Paraná, through studies of toposequences in conjunction with physical and water behavior analyses of soils, there are still few studies that seek to survey, reconstruct and map pedological volumes in areas with topographic characteristics considered favorable to the occurrence of erosive incisions, as well as assessing the impacts of soil degradation on the dynamics and quality of springs. Given this premise, the main objective of this research is to understand the organization and three-dimensional functioning of the pedological cover, derived from sandstone formation (Goio Erê Formation), in the drainage area of a spring in northwest Paraná. In addition, we sought to establish relationships between its functioning and the degradation of soils and the river system. To this end, cartographic products and topographic profiles were created using Qgis, Corel Draw, Surfer and AutoCAD software. The Structural Analysis of Pedological Coverage (AECPC) was adopted as the methodological basis for the surveys and two-dimensional reconstitution of the pedological volumes of five toposequences, carried out in the area where the spring contributes. Connecting the points of equivalence between the surveys, where the soil boundaries were mapped and represented using isodifferentiation curves, resulted in a three-dimensional representation of the soil cover. In order to classify and understand the physical and hydric behavior of the soils, trenches were opened along two toposequences (transects A and B), where morphological analysis was carried out and samples of the soil horizons found were collected. The samples were subjected to physical, chemical and water behavior analyses. The results obtained indicate that the drainage area of the spring called "Água da Fonte" has a pedological system with lateral continuity broken due to erosion processes that occurred in the middle slope, which generated a lateral succession of soils composed of Oxissol-Ultisol-Landfill-Ultisol-Quartzipsamment. The area that was occupied by sugarcane between 2007 and 2016 shows surface and subsurface horizons (Ap, AB and E) with critical soil density values and reduced porosity and infiltration rates, contributing to the formation of intense surface and subsurface runoff. This hydrological disturbance becomes even more pronounced in the "hollow", from the middle/low of the slope, aligned with the exfiltration flow line. At this point, the topographic attributes condition the convergence between surface and subsurface flows, which consequently favors the formation of erosive incisions. However, this problem is not restricted to this sector of the slope, as the foot of the slope, made up of quartzarenic cover with a low clay content and aggregation, also develops various erosive features when it receives the voluminous water flow coming from upstream, which is directly reflected in the dynamics and quality of the spring. In this way, it can be concluded that the degradation of the soils in the area of water contribution analyzed is the result of the integration of various factors: a) the intrinsic characteristics of the soils; b) management, especially of the sugarcane crop, which has led to substantial changes in the physical quality and water dynamics of the soils; c) the increase in the volume of rainfall in 2016 due to the occurrence of an El Niño; d) the topographical characteristics, which control the hydrological dynamics of the slope. Thus, in contrast to current environmental law, to ensure effective protection of springs through the implementation of APPs, especially in the event of extreme weather events, it is essential that zoning is delimited taking into account local geomorphological characteristics, as well as the hydrodynamics of the environment, which is also influenced by the physical characteristics of the soils.

Keywords: Soil. Pedological Cover Structural Analysis. Physical-Hydraulic Behavior. Erosion. Degraded Area.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos de estresse e tensão na função dos poros.....	28
Figura 2 - Processos hidrológicos de pequenas bacias	36
Figura 3 - Localização da área de estudo, no município de Cruzeiro do Sul, Paraná	40
Figura 4 - Formações geológicas do município de Cruzeiro do Sul-PR	42
Figura 5 - Classes de declividade do município de Cruzeiro do Sul-PR.....	43
Figura 6 - Morfologia de vertente do município de Cruzeiro do Sul-PR.....	44
Figura 7 - Classes de solos do município de Cruzeiro do Sul-PR.....	46
Figura 8 - Perfil esquemático destacando a estrutura de um segmento de Floresta Estacional Semidecidual, com predominância de Aspidosperma, Peltophorum, Enterolobium, Parapiptadenia, Cordia, Gallesia, Balfourodendron, Holocalyx e Cedrela.	47
Figura 9: Configuração dos lotes rurais planejados pela CMNP.....	49
Figura 10: Contribuição do Paraná, em %, para a produção de café no Brasil	50
Figura 11 - Uso da terra nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná no ano de 1985	52
Figura 12 - Uso da terra nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná no ano de 2021	55
Figura 13 - Classes de uso da terra do município de Cruzeiro do Sul-PR nos anos de 1985, 2000, 2010 e 2021	56
Figura 14 - As principais classes de uso da terra em relação aos hectares (A) e ao percentual (B) de área ocupada no município de Cruzeiro do Sul – PR.....	57
Figura 15 - Produto Interno Bruto (PIB) a preço corrente segundo o ramo de atividade do município – 2020, Cruzeiro do Sul-PR	59
Figura 16 - Fluxograma simplificado dos métodos e técnicas utilizados na pesquisa	60
Figura 17 - Método de implantação das sondagens ao longo de uma vertente	67
Figura 18 - Operações sucessivas para a localização de uma curva de isodiferenciação.....	68
Figura 19: Disposição dos levantamentos bidimensionais no perímetro da área de contribuição da nascente Água da Fonte	69
Figura 20 - Modelo esquemático do modelo de permeâmetro com carga constante	72
Figura 21 – Uso da terra na área de abastecimento da nascente Água da Fonte nos anos de 1980, 1985, 2008, 2016 e 2023	81
Figura 22 - Índice de Potência de Escoamento (IPE) da área de drenagem da nascente Água da Fonte e seu entrono.....	84
Figura 23 - Índice Topográfico de Umidade (ITU) da área de drenagem da nascente Água da Fonte e seu entrono.....	86

Figura 24 - Representação esquemática da organização vertical e lateral dos solos do transecto A	90
Figura 25 - Reconstituição da cobertura pedológica do transecto A, anterior ao desenvolvimento da área degradada em 2016	95
Figura 26 - Variação vertical dos constituintes granulométricos dos perfis de solo ao longo do transecto A.....	98
Figura 27 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto A	103
Figura 28 - Variação vertical da densidade do solo (Ds) dos horizontes pedológicos ao longo do transecto A.....	106
Figura 29 - Coeficiente de correlação de <i>Pearson</i> (<i>r</i>) entre os resultados das variáveis físicas e hídrica do transecto A.....	109
Figura 30 - Variação da porosidade (micro, macro e porosidade total) em relação a densidade do solo ao longo do transecto A	110
Figura 31 - Distribuição espacial das classes de Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados (DMPa) dos horizontes pedológicos do transecto A	114
Figura 32 - Variação vertical das taxas de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos horizontes pedológicos ao longo do transecto A	117
Figura 33 - Comportamento espacial da permeabilidade dos horizontes pedológicos do transecto A.....	122
Figura 34 - Topossequência de solos do transecto B	127
Figura 35 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto B.....	131
Figura 36 - Hipsometria e direção dos fluxos hídricos.....	133
Figura 37 - Topossequência de solos do transecto C	139
Figura 38 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto C.....	141
Figura 39 - Topossequência de solos dos transectos D e E	142
Figura 40 - Representação esquemática da organização tridimensional da cobertura pedológica da área de drenagem da nascente Água da Fonte	144

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição macromorfológica dos horizontes pedológicos do transecto A	92
Quadro 2 - Classificação dos solos do transecto A	126
Quadro 3 - Macromorfologia dos horizontes pedológicos na base do transecto B	129
Quadro 4 - Classificação do solo do descrito na base do transecto B	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos poros do solo: características e funcionalidades.....	27
Tabela 2 - População total, urbana e rural da mesorregião Noroeste (1970/2000)	53
Tabela 3 - Número e área ocupada (ha) pelos estabelecimentos agrícolas do Noroeste paranaense	53
Tabela 4 - Classes de intensidade de correlação.....	65
Tabela 5 - Classes de permeabilidade do solo	73
Tabela 6 - Granulometria, relação silte/argila, grau de dispersão e floculação dos horizontes pedológicos do transecto A.....	99
Tabela 7 - Porosidade, densidade do solo e diâmetro médio ponderado dos agregados dos horizontes pedológicos do transecto A.....	107
Tabela 8 - Diâmetro médio ponderado dos agregados, argila, carbono orgânico e densidade do solo dos horizontes pedológicos do transecto A.....	112
Tabela 9 - Condutividade hidráulica saturada, coeficiente de variação e classes de permeabilidade dos horizontes pedológicos do transecto A.....	118
Tabela 10 - Composição química dos horizontes pedológicos do transecto A	125
Tabela 11 - Granulometria, relação silte/argila, argila natural, grau de dispersão e floculação dos horizontes pedológicos na base do transecto transecto B	130
Tabela 12 - Porosidade, densidade do solo e diâmetro médio ponderado dos agregados dos horizontes pedológicos na base do transecto B	134
Tabela 13 - Diâmetro médio ponderado dos agregados, argila, carbono orgânico e densidade do solo dos horizontes pedológicos na base do transecto B.....	134
Tabela 14 - Condutividade hidráulica saturada, coeficiente de variação e classes de permeabilidade dos horizontes pedológicos na base do transecto B.....	135
Tabela 15 - Composição química dos horizontes pedológicos na base do transecto B.....	137

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AECP	Análise Estrutural da Cobertura Pedológica
ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
CMNP	Companhia Melhoramentos do Norte do Paraná
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTNP	Companhia de Terras do Norte do Paraná
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GERCA	Grupo Executivo de Racionalização da Cafeicultura
IAT	Instituto Água e Terra
IBGE	Instituto de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
ITC	Instituto de Terras e Cartografia do Paraná
MDE	Modelo digital de Elevação
MINEROPAR	Minerais do Paraná
PGE	Programa de Pós-Graduação em Geografia
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool
RPPN	Reserva Particular de Patrimônio Natural
SGB	Serviço Geológico do Brasil
UEM	Universidade Estadual de Maringá

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
1.1. ANÁLISE ESTRUTURAL DA COBERTURA PEDOLÓGICA	21
1.2. A INFLUÊNCIA DO MANEJO SOBRE OS INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA E DINÂMICA HÍDRICA DOS SOLOS	25
1.3. NASCENTE: CONCEITO, FUNCIONAMENTO E NORMATIVAS DE PROTEÇÃO	32
2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE PESQUISA	39
2.1. LOCALIZAÇÃO	39
2.2. ASPECTOS FÍSICOS	40
2.3. ABORDAGEM HISTÓRICA E ASPECTOS SOCIAIS	48
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	60
3.1. SELEÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	61
3.2. TRABALHOS DE GABINETE	62
3.2.1. Levantamento bibliográfico e de dados secundários	62
3.2.2. Levantamento e representação evolutiva do uso da terra na área de estudo	63
3.2.3. Confeção de produtos cartográficos	63
3.2.4. Elaboração de perfis da representação 3D da cobertura pedológica	64
3.2.5. Tratamento de dados analíticos e correlações estatísticas	65
3.3. TRABALHOS DE CAMPO	66
3.3.1. Delimitação da área de contribuição da nascente	66
3.3.2. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica	66
3.3.3. Análise morfológica e amostragem de solo	70
3.4. TRABALHOS DE LABORATÓRIO	71
3.4.1. Análise hídrica	71
3.4.1.1. Condutividade hidráulica saturada (K_{sat})	71
3.4.2. Análises físicas	73
3.4.2.1. Granulometria	73
3.4.2.2. Argila dispersa em água e grau de floculação	75
3.4.2.3. Microporosidade, macroporosidade e porosidade total	75
3.4.2.4. Densidade do solo	77
3.4.2.5. Estabilidade de agregados via seca	77

3.4.3. Análises Químicas.....	78
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1. HISTÓRICO DO USO DA TERRA E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS NA ÁREA DE RECARGA DA NASCENTE ÁGUA DA FONTE.....	79
4.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOMORFOLÓGICAS.....	82
4.3. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO A.....	88
4.3.1. Caracterização macromorfológica.....	91
4.3.2. Granulometria, Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação.....	96
4.3.3. Densidade do Solo e Porosidade.....	104
4.3.4. Estabilidade de Agregados.....	111
4.3.5. Características hídricas.....	116
4.3.6. Características químicas.....	123
4.4. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO B.....	127
4.4.1. Caracterização macromorfológica, física, hídrica e química.....	129
4.5. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO C.....	138
4.5.1. Características físicas.....	140
4.6. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DOS TRANSECTOS D/E.....	142
4.7. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO TRIDIMENSIONAL DA COBERTURA PEDOLÓGICA.....	143
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	148
REFERÊNCIAS.....	150
APÊNDICE.....	165

INTRODUÇÃO

A expansão agrícola desempenhou um papel fundamental no processo de ocupação e no desenvolvimento econômico dos municípios da mesorregião Noroeste paranaense. No entanto, a exploração desordenada do solo, sem imediata preocupação com futuras consequências ambientais, acarretou e continua a provocar alarmantes níveis de degradação, com destaque para a erosão dos solos e seus processos associados.

Essa problemática vem sendo alertada desde a década de 1980. A partir de então tem sido associada, principalmente, a fatores antrópicos, como o uso irracional dos solos mediante a implantação de lavouras agrícolas em substituição à floresta nativa, onde não foram adotadas práticas conservacionistas após o desmatamento generalizado, bem como a fatores relativos à natureza da cobertura pedológica, uma vez que a mesorregião é recoberta, na maior parte, por solos derivados de formações areníticas (Bigarella; Mazuchowski, 1985; Muzilli et al., 1989).

Embora se tenha evidenciado, sobretudo a partir da década de 1990, o aumento de pesquisas científicas que se dedicam a levantar e compreender a vulnerabilidade dos principais sistemas pedológicos que ocorrem na mesorregião, bem como o surgimento e a dinâmica das formas erosivas que frequentemente se destacam na paisagem, ainda são poucos os estudos que procuram estabelecer as relações entre a degradação dos solos e os seus efeitos sobre as nascentes, contribuindo, desse modo, para o estabelecimento de diretrizes adequadas à conservação do meio.

Dentre as implicações decorrentes do uso desordenado e a degradação dos solos por incisões erosivas sobre o sistema fluvial, destacam-se as modificações estruturais e a criação de novas descontinuidades neste sistema tridimensional (cobertura pedológica), o que pode alterar sua circulação hídrica lateral e, conseqüentemente, afetar o abastecimento das nascentes (Ruellan, 1985). Além disso, o transporte do material inconsolidado erodido nos compartimentos mais altos da vertente e o entulhamento na baixa encosta levam as nascentes em concavidade a serem sistemas ambientais de alta vulnerabilidade (Felippe, 2009), uma vez que podem ser afetadas pelo assoreamento e pela contaminação da água devido ao recebimento de partículas sólidas e elementos químicos dissolvidos na solução do solo.

Analisar espacialmente as variações na organização da cobertura pedológica que constitui a área de drenagem das nascentes, associada à sua representação tridimensional, tem se mostrado um método promissor para compreender de forma efetiva os atributos responsáveis pelo funcionamento e a vulnerabilidade dessas áreas (Fruet, 2021; Andreotti et al., 2023). A representação tridimensional, combinada aos resultados analíticos laboratoriais, permite uma

compreensão espacial da dinâmica hidrológica da área de recarga das nascentes, além de sua relação com os limites e a qualidade física dos solos. Dessa forma, as áreas com maior grau de vulnerabilidade são identificadas e caracterizadas.

No entanto, ainda que remonte a década de 1970, ainda são poucos os estudos que adotam a Análise Estrutural da Cobertura Pedológica (AECP) como metodologia de análise tridimensional, de modo a demonstrar as variações espaciais das características dos solos em concavidades, também denominadas como hollows por Hack e Goodlett (1960). Essas feições geomorfológicas são apontadas como áreas preferenciais de ocorrência de voçorocas na região Noroeste paranaense (Nóbrega et al., 2023).

Estudos dessa natureza podem ser úteis para o processo de planejamento e de gestão ambiental ao fornecerem subsídios para otimizar o cumprimento de diretrizes estabelecidas por políticas que almejam o desenvolvimento sustentável, como as normas promulgadas pela Lei Federal 12.651/2012, que definem a extensão das Áreas de Preservação Permanente (APPs).

A necessidade de aprimorar a delimitação espacial das APPs parte do pressuposto de que, apesar de muitas nascentes possuírem área vegetada com um raio de 50 metros, estando em conformidade com a legislação ambiental vigente, as condições estruturais e funcionais de sua área de abastecimento podem estar drasticamente comprometidas, especialmente quando comportam lavouras agrícolas, conforme evidenciado por Fruet (2021) e Andreotti et al. (2023).

As alterações do estado físico do solo e o desequilíbrio no ambiente provocados pelo manejo inadequado podem, portanto, tornar essas áreas de preservação, de metragem padrão, insuficientes para a conservação e um bom funcionamento das nascentes. Considerando-se, ainda, sob uma perspectiva geossistêmica, uma vez que esses elementos são integrantes de um sistema de ordem hierárquica maior, que os problemas deles derivados podem se refletir na dinâmica e funcionamento da bacia hidrográfica a qual pertencem.

Dessa maneira, este trabalho tem como intuito contribuir para o entendimento da cobertura pedológica que constitui esta importante e complexa área em termos geoambientais, mas que ainda carece de estudos detalhados. Com esse propósito, o objetivo principal é compreender a organização e o funcionamento tridimensional da cobertura pedológica, derivada de formação arenítica (Formação Goio Erê), em área de drenagem de uma nascente no Noroeste do Paraná. Além disso, buscou-se estabelecer relações entre seu funcionamento e a degradação dos solos e do sistema fluvial.

Para atingir o objetivo geral, se propôs a seguir os seguintes objetivos específicos:

- Levantar e cartografar a distribuição dos volumes pedológicos ao longo da área de drenagem da nascente;

- Avaliar a qualidade física e a dinâmica hídrica dos volumes pedológicos e a sua relação com a ocorrência de processos erosivos;
- Compreender os efeitos do uso da terra nas mudanças estruturais e no funcionamento dos solos;
- Compreender, através de índices hidrológicos, como a característica topográfica local, em conjunto com as características pedológicas, atua como propulsora do desencadeamento de sulcos erosivos;
- Inferir, a partir de uma análise tridimensional, os efeitos da degradação dos solos sobre o funcionamento da nascente.

Dessa maneira, a pesquisa foi estruturada em cinco seções:

A primeira seção refere-se à fundamentação das concepções teóricas, que não só embasam, mas também auxiliaram na escolha dos métodos adotados na pesquisa.

A segunda seção conduz a caracterização geral da área de estudo, onde foram retratados os aspectos físicos, históricos e socioeconômicos. De acordo com a disponibilidade de dados e, em alguns momentos, de forma intencional, essa descrição foi realizada em diferentes escalas espaciais e temporais.

A terceira seção corresponde aos métodos e técnicas aplicados na pesquisa, de modo a atender os objetivos propostos. Nesta parte foi detalhado o percurso dos procedimentos operacionais seguidos nas atividades desenvolvidas em campo, gabinete e laboratório.

A fase pós-experimentações e tratamento de dados, constitui a seção quatro, e estão relacionados aos resultados obtidos e suas respectivas discussões.

A última seção é dedicada às considerações finais, onde se apresentou uma síntese dos resultados alcançados com o estudo, onde também foram expostas as limitações e as potencialidades de se seguir a linha de pesquisa em questão, ou parte dela, para o aperfeiçoamento dos objetivos previstos nas normativas ambientais que almejam a conservação dos solos e da água.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. ANÁLISE ESTRUTURAL DA COBERTURA PEDOLÓGICA

É relevante destacar que os solos são sistemas dinâmicos e estruturados, em perpétua evolução, onde ocorrem transferências e transformações de constituintes, estruturas e sistemas porosos (Ruellan, 1985). Este aspecto evidencia sistemas heterogêneos na paisagem, tanto em termos de organização quanto de funcionamento (Queiroz Neto, 2002).

Contudo, a percepção acerca das variações laterais, devido à ocorrência de um complexo sistema de transformação, só foi efetivamente alcançada após a sintetização da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica (AECp), quando os solos passaram a ser compreendidos e examinados como um sistema contínuo e estruturado ao longo das vertentes.

O ponto inicial desde avanço remonta à primeira metade do século XX, quando, utilizando o conceito de *catena*, Milne, na década de 1930, realizou estudos relacionados a gênese e a distribuição da cobertura pedológica na paisagem (Queiroz Neto, 2002). Apesar do referido autor ser o primeiro a demonstrar que a distribuição dos solos estaria diretamente relacionada com o relevo (Santos, 2000), o conceito supracitado ainda era bastante reducionista, pois ainda trazia consigo a ideia de perfis isolados, onde a organização lateral era demonstrada sob o aspecto de sucessão vertical dos horizontes pedológicos (Queiroz Neto, 2002).

Segundo Queiroz Neto (op. Cit.) avanços significativos para a constituição de ideias que levaram a sistematização da AECp foram concebidas posteriormente por Delvigne (1965), que em sua tese de Doutorado desenvolvida em região equatorial do continente africano, voltada para a compreensão das alterações dos granitos ao longo da encosta, constatou que o topo das vertentes são áreas de exportação de elementos químicos, enquanto a base pode ser de acumulação. Seguidamente, ao estudar duas topossequências na África Central, Bocquier (1973), em sua tese de Doutorado, concluiu que as diferenciações pedogenéticas são resultados de processos de transformações, condicionados por fluxos hídricos internos.

Ainda na década de 1970 a AECp passou a integrar outros estudos desenvolvidos por pesquisadores franceses no continente africano, e, na década de 1980, foi difundida e passou a compor também pesquisas realizadas no Brasil, na França e na Guiana Francesa (Santos, 2000).

A partir disso, Boulet (1978) apresentou em sua tese de doutorado as diretrizes da aplicação metodológica da AECp, onde foi idealizada a concepção que permitiu descrever e representar de forma integrada as sucessões verticais e laterais dos horizontes pedológicos ao longo da encosta e traduzir sua organização e funcionamento. Assim, tornou-se possível

compreender o processo de mobilização de matéria no solo (Boulet, 1992) e, conseqüentemente, a evolução dos sistemas pedológicos (Ruellan; Dosso; Fritsch, 1989).

Por conseguinte, foi possível estabelecer duas bases conceituais concretas: a de que os solos são sistemas estruturais complexos, e que se pode reconstruir diretamente a constituição de seus materiais e os mecanismos que os diferem (Bocquier, 1984).

Realizada uma breve reconstituição evolutiva no que concerne à origem da AECP e sua disseminação inicial no meio científico, torna-se relevante destacar os fatores e processos associados que contribuem para as transformações pedogenéticas, bem como a referida metodologia tem contribuído para o levantamento e compreensão do funcionamento da cobertura pedológica em duas e três dimensões na paisagem.

Destaca-se que, o relevo, enquanto condutor dos fluxos hídricos por meio de sua morfologia e grau de inclinação (declividade), desempenha um papel fundamental no processo de gênese e evolução dos solos. Isso se deve ao fato de que a circulação hídrica é responsável por ações geoquímicas, além de conduzir a redistribuição e/ou a eliminação de soluções e elementos da vertente (Queiroz Neto, 2000), podendo, além da evolução pedogenética dos horizontes dos solos (Vidal Torrado; Lepsch; Castro, 2005), levar a modificações no modelado do relevo (Queiroz Neto, 2000).

Dessarte, quando as condições pedobioclimáticas são estáveis, ocorrem sistemas em equilíbrio, onde não há divergências entre a sucessão estrutural dos horizontes pedológicos, com variações verticais organizadas de forma mais ou menos paralela à superfície. Todavia, quando essas condições se tornam instáveis, novas seqüências passam a existir e, desse modo, origina-se um sistema em desequilíbrio (Boulet; Chauvel; Lucas, 1984; Boulet et al., 1993).

A Análise Estrutural, enquanto metodologia de levantamento e compreensão da organização e funcionamento dos solos, foi utilizada como embasamento metodológico em diversas pesquisas no Brasil, com destaque para o levantamento bidimensional. Em consonância a isso, também foram realizados diversos estudos em áreas sobre domínio de formações areníticas nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná, destacando os desenvolvidos por Cunha, Castro e Salomão (1999); Gasparetto (1999); Barbosa, Marcatto e Silveira (2021).

Outros pesquisadores ainda utilizaram o princípio da AECP em associação com outras técnicas de campo e laboratório, de modo a compreender a ocorrência e a dinâmica de formas erosivas, como Beckauser e Silveira (2020) e Marcatto (2020).

Cunha, Castro e Salomão (1999), ao estudarem uma vertente no município de Umuarama-PR, tiveram como objetivo compreender os arranjos verticais e laterais dos

horizontes pedológicos. Os autores constataram processos de transformações laterais através da observação de transferência de matéria ao longo da vertente, onde um horizonte Bw do topo se transforma em um Bt no terço médio da vertente, devido ao processo de e-iluviação. Concomitante, a perda progressiva da fração argila sentido à jusante levou o Argissolo (denominado como Podzólico Vermelho-Amarelo anteriormente) a se transacionar lateralmente para um Neossolo Quartzarênico (Areia Quartzosa) no sopé da vertente.

Gasparetto (1999), ao estudar as formações superficiais e sua relação com o arenito da Formação Caiuá, na mesorregião Noroeste do Paraná, analisou três topossequências localizadas nos municípios de Cianorte, Paranavaí e Umuarama-PR. Através da Análise Estrutural, o autor constatou um processo de transferência de matéria ao longo dos três transectos analisados, onde, no denominado como Três Leões, localizado no município de Cianorte, houve a transição de um horizonte Bw (Latossolo) para um Bt (Argissolo) entre a alta e a média vertente, se sucedendo para um Neossolo Quartzarênico no sopé. Nas demais topossequências, o Latossolo se estendeu até a baixa encosta, onde transacionou diretamente para um Neossolo Quartzarênc. O autor ainda enfatiza que as transformações laterais desses solos estão relacionadas ao recuo das cabeceiras de drenagem, através do aprofundamento dos vales, onde os processos climáticos e tectônicos são apontados como os possíveis causadores desse comportamento.

Já Barbosa, Marcatto e Silveira (2021) utilizaram a análise bidimensional para avaliarem a relação entre o sistema pedológico e o relevo ao estudarem uma vertente no município de Iguaraçu-PR. Ao longo da topossequência de solos analisada, o Latossolo Vermelho se prevaleceu do topo até os últimos 40 metros da vertente, onde se transaciona para um Gleissolo Háptico. Os autores ainda constataram, através da análise granulométrica, a perda gradual do conteúdo de argila, vertical e lateralmente, ao longo do recorte topográfico. A mobilização das frações finas corroborou para ocorrência de horizontes superficiais e de perfis mais arenosos em direção à jusante.

Marcatto (2020) analisou três topossequências de solos de textura média e arenosa derivados de formações areníticas distintas, pertencentes ao Grupo Bauru, localizadas nos municípios de Presidente Castelo Branco, Guaraci e Astorga-PR. A partir do estudo do comportamento físico-hídrico da cobertura pedológica, a autora constatou que todas as topossequências estão em desequilíbrio, com o transporte de matéria ao longo da vertente, o que demonstra a alteração dos horizontes devido aos fluxos hídricos verticais e laterais. Além disso, foi possível constatar que o manejo do solo para o cultivo de cana-de-açúcar possui uma relação direta com as mudanças em seus atributos físicos.

Beckauer e Silveira (2020) também utilizaram a análise bidimensional para compreender a organização da cobertura pedológica de um vale em berço em Sumaré, distrito do município de Paranaíba-PR. Os autores encontraram uma sequência de Latossolo, Argissolo e Neossolo Quartzarênico ao longo da encosta. Identificaram duas frentes de transformação. A primeira frente ocorre entre o topo e a média vertente, onde o horizonte Bt, diagnóstico do Argissolo, avança sobre o Bw da cobertura latossólica. Concomitante a este processo, a segunda frente ocorre no sopé da vertente, onde um Neossolo Quartzarênico avança sobre o Argissolo.

Ademais, alguns pesquisadores também aplicaram a Análise Estrutural em outros estados brasileiros. Castro (1989), em sua tese de doutorado, apontado como um dos trabalhos pioneiros na aplicação da metodologia em questão no Brasil, analisou um sistema de transformação Latossolo-Argissolo em Marília-SP. A autora constatou que devido à transferência e concentração de matéria na média e baixa vertente, ocorre um sistema em desequilíbrio, na qual um horizonte B latossólico se transforma em B textural.

Salomão (1994), ao pesquisar os processos erosivos lineares em Bauru – SP, utilizou os levantamentos em topossequências como uma das metodologias aplicadas em seu trabalho. Dessa maneira, a utilização parcial da Análise Estrutural, juntamente outros parâmetros físicos e hídricos (porosidade, densidade e condutividade hidráulica saturada), permitiu compreender a circulação da água e definir as áreas mais suscetíveis à ocorrência de ravinamentos.

Apesar de serem, em geral, pouco frequentes, alguns pesquisadores ainda propuseram analisar a espacialização dos solos na paisagem a partir da sinterização dos levantamentos bidimensionais.

Calegari (2000), ao utilizar alguns procedimentos, dentre eles o resultado da análise de 10 topossequências no município de Nova Esperança-PR, e, posteriormente, extrair desses levantamentos os dados para uma representação e análise tridimensional, delimitou e compreendeu a distribuição e evolução de cinco sistemas pedológicos na paisagem (Latossolo-Neossolo Quartzarênico; Latossolo-Argissolo-Latossolo; Latossolo-Argissolo-Neossolo Litólico; Argissolo-Neossolo Litólico; Latossolo-Argissolo-Neossolo Quartzarênico-Gleissolo).

Dessa maneira, ao investigar a organização bi e tridimensional da cobertura pedológica em conjunto com a morfologia da vertente, a autora concluiu que os solos encontrados ao longo do declive são originalmente oriundos de uma cobertura latossólica primária e que, devido a um desequilíbrio (bioclimático e/ou tectônico) instalou-se a transferência de matéria e os processos de e-iluviação. A autora também enfatiza que o avanço regressivo do Argissolo sobre o Latossolo pode levar ao aumento das áreas com maior grau de suscetibilidade erosiva.

Fruet (2021) considerou a análise tridimensional para compreender o funcionamento de duas nascentes sob substrato basáltico no município de Mandaguari-PR. Através do levantamento morfológico, juntamente com o levantamento bidimensional de três eixos, a autora encontrou três classes de solos na cabeceira de drenagem das nascentes analisadas (Neossolo Litólico, Chernossolo e Plintossolo). Assim, foi possível representar em mapa a organização de cada solo encontrado ao longo da paisagem, bem como o aparecimento/desaparecimento dos horizontes e a variação de suas respectivas espessuras. A autora ainda constatou que o conteúdo de argila no perímetro das cabeceiras de drenagem analisadas foi diretamente influenciado pela declividade.

Já Pellerin et al. (1997) utilizaram a análise tridimensional para compreender a dinâmica evolutiva de uma pequena depressão fechada no município de Biguaçu-SC, onde constataram que a evolução dos solos segue o relevo, ou seja, a pedogênese acompanha a morfogênese.

Frente ao exposto, é notório que a evolução pedogenética pode gerar sistemas pedológicos com diferentes graus de potencialidade e vulnerabilidade. Contudo, no contexto do desenvolvimento de formas erosivas, a introdução de práticas de manejo e técnicas agrícolas pode causar alterações substanciais no comportamento físico-hídrico dos solos, acentuando sua vulnerabilidade. À vista disso, este será o próximo tema a ser abordado.

1.2. A INFLUÊNCIA DO MANEJO SOBRE OS INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA E DINÂMICA HÍDRICA DOS SOLOS

Conforme destacado por Richart et al. (2005), a introdução de sistemas agrícolas em substituição à vegetação nativa, especialmente quando acompanhados de técnicas de manejo inadequadas, ocasiona alterações significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, resultando no desequilíbrio deste com o meio ambiente.

A principal problemática que envolve as práticas de manejo em relação às alterações físicas dos solos reside no aumento de sua densidade, consequência da compactação provocada pelo tráfego de máquinas agrícolas habitualmente utilizadas durante a colheita e em sua manutenção entre safras, as quais exercem grande carga e pressão sobre os solos (Campos et al., 1995; Collares et al., 2006).

No que compete aos atributos diretamente afetados pela densificação do solo em resposta à compactação, destacam-se as alterações no tamanho e estabilidade dos agregados, os quais são responsáveis por sua estruturação. Além disso, essa compactação provoca a diminuição do volume de poros totais (porosidade total) e dos macroporos (macroporosidade)

em relação à microporosidade, influenciando no regime hídrico (Silva, 1980; Borges; Kiehl; Souza, 1999; Ramos et al., 2010; Pezarico et al., 2013). Dessa forma, a dificuldade de infiltração e percolação da água, em resposta à redução da porosidade, levam à concentração de fluxos hídricos superficiais, predispondo os solos à erosão (Bertol et al., 2001).

O estado de densificação em áreas agricultáveis está, sobretudo, associado ao sistema de manejo adotado, como abordado por Reichert; Suzuki; Reinert (2007).

[...] A compactação em áreas agrícolas e em pastagens ocorre, geralmente, em uma camada encontrada até, no máximo, a 20 cm, enquanto, em áreas florestais, a compactação pode atingir maiores profundidades. No plantio convencional, essa camada compactada era rompida pelos implementos de preparo do solo, transferindo a compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. No sistema plantio direto ou em pastagens, como não há revolvimento, a compactação do solo fica mais restrita à sua superfície (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007, p.50).

Com papel de destaque, um dos principais provedores da compactação, além do tráfego constante de máquinas agrícolas, como já aludido, é a utilização de implementos no preparo do solo, especialmente em sistema de cultivo convencional.

Em função disso, convém destacar as acentuadas alterações geradas pelo uso de arados de discos/aiveca e grades aradoras durante a manutenção do solo. Esses são implementos agrícolas que, após sucessivos usos, são capazes de provocar a formação do chamado “pé-de-arado” (Vasconcelos; Pacheco, 1987; Gabriel Filho et al., 2000), que se traduz na ocorrência de uma camada subsuperficial compactada em contraste com a pulverização da superfície (Freitas, 1992; Gabriel Filho et al., 2000; Machado, 2003).

Seus efeitos podem atingir distintos estratos de profundidades, dependendo do implemento adotado na manutenção dos solos. Vasconcelos e Pacheco (1987) apontam que a grade aradora ou grade pesada pode atingir em média de 10 a 15 cm de profundidade, o arado de disco 20 cm, enquanto o arado de aiveca apresenta uma capacidade de revolvimento mais significativo, podendo chegar a 40 cm. Em concordância a isso, Stone e Silveira (1999) ao analisarem o efeito de diferentes sistemas de manejo sobre um Latossolo Vermelho-Escuro, constataram que a utilização da grade aradora acarretou maior compactação do solo entre 10 e 24 cm de profundidade.

Entretanto, a variabilidade da densidade não circunscreve ao manejo, uma vez que ela pode oscilar naturalmente conforme as características inerentes à composição dos solos ou em função da disfunção do processo de densificação natural, resultante da mobilização de partículas no interior dos solos, especialmente da argila. Todavia, embora a densificação natural

também possa gerar a obstrução dos poros dos solos, ou o selamento parcial destes, as práticas agrícolas exercem uma influência decisiva em seu estado poroso (Brady; Weil, 2013).

Reinert e Reichert (2006) enfatizam que, como na densidade, a própria constituição dos solos influenciam em seu sistema de poros e, em consequência disso, na diminuição ou incrementação da taxa de infiltração. No tocante à granulometria, os microporos predominam em solos argilosos devido ao tamanho e organização das partículas minerais. Esses mesmos microporos possuem maior capacidade de retenção e armazenamento de água no solo. Inversamente, os macroporos se predominam em solos arenosos e são responsáveis pelo processo de percolação da água.

Em relação à sua disposição no que diz respeito às unidades estruturais, considera-se que apresentam uma distribuição bimodal, sendo os intra-agregados, onde se agrupam os microporos, e os inter-agregados, onde se destacam a ocorrência dos macroporos (Othmer; Diekkruger; Kutilek, 1991; Ribeiro et al., 2007).

Em suma, a heterogeneidade do meio poroso dos solos resulta em uma variedade de classificações de acordo com seu diâmetro efetivo. Como consequência, apresentam funcionalidades específicas, conforme representado por Brewer (1964) (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação dos poros do solo: características e funcionalidades

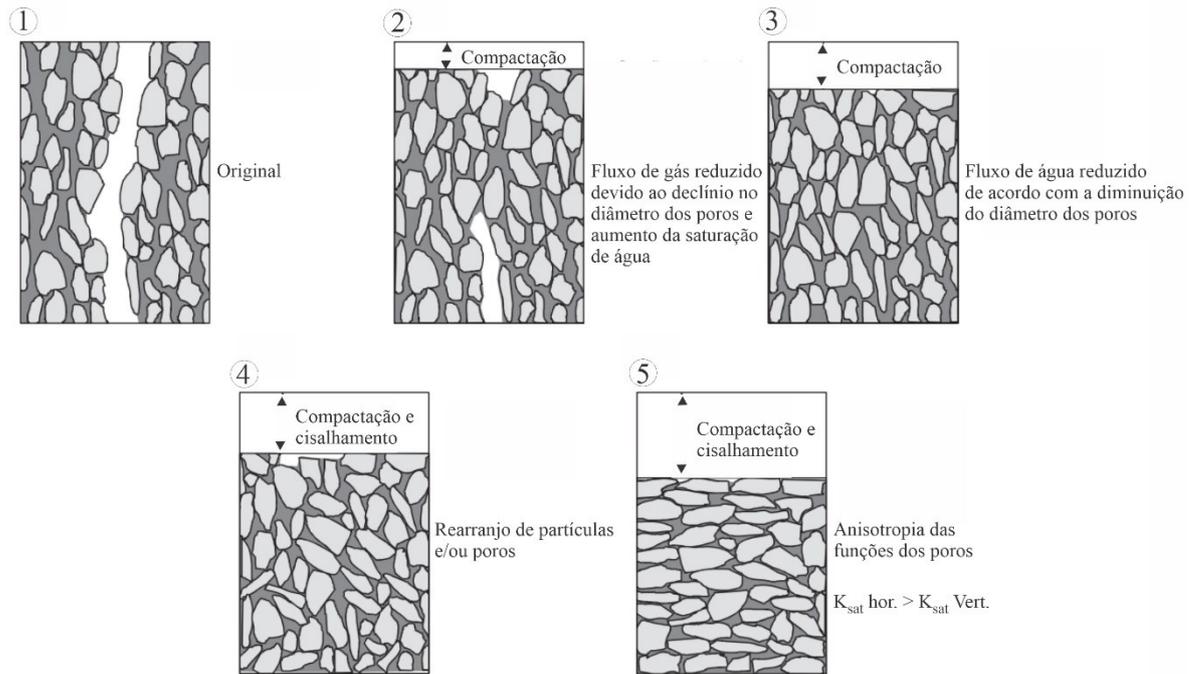
Classe simplificada	Classe	Diâmetro efetivo (mm)	Características e funcionalidades
Macroporos	Macroporos	0,08 <	Geralmente encontrado em unidade estruturais; drenagem da água gravitacional; difusão de gases; tamanho suficiente para acomodar raízes e habitats de certos animais no solo.
Microporos	Mesoporos	0,03 – 0,08	Retenção de água; movimento de água por capilaridade; habitats de fungos e de raízes mais finas.
	Microporos	0,005 – 0,03	Geralmente encontrado dentro de unidades estruturais; retenção de água disponível às plantas e habitat para a maioria das bactérias.
	Ultramicroporos	0,0001 – 0,005	Presentes em solos argilosos; retenção de água não disponível as plantas; seu tamanho exclui a maioria dos microorganismos.
	Criptoporos	< 0,0001	Seu tamanho exclui todos os microorganismos e moléculas de maior tamanho.

Fonte: Brewer (1964).

Quando os solos passam por excessivos processos de compactação, ocorre o rompimento de seu estado poroso harmônico, alterando o seu diâmetro e organização, chegando a obstruí-lo. De tal modo, a compactação pode resultar em alterações substanciais no regime

hídrico dos solos, levando à inversão de fluxos verticais para laterais, conforme exemplificado por Horn (2003) (Figura 1). Com isso, acomete a redução da infiltração e da condutividade hidráulica, levando a intensificação dos fluxos hídricos superficiais, predispondo a formação de processos erosivos (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Figura 1 - Efeitos de estresse e tensão na função dos poros



Fonte: Adaptado de Horn (2003).

Outro importante indicador da qualidade física e da degradação dos solos são os agregados (Tippkötter, 1994), que são unidades secundárias ao qual sua formação ocorre pelo arranjo de partículas minerais primárias areia, silte e argila (Lemos; Santos, 1996; Bronick; Lal, 2005), bem como íons e matéria orgânica (Chaves; Calegari, 2001; Bronick; Lal, 2005).

Portando, o estado de agregação dos solos é condicionado por fatores químicos, físicos e biológicos. Contudo, o manejo pela ação antrópica implica em alterações significativas em sua formação e estabilidade¹ (Chaves; Calegari, 2001). A exemplo disso, Silva, Cabeda e Carvalho (2006), ao realizarem um estudo associativo entre uma área sob cultivo com cana-de-açúcar e uma área controle, em Argissolo Amarelo, constataram que houve a redução da estabilidade dos agregados em água e o diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos via

¹ “Agregados estáveis são importantes para proporcionar boa estrutura do solo, provendo o interior deste com espaços porosos para desenvolvimento das raízes, da fauna do solo e circulação de ar e água (SALTON et al., 2008, p.19)”

úmida na área de cultivo de cana-de-açúcar. Com isso, foi possível constatar os efeitos causados nos atributos físicos do solo cultivado se comparado ao solo com floresta nativa.

Oades e Waters (1991) destacam que os agregados maiores contemplam maior volume de poros em comparação aos de menor diâmetro, além de apresentarem menor resistência à tração. Com a mecanização e a degradação dos macroagregados, considerados menos estáveis e com tamanho de $> 250 \mu\text{m}$ de diâmetro, surgem microagregados, mais estáveis e com diâmetro entre 20 e $250 \mu\text{m}$.

De acordo com Santos et al. (2005) são diversos os fatores que concedem a formação e estabilização dos agregados, cuja ligação se dá pelas substâncias orgânicas, bem como inorgânicas, sendo óxidos de ferro e alumínio, carbonatos, sílica e argila. No tocante às substâncias orgânicas, estas desempenham um papel fundamental como agente cimentante, notadamente dos macroagregados (Tisdall; Oades, 1982), sob atuação de raízes de hifas principalmente (Carpenedo, 1985).

Logo, quanto maior a adição de matéria orgânica no solo, melhor será a distribuição e a estabilização dos agregados, especialmente em superfície (Vasconcelos et al., 2010). Entretanto, sob ação dos processos pedogenéticos, como a e-iluviação, a matéria orgânica contida em horizonte eluvial pode ser transportadas verticalmente e, com a sua precipitação no horizonte B, ela pode passar à também contribuir para a cimentação dos agregados em profundidade (Bronick; Lal, 2005).

Os níveis de compostos orgânicos contidos nos solos são provenientes do tipo de cultivo adotado. Em solos cultiváveis a matéria orgânica atua na formação e estabilização dos agregados mais intensamente nas camadas superficiais e subsuperficiais. Entretanto, o constante revolvimento da camada arável por práticas de manejo levam a maior oxidação do carbono orgânico (Tisdall; Oades, 1982). Por outro lado, a redução do revolvimento do solo aumenta o teor de biomassa microbiana, ampliando sua eficiência metabólica e resultando na consequente melhora de sua qualidade física (Hungria et al., 2009). Com isso, ao efetuar variados tipos de manejo, é possível obter diferentes condições de equilíbrio físico do solo (Silva; Mielniczuk, 1998).

Nesse sentido, Hickmann et al. (2011) destacam a importância de realizar estudos morfológicos dos agregados, que permitam o acompanhamento dessas modificações em áreas cultiváveis. Esses estudos podem fornecer informações importantes que poderão servir como indicativo do tipo de manejo mais sustentável para minimizar os impactos causados ao solo, quando comparados às condições naturais.

No que concerne os compostos inorgânicos enquanto agentes cimentantes dos agregados, segundo Tisdall e Oades (1982) estes podem ser considerados como permanentes, e atuam fortemente na formação e estabilização dos microagregados. De tal modo, cabe destacar o papel desempenhado pela textura do solo, tendo a argila um importante agente cimentante, se correlacionando positivamente com seus índices de agregação (Boix-Fayos et al., 2001). Logo, assim como o observado para o composto orgânico, quanto maior a teor de argila, maior o favorecimento à agregação (Silva et al., 2014). Porém, de maneira inversa, geralmente em solos com altos teores de areia, sobretudo areia fina, ocorre baixa estabilidade de agregados (Dufranc et al., 2004).

Em suma, as características físicas e, correspondentemente, hídricas dos solos, por ser uma variável dependente, apresentam variabilidade espacial e são condicionadas tanto pelas suas próprias características intrínsecas quanto pelas condições de manejo as quais são atribuídos (Grego; Vieira, 2005). Essa variabilidade é maior em camadas aráveis em virtude do constante revolvimento por implementos agrícolas, a depender do tipo de manejo.

Portanto, conhecer o seu comportamento hídrico serve como subsídio para prevenção e contenção da degradação da cobertura pedológica. Esse funcionamento é complexo, depende tanto das propriedades físicas da água e dos fenômenos de interface água/partícula sólida e água/fase gasosa, quanto das propriedades físicas e mecânicas do solo, que servem como condutores internos da água ao longo da vertente (Cunha; Nóbrega; Castro, 2008).

Diante do exposto, faz-se oportuno destacar o trabalho de alguns autores que se dedicaram a compreender os efeitos dos sistemas de manejo sobre as propriedades físicas de solos derivados de formações areníticas no estado do Paraná (Silveira, 2001; Araujo; Tormena; Silva, 2004; Marcatto et al., 2022). Além disso, algumas pesquisas os correlacionam com a dinâmica hídrica, para estabelecer relações entre a qualidade física e o surgimento/evolução de processos erosivos (Cunha, 2002; Marcatto, 2020; Santos; Silveira; Cruz, 2023).

Ao analisar as mudanças impostas pelo manejo na estrutura e no comportamento hidrofísico de um Latossolo em Cidade-Gaúcha (PR), Silveira (2001) constatou que as alterações nas características físicas dos solos aparecem mais intensamente em até 50 cm de profundidade. Em áreas de floresta houve a redução dos valores de densidade do solo e o aumento da porosidade se comparado ao cultivo de cana-de-açúcar e ao uso com pastagem. Na área com o cultivo de cana, o aumento da densidade e da resistência à penetração são mais expressivos de 20 a 40 cm de profundidade, reflexo do uso de implementos agrícolas. Já em superfície, até 5 cm de profundidade, os maiores valores de densidade e de resistência a penetração foram encontrados sob o uso de pastagem, resultante do pisoteio animal.

Cunha (2002) caracterizou o funcionamento hídrico e a suscetibilidade à erosão de um sistema pedológico constituído por Latossolo – Argissolo no município de Cidade Gaúcha-PR. Os resultados apontaram que devido ao adensamento dos horizontes superiores (Ap, AB e BA) houve diminuição da porosidade total e redução da condutividade hidráulica. Esses resultados implicaram em uma diminuição dos fluxos hídricos verticais, onde passaram a ocorrer lateralmente, desde a alta vertente.

Araújo, Tormena e Silva (2004) analisaram e compararam as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob cultivo e floresta nativa, no município de Maringá (PR). A área sob cultivo tem sido submetida a diversas culturas, sendo as mais comuns o milho, a aveia, o sorgo, a soja e a mandioca. Os autores constataram que o solo contendo floresta nativa apresentou menores valores de densidade e maiores valores de porosidade total e macroporosidade se comparado ao solo cultivado. Tais resultados refletiram na resistência a penetração do solo, com maior magnitude no solo cultivado.

Marcatto (2020) estudou três topossequências de solos de textura média e arenosa derivados de formações areníticas distintas, pertencentes ao Grupo Bauru, localizadas nos municípios de Presidente Castelo Branco, Guaraci e Astorga-PR, avaliando o comportamento físico-hídrico da cobertura pedológica. A autora constatou que houve mudanças significativas no comportamento natural dos solos com o emprego de práticas de cultivo de cana-de-açúcar, responsáveis pelo surgimento e evolução de processos erosivos. Em superfície houve o aumento da densidade, acompanhada da diminuição da porosidade e da condutividade hidráulica saturada, além do aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados regido por processos mecânicos.

Ainda, através da revisão de trabalhos realizados em áreas com uso de pastagem, cana-de-açúcar e floresta nativa, Marcatto et al. (2022) buscaram verificar a influência do uso da terra nas propriedades físicas dos solos derivados de arenitos nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná. Para tal, foram extraídos dados de densidade do solo, porosidade (macro, micro e total) e estabilidade de agregados de vinte e um trabalhos que se enquadrassem nessas características. Os autores constataram que o cultivo de cana-de-açúcar é responsável pelas maiores alterações nas propriedades físicas do solo, com destaque ao aumento da densidade e diminuição da porosidade. Ainda salientam que com o constante avanço desse tipo de cultivo sobre as pastagens, os solos da mesorregião Norte e Noroeste estão cada vez mais sujeitos a intensas mudanças em suas propriedades físicas, o que, por vez, podem acarretar o desencadeamento de processos erosivos.

Santos, Silveira e Cruz (2023) estudaram o comportamento físico-hídrico de uma topossequência de solos sob domínio de formação arenítica, na mesorregião Norte do Paraná, no município de Munhoz de Melo. Constatou-se que os usos agrícolas utilizados na área, destinada atualmente ao uso de pastagem, mas que anteriormente era usada para o cultivo de grão, foram responsáveis pela formação de horizontes superficiais compactados, além da densificação natural de horizontes profundos, resultado da migração da fração argila. Essas características físicas refletiram significativamente na redução da porosidade, sobretudo, da macroporosidade e da condutividade hidráulica saturada, formando a concentração de fluxos hídricos superficiais, levando a formação de feições erosivas na baixa vertente.

Diante do que foi apresentado, nota-se que as práticas agrícolas, com destaque ao manejo, desempenham consideráveis impactos na qualidade física do solo, afetando, notadamente, sua dinâmica hídrica. Essa intervenção pode levar ao predomínio dos fluxos hortoneano (superficiais) em relação ao hipodérmico (subterrâneo) (Stevaux; Latrubesse, 2017), interferindo nas transformações pedogenéticas da encosta, no surgimento de formas erosivas - sejam elas laminares ou em sulcos, bem como na recarga e funcionamento das nascentes.

1.3. NASCENTE: CONCEITO, FUNCIONAMENTO E NORMATIVAS DE PROTEÇÃO

O termo “nascente” possui subjetividades e divergências em sua definição conceitual perante a literatura científica e ao conjunto de leis ambientais que promulgam normativas para sua proteção. Valente e Gomes (2005, p. 111) as definem como “manifestações superficiais de lençóis subterrâneos que dão origem a curso d’água”. A resolução do CONAMA nº 303, de 2002, que regulamenta os parâmetros, definições e limites das Áreas de Preservação Permanente (APPs), as caracterizam como “local onde aflora naturalmente, mesmo que de forma intermitente, a água subterrânea” (Brasil, 2002).

Todavia, Felipe et al. (2009) refutam parcialmente essas definições, por considerá-las redundantes, já que nem toda a água subterrânea exfiltrada é formadora de nascentes, uma vez que a surgência da água em superfície pode ocorrer diretamente na calha fluvial. Ademais, quanto a resolução supracitada, ela não pondera a necessidade da formação de fluxos hídricos superficiais, que se conectam com o sistema hidrográfico. Com isso, considerá-la apenas como um “local” onde a água subterrânea é exfiltrada, é ignorar o seu funcionamento sazonal perante as dinâmicas pluviométricas do local, as quais podem levar à sua migração para a jusante em virtude de esporádicos períodos de déficit hídrico e oscilações do lençol freático.

A exemplo disso, se as considerar apenas como “locais” de surgência da água subterrânea em superfície, e para que de fato seja atendido ao termo intermitente e considerado a sua sazonalidade, neste caso, deveriam ser classificadas como “duas nascentes” (Felippe; Magalhães Junior, 2013), o que já implicaria na abrangência do raio de APP que as margeiam.

Nesse contexto, Felippe et al. (2009, p.10) as definem como “um sistema ambiental natural marcado por uma feição geomorfológica ou estrutura geológica em que ocorre a exfiltração da água subterrânea de maneira perene ou intermitente, formando canal de drenagem a jusante que a inserem na rede de drenagem da bacia”. Não obstante, se divergindo em partes das outras classificações mencionadas, a Lei Federal 12.651/2012 (Art. 3º, XVII) as determinam como “afioramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água” (Brasil, 2012). Nesse sentido, o Novo Código Florestal define os afloramentos do lençol freático em superfície de maneira intermitente como “olho d’água”.

Independente das inconsistências encontradas em sua definição conceitual, as nascentes, na maioria das vezes, apresentam uma área de drenagem onde ocorre o seu abastecimento. Assim como foi apontado por Felippe (2009):

Um apanhado da literatura demonstra, então, que uma nascente é marcada por uma feição geomorfológica em que ocorre a exfiltração da água subterrânea em alguma parte do ano, formando canais de drenagem a jusante e possuindo características pedológicas e vegetacionais próprias, distintas de seu entorno imediato em função da maior disponibilidade de água (Felippe, p. 2009).

Normalmente essa área de contribuição é titulada como “cabeceira de drenagem”, porém, também apresentam uma lacuna em sua definição e podem ser denominadas como rampa, concavidade (Avelar; Coelho Netto, 1992² apud Coelho Netto, 2003), bacias de ordem zero, microbacia, vale não canalizado, cabeceira de vale, anfiteatro, dambo (Paisani; Pontelli; Geremia, 2006), “hollow” (Hack; Goodlett, 1960) e vale em berço (Nóbrega et al., 2023).

Em termos gerais, trata-se de feições geomorfológicas com morfologia côncavas localizadas à montante dos canais de primeira ordem hierárquica (Paisani et al., 2016), locais estes onde se desenvolvem ou avançam as cabeceiras de canais (Coelho Netto, 2003). Todavia, nem sempre seguem essa característica geomorfológica bem demarcada, uma vez que também podem apresentar morfologia suavizada e pouco evidente em superfície (Felippe et al., 2009).

Com isso, a área de drenagem das nascentes são responsáveis por interligar dois setores geomorfológicos distintos, a vertente e a rede de drenagem (Paisani et al., 2016), o que os

² AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fluxos d’água subsuperficiais associados à origem das formas côncavas do relevo. **Anais do 1º COBRAE**, p. 709-719, 1992.

tornam complexos sistemas hidro-geomorfológicos, uma vez que são locais onde ocorrem processos fluviais, superficiais e de encostas (Almeida Neto et al., 2017). Ademais, como apontado por Felipe et al. (2009, p.10) “ao determinarem o rearranjo dos fluxos em superfície, funcionando como pequenas bacias de captação de água e sedimentos, as cabeceiras possuem destacada importância na proteção e conservação das nascentes”.

Dessa forma, estudar a sua área de drenagem são condições norteadoras da aplicação de um planejamento e gerenciamento ambiental mais assertivo e eficaz desses locais, uma vez que são sistemas heterogêneos perante a ação dos agentes exógenos sobre a superfície, que levam à expressiva variação morfológica, geomorfológica, pedológica e hidrológica, resultante da ação dos diversos climas sobre diferentes substratos geológicos (Curcio, 2016; Felipe; Magalhães Júnior, 2013). Isso se reflete na dificuldade de gerenciamento desse sistema ambiental, que, em suma, são desconsiderados pelas políticas ambientais (Felipe; Magalhães Júnior, 2014).

Partindo do princípio de que necessitam de proteção integrada, a fim de promover a qualidade e quantidade de água para toda a bacia hidrográfica, foram estabelecidas normativas ambientais com o objetivo de proteger esses mananciais e melhorar a qualidade da água, como a determinação das Áreas de Preservação Permanente (APPs). A resolução do CONAMA n°303, de 2002 (Brasil, 2002), e o Novo Código Florestal (Lei Federal 12.651/2012) (Brasil, 2012) determinam um raio mínima de 50 metros de vegetação no entorno desses mananciais, independente da lacuna em sua definição conceitual, uma vez que essa metragem é estabelecida tanto para locais que apresentam um ciclo de exfiltração da água subterrânea de forma intermitente, quanto perene.

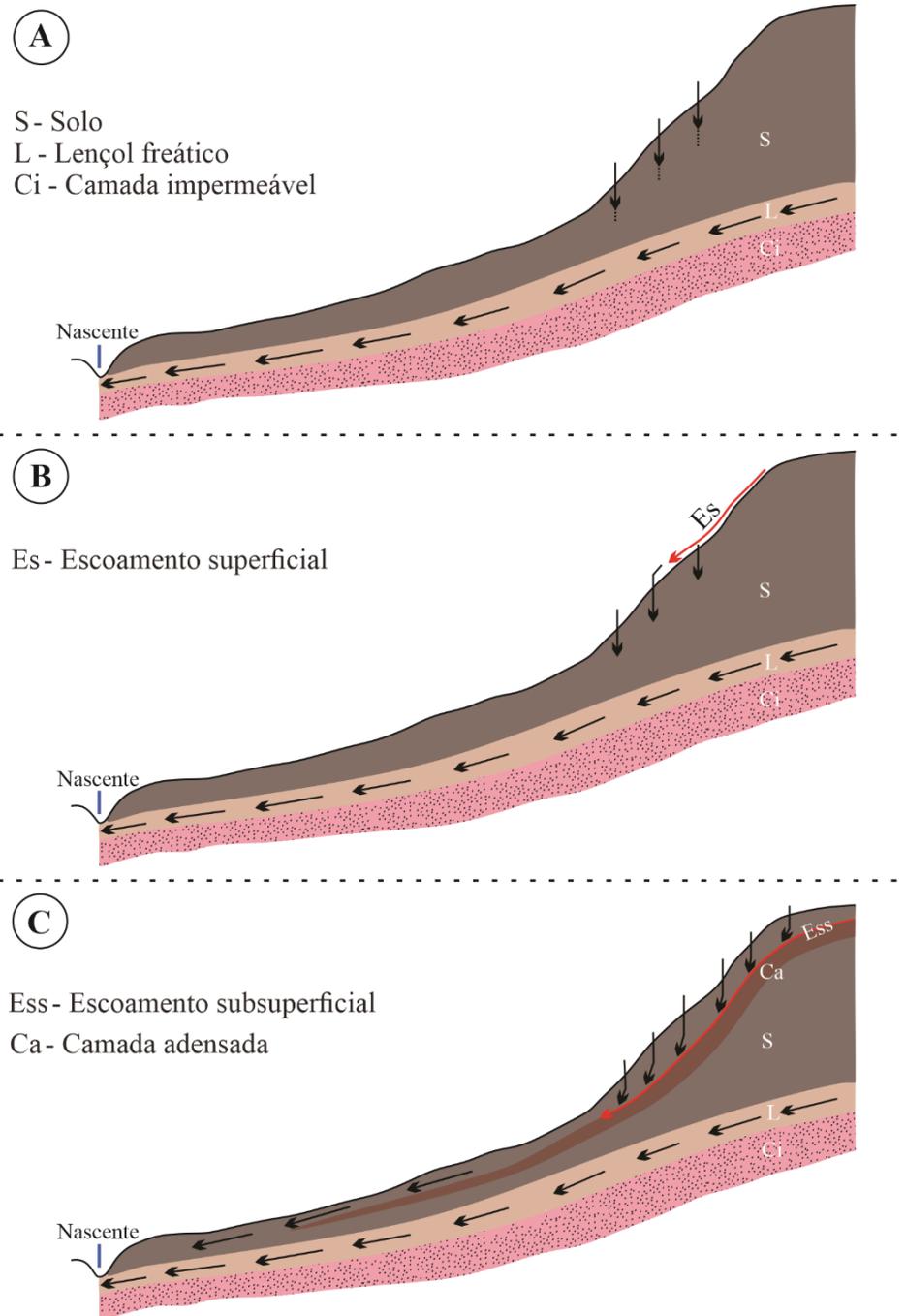
Contudo, mesmo incorporado este raio mínimo de vegetação em seu entorno, para que de fato se promova uma melhor qualidade hidrológica desses mananciais, além de cuidados técnicos nessas áreas de descarga hídrica (nascentes), também é necessário realizá-lo em seu local de recarga (Curcio, 2016). A caracterização do meio físico destas áreas de drenagem, de modo a definir as áreas críticas dessas áreas, são requisitos mínimos para o planejamento ambiental, visando a conservação e “produção” da água das bacias hidrográficas (Lima, 2008; Pinto et al., 2004), sobretudo em áreas que apresentam alto grau de alterações provocadas pelo manejo do solo.

Dessa maneira, quanto aos processos hidrológicos mantenedores das nascentes, Valente e Gomes (2005) destacam que quando o solo apresenta boa taxa de porosidade ao longo de todo o perfil, e a volume de chuva que atinge a bacia é menor que a velocidade de infiltração, não haverá a formação de escoamentos superficiais (Figura 2 - A) – também denominado como fluxo hortoneano (Stevaux; Latrubesse, 2017). Dessa maneira, a água infiltrada abastece o

lençol freático e se movimenta lateralmente em direção ao seu ponto de exfiltração, não levando ao aumento abrupto da vazão da nascente.

Segundo os menos autores (Valente e Gomes, 2005), quando a intensidade de chuva é maior que a capacidade de infiltração de água no solo, desenvolvem-se fluxos hídricos superficiais (enxurradas), mas se a velocidade de infiltração se permanecer menor que a permeabilidade do perfil, ainda assim ocorrerá o abastecimento do lençol freático (Figura 2 - B). Já no instante em há a formação de uma camada adensada subsequente à superfície, impedindo a infiltração da água no perfil, desenvolve-se escoamento subsuperficial no topo da camada adensada (Figura 2 - C). Isso condiciona a nascente a apresentar uma alta vazão pouco tempo após a chuva, acompanhado de uma baixa recarga do lençol freático.

Figura 2 - Processos hidrológicos de pequenas bacias



Fonte: Adaptado de Valente e Gomes (2005)

Dessa maneira, o estudo das variações nas características físicas e hídricas da cobertura pedológica que compõem a área de drenagem podem servir como subsídio para a conservação das nascentes. Isso se deve ao fato de que esses mananciais e os solos apresentam uma relação intrínseca, uma vez que as variações texturais, estruturais, e até mesmo a espessura dos horizontes pedológicos que constituem sua área de recarga, são os responsáveis por regular os

fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, deliberando em um menor ou maior grau de recarga hídrica superficial desses mananciais (Curcio, 2016).

Assim, para que se tenha uma constância hidrológica e para que a vazão mínima se estabeleça durante todo o ano, é ideal que a sua área de contribuição da nascente não esteja impermeabilizada, uma vez que, quando compactada, condicionam fluxos hídricos superficiais intensos, em um curto período. Em condições favoráveis, a água deve ser absorvida, armazenada no lençol freático e drenada para as nascentes gradativamente, especialmente nos períodos de seca (Júnior; Mello; Silva, 2010). Comportamento que só é possível quando não há alterações significativas nas propriedades físicas dos solos.

Diante dessa premissa, o tipo e o uso do solo, bem como o seu comportamento físico-hídrico, influenciam nos níveis de água subterrânea e, conseqüentemente, no regime hidrológico dos mananciais e dos cursos d'água de maior ordem hierárquica. Além disso, outra variável importante para ser observada é a inclinação do terreno, uma vez que a qualidade e quantidade de água das nascentes podem ser alteradas devido à declividade de sua área de contribuição (Pinheiro; Teixeira; Laufmann, 2009; Pinto et al., 2004). Nesse contexto, o reconhecimento da estrutura e do funcionamento da cobertura pedológica que compõe essas áreas podem apontar a sua vulnerabilidade e as suas potencialidades (Nóbrega; Cunha, 2011).

Alguns autores se propuseram a compreender o funcionamento e a vulnerabilidade dessas áreas de abastecimento das nascentes, como Martins (2000), que estudou o comportamento morfológico e a circulação hídrica de solos da cabeceira de drenagem do córrego Bom Jesus em Cidade Gaúcha-PR. A autora constatou a ocorrência de um sistema pedológico formado por Latossolo-Podzólicos (Argissolo)-Areia Quartzosa (Neossolo Quartzarênico). A morfologia convexa da vertente favoreceu os fluxos hídricos laterais superficiais e suspensos, responsáveis pelo desequilíbrio do sistema pedológico, associado, principalmente, a lavagem de partículas finas e a arenização à jusante.

Karling (2000) analisou três topossequências em uma cabeceira de drenagem do córrego Ipiranga, também na área rural de Cidade Gaúcha (PR). A autora constatou que a morfologia e a declividade da vertente exercem uma forte influência nas transformações pedogenéticas, onde encontrou um sistema pedológico em desequilíbrio, com a transformação gradativa de um Latossolo, encontrado em quase toda a vertente, passando para Areia Quartzosa (Neossolo Quartzarênico) no sopé. A autora salienta que, com a aquisição da propriedade em 1955, a área foi destinada para a cafeicultura, onde não se observava processos erosivos, entretanto houve a erradicação dos cafezais na década de 1970 e a sua substituição por pastagem. Na década de 1990 realizou-se o reflorestamento de 30 metros das margens do curso d'água, a fim de atender

a legislação ambiental da época e conter as feições erosivas que já haviam se instalado na área. De imediato tentou-se a implantação de espécies nativas, contudo, a única espécie que se adaptou às Areias Quartzosas foi o eucalipto, constatando, portanto, a dificuldade de recuperação dessas áreas. Além disso, verificou-se que houve o avanço da nascente em direção à montante, no qual na época do cultivo do café, o afloramento de água se encontrava há aproximadamente 5 metros à jusante.

Fruet (2021) analisou as cabeceiras de drenagem de duas nascentes do compartimento basáltico da bacia hidrográfica do rio Pirapó, no estado do Paraná. Apesar de serem próximas, a autora constatou que as duas nascentes analisadas apresentam características pedológicas e geomorfológica distintas, que refletem em sua funcionalidade hidrológica e em sua tipologia. Assim, a aplicação da legislação ambiental em vigor pode não ser satisfatório para as duas nascentes, uma vez que apresentam exfiltração e características físicas distintas.

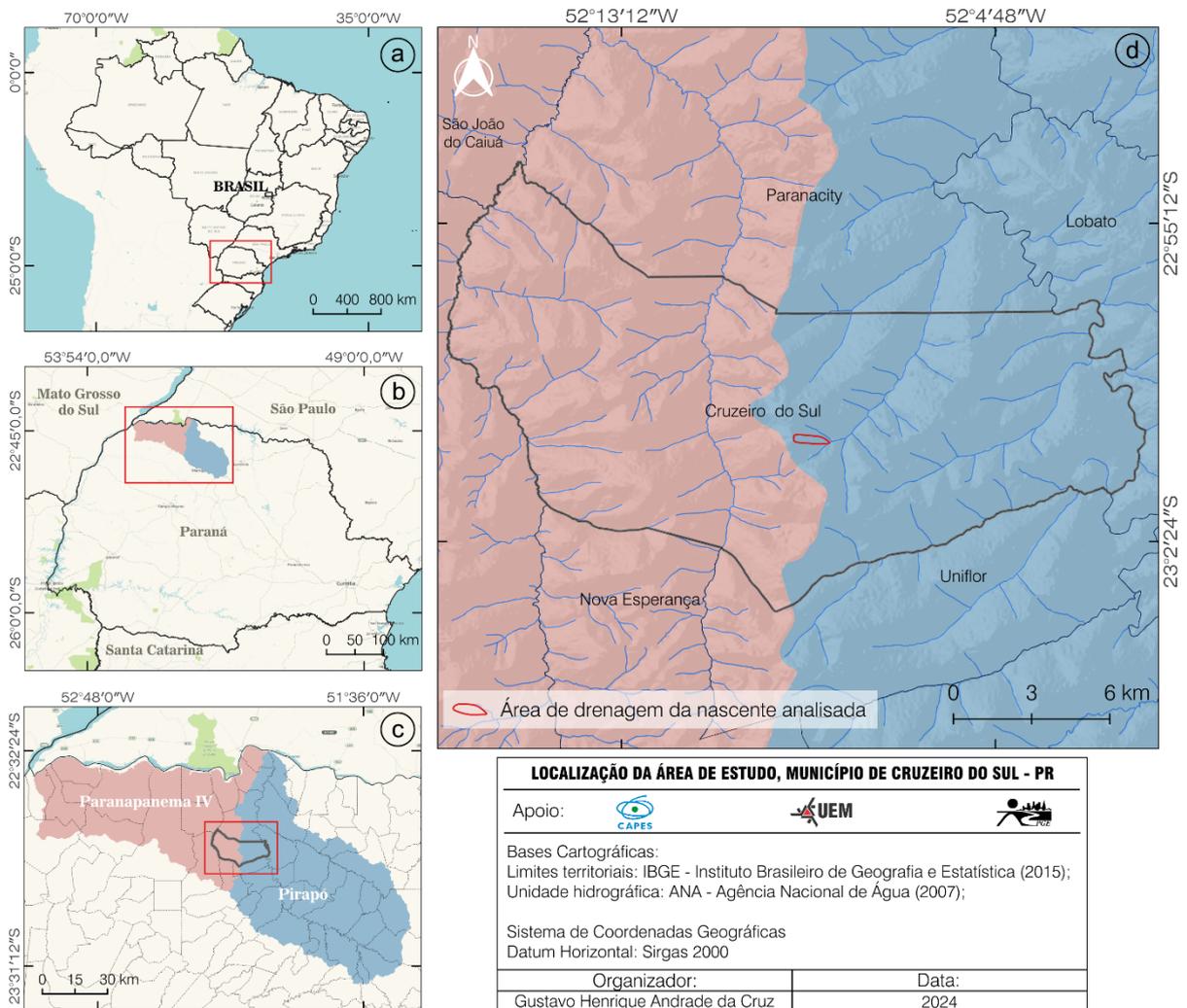
2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE PESQUISA

2.1. LOCALIZAÇÃO

O local experimental em que foi conduzido o estudo está localizado no município de Cruzeiro do Sul, na mesorregião Noroeste do estado do Paraná. Situa-se no Terceiro Planalto Paranaense, entre as subunidades geomorfológicas denominadas como Planalto de Maringá e de Paranaíba (Mineropar, 2006). O município apresenta uma área de 259,103 km² (IBGE, 2022) e está situado no interflúvio da bacia hidrográfica do rio Pirapó com o Paranapanema (IV), com uma cota altimétrica de 400 m.

Para o desenvolvimento do estudo foi selecionado a área de drenagem de uma das nascentes que ocorrem próximo à cabeceira, margem esquerda, de um dos cursos d'água de primeira ordem formador do córrego Cristino, afluente do rio Pirapó, localizada especificamente entre as latitudes de 23°00'07,31'' e 23°00'09,90'' Sul, e as longitudes de 52°08'55,05'' e 52°08'34,58'' Oeste (Figura 3).

Figura 3 - Localização da área de estudo, no município de Cruzeiro do Sul, Paraná



Org.: O autor (2024).

Apesar de não ser comum atribuir denominação a curso d'água de baixa ordem hierárquica, como o associado à nascente que emerge no sopé da vertente analisada, cuja extensão, computada do ponto de exfiltração até sua descarga no córrego Cristino, é de aproximadamente 50 metros, optou-se por nomeá-la como “Água da Fonte” ao longo deste estudo. Essa ação facilitou a comunicação ao longo do texto, pois evitou a utilização frequente de termos genéricos, passando a se referir de maneira direta a área de drenagem da nascente analisada.

2.2. ASPECTOS FÍSICOS

A partir de uma perspectiva regional, Zandonadi e Baldo (2022), apontaram que a maior concentração de chuva no Noroeste paranaense ocorre no final e início do ano (outubro – março), associada às estações primavera e verão, que apresentam, respectivamente, média

histórica de 468,8 mm e de 446,5 mm. Por outro lado, o inverno (julho-setembro) e o outono (abril-junho) são estações mais secas, apresentando média de 254,4 e 332,0 mm respectivamente. Quanto a média histórica mensal, se destaca janeiro como o mês mais chuvoso (176,0 mm), enquanto agosto se caracteriza como o mais seco (57,6 mm). Essa diminuição dos índices pluviométricos no mês de agosto está relacionada à redução dos fluxos de umidade e baixas temperaturas para a região.

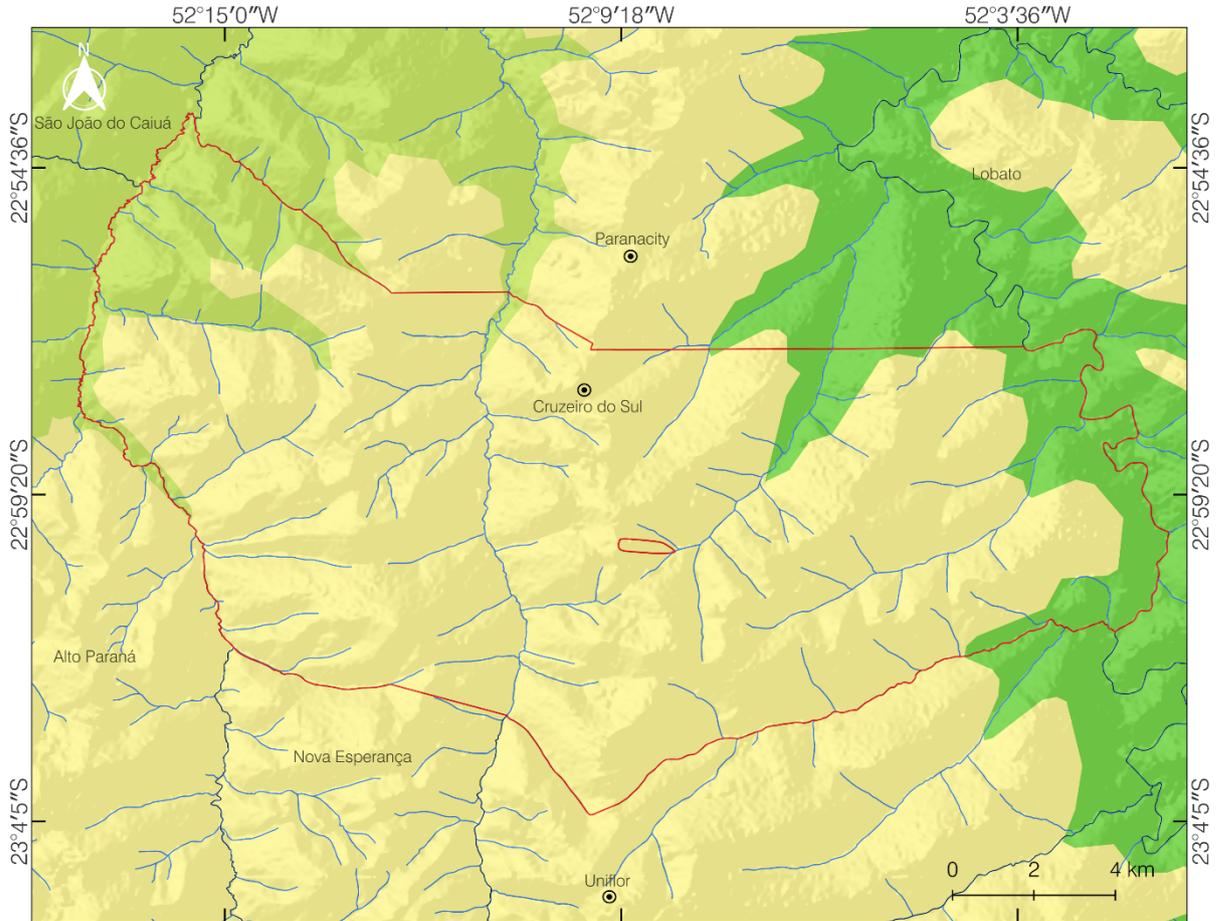
Em relação às temperaturas, segundo os mesmos autores, o verão é identificado como a estação mais quente, registrando uma média histórica de 24,4°C, seguido da primavera, com 23,2 °C, e das estações de outono e inverno, que apresentam médias de temperaturas idênticas, com 19°C.

No que diz respeito o aspecto geológico, o mapeamento produzido por Besser, Brumatti e Spisila (2021), vinculado ao SGB (Serviço Geológico do Brasil), antiga CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), demonstra que no município predominam as rochas areníticas suprabasálticas, associadas às formações Rio Paraná Goio Êre, pertencentes ao Grupo Caiuá. Entretanto, apesar da marcante predominância das formações sedimentares, uma parcela menor de seu território, em sua região oriental, é constituída por rochas de natureza vulcânica (basaltos), correspondentes à Formação Pitanga, que integra o Grupo Serra Geral (Figura 4).

Fernandes e Coimbra (1994) apresentando uma definição formal do Grupo Caiuá a partir do estudo de Fernandes (1992), enfatizam que as rochas desse grupo são derivadas de ambientes deposicionais desérticos, sendo possível a distinção de três unidades litoestratigráficas geneticamente relacionadas, mas de subambientes distintos. A Formação Rio Paraná corresponde a área central de um *sand sea*, a Formação Goio Erê às zonas de depósitos eólicos marginais, enquanto a Formação Santo Anastásio se origina de depósito de areia extradunas, acumuladas no entorno do *sand sea*.

O substrato geológico que ocorre na área de estudo é constituído pelas rochas da Formação Goio Erê (Figura 4). Essa formação é caracterizada pela ocorrência de arenitos quartzosos de granulometria fina a muito fina, casualmente média, e de cor marrom-avermelhado a cinza-arroxeadado. Os grãos apresentam superfície fosca encoberta por película de óxido de ferro. Possui estratificação cruzada, de médio e pequeno porte (até 3m), alternadas, do tipo acanalado ou tabular tangencial na base, atribuídos a depósitos de dunas barcanóides de porte pequeno a moderado (Fernandes; Coimbra, 1994, 2000).

Figura 4 - Formações geológicas do município de Cruzeiro do Sul-PR



Formação Geológica		ERA	PERÍODO	IDADE (Ma)
 Form. Goio Erê (arenito)	Mesozoico	Cretáceo	Superior	100.5-56
 Form. Rio Paraná (arenito)			Inferior	145-100.5
 Form. Pitanga (basalto)				

Convenções Cartográficas	
	Área de drenagem da nascente Água da Fonte
	Hidrografia

UNIDADES LITOESTRATIGRAFICA DO MUNICÍPIO DE CRUZEIRO DO SUL, ESTADO DO PARANÁ	
Apoio:	
Bases Cartográficas: Limites territoriais: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015); Hidrografia e Geologia: SGB/CPRM - Serviço Geológico do Brasil (2021).	
Datum Horizontal: Sirgas 2000 Sistema de Coordenadas: Geográfica	
Organizador:	Data:
Gustavo Henrique Andrade da Cruz	2024

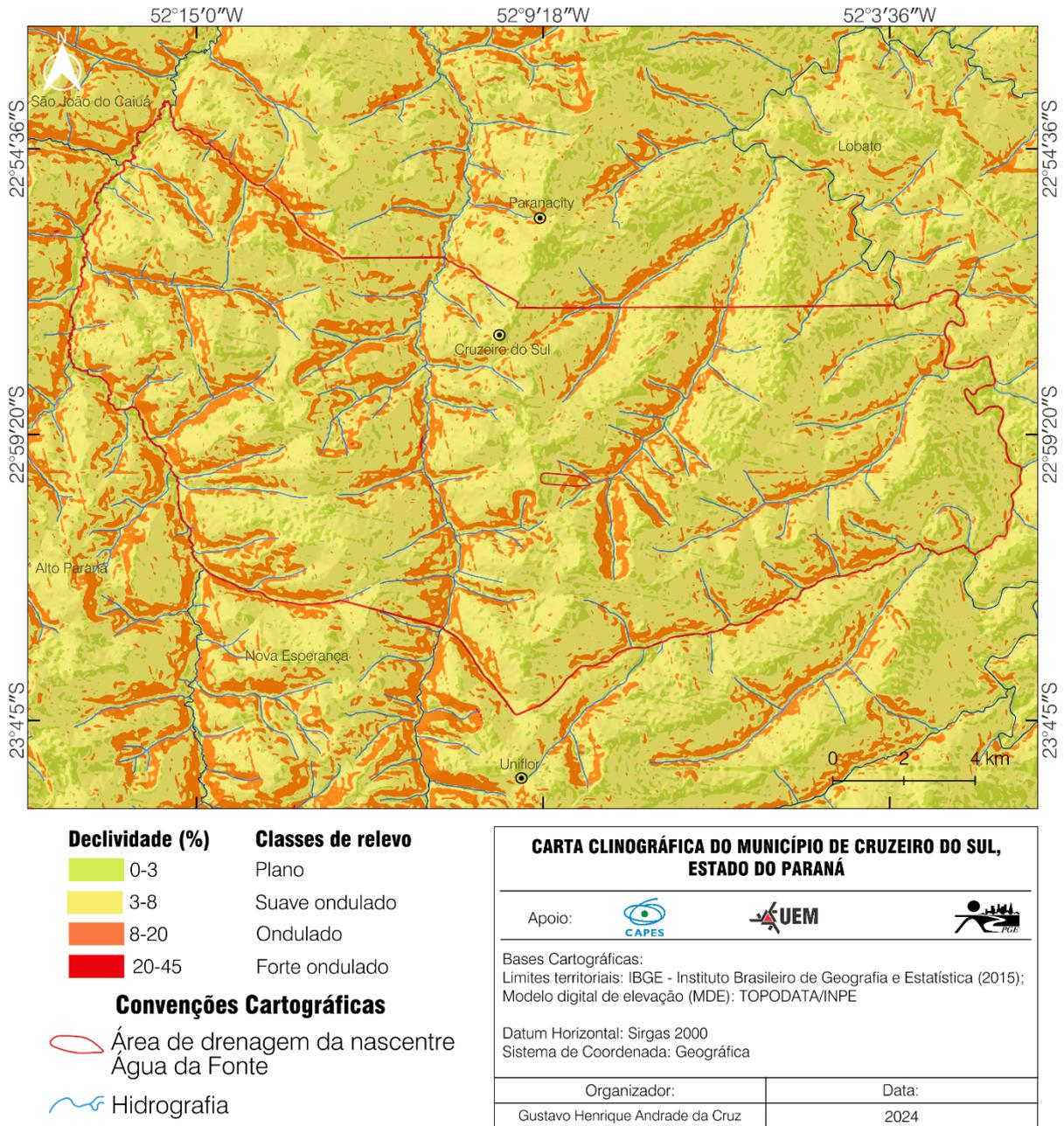
Org.: O autor (2024), adaptado de Besser et al. (2021).

A carta clinográfica revela que a declividade no perímetro de Cruzeiro do Sul oscila de 0 a 45%. Dessa forma, empregando a classificação proposta pela Embrapa (1979), o município apresenta relevo com topografia que varia de plano (< 3%) a forte ondulado (20-40%). A classe suave ondulado (3-8%) é predominante, enquanto as áreas com fortes ondulações (20-45%) se apresentam pouco expressivas (Figura 5).

Em termos de ocorrência na paisagem, as declividades menos acentuadas, abaixo de 8%, concentram-se principalmente nos topos dos interflúvios. Inversamente, as áreas com

maior grau de dissecação, com variação entre 8 e 20%, correspondentes à classe de relevo ondulado, ocorrem sobretudo nas cabeceiras e alinhadas ao entalhamento da rede de drenagem (Figura 5).

Figura 5 - Classes de declividade do município de Cruzeiro do Sul-PR

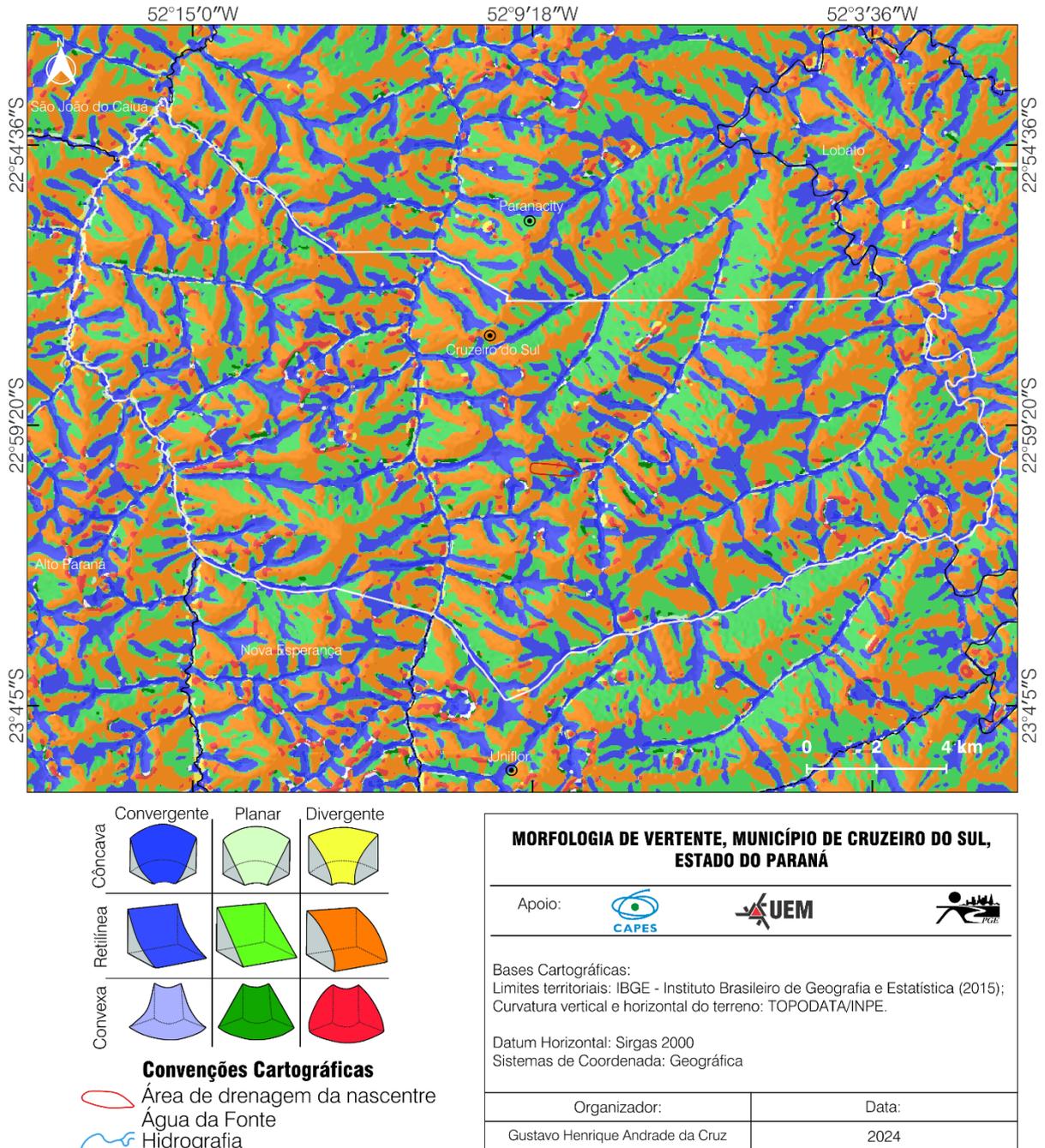


Org.: O autor (2024).

Outra análise topográfica, definida a partir da combinação das curvaturas vertical e horizontal do terreno, ainda releva uma associação direta entre o grau de dissecação do terreno e sua morfologia. Nas maiores cotas altimétricas, onde a declividade é menos acentuada, se prevalecem a forma retilínea-divergente (Figura 6). Por outro lado, as áreas de maior

declividade, que constituem a paisagem das médias e baixa encostas, estão fortemente associadas à forma de terreno côncava-convergente. Esta, por sua vez, é caracterizada pela maximização da concentração e cumulação do escoamento hídrico, que transporta matéria e soluções, interferindo no equilíbrio entre os processos de pedogênese/morfogênese (Valeriano, 2008).

Figura 6 - Morfologia de vertente do município de Cruzeiro do Sul-PR



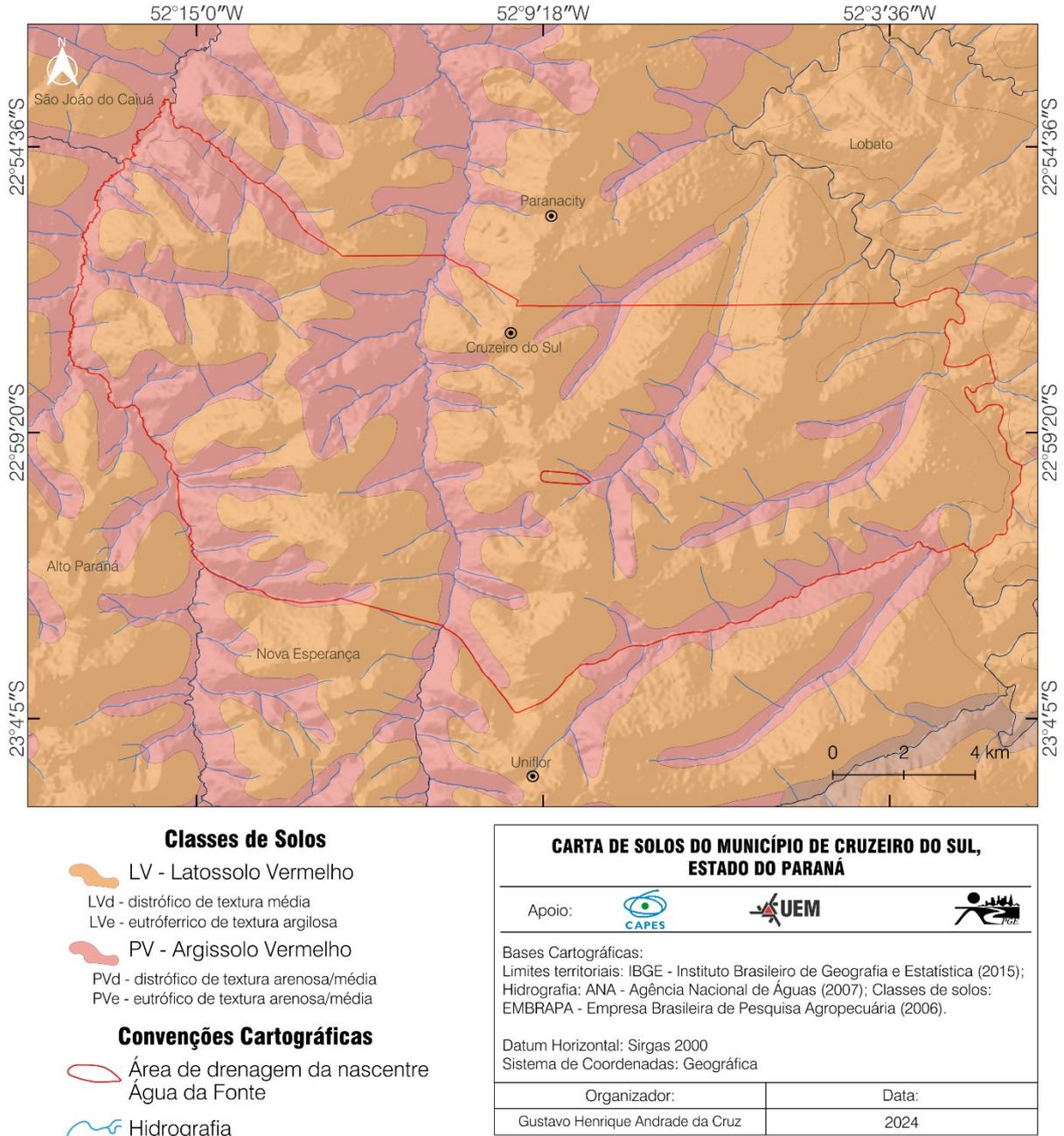
Org.: O autor, 2024.

A partir dessas características topográficas ainda é possível inferir de forma direta que, além das cabeceiras de drenagem, estrutural e fisionomicamente acentuadas nas maiores cotas altimétricas de uma bacia hidrográfica, ao qual já foi destacado por Filizola et al. (2011), essas características de concavidade, que se estendem longitudinalmente aos vales fluviais, também possuem alto potencial de concentração e escoamento hídrico, tornando-as áreas sujeitas de confluência entre os fluxos superficiais e subsuperficiais. Isso coopera para o desenvolvimento e evolução de formas erosivas, e seu consequente impacto sobre as nascentes que emergem em áreas concavas, no sopé das vertentes.

Em consonância com às características topográficas e seu material de origem, o mapeamento realizado pela Embrapa (2008), em escala de 1:250.000, demonstra que sobre área em domínio das formações areníticas Rio Paraná e Goio Erê formam-se Latossolos Vermelhos de textura média e Argissolos Vermelhos de textura média/arenosa, enquanto as constituídas pela Formação Pitanga, composta por basaltos, se originam Latossolos de textura argilosa (Figura 7). Entretanto, nas baixas vertentes, no caso daquelas formadas por rochas eruptivas, também podem ocorrer Nitossolos Vermelhos, não perceptíveis na escala adotada para o mapeamento.

Independente do material do qual é originado, os Latossolos recobrem os topos dos interflúvios, associados às topografias menos dissecadas, com declividade abaixo de 8%, e morfologia de terreno retilínea-planar/divergente-planar. Em contrapartida, os Argissolos se estendem da média até o sopé das vertentes, prevalecendo em relevo ondulado e morfologia côncava-convergente (Figura 7).

Figura 7 - Classes de solos do município de Cruzeiro do Sul-PR



Org.: O autor (2024), adaptado de EMBRAPA (2006).

Nóbrega et al. (2022) ao definirem treze unidades morfopedológicas para a mesorregião Noroeste paranaense, destacam que no compartimento denominado como Paranaíba (II) – unidade de paisagem onde se localiza a área de estudo, em virtude de as declividades serem mais acentuadas, ocorre o maior avanço do Argissolo na vertente, que, geralmente, ocupa todo o seu terço inferior. Portanto, sob influência do relevo, neste compartimento prevalece a ocorrência de um sistema de transformação composto por Latossolo-Argissolo.

Em consonância com a característica climáticas, incluindo a influência da altitude, segundo Roderjan et al. (2002) a região apresentava originalmente a Floresta Estacional Semidecidual, que se desenvolvia entre as altitudes de 200 e 800 m, e exibe uma composição florística menos diversa se comparada as formações ombrófilas. Em períodos desfavoráveis, com ocorrência de geadas ocasionais e de estresse hídrico na estação do inverno, as árvores dessa unidade fitogeográfica tendem a perder de 20 a 50% de sua cobertura foliar, resultando em uma mudança significativa em sua fisionomia.

Ainda, de acordo com uma classificação de segunda ordem, conforme indicado pelo mesmo autor, na região prevalecia uma formação Submontana. Essa tipologia vegetal é principalmente composta, em termos florísticos e estruturais, por espécies do gênero *Aspidosperma*, *Peltophorum*, *Enterolobium*, *Parapiptadenia*, *Cordia*, *Gallesia*, *Balfourodendron*, *Holocalyx* e *Cedrela*. É comum a ocorrência da *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. (Apocynaceae), popularmente conhecida como peroba-rosa, responsável pela densidade e altos dosséis dessa formação fitogeográfica, podendo atingir até 40 m de altura (Figura 8).

Figura 8 - Perfil esquemático destacando a estrutura de um segmento de Floresta Estacional Semidecidual, com predominância de *Aspidosperma*, *Peltophorum*, *Enterolobium*, *Parapiptadenia*, *Cordia*, *Gallesia*, *Balfourodendron*, *Holocalyx* e *Cedrela*.



Fonte: Roderjan (2002).

Atualmente os pequenos remanescentes da floresta original se restringem principalmente às áreas situadas nas cabeceiras de drenagem e nos fundos de vale, de modo a atender a legislação ambiental vigente, ou em reservas ambientais, gerenciadas por órgãos públicos ou particulares.

2.3. ABORDAGEM HISTÓRICA E ASPECTOS SOCIAIS

A dinâmica de ocupação e desenvolvimento econômico da mesorregião Noroeste paranaense, influenciada, em partes, por suas características físicas, bem como pela demanda do mercado interno e externo, se reverbera diretamente na escala municipal e local. Com base nesse princípio, para compreender os aspectos sociais, particularmente os que se referem aos processos de ocupação, estrutura fundiária, uso da terra e consequente estrutura econômica, torna-se evidente a necessidade de se realizar uma breve abordagem em múltipla escala. Isso implica iniciar por um primeiro nível de abordagem, se pautando no regional e municipal, migrando posteriormente para o local – ao nível da área de estudo, o qual será mais bem detalhado na seção de discussões e resultados da pesquisa, uma vez que o uso e o tipo de manejo adotado atuam diretamente na organização e funcionamento dos solos.

Partindo de contexto regional, como bastante difundido na literatura científica, a ocupação e o desenvolvimento econômico do Noroeste paranaense, que correspondente geograficamente, em termos de ocupação, ao Norte Novíssimo, foram sustentados pela atividade cafeeira e pela facilidade de acesso às terras por empresas de colonizadoras privadas (Alegre; Moro, 1986; Serra, 1992; Mendonça, 1994; Nóbrega; Serra, 2009; Serra, 2010; Serra, 2022). Esse feito foi coordenado principalmente pela Companhia de Terras do Norte do Paraná (CTNP), que a partir da década de 1940 passou a ser denominada como Companhia Melhoramentos do Norte do Paraná (CMNP) (Serra, 2022). Desse modo, a ocupação e a estruturação, tanto urbana quanto rural, da mesorregião Noroeste foram fortemente influenciados pela mesorregião Norte.

O pagamento facilitado das terras, juntamente com a promoção de consistentes campanhas publicitárias dos empreendimentos em todo o território nacional, estimularam intensos fluxos migratórios para o Norte do Paraná (Mendonça, 1994), região que apresenta predomínio de “terra roxa”³, caracterizada pela alta fertilidade natural, permeabilidade e capacidade de retenção de água, o que contribuiu para que essa região se transformasse em um polo cafeeiro (Soethe, 2014).

Mesmo anterior ao efetivo processo de ocupação, o planejamento urbano e rural substanciado pela empresa colonizadora já demonstrava algumas especificidades, como a criação de centros urbanos de porte médio distanciadas entre si por aproximadamente 100 km

³ Termo popular refere a solo de textura argilosa, derivado do basalto (Soethe, 2014).

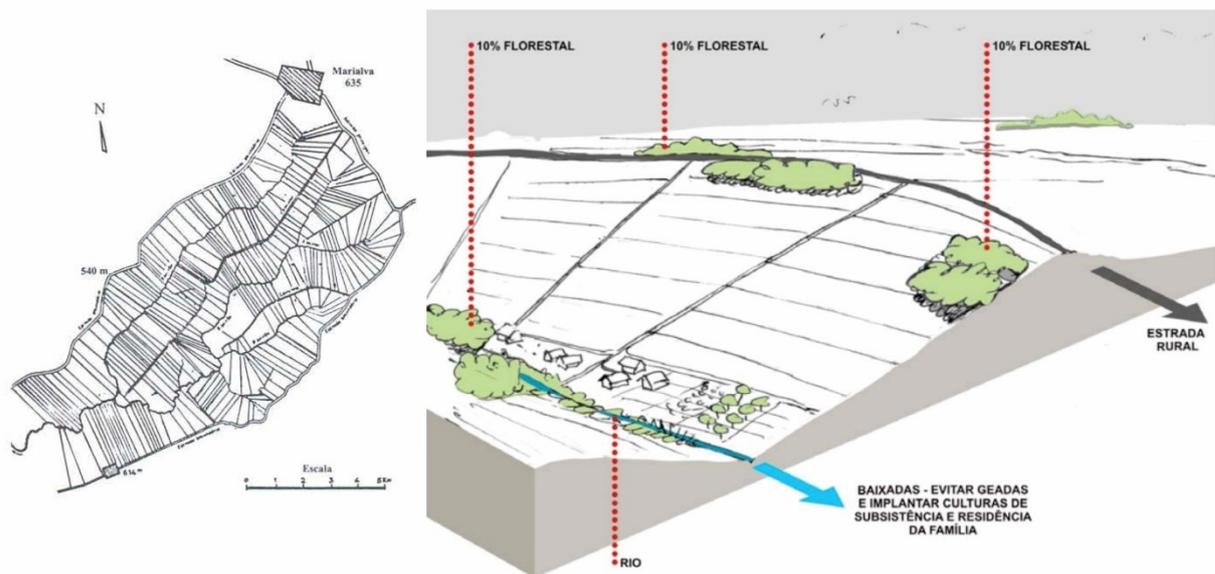
a criação de núcleos urbanos menores separados por 30 km, intercalados por núcleos rurais, visando facilitar a circulação do café (CMNP, 1975).

No tocante ao modelo de parcelamentos das propriedades rurais, estas também possuíam configuração específica no que concerne ao tamanho e estruturação, já mirando na acomodação das famílias no campo e o desenvolvimento da agricultura de subsistência:

[...] A área rural seria cortada de estradas vicinais, abertas de preferência ao longo dos espigões, de maneira a permitir a divisão da terra da seguinte maneira: pequenos lotes de 10, 15 ou 20 alqueires, com frente para a estrada de acesso e fundos para um ribeirão. Na parte alta, apropriada para plantar café, o proprietário da gleba desenvolveria sua atividade agrícola básica: cerca de 1.500 pés por alqueire. Na parte baixa construiria sua casa, plantaria a sua horta, criaria seus animais para consumo próprio, formaria seu pequeno 64 pomares. Água seria obtida no ribeirão ou em poços de boa vazão (CMNP, 1975. p. 75-78).

Assim sendo, a divisão dos lotes seguiu o modelo “espinha de peixe”, no sentido montante-jusante, atentando que os produtores tivessem acesso tanto à estrada quanto ao curso hídrico (Mendonça, 1994) (Figura 9).

Figura 9: Configuração dos lotes rurais planejados pela CMNP

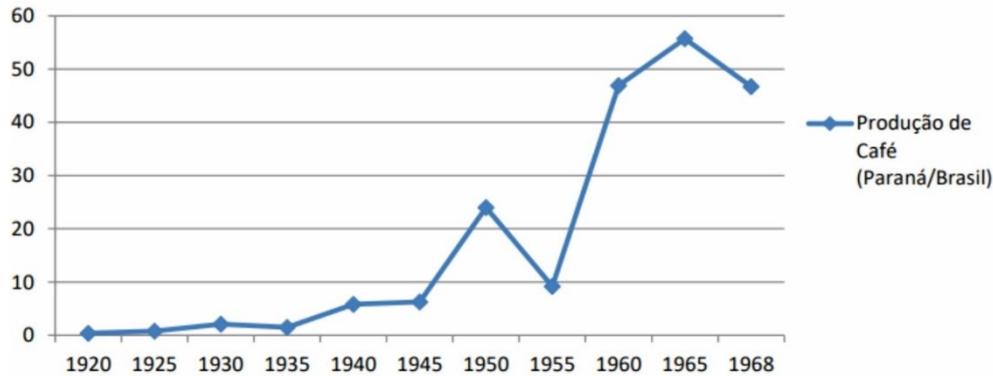


Org.: O autor (2024). Adaptado de Yonegura (2010).

De imediato, como reflexo da implantação e avanço de novas lavouras no interior do estado, em consenso à boa qualidade dos solos, incentivo governamental e à alta demanda do mercado interno e externo, o Paraná alcançou recordes de produtividade nacionalmente usando apenas o húmus natural, sem a necessidade de execução de significativas correções químicas

no solo (Serra, 1992). Dessa forma, o estado chegou ao seu ápice de participação na produção cafeeira em 1965, assumindo um posto de destaque na produção brasileira, contribuindo com 55% do montante produzido pelo país (Gardenal, 2019) (Figura 10).

Figura 10: Contribuição do Paraná, em %, para a produção de café no Brasil



Fonte: Gardenal (2019), elaborado a partir de Crocetti (2007).

O crescente índice de exportação, observados já entre 1940 e 1950, incentivou os produtores a procurarem cada vez mais terras, a fim de aumentar a produtividade. Contudo, com o esgotamento do estoque da tão almejada “terra roxa” pelos cafeicultores no Norte do estado, a colonização avançou sobre os oriundos de formações areníticas, comuns na mesorregião Noroeste (Serra, 2022). Mas, além de possuírem textura média/arenosa, que os denotam naturalmente a alta suscetibilidade erosiva, estes solos apresentam baixa retenção de água, reação ácida (pH 4,3-5,8) e, gradativamente, perdem a sua baixa fertilidade natural após um curto período de exploração (Soethe, 2014). Todavia, mesmo não possuindo a mesma qualidade em termos químicos e estruturais dos procurados de imediato pelos cafeicultores, eles mantiveram, por um período considerável, o mesmo ritmo de ocupação e instalação de novas lavouras de café (Serra, 2022).

Assim, a marcha para a "última fronteira do café"⁴, mais intensa entre 1940 e 1960, marcou a ocupação dessa mesorregião, impulsionando o povoamento de seu interior e contribuindo para o surgimento e desenvolvimento de novos núcleos urbanos (França, 2011). Assim, a monocultura do café desempenhou um papel fundamental ao capitanear economicamente a colonização desta mesorregião, sob efeito da procura e consequente vendas de lotes rurais (Nóbrega; Serra, 2009).

No entanto, diante de superprodução e da consequente crise dos preços no cenário nacional e internacional, no início da década de 1960 foi criado o Grupo Executivo de

⁴ Termo emprestado de Serra (2022).

Racionalização da Cafeicultura (GERCA). Essa instituição tinha “o objetivo explícito de erradicar o excedente dos cafezais, utilizando como ferramenta básica a renovação da agricultura por meio da diversificação das culturas” (Oliveira; Morelli, 2011, p. 1684). As principais alternativas de mudança propostas pelo grupo foi a adoção de culturas temporárias (soja/trigo) e de pastagem (Gardenal, 2019).

Tais esforços para a erradicação dos cafezais se intensificaram em meados de 1964 (Sampaio; Lima, 2020) e, apesar da relutância por parte dos produtores, as lavouras foram findadas em 1975, devido à ocorrência de uma geada preta⁵ que destruiu as plantações de café (Camolezi; Costa, 2009). Associada à condicionante climática, também estão as novas políticas agrícolas, altamente modernizada do ponto de vista tecnológico (Sampaio; Lima, 2020).

Com isso, os produtores não tiveram uma alternativa a não ser mudar o modo de produção, seguindo aqueles incentivados pelos programas que visavam a desmonopolização de cultura, como destacado por Serra (1986):

Foi neste ano que os proprietários rurais resolveram, de vez, substituir o café por outro produto que apresentasse mais segurança em termos de comercialização e menos risco em termos de eventuais instabilidades climáticas. As culturas mecanizadas de soja, trigo e milho, o algodão e as pastagens foram as alternativas que passaram a ter a preferência do agricultor (Serra, 1986, p. 57).

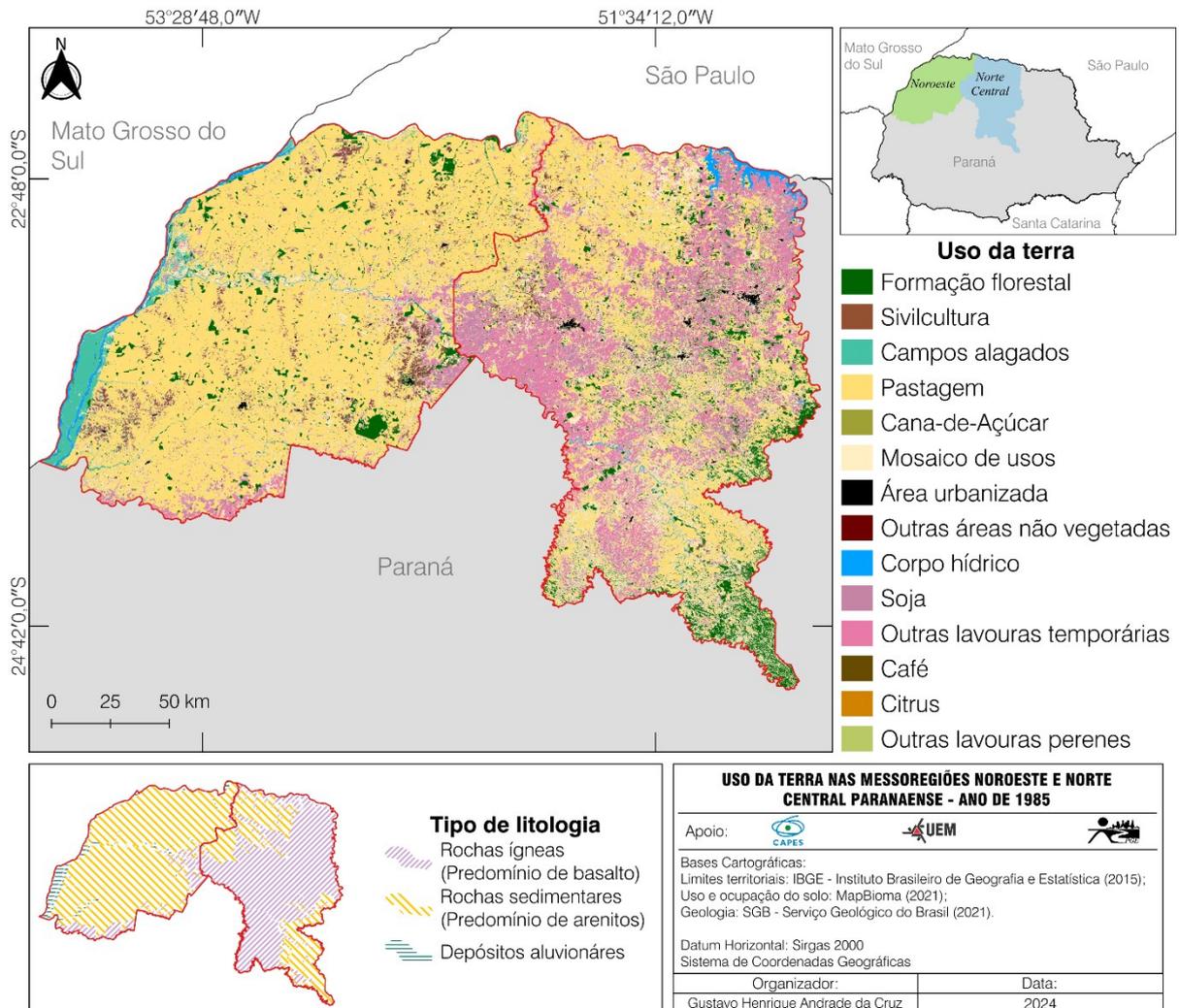
Logo, o espaço agrário passou a ser dominado por culturas temporárias, notadamente com binômio soja-trigo, estabelecidas sobretudo em solos derivados de formações basálticas, predominantes na região Norte. Sobre os oriundos de formações areníticas, prevaletentes no Noroeste, desenvolveu-se pastagem plantada voltada para a criação do gado de corte (Fonseca; Serra, 2019). Já em relação às áreas de contato arenito-basalto, que exibem características pedológicas heterogêneas por apresentarem teores variados de argila, conferindo-lhes propriedades “mistras”, estas se tornaram palco do desenvolvimento tanto da pastagem, quanto das lavouras relacionadas às culturas temporárias. Em outras palavras, são áreas que passaram a sustentar um mosaico de usos (Nóbrega; Serra, 2009).

Em função do novo quadro agrícola, em 1985 já se observava o desaparecimento quase integral da cultura do café, isso em ambas as mesorregiões. Os pequenos remanescentes dos

⁵ “A geada preta ocorre quando a frente polar avança, facilitada pelo recuo da massa tropical-atlântica. O encontro das duas massas provoca tempestades, seguidas de brusca queda de temperatura: as plantas, carregadas de umidade não evaporada, são então queimadas por congelamento” (Muller, 1956, p. 60).

cafezais que ainda persistiam, se concentravam em solos areníticos ou sobre aqueles com propriedades mistas (Figura 11).

Figura 11 - Uso da terra nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná no ano de 1985



Org.: O autor (2024).

Ainda que a crise do café se remonte ao início da década de 1960, a atividade cafeeira foi a sustentação econômica do Noroeste até 1970 (Nóbrega; Serra, 2009), mas, apesar disso, a reconfiguração agrícola torna-se propulsora de consequências socioeconômicas significativas, com destaque para o esvaziamento populacional (Serra, 2022). Entre 1970 e 1980 a mesorregião apresentou uma evasão de 218.428 habitantes, o equivalente a 22,83% de sua população total (Moro; Teixeira, 1989).

Ainda que fossem implantados novos modos de produção, estes não tiveram a capacidade de retenção de grandes contingentes populacionais (Soethe, 2014; Serra, 2022),

resultando na inversão total entre a população rural e urbana até o ano de 2000 (Serra, 2010) (Tabela 2).

Tabela 2 - População total, urbana e rural da mesorregião Noroeste (1970/2000)

Período	Total	Urbana	Rural
1970	962.798	253.507 (26,33%)	709.291 (73,67%)
1980	746.472	360.966 (48,36%)	385.506 (51,64%)
1991	655.509	441.840 (67,40%)	213.669 (32,60%)
2000	641.084	495.342 (77,27%)	145.742 (22,73%)

Org.: Serra (2010). Fonte: Ipardes (2008).

Além disso, a concentração de terras foi outra consequência herdada da reconfiguração agrícola, uma vez que o novo modelo de uso da terra, altamente modernizado, requereram maiores espaços territoriais e, por consequência, sem condições financeiras para assumir a modernização agrícola, grande parte dos pequenos produtores de café se viram obrigados em vender suas propriedades (Moro, 1995).

À vista disso, Serra (2022) destaca que:

Os estratos de área mais afetados pela concentração fundiária foram os de menos de dez hectares (as chácaras) e os de 10 a 20 hectares (os sítios), justamente os estratos que predominaram no modelo fundiário desenhado pelas colonizadoras e que sustentaram na mesorregião as lavouras de café. Foram esses estratos que abrigaram as famílias dos pequenos proprietários e seus trabalhadores, remunerados ou não. O primeiro estrato (menos de 10 hectares) perdeu 38.954 estabelecimentos e 223.766 hectares; o segundo (de 10 a 20 hectares) perdeu 14.418 estabelecimentos e 38.936 hectares. As áreas das unidades que desapareceram foram incorporadas aos estratos maiores, de mais de 100 e de mais de 500 hectares (Serra, 2022, p. 29-30) (Tabela 3).

Tabela 3 - Número e área ocupada (ha) pelos estabelecimentos agrícolas do Noroeste paranaense

Estratos de área	1970		1980		1996		2017	
	Est. (n.)	Área (ha)						
01-10	50.168	307.543	27.565	151.713	10.831	83.716	5.124	n/d
10-20	21.592	293.653	14.279	197.860	7.174	121.944	5.837	n/d
20-50	9.002	267.826	8.386	258.886	6.520	237.473	5.494	n/d
50-100	2.006	142.278	2.732	194.599	2.541	201.625	2.247	n/d
100-500	2.161	469.699	3.107	669.598	3.147	740.307	2.842	n/d
+500	481	414.675	705	853.481	728	836.633	618	n/d
Total	85.410	1.895.674	56.714	2.308.137	30.941	2.248.698	30.807	2.097.292
Paraná	554.488	14.625.530	454.103	16.380.332	369.875	15.946.632	305.154	14.741.497

Org.: Serra (2022). Fonte: IBGE, Censos Agropecuários de 1970, 1980, 1996, 2017. n/d = dados não disponíveis.

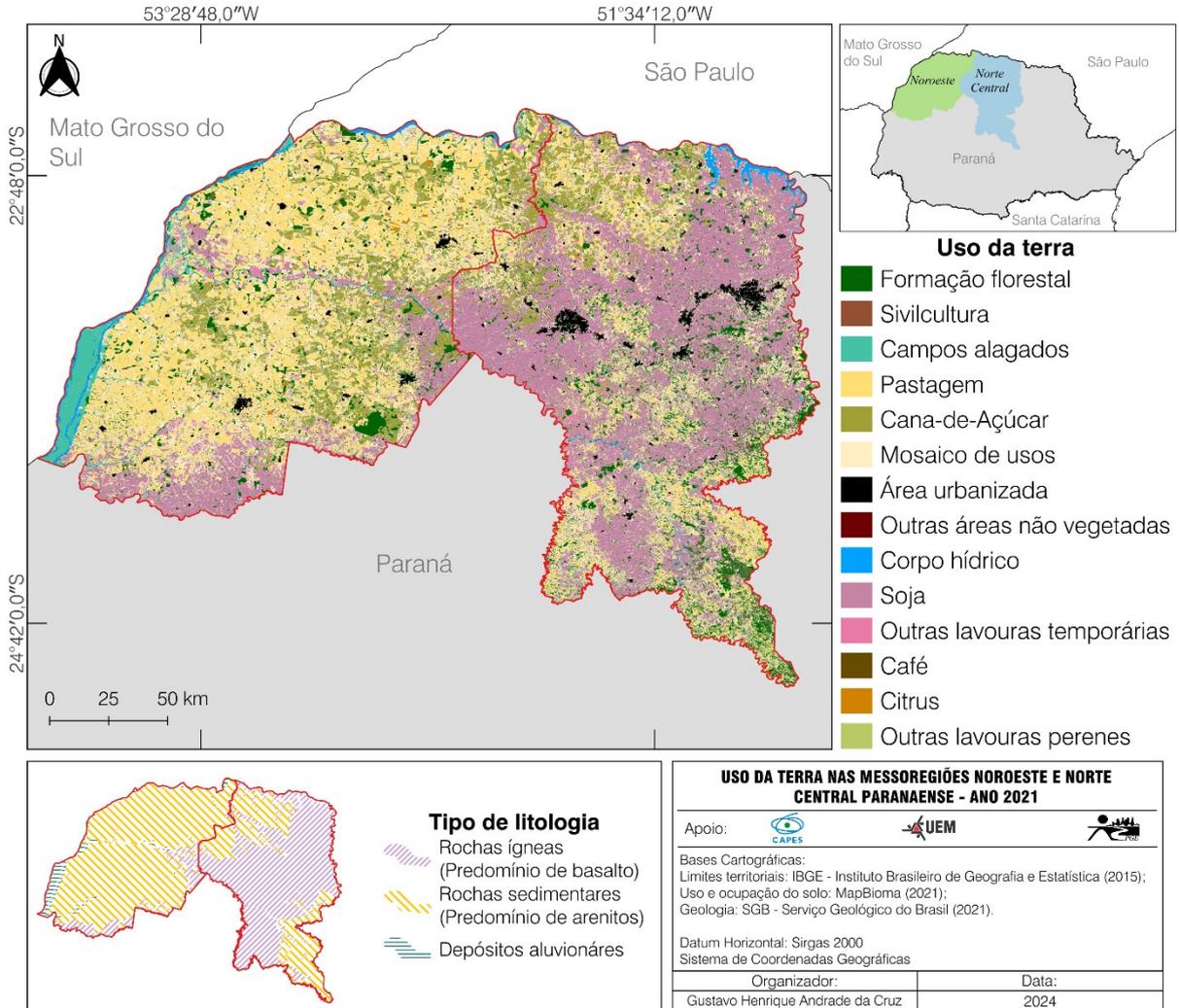
Vagarosamente, na década de 1980 a paisagem agrícola e a relações de trabalho da mesorregião Noroeste começou a sofrer novas transformações, agora por estímulos do governo através do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL)⁶. Visando a produção de açúcar e álcool, a implantação deste projeto contribuiu para a instalação de lavouras de cana-de-açúcar na mesorregião, bem como de usinas para o processamento da matéria-prima (Serra, 2010).

Ainda que os estímulos remonte à década de 1980, as transformações no cenário agrícola sobre efeito do desenvolvimento da economia açucareira ocorreram com maior intensidade apenas no final do século XX, quando, a partir do segundo quinquênio da década de 1990, já era possível observar a substituição de vastas áreas de pastagem plantada por lavouras de cana-de-açúcar (Serra, 2010).

Portanto, tais configurações do espaço agrário se estendem aos dias atuais. Sobre os solos de textura argilosa, prevalece o desenvolvimento das commodities agrícolas soja e milho, ao passo que sobre os de textura média/arenosa ocorre a disputa de espaço entre a pastagem plantada e cana-de-açúcar, como ressaltado por Serra (2010) - já elencado, e observado na figura 12.

⁶ “O Proálcool, como foi popularmente batizado, visava o desenvolvimento das técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de álcool etílico” (Andrade; Carvalho; Souza, 2010, p.131).

Figura 12 - Uso da terra nas mesorregiões Norte e Noroeste do Paraná no ano de 2021



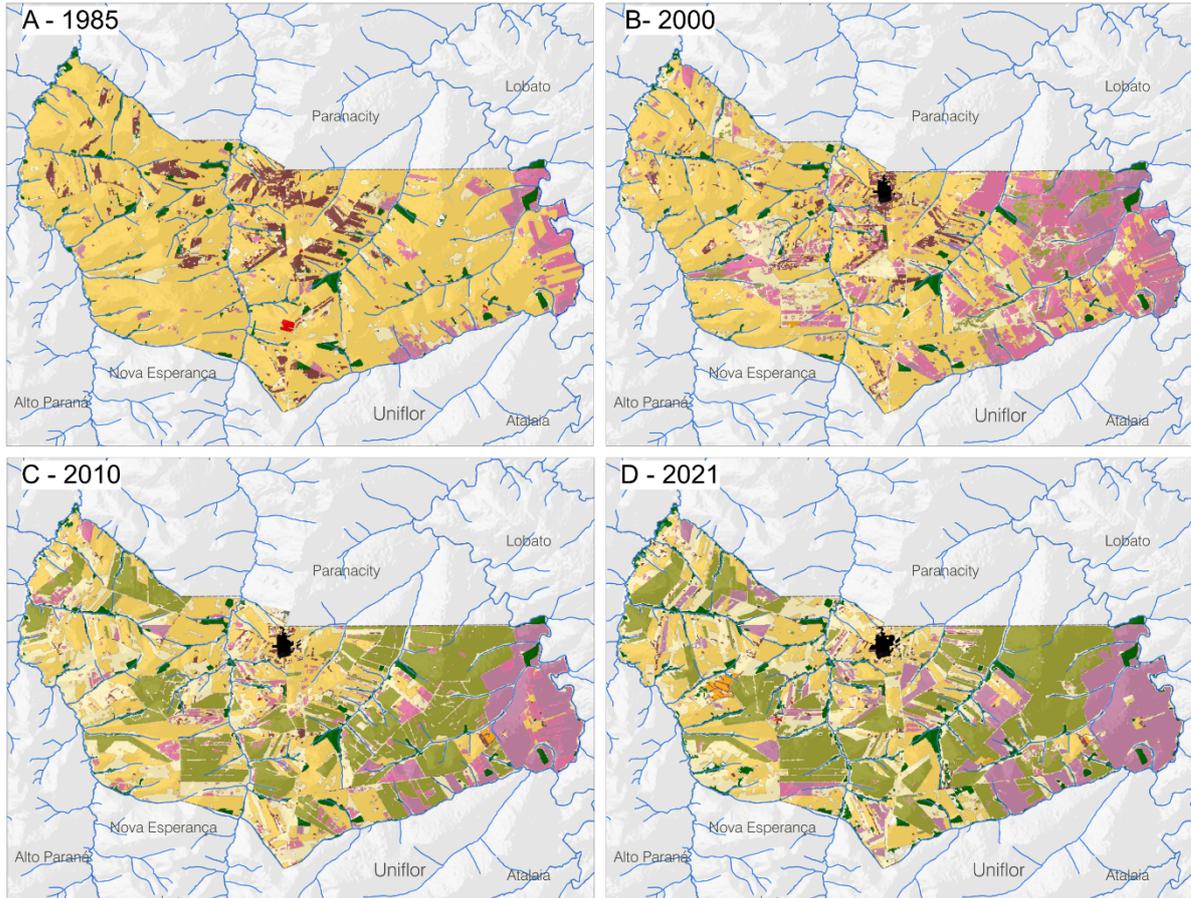
Org.: O autor (2024).

Embora esteja inserido na mesorregião Noroeste, Cruzeiro do Sul constitui relação fronteiriça com o Norte Central, além de apresentar, inclusive próximo a essa divisa, uma área de contato arenito-basalto. Em decorrência disso, o município apresenta variações socioeconômicas bem definidas em comparação aos instaurados no interior da mesorregião, sobretudo aqueles associados às maiores cotas altimétrica que não apresentam o basalto como rocha aflorante no talvegue dos rios. Estes, além de não sofrerem influência imediata da frente de ocupação, não passam por mudanças expressivas no uso da terra em função da uniformidade das características pedológicas, embora também apresentem transformações laterais que lhes conferem variabilidades no que concerne suas potencialidades e limitações, que se reverbera diretamente no uso da terra e o estrato socioeconômico.

As constantes alterações na configuração e desenvolvimento agrícola sucedidas no município foram substanciadas por influência de ambas as mesorregiões, dependentes dos

fluxos migratórios e ocupação. Isso fez com que as transformações de sua paisagem agrícola se manifestassem de maneira bem definida em sentido Leste-Oeste (Figura 13).

Figura 13 - Classes de uso da terra do município de Cruzeiro do Sul-PR nos anos de 1985, 2000, 2010 e 2021



Uso da terra

- Formação florestal
- Café
- Citrus
- Outras lavouras perenes
- Pastagem
- Soja
- Cana-de-açúcar
- Mosaico de agricultura e pastagem
- Outras lavouras temporárias
- Área urbanizada
- Outras áreas não vegetadas
- Hidrografia

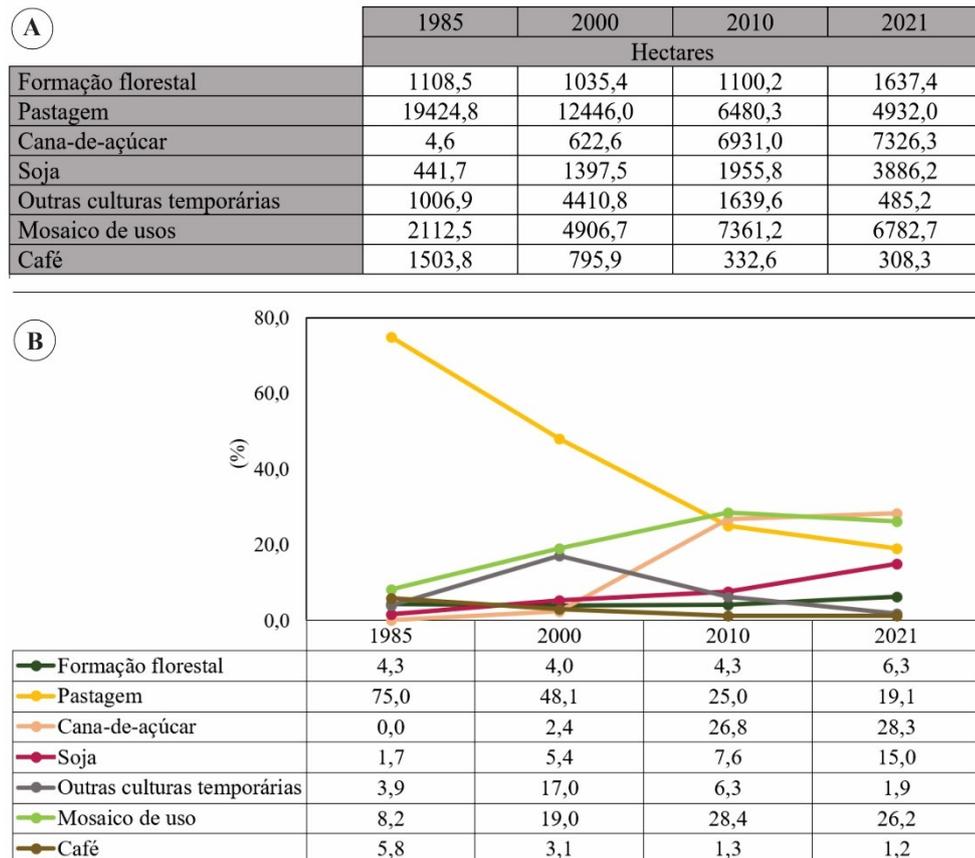


EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO USO DA TERRA NO MUNICÍPIO DE CRUZEIRO DO SUL, ESTADO DO PARANÁ	
Apoio:	
Bases Cartográficas: Limites territoriais: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015); Uso da terra : MapBiomias (2021).	
Datum Horizontal: Sirgas 2000 Sistema de Coordenada: Geográfica	
Organizador:	Data:
CRUZ; G. H. A.	2024

Org.: O autor (2024).

A cafeicultura já não era a atividade econômica principal do município em 1985, uma vez que os cafezais ocupavam apenas 5,8% de sua área total, equivalente a 1503,8 ha (hectares). Desde então, tem testemunhado um constante declínio ao longo das décadas, chegando a 1,2%, o equivalente a 308,3 ha em 2021 (Figura 14).

Figura 14 - As principais classes de uso da terra em relação aos hectares (A) e ao percentual (B) de área ocupada no município de Cruzeiro do Sul – PR.



Org.: O autor (2024). Fonte: MapBiomias (2021).

Em resultado de uma abrupta diminuição da atividade cafeeira, maioria das terras do município foram ocupadas por pastagem plantada, aspecto de transição de uso característico em toda a mesorregião Noroeste. Em 1985, o uso em questão ocupava uma área de 19424,8 ha, o equivalente à cerca de 75,0% do território do município (Figura 13). Contudo, ainda que abrangessem uma área modesta, as primeiras lavouras com culturas temporárias (soja/trigo) já haviam se estabelecido em sua porção oriental, o qual está sob domínio de basaltos, que, como já aludido, deriva solos propícios para a sustentação das lavouras após a erradicação dos cafezais (Figura 13 - A).

O avanço das lavouras com culturas temporárias sobre a pastagem resultou no aumento da área plantada com soja, que passou de 441,7 ha (1,7%) em 1985, para 1397,5 ha (5,4%) no

ano 2000. Essa ampliação também foi acompanhada por “outras lavouras temporárias”, não especificada pelo MapBiomas (órgão de referência), mas acredita-se que possa se tratar de lavouras de trigo/milho. Essa classe de uso da terra ocupava uma área de 1006,9 ha do município em 1985 (3,9%), chegando a 4410,8 ha (17,0%) no início do século XXI (Figura 14).

Em concordância com o que foi apontado por Serra (2010), que destaca o avanço proeminente da cana-de-açúcar no quadro agrícola do Noroeste do estado a partir da segunda metade da década de 1990, esse feito é claramente observado em Cruzeiro do Sul na primeira década do século XXI. No ano 2000, os canaviais ocupavam uma área de cerca de 622,6 ha no município, o que corresponderia a 2,4% de sua área total. Em uma década, este valor aumentou mais de dez vezes, alcançando 6931,0 ha em 2010 (26,8%) (Figura 14).

À medida que os novos modelos de produção, modernizados, avançavam na paisagem agrícola, houve uma redução substancial das áreas com pastagem, que até a primeira década do século XXI ainda se caracterizava como o uso da terra dominante no município. Em 2021, as áreas destinadas ao uso pastio passou a recobrir 4932,0 ha, representando, portanto, uma redução de 74,6% em relação ao de 1985 (Figura 14).

Outra classe de uso da terra significativa em termos de área de abrangência que merece ser destacada é o “mosaico de uso”, que apresentava crescimento significativo desde 1985, mas que permaneceu praticamente estático entre 2010 e 2021 (Figura 14). Embora esteja fortemente associado às áreas que possuem características pedológicas “mistas” (Nóbrega; Serra, 2009), é possível inferir que a taxa de crescimento que prevaleceu até 2010 está intrinsecamente associada às alterações no modelo de produção agrícola, considerando que leva um período relativo para que o produtor rural promova a conversão total das culturas, seja por motivos envolvidos ao processo de adaptação ou por dificuldades referentes ao capital financeiro. Esse alongamento leva a mudanças gradativas, resultando no desenvolvimento de cultura mista na propriedade.

Toda essa conjuntura histórica de ocupação e desenvolvimento do município contribui para que sua economia seja fomentada, principalmente, pelo setor primário. Segundo dados do IPARDES (2023), Cruzeiro do Sul apresenta um PIB a preço corrente, também denominado como PIB nominal, de 197.191,260. Deste montante, 64,5% são correspondentes ao setor agropecuário (Figura 15).

Figura 15 - Produto Interno Bruto (PIB) a preço corrente segundo o ramo de atividade do município – 2020, Cruzeiro do Sul-PR



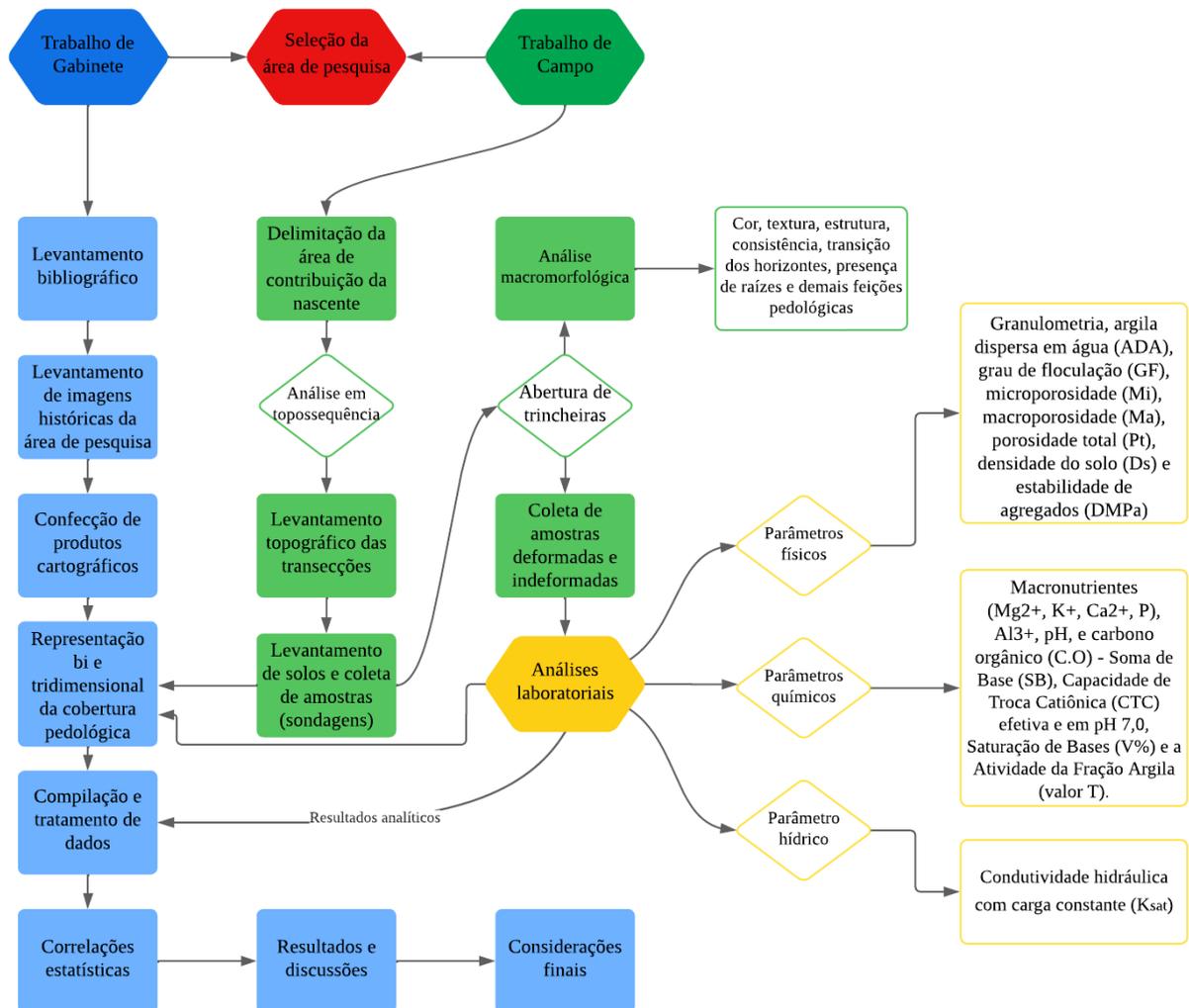
Org.: O autor (2024). Fonte: IPARDES (2023).

Com menores representatividades, esse percentual vem seguido pelos setores de comércio e serviços (15,7%), administração pública (13,0%), e impostos e indústria, com ambos contribuindo com 3,4% do valor total.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram aplicados métodos e técnicas que estão divididos em quatro principais etapas, a seleção da área de estudo, os trabalhos de gabinete, de campo e de laboratório (Figura 16). Todavia, seguindo uma ordem cronológica, a seleção da área foi precedida por investigações preliminares que se enquadram tanto as atividades de escritório quanto de campo, uma vez que, inicialmente, foram analisadas imagens orbitais e representações cartográficas secundárias que retratassem os aspectos físicos e sociais da área, seguidas da realização do campo de reconhecimento – observação *in loco*. Desse modo, somente após essa seleção que se procedeu efetivamente às etapas consecutivas.

Figura 16 - Fluxograma simplificado dos métodos e técnicas utilizados na pesquisa



Fonte: O autor (2024).

3.1. SELEÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

No contexto na mesorregião Noroeste do Paraná, para além da vulnerabilidade natural dos solos a processos erosivos e a potencialização dessa problemática por ações antrópicas, as formas erosivas possuem locais preferenciais para sua ocorrência, em virtude de características topográficas específicas e comportamento hidrológico, repercutindo diretamente sobre as nascentes. Como mencionado por Nóbrega et al. (2023) existem três locais que prevalecem a ocorrência de voçorocas no Noroeste do estado do Paraná, sendo:

[...] ao longo dos vales em forma de berço e suas cabeceiras; em setores de média e baixa encosta com declividades moderadas a fortes; e no interior de grandes anfiteatros definidos por rupturas marcadas, vertentes curtas e declividades fortes, e que abrigam várias nascentes de pequenos cursos d'água (Nóbrega et al., 2023, p.6).

Partido desse pressuposto, e considerando a carência de estudos que se dedicam em analisar de forma direta a relação entre a degradação dos solos e as nascentes de pequenos cursos d'água no Noroeste paranaense, foi selecionada uma nascente associada a uma concavidade.

Em termos de definição, o local experimental não se trata de um extenso vale em berço⁷ que tipicamente compreendem os cursos d'água de primeiras ordens hierárquicos situados nas maiores cotas altimétricas das bacias hidrográficas da região. Todavia, apesar do processo de exfiltração da água subterrânea ocorrer no seguimento de baixa encosta, o que faz com que sua dinâmica esteja fortemente influenciada pelos processos funcionais da vertente, a nascente ainda assim possui uma área de contribuição, onde ocorre a recarga e a drenagem da água para seu ponto de exfiltração. Foi nesta área de drenagem em que a pesquisa foi conduzida.

Ademais, foram considerados os aspectos físicos do local, tais como a geologia, o sistema pedológico, a hidrografia e o relevo (apontado pela declividade e morfologia do terreno). Além das práticas agrícolas impostas à área, que serviram como subsídio para compreender os efeitos da adoção dos principais sistemas agrícolas desenvolvidos na região, e seu papel como agente propulsor da degradação dos solos e da nascente, numa já complexa feição geomorfológica.

⁷ Termo emprestado de Nóbrega et al. (2023).

3.2. TRABALHOS DE GABINETE

A etapa inicial dos trabalhos de gabinete foi executada simultaneamente às atividades de campo e de laboratório. Portanto, durante esse período foram fundamentadas as concepções teóricas-metodológicas da pesquisa, realizada a confecção de produtos cartográficos e a compilação dos dados obtidos em campo. Na fase consecutiva, se concentrou às análises dos resultados, integrando o tratamento dos resultados dos experimentos laboratoriais, bem como suas respectivas representações gráficas e correlações estatísticas. Por fim, a interpretação dos resultados obtidos, associados à assimilação com a literatura científica preexistente (resultados e discussões), levou às considerações finais (Figura 16).

3.2.1. Levantamento bibliográfico e de dados secundários

De modo geral, esta etapa foi composta principalmente pela revisão da literatura que auxiliou versar as concepções teóricas e bases metodológicas empregadas na pesquisa. Ademais, compreende o levantamento de dados secundários que nortearam a seleção da área de estudo, e que posteriormente possibilitaram a sua caracterização geral, onde se embasou tanto os aspectos físicos quanto os sociais.

Desse modo, foram levantadas principalmente bases bibliográficas que permitiram fundamentar os termos conceituais referentes a Análise Estrutural da Cobertura Pedológica; o manejo enquanto agente propulsor de alterações das propriedades físicas e dinâmica hídrica dos solos; e, por fim, temas direcionados às nascentes, como a definição conceitual, complexidades geoambiental e normativas estabelecidas para a sua proteção.

Ainda compreendendo os levantamentos bibliográficos, também se levantou e foram apresentadas as metodologias empregadas, de modo a atender os objetivos estabelecidos na pesquisa. Para tanto, foram consultados diversos tipos de bases literárias, como manuais técnicos, artigos científicos, teses, dissertações e livros.

Em relação aos dados secundários, foram realizadas consultas no banco de dados do MapBiomas Brasil (2021), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2006), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2009), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2015), Agência Nacional de Águas – ANA (2007) e Serviço Geológico do Brasil – SGB (2021), antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Além disso, também foi consultado o *Google Earth Pro*, versão 7.3.3.

3.2.2. Levantamento e representação evolutiva do uso da terra na área de estudo

Para compreender a dinâmica evolutiva do uso da terra, tendo como principal critério de escolha o ano de mudanças de uso na área de estudo, foram levantadas e compiladas imagens de 1980, 2008, 2016 e 2023. A fotografia aérea correspondente ao primeiro ano de análise, datada no ano 1980, foi disponibilizada pelo Instituto de Terras e Cartografia do Paraná (ITC-PR), hoje incorporado ao Instituto Água e Terra do Paraná (IAT-PR), em uma escala de 1:25.000. As demais, com melhor resolução espacial, foram extraídas do software *Google Earth Pro*, versão 7.3.3.

Após serem obtidas, essas imagens foram tratadas e organizadas em formato de linha do tempo no software *Corel Draw 2020*.

Embora o itinerário de elaboração seja efetivamente exposto no próximo subitem desta pesquisa (3.2.3), torna-se relevante enfatizar que ainda foi gerado um mapeamento adicional do uso da terra na área para o ano de 1985, considerando que as imagens do Google Earth estão disponíveis a partir de 2008. Essa representação foi fundamental para preencher uma lacuna na linha do tempo, uma vez que forneceu uma representação mais detalhada do marco da substituição do café pela pastagem, demonstrando a sua espacialização.

3.2.3. Confeção de produtos cartográficos

Os produtos cartográficos foram gerados no software *QGIS 3.24.3*. Para isso, foram utilizados variados tipos e formatos de bases cartográficas, disponibilizadas por instituições de responsabilidade estatal, via *websites* oficiais. Trata-se, desse modo, de dados vetoriais, em formato *shapefile*, disponibilizados pelo IAT (Instituto Água e Terra), IBGE (Instituto de Geografia e Estatística), ANA (Agência Nacional de Águas), EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e SGB (Serviço Geológico Brasileiro).

Tais fontes constituíram a base fundamental para a elaboração dos mapas de localização, de solos (Embrapa, 2008) de geologia (Besser; Brumatti; Spisila, 2021), ou ainda foram utilizadas como conversões cartográficas secundárias.

Além disso, também foram tratados e utilizados arquivos matriciais, como o disponibilizado pelo MapBiomas (2021) para elaboração de mapas de uso e ocupação da terra, bem como o MDE (Modelo Digital de Elevação), elaborados via dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e disponibilizadas pelo projeto TOPODATA/INPE (Valeriano; Rossetti, 2012) com resolução espacial de ± 30 metros.

Para representar a evolução do uso da terra em uma perspectiva temporal, adotou-se uma abordagem multiescalar (ao nível regional, municipal e local). Contudo, em razão do mapeamento original ter sido realizado em uma escala de 1:250.000, o que pode subestimar a representação cartográfica para o nível escalar da área analisada, a base matricial original foi polarizada e passadas por ajustes, quando necessário, apoiando-se em informações fornecidas pelos proprietários da área.

Ainda, assim como para elaboração de carta clinográfica, o MDE (Valeriano; Rossetti, 2012), com resolução de ± 30 metros, serviu como apoio para a confecção do mapa de Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index - TWI*) e do Índice de Potência de Escoamento (*Stream Power Index - SPI*), seguindo a metodologia preconizada por Moore, Grayson e Ladson (1991).

O TWI foi calculado através da equação 1:

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \quad (1)$$

Onde, TWI = Índice Topográfico de Umidade; α = área, em m^2 ; β = gradiente de inclinação, em graus.

Utilizando as mesmas variáveis, o SPI foi calculado através da equação 2:

$$SPI = \alpha \tan \beta \quad (2)$$

3.2.4. Elaboração de perfis da representação 3D da cobertura pedológica

Para a representação gráfica das sequências topográficas dos solos, utilizou-se o software *Corel Draw 2020*. Contudo, embora tenham sido elaborados com base nos levantamentos bidimensionais realizados em campo, a confirmação de tal representação ficou condicionada às análises laboratoriais, especificamente à granulometria, que foram fundamentais para a realização de ajustes, quando necessário.

Os resultados experimentais deste mesmo parâmetro analisado serviram para a elaboração de perfis com curvas de isovalores de areia total, silte e argila, a partir dos resultados laboratoriais das amostras coletadas a trado. Para tanto, três softwares foram empregados: o *AutoCAD LT 2023*, onde foi plotado os resultados analíticos em pontos georreferenciados; o *Surfer 16*, que realizou a interpolação dos valores; e o *Corel Draw 2020*, onde foi arquitetado o layout final dos perfis através da interpretação e delineamento das curvas geradas pelo software precedente. Esses perfis possibilitaram a visualização integrada do comportamento

vertical e lateral das frações minerais supracitadas ao longo das seções, representando as áreas de perda e concentração.

Já a representação tridimensional da cobertura pedológica ocorreu em duas etapas, conforme proposto por Boulet, Humbel e Lucas (1982) e Boulet (1988). A primeira fase do projeto consistiu na confecção da representação 3D do terreno por meio do *qgis2threejs exporter*, plugin complementar do software *QGIS 3.24.3*. Na etapa seguinte, plotou-se os horizontes pedológicos e foram delineados seus limites no software *Corel Draw 2020*, conforme exposto detalhadamente no subitem 3.3.2.

3.2.5. Tratamento de dados analíticos e correlações estatísticas

A tabulação dos dados obtidos em campo e em laboratório foi efetuada no *office Excel*, aplicativo do pacote Microsoft 365. Neste programa também foram realizados cálculos das análises laboratoriais, a partir da aplicação das suas equações correspondentes, além da geração de gráficos.

A partir dos resultados dos parâmetros analisado foi aplicado cálculos estatísticos, sendo o Coeficiente de Variação (CV%), bem como o Coeficiente de Correlação de Pearson (r). Para este último adotou-se a classificação proposta por Santos et al. (2012), adaptada de Zou; Tuncali; Silverman (2003), para a determinação da intensidade de correlação entre as variáveis analisadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Classes de intensidade de correlação

Correlação negativa	Intensidade de Correlação	Correlação positiva
0 a -0,2	Muito Fraca	0 a 0,2
-0,2 a -0,4	Fraca	0,2 a 0,4
-0,4 a -0,6	Moderada	0,4 a 0,6
-0,6 a -0,8	Forte	0,6 a 0,8
-0,8 a -1	Muito Forte	0,8 a 1

Fonte: Santos et al. (2012), adaptada de Zou; Tuncali; Silverman (2003).

Para a elaboração de gráficos de granulometria e dos diagramas físico-hídrico para os horizontes pedológicos analisados foi utilizado o software *Corel Draw 2020*.

3.3. TRABALHOS DE CAMPO

3.3.1. Delimitação da área de contribuição da nascente

Nessa etapa foram combinados levantamentos de campo e a aplicação de técnicas de geoprocessamento. Dessa maneira, a perimetragem da área de contribuição da nascente foi, inicialmente, realizada diretamente em campo, por meio da observação dos limites de seus interflúvios e o registro de coordenadas ao longo desta demarcação com o auxílio de um dispositivo GPS, do tipo *Garmin eTrex High Sensitivity*.

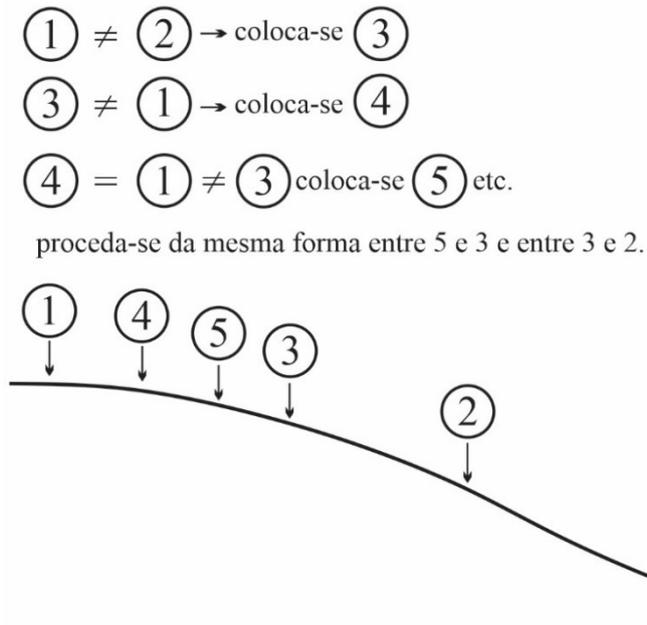
Posteriormente, com a plotagem das coordenadas e a vetorização prévia da área no software *Qgis 3.24.3*, o mapeamento foi sobreposto a um modelo 3D do terreno, cuja elaboração foi descrita no subitem 3.2.4. Essa sobreposição viabilizou realizar ajustes em sua delimitação, uma vez que tais adequações foram necessárias em áreas onde houve dificuldade de definir os limites de forma minuciosa em campo, em virtude da topografia pouco demarcada e a dificuldade na percepção espacial no interior da floresta que recobre o sopé da encosta.

3.3.2. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica

Para o levantamento e reconhecimento do sistema pedológico que constitui a vertente foi aplicada parte da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica (AECPE), em uma perspectiva bidimensional (Boulet et al., 1982) e tridimensional (Boulet, Humbel e Lucas, 1982; Boulet, 1988). A aplicação dessa metodologia, aliada a análises laboratoriais, além do levantamento detalhado dos solos que compõe a área de contribuição da nascente, permitiram compreender o estado da sua qualidade física e dinâmica hídrica.

A aplicação da AECPE é estruturada em duas principais etapas. A primeira corresponde ao estudo em topossequência, onde são levantados os volumes pedológicos ao longo de recortes topográficos por meio de sondagens a trado (Figura 17), chegando à obtenção de sua organização vertical e as suas sucessões laterais.

Figura 17 - Método de implantação das sondagens ao longo de uma vertente

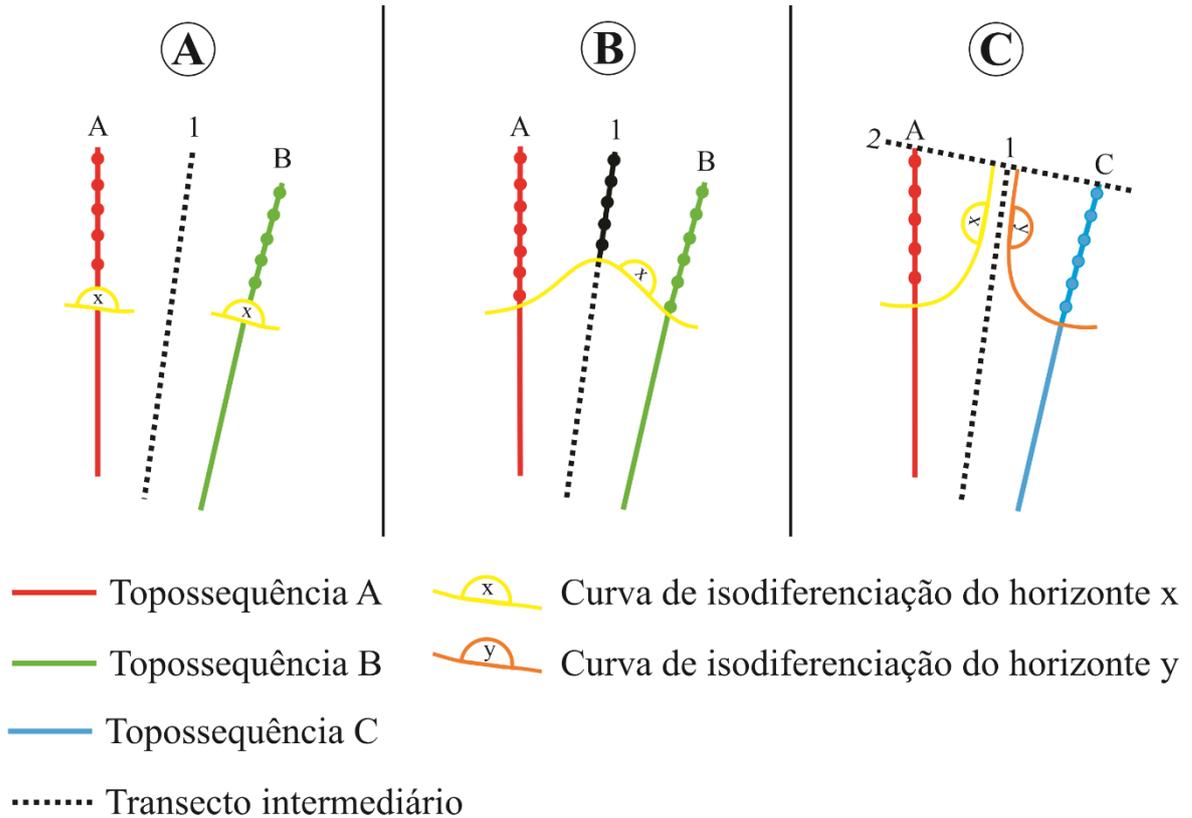


Fonte: Boulet et al, 1982.

Essa investigação inicial sustenta a etapa subsequente, a representação e análise tridimensional, que se refere à espacialização dos limites pedológicos na paisagem, simbolizadas por meio de curvas de isodiferenciação. Em suma, refere-se à cartografia detalhada dos solos de uma unidade de paisagem elementar ao nível de detalhe, onde tais curvas, que retratam a continuidade/descontinuidade dos volumes pedológicos, são dispostas sobre um modelo 3D do terreno, permitindo uma melhor visualização da organização dos solos ao longo da unidade analisada.

A metodologia estabelece que, ao analisar dois transectos paralelos (A e B) (Figura 18a), faz-se a introdução de um intermediário na parte central dos dois primeiros (Figura 18b). Utilizando os resultados dos três levantamentos, os pontos de equivalência são conectados (Figura 18b). Caso não sejam encontrados pontos correspondentes, recorre-se a uma transeção transversal (Figura 18c) (Boulet, 1988).

Figura 18 - Operações sucessivas para a localização de uma curva de isodiferenciação



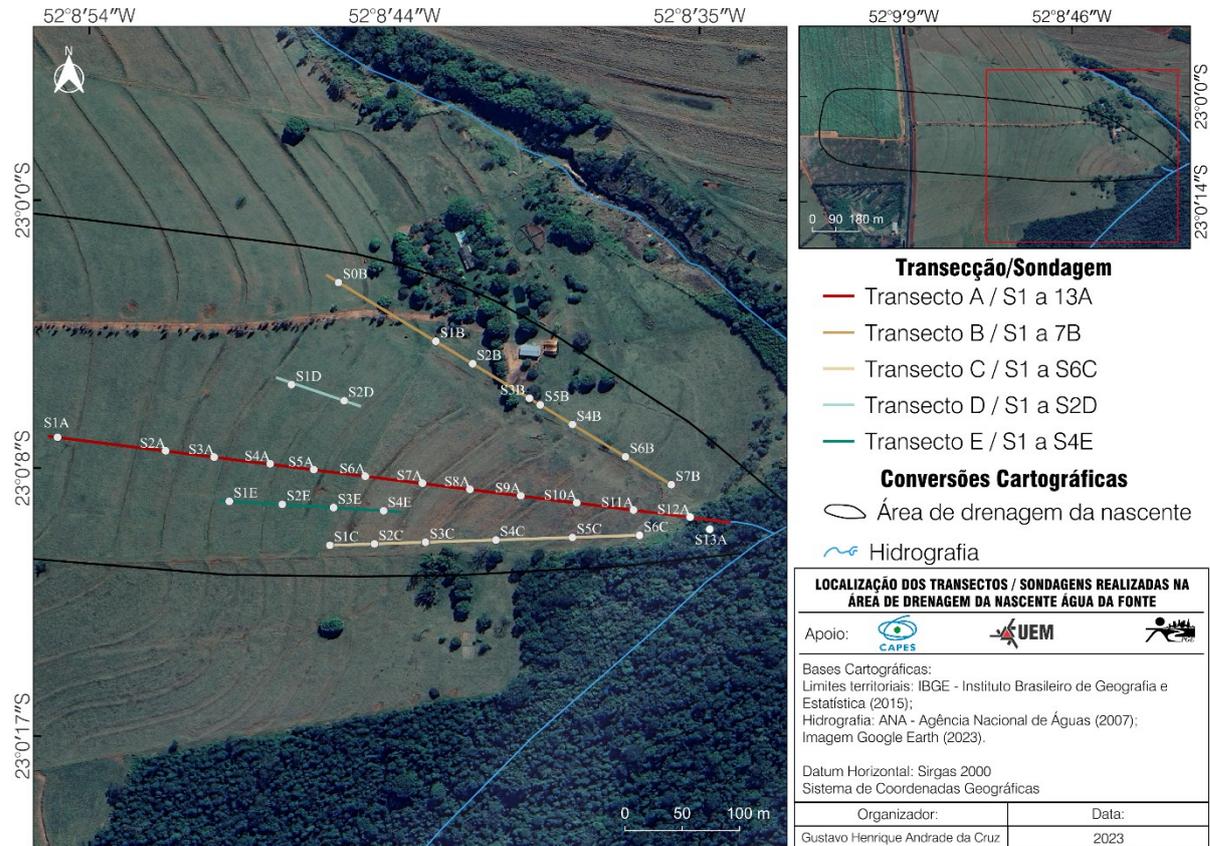
Org.: O autor (2024), adaptado de Boulet (1993).

Dessa maneira, a fim de viabilizar a representação tridimensional, foram analisados cinco transectos (topossequências), denominados como A, B, C, D e E.

A parte inicial do itinerário operacional consistiu no levantamento topográfico correspondentes, realizado com o auxílio de um clinômetro, metro e trena, através da medição dos ângulos de inclinação e elevação do terreno, conforme descrito por Marques, Santil e Cunha (2000). Contudo, embora a metodologia sugira a realização de leituras a cada 10 m de distância em terrenos que não apresentam irregularidades, como é o caso da área de estudo, destaca-se que os levantamentos foram conduzidos por leituras realizadas, em média, a cada 3 m, o que aumentou o nível de precisão.

Sucessivamente, efetuou-se o levantamento dos solos seguindo a metodologia proposta por Boulet et al. (1982), a partir da disposição de sondagens a trado com 2 metros de profundidade, iniciadas no topo e se estendendo a base dos transectos, com a realização de tradagens intermediárias quando necessário (Figura 19).

Figura 19: Disposição dos levantamentos bidimensionais no perímetro da área de contribuição da nascente Água da Fonte



Org.: O autor (2024).

Quanto ao seu posicionamento, o transecto A foi posicionado na área central da área de contribuição da nascente, em eixo de maior declividade, perpendicular a linha de fluxo e ao ponto de exfiltração. Os transectos B e C foram traçados paralelamente ao eixo central, às margens direita e esquerda, respectivamente, considerando a observação do topo para a base da vertente.

Já os transectos D e E foram posicionados entre o A-B e A-C, respectivamente. Trata-se de eixos secundários conferidos ao declive posterior aos demais, pois derivam da necessidade de encontro do ponto de aparecimento de um dos volumes pedológicos encontrados nas topossequências primárias, por isso, possuem menor extensão (Figura 19).

Ao final foram realizadas um total de 32 sondagens nas cinco linhas de levantamento (Figura 19). Com isso, além de adquirido a estrutura bidimensional dos horizontes pedológicos, ao longo das tradagens também foram realizadas amostragens de solo em intervalos de 5 cm de profundidade, até 200 cm. Isso resultou na obtenção de um total de 640 amostras, das quais, de forma intercalada, uma metade foi devidamente organizada e acondicionada junto ao pedocomparador, para consultas futuras, caso sejam necessárias. A outra parte foi armazenada

em sacos plásticos devidamente identificados e designada à análise granulométrica em laboratório.

Levando em consideração as características morfopedológicas da vertente, bem como seu histórico de uso, foram selecionados seis pontos para a abertura de trincheiras. De tal modo, cinco foram abertas no transecto principal (A), sob área que passou por diversas mudanças de uso da terra, e maior variação de declive e morfologia. Outra foi aberta no transecto B, representativo de uma parcela da vertente historicamente mantida com pastagem nas últimas décadas, com característica morfológica distinta, uma vez que se situa no divisor convexo da bacia, área de divergência em termos de fluxos hídricos. Assim, além do compreender de maneira integrada as características intrínsecas aos solos, o posicionamento estratégico das unidades experimentais (trincheiras) ao longo da vertente permitiu realizar comparações relativas aos efeitos dos sistemas de manejo adotado.

Após a caracterização e a classificação dos solos procedeu-se à segunda etapa da AECP, a representação tridimensional, com a reconstituição da espacialização dos volumes pedológicos ao longo da área de contribuição da nascente, onde o aparecimento/desaparecimento e as transformações pedogenéticas foram representados por curvas de isodiferenciação.

3.3.3. Análise morfológica e amostragem de solo

Os perfis verticais levantados ao longo dos transectos tiveram seus horizontes pedológicos descritos conforme os critérios estabelecidos por Santos et al. (2015). De tal modo, determinou-se a cor, conforme a Carta de Munsell (1998), a textura, a estrutura (grau, tamanho e tipo), a consistência (seca, úmida e molhada), a transição dos horizontes (topografia dos horizontes e nitidez), a presença de raízes, e demais feições pedológicas.

Posterior à análise macromorfológica, foram realizadas amostragens de solos em cada horizonte pedológico para a determinação de parâmetros físicos, químicos e hídrico em laboratório.

As amostras com estrutura deformadas foram armazenadas em sacos plásticos e posteriormente utilizadas para a determinação da granulometria e de parâmetros químicos. As amostras com estrutura preservada, coletadas em forma de monólitos, foram armazenadas em caixas de papelão e destinadas à determinação da estabilidade de agregados, expressa pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPa); enquanto as amostras coletadas em anéis volumétricos (143 cm³) foram envolvidas em plástico filme e guardadas em maletas de madeira,

onde em laboratório foram designadas aos ensaios de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), porosidade e densidade do solo.

Todavia, devido à alta variabilidade espacial das características físicas dos solos, que, por sua vez, exercem forte influência sobre seu funcionamento hídrico, especialmente nas camadas aráveis, derivadas de forças compressórias provocadas por máquinas agrícolas (Reichardt, 1978) as amostragens correspondentes aos anéis com volume conhecido (143 cm^3) foram coletadas em quadruplicada para cada horizonte de solo descrito em campo. Isso permitiu que os resultados das variáveis analisadas, provenientes da média aritmética entre as quatro amostras, fossem, de fato, representativas.

3.4. TRABALHOS DE LABORATÓRIO

3.4.1. Análise hídrica

A circulação hídrica atua como condutora de matéria e solutos, desempenhando um papel fundamental nos processos de transformações pedogenéticas (Cunha; Nóbrega; Castro, 2008). Porém, a concentração de fluxos hídricos podem, por vez, favorecer o surgimento de feições erosivas, o que também as torna uma das principais condicionantes da degradação dos solos (Oliveira, 1979; Filho, 1987).

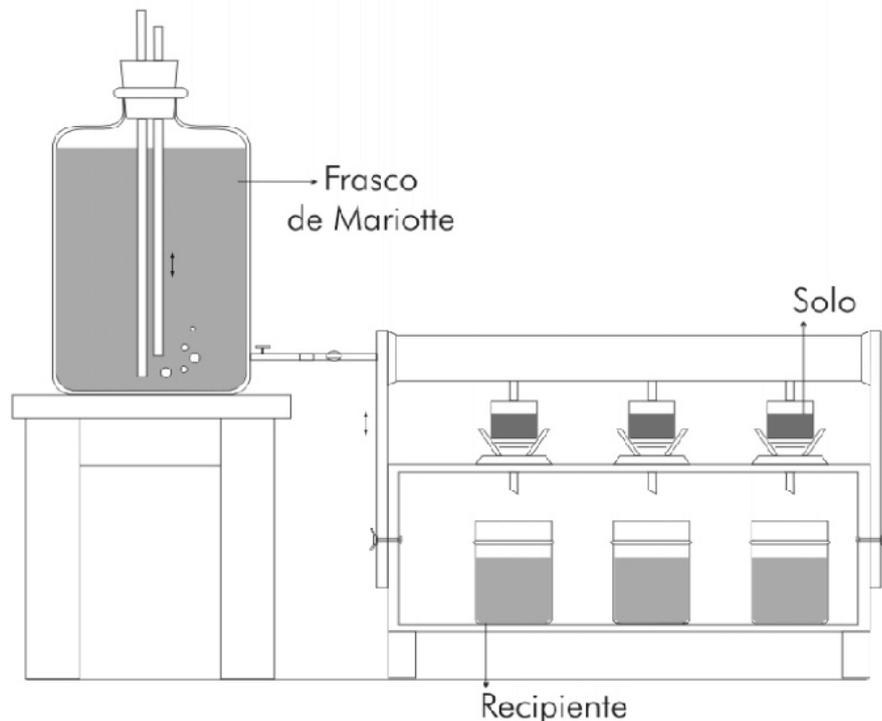
Diante dessa premissa, a dinâmica hídrica do solo se torna uma variável chave a ser analisada quando se pretende compreender a organização e o funcionamento da cobertura pedológica, bem como quando se investiga os processos envolvidos em sua degradação. Em consideração a isso, adotou-se como parâmetro a ser avaliado a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), por meio da utilização de um permeâmetro com carga constante, conforme descrito pela Embrapa (2017). Essa análise permite obter a velocidade com que a água se movimenta no espaço poroso do solo (Gonçalves; Libardi, 2013).

3.4.1.1. Condutividade hidráulica saturada (K_{sat})

Quanto ao procedimento operacional, em laboratório, sobre a parte superior dos cilindros contendo amostras de solos foi fixado, com fita impermeável, um outro cilindro (vazio), de mesmo diâmetro e altura de 2 cm. Em seguida, o conjunto foi parcialmente emergido em uma bandeja contendo água, permitindo que o solo atingisse seu ponto de saturação por capilaridade.

Após esse procedimento, as amostras foram transferidas para o suporte do permeâmetro, contendo um fluxo d'água constante, que percola através do solo, semelhante ao observado na figura 20. O volume de água percolada foi coletado em provetas posicionadas logo abaixo das amostras, sendo realizadas leituras a cada 1 hora, durante 8 horas contínuas.

Figura 20 - Modelo esquemático do modelo de permeâmetro com carga constante



Fonte: Marques et al. (2008).

O valor de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtido através da quantidade de água percolada no solo em uma unidade de área e de tempo conhecido, conforme a Equação 3:

$$K_{sat} = \left(\frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \right) \quad (3)$$

Onde K_{sat} = condutividade hidráulica, em cm/h; Q = volume de água percolada, em ml; L = altura do bloco do solo, em cm; A = área do cilindro de amostragem, em cm²; H = altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm; t = tempo, em horas.

Para a categorização dos resultados obtidos adotou-se a classificação proposta por Beutler et al. (2001), adaptado de Soil Survey Staff (1993) (Tabela 5).

Tabela 5 - Classes de permeabilidade do solo

Permeabilidade (mm h ⁻¹)	Classe
> 254	Rápida
254 – 127	Moderada rápida
127 - 63,5	Moderada
63,5 – 20	Lenta a moderada
20 – 5	Lenta
< 5	Muito lenta

Fonte: Beutler et al. (2001), adaptado de Soil Survey Staff (1978).

3.4.2. Análises físicas

Com o propósito de obter dados que indicassem as condições físicas dos solos, foram analisados os parâmetros de granulometria; argila dispersa em água (ADA); grau de floculação (GF); estabilidade de agregados, expressa pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPa); microporosidade (Mi); macroporosidade (Ma); porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds) – equivalente a densidade global ou aparente. Em consonância ao parâmetro hídrico, para todos os experimentos laboratoriais ditos como físicos, seguiram-se as metodologias analíticas descritas no Manual de Método de Análise de Solos (Embrapa, 2017), com exceção da porosidade do solo, em que se adotou uma versão anterior do mesmo manual técnico (Embrapa, 1997).

3.4.2.1. Granulometria

A análise granulométrica foi obtida através da quantificação das partículas minerais de tamanho areia, silte e argila, o que permitiu compreender o comportamento textural dos solos, bem como classificá-los. Este ensaio foi realizado tanto com as amostras coletadas nas trincheiras, referentes aos horizontes pedológicos descritos em campo, quanto para as amostragens referentes às sondagens realizadas a trado, obtidas durante os levantamentos dos solos. A partir desse último, os resultados ainda permitiram a confecção de perfis com curvas de isovalores, como descrito no subitem 3.2.4. desta pesquisa.

Conforme descrito por Embrapa (2017), para a preparação das amostras, em um béquer de 250 ml foram pesados 20 g de TFSA (terra fina seca ao ar) e adicionados 40 ml da solução dispersante (hidróxido de sódio - NaOH 1mol L⁻¹), utilizada para a desagregação e a individualização das partículas minerais. Em seguida, o volume do béquer foi completado até

100 ml com água destilada, homogeneizado com um bastão de vidro e destinado ao descanso por uma noite.

Após o descanso de aproximadamente 16 horas, a amostra foi transferida para o copo metálico de um agitador mecânico tipo “*stirrer*”, acrescentado cerca de 300 ml de água destilada e agitado por 10 minutos. Posterior a agitação mecânica, com o auxílio de uma peneira com malha de 53 μm , acoplada a um funil e uma proveta graduada de 1.000 ml, foi realizada a lavagem da amostra com o auxílio de uma pisseta contendo água destilada. O material retido na peneira (areia) foi transferido para um béquer de 250 ml previamente tarado, levado para estufa à 105 °C por 24 horas, e pesado após esfriar no dessecador. A proveta que continha o material passante, silte e argila, teve seu volume completado até 1.000 ml com água destilada.

De modo que a solução utilizada em cada amostra fosse computada e subtraída no cálculo final (fator de correção), uma prova em branco foi preparada, utilizando o mesmo volume de água destilada e a mesma quantidade de solução dispersante empregada nas amostras que continham solo. Em seguida, foi realizada a medição da temperatura da amostra para determinação dos intervalos de tempo de pipetagem das frações silte e argila, de acordo com a lei de Stokes, que determina o tempo de sedimentação das partículas sólidas em meio a um fluido viscoso.

Após a preparação das amostras e os tempos de pipetagem pré-estabelecidos, com o auxílio de um bastão, as amostras foram agitadas manualmente durante 1 minuto. Posteriormente, seguindo os intervalos de tempo previamente estabelecidos, foi coletada as frações silte+argila, pipetando uma alíquota de 20 ml do sobrenadante a uma profundidade 10 cm, seguido da coleta de outra alíquota de mesmo volume, coletada a 5 cm, correspondente apenas à argila.

As alíquotas foram transferidas para um béquer de 50 ml de peso conhecido e levadas para a estufa a uma temperatura de 105 °C por 24 horas. Posteriormente, os béqueres com os pipetados secos foram pesados em balança analítica após esfriarem no dessecador.

A determinação granulométrica foi obtida por gravimetria, conforme as equações 4.

$$\text{Teor de argila} = (\text{Argila (g)} - \text{dispersante (g)}) \times 500 \quad (4.1)$$

$$\text{Teor de silte} = 500 - (\text{Argila (g)} + \text{Areia}) \quad (4.2)$$

$$\text{Teor de areia} = \text{Areia (g)} \times 5 \quad (4.3)$$

Utilizando um jogo de peneiras, a areia ainda foi classificada em cinco categorias, que incluem: areia muito fina (0,053 — 0,125 mm), fina (0,125 — 0,250 mm), média (0,250 — 0,500 mm), grossa (0,500 — 1,00 mm) e muito grossa (1,00 — 2,00 mm).

3.4.2.2. Argila dispersa em água e grau de floculação

A argila dispersa em água (ADA) e o grau de floculação (GF) são frequentemente utilizados como indicadores da qualidade física do solo, uma vez que apontam seu nível de estabilidade estrutural e resistência a erosão hídrica (Lima et al., 1990).

Para sua determinação seguiu-se os mesmos procedimentos adotados para a obtenção das frações granulométricas, como descrito pela Embrapa (2017). Contudo, os valores de areia e silte não foram considerados, tampouco foi utilizado o dispersante químico, uma vez que este parâmetro possui como desígnio a obtenção da argila naturalmente dispersa em água, descartando a utilização de dispersante químico.

O grau de floculação da argila foi obtido através da equação 5:

$$GF = \left(\frac{a-b}{a} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Onde GF = Grau de floculação, em %; o teor de argila com dispersão total, em %; b= teor de argila naturalmente dispersa em água, em g.

3.4.2.3. Microporosidade, macroporosidade e porosidade total

A porosidade corresponde aos vazios existentes entre e dentro dos agregados do solo, locais estes passíveis de serem preenchidos por água ou ar (Lepsch, 2011). Esse é, portanto, um importante parâmetro a ser analisado para compreender o estado físico-hídrico dos solos, uma vez que é responsável pela condução ou retenção da água (Brady; Weil, 2013).

A partir do método da mesa de tensão, exposto pela Embrapa (1997), foi possível obter a microporosidade (Mi), a macroporosidade (Ma) e, a partir da combinação destas, a porosidade total (Pt). Assim como na condutividade hidráulica saturada e para a densidade do solo, esses parâmetros foram analisados em quaduplicadas, sendo o resultado a média aritmética dos valores obtidos em cada ponto amostral.

Após serem coletadas, em laboratório, os anéis volumétricos com solo foram submetidos à saturação por água e posteriormente pesados, obtendo-se o peso da amostra saturada (a). Posteriormente, foram transferidos para a mesa, e submetidos a uma tensão conhecida de 0,006 Mpa (60 cm), fazendo com que água contida nos poros do solo, especificamente dos seus macroporos, fosse drenada por meio da sucção provocada pelo vácuo da mesa.

Após 24 horas do início do ensaio, ou até cessar a drenagem, foi verificado se não houve a quebra da coluna de água, caso não, as amostras foram colocadas em vasilhas metálicas de peso conhecido, obtendo-se o peso pós-tensão (b).

O cálculo da macroporosidade foi obtida por gravimetria, a partir da subtração do peso da amostra saturada e pós tensão, dividindo pelo volume do cilindro, conforme a equação 6:

$$Ma = \left(\frac{a-b}{d} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde, Ma= macroporosidade, em %; a= peso da amostra saturada, em g; b= peso da amostra após ser submetida à tensão, em g; d= volume do cilindro de amostragem, em cm³.

Para a obtenção da microporosidade, após passarem pela tensão conhecida as amostras foram levadas à estufa por 24 horas em uma temperatura de 105 °C, e pesadas após esfriarem em dessecadores, obtendo-se o peso da amostra seca (c), conforme a equação 7.

$$Mi = \left(\frac{b-c}{d} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde, Mi%= microporosidade, em %; b= peso da amostra após ser submetida à tensão, em g; c= peso da amostra seca à 105°C, em g; d= volume do cilindro de amostragem, em cm³.

Logo, a porosidade total foi determinada a partir da somatória dos valores de microporosidade e de macroporosidade, conforme a equação 8:

$$Pt = Ma + Mi \quad (8)$$

Onde, Pt= Porosidade total, em %; Ma= Macroporosidade, em %; Mi= Microporosidade, em %.

3.4.2.4. Densidade do solo

A densidade do solo (D_s), também nomeada como densidade aparente ou global, é um importante indicador da qualidade física da cobertura pedológica, uma vez que revela informações relevantes do seu grau de compactação (Soane; Ouwerkerk, 1994; Brady; Weil, 2013). Nesse sentido, quanto maior a massa sólida do solo em um determinado volume, maior será a sua densidade (Reichardt, 1978).

Para a sua determinação, seguiu-se a metodologia analítica descrita pela Embrapa (2017), através da utilização das mesmas amostras processadas nos ensaios de porosidade (microporosidade, macroporosidade e porosidade total) e condutividade hidráulica saturada. Entretanto, para o cômputo foi considerado apenas o peso da amostra seca (c) em estufa a uma temperatura de 105 °C por 24 horas e o volume do cilindro, conforme a equação 9:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (9)$$

Onde D_s = Densidade do solo, em g.cm³; M_s = massa de solo seco, em g; V = volume do anel de amostragem, em cm³.

3.4.2.5. Estabilidade de agregados via seca

A estabilidade de agregados, representada pelo diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPa), desempenha um papel fundamental como indicador dos processos envolvidos na degradação do solo. Tal relevância emerge do fato que os agregados são responsáveis pela estruturação do solo, ao qual está sujeita a intensas intervenções e variações em áreas agricultáveis (Tippkötter et al., 1994).

Assim, conforme estabelecido pela Embrapa (2017), esse parâmetro foi determinado através da execução de cinco repetições para cada horizonte de solo.

As amostras de solo coletadas em forma de monólito foram destorroadas à mão e passadas por uma peneira com malha de 8 mm. Posteriormente, foram pesadas 100 g do material passado pela peneira e seguiram para o agitador mecânico vibratório contendo sequencialmente um conjunto de peneiras de 20 cm de diâmetro e malha de 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,25 mm. As amostras foram submetidas a 10 minutos de agitação com uma frequência de 9 Hz (hertz).

Seguidamente, os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para vasilhas metálicas numeradas e de peso conhecido, e levados à estufa a uma temperatura de 105 °C, durante 12 horas. Na sequência, as vasilhas contendo os agregados secos foram pesadas em balança analítica após esfriarem em dessecadores.

O cálculo do diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPA) foi determinado pela equação sugerida por Youker e McGuinness (1956) (10).

$$\text{DMPA} = \Sigma(\text{Cmm} \times \text{P}) \quad (10)$$

Onde Cmm é o centro das classes de tamanho dos agregados, em mm; P = é a proporção do peso de cada fração de agregados em relação ao peso da amostra, em g.

3.4.3. Análises Químicas

Embora também aponte o comportamento dos constituintes químicos ao longo da vertente, o principal propósito das análises químicas foi a classificação dos solos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório da Sociedade Rural de Maringá, que seguiram como embasamento metodológico o Manual de Métodos de Análise do Solo, organizado pela Embrapa (2017).

Foram determinados os teores de Cálcio (Ca^{+2}), Magnésio (Mg^{+2}), Potássio (K^{+}), Fósforo (P), Hidrogênio (H^{+}), Alumínio (Al^{+3}), Carbono (C), Matéria Orgânica (M.O) e pH em Cloreto de Cálcio (CaCl_2), em água (H_2O) e em solução tampão SMP.

Em seguida, os resultados serviram para o cálculo da Soma de Base (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) efetiva e em pH 7,0, Saturação de Bases (V%) e a Atividade da Fração Argila (valor T).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. HISTÓRICO DO USO DA TERRA E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS NA ÁREA DE RECARGA DA NASCENTE ÁGUA DA FONTE

Em consonância aos principais usos da terra que foram introduzidos no espaço agrícola ao longo da ocupação e do desenvolvimento econômico do Noroeste paranaense, influenciados, em parte, pelas características dos solos, interferências políticas e demandas de mercado, como já elencado detalhadamente, a área de estudo seguiu o mesmo ritmo e foi cenário de diversas mudanças de usos da terra. Contudo, nem sempre essas conversões se deram por influência dos fatores supracitados, pois, algumas, relativamente recentes, ocorreram por consequência de problemas ambientais na propriedade, especificamente devido ao desenvolvimento de processos erosivos.

Nesse contexto, a partir de uma reconstituição histórica, que se baseou em dados secundários (MapBiomas e imagens orbitais) e nas informações fornecidas pelos proprietários da área, foi possível constatar que apesar da intensificação da erradicação dos cafezais na década de 1970, o café ainda era predominante na propriedade⁸ até 1980, seguindo a mesma estrutura dos lotes rurais planejados pela empresa colonizadora que atuou no Norte e Noroeste paranaense (CMNP). Nesse modelo de ocupação, a lavoura de café se estende do topo até a parte média da vertente, enquanto no terço inferior concentravam-se as construções para a permanência da família na propriedade (Figura 21 - A).

A lavoura de café apresentou significativa redução de sua extensão e, no ano de 1985, mesmo que ainda recobrisse parte da área de drenagem da nascente, esta já não era mais predominante, pois cedeu espaço para a pastagem plantada. A partir desse ano, já não se sabe se a área construída, aquela estabelecida no terço médio da vertente, ainda permaneceu com a remoção dos cafezais (Figura 21 - B).

Segundo relato dos proprietários, a pastagem se estendeu até 2007, ano em que a propriedade foi predominantemente ocupada com a cultura da cana-de-açúcar (Figura 21 - C). Nesse contexto, é oportuno destacar que a espacialização da nova cultura inserida na área está representada por uma imagem que data um ano posterior à mudança de uso da terra, uma vez que as imagens do Google Earth estão disponíveis a partir de 2008 para o local.

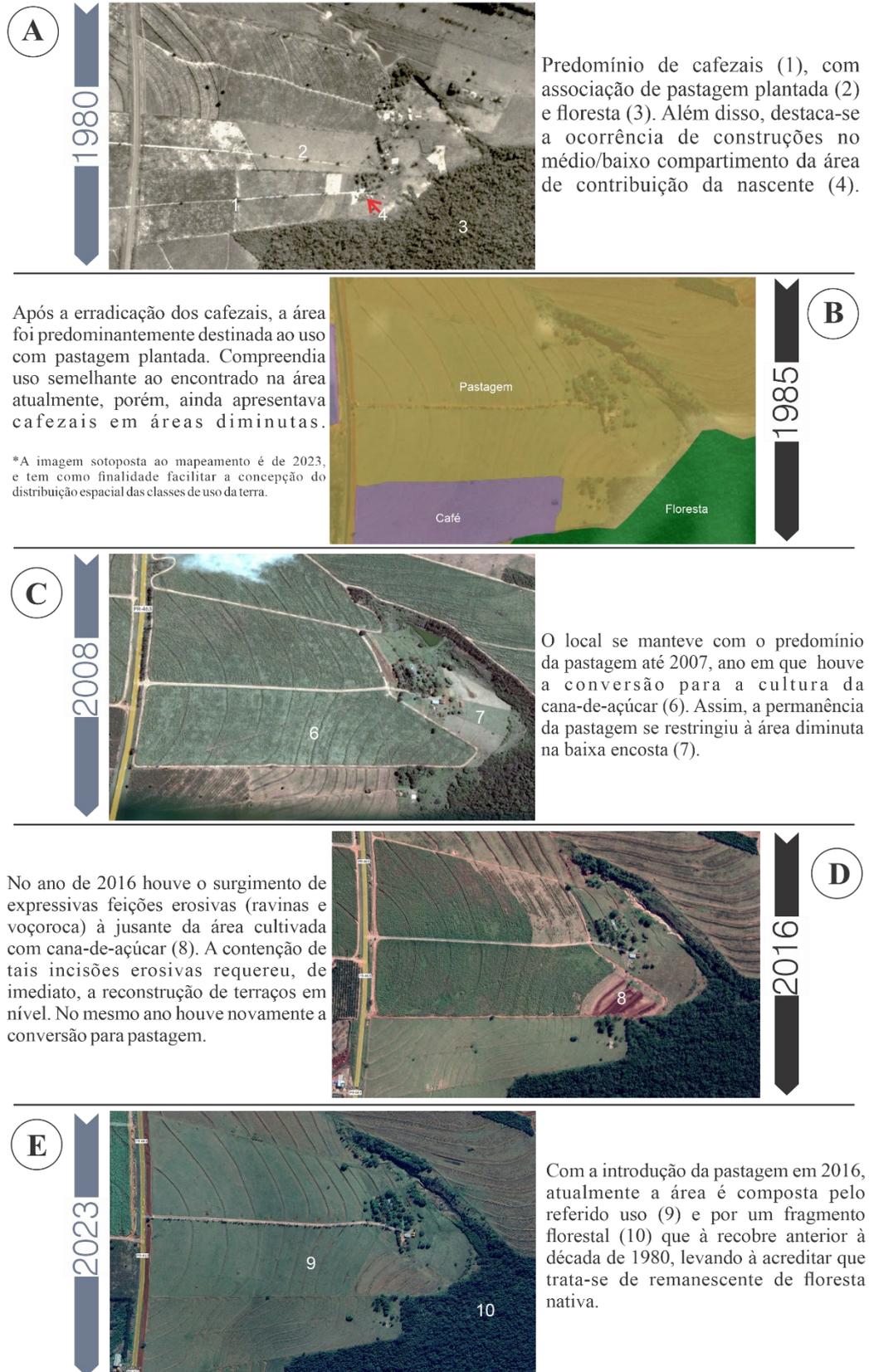
⁸ A área de abastecimento da nascente Água da Fonte está sob domínio de uma única propriedade rural.

Esse período, a primeira década do século XXI, coincide com a expansão da atividade açucareira no Noroeste paranaense, estimulada por programas governamentais que incentivavam a implantação da cultura da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, a instalação de usinas de processamento da matéria-prima, objetivando a produção de açúcar e álcool, como destacado por Serra (2010), já elencado.

A cultura da cana-de-açúcar perdurou por cerca de onze anos, até que, em 2016, houve o desenvolvimento de um número significativo de incisões erosivas na propriedade, tais como ravinas e voçoroca. Devido a isso, surgiu a necessidade de pôr em prática um plano de contenção das feições erosivas e que, de certo modo, também teve caráter preventivo para a ocorrência de novas incisões.

Assim, dentre várias atividades, o plano de controle teve como procedimento inicial a mudança de uso da terra na propriedade, retomando o cultivo de pastagem. Optou-se pela gramínea por manter a superfície do solo coberta por mais tempo (Figura 21 - E).

Figura 21 – Uso da terra na área de abastecimento da nascente Água da Fonte nos anos de 1980, 1985, 2008, 2016 e 2023



Org: O autor (2024).

A resolução temporal das imagens disponibilizadas pelo Google Earth não permitiu demonstrar a espacialização e a morfologia das formas erosivas (ravinas e voçoroca) desenvolvidos na média vertente em 2016, considerando que o fechamento das feições erosivas foi executado em um curto período, sendo este mais uma etapa do plano de controle.

Segundo relatos dos proprietários, o local da degradação corresponde ao ponto 8, na figura 21 – D. Neste local, a voçoroca não se ateve a um direcionamento único, perpendicular à linha de fluxo hídrico da vertente, apresentando algumas ramificações que envolveram, não somente o centro da área de contribuição da nascente, mas também sua margem esquerda, considerando uma observação jusante-montante.

Essa dedução corrobora com o destacado por Beckauser (2020), ao analisar a dinâmica evolutiva de uma voçoroca em Sumaré, distrito do município de Paranavaí, no Noroeste do Paraná. A autora constatou que, devido às características físicas do Argissolo Vermelho que ocorre na média vertente, houve maior resistência a incisão vertical da erosão, ocasionando na sua ramificação. Já no sopé da vertente, em área de ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, a evolução da voçoroca ocorre em profundidade, onde se observa a exposição da rocha no talvegue da voçoroca e o afloramento de um fluxo de água constante.

O uso com pastagem permanece até os dias atuais na propriedade, com exceção da baixa encosta, que permanece recoberta por um fragmento de floresta nativa (Floresta Estacional Semidecidual), vinculado à Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Duas Fontes (Figura 21 - E).

4.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOMORFOLÓGICAS

Além dos possíveis efeitos do uso da terra sobre as propriedades físicas dos solos (variável dependente), que se reverbera direta e negativamente em seu funcionamento hidrológico e, conseqüentemente, subsidiam o surgimento de formas erosivas, é preciso compreender a participação da topografia como um agente regulador do funcionamento hidrológico e da degradação dos solos. Isso se justifica pelo fato de que o relevo controla os mecanismos de transporte de sedimento e nutrientes na paisagem. Dessa maneira, a análise de modelos hidrológicos, considerando o controle da topografia sobre a movimentação da água, se torna necessário para a previsão das características de fluxos (Moore; Grayson; Ladson, 1991). Os fluxos superficiais e subsuperficiais controlam a variabilidade espacial da degradação dos solos por processos erosivos, transporte de elementos químicos (Moore; Gordon, 1986), bem como o equilíbrio entre a pedogênese/morfogênese (Wilson; Gallant, 2000). Nesse

contexto, Siefert e Santos (2012) destacam que “o índice topográfico surge como o indicador de base física mais difundido para delimitação das áreas saturadas e áreas hidrologicamente sensíveis”.

A análise topográfica parte de atributos primários e secundários (ou compostos). O primário é calculado diretamente a partir do modelo de elevação do terreno, como inclinação (declividade), morfologia, orientação da vertente, entre outros. Já os secundários são calculados a partir da combinação de vários atributos primários e servem como indicativo da variabilidade espacial de atividades particulares que ocorrem na paisagem, como o conteúdo de água no solo (Moore; Grayson; Ladson, 1991).

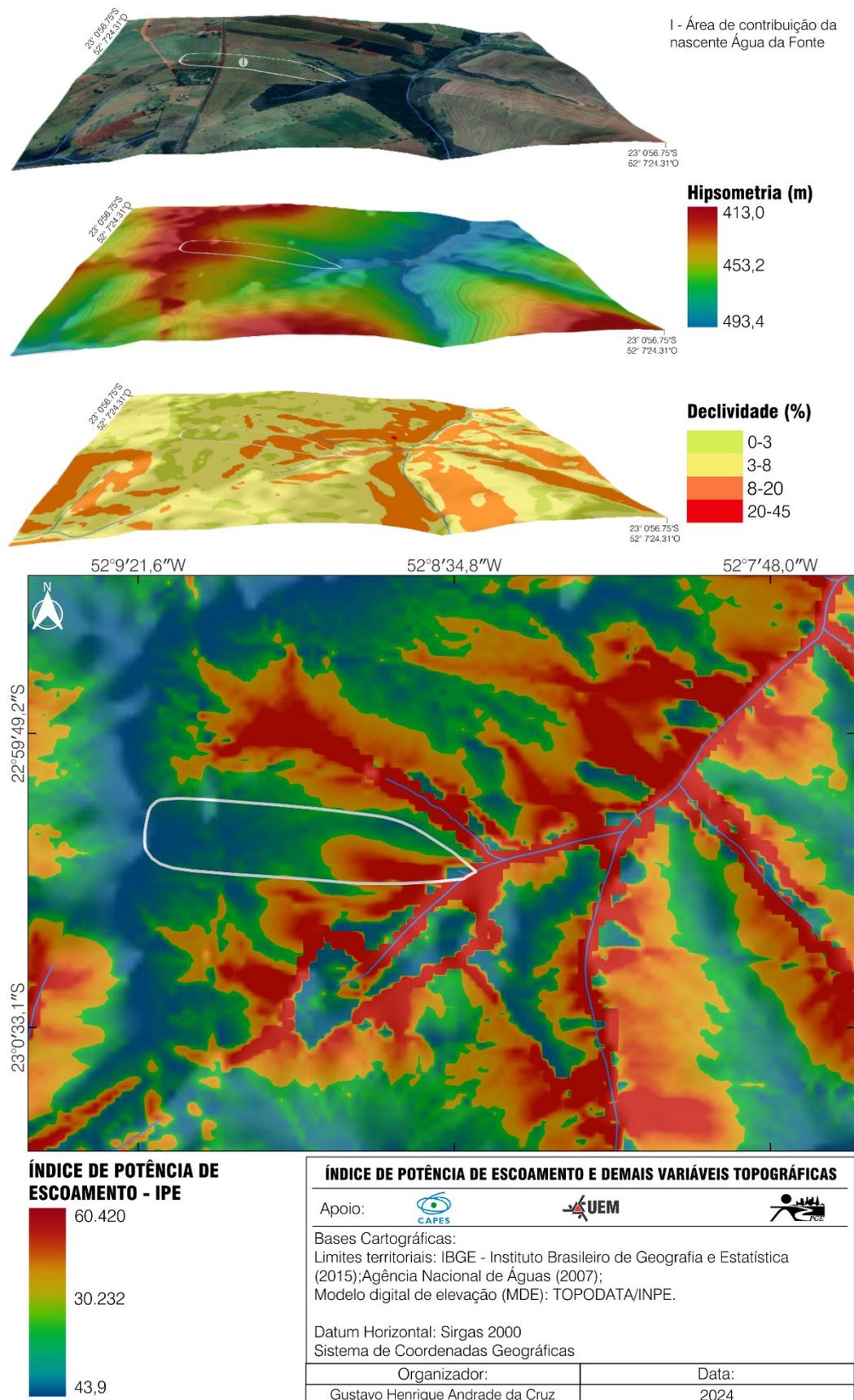
Um dos atributos secundários é o Índice de Potência de Escoamento (IPE), do inglês *Stream Power Index – SPI*, que discretiza as áreas com maior potencial de concentração de água superficial (Capoane, 2015).

Na figura 22, é possível observar o IPE no perímetro da área de contribuição da nascente analisada e em seu entorno. As tonalidades que variam entre vermelho e laranja, representam os locais de maior potência de escoamento e, conseqüentemente, a concentração do escoamento hídrico superficial. Nota-se que, no âmbito da área de drenagem da nascente Água da Fonte, a zona com menor potencial de escoamento hídrico ($>30,0$) ocorre no topo da bacia, em área com predomínio de declividade menos acentuada ($<8\%$).

Por outro lado, a máxima taxa do potencial ($> 40,0$) ocorre na média/baixa vertente, entre o centro e a margem esquerda da bacia, coincidindo com a área que desenvolveu alta densidade de processos erosivos em 2016 (Figura 22).

Esses resultados corroboram com os encontrados por Capoane (2015), ao determinar o IPE para o município de Palmitinho, no Rio Grande do Sul. A autora constatou que os maiores índices de escoamento superficial ocorrem em áreas íngremes, alinhadas ao entalhe dos canais de drenagem.

Figura 22 - Índice de Potência de Escoamento (IPE) da área de drenagem da nascente Água da Fonte e seu entrono



Org: O autor (2024).

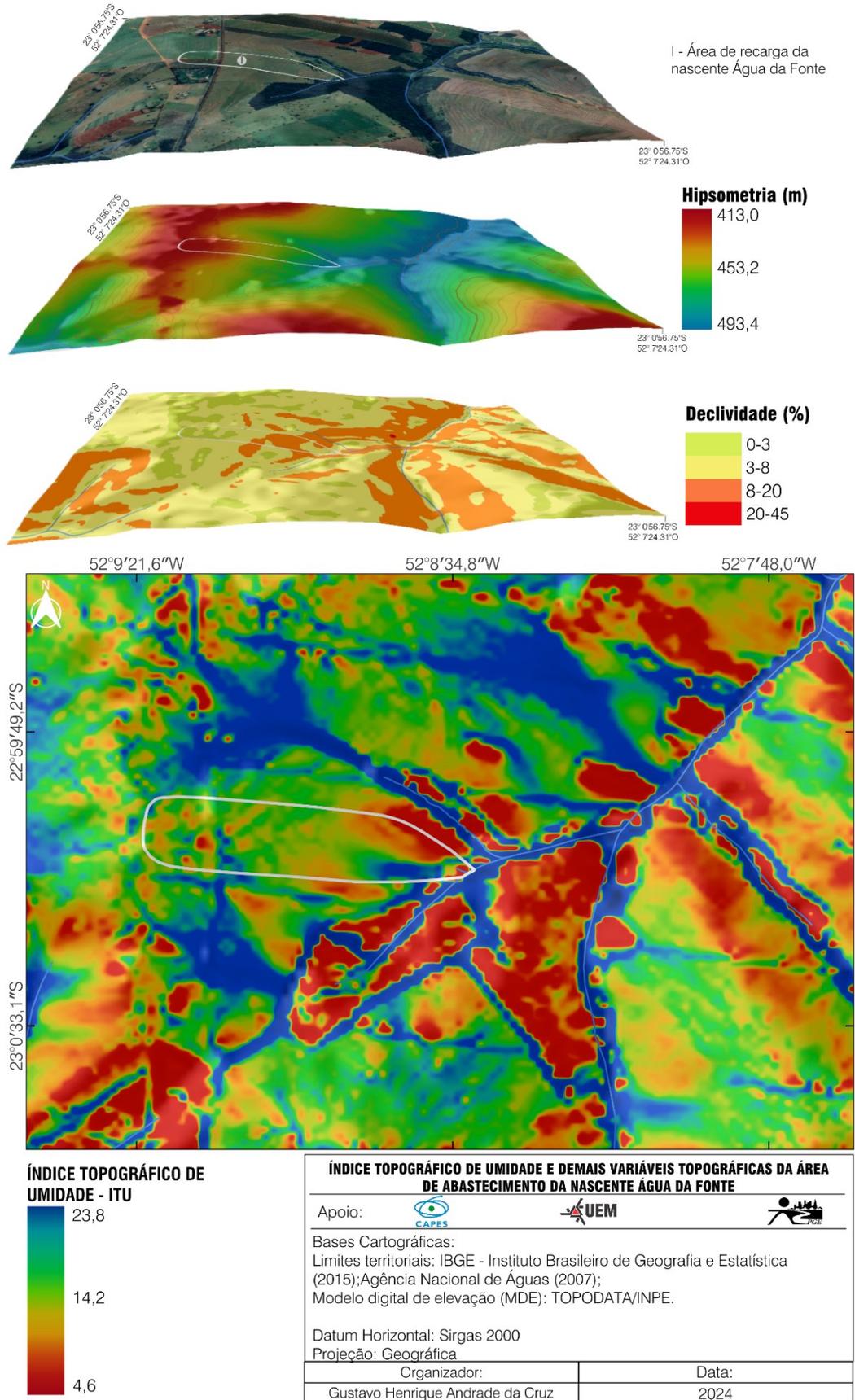
Outro atributo topográfico importante a ser analisado é o Índice Topográfico de Umidade (ITU), do inglês *Topographic Wetness Index* (TWI). Este é considerado um poderoso atributo topográfico para uma série de aplicações relativas à vegetação, propriedade dos solos, iniciação de deslizamentos e hidrologia em encostas (Gruber; Peckham, 2009).

Sirtoli et al. (2008b, p. 68) destacam que “o índice de umidade, porém, depende do plano de curvatura. O plano de curvatura é responsável pela medida de convergência e/ou divergência e, ainda, pelo acúmulo de água no solo”. Nesse contexto, Sirtoli et al. (2008a), ao analisarem os atributos do relevo e suas relações com os solos em uma área de 303,4 ha, na bacia hidrográfica do rio Canguiri, constataram que os valores elevados de ITU estão associados a relevo plano, em área de várzea ou em áreas côncavas.

Na área de estudo, a faixa de oscilação de umidade variou entre 4,6 e 23,8. Contudo, os valores mais elevados (>20,0) ocorrem entre a média/baixa e baixa encosta, associado a um setor com topografia côncava e que, assim como a área em que se observou uma incrementação no IPE, coincide com os setores em que foram alocadas duas das três topossequências de solos analisadas nesta pesquisa (transecto A e C) e com o setor degradado da área de drenagem da nascente (Figura 23).

Dessa maneira, por meio de uma análise dos índices topográficos, é possível compreender que os fluxos hídricos, além de se direcionarem para o centro da área de drenagem da nascente, devido a sua forma côncava, tendem a apresentar energia potencial mais elevada. Nessas condições, o compartimento côncavo da vertente se manifesta como um setor de convergência entre os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, tornando-se mais propenso à erosão hídrica. A relação entre a confluência de fluxos hídricos com áreas côncavas também foi ressaltada por diversos autores (Avelar; Coelho Netto, 1992; Botelho; Silva, 2004; Castro, 2005; Filizola et al., 2011; Morais, 2012).

Figura 23 - Índice Topográfico de Umidade (ITU) da área de drenagem da nascente Água da Fonte e seu entrono



Org: O autor (2024).

Considerando que apresenta influência do comportamento hidrogeomorfológico, o poder erosivo nesta área hidrologicamente sensíveis, sofre influência da condicionante climatológica, que regula a entrada da água no sistema pedológico. Seu papel como agente intensificadora das ações erosivas se revela quando subsidiam excedentes hídricos, associados à frequência e distribuição irregular dos índices de precipitação. Como destacado por Montanher et al. (2023b), um episódio de excesso de água no sistema foi presenciado pelo Noroeste paranaense entre setembro de 2015 e fevereiro de 2016, onde o fenômeno El Niño causou chuvas volumosas na mesorregião.

Beckauser (2020), ao analisar uma série histórica de precipitação entre 1979 e 2018, no distrito de Sumaré (Paranavaí-PR), a cerca de 40 km da área de estudo, constatou que 2015 apresentou a maior média anual para o período analisado (2400 mm), enquanto 2016 se estabeleceu abaixo da média anual da série histórica, que foi de 1515,0 mm.

Contudo, para Montanher et al. (2023a), o parâmetro mais indicado para analisar os eventos extremos de chuva durante o episódio de El Niño, foi a precipitação acumulada em seis meses. Dessa maneira, ao analisarem uma série histórica de dados pluviométricos, entre 1981 e 2016, os autores constataram que, para o mesmo município (Paranavaí-PR), a precipitação acumulada entre setembro/2015 e fevereiro/2016 foi de 1573,7 mm, evidenciando chuvas com tempo de retorno > 40 anos.

Ao correlacionarem os efeitos das chuvas extremas durante o El Niño em 2015/2016 sob a dinâmica geossistêmica, Montanher et al. (2023b) apontam que o Noroeste do estado apresentou colapso em seus componentes geossistêmicos em novembro/2015, enquanto a crise enfrentada pela região Norte Central e Norte Pioneiro necessitou de meses consecutivos de chuvas e com precipitação diária extrema (janeiro/2016). Os autores atribuem esse comportamento à diferença de substrato geológico, cobertura superficial, bem como com as próprias características inerentes ao clima, que ocorrem nessas áreas.

Frente ao exposto, pode-se deduzir que as características hidrológicas, dependente da particularidade topográfica local, atrelado ao uso da terra e manejo agrícola e às altas concentrações pluviométricas ocorridas no período, sob efeito do fenômeno El Niño, foram os propulsores da degradação enfrentada pela área de drenagem da nascente Água da Fonte em 2016. Cabe, agora, analisar o papel da organização e do funcionamento da cobertura pedológica local e a sua vulnerabilidade à instalação desses processos erosivos.

4.3. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO A

A topossequência de solos principal, denominada como transecto A, foi posicionada no eixo central da área de abastecimento da nascente Água da Fonte, em paralelo à linha de fluxo hídrico superficial e subsuperficial, de maior declividade.

Em termos de características morfométricas e morfológicas, a topossequência apresenta 601 m de extensão e um desnível topográfico de 68 m, o que lhe confere uma média de declividade de 11,3%.

A topossequência de solos foi dividida em três setores, conforme apresentado na Figura 24. O setor I possui declividade média de 4,3% e morfologia convexa-planar, que se estende até a média vertente (setor II), onde se altera em côncava-plana e passa a apresentar declividade média de 10,4%. No sopé da vertente (setor III), a morfologia do terreno muda para côncava-convergente e passa a apresentar declividade média de 15,5%.

As variações clinográficas e morfológicas do terreno condicionam mudanças nos solos ao longo dos transectos, resultantes dos processos de transformação lateral. No entanto, o desenvolvimento de erosões em 2016 desencadeou modificações significativas na organização dos horizontes superficiais e subsuperficiais em algumas áreas da topossequência, particularmente na média vertente.

Dessa maneira, o setor I da topossequência, que compreende a sondagem 1 (S1) e a trincheira 1 (TRI), é composto por um Latossolo Vermelho, com a sequência vertical dos horizontes pedológicos Ap, AB e Bw (Figura 24).

Ao longo do curso descendente da vertente, as organizações verticais e laterais dos horizontes pedológicos tornam-se mais complexas a partir do setor II, dependentes de dois principais fatores:

- Em resposta ao aumento da declividade e a alteração da morfologia da vertente, iniciam-se os processos de transformações laterais, com o Latossolo Vermelho sendo sucedido por um Argissolo Vermelho, como resultado do processo de e-iluviação.

- A contenção das erosões desencadeadas em 2016 envolveu o aterramento das incisões e a reconstrução de terraços em níveis. Essas interferências tiveram impacto direto nas dessemelhanças da organização vertical e lateral dos horizontes pedológicos encontrados nos setores II e III, uma vez que essa condução demandou a remoção mecânica dos horizontes superficiais e parcialmente dos subsuperficiais, seguido pelo preenchimento por solo importado de outra localidade.

Através dos levantamentos realizados em campo e no laboratório, acreditava-se que o solo encontrado na área de aterro tratava-se de um horizonte Bw, exposto à superfície devido à remoção dos horizontes sobrepostos, uma vez que apresentam composição granulométrica semelhante a esse tipo de horizonte. Essa informação não se confirmou, pois o levantamento topográfico da topossequência não acusa mudanças significativas no modelado e declividade do terreno, que poderiam indicar que o horizonte Bw se encontra em superfície.

Diante dessa conjuntura, no setor II (S2 – S9), houve a necessidade de abertura de duas trincheiras, uma posicionada em ponto equivalente a S4 (TRII), onde foi descrito um Argissolo Vermelho com a sequência vertical dos horizontes Ap, E, Bt e Bw, seguido da TRIII, que apresenta um horizonte Bw sotoposto ao aterro (Figura 24).

No setor III (S10 – S13), correspondente à baixa encosta, também foram dispostas outras duas trincheiras, a TRIV e a TRV. Na TRIV foi descrito um Argissolo Vermelho, com a mesma sequência vertical de horizontes encontrada na TRII, o que sugere que tais horizontes eram interligados. Já na TRV, foi identificado um Neossolo Quartzarênico que segue a sequência vertical dos volumes pedológicos A e C, com contato lítico em 1,30 m de profundidade (Figura 24).

4.3.1. Caracterização macromorfológica

O horizonte Ap ocorre lateralmente por quase toda a extensão da topossequência, com exceção da área aterrada (S7 – S11), sendo sucedido por um horizonte A na base, na área de floresta, onde há a ausência do manejo agrícola, como observado na figura 24.

Morfologicamente, o horizonte (Ap) demonstra pouca variação nas suas características. Apresenta espessura média de 22 cm, cor marrom-avermelhado (2,5YR 3/4), estrutura com grau fraco a moderado e tamanhos que variam de pequeno a médio. Em relação ao tipo de estrutura, apresenta uma leve variação, com blocos angulares e agregados granulares no setor I (TRI), passando a grão simples no setor II (TRII). É marcado pelo aumento de espessura, com variação entre 23 e 26 cm de profundidade, na TRIV e TRV, respectivamente. Esse espessamento vem acompanhado pelo clareamento de cor (7,5YR 6/4) (Quadro 1).

No setor I, o horizonte superficial Ap transiciona verticalmente para o AB, que ocorre entre 27 e 56 cm de profundidade. Este horizonte pedológico subsuperficial apresenta características morfológicas semelhantes às do horizonte superficial Ap, porém o tipo de estrutura é alterado para blocos angulares e subangulares e a textura passa de areia franca para franco arenosa (Quadro 1).

Quadro 1 - Descrição macromorfológica dos horizontes pedológicos do transecto A

Horiz. / Prof. (cm)	Cor	¹Estrutura			²Textura	³Consistência				Transição	⁴Presença de Raízes	
		Grau	Tamanho	Tipo		Seco	Úmido	Molhado			Tamanho	Quantidade
TRI – Latossolo Vermelho												
Ap (0-27)	2,5YR 3/2 a 3/4	fr. a mod.	peq. a méd.	b. ang./gran.	ar. fran.	macia	m. fri.	lig. plást.	lig. peg.	plana gradual	m. fin.	abundante
AB (27-56)	2,5YR 4/6	fr. a mod.	peq. a méd.	b. ang./subang.	fran.-aren.	macia	m. fri.	lig. plást.	lig. peg.	plana gradual	m. fin.	poucas
Bw ₁ (56-126)	2,5YR 3/6	fr. a mod.	peq. a méd.	b. ang. e subang./gran.	fran.-aren.	solta a macia	m. fri.	lig. plást. a plast.	lig. peg.a peg.	plana difusa	m. fin.	poucas
Bw ₂ (126-215+)	2,5YR 4/6	fr.	peq.	b. ang./gran.	fran.-aren.	solta	m. fri.	lig. plást. a plast.	lig. peg.a peg.	x	ausente	
TRII – Argissolo Vermelho												
Ap (0-20)	2,5YR 3/4	fr.	peq. a méd.	gran. a g. simp.	ar. fran.	solta a macia	m. fri.	ñ plást.	ñ peg.	plana gradual	fin.	abundante
E (20-46)	2,5YR 4/4	fr.	peq. a méd.	b. subang./g. sim.	fran.-aren.	solta	m. fri.	ñ plást.	lig. peg.	plana gradual	fin.	poucas
Bt (46-92)	2,5YR 4/6	mod. a for.	méd. a gran.	b. ang. e subang.	fran.-arg.- aren.	macia	m. fri.	plást.	peg.	plana gradual	fin. e m. fin.	poucas
Bw ₁ (92-132)	2,5YR 4/8	fr. a mod.	peq.	b. ang. e subang./gran.	fran.-aren.	solta	m. fri.	lig. plást. a plást.	peg.	plana difusa	fin.	poucas
Bw ₂ (132-210+)	2,5YR 5/8	fr.	peq.	b. ang./g. sim.	fran.-aren.	solta	m. fri.	lig. plást. a plást.	peg.	x	fin.	poucas
TRIII – Aterro												
Aterro (0-60)	2,5YR 4/4 a 4/6	mod. a for.	méd. a gran.	b. ang. a subang.	fran.-aren.	solta a macia	m. fri.	lig. plást. a plást.	lig. peg.a peg.	plana gradual	m. fin.	muito poucas
Bw ₁ (60-119)	2,5YR 4/6 a 4/8	fr. a mod.	peq. a méd.	b. subang./gran.	fran.-aren.	solta	sol. a m. fri.	lig. plást. a plást.	lig. peg.a peg.	plana difusa	m. fin.	muito poucas
Bw ₂ (119-215+)	2,5YR 4/8	fr.	peq.	gran.	fran.-aren.	solta	sol.	lig. plást.	lig. peg.	x	ausente	
TRIV – Argissolo Vermelho												
A (0-23)	2,5YR 5/4	ausente mac./g. simp.			aren.	solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	ondulada gradual	fin., méd., e gros.	abundante
E ₁ (23-63)	5YR 6/4	ausente mac./g. simp.			aren.	Solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	plana gradual	fin. e méd.	abundante
E ₂ (63-135)	5YR 6/6	ausente mac./g. simp.			aren.	solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	plana clara	fin., méd., e gros.	abundante
Bt (135-200+)	2,5YR 4/6	mod.	méd.	b. ang. e subang.	fran.-arg.- aren.	solta	m. fri.	lig. plást. a plást.	lig. peg.a peg.	x	fin. e méd.	poucas
TRV – Neossolo Quartzarênico												
A (0-26)	7,5YR 6/2 a 6/4	ausente mac./g. simp.			aren.	solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	ondulada gradual	fin., méd., e gros.	abundante
C ₁ (26-80)	10YR 7/3	ausente g. simp.			aren.	solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	plana difusa	fin., méd., e gros.	abundante
C ₂ (80-130)	10YR 8/3	ausente g. simp.			aren.	solta	sol.	ñ plást.	ñ peg.	x	fin.	abundante

¹Estrutura: fr. – fraca, mod. – moderada, for. – forte, peq. – pequena, méd. – média, gran. – grande; b. – blocos, ang. – angulares, gran. – granular, subang. – subangulares, mac. – maciça; g. – grão, simp. – simples; ²Textura: ar. – areia, fran. – franca, aren. – arenosa, arg. – argilo; ³Consistência: lig. – ligeiramente, plást. – plástica, peg. – pegajosa; ⁴Presença de Raízes: m. – muito, f. – fina, méd – média, gros. – grossas.

Fonte: O autor (2024).

Entre os setores II e III, o aumento da declividade e a mudança na morfologia da vertente influenciam no desenvolvimento do processo de e-iluviação, formando um horizonte pedológico subsuperficial de perda de argila (E), em associação a outro de concentração em profundidade (Bt). Embora ocorram por quase a totalidade da topossequência analisada, com exceção do setor I, esses horizontes sofrem o rompimento de sua continuidade na área de aterro, especificamente entre a S7 e S9. O surgimento do processo de e-iluviação em associação com o aumento da declividade ao longo da vertente também foi observado por Zapparoli (2009), ao analisar uma topossequência no município de Florai, Paraná.

O horizonte eluvial (E) no topo do setor II apresenta características morfológicas distintas em relação ao descrito no sopé da vertente. No setor médio, esse horizonte surge sotoposto ao horizonte Ap, a 20 cm de profundidade, e possui espessura de 26 cm. Ainda que se trate de um horizonte eluvial, este é constituído por textura franco arenosa, cor marrom avermelhada (2,5YR 4/4), agregados com grau fraco, tamanho pequeno a médio, do tipo em blocos subangulares, passando a grão simples. Infere-se a esse comportamento dos agregados, a compactação por compressão mecânica promovida por máquinas agrícolas utilizadas no manejo da cana-de-açúcar entre 2007-2016 e, recentemente, pelo pisoteio animal.

No baixo setor da vertente (III), o horizonte E adquire um aumento de espessura considerável (total de 112 cm), chegando a 135 cm de profundidade. Outra característica relevante deste horizonte pedológico é a mudança de cor, que passa a ter uma tonalidade mais clara (5YR de 4/6 a 6/4), bem como a textura, que se torna arenosa e, em consonância a isso, a ausência de estrutura (Quadro 1). Essas mudanças podem estar associadas à intensificação dos fluxos hídricos na baixa vertente, que promovem a remoção e o transporte de material fino (lixiviação), sobretudo de argila, assim como o que foi observado por Santos, Cruz e Silveira (2023), ao analisarem uma topossequência de solos no município de Munhoz de Melo-PR.

Lateralmente, o horizonte E na base da vertente transaciona para um volume C (TRV), de cor marrom muito claro (10YR 7/3 a 8/3), textura arenosa e com a ausência de estrutura. Embora possuam características morfológicas semelhantes, a adoção de terminologias distintas se deu em resposta à classificação dos perfis de solo, fundamentada nos preceitos estabelecidos pela Embrapa (2018).

Assim, no ponto experimental em que foi disposta a TRV, o perfil descrito é constituído por horizontes de textura arenosa até 1,30 m de profundidade, onde passa a apresentar contato lítico, sendo classificado como um Neossolo Quartzarênico. Por outro lado, embora o solo descrito na TRIV também constitua um espesso pacote arenoso, referente aos horizontes A e E, sotoposto a estes forma-se um horizonte de acúmulo de argila, classificado como Bt, a partir de

1,35 m de profundidade. Dessa forma, por não atender aos critérios para classificá-lo como um Neossolo Quartzarênico, uma vez que não apresenta sequência de horizontes com textura arenosa que ultrapassem a espessura mínima de 1,50 m, este perfil foi classificado como contendo um Argissolo Vermelho.

Em profundidade, desde o topo até a baixa vertente, ocorre um horizonte Bw (que se mantém também na base do aterro). Entretanto, no início do setor II até a base da vertente, o horizonte Bw aparece sotoposto a um horizonte Bt. Por ser um horizonte que se forma em profundidade, o manejo do solo pouco interfere em sua caracterização macromorfológica. Logo, este horizonte (Bw) apresenta cor que varia entre vermelho a vermelho-escuro (2,5YR 3/6 a 5/8), agregados predominantemente de tamanho muito pequeno a pequeno, granulares, que se desfazem em grão simples (Quadro 1).

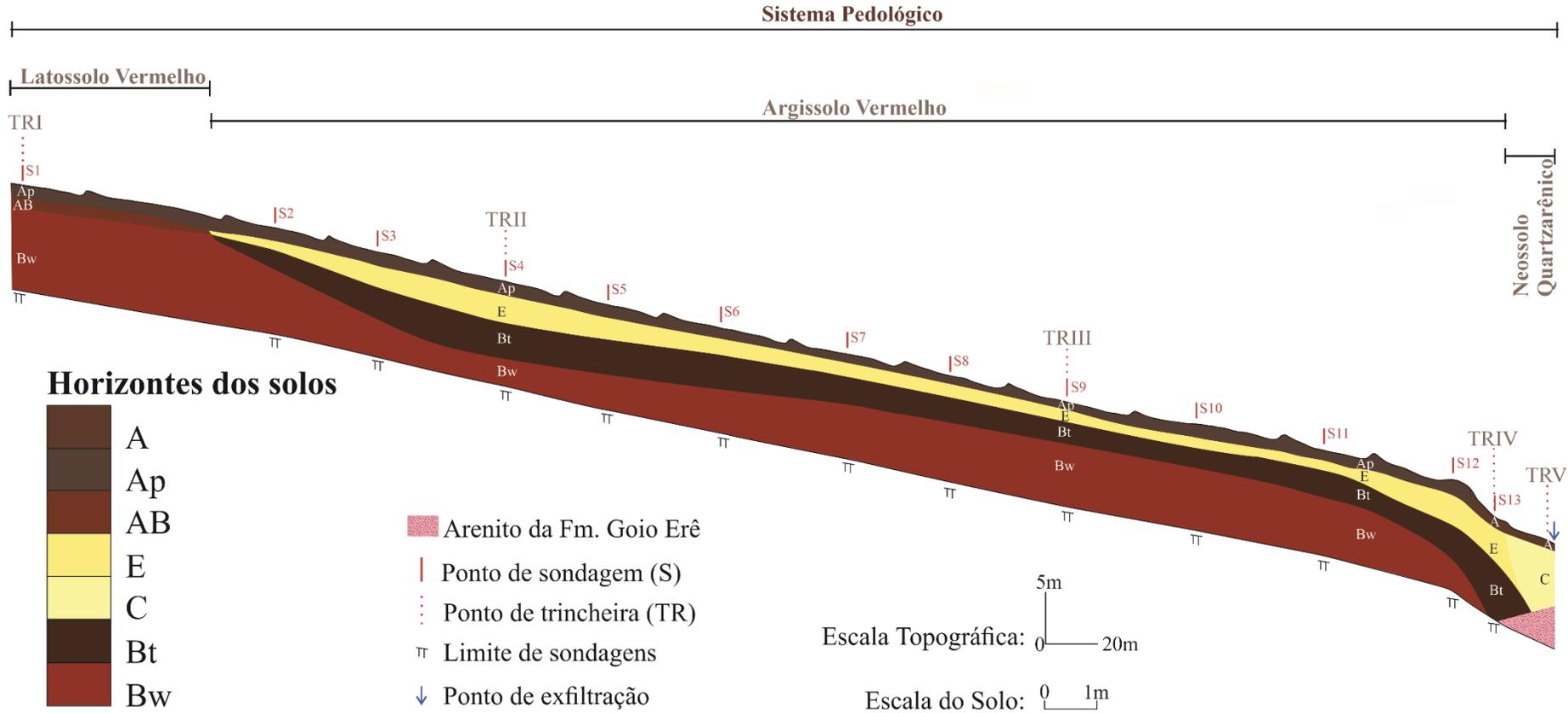
Quanto ao horizonte de acúmulo de argila (Bt), diagnóstico do Argissolo Vermelho, este exibe uma notável uniformidade morfológica ao longo do transecto. É caracterizado por apresentar cor vermelha (2,5YR 4/6), grau de estrutura que oscila entre moderada a forte, tamanho médio a grande, com agregados em formatos de blocos angulares e subangulares (Quadro 1).

Desse modo, apesar de se notar uma diferenciação morfológica significativa entre os horizontes E descritos no setor II (TRII) e no setor III (TRIV), as características do horizonte Bt nos perfis analisados permaneceram relativamente semelhantes, assim como o observado para o horizonte Bw, descritos na TRI, II e III.

Essa condição sugere que os Argissolos que recobrem a vertente eram contínuos, embora tenha sofrido uma desconexão lateral em virtude dos processos erosivos ocorridos em 2016. É possível deduzir, portanto, que antes do desenvolvimento das formas erosivas e a tomada do plano de sua contenção, a vertente apresentava um sistema pedológico composto por Latossolo-Argissolo-Neossolo Quartzarênico (Figura 25). Esse “sistema pedológico original”⁹, é comumente encontrado sobre formação arenítica na mesorregião Noroeste paranaense, e já foram constatados nas pesquisas desenvolvidas por Gasparetto (1999), Calegari (2000), Cunha (2002), Beckauser (2020), Santos e Oliveira (2020), entre outras.

⁹ Como já mencionado, os solos são sistemas dinâmicos, em contínua evolução (Ruellan, 1985). Com isso, cabe destacar que a utilização do termo “sistema pedológico original”, não faz alusão à organização lateral que recobria a vertente no princípio de sua gênese, mas sim, ao sistema anterior ao desenvolvimento da área degradada por erosão, ou seja, precedente à desconexão lateral.

Figura 25 - Reconstituição da cobertura pedológica do transecto A, anterior ao desenvolvimento da área degradada em 2016



Fonte: O autor (2024).

4.3.2. Granulometria, Argila Dispersa em Água e Grau de Flocculação

Em resposta ao seu material parental (arenitos da Fm. Goio Erê), todos os horizontes pedológicos analisados apresentaram em sua composição granulométrica a predominância da fração areia. Contudo, nota-se que o incremento do conteúdo de areia total (AT) estão fortemente associados aos horizontes superficiais (Ap e A), dos quais apresentam valores laterais que oscilam entre 841,6 e 953,2 g.Kg⁻¹, e aos subsuperficiais com características de iluviação (E e C), com variação entre 816,1 e 961,9 g.Kg⁻¹ (Figura 26 e Tabela 6).

Dessa forma, é possível constatar que ao longo da topossequência de solos, em cobertura latossólica e argissólica, as concentrações de AT estão estritamente correlacionadas ao horizonte superficial Ap. Na cobertura quartzarênica ocorre o inverso, o incremento de AT ocorre em profundidade, embora este também apresente um horizonte superficial (A) arenoso (Figura 26 e Tabela 6). Tais resultados corroboram com os encontrados por Marcatto (2020), Beckhauser (2020), Oliveira, Santos e Calegari (2020), que os associam à lixiviação lateral da fração argila em superfície e subsuperfície, e a intensificação desse processo à medida que se desloca para a base da vertente, passando a atingir também os horizontes subsuperficiais.

O fracionamento da AT acusou a predominância de areia fina (AF) em todos os horizontes pedológicos analisados, com um suave empobrecimento de seus valores no baixo setor da vertente (setor III) – nas TRIV e TRV, em conformidade com o aumento da areia média (AM). Esses resultados se explicam pelos fluxos hídricos que atuam na base da vertente, que além de ocasionarem na lixiviação da fração argila, também removem as frações minerais de tamanhos inferiores à areia média, como a areia fina e a areia muito fina (Figura 26 e Tabela 6).

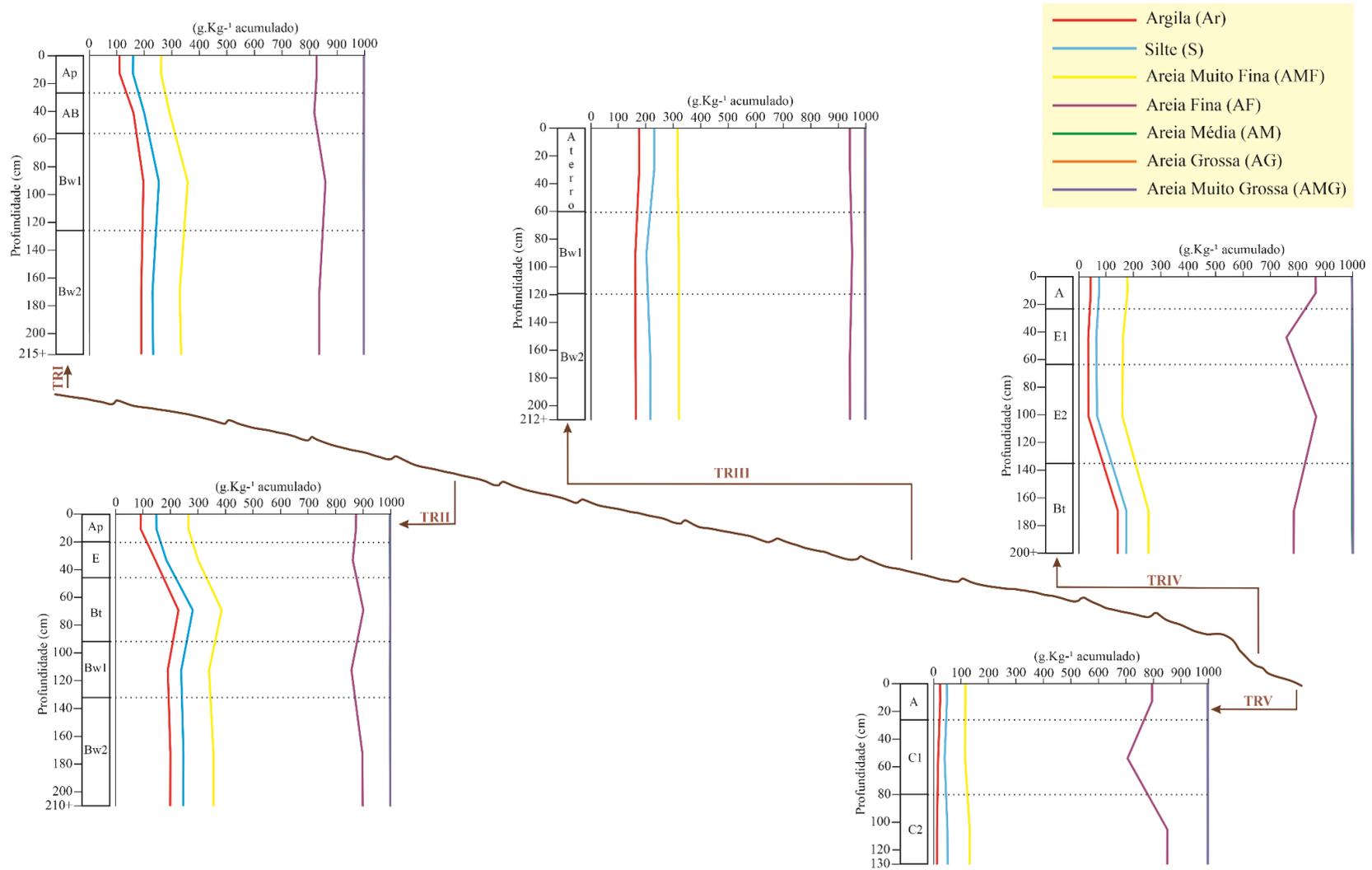
No que tange ao comportamento da argila, é possível notar que o incremento de seu teor está associado ao horizonte Bt, diagnóstico do Argissolo. No entanto, apesar de se tratar de um horizonte de acúmulo de argila, é perceptível que este horizonte apresenta a redução de concentração dessa fração granulométrica lateralmente, visto que no setor II (TRII), compartimento em que ocorre seu surgimento, o horizonte Bt apresenta em sua composição granulométrica 227,0 g.Kg⁻¹ de argila, passando a 140,1 g.Kg⁻¹ no setor III (TRIV) (Figura 26 e Tabela 6).

Assim como o observado nos horizontes superficiais (Ap e A) e subsuperficiais (E e C), o empobrecimento lateral do conteúdo de argila no horizonte Bt decorre de sua disposição ao longo da vertente, que se estende da média até a baixa encosta. A declividade crescente em direção ao sopé cria ambiente favorável a aceleração e concentração dos fluxos hídricos laterais

e, conseqüentemente, contribui para o processo de lixiviação das frações finas deste horizonte de acúmulo de argila (Bt), como o observado na TRIV.

Além da declividade, se deve destacar a influência do modelado do terreno nesse processo de perda/concentração de frações granulométricas lateralmente ao longo do transecto A, que levam às transformações pedogenéticas (Valeriano; Carvalho Júnior, 2003). Devido a topossequência ter sido disposta sentido a nascente, paralelamente ao eixo central da concavidade, englobando os setores II e III da vertente, de morfologia côncava, essa condição contribui para a intensificação dos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, que, conseqüentemente, coopera para as transformações laterais dos solos e, mutuamente, para a sua vulnerabilidade à ocorrência de feições erosivas.

Figura 26 - Variação vertical dos constituintes granulométricos dos perfis de solo ao longo do transecto A



Fonte: O autor (2024).

Verticalmente, a trincheira disposta sobre o Latossolo Vermelho (TRI) apresenta baixa variação entre os constituintes granulométricos, com teores de argila variando entre 109,5 e 199,2 g.Kg⁻¹, para o horizonte Ap e Bw₁, respectivamente. As classes fracionadas da areia total não apresentaram um gradiente uniforme, entretanto, nota-se uma modesta redução dos seus teores em profundidade (Tabela 6).

Tabela 6 - Granulometria, relação silte/argila, grau de dispersão e floculação dos horizontes pedológicos do transecto A

Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria (g.Kg ⁻¹)								S/A	AN (%)	
		AMF	AF	AM	AG	AMG	AT	S	A		ADA	GF
TRI – Latossolo Vermelho												
Ap	0-27	102,9	564,6	173,2	0,7	0,0	841,6	48,9	109,5	0,45	11,2	88,8
AB	27-56	92,6	525,2	182,6	1,5	0,0	801,8	37,9	160,2	0,24	19,5	80,5
Bw ₁	56-126	105,1	498,6	141,9	0,8	0,0	746,4	54,3	199,2	0,23	24,5	75,5
Bw ₂	126-215+	95,7	504,3	166,4	1,4	0,0	767,8	44,7	187,5	0,24	21,9	78,1
TRII – Argissolo Vermelho												
Ap	0-20	116,6	607,7	127,3	0,5	0,0	852,2	56,3	91,5	0,62	23,6	76,4
E	20-46	113,9	562,2	138,5	1,5	0,1	816,1	40,1	143,8	0,28	20,9	79,1
Bt	46-92	107,3	513,4	100,8	0,4	0,0	722,0	50,2	227,8	0,22	17,1	82,9
Bw ₁	92-132	100,2	517,5	143	0,9	0,0	761,6	48,0	190,4	0,25	26,6	73,4
Bw ₂	132-210+	108,3	539,1	104,4	0,5	0,0	752,4	49,1	198,5	0,25	6,5	93,5
TRIII - Aterro												
Aterro	0-60	86,0	632,1	51,5	0,3	0,8	770,7	54,8	174,5	0,31	0,7	99,3
Bw ₁	60-119	119,8	632,4	47,1	0,3	0,0	799,6	40,1	160,3	0,25	0,7	99,3
Bw ₂	119-212+	105,9	620,4	58,9	0,6	0,0	785,7	45,5	168,7	0,27	1,5	98,5
TRIV – Argissolo Vermelho												
Ap	0-23	102,5	686,1	135,3	2,5	0,0	926,4	31,2	42,4	0,74	21,5	78,5
E ₁	23-63	97,1	595,9	244,3	0,2	0,0	937,5	29,4	33,1	0,89	22,1	77,9
E ₂	63-135	91,5	704,9	137,4	0,3	0,0	934,1	27,0	38,9	0,69	27,8	72,2
Bt	135-200+	79,5	530,2	216,5	0,2	0,0	826,5	33,4	140,1	0,24	25,3	74,7
TRV – Neossolo Quartzarênico												
A	0-26	67,8	678,4	206,3	0,7	0,0	953,2	25,2	21,6	1,17	33,3	66,7
C ₁	26-80	74,3	590,6	297,0	0,0	0,0	961,9	24,7	13,4	1,84	56,7	43,3
C ₂	80-130	81,8	718,7	150,6	0,0	0,0	951,1	38,5	10,4	3,70	36,6	65,4

AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina, S = Silte; A = Argila; S/A – Relação silte/argila; AN – Argila Natural; ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de floculação.

Fonte: O autor (2024).

Ao contrário da TRI, na TR II, onde foi descrito um Argissolo Vermelho, o teor de argila, além de passar a ser mais expressivo, apresenta maior variabilidade vertical, oscilando entre 91,5 e 227,8 g.Kg⁻¹, para o horizonte Ap e Bt, respectivamente. Quanto às areias fracionadas, apresenta valores inexpressíveis para areia grossa (AG) e areia muito grossa (AMG), assim como também foi observado em todas as outras trincheiras (Tabela 6) e nas amostras coletadas a trado (Apêndice 1). É comum o baixo teor ou a ausência de AG e da AMG

nos solos derivados de formações areníticas no Norte e Noroeste do Paraná, como já evidenciado em várias outras pesquisas (Gasparetto, 1999; Zapparoli, 2009; Barbosa; Marcatto; Silveira, 2021).

Contudo, de forma geral, essa trincheira (II) apresentou verticalmente uma redução gradual dos teores das frações AMF, AF e AM. Já em relação ao silte, não se observou comportamento padrão (Tabela 6).

A área aterrada (TRIII) apresenta, verticalmente, valores homogêneos para a fração argila, variando entre 160,3 e 174,5 g.Kg⁻¹, para o Bw2 e o “volume pedológico” classificado como aterro, respectivamente (Tabela 6).

Na TRIV ocorre um contraste vertical nítido entre os horizontes pedológicos, com valores de argila que variam entre 33,1 e 140,1 5 g.Kg⁻¹, para o volume E₁ e Bt, respectivamente. Contudo, cabe destacar que, apesar do horizonte Bt apresentar um empobrecimento no conteúdo de argila lateral, o Argissolo nesse ponto da vertente apresenta uma relação textural de 3,7, que lhe confere caráter abrupto, conforme os preceitos estabelecidos pela Embrapa (2018). Além disso, sua classificação foi confirmada por sua estrutura, uma vez que exibe agregados de grau moderado, tamanho médio e do tipo blocos angulares e subangulares.

A redução vertical e lateral dos teores de argila indicam que o topo do horizonte Bt está passando por um processo de degradação e aprofundamento, contribuindo, gradativamente, para o espessamento vertical do horizonte E. O aumento da espessura do horizonte E em resposta à destruição e aprofundamento do Bt, corrobora com os resultados encontrados por Martins (2000).

Esse processo de transformação é evidenciado pelos resultados de granulometria do perfil, onde o horizonte E₂ apresenta maior conteúdo de argila se comparado ao E₁, mesmo que, teoricamente, os fluxos hídricos laterais estabelecidos no topo do Bt, em razão de ser menos permeável, poderiam contribuir para maior grau de lixiviação do E₂. No entanto, não é isso que se observa, uma vez que outro fato que demonstra a destruição do Bt foi a observação de bandas onduladas de textura franco-argilo-arenosa no interior do horizonte E₂, evidenciando o processo de transformação E/Bt.

Assim, os dados demonstram que os maiores teores de frações finas (argila) no horizonte E₂ se comparado ao volume pedológico justaposto (E₁) são explicados pela presença das bandas ondulada. A ocorrência dessas feições pedológicas em cobertura argissólica para Castro (1989) são resquícios do horizonte Bt que sofreu transformação pela perda do conteúdo

de argila. Essas lamelas também foram observadas por diversos outros estudos, como Cunha (1996), Oliveira (1997), Gasparetto (1999), Santos e Castro (2006) e Marcatto (2020).

Os teores de silte no ponto experimental TRIV mostrou-se homogêneo, variando entre 27,0 e 33,4 g.Kg⁻¹, para os horizontes E₂ e Bt, respectivamente. Já em relação à AT, esta apresenta distribuição uniforme para o pacote arenoso vertical (horizontes A, E₁ e E₂), com variação entre 934,1 e 926,4 g.Kg⁻¹, seguido de uma redução substancial em profundidade para 826,5 g.Kg⁻¹, associado ao horizonte Bt. No entanto, nas classes fracionadas de areia não se observou um padrão uniforme, à exceção da AMF, que apresentou um declínio gradativo de seus teores verticalmente (Tabela 6).

A trincheira disposta sobre cobertura quartzarênica, assim como já aludido, apresenta teores elevados de AT (> 950,0 g.Kg⁻¹) em todos os volumes pedológicos analisados, em detrimento dos valores de argila (< 22,0 g.Kg⁻¹). O silte também apresenta teores baixos, porém com um leve incremento em profundidade, chegando a 38,5 g.Kg⁻¹ no volume pedológico C₂.

Embora modesto, ocorre um incremento vertical da fração silte no volume C₂ no contato com o arenito da Formação Goio Erê sotoposto. Essa condição resulta em relação silte/argila de 3,70 (Tabela 6). Segundo Gasparetto (1999), esse comportamento se deve ao fato de que a rocha alterada fornece a renovação dessa fração granulométrica.

É oportuno destacar também que, diferente do que foi constatado no horizonte pedológico E₂ da cobertura argissólica na baixa encosta, o volume C₂ do Neossolo Quartzarênico, por não apresentar sequencialmente sotoposto um volume de concentração de argila, e devido à intensificação lateral dos fluxos hídricos no topo do substrato rochoso apresenta maior grau de lixiviação da fração argila se comparado ao C₁.

Em relação aos resultados analíticos das amostras coletadas no decorrer das sondagens realizadas a trado, sua representação em perfis de isovalores proporcionaram uma visualização integrada do comportamento das frações granulométricas areia total, silte e argila ao longo do transecto, representando espacialmente áreas de perda e concentração (Figura 27). Apesar dos perfis de isovalores de AT e argila não terem sido confeccionados com as mesmas classes de variação, considerando a amplitude total do teor de cada fração granulométrica, de modo geral, a análise comparativa entre estes revelam que são inversamente proporcionais, ou seja, em áreas com incremento de areia, observou-se a perda de material fino, e o oposto.

Assim, nota-se que no setor I (S1), compartimento recoberto por Latossolo Vermelho, os teores de argila são relativamente uniformes, vertical e lateralmente, com oscilação compreendida entre 125,0 a 175,0 g.Kg⁻¹. A homogeneidade textural dos Latossolos, segundo Calegari (2000), está relacionado a baixa declividade encontrada na alta vertente, que favorece

a infiltração vertical e, conseqüentemente, resulta na homogeneidade dos constituintes granulométricos, não ocorrendo perdas nem ganhos significativos.

Em contrapartida, à medida que se desloca para a baixa vertente, em área de predomínio do Argissolo, entre a S2 e S6, bem como S10 e S13, em função da mobilização da argila pelo desenvolvimento do processo de e-iluviação, a uniformidade vertical dos constituintes granulométricos é interrompida, e passam a apresentar uma faixa de variação maior do teor de argila, compreendida entre 25,0 e 250,0 g.Kg⁻¹ (Figura 27).

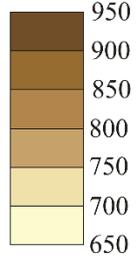
No entanto, ainda que a faixa entre a S7 e S9 também contemple o setor médio da encosta, que, em suma, o aumento da declividade e dos fluxos hídricos condicionariam maior mobilização da fração argila, assim como nas sondagens cujo comportamento granulométrico foi discutido no parágrafo anterior, não é isso que se verifica entre essas sondagens (S7 e S9), pois este ponto é marcado por uma faixa de baixa variação, oscilando entre 150,0 a 175,0 g.Kg⁻¹.

Todavia, esse ponto coincide com a área aterrada, e acredita-se que seja resultado da intensa mistura dos horizontes formados *in situ*, atrelado ao material transportado de outra localidade para o fechamento das incisões ocorridas em 2016. Estes fatores corroboraram para a homogeneidade vertical e lateral dos teores de argila e areia total (Figura 27).

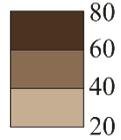
Figura 27 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto A

Teores de frações granulométricas (g.Kg⁻¹)

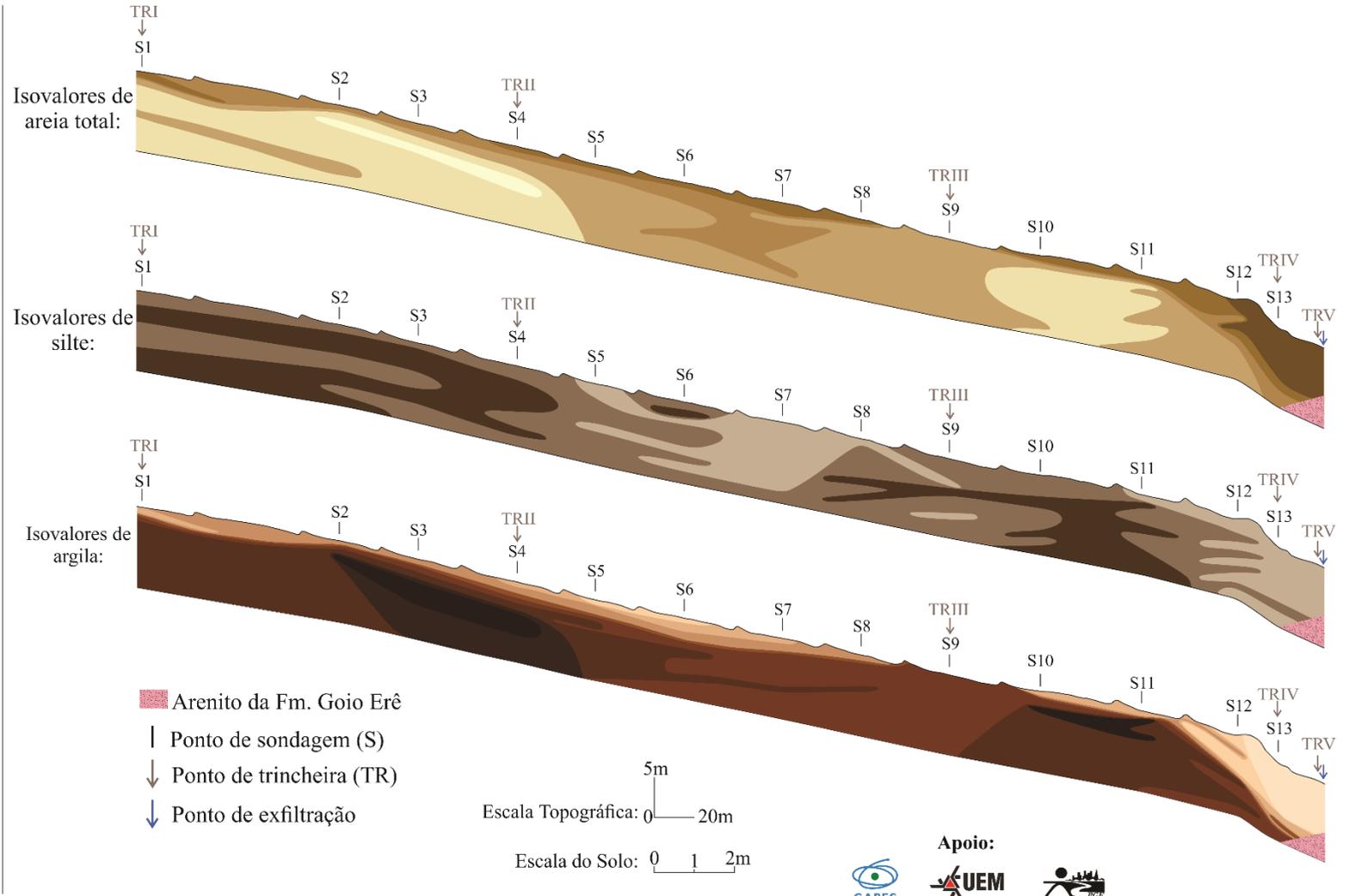
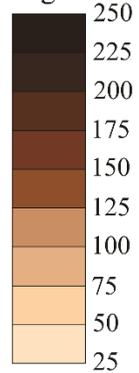
Areia Total:



Silte:



Argila:



Fonte: O autor (2024).

A partir da S12 se evidencia a formação de um pacote arenoso, em detrimento da redução dos teores de argila. A ocorrência dessa arenização está associada, principalmente, ao Neossolo Quartzarênico, mas também contempla os horizontes A e E do Argissolo Vermelho localizado na baixa vertente (Figura 27).

Dessa maneira, em cobertura quartzarênica, a faixa de variação vertical para a fração argila apresenta baixa oscilação, entre 25,0 e 50,0 g.Kg⁻¹. Contudo, em cobertura argissólica (S13), a formação de um horizonte de acúmulo de argila sotoposto ao horizonte arenoso E, resulta no aumento de amplitude dessa faixa de variação, que passa a oscilar entre 25,0 e 150,0 g.Kg⁻¹ (Figura 27).

A condição descrita indica que o Neossolo Quartzarênico está avançando sobre o Argissolo Vermelho, que vem sendo submetido à perda progressiva de argila, assim como evidenciado na análise dos perfis verticais. Contudo, ainda que a soma das espessuras dos horizontes arenosos (A e E) sobrepostos ao horizonte Bt apresente uma profundidade considerável (135 cm), de acordo com os critérios estabelecidos pela Embrapa (2018), este ainda não se caracteriza como um Neossolo Quartzarênico, pois ainda não é formado exclusivamente por horizontes de textura arenosa, até a profundidade de 150 cm.

A evolução regressiva do Neossolo Quartzarênico sobre o Argissolo Vermelho, em função da perda de material fino na baixa encosta, também foi constatado em diversas pesquisas desenvolvidas na mesorregião Noroeste do Paraná (Cunha, 1999; Calegari, 2000; Beckauser; Silveira, 2020; Oliveira; Santos; Calegari, 2020).

Em relação ao comportamento natural da argila, na TRI o conteúdo de argila dispersa em água (ADA) variou entre 11,2 e 21,9% para o horizonte Ap e Bw₁, respectivamente. Em consonância a isso, por ser suplementar à ADA, os mesmos horizontes apresentam, inversamente, as extremidades para o grau de floculação (GF), com variação entre 75,5 e 88,8%. Correlacionando esses resultados aos de granulometria, onde verticalmente obteve-se um pequeno incremento da fração argila no horizonte Bw₁, pode-se deduzir que o referido horizonte pedológico está em processo de transformação, supostamente para um Bt.

Nas demais trincheiras, os percentuais de GF acima de 90% estão associados ao horizonte Bw₂, evidenciando a estabilidade da argila em profundidade.

4.3.3. Densidade do Solo e Porosidade

O manejo dos solos, em conformidade com o tipo de cultura agrícola introduzida ao longo das décadas, parece ter impactado significativamente a qualidade física e,

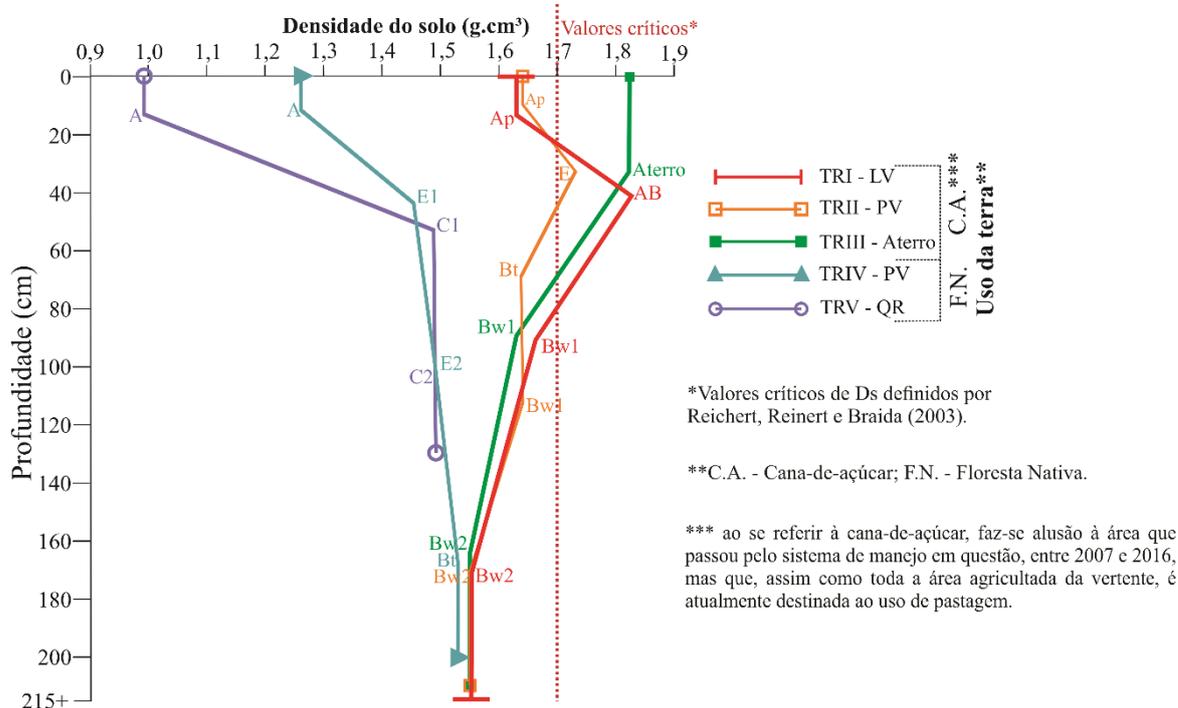
consequentemente, o funcionamento hídrico da cobertura pedológica que constitui a área de drenagem da nascente Água da Fonte. De tal modo, para discutir de maneira mais aprofundada as variáveis que são diretamente afetadas pelo manejo agrícola, torna-se necessário estabelecer relações entre o uso da terra historicamente desenvolvido nos pontos experimentais e a qualidade física dos solos, embora atualmente a área seja recoberta exclusivamente por pastagem.

Além disso, o vínculo de dependência de uma variável para outra faz com que seja necessário, ao longo da interpretação dos resultados experimentais, a correlação entre ambas. Com isso, mesmo que tenha subdividido em subtópicos, determinadas variáveis passam a ser ressaltadas mais de uma vez ao longo do texto.

Conforme destacado na fundamentação teórica da pesquisa, a principal problemática no que se refere a degradação dos solos em resposta a implantação de práticas agrícolas, é a compactação, que resulta no aumento de sua densidade. Dessa maneira, a partir de uma observação prévia do comportamento vertical da densidade do solo (D_s) ao longo do transecto analisado (Figura 28), é possível constatar que as maiores taxas de densificação estão associadas aos horizontes superficiais e subsuperficiais, especialmente nas trincheiras I, II e III. Esses pontos experimentais coincidem com a área que foi cultivada com cana-de-açúcar, entre os anos de 2007 e 2016.

Comportamento oposto é observado nos perfis de solos analisados sob domínio de floresta nativa – Argissolo e Neossolo Quartzarênico da baixa vertente, que apresentam verticalmente menores valores de D_s , com destaque para a superfície, que possivelmente estão associados a concentração de matéria orgânica. Além disso, a partir de cerca de 60 cm de profundidade, esses teores tendem a apresentar maior uniformidade em todos os pontos analisados, marcado por uma diminuição significativa mesmo nos solos da área agricultada.

Figura 28 - Variação vertical da densidade do solo (Ds) dos horizontes pedológicos ao longo do transecto A



Fonte: O autor (2024).

Em termos numéricos, os maiores teores de Ds ocorrem no horizonte AB da TRI (1,82 g.cm³) e E da TRII (1,73 g.cm³) (Tabela 7). Esses valores são considerados críticos para a circulação hídrica e o desenvolvimento das plantas, de acordo com a classificação proposta por Reichert; Reinert; Braida (2003) e Reinert et al. (2008). O aumento da densidade em subsuperfície também foi constatado por Beckhauser (2020), ao analisar a dinâmica evolutiva de uma voçoroca em Sumaré, distrito do município de Paranavaí.

Devido as trincheiras (I e II) estarem dispostas sobre área que dispunha do cultivo da cana-de-açúcar, os maiores níveis de densificação em subsuperfície está possivelmente vinculado com as práticas adotadas para o preparo do solo, em consequência da manutenção do canavial, como o uso do arado de disco, responsável por promover a aeração da superfície, enquanto a subsuperfície permanece compactada. Isso corrobora com o que foi descrito por Vasconcelos e Pacheco (1987), Freitas (1992), Stone e Silveira (1999), Machado (2003).

Por outro lado, mesmo apresentando valores próximos aos limites críticos, a possível utilização de arado de disco nas áreas cultivadas com cana levou à redução da Ds no horizonte Ap, se comparado aos horizontes subsuperficiais, uma vez que estes apresentam valores de Ds de 1,63 e 1,64 g.cm³, para a TRI e TRII, respectivamente (Tabela 7). Todavia, também se faz oportuno elencar o papel do uso da terra atual na manutenção da qualidade física dos solos em

superfície, uma vez que a pastagem, visualmente pouco degradada nos pontos em que foram dispostas as referidas trincheiras, também contribuem para a diminuição da Ds em superfície.

Tabela 7 - Porosidade, densidade do solo e diâmetro médio ponderado dos agregados dos horizontes pedológicos do transecto A

Horizonte	Profundidade (cm)	Mi ----- (%)	Ma ----- (%)	Pt	Ds (g.cm ³)
TRI – Latossolo Vermelho					
Ap	0-27	29,8	7,2	37,0	1,63
AB	27-56	24,0	4,0	28,0	1,82
Bw ₁	56-126	25,2	9,7	34,9	1,66
Bw ₂	126-215+	25,4	12,7	38,1	1,53
TRII – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	27,4	5,8	33,2	1,64
E	20-46	24,8	5,1	29,9	1,73
Bt	46-92	26,9	5,4	32,3	1,62
Bw ₁	92-132	27,4	7,6	35,0	1,64
Bw ₂	132-210+	27,4	8,5	35,9	1,55
TRIII - Aterro					
Aterro	0-60	25,5	3,7	29,2	1,82
Bw ₁	60-119	27,5	8,0	35,5	1,63
Bw ₂	119-212+	26,5	10,8	37,3	1,55
TRIV – Argissolo Vermelho					
A	0-23	28,6	16,1	44,7	1,20
E ₁	23-63	29,6	7,0	36,6	1,45
E ₂	63-135	30,2	7,1	37,3	1,49
Bt	135-200+	29,6	6,4	36,0	1,53
TRV – Neossolo Quartzarênico					
A	0-26	23,0	18,2	41,2	0,98
C ₁	26-80	29,6	9,4	39,0	1,48
C ₂	80-130	29,6	6,8	36,4	1,49

Mi = Microporosidade; Ma = Macroporosidade; Pt = Porosidade total; Ds = Densidade do solo.

Fonte: O autor (2024).

O “volume pedológico” aterro¹⁰ na TRIII também apresenta valor crítico de Ds (1,82 g.cm³), que decorre, possivelmente, da compactação do solo durante o processo de aterramento, bem como uma “herança” deixada pela área construída disposta no terço média/baixo da vertente, como observado na figura 21 - A. Diante disso, pode-se inferir que o próprio modelo de parcelamento e estruturação das propriedades rurais planejadas pela CMNP, marcado por construções na baixa vertente que contribuem para a impermeabilização, tem cooperado para a degradação da cobertura pedológica a partir da média vertente. Essa constatação corrobora com o que foi elencado por Mendonça (1994).

¹⁰ Ainda que não seja habitual, a denominação do aterro como um “volume pedológico” foi realizada com a finalidade de facilitar a discussão do texto ao correlacioná-lo com os demais horizontes pedológicos autóctones.

Ademais, contrariamente aos demais perfis analisados, em que a pastagem contribui levemente para a melhora da qualidade física do solo em superfície, a compactação exercida diretamente em superfície neste ponto experimental (TRIII) minimiza a integração de uma ação mutualmente benéfica. O valor crítico de D_s dificulta o desenvolvimento de um sistema radicular mais eficaz da gramínea, resultando em desenvolvimento limitado e não auxiliando na manutenção da qualidade física do solo.

No que se refere a área sob uso agrícola (TRI, II e III), em profundidade a D_s permaneceu homogênea, com valores abaixo de $1,66 \text{ g.cm}^3$, uma vez que esta não sofre efeito direto do manejo agrícola (Figura 28 e Tabela 7).

Na floresta nativa, o Argissolo Vermelho (TRIV) apresentou variação vertical de D_s entre $1,20$ e $1,53 \text{ g.cm}^3$, enquanto para o Neossolo Quartzarênico (TRV) os valores oscilaram entre $0,98$ e $1,49 \text{ g.cm}^3$. Em ambos os pontos amostrais os menores valores estão associados ao horizonte A, o que se deve à concentração de matéria orgânica na superfície, que, por ser um elemento de baixa densidade em relação às partículas minerais, contribui para a diminuição da massa sólida em um determinado volume específico (Aragón et al., 2000; Dias Junior; Miranda, 2000; Assis; Lanças, 2005).

Dessa maneira, em resposta a diminuição dos teores de matéria orgânica em profundidade, ocorre o aumento gradativo da D_s , que passa a variar entre $1,45$ e $1,53 \text{ g.cm}^3$ no Argissolo Vermelho (TRIV), sucedido por valores semelhantes no Neossolo Quartzarênico (TRV), que apresenta teores de $1,48$ e $1,49 \text{ g.cm}^3$ para o volume pedológico C_1 e C_2 , respectivamente (Tabela 7). O aumento da densidade do solo em função da diminuição da matéria orgânica verticalmente, em área florestada, corrobora com o que foi destacado por Vitorino¹¹ (1986) apud Panachuki et al. (2006). Todavia, deve-se considerar que a tendência incremental de D_s para o horizonte Bt ($D_s = 1,53 \text{ g.cm}^3$), também decorre do processo de densificação natural, como destacado por Silva et al. (2005) e Silva et al. (1999).

O panorama comportamental da D_s refletiu diretamente nas taxas de porosidade, sobre principalmente a macroporosidade (M_a) e a porosidade total (P_t), que apresentaram valores idênticos de correlação negativa muito forte com a D_s ($r = -0,86$) (Figura 29), constatando que são inversamente proporcionais. Em outras palavras, de modo linear, quando o valor de uma delas aumenta, a outra decresce, e vice-versa. A direta influência da D_s sobre a porosidade também foi observado por Alvarenga et al. (1996); Stone; Guimarães; Moreira (2002).

¹¹ VITORINO, A.C.T. **Caracterização e interpretação, para uso agrícola, de solos de terraço fluvial, no médio Rio Doce, Município de Córrego Novo, MG.** 1986. 107f. Tese (Mestrado em Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

Figura 29 - Coeficiente de correlação de *Pearson* (r) entre os resultados das variáveis físicas e hídrica do transecto A

	Argila	ADA	GF	Mi	Ma	Pt	Ds	DMPa	C.O
ADA	-0,62								
GF	0,61	-1,00							
Mi	-0,43	0,22	-0,22						
Ma	-0,32	0,21	-0,22	-0,19					
Pt	-0,53	0,32	-0,32	0,36	0,85				
Ds	0,62	-0,39	0,39	-0,07	-0,86	-0,86			
DMPa	0,56	-0,11	0,10	-0,20	-0,42	-0,51	0,48		
C.O	-0,04	-0,05	0,05	-0,13	0,08	0,01	0,00	0,43	
K _{sat}	-0,89	0,67	-0,66	0,39	0,44	0,63	-0,72	-0,65	-0,27

Intensidade de Correlação*

$0 \leq R < 0,2$	= muito fraca
$0,2 \leq R < 0,4$	= fraca
$0,4 \leq R < 0,6$	= moderada
$0,6 \leq R < 0,8$	= forte
$0,8 \leq R \leq 1,0$	= muito forte

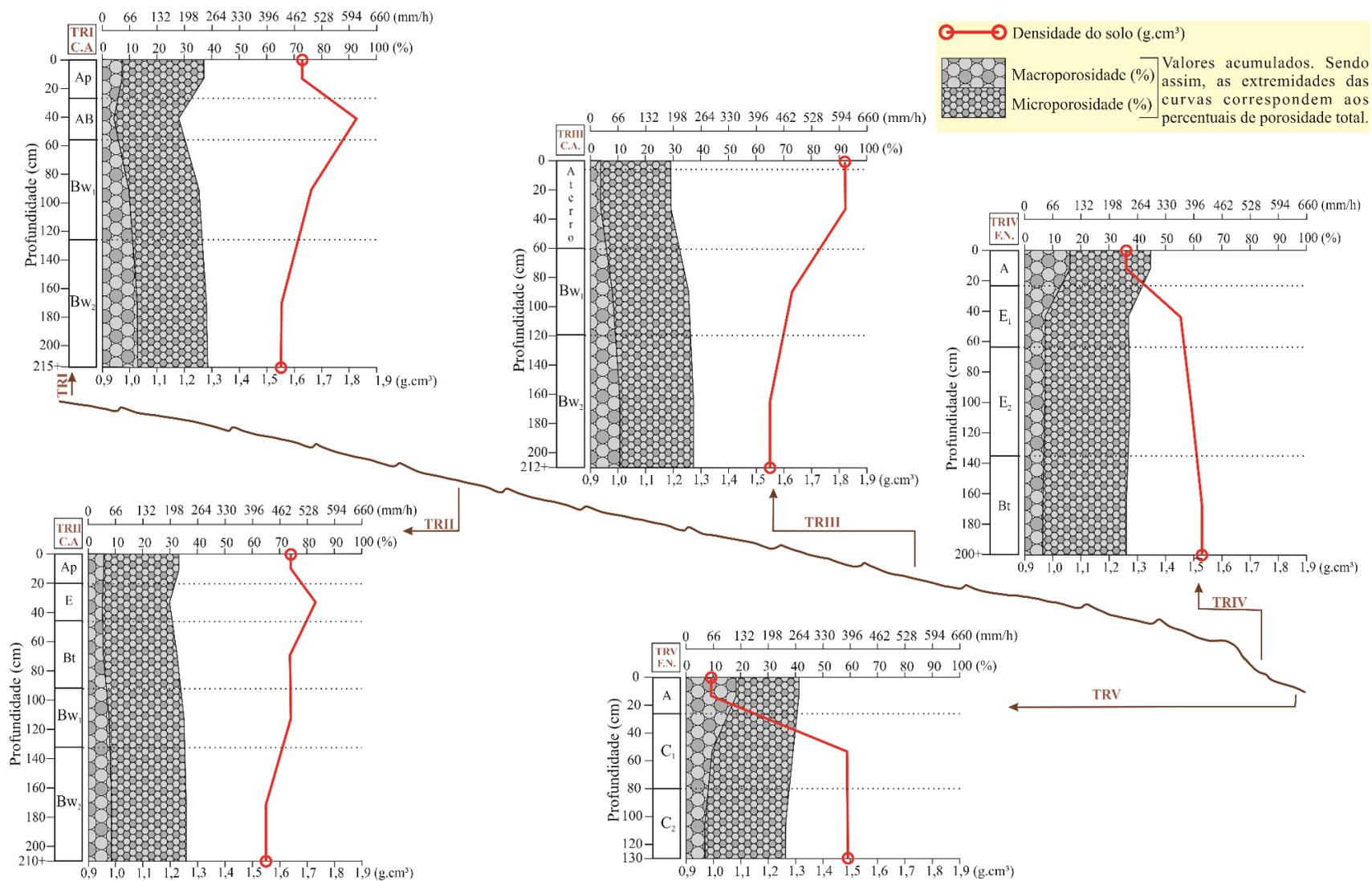
* Classes determinadas por Santos et al (2012), adaptada de Zou; Tuncali; Silverman (2003).

Nota: ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de Flocculação; Mi – Microporosidade; Ma – Macroporosidade; Pt – Porosidade Total; Ds – Densidade do Solo; DMPa – Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados; C.O – Carbono Orgânico; K_{sat} – Condutividade Hidráulica do Solo Saturado.

Fonte: O autor (2024).

Dessa maneira, em conformidade à correlação direta com Ds, também foram observadas nas trincheiras I e II, sobretudo em subsuperfície, as menores taxas de macroporos (Ma) e porosidade total (Pt), acompanhado de um leve aumento em profundidade, a partir de 60 cm, em função da diminuição do impacto direto do manejo do solo. Essa tendência também é constatada na TRIII, associado à área de aterro. Inversamente, na baixa encosta (trincheiras IV e V), conforme ocorre a diminuição da Ds em superfície, há um aumento expressivo da Ma e da Pt, acompanhada de uma diminuição em profundidade, a partir de 20 cm (Figura 30).

Figura 30 - Variação da porosidade (micro, macro e porosidade total) em relação a densidade do solo ao longo do transecto A



Fonte: O autor (2024).

Em termos quantitativos, no tocante a Ma, o Latossolo Vermelho da alta vertente apresenta uma faixa de variação vertical entre 4,0 e 12,7, com limites de amplitudes associadas aos horizontes AB e Bw₂, respectivamente. Em área de Argissolo Vermelho, na média encosta (TRII), os percentuais oscilam entre 5,1 e 8,5% para os horizontes E e Bw₂. Já a TRIII apresentou variação entre 3,7 e 10,8%, para o aterro e o Bw₂, respectivamente (Tabela 7 e Figura 30).

No Argissolo Vermelho da baixa vertente (TRV), a faixa de oscilação vertical de Ma é de 6,4 e 16,1%, com limites de amplitude referente aos horizontes pedológicos Bt e A, respectivamente. Já no Neossolo Quartzarênico, a amplitude foi de 6,8 a 18,2%, referente aos horizontes C₂ e A, respectivamente (Tabela 7 e Figura 30).

De modo geral, nota-se que, na média e baixa encosta, em área cultiváveis, as maiores taxas de Ma se concentram em profundidade, associado principalmente ao horizonte Bw₂. Em contrapartida, no sopé da vertente, essa tendencia se comporta de maneira inversa, com os maiores percentuais de Ma atrelados aos horizontes A, em superfície.

Por apresentar correlação muito forte e positiva com a Ma ($r=0,85$) (Figura 29), a porosidade total (Pt) possui comportamento semelhante ao da Ma ao longo da topossequência. Apresenta, em área agricultada (TRI, II e III), valores abaixo de 29,9%, nos volumes pedológicos subsuperfícies AB, E e aterro, seguido de um aumento expressivo em profundidade (>34,9%), associado ao horizonte Bw. Comportamento semelhante foi encontrado por Marcatto (2020).

Sob floresta nativa (TRIV e V) esse comportamento é inverso, onde a Pt apresenta percentuais mais elevados em superfície (>40,0%), associados ao horizonte A, seguido de redução em profundidade, ao qual passam a apresentar taxas abaixo de 39,0%.

4.3.4. Estabilidade de Agregados

Entre as variáveis consideradas como agentes cimentantes dos agregados que foram analisadas nesta pesquisa, a maior correlação ocorreu com a fração argila ($r=0,56$) e o carbono orgânico ($r=0,43$). Todavia, não se deve desconsiderar a atuação da densidade do solo ($r=0,48$) como fator formador de macroagregados, uma vez que, como encontrado na pesquisa de Marcatto (2020), o solo quando condicionado ao tráfego constante de máquinas agrícolas, pode apresentar o surgimento de agregados grandes em decorrência da compressão mecânica.

Dessa maneira, como demonstrado na tabela 8 e especialmente na figura 31, no topo da vertente, o maior índice de diâmetro médio ponderado dos agregados (DMPa) está vinculado ao horizonte subsuperficial AB (1,47 mm), em associação, possivelmente, com a Ds (1,82 g.cm³). Esse limite máximo da faixa de variação encontrada para o perfil vem acompanhada pelo horizonte Ap, com valor de DMPa de 1,24 mm, mas que neste caso está relacionado ao incremento de carbono orgânico, frequente na superfície do solo (11,81 g/dm³) (Tabela 8).

Tabela 8 - Diâmetro médio ponderado dos agregados, argila, carbono orgânico e densidade do solo dos horizontes pedológicos do transecto A

Horizonte	Profundidade (cm)	DMPa (mm)	Argila g.Kg ⁻¹	C.O g/dm ³	Ds (g.cm ³)
TRI – Latossolo Vermelho					
Ap	0-27	1,24	109,5	11,81	1,63
AB	27-56	1,47	160,2	6,28	1,82
Bw ₁	56-126	0,97	199,2	5,63	1,66
Bw ₂	126-215+	0,47	187,5	4,88	1,53
TRII – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	0,81	91,5	11,43	1,64
E	20-46	0,80	143,8	6,28	1,73
Bt	46-92	1,53	227,8	6,0	1,62
Bw ₁	92-132	1,19	190	4,41	1,64
Bw ₂	132-210+	0,49	198,5	4,13	1,55
TRIII - Aterro					
Aterro	0-60	0,32	174,5	4,04	1,82
Bw ₁	60-119	0,32	160,3	3,49	1,63
Bw ₂	119-212+	0,29	168,7	2,82	1,55
TRIV – Argissolo Vermelho					
A	0-23	0,37	42,4	8,62	1,20
E ₁	23-63	0,25	33,1	2,54	1,45
E ₂	63-135	0,30	38,9	2,26	1,49
Bt	135-200+	0,92	140,1	2,35	1,53
TRV – Neossolo Quartzarênico					
A	0-26	0,29	21,6	6,38	0,98
C ₁	26-80	0,21	13,4	3,29	1,48
C ₂	80-130	0,20	10,4	4,32	1,49
DMPa = Diâmetro médio ponderado dos agregados; C.O = Carbono orgânico; Ds = Densidade do solo.					

Fonte: O autor (2024).

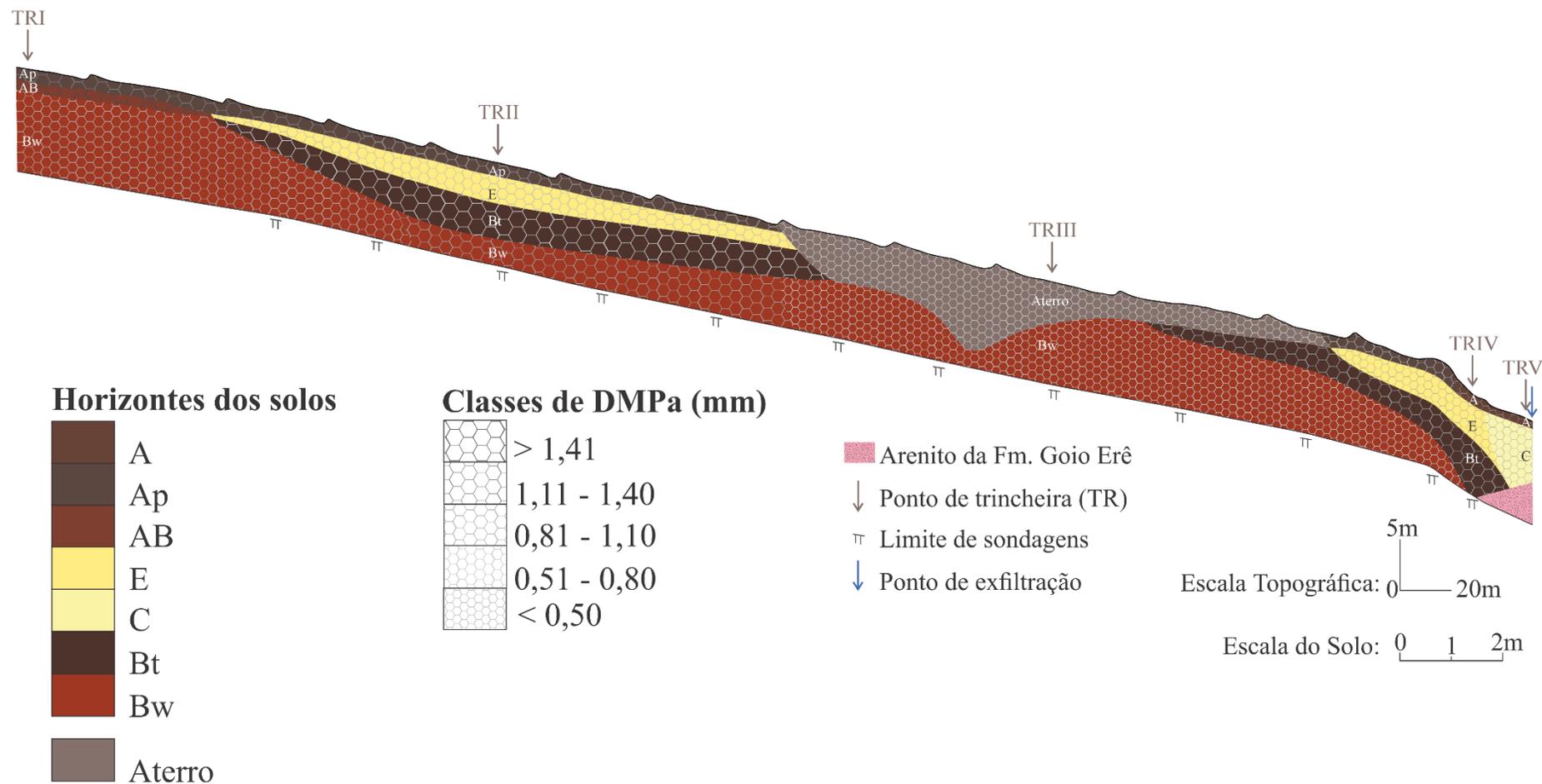
Em profundidade, foram encontrados valores reduzidos de DMPa no horizonte Bw. Contudo, esse decréscimo é mais significativo no Bw₂ (0,47 mm). O incremento de argila constatado no Bw₁ (199,2 g.Kg⁻¹), ainda que modesto, pode estar contribuindo para a agregação deste horizonte (DMPa=0,97 mm), se comparado ao volume pedológico subsequente (Bw₂) (Tabela 8). Além disso, a redução dos agregados em profundidade, nos horizontes Bw, decorre de sua estruturação natural, com a presença de blocos subangulares e granulares, assim como

evidenciado na descrição morfológica. A diminuição do diâmetro dos agregados em horizontes B latossólicos também foram observados por Silveira (2001), Medeiros et al. (2018) e Santos, Cruz e Silveira (2023).

Lateralmente, em cobertura argissólica (TRII), em virtude do incremento do teor da fração areia, o horizonte superficial Ap passa a apresentar DMPa de 0,81 mm. Essa tendência também é observada no horizonte E, onde o baixo teor de argila deste horizonte ($143,8 \text{ g.Kg}^{-1}$), juntamente com a redução gradativa do carbono orgânico ($6,28 \text{ g.dm}^3$) em subsuperfície, condiciona à formação de agregados de menor diâmetro (0,80 mm) (Figura 31).

Ainda neste ponto amostral (TRII), o horizonte pedológico Bt apresenta o maior valor de DMPa, com 1,53 mm. Esse aumento vertical do índice de agregação decorre do processo de iluviação. Em outras palavras, a perda de argila experimentada pelos horizontes Ap e E, com acumulação no Bt ($227,8 \text{ g.Kg}^{-1}$), fornece aporte para que esse horizonte apresente agregados maiores e mais estáveis (Figura 31). Isso corrobora com o estudo de Boix-Fayos et al. (2001) e Silva et al. (2014), que destacam a correlação positiva entre o teor de argila com o aumento da agregação do solo.

Figura 31 - Distribuição espacial das classes de Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados (DMPa) dos horizontes pedológicos do transecto A



Fonte: O autor (2024).

Em profundidade, o Bw₁ da TRII apresenta maior diâmetro médio (DMPa=1,19 mm) em relação ao horizonte subseqüente (Bw₂), que exibe valor de 0,49 mm. O referido aumento do DMPa, que constitui o horizonte B latossólico superior, não apresenta correlação direta com o teor de argila (160,3 g.Kg⁻¹), com a densidade do solo (1,63 g.cm³), tampouco com o teor de carbono orgânico, que foi de 3,49 g.dm³ (Tabela 8). Todavia, essa maior agregação em profundidade pode estar relacionada a outros elementos inorgânicos que atuam como agentes cimentantes dos agregados, como os óxidos de ferro e alumínio, carbonatos e sílica, assim como apontado por Santos et al. (2005).

Na área de aterro, o DMPa se mostrou uniforme verticalmente, com valores que variam entre 0,29 e 0,32 mm. Embora o “volume pedológico” aterro tenha apresentado alta Ds (1,82 g.cm³), dominam os agregados de menores diâmetros (Tabela 8).

No sopé da vertente, nas trincheiras IV e V, o pacote arenoso que envolve os horizontes A, E e C, em resposta ao baixo teor de argila (< 45,0 g.Kg⁻¹), apresenta baixa agregação, com DMPa menor que 0,40 mm. Nota-se que os maiores índices de agregação estão relacionados aos horizontes A, com DMPa de 0,37 e 0,29 mm, em cobertura argissólica e quartzarênica, respectivamente. Isso decorre da concentração da matéria orgânica nesses pontos amostrais, em que, na mesma sequência supracitada, os teores de carbono orgânico encontrados foram de 8,62 e 6,38 g/dm³. Isso evidencia a atuação dos elementos orgânicos como cimentantes dos agregados, assim como destacado por Tisdall e Oades (1982).

Em profundidade, na cobertura argissólica (TRIV), ocorre o aumento expressivo de agregação no horizonte Bt (DMPa = 0,92 mm) que, assim como o observado na TRII, é resultante da concentração da argila lixiviada dos horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (E) e depositadas em profundidade, fazendo com que ocorra uma mudança de agregação abrupta entre os horizontes eluviais (A/E) e o iluvial (Bt) (Figura 31). O aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados em associação ao aumento do teor da fração argila também foram encontrados nos estudos de Medeiros et al. (2018) e Beckhauser (2020).

Os agregados de menor diâmetro encontrados em superfície, no horizonte Ap, sobretudo a partir da média vertente, e os associados ao pacote arenoso no sopé da vertente (horizonte A, E e C), estão sujeitos à desagregação e ao arraste de partículas por ação da chuva, o que leva ao desenvolvimento de feições erosivas. Dessa maneira, essa problemática também incide sobre a área aterrada, na média encosta, onde a pastagem, em estado de degradação, não auxilia na formação de macroagregados estáveis, além de apresentar solo exposto entremeado a pequenas áreas que exibem a cobertura densa de gramínea.

Contudo, os solos do sopé da vertente (Argissolo e Neossolo Quartzarênico) apresentam maior grau de vulnerabilidade às ações erosivas, pois, ainda que sua superfície seja mantida coberta por detritos vegetais, em presença da cobertura florestal, o crescente aumento dos fluxos hídricos em direção ao sopé da vertente pode provocar a desagregação dos agregados de pequeno diâmetro e instáveis, fomentando o carregamento e deposição de partículas na área da nascente.

4.3.5. Características hídricas

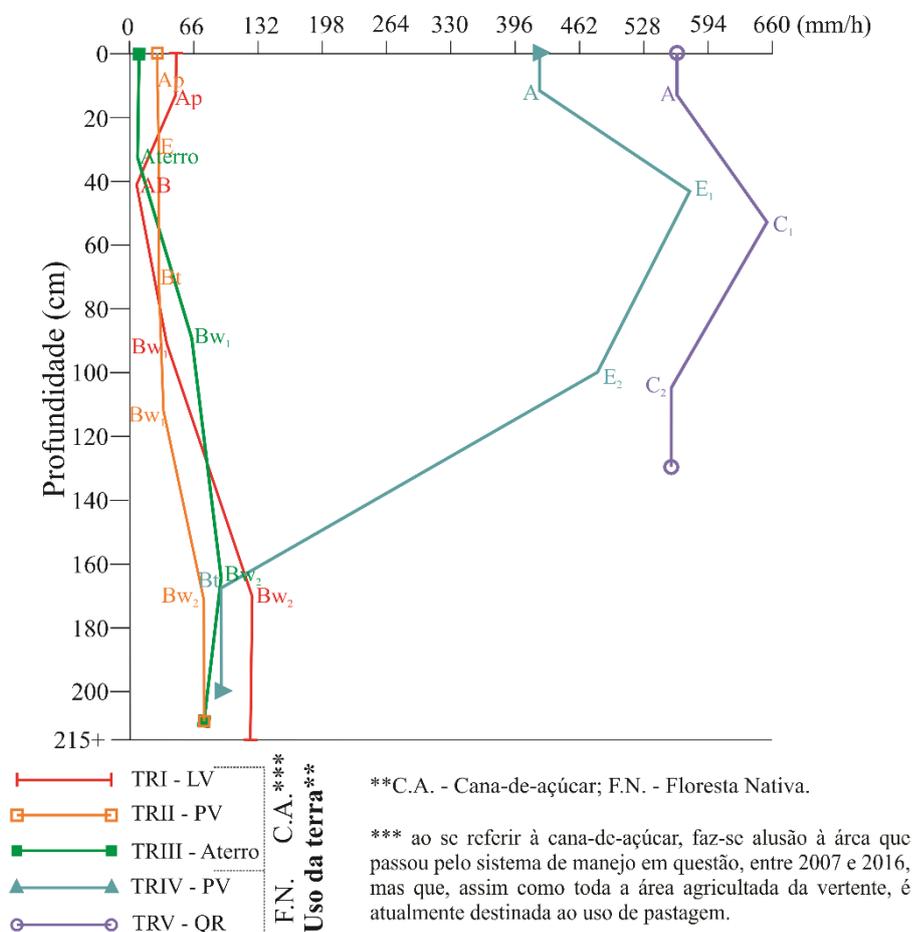
Os dados de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) estão apresentados na figura 32. Na tabela 9 pode-se observar os resultados analíticos de K_{sat} juntamente com os percentuais de macroporosidade, bem como o coeficiente de variação (CV%), calculado em conjunto com os resultados analíticos em relação à sua média¹². Os resultados obtidos foram agrupados em classes e, além de estarem representados na tabela com os dados numéricos, também foram ilustrados espacialmente no transecto (Figura 33).

A partir de uma observação prévia do comportamento vertical da K_{sat} (Figura 32), nota-se que em todas as trincheiras analisadas, sobre área cultivada (TRI, II e III), as taxas de percolação foram mais baixas em superfície e em subsuperfície, com tendência de incrementação em profundidade, a partir de 60 cm. Contrariamente, mesmo que apresente altos índices de K_{sat} em todos os horizontes pedológicos analisados, na área sob uso de floresta nativa, no sopé da vertente, os índices de percolação são mais expressivos em superfície (horizonte A), acompanhado de uma extrema redução em profundidade na cobertura argissólica, associada ao horizonte Bt.

Além disso, as maiores variabilidades entre os resultados analíticos da K_{sat} se associam aos horizontes superficiais e subsuperficiais. Possivelmente, destacado pelo uso com a cana, essa oscilação é decorrente do revolvimento do solo por implementos agrícolas durante a manutenção do canavial, e resultante da concentração de matéria orgânica em área sobre uso com floresta, corroborando com o que foi apontado por Reichardt (1978).

¹² Em outras palavras, o CV% foi calculado entre o resultado das quatro amostras analisadas para cada horizonte pedológico em relação à sua média.

Figura 32 - Variação vertical das taxas de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos horizontes pedológicos ao longo do transecto A



Fonte: O autor (2024).

Na cobertura argissólica, no topo do transecto analisado, verticalmente a K_{sat} apresenta uma faixa de variação ente 8,08 e 130,2 mm/h, com tais extremidades associadas ao horizonte AB e Bw_1 , respectivamente (Tabela 9). A diminuição da K_{sat} em subsuperfície (horizonte AB) apresenta uma intrínseca relação com o aumento da densidade e diminuição da porosidade (macro e poros totais) para este horizonte. Essa redução da porosidade e da condutividade hidráulica é consequência da compactação provocada pelo tráfego contínuo de máquinas e a utilização de implementos agrícolas durante o manejo da cana-de-açúcar. Tal condição pode criar um ambiente de saturação temporário no topo do horizonte AB, assim como também foi constatado por Marcatto (2020).

Foi verificado para todo o transecto analisado que a K_{sat} apresentou correlação forte negativa com a D_s ($r = -0,72$), bem como forte positiva com a P_t ($r = 0,63$) e moderada com a macroporosidade ($r = 0,44$). A correlação negativa entre a taxa de percolação da água com a densidade do solo também foi observado por Cunha, Nóbrega e Castro (2008) ao analisarem

uma topossequência de solos no município de Cidade Gaúcha, no Noroeste do Estado do Paraná.

Tabela 9 - Condutividade hidráulica saturada, coeficiente de variação e classes de permeabilidade dos horizontes pedológicos do transecto A

Horizonte	Profundidade	K_{sat}	Ma	CV	*Classe de permeabilidade
	cm	(mm/h)	----- (%) -----		
TRI – Latossolo Vermelho					
Ap	0-27	47,93	7,2	30,42	Lenta a Moderada
AB	27-56	8,08	4,0	92,0	Lenta
Bw ₁	56-126	34,24	9,7	34,96	Lenta a Moderada
Bw ₂	126-215+	130,43	12,7	24,41	Moderada Rápida
TRII – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	28,59	5,8	21,67	Lenta a Moderada
E	20-46	30,02	5,1	61,36	Lenta a Moderada
Bt	46-92	28,76	5,4	71,83	Lenta a Moderada
Bw ₁	92-132	34,27	7,6	63,93	Lenta a Moderada
Bw ₂	132-210+	78,01	8,5	44,20	Moderada
TRIII - Aterro					
Aterro	0-60	8,10	3,7	28,36	Lenta
Bw ₁	60-119	64,08	8,0	17,32	Moderada
Bw ₂	119-212+	93,77	10,8	32,28	Moderada
TRIV – Argissolo Vermelho					
A	0-23	420,88	16,1	45,45	Rápida
E ₁	23-63	573,86	7,0	6,40	Rápida
E ₂	63-135	480,59	7,1	10,13	Rápida
Bt	135-200+	93,79	6,4	61,42	Moderada
TRV – Neossolo Quartzarênico					
A	0-26	561,25	18,2	57,75	Rápida
C ₁	26-80	654,13	9,4	10,49	Rápida
C ₂	80-130	555,92	6,8	4,34	Rápida

K_{sat} = Condutividade hidráulica saturada; CV = Coeficiente de variação. *Classes de permeabilidade proposta por Beutler et al. (2001) adaptado de Soil Survey Staff (1993).

Fonte: O autor (2024).

O comportamento observado na alta vertente (TRI) é repetido na média encosta, sobre o Argissolo Vermelho (TRII), onde ocorre um aumento gradativo da K_{sat} em profundidade, com taxa de percolação de 28,59 mm/h para o horizonte Ap, chegando a 78,01 mm/h no horizonte Bw₂. Borges et al. (2009) destacam que em profundidade as propriedades físicas dos solos não são diretamente afetadas pelo manejo, portanto, se mantém melhores condições de drenagem.

A área aterrada demonstra uma clara organização vertical nos padrões de drenagem, associado aos percentuais de macroporosidade e de densidade do solo. A taxa mais baixa de K_{sat} identificada nestes perfis refere-se ao local com aterro, onde o valor encontrado foi de 8,10 mm/h. Este valor diminuto de percolação e movimentação da água demonstra correlação direta

com os baixos percentuais de Ma (3,7%) e alto teor de Ds (1,82 g.dm³). Esses índices desfavoráveis para um bom funcionamento do solo são seguidos por uma melhora em profundidade, onde o horizonte Bw₂ apresenta K_{sat} de 93,77 mm/h, em correlação com a diminuição da Ds (1,55 g.dm³) e o aumento da Ma (10,8%) (Tabela 9).

Na baixa vertente observa-se um aumento expressivo da taxa de percolação da água no solo, vertical e lateralmente. Todavia, o comportamento ascendente da K_{sat} está mais fortemente associado aos horizontes lixiviados superficiais e subsuperficiais (A, E e C). Assim, a cobertura argissólica da baixa vertente apresenta verticalmente uma faixa de percolação que varia entre 93,79 e 573,86 mm/h, sendo extremidades relativas aos horizontes Bt e E₁, respectivamente (Tabela 9).

Embora a infiltração dos solos esteja condicionada aos índices de macroporos (Smettem, 1986; Reinert; Reichert, 2006), não é isso que se observa neste ponto experimental. O maior percentual de Ma encontrado neste perfil (TRIV) corresponde ao horizonte A, com 16,1%, porém, este apresenta valor de K_{sat} intermediário, de 420,88 mm/h (Tabela 9).

A explicação para esta inconformidade pode residir na organização da rede de poros neste perfil, considerando que para Mesquita e Moraes (2004), além da geometria dos poros, a infiltração do solo também é determinada pela continuidade de seu sistema. Assim, a descontinuidade dessa rede - mesmos dos poros de maior diâmetro, pode diminuir a eficiência da taxa de percolação da água no solo. Nessa linha de pensamento, Bouma (1982) salienta que os microporos, desde que conectados, também podem conduzir grandes volumes de água.

Ainda em relação à cobertura argissólica da baixa encosta, houve uma diminuição substancial da taxa de percolação no horizonte Bt (93,79 mm/h), evidenciando um decréscimo vertical de mais de quatro vezes, se comparado a média aritmética (\bar{x}) entre a K_{sat} dos horizontes subjacentes, que é de 491,7 mm/h. O acentuado declínio da condutividade em profundidade está associado ao processo de densificação natural do horizonte Bt, onde a migração da fração argila dos horizontes A e E são depositadas e obstruem a porosidade em profundidade, assim como destacado por Silva et al. (1999).

Da mesma forma que observado nos horizontes AB da TRI e E da TRII, o Bt da cobertura argissólica na baixa vertente, por ser menos permeável, está condicionado à formação de fluxos hídricos temporários suspensos em seu topo, fazendo com os horizontes subjacentes atinjam saturação mais rápida, o que favorece o desenvolvimento de feições erosivas. Resultados semelhantes foram constatados nos trabalhos desenvolvidos por Zago (2000) e Cunha, Nóbrega e Castro (2008).

Em cobertura quartzarênica se repete o que foi observado no pacote arenoso da cobertura argissólica (TRIV), representado pelos horizontes A, E₁ e E₂, porém, com volumes de percolação mais significativos. Neste perfil (TRV), a faixa de oscilação da condutividade está entre 555,92 e 654,13 mm/h, correspondentes aos volumes pedológicos C₂ e C₁, respectivamente (Tabela 9). A maior taxa de percolação da água não está diretamente correlacionada com a maior taxa percentual de macroporosidade, considerando que, neste perfil, o horizonte A apresenta o maior volume de poros grandes (18,2%), mas exibe a segunda menor taxa de K_{sat} (654,13 mm/h) (Tabela 9). Esse comportamento, assim como o constatado no Argissolo, decorre, possivelmente, da continuidade do sistema de poros, que necessitariam de análises específicas para tal comprovação, como a observação do solo em lâminas delgadas.

Frente ao exposto, a partir de uma abordagem geral, é possível deduzir que o selamento e o rompimento na continuidade da rede de poros nos horizontes pedológicos superficiais e subsuperficiais, como consequência da compactação exercida pela implantação do sistema de cultivo da cana-de-açúcar, no médio compartimento da encosta, foram propulsores de alterações substanciais na qualidade física dos solos.

As modificações impactaram negativamente na infiltração e percolação da água no solo, repercutindo no regime hídrico da área de drenagem da nascente, onde os fluxos hídricos tomam novos direcionamentos, em que geralmente passam a se concentrarem em superfície ou no topo dos horizontes pedológicos subsuperficiais que se encontram compactados, em virtude de sua menor permeabilidade.

Contudo, não se pode desconsiderar os efeitos das características inerentes à sua natureza e evolução pedogenética no controle do comportamento hídrico ao longo da transecção analisada, que está fortemente evidenciado na baixa encosta. A mobilização de partículas minerais, particularmente a argila, dos horizontes Ap/A e E, e a consequente deposição no Bt, resultado de um comportamento natural, mas que também sobre forte influência do manejo adotado, resultando na obstrução da porosidade em profundidade.

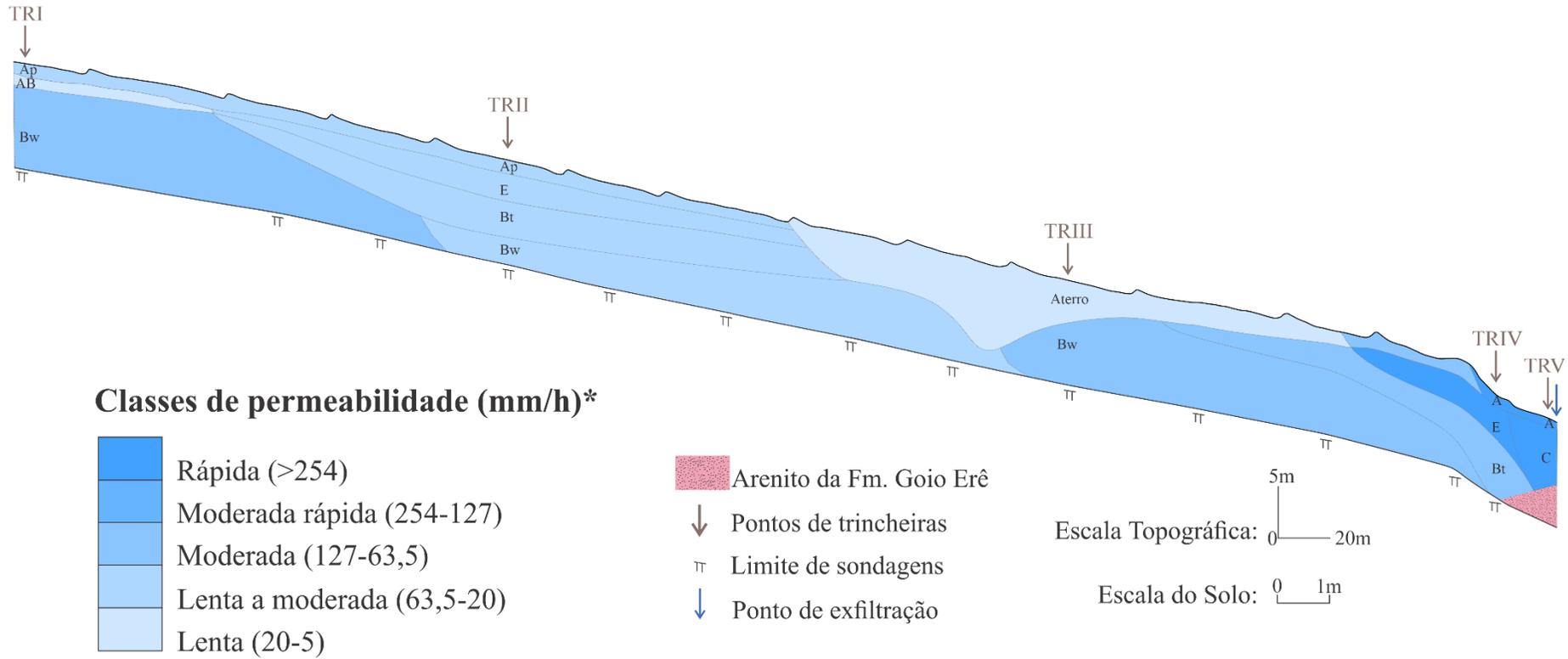
A redução dos percentuais de porosidade e a diminuição da infiltração vertical da água no topo do horizonte Bt, assim como o observado nos horizontes compactados subsuperficiais, favorece a formação de fluxos hídricos laterais que podem levar ao desencadeamento de formas erosivas. Esse mesmo comportamento é constatado na cobertura quartzarênica, entre a rocha alterada (menos permeável) e os volumes arenosos sobrepostos, que apresentam as maiores taxas de permeabilidade encontradas ao longo da topossequência (Figura 33).

Observa-se na figura 33 que as condições menos favoráveis para a infiltração da água no solo se concentram no topo e no compartimento inferior da média encosta, associados ao

horizonte AB e o aterro. Todavia, deve-se levar em consideração que, à exceção dos horizontes Bw e do pacote arenoso que localizado na baixa vertente, os demais horizontes pedológicos também apresentam baixo índice de percolação, com permeabilidade oscilando entre lenta e lenta a moderada.

Assim, a diminuição da infiltração da água no solo leva a concentração de fluxos hídricos superficiais, desde a montante da vertente. A medida em que se direcionam para a jusante, essa circulação hídrica ganha energia e, ao serem receptados pelos volumes pedológicos vulneráveis que constituem a baixa encosta (A, E e C), tendem a se infiltrar verticalmente muito rápido, mas seguido de limitações ao contactarem o horizonte Bt ou a rocha, formando fluxos laterais. Essa condição, além de promover a intensificação do processo de lixiviação da fração argila dos horizontes pedológicos, causando a degradação gradativa do horizonte Bt, também provoca a desagregação dos horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (E e C) que apresentam alto teores de areia e baixo grau de agregação.

Figura 33 - Comportamento espacial da permeabilidade dos horizontes pedológicos do transecto A



* Classes de permeabilidade proposta por Beutler et al. (2001) adaptado de Soil Survey Staff (1993). Realizou-se uma média entre os horizontes Bw₁ e Bw₂/E₁ e E₂/C₁ e C₂.

Fonte: O autor (2024).

A qualidade física e o comportamento hídrico ao longo da topossequência cria condições favoráveis para o desenvolvimento de feições erosivas em três principais áreas da bacia, com diferentes magnitudes:

- Embora toda a área que dispunha do cultivo de cana-de-açúcar e que não passou pelo processo de degradação no ano de 2016 apresentem características físicas alteradas, as condições adversas¹³ prevalecem sobre o aterro. Com isso, esta área pode desenvolver feições erosivas de natureza regressiva, no contato entre os horizontes descritos na TRII com o aterro, onde a circulação hídrica lateral advinda de montante encontra o impedimento ao contactarem esse “volume pedológico”, resultando no rompimento dos horizontes superficiais;

- O segundo ponto potencial ao descontrole erosivo também está vinculado à área aterrada, com tendência de evolução progressiva, mas de mesma magnitude da supracitada. A intensificação dos fluxos hídricos superficiais sobre o aterro pode desencadear o rompimento de seu horizonte de contato Ap, situado à jusante;

- De modo semelhante, porém com maior expressividade, no sopé da vertente também ocorre o desenvolvimento de uma erosão remontante, desencadeada sob Neossolo Quartzarênico, que avança sobre o Argissolo Vermelho.

Cabe ponderar que o comportamento do regime hídrico reflete de forma direta e intensamente sobre a nascente, podendo levar, além de sua degradação através dos sedimentos erodidos e depositados no sopé da concavidade, a alterações na sua vazão e no modo de exfiltração. Todavia, essa problemática será apresentada na discussão da síntese da organização e funcionamento da cobertura pedológica, considerando uma perspectiva tridimensional. Essa abordagem prevê que as conclusões e deduções a respeito da interação dos solos e da nascente passam a ser mais qualificadas e mais bem discutidas a partir da integralização de todas as sequências topográficas analisadas.

4.3.6. Características químicas

As análises químicas foram realizadas para fins de classificação dos solos, chegando até o quarto nível categórico. Os resultados dos parâmetros químicos analisados estão apresentados na tabela 10.

Em termos de acidez, o pH em água (H₂O) oscilou entre 4,60 e 6,40 ao longo do transecto, variando entre as classes fortemente a moderadamente ácidos, conforme a

¹³ Alta densidade do solo, baixo volume de poros e do índice de cobertura pela gramínea, agregados menos estáveis, e intensificação dos fluxos hídricos.

classificação proposta pela Embrapa (2018). Os níveis de pH em H₂O mais elevados estão geralmente associados aos horizontes superficiais, com exceção da área aterrada, que apresenta comportamento inverso, com maior acidificação em superfície, acompanhado de um incremento nos níveis de acidez em subsuperfície.

No topo da vertente, em cobertura latossólica, o pH apresenta uma constância uniforme, com horizontes superficiais mais ácidos, seguido do decréscimo gradativo da acidez em subsuperfície, uma vez que os horizontes Ap e AB apresentam, igualmente, pH de 5,70, passando a 6,40 no Bw₂ (Tabela 10).

Em cobertura argissólica na média vertente, o horizonte superficial Ap passa a apresentar pH em H₂O de 6,40, com diminuição gradativa em profundidade, chegando a 6,10 no horizonte Bw₂. Todavia, os demais horizontes do perfil (E, Bt e Bw₁) mantêm um valor médio de 5,60.

Já a área aterrada não apresenta comportamento padrão verticalmente, pois comporta um “volume pedológico” com maior acidificação em superfície (4,60), passando para 6,10 no horizonte Bw₁ e 4,90 no Bw₂.

A cobertura argissólica da baixa vertente apresenta índices de pH uniformes em relação aos seus horizontes arenosos, com valor de 5,80 para os horizontes A e E₁, passando à 5,70 no E₂. O horizonte de acúmulo de argila (Bt) é marcado por uma redução, passando a apresentar pH de 4,80. A cobertura quartzarênica possui um comportamento semelhante à cobertura argissólica supra caracterizada, com gradiente de pH oscilando verticalmente entre 5,80 e 5,50, para o horizonte A e C₂, respectivamente.

No que diz respeito aos cátions trocáveis, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, de modo geral, apresentaram maiores valores em superfície e no topo da vertente, com diminuição gradativa em profundidade e em direção ao sopé da encosta. O elemento mais expressivo é o Ca²⁺, com valores que variam entre 0,30 e 2,57 cmol./dm³.

Com exceção do Argissolo da média vertente, que apresenta em seu horizonte diagnóstico valor de saturação por bases (V%) de 53,9%, o qual lhe confere caráter eutrófico de acordo com a Embrapa (2018), todos os outros solos levantados no transecto A possuem caráter distrófico, com saturação por bases <50%.

Em relação a atividade da fração argila (AFA), todos os solos apresentam atividade baixa (Tb), abaixo de 27,0 cmol.Kg⁻¹, exceto o Argissolo da baixa vertente, cujo seu horizonte diagnóstico dispõe de 33,8 cmol.Kg⁻¹.

Tabela 10 - Composição química dos horizontes pedológicos do transecto A

Horizonte	Profundidade	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	P	C	M.O	pH	CTC		V	Valor S	AFA*		
											Total	Efetiva					
	cm	cmol./dm ³				mgP/dm ³	g/dm ³		CaCl ₂	H ₂ O	SMP	cmol./dm ³	%	cmol.Kg ⁻¹			
TRI – Latossolo Vermelho																	
Ap	0-27	0,15	1,67	0,54	0,00	3,3	9,97	11,81	20,36	5,00	5,70	6,55	5,66	2,36	41,7	2,36	-
AB	27-56	0,2	1,64	0,42	0,00	2,84	1,7	6,28	10,83	5,00	5,70	6,75	5,10	2,26	44,3	2,26	31,8
Bw ₁	56-126	0,16	1,85	0,49	0,00	2,84	1,53	5,63	9,7	5,00	5,60	6,75	5,34	2,50	46,8	2,5	25,6
Bw ₂	126-215+	0,01	1,76	0,24	0,00	2,19	1,09	4,88	8,41	5,60	6,40	7,10	4,20	2,01	47,9	2,01	22,4
TRII – Argissolo Vermelho																	
Ap	0-20	0,12	2,44	0,35	0,00	2,74	47,91	11,43	19,71	5,60	6,40	6,80	5,65	2,91	51,5	2,91	-
E	20-46	0,14	1,77	0,37	0,00	2,54	1,61	6,28	10,83	5,00	5,60	6,90	4,82	2,28	47,3	2,28	33,5
Bt	46-92	0,05	2,57	0,47	0,08	2,56	3,68	6	10,35	4,80	5,50	6,85	5,73	3,17	53,9	3,09	25,2
Bw ₁	92-132	0,01	1,4	0,37	0,00	2,45	1,7	4,41	7,6	5,10	5,80	6,95	4,23	1,78	42,1	1,78	22,3
Bw ₂	132-210+	0,01	1,29	0,27	0,00	2,36	1,35	4,13	7,12	5,40	6,10	7,00	3,93	1,57	39,9	1,57	19,8
Trincheira III – Aterro																	
Aterro	0-60	0,04	0,84	0,16	1,14	2,69	2,13	4,04	6,96	4,00	4,60	6,35	4,87	2,18	21,4	1,04	27,9
Bw ₁	60-119	0,03	1,16	0,48	0,00	2,11	2,39	3,49	6,02	5,40	6,10	7,15	3,78	1,67	44,2	1,67	23,6
Bw ₂	119-212+	0,02	0,63	0,39	0,49	2,35	1,96	2,82	4,86	4,30	4,90	6,75	3,88	1,53	26,8	1,04	23,0
TRIV – Argissolo Vermelho																	
A	0-23	0,09	1,8	0,62	0,00	2,45	2,91	8,62	14,87	5,00	5,80	6,95	4,97	2,52	50,5	2,51	-
E ₁	23-63	0,09	0,61	0,53	0,00	1,63	1,53	2,54	4,37	5,00	5,80	7,50	2,86	1,23	43,0	1,23	-
E ₂	63-135	0,13	0,4	0,31	0,08	1,61	1,18	2,26	3,89	4,90	5,70	7,45	2,53	0,92	33,2	0,84	-
Bt	135-200+	0,16	0,52	0,22	1,48	2,35	1,35	2,35	4,05	4,00	4,80	6,35	4,73	2,38	19,0	0,9	33,8
TRV - Neossolo Quartzarênico																	
A	0-26	0,07	1,65	0,44	0,00	2,19	2,04	6,38	10,99	5,00	5,80	7,10	4,34	2,15	49,8	2,16	-
C ₁	26-80	0,03	0,43	0,11	0,07	1,62	3,08	3,29	5,67	4,90	5,60	7,45	2,26	0,64	25,2	0,57	-
C ₂	80-130	0,02	0,3	0,04	0,09	1,54	1,01	4,32	7,44	4,80	5,50	7,50	1,98	0,44	18,2	0,36	-

K⁺ – Potássio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; Al³⁺ - Alumínio; P – Fósforo; C – Carbono; M.O – Matéria Orgânica; CTC – Capacidade de troca catiônica; V% - Saturação de bases; Valor S – Soma de Bases; Valor T – Atividade da fração argila. *Como proposto pela Embrapa (2018), a atividade da fração argila (AFA) não foi calculada para os horizontes com classes texturais arenosa e franco arenosa.

Fonte: O autor (2024).

A partir das análises morfológicas, químicas e físicas, os solos encontrados ao longo da topossequência foram classificados até o quarto nível categórico (Quadro 2), seguindo os preceitos estabelecidos pela Embrapa (2018).

Quadro 2 - Classificação dos solos do transecto A

PERFIL	ORDEM	SUBORDEM	GRANDE GRUPO	SUBGRUPO	CLASSIFICAÇÃO
I	Presença de horizonte B latossólico = Latossolo	Cor com matiz 2,5 = Vermelho	Saturação por Bases <50% = distrófico	Apresentar relação textural (B/A) de 1,46, bem como estrutura com grau moderado no horizonte Bw ₁ = argissólico	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico argissólico
II	Apresenta um horizonte de acúmulo de argila, classificado como B textural, com relação textural (B/A) de 1,9. = Argissolo	Cor com matiz 2,5 = Vermelho	Saturação por Bases >50% = eutrófico	Apresentar um B latossólico sotoposto ao horizonte B textural = latossólico	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico latossólico
III	Como se trata de um ponto amostral situado em área degradada, o horizonte diagnóstico original foi removido. Diante disso, ainda que apresente um horizonte B latossólico em subsuperfície, não foi realizada a classificação do solo deste perfil.				
IV	Apresenta um horizonte de acúmulo de argila, classificado como B textural (Relação textural B/A=3,7) = Argissolo	Cor com matiz 2,5 = Vermelho	Apresenta argila de atividade alta (> 27,0 cmol.Kg ⁻¹) e Saturação por Bases <50% = distrófico	Apresenta relação mudança textural abrupta, dentro de 7,5 cm. = abrupto Apresentar um B latossólico sotoposto ao horizonte B textural = latossólico	ARGISSOLO VERMELHO Ta Distrófico abrupto latossólico
V	Não apresenta um horizonte B diagnóstico = Neossolo	Sem contato lítico ou fragmentário até de 50cm de profundidade; formado essencialmente por volumes pedológicos de textura arenosa, com teores de areia > 95 g.Kg ⁻¹ , até 1,30 cm de profundidade = Quartzarênico	Ausência de hidromorfismo = Órtico	Não se enquadra em outras classes = típico	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico

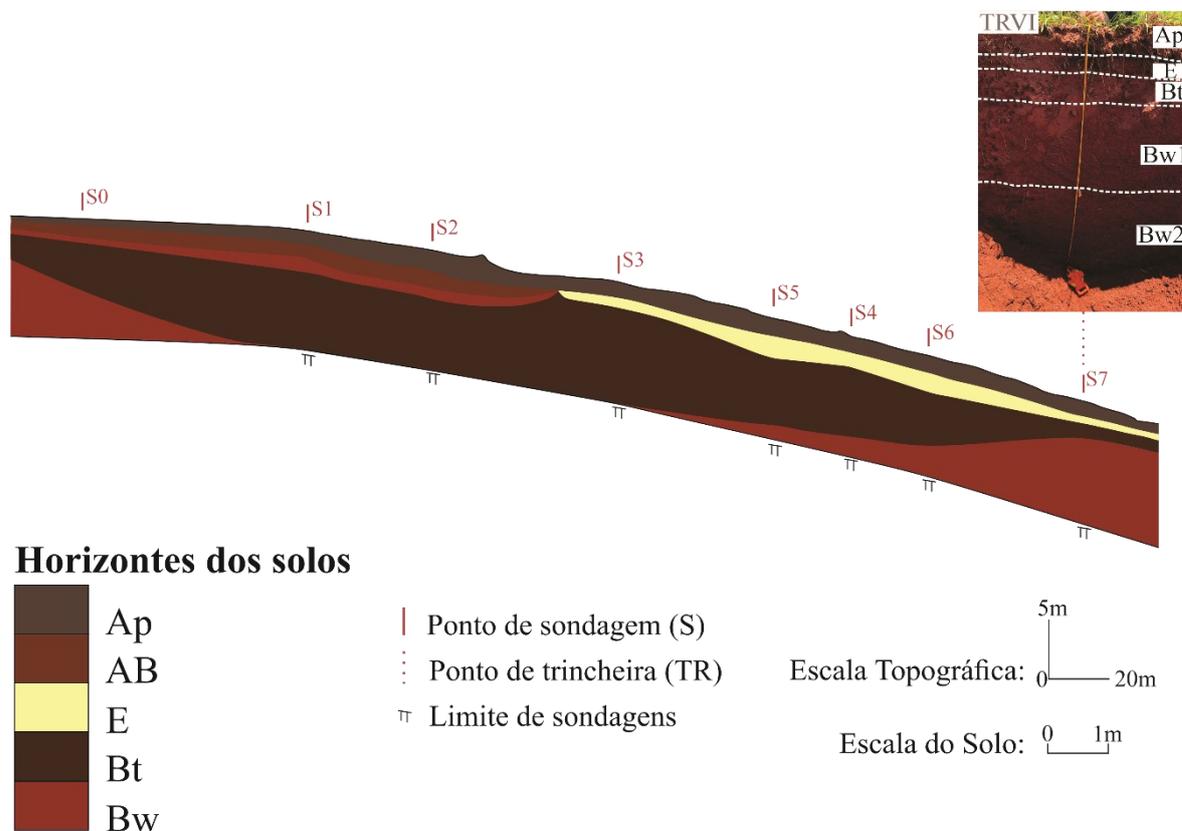
Fonte: O autor (2024).

4.4. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO B

O transecto B foi posicionado estrategicamente próxima à margem direita da área de drenagem da nascente, considerando o sentido jusante-montante. Essa topossequência possui 369 m de extensão e um desnível topográfico de 34 m, o que lhe confere declividade média de 9,3%. A morfologia é variada, alternando entre convexa-plana (S0), retilínea-plana (S1 – S3), côncava-planar (S4 -S5) e côncava-convergente (S6-S7).

Apresenta um sistema pedológico composto por Latossolo-Argissolo. Diferentemente da topossequência principal, no eixo A, onde foram selecionados cinco pontos amostrais para a disposição de perfis de solos, após o levantamento bidimensional, apenas uma trincheira foi aberta (TRVI) no transecto B, no ponto correspondente à S7, perpendicular à área degradada da bacia (TRIII) (Figura 34).

Figura 34 - Topossequência de solos do transecto B



Fonte: O autor (2024).

Por não apresentar mudanças significativas de uso da terra nas últimas décadas¹⁴ e por não ter sido afetada por incisões erosivas, como evidenciado na área central da bacia, o ponto amostral em que foi alocado o perfil VI serviu como base para a compreensão da organização dos horizontes pedológicos nessa posição da vertente. Assim, mesmo não servindo como área controle, uma vez que se situada em área de morfologia convexa e, portanto, apresenta características topográficas distintas que os denotam diferentes graus de intensidade de transformações pedogenéticas, os resultados obtidos com as análises morfológicas, físicas, químicas e hídricas dos horizontes pedológicos identificados nesta área permitiram identificar o solo que constituía a média-baixa encosta na área central da bacia, precedente à degradação e a consequente descontinuidade lateral de horizontes pedológicos superficiais e subsuperficiais.

Apesar de o perfil VI ter sido posicionado paralelamente à área degradada, as características topográficas (declividade e morfologia) marginais da bacia se diferenciam da área central. Logo, como apresentado anteriormente, as especificidades topográficas de determinado ponto interferem no funcionamento hidrológico e, consequentemente, nos processos pedogenéticos que atuam em sua cobertura pedológica. Com isso, a reconstituição dos solos da área degradada, através da análise do perfil alocado na base do transecto B, tem como foco principal entender a organização vertical dos volumes pedológicos, em detrimento do funcionamento propriamente dito, uma vez que este poderia não ser o mesmo para as duas áreas. Além disso, decifrar a qualidade física e dinâmica hídrica em área sob uso único de pastagem também permitiu compreender o funcionamento do compartimento que não passou pelo sistema de cultivo da cana-de-açúcar, bem como suas implicações sobre o funcionamento da nascente.

Portanto, os resultados obtidos dos parâmetros analisados no perfil VI serviram de aporte para uma caracterização pontual, referente aos horizontes pedológicos que constituem a base do eixo B. Assim, não foi realizado uma representação lateral das variáveis analisadas nas amostragens referente à trincheira (condutividade hidráulica, diâmetro médio ponderado dos agregados, densidade e porosidade), diferentemente das amostras coletadas a trado que foram obtidas ao longo de toda a topossequência e que tiveram seus resultados granulométricos representados lateralmente em perfis com curvas de isolinhas, igualmente ao apresentado para o transecto A.

¹⁴ Segundo a reconstituição histórica do uso da terra, representada pela figura 21, a área em que foi posicionado o transecto B, especialmente da sondagem 5 até a base da topossequência, se manteve com o uso de pastagem desde a erradicação do café na propriedade, no início da década de 1980.

Os levantamentos bidimensionais demonstram que o horizonte Ap se estende lateralmente por toda a topossequência de solos (Figura 34). No topo da topossequência, em cobertura latossólica (S0 à S2), sotoposto ao horizonte superficial, foi descrito um horizonte de transição, classificado como AB, sequenciado, verticalmente, por um horizonte Bw e Bt, respectivamente.

Da média em direção à parte inferior do transecto (S3 – S7), a sequência vertical consiste nos horizontes Ap, E, Bt e Bw. Todavia, o horizonte diagnóstico do Argissolo (Bt) é marcado por apresentar um espessamento significativo entre a S1 e a S3, surgindo, em média, a partir de 30 cm e passando dos 200 cm de profundidade. O horizonte B latossólico desaparece entre a S2 e S3, e volta a surgir lateralmente a partir da S5, com um espessamento significativo na S7 (60 cm+).

4.4.1. Caracterização macromorfológica, física, hídrica e química

Os resultados demonstraram pouca variação na morfologia dos horizontes pedológicos do perfil alocado na base do eixo B (TRVI). A cor é predominantemente vermelha (2,5YR 4/6 a 4/8), porém comporta oscilação para marrom-avermelhado (2,5YR 4/4) e marrom avermelhado escuro (2,5 YR3/4). A estrutura apresenta grau fraco a moderado, tamanho muito pequeno a grande, acompanhada de uma vasta variação no tipo de estrutura (Quadro 3).

Quadro 3 - Macromorfologia dos horizontes pedológicos na base do transecto B

Horiz. / Prof. (cm)	Cor	¹ Estrutura			² Textura	³ Consistência				Transição	⁴ Presença de Raízes	
		Grau	Tamanho	Tipo		Seco	Úmido	Molhado			Tamanho	Quantidade
								Plasticidade	Pegajosidade			
TRVI – Argissolo Vermelho												
Ap (0-20)	2,5YR 3/4	fr.	peq.	gran. a g. simp.	ar. fran.	solta	s.	ñ plást. a lig. plást.	ñ peg. e lig. peg.	plana difusa	fin. e m. fin.	abundante
E (20-30)	2,5YR 4/4	fr.	peq.	gran. a g. simp.	ar. fran.	solta	s. a m. fri.	ñ plást. a lig. plást.	ñ peg. e lig. peg.	plana gradual	fin.	abundante
Bt (30-50)	2,5YR 4/6	mod.	méd. a gran.	b. ang. e subang.	fran.-aren.	macia	m. fri.	lig. plást. a plást.	lig. peg. a peg.	plana gradual	fin.	abundante
Bw ₁ (50-120)	2,5YR 4/8	fr.	peq.	b. ang. pass. a gran.	fran.-aren.	solta a macia	m. fri.	lig. plást. a plást.	lig. peg. a peg.	plana difusa	fin.	abundante
Bw ₂ (120-215+)	2,5YR 4/8	fr.	m. peq.	gran. a g. simp.	fran.-aren.	solta	s.	lig. plást. a plást.	lig. peg. a peg.	x	m. fin.	poucas
¹ Estrutura: fr. – fraca, mod. – moderada, for. – forte, peq. – pequena, méd. – média, gran. – grande; b. – blocos, ang. – angulares, gran. – granular, subang. – subangulares, g. – grão, simp. – simples; ² Textura: ar. – areia, fran. – franca, aren. – arenosa, arg. – argilo; ³ Consistência: s – solta; lig. – ligeiramente, plást. – plástica, peg. – pegajosa; ⁴ Presença de Raízes: m. – muito, f. – fina.												

Fonte: O autor (2024).

Em termos de composição granulométrica, o perfil VI apresenta variação do conteúdo de argila, oscilando entre 72,2 e 176,7 g.Kg⁻¹ para o horizonte Ap e Bt, respectivamente. Nos mesmos horizontes, porém inversamente proporcional ao teor de argila, os valores de AT oscilaram entre 767,0 e 883,6 g.Kg⁻¹. O silte não apresentou comportamento padrão verticalmente, porém nota-se um leve incremento de seu teor no horizonte Bt (56,3 g.Kg⁻¹) e um declínio significativo no Bw₂ (30,1 g.Kg⁻¹) (Tabela 11).

A AF é predominante, variando verticalmente entre 602,8 e 122,1 g.Kg⁻¹ para os horizontes Bt e E, respectivamente. As demais frações relativas ao fracionamento da AT não apresentaram comportamento padrão, e assim como o transecto A, foram obtidos valores irrelevantes de AG e AMG (Tabela 11).

Tabela 11 - Granulometria, relação silte/argila, argila natural, grau de dispersão e floculação dos horizontes pedológicos na base do transecto transecto B

Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria								S/A	AN		
		AMF	AF	AM	AG	AMG	AT	S	A		ADA	GF	
		(g.Kg ⁻¹)										%	
TRVI – Argissolo Vermelho													
Ap	0-20	117,8	683,8	81,5	0,5	0,0	883,6	44,2	72,2	0,61	14,7	85,3	
E	20-30	122,1	685,7	56,8	0,3	0,2	865,1	48,4	86,5	0,56	17,7	82,3	
Bt	30-50	96,7	602,8	67,3	0,1	0,0	767,0	56,3	176,7	0,32	14,0	86,0	
Bw ₁	50-120	102,6	642,6	60,5	0,2	0,0	806,1	40,3	153,6	0,26	20,2	79,8	
Bw ₂	120-215+	100,6	627,3	70,1	0,1	0,0	798,1	30,1	171,7	0,18	0,6	99,4	

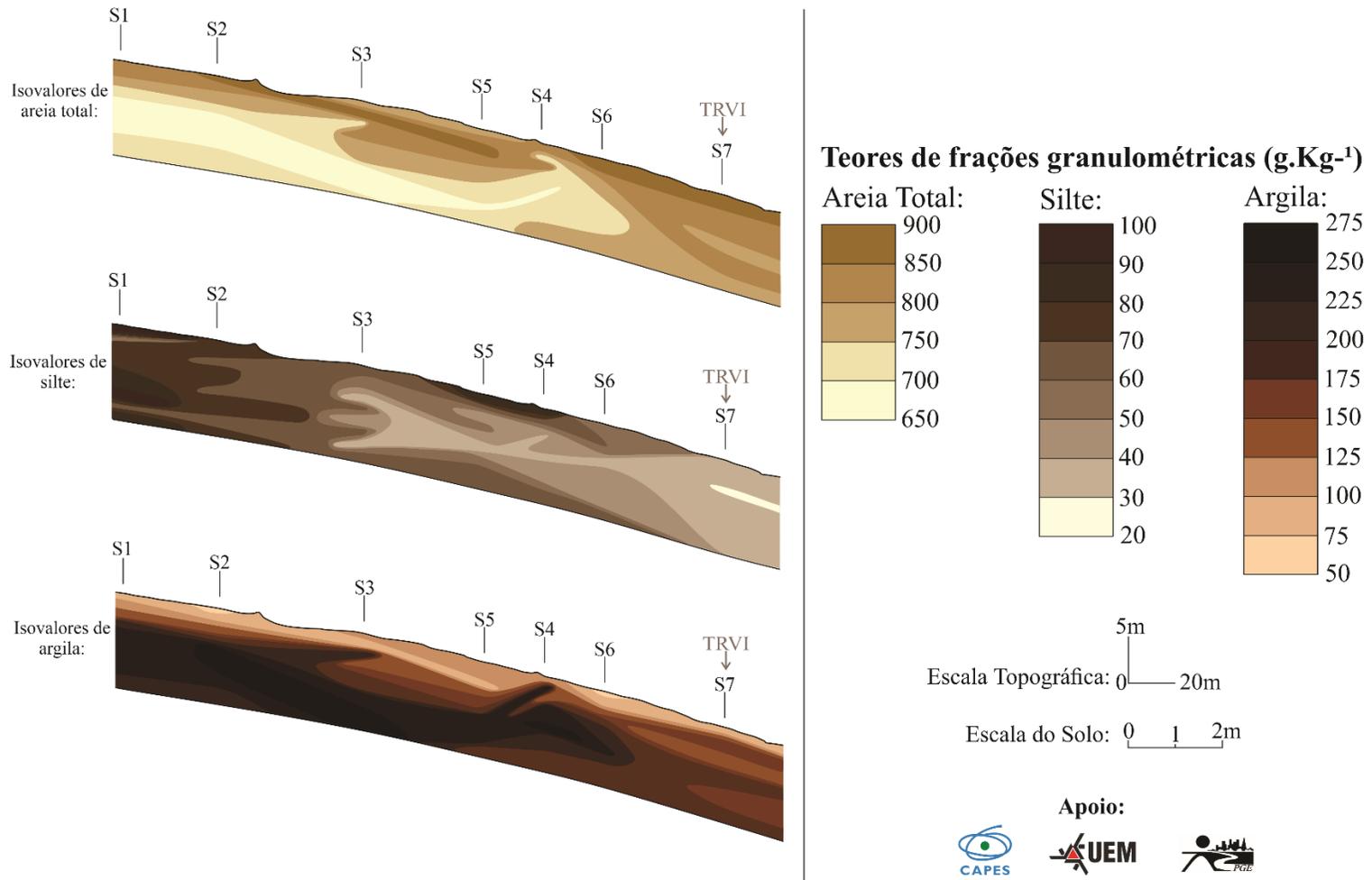
AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina, S = Silte; A = Argila; S/A – Relação silte/argila; AN – Argila Natural; ADA – Argila Dispersa em Água; GF – Grau de floculação.

Fonte: O autor (2024).

Embora o conteúdo de argila seja semelhante ao do horizonte Bw₂, o Bt difere deste pela sua caracterização morfológica, com estrutura formada por agregados em blocos angulares e subangulares, de tamanho médio a grande. Enquanto o B latossólico apresenta estrutura granular (microagregada), que se desfaz em grão simples (Quadro 3).

Os perfis de isovalores acusam a concentração da fração argila (>200 g.Kg⁻¹) em profundidade, a partir de 70 cm, que se estende da S1 à S6, enquanto os menores valores são encontrados em superfície (<100 g.Kg⁻¹), ao longo de toda a toposequência (Figura 35).

Figura 35 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto B



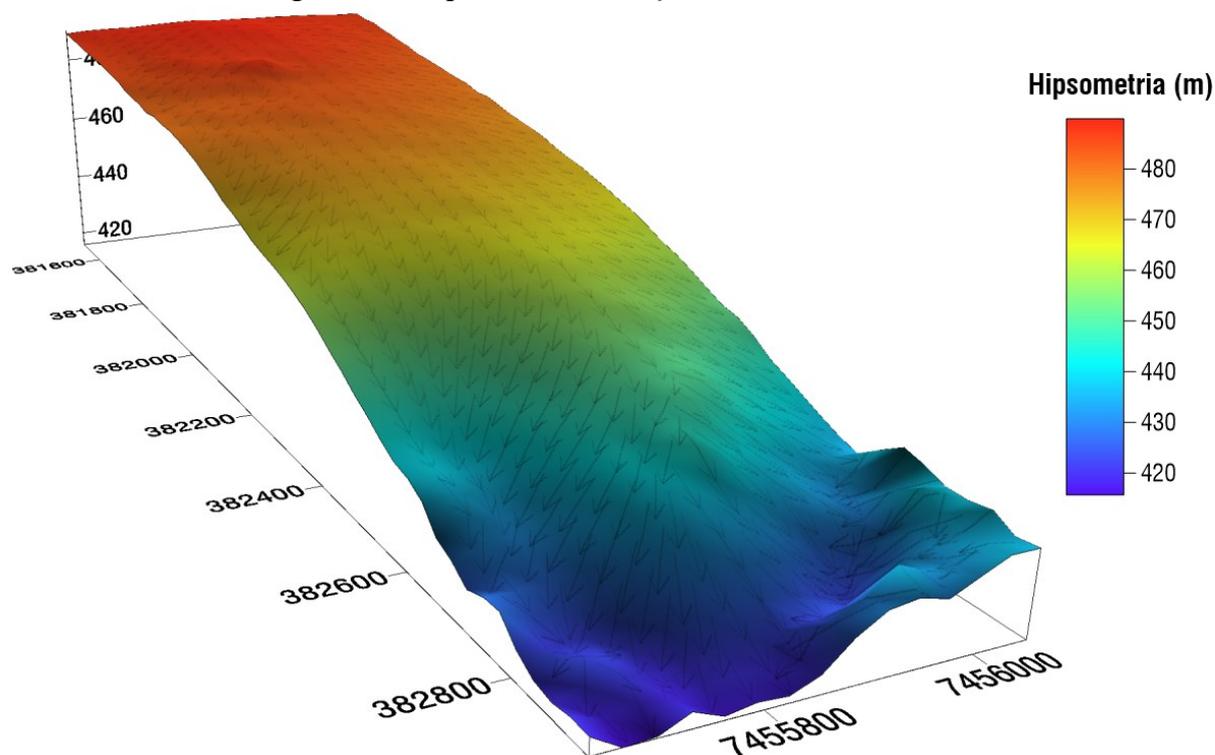
Fonte: O autor (2024).

Ainda que prevaleça o incremento do conteúdo de argila em subsuperfície ao longo de quase toda a topossequência e, com isso, a diminuição dos teores de AT, uma vez que são inversamente proporcionais, essa tendência é menos significativa no ponto em que foi alocada a S7, que apresenta, verticalmente, uma baixa faixa de variação, entre 50 e 200 g.Kg⁻¹ (Figura 35).

A diminuição da amplitude da faixa de variação dos teores da fração argila na base da topossequência (S7) pode estar associada às características hidrológicas, reguladas pelas características topográficas local. A partir da S4, os fluxos hídricos deixam de ocorrer preferencialmente em direção paralela e passam a atuar de forma transversal (\pm com ângulo de 110°) ao eixo central da concavidade (Figura 36). Esse arranjo do sistema hídrico pode, portanto, influenciar a ocorrência de processos pedogenéticos, como a e-iluviação, atenuando as transformações laterais do horizonte Bw em um horizonte B textural.

Em contrapartida, os fluxos hídricos que passam a se direcionarem para o interior da concavidade faz com que se desenvolvam “transformações pedogenéticas transversais”, por meio da mobilização de frações finas e elementos químicos dos horizontes superficiais e subsuperficiais da borda da bacia para o interior da concavidade. Esse comportamento pode ser observado nos resultados de granulometria na base do transecto B (TRVI), onde se evidencia horizontes superficiais (Ap e E) empobrecidos em argila (média de 79,3 g.Kg⁻¹), com baixo incremento no horizonte subjacente (Bt), que apresenta conteúdo de argila de 176,7 (g.Kg⁻¹) (Tabela 11), se comparado, por exemplo, ao perfil II analisado no transecto A, que possui direcionamento de fluxos hídricos puramente longitudinais ao plano horizontal da vertente e que com isso foi constatado maior acréscimo da argila no horizonte Bt (227,8 g.Kg⁻¹).

Figura 36 - Hipsometria e direção dos fluxos hídricos



Org.: O autor (2024).

Quanto a densidade do solo (D_s), o maior valor neste ponto amostral está associado ao horizonte de acúmulo de argila Bt ($1,73 \text{ g.cm}^3$), enquanto o valor mínimo foi verificado no Bw₂ ($1,50 \text{ g.cm}^3$), semelhante ao observado no Ap ($1,55 \text{ g.cm}^3$) (Tabela 12). A densificação do horizonte Bt, assim como destacado no transecto A, decorre do processo natural, onde a eluviação da fração argila ocorrida dos horizontes superficiais, e sua consequente concentração em profundidade, contribuem para o aumento da massa sólida neste horizonte, elevando sua densidade aparente (Silva, 1999).

Nota-se uma forte correlação negativa entre os resultados de D_s e os percentuais de porosidade do solo para o perfil, uma vez que o maior conteúdo de macroporos está associado ao horizonte Bw₂ (9,3%), enquanto a taxa mínima corresponde ao horizonte Bt (1,9%). Em termos de porosidade total (Pt), o menor percentual permanece para o horizonte de acúmulo de argila (29,5%), enquanto o horizonte Ap apresenta o maior índice, com 40,9% (Tabela 12).

O aumento da Pt está relacionado, possivelmente, aos efeitos das raízes das gramíneas, que contribuem para o aumento da microporosidade (36,7%) e, conseqüentemente, da porosidade total em superfície, levando a uma diminuição gradativa em profundidade (Tabela 12).

Tabela 12 - Porosidade, densidade do solo e diâmetro médio ponderado dos agregados dos horizontes pedológicos na base do transecto B

Horizonte	Profundidade (cm)	Mi	Ma	Pt	Ds
		----- (%) -----			(g.cm ³)
TRVI – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	36,7	4,2	40,9	1,55
E	20-30	32,9	3,7	36,6	1,58
Bt	30-50	27,6	1,9	29,5	1,73
Bw1	50-120	29,5	7,0	36,5	1,61
Bw2	120-215+	29,2	9,3	38,5	1,50

Mi = Microporosidade; Ma = Macroporosidade; Pt = Porosidade total; Ds = Densidade do solo.

Fonte: O autor (2024).

A menor taxa de agregação está relacionada ao Bw₂ (DMPa=0,61 mm), característica deste horizonte pedológico, que apresenta uma estrutura “microagregada”. Em seguida, este horizonte vem acompanhado pelos horizontes Ap e E, com ambos apresentando DMPa de 0,70 mm. Apesar de apresentarem maiores teores de carbono orgânico (9,56 e 7,5 g/dm³, respectivamente), a taxa de agregação diminui nesses horizontes, devido à redução do conteúdo de argila em superfície. Em contrapartida, o incremento de argila (176,7 g.Kg⁻¹) e a densificação natural do horizonte Bt (1,73 g.cm³) contribuem para que este horizonte apresente o maior índice de DMPa para o perfil (1,58 mm) (Tabela 13).

Tabela 13 - Diâmetro médio ponderado dos agregados, argila, carbono orgânico e densidade do solo dos horizontes pedológicos na base do transecto B

Horizonte	Profundidade (cm)	DMPa (mm)	Argila g.Kg ⁻¹	C.O g/dm ³	Ds (g.cm ³)
TRVI – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	0,70	72,2	9,56	1,55
E	20-30	0,70	86,5	7,5	1,58
Bt	30-50	1,58	176,7	5,91	1,73
Bw ₁	50-120	0,90	153,6	4,5	1,61
Bw ₂	120-215+	0,61	171,7	3,29	1,50

DMPa = Diâmetro médio ponderado dos agregados; C.O = Carbono orgânico; Ds = Densidade do solo.

Fonte: O autor (2024).

Em relação à caracterização física-hídrica, nota-se uma relação direta entre os valores de porosidade com a densidade do solo e com os valores de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}). Dessa maneira, a menor taxa de percolação da água está associada ao horizonte Bt (2,41 mm/h), que apresentou o menor percentual de Ma (1,9%) para o perfil. Os demais horizontes apresentaram um aumento gradativo anterior e posterior ao horizonte B textural, ou seja, os horizontes Ap e E exibiram K_{sat} de 100,95 e 60,95 mm/h, enquanto no Bw₁ e Bw₂ os valores foram de 98,39 e 106,08 mm/h, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 - Condutividade hidráulica saturada, coeficiente de variação e classes de permeabilidade dos horizontes pedológicos na base do transecto B

Horizonte	Profundidade (cm)	K_{sat} (mm/h)	Ma ----- (%) -----	CV	*Classe de permeabilidade
TRVI – Argissolo Vermelho					
Ap	0-20	100,05	4,2	19,59	Moderada
E	20-30	60,95	3,7	27,42	Lenta a Moderada
Bt	30-50	2,41	1,9	72,1	Muito Lenta
Bw ₁	50-120	98,39	7,0	21,20	Moderada
Bw ₂	120-215+	106,08	9,3	15,31	Moderada

K_{sat} = Condutividade hidráulica saturada; CV = Coeficiente de variação. *Classes de permeabilidade proposta por Beutler et al. (2001).

Fonte: O autor (2024).

Assim, considerando a percolação média de 80,5 mm/h para os horizontes Ap e E, a redução vertical no horizonte Bt (2,41 mm/h) foi de trinta e três vezes. Essa drástica diminuição da infiltração vertical leva à formação de fluxos hídricos laterais no topo do horizonte Bt, condicionado, principalmente, pela obstrução da porosidade resultante do processo de densificação natural do solo, corroborando com os resultados encontrados por Eltz; Mehl; Reichert, 2001.

Em síntese, correlacionando as características físico-hídricas da área destinada exclusivamente ao uso de pastagem nas últimas décadas com aquela utilizada com o cultivo da cana-de-açúcar (transecto A), evidencia-se que, diferentemente das áreas que passaram por mecanização agrícola (perfil II - Argissolo Vermelho), a área com pastagem (TRVI) apresenta horizonte superficial (Ap) e subsuperficial (E) significativamente menos compactados, o que, conseqüentemente, aumenta o volume de poros que contribuem para um bom funcionamento hídrico.

Embora se tenha realizado uma análise comparativa com o Argissolo Vermelho do perfil II (cana) por se tratar da mesma classe de solo do perfil VI (pastagem), deve-se destacar que o perfil I, em cobertura latossólica, que também passou pelo sistema de cultivo da cana, igualmente apresentou horizontes superficiais e subsuperficiais (Ap e AB) mais compactados em relação à área de pastagem (transecto B).

A maior dificuldade de infiltração no perfil VI em subsuperfície está associada ao horizonte Bt, que apresenta processo de densificação natural, enquanto na área cultivada as menores taxas de infiltração ocorrem nos horizontes que sofrem compactação mecânica pelo tráfego de máquinas agrícolas (Ap, AB e E). Assim, é possível observar que o comportamento hídrico em área de pastagem é dependente de suas características naturais, preconizadas pelos processos pedogenéticos. Já nas áreas ocupadas pelo cultivo de cana-de-açúcar, a circulação

hídrica é puramente condicionada pelas interferências da aplicação das práticas de manejo no solo.

Em termos de composição química, os horizontes pedológicos do perfil VI apresentam baixa variação de pH em água (H₂O), com valores entre 5,50 e 6,20, o que lhes conferem acidez moderada, de acordo com a classificação proposta pela Embrapa (2018). Os índices de acidez mais elevados estão associados aos horizontes E e Bt, enquanto a redução da acidificação está vinculada ao horizonte Bw₂ (Tabela 15).

Quanto aos cátions trocáveis Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, de modo geral, não apresentam comportamento padrão. Contudo, o elemento mais expressivo é o Ca²⁺, variando entre 1,07 e 1,57 cmol./dm³, para os horizontes Bt e Bw₂, respectivamente.

O maior teor de carbono orgânico está associado ao horizonte superficial Ap, com 9,56 g/dm³, seguido de uma diminuição progressiva em profundidade, chegando a 3,29 g/dm³ no Bw₂. Apresenta saturação por bases <50,0%, o qual lhe confere caráter distrófico, conforme a Embrapa (2018), e segundo o mesmo manual, apresenta atividade da fração argila baixa (Tb), abaixo de 27,0 cmol.Kg⁻¹ (Tabela 15).

Tabela 15 - Composição química dos horizontes pedológicos na base do transecto B

Horizonte	Profundidade (cm)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	P	C	M.O	pH	CTC		V	Valor S	AFA*		
											Total	Efetiva					
		cmol./dm ³				mgP/dm ³		g/dm ³		CaCl ₂	H ₂ O	SMP	cmol./dm ³		%	cmol.Kg ⁻¹	
TRVI – Argissolo Vermelho distrófico abruptico																	
Ap	0-20	0,07	1,26	0,54	0,00	3,18	7,13	9,56	16,48	5,00	5,70	6,60	5,05	1,87	37,0	1,87	-
E	20-30	0,03	1,25	0,39	0,07	2,99	1,61	7,5	12,93	4,80	5,50	6,65	4,73	1,74	35,3	1,67	-
Bt	30-50	0,03	1,07	0,34	0,05	2,69	1,27	5,91	10,19	4,80	5,50	6,80	4,18	1,49	34,4	1,44	23,7
Bw ₁	50-120	0,02	1,26	0,47	0,00	2,64	1,61	6	10,35	5,10	5,80	6,85	4,39	1,75	39,9	1,75	28,6
Bw ₂	120-215+	0,02	1,57	0,38	0,00	2,45	1,27	3,29	6,67	5,50	6,20	6,95	4,42	1,97	44,6	1,97	25,7

Nota: K⁺ – Potássio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; Al³⁺ - Alumínio; P – Fósforo; C – Carbono; M.O – Matéria Orgânica; CTC – Capacidade de troca catiônica; V% - Saturação de bases; Valor S – Soma de Bases; Valor T – Atividade da fração argila. *Como proposto pela Embrapa (2018) a atividade da fração argila (AFG) não foi calculada para os horizontes com classes texturais arenosa e franco arenosa.

Fonte: O autor (2023).

Frente aos resultados das análises morfológicas, físicas e químicas dos horizontes pedológicos do perfil VI, este ponto experimental apresenta um Argissolo Vermelho Ta Abrupto latossólico, conforma demonstrado no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação do solo do descrito na base do transecto B

TR	Ordem	Subordem	Grande Grupo	Subgrupo	Classificação
VI	Apresenta um horizonte de acúmulo de argila, classificado como B textural (RT=2,2) = Argissolo	Cor com matiz 2,5 = Vermelho	Apresenta argila de atividade baixa ($> 27,0 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) e Saturação por Bases (V%) $< 50\%$	Apresenta relação mudança textural abrupta, dentro de 7,5 cm = Abrupto Apresentar um B latossólico sotoposto ao horizonte B textural = latossólico	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico Abrupto latossólico

Fonte: O autor (2024).

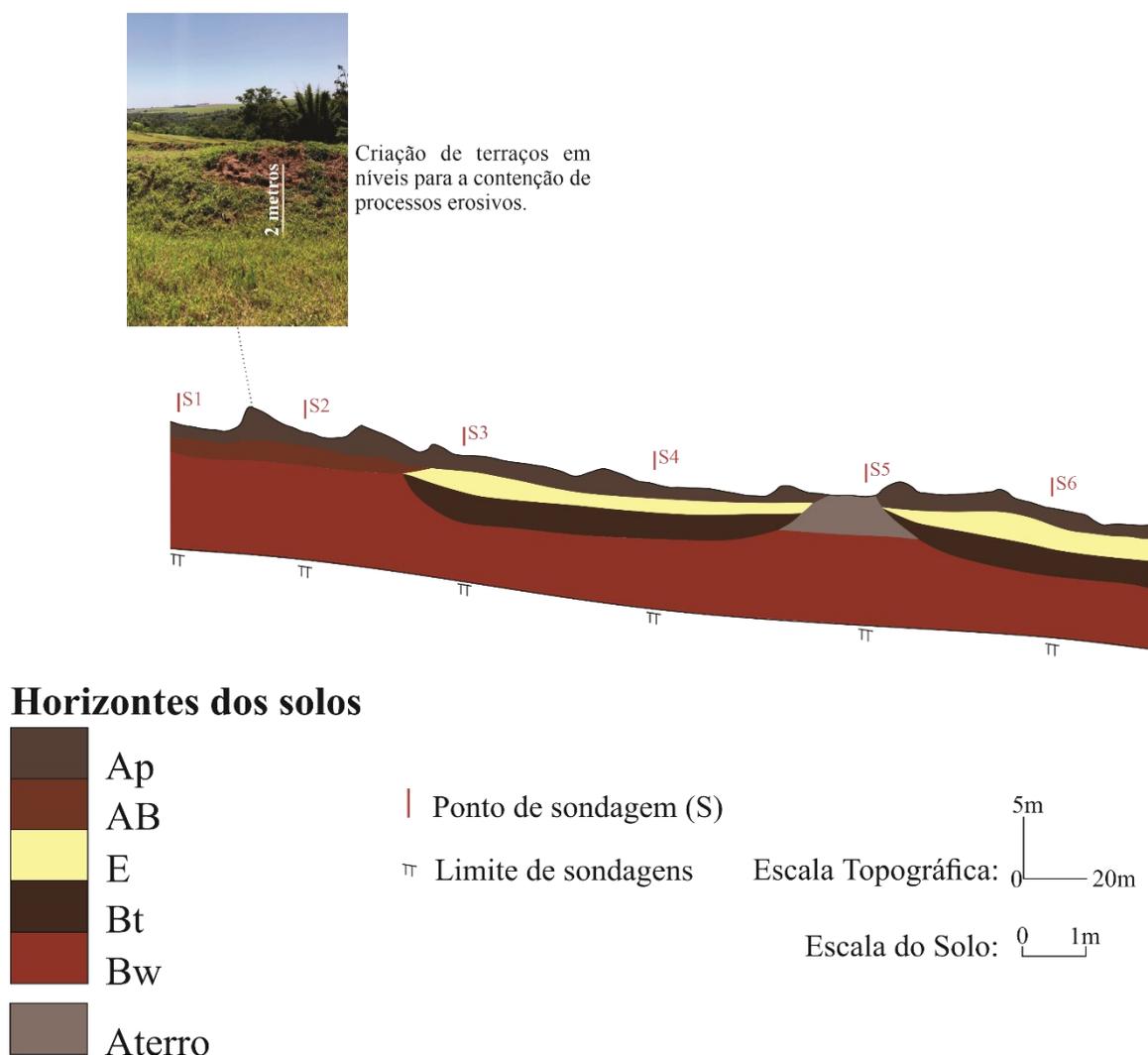
4.5. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DO TRANSECTO C

O transecto C foi posicionado na margem oposta em relação ao eixo B, à esquerda da área de drenagem da nascente, considerando uma observação jusante-montante. Possui 309 m de extensão, desnível topográfico de 16 m e declividade média de 5,2%. Em termos de morfologia do terreno, detém predomínio da forma côncava-planar (S1 – S4), alterando para convexa-convergente na base (S5 e S6).

Apresenta um sistema pedológico composto por Latossolo-Argissolo. Entretanto, uma parcela do transecto também foi atingido pelos processos erosivos desenvolvidos na propriedade em 2016, especificamente no ponto em que foi alocada a S5. Assim, o recorte dessa sequência topográfica de solos também exhibe a descontinuidade lateral dos horizontes Ap, E e Bt do Argissolo Vermelho, em resposta ao aterramento das incisões erosivas (Figura 37).

A declividade menos acentuada, associada a uma pequena concavidade no terço médio do transecto C, faculto o direcionamento de fluxos hídricos concentrados para essa área da topossequência e da bacia, o que contribuiu para o desenvolvimento das formas erosivas. Em razão disso, nota-se que, para a contenção e prevenção do desenvolvimento de novas formas erosivas, foram observados terraços em níveis construídos pelo proprietário da terra, que excedem 2 metros de altura (Figura 37).

Figura 37 - Topossequência de solos do transecto C



Fonte: O autor (2024).

Em termos de organização e sucessão dos volumes pedológicos, o transecto C apresenta um horizonte Ap com espessura média de 20 cm, que se estende por quase toda a topossequência, com rompimento de continuidade lateral na S5 que, assim como no transecto A, apresenta “volume pedológico” denominado como aterro em superfície, até 60 cm de profundidade.

Sotoposto ao Ap, entre a S2 e a S3, ocorre um horizonte de transição classificado como AB, com espessura média de 25 cm. Esse volume pedológico é sucedido lateralmente, a partir da S3, por um horizonte com características de eluviação (E), que se estende até a base da topossequência. Todavia, esse horizonte (E) também desenvolve descontinuidade lateral na S5, assim como observado no horizonte superficial (Ap), bem como ao seu subjacente Bt, que ocorre de forma paralela ao volume iluvial, observado nos mesmos pontos amostrais, com espessura média de 40 cm (Figura 37).

O B latossólico (Bw) ocorre ao longo de todo o eixo B. Contudo, a partir da S3 se apresenta abaixo do horizonte de acúmulo de argila e ao aterro na S5.

4.5.1. Características físicas

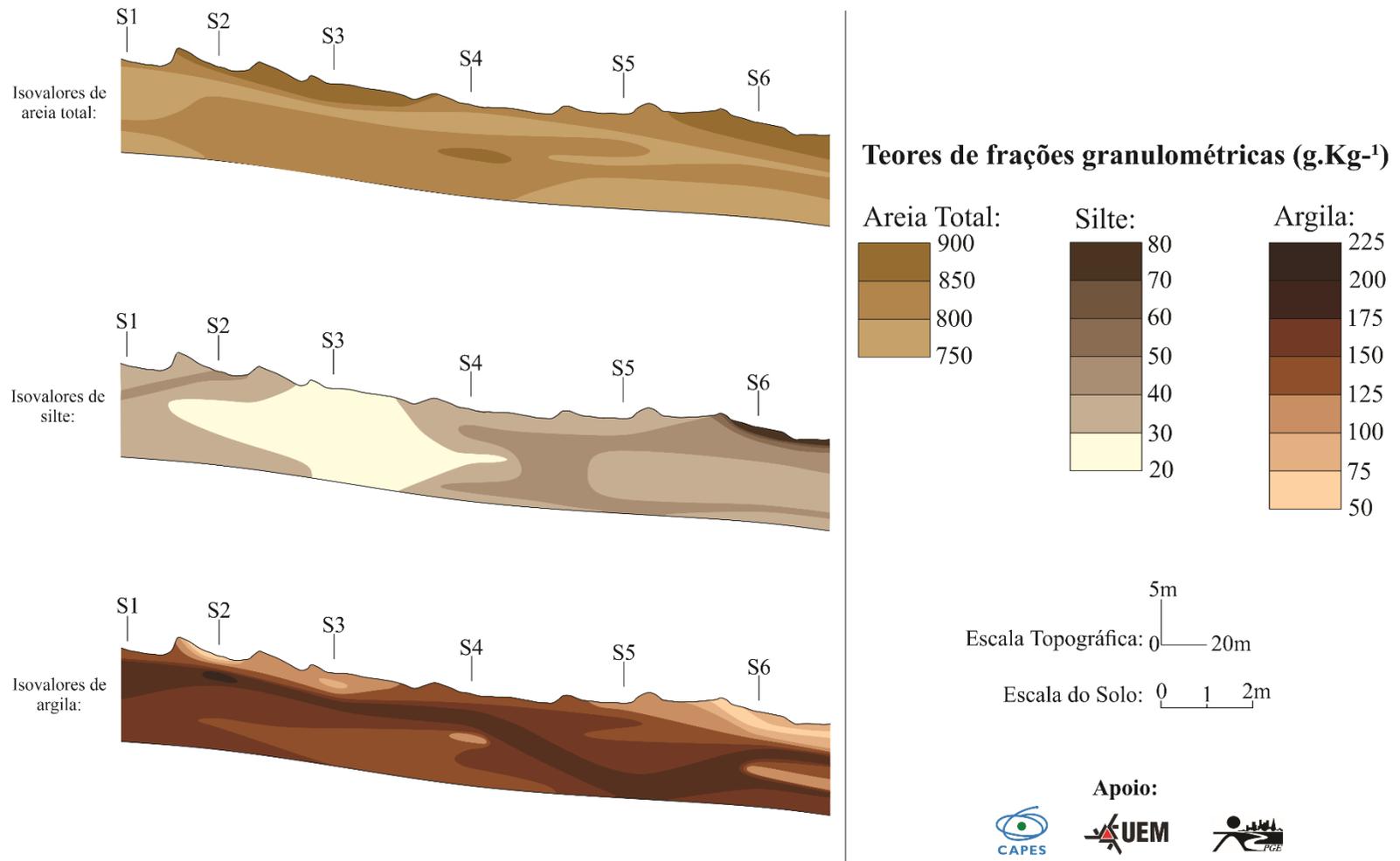
Em resposta a baixa declividade e a menor oscilação na morfologia do terreno, o transecto C, embora apresente o mesmo sistema pedológico das outras topossequências analisadas, exibe uma baixa amplitude na variação dos constituintes granulométricos ao longo de todo o transecto, oscilando entre 750 e 900 g.Kg⁻¹ para AT, 20 e 80 g.Kg⁻¹ para silte e 50 e 225 g.Kg⁻¹ para argila (Figura 38). Além disso, também apresenta menor amplitude entre os teores de frações granulométricas se comparada aos demais recortes topográficos analisados, uma vez que a topossequência A, por exemplo, exibe uma faixa de variação para o conteúdo de argila entre 50 e 275 g.Kg⁻¹.

Contudo, ainda que mais sucinta, nota-se uma leve concentração dos teores de argila em profundidade ao longo de toda a topossequência, associado, principalmente, a um horizonte Bt, que toma maiores profundidades a partir da S4 (Figura 38). Entretanto, na S1 e S2 não se obtém relação textural suficiente para caracterizar esse ponto como Argissolo Vermelho, que surge a partir da S3.

Assim como observado nos transectos A e B, ocorre perda de argila na base da topossequência C até 60 cm de profundidade (<125,0 g.Kg⁻¹), o que leva ao aumento dos teores de areia (>850,0 g.Kg⁻¹) (Figura 38).

A distribuição da fração silte não apresentou comportamento padrão, com exceção da S3, o qual se obteve, verticalmente, valores homogêneos e diminutos (<30,0 g.Kg⁻¹). Em contrapartida, o teor máximo dessa fração ocorre em superfície, na base do transecto (S6), com valores >70,0 g.Kg⁻¹ (Figura 38).

Figura 38 - Perfis com curvas de isovalores de frações granulométricas do transecto C

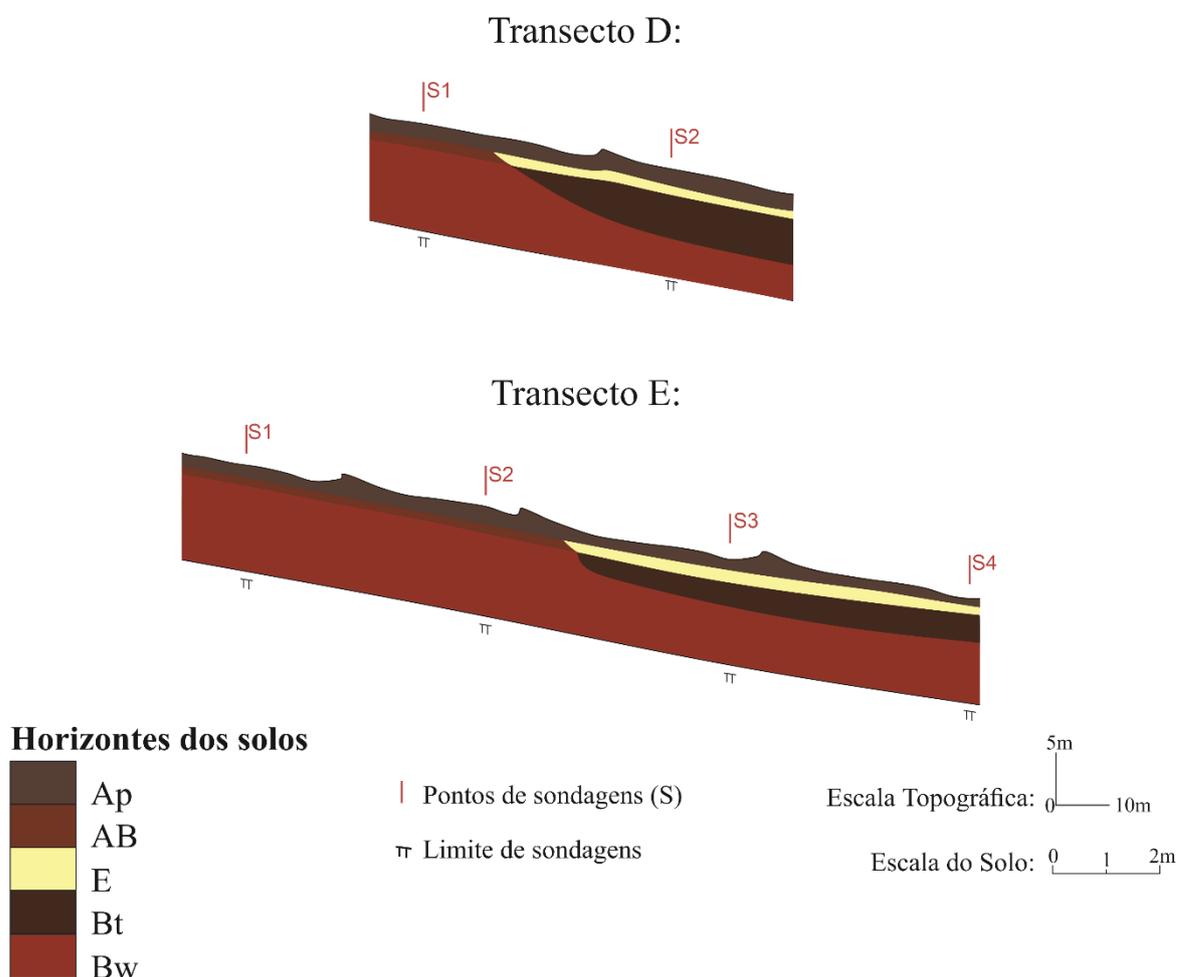


Fonte: O autor (2024).

4.6. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SOLOS DOS TRANSECTOS D/E

Os transectos D e E, com 80 e 150 metros, respectivamente, apresentam menor extensão se comparados às demais seções analisadas (Figura 39). Foram posicionados em pontos estratégicos entre o transectos A-B e A-C, com a finalidade de encontrar o ponto de transição e delinear, através da curva de isodiferenciação, a ocorrência do horizonte Bt entre as topossequências principais.

Figura 39 - Topossequência de solos dos transectos D e E



Fonte: O autor (2024).

Embora se tenha realizado análises granulométricas (Apêndice A) de modo que fosse confirmado os levantamentos realizados a trado, para essas transecções não foram elaborados perfis com curvas de isovalores das frações granulométricas areia, silte e argila.

4.7. ORGANIZAÇÃO E FUNCIONAMENTO TRIDIMENSIONAL DA COBERTURA PEDOLÓGICA

Para uma compreensão mais clara dos limites pedológicos, bem como da distribuição espacial dos volumes pedológicos com maior grau de vulnerabilidade à ação erosiva, foram selecionadas cinco curvas de isodiferenciação (Figura 40):

- A curva 1 (Vermelha) representa o aparecimento do horizonte de caráter eluvial (E) em consonância ao desaparecimento lateral do horizonte AB, bem como o surgimento de um horizonte de acúmulo de argila em profundidade (Bt). Indica, portanto, a transformação lateral do Latossolo para o Argissolo Vermelho. Essa transição ocorre, essencialmente, na mudança de morfologia retilínea-planar para côncava-plana, assim como segue o aumento de declividade (>8%);

- A curva 2 (Azul) mostra o desaparecimento do Ap e E, devido ao rompimento dos horizontes superficiais e subsuperficiais por ações erosivas e pelo revolvimento em superfície e pelo aterramento realizado na área central da bacia;

- A curva 3 (Verde) retrata o desaparecimento do horizonte Bt. Assim, quando há ausência do horizonte de acúmulo de argila no perímetro da curva 2, seu desaparecimento está relacionado à área aterrada, e quando fora, este apresenta um horizonte B latossólico ou Ap em sobreposição. Além disso, destaca-se que o desaparecimento do referido horizonte ocorre apenas no interior dessa curva (3), associada à ocorrência do aterro, uma vez que, desde o seu aparecimento (curva 1), se estende até a baixa encosta. A degradação da área e o surgimento de novas discontinuidades faz com que essa curva de isodiferenciação, assim como a precedente (2), não apresente correlação direta com as mudanças de morfologia do terreno, tampouco com declividade;

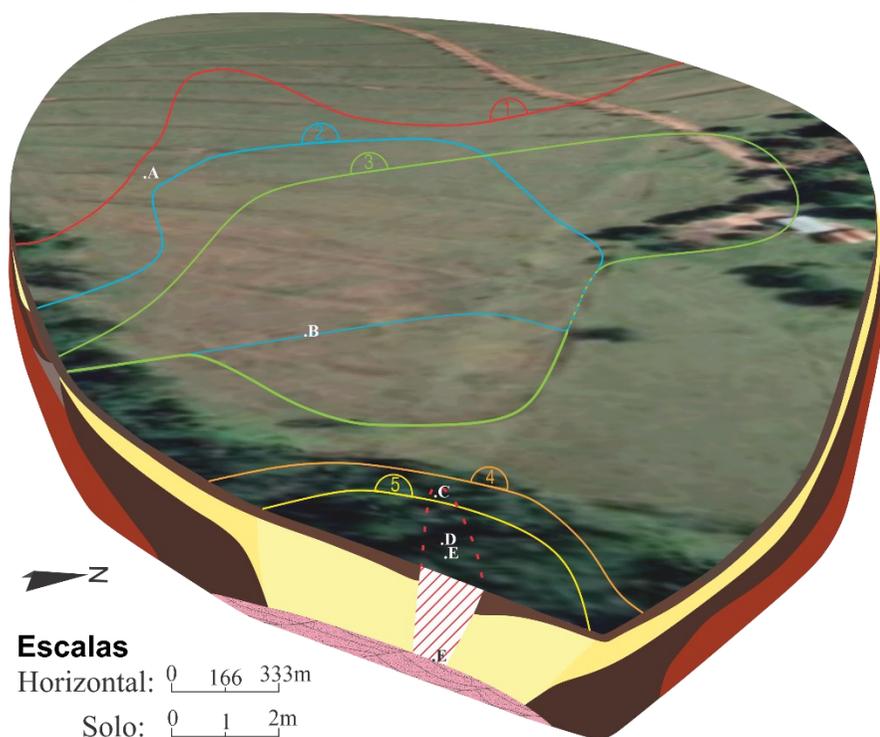
- A curva 4 (Laranja) constitui o fim do horizonte Bw em profundidade, sendo sucedido lateralmente por um horizonte Bt, associado à mudança da morfologia do terreno de côncava-planar para côncava-convergente;

- A curva 5 (Amarela) delimita o fim dos horizontes E e Bt de uma cobertura argissólica e o surgimento do volume C da cobertura quartzarênica. Essa transformação lateral ocorre exclusivamente em relevo com morfologia côncava-convergente, caracterizado topograficamente pela maior concentração e acumulação da circulação hídrica, que rege as transformações pedogenéticas por meio da potencialização do transporte de matéria e soluções (Valeriano, 2008). Neste caso, é possível notar a lixiviação da fração argila e a formação de horizontes de textura muito arenosa.

Figura 40 - Representação esquemática da organização tridimensional da cobertura pedológica da área de drenagem da nascente Água da Fonte

Limites Pedológicos

- ① Aparecimento dos horizontes E e Bt e desaparecimento do horizonte AB
- ② Desaparecimento do horizonte E
- ③ Desaparecimento do horizonte Bt
- ④ Fim do horizonte Bw
- ⑤ Aparecimento do horizonte C e fim dos horizontes E e Bt



Horizontes dos solos

	A
	Ap
	AB
	E
	C
	Bt
	Bw
	Aterro

	Erosão
	Limite da erosão
	Arenito da Fm. Goio Erê



Ⓐ Concentração de água na superfície da cobertura argissólica, resultante da alta densidade do solo e baixo índice de porosidade.



Ⓑ Erosão regressiva no setor médio da área da bacia, no contato dos horizontes Ap/E e o aterro.



Ⓒ Erosão regressiva na baixa encosta, entre a sucessão lateral do Argissolo para o Neossolo Quartzarênico.



Ⓓ Ponto de exfiltração (formação da nascente), margeada por uma baixa densidade vegetal.



Ⓔ Ponto de afloramento do arenito da Formação Goio Erê.

Fonte: O autor (2024).

Ao final da integralização dos dados obtidos nos levantamentos bidimensionais, se obteve um mapeamento na escala de 1:10000, mas em algumas áreas se chegou a 1:5000. Todavia, é relevante destacar que, como salientado por Fernandes Barros et al. (1983), mesmo que seja um mapeamento ao nível de detalhe, o espaço entre as curvas de isodiferenciação não representa ambientes pedologicamente uniformes, uma vez que ocorre a variação da espessura dos horizontes, o desenvolvimento de revestimentos argilosos, diferenciações micromorfológicas, entre outros.

No entanto, na escala mapeada, é possível visualizar de modo integrado que a cobertura latossólica se restringe ao topo da área de drenagem da nascente analisada. Embora esse compartimento seja constituído por solos de composição textural verticalmente homogênea, é marcado pela ocorrência de horizontes superficiais e subsuperfícies compactados pelos sistemas de manejo da cana-de-açúcar, onde a utilização de máquinas agrícolas provocaram, além do aumento da densidade do solo, a diminuição da porosidade nos horizontes Ap e AB. As mudanças estruturais presenciadas em tais horizontes pedológicos refletiram diretamente na condutividade hidráulica, que, devido à dificuldade de infiltração, desenvolve escoamentos hídricos em superfície.

Pode-se considerar que entre as curvas 1 e 4, área associada ao Argissolo Vermelho e ao aterro, se caracteriza como a segunda área mais sensível à ação erosiva, pois além de apresentar volumes pedológicos (aterro, E e Bt) com mudanças estruturais significativas, resultante da mesma problemática enfrentada pela cobertura latossólica (manejo), este compartimento é constituído, em maior parte, por solos com gradiente textural vertical bem demarcado (Argissolo). Assim, as características intrínsecas à natureza dos solos, que resultam na formação de um horizonte menos permeável (Bt), potencializado pelo manejo, cria um ambiente favorável para o desenvolvimento de fluxos hídricos em subsuperfície, induzindo os horizontes superficiais (Ap) a atingirem seu ponto de saturação mais rapidamente e, portanto, a formação de fluxos superficiais provenientes do excedente hídrico (Figura 40 - A).

Além disso, a média/baixa vertente, sobretudo em seu eixo central, perpendicular ao ponto de exfiltração da água subterrânea para a superfície, trata-se um uma área hidrogeomorfológica sensível, onde o aumento progressivo da declividade em direção a baixa encosta, juntamente com surgimento da forma de terreno côncava, gera a concentração de fluxos hídricos (direcionamento e potência de escoamento) superficiais e de umidade em subsuperfície, que ao convergirem, podem resultar no rompimento dos horizontes superficiais (Figura 40 - B).

Considerando as características físicas, bem como a interação dos solos ao longo da encosta, os locais compreendidos pelas curvas 4 e 5 são as áreas mais sensíveis ao desenvolvimento de incisões erosivas (Figura 40 - C). Além de apresentarem volumes pedológicos de textura arenosa e ausência de estrutura, estão sujeitas ao recebimento de grandes volumes de água advindas das áreas mais altas, que ganham energia em direção à baixa vertente, em virtude do aumento gradativo da declividade. Portanto, sofre o efeito da concentração hídrica que ocorre na concavidade, a qual surge a partir da média/baixa vertente, seguindo a linha de fluxo subterrânea que dá origem à nascente no sopé da encosta (Figura 40 - D).

A diminuição da taxa infiltração na área de drenagem da nascente e o desenvolvimento do escoamento superficial, faz com que, no sopé da encosta, onde o fluxo hipodérmico (subsuperficial) ressurgente (fluxo de retorno), possivelmente se desenvolva um aumento repentino do fluxo subsuperficial. Segundo o estudo de Valente e Gomes (2005), esse processo, além de levar à intensificação do surgimento e evolução de feições erosivas no sopé da vertente, condiciona a nascente a apresentar uma alta vazão em um curto período, que tende a diminuir com o tempo, quando o abastecimento do lençol já não é tão significativo. No entanto, para uma melhor compreensão dos efeitos da qualidade física dos solos sobre a dinâmica hidrológica da nascente, levando assim à comprovação de tal dedução, necessitaria a medição de sua vazão ao longo de um determinado período – preferencialmente sazonal ou mensal.

Assim, o aumento do número de processos erosivos, evidenciados no sopé da vertente, resultante da interação sistêmica dos solos em sua área de abastecimento, tem provocado alterações substanciais no funcionamento da nascente. Com isso, além da possibilidade de ocorrer o rebaixamento do nível do lençol freático, em resposta a diminuição na entrada da água no sistema pedológico em sua área de abastecimento, a voçoroca observada no sopé da vertente, em cobertura quartzarênica, parece estar resultando na regressão do ponto de exfiltração da nascente na vertente.

As incisões erosivas têm levado ao afloramento do arenito da Formação Goio Erê em superfície (Figura 40 - E), onde a água exfiltrada pode se alterar do tipo pontual para o difuso, seguindo a classificação proposta por Faria (1997). Dessa maneira, a mudança no tipo de exfiltração pode levar, também, à dificuldade na captação da água para o abastecimento da propriedade.

Além disso, ainda que esteja enquadrada em uma RPPN, observa-se a baixa densidade de vegetação no entono da nascente (Figura 40 - D), que pode elevar o potencial erosivo da área. Portanto, o modelo tridimensional da cobertura pedológica, representando espacialmente as respectivas áreas de maiores vulnerabilidades, juntamente com o mapeamento dos índices

hidrológicos e topográficos, demonstra que, embora a área considerada mais vulnerável (cobertura quartzarênica) esteja recoberta por vegetação nativa, porém em estado de degradação, para que se promova a conservação e um bom funcionamento da nascente, além de priorizar a recomposição da vegetação em seu entorno, a APP deveria avançar sobre toda a concavidade da vertente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a área de drenagem da nascente Água da Fonte apresenta um sistema pedológico composto por Latossolo-Argissolo-Neossolo Quartzarênico, marcado por uma ruptura de sucessão lateral na média encosta devido ao desenvolvimento de processos erosivos em 2016, ao qual causou a remoção dos horizontes superficiais e subsuperficiais (Ap, E e Bt) e que posteriormente foram preenchidos por um aterro.

Dentre os principais fatores que contribuíram para a degradação dos solos através dos processos erosivos, destacam-se: a) as suas inerentes características pedológicas, a circulação hídrica interna; b) as alterações no estado físico-hídrico dos solos em resposta a implantação do sistema de manejo da cana-de-açúcar; c) a incidência de grandes volumes de chuva entre 2015/2016, em associação ao fenômeno anômalo El Niño-Oscilação Sul; d) as características do relevo, que, além de influenciarem diretamente os processos pedogenéticos, também potencializam ao escoamento superficial e a concentração de umidade no solo, contribuindo para a maior ou menor grau de potencialidade erosiva.

O sistema pedológico que constitui a área de abastecimento da nascente se encontra em desequilíbrio pedobioclimático, uma vez que compreende o transporte de matéria e soluções no sentido vertical e lateral do longo da encosta, condicionadas pela circulação hídrica. Em termos de vulnerabilidade, destaca-se a cobertura quartzarênica, que, embora bem drenada, é formada essencialmente por volumes pedológicos de textura arenosa (A e C) e de baixo teor de agregação.

O Argissolo Vermelho em transformação na baixa encosta apresenta vulnerabilidade semelhante, uma vez que, além de apresentar, também, horizontes com as mesmas características físico-hídrica do Neossolo Quartzarênico (A e E), sotopostos a estes apresenta o horizonte Bt que reduz a velocidade de infiltração e intensifica os escoamentos hídricos laterais em subsuperfície, elevando a probabilidade do desenvolvimento de incisões erosivas.

Além da vulnerabilidade natural dos solos o sistema de cultivo da cana-de-açúcar foi um dos principais impulsionadores da degradação dos solos ao longo da vertente. O uso de máquinas agrícolas utilizados durante o manejo, levou à compactação, bem como, possivelmente, à diminuição substancial da continuidade do sistema de poros dos solos. Essas mudanças no estado físico dos solos, principalmente em superfície e subsuperfície, resultaram em alterações substanciais na dinâmica hídrica na vertente, com redução de infiltração e concentração de fluxos hídricos em superfície.

Em síntese, a água das chuvas, em quantidades que excedem o limite de infiltração, leva ao rompimento do equilíbrio em algum setor da vertente. Dessa maneira, considerando a compactação dos horizontes superficiais e subsuperficiais, provocada pelo manejo da cana, associada a morfologia côncava e aumento progressivo da declividade em direção à nascente, levaram ao rompimento do equilíbrio hidrodinâmico ao longo da encosta, propiciando a concentração de fluxos hídricos superficiais, principalmente entre a média e o sopé da vertente. Além disso, a morfologia de terreno côncava desses setores da bacia leva à concentração de umidade em subsuperfície.

O surgimento de descontinuidades laterais na área de drenagem da nascente e a disfunção do sistema hidrológico, podem causar, além da degradação física do ponto de descarga da água subsuperficial (ponto de exfiltração), oscilações no modo de exfiltração e na velocidade da vazão da nascente. Isso se reflete diretamente na capacidade de água que pode ser captada para o abastecimento da propriedade rural e que deságua no rio de maior ordem hierárquica, o Córrego Cristino, cujo apresenta exutório no rio Pirapó.

A análise tridimensional da cobertura pedológica possibilitou uma compreensão integrada da organização espacial dos solos e da sua relação com o relevo, o que, consequentemente, resultou na identificação espacial das áreas com maior grau de vulnerabilidade. Ainda indica indiretamente que, para promover uma efetiva conservação da nascente, não se deve apenas manter uma área vegetada com raio de 50 m, de modo a estar em conformidade com a Lei ambiental em vigência (Código Florestal - Lei no 12.651). Ao desconsiderar suas características hidrogeomorfológicas e a qualidade física dos solos que compõem a sua área de abastecimento, essa área vegetada de proteção pode não ser o insuficiente.

Finalizando, destaca-se que é de suma importância o mapeamento e análise da qualidade das nascentes que emergem nos sopés das vertentes, uma vez que, geralmente, são elas que dispõem de um sistema de captação que fornece água para as propriedades rurais.

REFERÊNCIAS

- ALEGRE, M.; MORO, D. A. A mobilidade da população nas antigas áreas cafeeira do Paraná. **Boletim de Geografia**, v. 4, n. 1, p. 28-73, 1986.
- ALMEIDA NETO, J. O.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JR., A. P.; COSTA, F. C. Caracterização Hidrogeoquímica de Cabeceiras de Drenagem na Serra da Mantiqueira. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17., 2017, Campinas. **Anais [...]**, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, p. 6003-6015. 2017.
- ALVARENGA, R. et al. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 319–326, 1996.
- ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G.; SOUZA, L. F. Programa do Proálcool e o etanol no Brasil. **Engevista**, v. 11, n. 2, p. 127-136, 2010.
- ANDREOTTI, L. G. et al. Análise da Cobertura Pedológica da Cabeceira de Drenagem do Córrego Água Suíça, Município de Munhoz de Melo, Paraná, Brasil. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 15, n. 2, p. 446-472, 2023.
- ARAGÓN, A. et al. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. **Soil and Tillage Research**, v. 56, n. 3, p. 197-204, 2000.
- ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema platio direto, preparo convencional e Mata Nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 507-514, 2005.
- AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fraturas e desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio Vale do Rio Paraíba Do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 2, p. 222-227, 1992.
- BARBOSA, A. F.; MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H. A relação entre o sistema pedológico e o relevo no município de Iguaraçu-PR. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium**, v. 174, n. 1, p. 174-186, 2021.
- BECKAUSER, M. C. **Os solos e a dinâmica erosiva ao longo de uma voçoroca no distrito de Sumaré em Paranavaí – PR**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.
- BECKAUSER, M. C.; SILVEIRA, H. Caracterização da cobertura pedológica ao longo de uma topossequência situada no distrito do Sumaré em Paranavaí-PR. **Geofronter**, v. 6, p. 1-17, 2020.

BERTOL, I. et al. Propriedades Físicas de um Cambissolo Húmico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Curitiba: SGB-CPRM, 2021.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 167-177, 2001.

BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2, Maringá, 1985. Visão integrada da problemática da erosão. Anais **Anais [...]**, ABGE, Livro Guia, 332 p, 1985.

BOCQUIER, G. Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tschad. **Cah. O.R.S.T.O.M.**, sér. Pédol., vol. IX, n. 4, p. 509-515, 1971.

BOCQUIER, G. L'évolution des démarches en pédologie. De l'héritage de B.B. Dokoutchaev à la diversité des démarches actuelles en pédologie. **Bulletin de l'Association française pour l'étude du sol. Science du sol**, n. 2, p. 113-121, 1984.

BOIX-FAYOS, C. et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. **Catena**, v. 44, n. 1, p. 47-67, 2001.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C.; SOUZA, L. S. Microbiana de um Latossolo Amarelo Álico após o cultivo com fruteiras perenes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 1019-1025, 1999.

BORGES, T. A. et al. Avaliação de parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 18-25, 2009.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Reflexões sobre geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand, 2004, p. 153-192.

BOULET, R. **Análise estrutural da cobertura pedológica e cartografia**. In: MONIZ, A.C. et al. (Coord.). A responsabilidade social da Ciência do Solo e os simpósios Microbiologia do solo: só simbioses? e A importância do conhecimento da organização da cobertura pedológica: a análise estrutural. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 79-90, 1988.

BOULET, R. et al. Géochimie des paysages: le rôle des couvertures pédologiques. In: **Coll. "Sédimentologie et Géochimie de la Surface" à la mémoire de Goerges Millot**. p. 55-76. 1993.

BOULET, R. Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta: équilibres et déséquilibres pédobioclimatiques. Mém. **ORSTOM**, v.85, 1978.

BOULET, R. Uma evolução recente da pedologia e suas implicações no conhecimento da gênese do relevo. *In*: III Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Belo Horizonte: ABEQUA. Belo Horizonte: 1992.

BOULET, R.; CHAUVEL, A.; LUCAS, Y. Les systèmes de transformation en pédologie. *In*: **Livre Jubilaire AFES**, AFES, Paris, p.167-179, 1984.

BOUMA, J. Measuring the Hydraulic Conductivity of Soil Horizons with Continuous Macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 2, p. 438-441, 1982.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013. 683p.

BRASIL. Código Florestal, **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União, 2012.

BRASIL. **Resolução Conama nº303**, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2002.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. J. Wiley ed. New York: J. Wiley, 1964. 470 p.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005.

CALEGARI, M.R. **Distribuição da cobertura pedológica e o relevo no alto vale do ribeirão Água do São Francisco – Nova Esperança**. 2000. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

CAMOLEZI, B. A.; COSTA, J. M. A substituição de culturas e a dinâmica populacional no norte paranaense entre 1930-2005. *In*: XII Encuentro de Geógrafos de America Latina, Montevideo. **Anais [...]** Montevideo, 2009.

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 121-126, 1995.

CAPOANE, V. Determinação do Índice de Potência de Escoamento para o Município de Palmitinho / RS. **Estudos geográficos**, v. 13, n. 2, p. 106-117, 2015.

CARPENEDO, V. **Qualidade e estabilidade de Agregados de Latossolo Roxo submetido a diferentes manejos**. 1985. 129 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, p. 38-60, 2005.

CASTRO, S.S. **Sistemas de transformação pedológica em Marília, SP: B latossólicos e B texturais**. 1989. 301 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

CHAVES, J. C.; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, v. 22, p. 53–60, 2001.

CMNP - COMPANHIA MELHORAMENTOS NORTE DO PARANÁ. **Colonização e Desenvolvimento do Norte do Paraná**. São Paulo: Editora Ave Maria, 1975.

COELHO NETTO, A. L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 2, p. 69-100, 2003.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

CROCETTI, Z. S. **Evolução Sócio-Espacial do Paraná (Estudos de Geografia Econômica do Paraná)**. 2007. 197f. Dissertação de mestrado. Desenvolvimento Regional e Urbano. Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFSC, 2007.

CUNHA, J. E. **Caracterização Morfológica (Macro e Micro) e comportamento Físico-Hídrico de Duas Toposseqüências em Umuarama (PR): Subsídios para avaliação dos processos erosivos**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CUNHA, J. E. **Funcionamento hídrico e suscetibilidade erosiva de um sistema pedológico constituído por Latossolo e Argissolo no município de Cidade Gaúcha-PR**. 2002. 190f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CUNHA, J. E.; CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Comportamento erosivo de um sistema pedológico de Umuarama, Noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 23, p. 943-951, 1999.

CUNHA, J. E.; NÓBREGA, M. T.; CASTRO, S. S. Infiltração da água no solo no sistema pedológico Campus do Arenito, cidade gaúcha, noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1837-1848, 2008.

CURCIO, G. R. As nascentes e sua inserção em paisagens com diferentes potenciais de uso: Uma reflexão. *In. XX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*. 2016.

DELVIGNE, J. **Pédogenèse en zone tropicale: la formation des minéraux secondaires en milieu ferralitique**. Mém. ORSTOM, v. 13, 1965. 117 p.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. É. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência Agrotecnologia**, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

DUFRANC, G. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 505-517, 2004.

ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 485-493, 2001.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 5ed. Brasília: Embrapa, 2018. 590p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sumula da 10ª reunião técnica de levantamento de solos. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, v. 10, n. 1, p. 83, 1979.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: **Ministério da Agricultura e Abastecimento**. 1997. 212 p.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 573 p.

EMBRAPA. – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de solos. Mapa de Solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: **EMBRAPA Solos e Florestas**, 2008.

FARIA, A. P. A dinâmica de nascentes e a influência sobre os fluxos nos canais. **A Água em Revista**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 74-80, 1997.

FELIPPE, M. F. **Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte-MG com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais**. 2009. 277f. Dissertação (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental) – Instituto de Geociência, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FELIPPE, M. F. et al. Espacialização e Caracterização das Nascentes em Unidades de Conservação de Belo Horizonte-MG. *In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, n. October 2017, p. 1-18, 2009.

FELIPPE, M. F. **Gênese e dinâmica de nascentes: Contribuições a partir da investigação hidrogeomorfológica em região tropical**. 2013. 255f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociência, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **Revista Geografias**, v. 9, n. 1, p. 70-81, 2013.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Desenvolvimento de uma tipologia hidrogeomorfológica de nascentes baseada em estatística nebulosa multivariada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3 (Jun-Set), p.393-409, 2014.

FERNANDES BARROS, O. N. et al. Caracterização e representação de volumes pedológicos em Marília - São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 2, p. 73-80, 1983.

FERNANDES, L. A. **A Cobertura Cretácea Suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): Os Grupos Bauru e Caiuá**. 1992. 188f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): Revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.

FILHO, J. T. O papel das características e propriedades físicas nas perdas de solo-água e nutrientes por erosão devida ao cultivo do solo. **Semira**, v. 8, n. 1, p. 42-44, 1987.

FILIZOLA, H. F. et al. Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos. **Circular Técnica da Embrapa Meio Ambiente 22**, v. 1, p.7, dez. 2011.

FONSECA, F. P.; SERRA, E. Trajetórias recentes do novo modelo agrícola no Noroeste do Paraná. **Terra Plural**, v. 13, n. 1, p. 58-72, 2019.

FRANÇA, J. P. A ocupação do Noroeste do Paraná e a cidade de Umuarama: Uma retrospectiva do processo de ocupação. **Akropolis – Revista de Ciências Humanas da UNIPAR**, v. 19, n. 3, p. 164-174, 2011.

FREITAS, P.L. Manejo físico do solo. *In*: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1., 1990, Goiânia. **Anais [...]** Campinas: Fund. Cargill, p.117-139. 1992.

FRUET, J. G. W. **Análise da estrutura e funcionamento de cabeceiras de drenagem: Subsídios para a conservação de nascentes**. 2021. 369f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

GARDENAL, L. A. S. Café e atividade industriais no Norte do Paraná: a formação de um complexo cafeeiro? (1940-1970). *In*: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DE EMPRE-SAS,7; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HISTÓRIA ECONÔMICA, 9, 2019, Ribeirão Preto. **Anais[...]**. Ribeirão Preto: USP/ABPHE, 2019.

GASPARETTO, N.V.L. **As formações superficiais do Noroeste do Paraná e sua relação com o Arenito Caiuá**. 1999. 209f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174-1184, 2013.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GRUBER, S.; PECKHAM, S. Land-surface parameters and objects in hydrology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, p.171-194, 2009.

HACK; J. T.; GOODLETT, J. **Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the Central Appalachians**. U.S. Geological Survey, 1960, 66p. (Prof. Paper 347).

HICKMANN, C. et al. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes manejos de longa duração e mata atlântica secundária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2191-2198, 2011.

HORN, R. Stress - Strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, p. 77-88, 2003.

HUNGRIA, M. et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, n. 3, p. 288-296, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/cruzeiro-do-sul/panorama>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2024.

JÚNIOR, J. A. J.; MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA. Comportamento hidrológico de duas nascentes associadas ao uso do solo numa bacia hidrográfica de cabeceira. *In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*. 2010.

KARLING, G. **Estudo da morfologia e estrutura da cobertura pedológica em cabeceira de drenagem na área rural de Cidade Gaúcha**. 2000. 87p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.

LEMOS, R.C., SANTOS, R.D. **Manual de método de trabalho de campo**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996, 36p.

LEPESH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 218p.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2021. 793p.

LIMA, J. M. DE et al. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 1, p. 85–90, 1990.

LIMA, W. DE P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2008.

MACHADO, P. L. O. A. **Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar**. Embrapa, 2003. 18p.

MAPBIOMAS – **Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**, 2021. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 29 de março de 2023.

MARCATTO, F. S. M. et al. A influência do uso da terra na qualidade física de solos derivados de arenitos no Paraná: uma revisão. Em: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBRE (Eds.). **Noroeste Paranaense: Paisagem e Desenvolvimento Rural**. PGE ed. Maringá, p. 175-194. 2022.

MARCATTO, F. S. **Os principais sistemas pedológicos derivados das Formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina na bacia hidrográfica do Rio Pirapó-PR: Os efeitos do uso e manejo do cultivo da cana-de-açúcar**. 2020. 208p. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.

MARQUES, A. J.; SANTIL, F. L. P.; CUNHA, J. E. O uso do clinômetro no levantamento topográfico. Estudo de caso: levantamento pedológico. **Boletim de Geografia**, p. 135-141, 2000.

MARQUES, J. D. D. O. et al. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

MARTINS, V. M. **Caracterização morfológica e da circulação hídrica dos solos da cabeceira de drenagem do Córrego Bom Jesus no município de Cidade Gaúcha-PR**. 2000. 145f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MEDEIROS, F. B. et al. Avaliação da estabilidade de agregados e a vulnerabilidade à erosão ao longo de uma vertente no município de Araruna, região noroeste do Paraná-Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 28, n. 55, p. 845-862, 2018.

MENDONÇA, F. D. A. A Degradação Ambiental do Noroeste do Estado do Paraná. Um Processo de Desertificação Ecológica em Curso. **Pesquisa em Geociência**, v. 21, p. 34-39, 1994.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. Escala base 1:250.000, modelo reduzido 1:500.000, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

MONTANHER, O. C. et al. Chuvas durante o El Niño de 2015/2016 e seus efeitos geossistêmicos no Norte do Paraná. **Geoiंगा: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 15, n. 1, p. 4-29, 2023b.

- MONTANHER, O. C. et al. Geosystemic Impacts of the Extreme Rainfall Linked to the El Niño 2015/2016 Event in Northern Paraná, Brazil. **Applied Sciences**, v. 13, n. 17, p. 3-15, 2023a.
- MOORE, I. D.; GORDON, J. B. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 1986, p. 1294-1298, 1986.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, 1990, p. 3-30, 1991.
- MORAIS, F. DE. Infiltração: uma variável geomorfológica. **Caderno de Geografia**, v. 22, n. 38, p. 73-87, 2012.
- MORO, D. A. Aspectos geográficos da modernização agrícola no Norte do Paraná. **Boletim de Geografia**, v. 13, n. 13, p. 79-93, 1995.
- MORO, D. A.; TEIXEIRA, W. A. Diagnóstico técnico do impacto ambiental no meio antrópico para o projeto de irrigação e drenagem no baixo Ivaí. **Boletim de Geografia**, v. 7, n. 01, p. 5-16, 1989.
- MULLER, N. L. Contribuição ao estudo do Norte do Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 22, p. 55-97, 1956.
- MUZILLI, O. et al. Conservação do solo em sistemas de produção nas microbacias hidrográficas do Arenito Caiuá. Clima, solo, estrutura fundiária e perfil da produção agropecuária. **Boletim Técnico Iapar**, v. 33, n. 1, 1989.
- NÓBREGA, M. T. DE et al. As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, p. 0-25, 2023.
- NÓBREGA, M. T. DE et al. Morfopedologia e dinâmica das paisagens no Noroeste paranaense em face da erosão. Em: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M. T. DE (Eds.). **Noroeste paranaense: Paisagem e Desenvolvimento Rural**. PGE ed. Maringá: 1, p. 71-114, 2022.
- NÓBREGA, M. T. DE; SERRA, E. Noroeste do Paraná: a dinâmica da paisagem rural nas zonas de contato arenito-basalto. **Terra Plural**, v. 3, n. 2, p. 197-214, 2009.
- NÓBREGA, M. T.; CUNHA, J. E. A Paisagem, os solos e a suscetibilidade à erosão. **Espaço Plural**, n. 25, p. 63-72, 2011.
- OADES, J. M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 815-825, 1991.
- OLIVEIRA, D. **Estudo macro e micromorfológico de uma topossequência na bacia do Córrego do Retiro em São Pedro-SP**. 1997. 160f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Relação solo-relevo em sistema pedológico Argissolo-Neossolo Quartzarênico na região Noroeste do Estado do Paraná: Caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 661-675, 1 set. 2020.

OLIVEIRA, M. **Comportamento de características e propriedades físicas de um podzólico vermelho-amarelo sob condições de pasto natural e cultivo na região de Lavras, Minas Gerais**. 1979. 153p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1979.

OLIVEIRA, W. F. DE; MORELLI, A. J. Descrição e Digitalização das Fotografias Aéreas Produzidas pelo IBC/GERCA no Estado do Paraná no Ano de 1970. Congresso Internacional de História. **Anais [...]** 2011.

OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, v. 152, n. 3, p. 139-150, 1991.

PAISANI, J. C. et al. Evolução de paleocabeceira de drenagem do rio chopinzinho (sul do Brasil) durante o quaternário superior. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, p. 43-59, 2016.

PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; GEREMIA, F. Cabeceiras de drenagem da bacia do rio Quatorze-formação Serra Geral (SW do Paraná): Distribuição espacial, propriedades morfológicas e controle estrutural. **RA'É GA**, n. 12, p. 211-219, 2006.

PANACHUKI, E. et al. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 129-137, 2006.

PELLERIN, J. et al. Análise tridimensional da cobertura pedológica de uma pequena depressão fechada: município De Biguaçu / Santa Catarina / Brasil. *In: VI Encontro De Geógrafos Da América Latina, Buenos Aires*. Buenos Aires: Anais Eletrônicos: Sessione Temas ibres, 1997.

PEZARICO, C. R. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; LAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista Ambiente e Água**, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

PINTO, L. V. A. et al. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 197-206, 2004.

QUEIROZ NETO, J. P. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica: Uma experiência de ensino e pesquisa. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 15, p. 77-90, 2002.

QUEIROZ NETO, J. P. Geomorfologia e Pedologia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 1, n. 1, p. 56-67, 2000.

RAMOS, F. T. et al. Indicadores de Qualidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 112-120, 2010.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

REICHERT J.M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. A qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Propriedades físicas do solo. **Departamento de Solos**, UFSM, p. 0-18, 2006.

RIBEIRO, K. D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

RODERJAN, C. V. et al. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná, Brasil. **Ciência & Ambiente**, v. 24, p. 75-92, 2002.

RUELLAN, A. Les sols dans le paysage. **Cah O.R.S.T.O.M.**, v. XXI, n. 3, p. 198–207, 1985.

RUELLAN, A.; DOSSO, M.; FRITSCH, E. L'analyse structurale de la couverture pédologique. **Science du Sol**, v. 27, n. 4, p. 319–334, 1989.

SALOMÃO, F. X. DE T. **Processos erosivos lineares em Bauru (SP): Regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural**. 1994. 220p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SAMPAIO, A. C. S. T.; LIMA, M. G. A influência das políticas agrícolas na territorialização do setor sucraalcooleiro no Noroeste do Paraná. **Geofronter**, v. 6, p. 1–22, 2020.

SANTOS, D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 45, p. 843-848, 2012.

SANTOS, L. J. C. Contribuições da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica ao desenvolvimento da ciência do solo. **Revista RA'EGA**, n. 4, p. 131-138, 2000.

SANTOS, L. J. C.; DE CASTRO, S. S. Lamelas (Bandas Onduladas) em Argissolo Vermelho-Amarelo como indicadores da evolução do relevo: O caso das colinas médias do Platô De Bauru (Sp). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 43-64, 2006.

SANTOS, L. J. C.; OLIVEIRA, J. G. Evolução de Neossolos Quartzarênicos com base em estudo de caso na região Noroeste do Paraná. **William Morris Davis – Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 2, p. 105-118, 2020.

SANTOS, M. C. C.; CRUZ, G. H. A. C.; SILVEIRA, H. Comportamento físico-hídrico de uma toposequência de solos formados da alteração do arenito da formação adamantina na bacia hidrográfica do rio Pirapó, Paraná, Brasil. **Geographia Opportuno Tempore**, v. 9, p. 1-24, 2023.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5° ed. rev e amp. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2005. 98p.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7° ed. rev ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2015. 101p.

SERRA, E. Noroeste do Paraná: o avanço das lavouras de cana e a nova dinâmica do uso do solo nas zonas de contato arenito-basalto. **Revista Campo-Território**, v. 5, n. 9, p. 89-111, 2010.

SERRA, E. Noroeste do Paraná: pasto e cana nas terras da última fronteira do café. Em: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; TERESA DE NÓBREGA, M. (Eds.). **Noroeste Paranaense: Paisagem e Desenvolvimento Rural**. 1. ed. Maringá: PGE, 2022. v. 1, p. 9-46.2022.

SERRA, E. Os primeiros processos de ocupação da terra e a organização pioneira do espaço agrário no Paraná. **Boletim de Geografia**, v. 10, n. 1, p. 61-93, 1992.

SERRA, E. **Contribuição ao estudo do cooperativismo na agricultura do Paraná: o caso da Cooperativa de Cafeicultores e Agropecuaristas de Maringá**. 1986. 220p. Dissertação (Mestrado em Organização do Espaço Urbano e Rural), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 1986.

SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: Uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação de áreas de preservação permanente. **RA'E GA**, v. 24, n. 24, p. 227-257, 2012.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SILVA, A. S. et al. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 10, p. 1783-1789, 2014.

SILVA, F. **Efeitos de sistemas de manejo e tempo de cultivo sobre propriedades físicas em um Latossolo**. 1980. 78p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 311-317, 1998.

SILVA, M. A. S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005.

SILVA, M. S. L. et al. Origem do adensamento em solos do tabuleiro sertanejo do estado de Pernambuco: Caracterização morfológica e física. *In*: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Anais [...] Brasília - DF: 1999.

SILVEIRA, H. **Modificações na estrutura e no comportamento hidrofísico de Latossolos provocadas pelo uso e manejo no município de Cidade Gaúcha – Paraná**. 2001. Tese (Doutorado em Geociências e Meio ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista Paulista, 2001.

SIRTOLI, A. E. et al. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. **Geociências (UNESP, Sao Paulo)**, v. 27, n. 1, p. 63-77, 2008b.

SIRTOLI, A. et al. Atributos do relevo derivados de modelos digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008a.

SMETTEM, K. R. J. Analysis of water flow from cylindrical macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 5, p. 1139-1142, 1986.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. Soil Compaction Problems in World Agriculture. **Elsevier Science**, p. 1-21, 1994.

SOETHE, P. A. Colonização Agrária no Norte do Paraná. 1. ed. Maringá: EDUEM. 2014. 254p.

SOIL SURVEY MANUAL. Washington, USDA SCS. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p. (Handbook, 18 Hill do Brasil, 1978).

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos. 2017.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.

TIPPKOTTER, R. et al. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-2,000 µm). **Z. Pflanzenernähr. Bodenk.**, v. 104, p. 99–104, 1994.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. **Conservação de Nascentes: Produção de Água em Pequenas Bacias Hidrográficas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2005.

VALERIANO, M. D. M.; ROSSETTI, D. D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012.

VALERIANO, M. M. TOPODATA: **Guia para utilização de dados geomorfológicos locais do projeto de Produtividade em Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM”**, CNPq, processo nº 306021/2004-8 (NV). MCTI. INPE. São José dos Campos. SP. 2008.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O, A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, p. 17-29, 2003.

VASCONCELOS, B. et al. Estabilidade de agregados de um Latossolo sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 309-316, 2010.

VASCONCELOS, C. V.; PACHECO, E. P. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, v. 13, n. 147, p. 37-45, 1987.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações Pedologia- Geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos em Ciência do Solo**, n. 4, p. 145–192, 2005.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital Terrain Analysis. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Eds., **Terrain Analysis: Principles and Applications**, John Wiley and Sons, Inc, New York. p. 1-27. 2000.

YOUKER, R. E.; MCGUINNESS, J. L. **Um método curto de obtenção de valores médios em massa e diâmetro de análises de agregados de solos**. 1956.

ZAGO, A. **Sistema Pedológico Latossolo-Argissolo e seu comportamento físico-hídrico em Mamborê, PR**. 2000. 184p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ZANDONADI, L.; BALDO, M. C. Características climáticas e o fenômeno das secas na mesorregião Noroeste paranaense. In: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M. T. (Eds.). **Noroeste paranaense: Paisagem e Desenvolvimento Rural**. 1. ed. Maringá: Programa de Pós-Graduação em Geografia - PGE, v. 1, p.115–156, 2022.

ZAPAROLI, F. C. M. **As transformações pedogenéticas identificadas na topossequência sítio São José na bacia do córrego Aratu, Floraí – PR**. 2009. 155p. Dissertação (Mestrado

em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

ZOU, K. H.; TUNCALI, K.; SILVERMAN, S. G. Correlation and simple linear regression. **Journal of Veterinary Clinics**, v. 27, n. 4, p. 427–434, 2003.

APÊNDICE

RESULTADOS DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DAS SONDAGENS ANALISADAS NOS TRANSECTOS A, B, C D e E

Granulometria das sondagens da sequência topográfica de solos do transecto A

Prof.	AMF	AF	AM	AG	AMG	AT	S	A
	g.Kg ⁻¹							
Sondagem 1								
5-10	92,3	569,0	195,7	0,2	0,0	857,1	51,5	91,4
25-30	103,8	535,5	148,1	0,9	0,0	788,2	48,1	163,6
45-50	84,2	478,5	171,4	1,2	0,0	735,3	65,0	199,6
65-70	97,3	492,7	139,7	0,8	0,0	730,5	71,1	198,4
85-90	90,1	493,7	163,1	1,0	0,0	747,9	52,2	199,9
105-110	96,9	510,5	142,9	1,1	0,0	751,4	51,7	196,9
125-130	90,4	484,3	174,0	1,3	0,0	750,0	56,8	193,1
145-150	92,3	491,9	163,0	1,1	0,0	748,3	61,1	190,6
165-170	85,0	472,7	172,0	6,7	0,0	736,3	71,8	191,9
185-190	94,3	493,2	156,5	1,0	0,0	745,1	68,3	186,6
Sondagem 2								
5-10	91,6	617,1	139,4	0,7	0,0	848,8	43,9	107,2
25-30	89,3	537,3	122,1	0,9	0,0	749,6	62,2	188,2
45-50	81,5	489,6	118,8	0,9	0,0	690,8	78,6	230,6
65-70	81,3	556,0	98,6	0,6	0,2	736,8	67,5	195,7
85-90	91,1	538,5	119,0	1,1	0,0	749,7	46,5	203,7
105-110	85,7	549,1	93,2	0,7	0,0	728,6	73,7	197,8
125-130	79,6	533,1	127,2	1,3	0,0	741,2	60,2	198,5
145-150	86,8	567,7	98,9	0,8	0,0	754,2	51,6	194,1
165-170	92,2	543,4	121,0	1,0	0,0	757,7	55,7	186,6
185-190	97,3	523,0	106,0	0,8	0,0	727,1	73,1	199,7
Sondagem 3								
5-10	100,1	627,5	115,9	0,5	0,0	844,0	47,8	108,2
25-30	105,9	550,0	123,6	0,9	0,0	780,5	68,0	151,5
45-50	105,3	548,9	95,2	0,5	0,0	749,9	73,3	176,7
65-70	93,3	487,4	111,7	0,7	0,0	693,2	75,6	231,2
85-90	92,2	520,7	94,3	0,6	0,0	707,8	59,0	233,2
105-110	93,6	528,4	91,6	0,7	0,1	714,5	53,0	232,5
125-130	98,2	529,5	87,5	0,5	0,0	715,8	72,2	212,0
145-150	104,1	516,2	111,3	0,6	0,1	732,4	64,9	202,7
165-170	105,7	528,2	107,3	0,7	0,0	742,0	53,8	204,2
185-190	109,5	514,3	103,7	0,6	0,0	728,0	57,5	214,5
Sondagem 4								
5-10	100,5	639,0	126,2	0,7	0,0	866,5	43,7	89,7
25-30	111,9	594,0	143,5	0,6	0,0	850,0	47,3	102,7
45-50	101,6	559,7	111,2	0,5	0,0	773,0	67,5	159,5
65-70	93,9	529,3	101,1	0,5	0,0	724,7	76,5	198,9
85-90	94,2	484,4	119,1	0,8	0,0	698,4	65,6	236,0
105-110	92,3	478,4	114,1	0,4	0,0	685,3	72,6	242,1
125-130	90,5	524,5	100,3	0,6	0,0	715,9	51,8	232,2

145-150	100,0	500,6	123,1	0,6	0,0	724,3	55,7	220,0
165-170	94,5	521,3	99,7	0,5	0,0	716,0	70,8	213,2
185-190	103,1	510,4	125,8	1,1	0,0	740,4	44,9	214,7
Sondagem 5								
5-10	94,0	648,3	156,0	0,7	0,0	899,1	35,2	65,7
25-30	91,2	636,8	112,3	0,6	0,0	840,9	30,4	128,8
45-50	94,4	566,7	117,8	0,6	0,0	779,5	54,5	166,0
65-70	83,9	572,0	96,3	0,4	0,0	752,5	54,8	192,8
85-90	85,0	598,6	105,3	0,6	0,0	789,6	44,4	166,0
105-110	91,0	600,5	100,6	0,4	0,0	792,5	36,0	171,5
125-130	87,3	573,4	97,0	0,4	0,0	758,1	44,3	197,6
145-150	91,4	563,9	121,4	0,6	0,0	777,3	41,9	180,7
165-170	92,1	587,8	98,3	0,5	0,0	778,7	52,1	169,2
185-190	99,8	559,7	116,7	0,7	0,0	776,9	51,6	171,5
Sondagem 6								
5-10	99,5	663,9	120,3	1,2	0,0	885,0	45,7	69,2
25-30	71,5	666,2	102,8	0,0	0,0	840,5	72,5	87,0
45-50	87,1	632,1	114,9	0,7	0,0	834,9	38,4	126,7
65-70	72,7	625,7	100,6	0,7	0,0	799,6	47,9	152,5
85-90	81,6	595,3	97,6	0,4	0,0	774,9	44,4	180,7
105-110	80,6	608,2	107,0	0,4	0,0	796,3	44,1	159,6
125-130	84,4	606,3	109,7	0,5	0,0	801,0	31,5	167,5
145-150	76,9	610,3	82,4	0,4	0,0	770,0	54,0	176,0
165-170	85,7	609,9	110,8	0,8	0,0	807,1	27,9	165,0
185-190	82,3	629,2	85,2	0,5	0,0	797,3	55,2	147,5
Sondagem 7								
5-10	84,4	677,8	124,9	1,2	0,0	888,3	20,4	91,2
25-30	71,4	681,8	99,7	2,3	0,0	855,1	40,7	104,1
45-50	63,7	637,8	95,6	1,1	0,0	798,2	33,6	168,2
65-70	69,1	660,5	81,8	0,3	0,0	811,7	21,0	167,2
85-90	74,8	626,9	104,5	0,3	0,0	806,6	35,4	158,0
105-110	76,0	659,2	80,7	0,4	0,0	816,3	27,2	156,5
125-130	68,8	637,0	80,7	0,2	0,0	786,6	35,2	178,1
145-150	73,4	611,2	103,5	0,5	0,0	788,5	38,7	172,7
165-170	69,7	658,8	82,8	0,4	0,0	811,7	30,8	157,5
185-190	78,9	620,8	97,4	0,7	0,0	797,7	49,5	152,7
Sondagem 8								
5-10	81,4	690,0	81,6	0,4	0,0	853,3	22,7	124,0
25-30	81,2	607,0	90,9	0,3	0,0	779,4	52,3	168,2
45-50	73,6	627,7	72,2	0,2	0,0	773,8	59,7	166,5
65-70	78,0	609,9	90,3	0,4	0,0	778,7	59,8	161,5
85-90	76,9	605,3	86,7	0,3	0,0	769,1	54,5	176,4
105-110	72,4	624,0	70,1	0,3	0,0	766,8	60,7	172,5
125-130	79,1	615,3	90,4	0,3	0,0	785,1	56,1	158,8
145-150	76,3	637,7	74,9	0,3	0,0	789,2	61,1	149,7
165-170	79,0	622,4	92,7	0,4	0,0	794,6	43,3	162,1
185-190	74,7	642,0	74,4	0,3	0,0	791,5	57,8	150,7

Sondagem 9								
5-10	97,6	620,2	62,8	0,4	0,0	781,0	44,8	174,2
25-30	82,5	645,9	53,7	0,3	0,0	782,5	41,3	176,2
45-50	102,4	639,7	56,6	0,3	0,0	799,0	41,4	159,6
65-70	92,0	666,2	51,6	0,2	0,0	810,0	33,0	157,0
85-90	93,9	634,3	43,7	0,1	0,0	772,0	71,7	156,3
105-110	106,3	622,0	56,1	0,6	0,0	785,0	44,3	170,8
125-130	95,0	640,6	45,9	0,3	0,0	781,8	54,9	163,2
145-150	98,2	635,6	58,5	0,5	0,0	792,7	39,0	168,2
165-170	99,2	633,5	43,1	0,2	0,0	776,1	54,2	169,7
185-190	104,9	606,9	53,9	0,3	0,0	766,0	59,2	174,8
Sondagem 10								
5-10	103,9	634,8	26,6	0,3	0,0	857,1	51,5	91,4
25-30	115,2	623,6	34,1	0,1	0,0	788,2	48,1	163,6
45-50	102,0	616,5	23,7	0,2	0,0	742,4	47,5	210,1
65-70	111,3	613,1	35,6	0,3	0,0	730,5	71,1	198,4
85-90	108,4	645,5	26,2	0,5	0,0	747,9	52,2	199,9
105-110	116,6	648,0	35,4	0,4	0,0	751,4	51,7	196,9
125-130	115,9	625,8	21,8	0,1	0,0	750,0	56,8	193,1
145-150	120,4	621,1	31,9	0,5	0,0	748,3	61,1	190,6
165-170	123,3	619,3	30,2	0,2	0,0	772,9	46,7	180,4
185-190	122,2	624,3	36,6	0,2	0,0	745,1	68,3	186,6
Sondagem 11								
5-10	134,6	679,0	54,1	0,3	0,0	868,0	38,9	93,1
25-30	115,4	518,2	76,7	0,2	0,0	710,5	72,6	216,9
45-50	114,7	582,2	55,3	0,3	0,0	752,4	58,2	189,4
65-70	118,4	546,2	72,3	0,0	0,0	736,9	47,5	215,6
85-90	124,4	573,8	49,8	0,1	0,0	748,2	74,7	177,1
105-110	135,3	569,3	63,1	0,1	0,0	767,8	55,6	176,6
125-130	120,1	578,9	47,9	0,1	0,0	746,9	59,4	193,6
145-150	131,9	548,9	63,2	0,2	0,0	744,2	73,4	182,4
165-170	131,6	575,8	48,4	0,0	0,0	755,9	71,0	173,1
185-190	133,8	555,7	67,6	0,1	0,0	757,1	75,1	167,9
Sondagem 12								
5-10	154,7	716,1	44,6	0,3	0,0	915,7	29,4	54,9
25-30	160,9	701,3	47,4	0,3	0,0	909,9	27,2	62,9
45-50	103,3	662,3	83,4	0,2	0,0	849,2	50,6	100,1
65-70	88,3	710,5	107,7	0,1	0,0	906,7	21,7	71,6
85-90	100,5	679,9	108,1	0,1	0,0	888,6	41,8	69,6
105-110	95,3	587,0	140,1	0,2	0,0	822,7	26,2	151,1
125-130	91,4	570,4	101,4	0,1	0,0	763,4	45,0	191,6
145-150	105,1	499,0	191,2	0,1	0,0	795,5	37,4	167,1
165-170	88,9	569,6	97,9	0,2	0,0	756,6	59,5	183,9
185-190	89,4	607,7	100,9	0,2	0,0	798,2	39,2	162,6
Sondagem 13								
5-10	91,5	702,1	139,8	0,8	0,0	934,2	36,2	29,6
25-30	76,9	565,4	296,1	0,3	0,0	938,6	35,2	26,1

45-50	78,8	697,0	160,7	0,5	0,0	937,0	37,4	25,6
65-70	75,7	558,6	294,4	0,5	0,0	929,2	33,7	37,1
85-90	84,2	689,4	149,9	0,4	0,0	923,9	31,7	44,4
105-110	77,1	562,1	273,7	0,6	0,0	913,5	35,6	50,9
125-130	86,2	712,5	143,4	0,4	0,0	942,5	22,1	35,4
145-150	81,5	547,1	241,5	0,4	0,0	870,6	50,1	79,4
165-170	81,3	639,0	118,9	0,3	0,0	839,6	43,1	117,4
185-190	79,0	505,9	216,4	0,4	0,0	801,7	35,2	163,1

AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina; AT = Areia total; S = Silte; A = Argila.

Granulometria das sondagens da sequência topográfica de solos do transecto B

Prof.	AMF	AF	AM	AG	AMG	AT	S	A
	g.Kg ⁻¹							
Sondagem 0								
5-10	154,0	562,1	115,0	0,4	0,3	869,5	35,1	95,4
25-30	139,6	502,6	88,4	0,3	0,2	769,4	27,4	203,1
45-50	150,6	505,8	97,3	0,0	0,3	728,1	84,0	187,9
65-70	147,6	486,3	91,0	0,4	0,3	747,2	73,4	179,4
85-90	147,7	485,5	85,3	0,3	0,3	720,7	64,2	215,1
105-110	153,8	490,5	84,5	0,3	0,0	744,7	55,6	199,6
125-130	161,2	494,1	80,8	0,3	0,3	748,1	74,1	177,9
145-150	161,4	494,1	78,7	0,4	0,3	755,1	87,1	157,9
165-170	170,3	444,2	109,4	0,4	0,0	758,6	69,3	172,1
185-190	182,3	470,2	113,0	0,4	0,0	746,9	74,2	178,9
Sondagem 1								
5-10	151,5	552,9	113,1	0,4	0,3	818,1	91,6	90,3
25-30	156,5	563,3	99,0	0,4	0,3	819,5	59,2	121,2
45-50	158,5	532,2	102,3	0,0	0,3	793,2	76,0	130,8
65-70	145,6	479,7	89,8	0,4	0,3	715,7	70,3	214,0
85-90	140,8	462,9	81,3	0,3	0,3	685,5	70,8	243,8
105-110	140,2	447,1	77,0	0,3	0,0	664,6	85,4	250,0
125-130	147,5	452,1	74,0	0,3	0,3	674,1	86,6	239,3
145-150	150,1	459,4	73,2	0,3	0,3	683,3	94,2	222,5
165-170	165,0	430,3	106,0	0,4	0,0	701,7	67,6	230,8
185-190	167,1	430,9	103,5	0,4	0,0	701,9	81,9	216,3
Sondagem 2								
5-10	146,6	622,9	85,1	0,5	0,0	855,1	78,9	66,0
25-30	182,9	501,2	145,2	0,7	0,0	829,9	70,6	99,5
45-50	159,5	555,6	68,6	0,1	0,0	783,8	67,2	149,0
65-70	180,8	446,1	119,6	0,4	0,0	746,9	73,9	179,2
85-90	150,8	451,7	72,9	0,4	0,0	675,8	70,8	253,4
105-110	158,9	396,9	105,9	0,3	0,0	662,1	65,6	272,2
125-130	145,9	409,8	115,0	0,4	0,0	671,2	73,6	255,3
145-150	172,2	404,4	104,0	0,4	0,0	680,9	74,1	245,0
165-170	181,4	418,7	101,8	0,4	0,0	702,3	68,0	229,7
185-190	184,3	433,5	103,3	0,6	0,0	721,8	70,5	207,7

Sondagem 3								
5-10	135,0	544,6	87,9	0,6	0,5	768,6	68,2	163,1
25-30	142,0	647,3	62,3	0,4	0,0	852,1	54,8	93,1
45-50	141,0	530,9	65,9	0,8	0,0	738,5	46,4	215,1
65-70	163,7	586,0	75,7	1,1	0,0	826,6	38,4	135,0
85-90	143,5	548,6	59,8	0,8	0,0	752,8	64,1	183,1
105-110	156,1	541,4	62,1	0,4	0,0	760,0	45,4	194,6
125-130	153,3	561,6	51,3	0,7	0,0	766,9	49,5	183,6
145-150	150,0	492,3	51,7	0,4	0,0	694,3	63,0	242,6
165-170	138,5	491,1	46,4	0,4	0,0	676,4	39,7	283,9
185-190	150,1	481,8	51,7	0,3	0,0	683,8	56,5	259,6
Sondagem 4								
5-10	136,1	624,5	47,1	0,2	0,0	807,9	84,2	107,9
25-30	156,2	509,3	62,3	0,7	0,0	728,5	41,9	229,6
45-50	150,0	641,6	33,3	0,4	0,0	825,3	36,8	137,9
65-70	134,6	558,4	40,0	0,5	0,0	733,6	36,5	229,9
85-90	123,6	564,4	27,3	0,3	0,0	715,6	41,3	243,1
105-110	107,7	535,3	32,8	0,2	0,0	676,0	36,8	287,1
125-130	129,7	550,2	27,1	0,3	0,0	707,3	69,1	223,6
145-150	139,2	555,7	38,7	0,2	0,0	733,8	48,3	217,9
165-170	137,2	589,2	31,5	0,3	0,0	758,3	42,1	199,6
185-190	150,9	572,2	37,4	0,4	0,0	760,9	55,5	183,6
Sondagem 5								
5-10	154,9	552,7	84,5	1,3	0,0	793,5	90,0	116,5
25-30	181,5	561,3	86,4	2,1	0,0	831,4	65,5	103,1
45-50	151,0	642,1	67,5	0,5	0,0	861,1	40,5	98,4
65-70	155,9	595,3	53,5	0,6	0,0	805,3	53,8	140,9
85-90	159,0	583,6	42,4	0,9	0,0	785,9	47,0	167,1
105-110	158,2	608,8	47,8	0,2	0,0	815,0	39,1	145,9
125-130	139,7	537,5	42,2	0,2	0,0	719,6	51,9	228,5
145-150	129,9	535,1	35,3	0,3	0,0	700,6	53,5	245,9
165-170	140,2	514,5	42,3	0,1	0,0	697,2	67,7	235,1
185-190	143,7	558,2	36,7	0,2	0,0	738,8	69,1	192,1
Sondagem 6								
5-10	135,7	655,3	75,6	4,5	0,0	871,2	60,0	68,9
25-30	144,1	659,2	52,5	0,3	0,0	856,1	57,0	86,9
45-50	132,6	629,2	35,8	0,2	0,0	797,8	63,6	138,6
65-70	133,1	585,4	36,0	0,1	0,0	754,6	56,5	188,9
85-90	119,0	614,0	28,2	0,2	0,0	761,4	38,5	200,1
105-110	125,2	585,0	36,1	0,9	0,0	747,1	41,6	211,3
125-130	110,4	564,6	36,7	0,4	0,0	712,1	53,1	234,8
145-150	128,3	574,2	32,9	0,3	0,0	735,7	42,1	222,1
165-170	135,0	608,4	23,4	0,1	0,0	766,9	49,0	184,1
185-190	138,3	592,8	30,8	0,2	0,0	762,1	64,5	173,4
Sondagem 7								
5-10	123,3	674,5	83,3	0,2	0,0	881,2	33,3	85,5
25-30	71,4	682,2	99,8	2,3	0,0	855,6	36,9	107,5

45-50	109,1	612,4	80,0	0,4	0,0	801,9	30,6	167,5
65-70	97,9	658,6	71,9	0,2	0,0	828,5	35,3	136,1
85-90	106,6	634,8	87,6	0,7	0,0	829,7	34,4	135,9
105-110	98,9	595,2	83,7	0,3	0,0	778,0	38,2	183,8
125-130	99,2	631,2	61,3	0,0	0,0	791,7	38,2	170,1
145-150	105,1	637,2	60,2	0,1	0,0	802,6	33,4	164,0
165-170	97,4	643,0	60,0	0,1	0,5	800,9	25,6	173,5
185-190	112,1	588,4	72,5	0,3	0,0	773,3	40,0	186,7

AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina; AT = Areia total; S = Silte; A = Argila.

Granulometria das sondagens da sequência topográfica de solos do transecto C

Prof.	AMF	AF	AM	AG	AMG	AT	S	A
	g.Kg ⁻¹							
Sondagem 1								
5-10	90,2	610,9	116,2	1,4	0,0	818,8	31,7	149,5
25-30	93,2	607,4	79,3	0,5	0,0	780,4	30,2	189,4
45-50	93,8	611,3	79,8	0,5	0,0	785,5	35,9	178,6
65-70	91,6	597,1	78,0	0,5	0,0	767,3	41,1	191,6
85-90	93,6	594,1	78,4	0,4	0,0	766,6	39,5	193,9
105-110	88,6	640,5	63,1	0,7	0,0	792,9	32,0	175,1
125-130	96,6	640,5	62,0	0,4	0,0	799,4	31,4	169,1
145-150	101,6	621,0	79,5	0,3	0,0	802,4	31,5	166,1
165-170	100,0	634,6	60,6	0,3	0,0	795,5	37,8	166,6
185-190	101,3	610,1	78,3	0,5	0,0	790,2	34,9	174,9
Sondagem 2								
5-10	93,1	717,4	79,7	0,6	0,0	890,8	46,1	63,1
25-30	80,0	607,6	89,5	0,6	0,0	777,7	36,7	185,6
45-50	71,5	625,7	69,7	0,4	0,0	767,2	32,1	200,6
65-70	75,5	660,9	73,6	0,4	0,0	810,5	27,9	161,6
85-90	75,5	660,1	73,5	0,4	0,0	809,5	25,0	165,5
105-110	77,0	655,4	73,1	0,4	0,0	805,9	27,5	166,6
125-130	83,4	638,3	90,7	0,4	0,0	812,8	28,8	158,4
145-150	79,8	663,3	70,4	0,5	0,0	814,0	39,4	146,6
165-170	75,7	577,8	157,5	0,8	0,0	811,7	33,8	154,5
185-190	88,1	624,1	88,4	0,7	0,0	801,3	33,4	165,4
Sondagem 3								
5-10	71,6	664,6	129,6	2,2	0,0	868,0	26,2	105,9
25-30	67,2	705,2	110,4	1,9	0,0	884,7	21,9	93,4
45-50	67,7	677,3	120,3	0,6	0,0	865,9	24,2	109,9
65-70	58,1	636,2	79,6	0,5	0,0	774,5	29,9	195,6
85-90	67,8	637,6	106,3	0,9	0,0	812,6	27,7	159,6
105-110	63,0	672,8	86,6	0,7	0,0	823,1	26,8	150,1
125-130	65,3	641,6	116,3	0,9	0,0	824,1	26,5	149,4
145-150	65,3	669,5	86,8	0,5	0,0	822,1	23,2	154,6
165-170	50,3	647,0	131,2	0,8	0,0	829,3	21,1	149,6
185-190	63,7	686,7	87,7	0,4	0,0	838,4	23,7	137,9

Sondagem 4								
5-10	74,3	649,8	118,2	1,6	0,0	843,9	28,5	127,6
25-30	90,0	656,7	52,8	0,4	0,0	799,8	32,5	167,6
45-50	101,1	602,9	49,2	0,3	0,0	753,5	53,4	193,1
65-70	86,1	631,3	51,1	0,4	0,0	768,8	43,8	187,4
85-90	112,3	665,7	63,1	0,3	0,0	841,4	33,0	125,6
105-110	123,0	693,3	52,4	0,6	0,0	869,4	28,5	102,1
125-130	103,6	646,6	53,3	0,3	0,0	803,8	38,1	158,1
145-150	85,9	666,0	49,2	0,4	0,0	801,5	34,9	163,6
165-170	116,7	645,9	62,7	0,7	0,0	825,9	40,9	133,1
185-190	88,9	678,7	56,9	0,6	0,0	825,2	37,9	136,9
Sondagem 5								
5-10	103,0	682,8	51,2	1,4	0,0	838,4	37,1	124,5
25-30	83,2	691,0	40,9	0,3	0,0	815,4	30,6	154,0
45-50	86,6	647,4	51,0	0,3	0,0	785,3	45,2	169,5
65-70	88,9	694,0	36,9	0,6	0,0	820,4	33,6	146,0
85-90	90,4	675,0	51,9	0,3	0,0	817,6	33,4	149,0
105-110	89,7	666,9	33,3	0,2	0,0	790,2	37,5	172,3
125-130	96,8	664,2	47,9	0,3	0,0	809,3	34,9	155,8
145-150	95,4	666,7	34,2	0,6	0,0	797,0	37,5	165,5
165-170	101,1	637,6	45,2	0,6	0,0	784,6	39,2	176,2
185-190	99,3	643,0	32,0	1,0	0,3	775,6	43,4	181,0
Sondagem 6								
5-10	143,7	627,3	79,4	0,6	0,0	850,9	74,0	75,1
25-30	115,7	698,2	78,0	0,4	0,0	892,3	49,6	58,1
45-50	126,5	659,1	92,0	0,3	0,0	877,9	42,3	79,9
65-70	108,0	636,8	67,6	0,4	0,0	812,8	41,6	145,6
85-90	103,9	614,1	64,9	0,2	0,0	783,1	36,8	180,1
105-110	112,0	625,4	82,3	0,2	0,0	819,9	34,5	145,6
125-130	121,7	636,2	83,3	0,1	0,0	841,4	35,0	123,6
145-150	104,5	606,8	60,0	0,3	0,0	771,6	36,5	191,9
165-170	117,5	598,4	76,0	0,1	0,0	792,1	40,3	167,6
185-190	84,5	652,1	59,1	0,3	0,0	796,0	32,7	171,4

AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina; AT = Areia total; S = Silte; A = Argila.

Granulometria das sondagens da sequência topográfica de solos do transecto D

Prof.	AT	S	A
	g.Kg ⁻¹		
Sondagem 1			
5-10	841,5	73,1	85,4
25-30	778,1	80,5	141,4
45-50	784,0	66,3	149,6
65-70	730,5	73,4	196,1
85-90	743,4	56,5	200,1
105-110	730,3	49,8	219,9
125-130	741,7	60,4	197,9

145-150	726,3	61,1	212,6
165-170	716,4	82,3	201,4
185-190	724,9	71,7	203,4
Sondagem 2			
5-10	841,1	56,7	102,1
25-30	791,3	58,1	150,6
45-50	746,5	25,3	228,1
65-70	677,0	84,9	238,1
85-90	748,6	39,5	211,9
105-110	710,7	72,9	216,4
125-130	698,6	70,3	231,1
145-150	742,4	52,5	205,1
165-170	746,0	55,9	198,1
185-190	733,4	68,0	198,6
AT= Areia Total; S = Silte; A = Argila.			

Granulometria das sondagens da sequência topográfica de solos do transecto E

Prof.	AT	S	A
	g.Kg ⁻¹		
Sondagem 1			
5-10	839,6	62,2	98,1
25-30	804,9	48,9	146,1
45-50	733,8	77,9	188,4
65-70	709,5	79,6	210,9
85-90	737,8	51,1	211,1
105-110	711,5	84,7	203,8
125-130	735,9	62,4	201,6
145-150	770,2	45,3	184,5
165-170	731,1	78,3	190,6
185-190	730,6	76,5	192,9
Sondagem 2			
5-10	869,5	35,1	95,4
25-30	769,4	27,4	203,1
45-50	728,1	84,0	187,9
65-70	747,2	73,4	179,4
85-90	720,7	64,2	215,1
105-110	744,7	55,6	199,6
125-130	748,1	74,1	177,9
145-150	755,1	87,1	157,9
165-170	758,6	69,3	172,1
185-190	746,9	74,2	178,9
Sondagem 3			
5-10	906,6	36,9	56,5
25-30	859,8	53,4	86,8
45-50	781,9	59,1	159
65-70	804,4	51,3	144,3
85-90	808,8	40,8	150,4

105-110	797,6	55,9	146,5
125-130	785,0	52,2	162,8
145-150	805,9	14,3	179,8
165-170	789,1	50,9	160
185-190	796,8	43,4	159,8
Sondagem 4			
5-10	843,1	28,5	128,4
25-30	799	32,6	168,4
45-50	752,7	53,4	193,9
65-70	768	43,8	188,2
85-90	799,8	44,9	155,3
105-110	821,8	25,9	152,3
125-130	812	28,8	159,2
145-150	813,2	39,4	147,4
165-170	810,9	33,8	155,3
185-190	800,5	33,3	166,2
AT= Areia Total; S = Silte; A = Argila.			