

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO EM GESTÃO DO TERRITÓRIO

LUCIANE GRYZAK

**CARACTERIZAÇÃO MORFOPEDOLÓGICA COMO SUBSÍDIO À ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE FRENTE À CONTAMINAÇÃO**

PONTA GROSSA

2018

LUCIANE GRYZAK

**CARACTERIZAÇÃO MORFOPEDOLÓGICA COMO SUBSÍDIO À ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE FRENTE À CONTAMINAÇÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão do Território.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. M^a. Ligia Cassol Pinto

PONTA GROSSA

2018

G894 Gryczak, Luciane
Caracterização morfoopedológica como subsídio à análise de vulnerabilidade frente à contaminação / Luciane Gryczak. Ponta Grossa, 2018.
75 f.

Dissertação (Mestrado em Gestão do Território - Área de Concentração: Gestão do Território: Sociedade e Natureza), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Lígia Cassol Pinto.

1. Relevo. 2. Solo. 3. Fluxos superficiais. 4. Contaminação. I. Pinto, Maria Lígia Cassol. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Gestão do Território: Sociedade e Natureza. III.T.

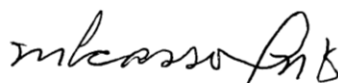
CDD: 910

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCIANE GRYZAK

“CARACTERIZAÇÃO MORFOPEDELÓGICA COMO SUBSÍDIO A ANÁLISE DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geografia – Mestrado em Gestão do Território, Setor de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:



Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Ligia Cassol Pinto

UEPG



Prof^o Dr^o Nelson Ferreira Fernandes

UFRJ



Prof^o Dr^o Valdemir Antoneli

UNICENTRO

Ponta Grossa, 31 de Agosto de 2018.

AGRADECIMENTOS

A vida é um ato contínuo de agradecimento, quanto mais realizações obtemos mais pessoas a agradecer. A minha lista é longa. Inicialmente meus falecidos pais Olga e Miroslaw Gryczak que dentro da sua simplicidade sempre acreditaram que o estudo e o trabalho eram os meios para o sucesso e, nunca deixaram que eu esquecesse isto. Os meus oito irmãos: Jorge, Iria, Gloria, Alfredo, Hilda, Antônio, Luiz e Adriana, todos contribuíram com palavras, com gestos e ações para que eu pudesse tranquilamente estudar. Tranquilidade está que as questões duras da vida não permitiriam que alguns usufríssem da mesma forma. Faço menção especial a minha saudosa irmã Hilda, retirada do nosso convívio de forma abrupta deixando um vazio em nosso círculo familiar. E, falando dela não posso deixar de mencionar seu marido José Amilton, a quem considero como irmão, com seu coração enorme sempre ajudando toda a família. Meu namorado Asimar, o companheiro presente nos momentos bons e ruins, do amor pelos animais, em especial os felinos, parceiro do vinho e das discussões sobre temas diversos. Meus amigos de trabalhos, em especial aos meus líderes que me deram a compreensão, característica rara nos dias atuais, permitindo que conseguisse conciliar o estudo e o trabalho. Meus colegas de mestrado, em especial Diely e Marcos, parceiros dos trabalhos de campo e das dificuldades em se desenvolver pesquisa científica em um país que infelizmente não entendeu a importância da educação e produção do conhecimento. As pessoas da Fazenda Pitangui que permitiram o desenvolvimento do meu trabalho acadêmico em sua propriedade, e a INTERPARTNERS que cedeu seu equipamento e espaço para que eu realizasse parte das minhas análises de solo em seu laboratório. A paciência e compreensão de pessoas como o André (gerente da fazenda) e do Sr. Evaldo (proprietário da INTERPARTNERS) é que ajudam ao país a se desenvolver. A Prof.^a Dr^a Andrea Tedesco que muitas e muitas vezes deixou seu convívio familiar, nos feriados e finais de semana, para me ajudar nos levantamentos topográficos altimétricos. Finalizando, o meu agradecimento especial à Prof.^a Dr^a Maria Lígia Cassol Pinto, incentivadora, amiga, orientadora e companheira de todas as horas. Sua confiança em minha capacidade, mesmo nos momentos em que eu duvidava foi a força motriz que me ajudou a concluir este mestrado.

RESUMO

As características do relevo influenciam a distribuição dos solos ao longo das vertentes, podendo também interferir nos processos de difusão e mobilização de contaminante no solo, mantendo-o imobilizado ou disponível à absorção pelas plantas ou ao carreamento até as fontes de água para o abastecimento humano e animal. Os processos de transporte e sedimentação associados às características físico-químicas da cobertura pedológica, e do agente químico, configuram a vulnerabilidade morfopedológica a um determinado contaminante. Nesse contexto, essa pesquisa se propôs a avaliar os indicadores do relevo e os atributos dos solos relacionados à vulnerabilidade à contaminação quando expostos a ação de algum produto químico. A metodologia empregada incluiu procedimentos como o levantamento topográfico altimétrico, a elaboração de modelo digital de elevação, a discretização de atributos topográficos, a abertura de trincheiras, coletas e análises de amostras de solos. A área de estudo, localizada no município de Ponta Grossa, corresponde a uma porção agrícola sob plantio direto há mais de quarenta anos, na cercania do corredor industrial Norte, proximidades da Rodovia PR-151, e de bairros residenciais. Constitui uma forma geomorfológica de topo plano e alongado, com orientação SE-NW, composta por duas vertentes com diferentes formas, sob condições similares de uso e manejo do solo, climáticas e de matriz litológica, favorecendo o melhor entendimento da influência do relevo nos processos de formação do solo, no potencial de lixiviação e carreamento de partículas e substâncias químicas. Suas características morfolitológicas são consideradas representativas do município de Ponta Grossa. As toposequências estudadas configuram um transecto perpendicular ao eixo da colina, abrangendo dois segmentos de vertente; o ocidental (Vc) e o oriental (Vr). O segmento Vc se apresenta convexo em planta, marcadamente na terça superior, e com segmentos côncavos, convexos e retilíneos em perfil. O segmento Vr é predominantemente convexo-planar de topo à base. A influência do relevo ficou evidente na distribuição dos solos e no controle dos processos hidrológicos, condicionados pela declividade e forma do relevo. Tal influência também foi observada nos resultados das análises químicas das amostras de solo, como no teor de matéria orgânica e valores de óxidos de ferro e alumínio. A influência litológica foi evidenciada pelos elevados teores de argila no solo, mesmo nos mais jovens. As porções côncavas do relevo, onde há maior concentração do fluxo hídricos com a formação de zonas úmidas, tendem a ser os locais mais vulneráveis à contaminação difusa, no entanto são necessários maiores estudos, especialmente no sentido de quantificar o potencial de carreamento de contaminantes, por escoamento superficial, para os rios. A modelagem dos atributos topográficos/morfopedológicos foi considerada representativa e uma importante ferramenta para análise da vulnerabilidade por contaminação difusa.

Palavras-chave: relevo, solo, fluxos superficiais, contaminação

ABSTRACT

The characteristics of the relief influence the distribution of soils along the slopes and may also interfere in the diffusion and mobilization processes of the contaminant through the soil, keeping it immobilized or under disponibility for plant absorption and transport untill water sources for animal and human consumption. The transport and sedimentation processes associated with the physico-chemical characteristics of the pedological cover, and the chemical agent, constitute the morphopedological vulnerability to a certain contaminant. In this context, this research aimed to evaluate the relief indicators and the most relevant soil attributes linked to their vulnerability face to a possible contamination by chemical products. For this research, the methodology included technical procedures from the altimetrical topographic survey, the elaboration of a digital elevation model, the discretization of topographic attributes, to the opening of trenches, collections and analysis of soil samples. The study area, located in the municipality of Ponta Grossa, corresponds to an agricultural portion under no-tillage system for more than forty years, surrounded by the industrial corridor (N), Highway PR151 and by residential quarters. It is a flat and elongated geomorphological form with SE-NW orientation, consisting of two strands with different forms, under similar conditions of soil use and management, climatic and lithological matrix, favoring a better understanding of the influence of relief on the processes soil formation, potential for leaching and hauling of particles and chemicals. Its characteristics of relief and lithology are considered representative for the municipality of Ponta Grossa. The studied topsequences constitute a transect perpendicular to the axis of the hill, covering two segments of slope; one west (Vc) and one east (Vr). The segment Vc is convex in plan, more striking in the upper portion, and with concave, convex and rectilinear segments in its lateral view. The Vr segment is predominantly convex-planar from top to bottom. The influence of the relief was evident in the distribution of soils and in the control of the hydrological processes, conditioned by the declivity and shape of the relief. Such influence was also observed in the results of the chemical analyzes of soil samples, as well as in the organic matter content and iron and aluminum oxide values. The lithological influence was evidenced by the high levels of clay in the soil, even in the youngest ones. The concave portions of the relief, where there is greater concentration of hydric flow with the formation of wetlands, tend to be the most vulnerable to diffuse contamination, however, further studies are necessary, especially aiming to quantify the potential of contaminants transport, by surface runoff, to the rivers. The modeling of topographic/morphopedological attributes was considered representative and an important tool for the analysis of vulnerability to the diffuse contamination.

Keywords: relief, soil, surface flows, contamination

LISTA DE FIGURAS

Figura 01:	Variáveis Morfométricas – forma da vertente.....	15
Figura 02	Localização da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”	253
Figura 03	Litologia da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	26
Figura 04	Segmentos de Vertente Experimentais na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	28
Figura 05	Fluxograma da Metodologia Adotada.....	30
Figura 06	Procedimentos de Levantamento Topográfico Altimétrico na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	34
Figura 07	Reconhecimento dos Solos e Coleta de Amostras Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	38
Figura 08	Curvas de Nível Geradas com Equidistância de Um Metro – Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	43
Figura 09	Atributos Topográficos Primários da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	45
Figura 10	Atributos Topográficos Secundários da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	47
Figura 11	Perfil Topográfico das Topossequências com a Distribuição dos Pontos de Abertura de Trincheiras da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	51
Figura 12	Granulometria no Solo nas Topossequência na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: Teor de Argila; Teor de Silte; Teor de Areia; Teor de Argila Dispersa em Água.....	54
Figura 13	Densidade Global e Porosidade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: Densidade do Solo, Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade.....	55
Figura 14	Propriedades Químicas do Solo nas Topossequências Estudadas: Matéria Orgânica, Capacidade de Troca Catiônica, Saturação por Al^{3+} , e pH em $CaCl_2$	57
Figura 15	Teor de Óxidos por Fluorescência de Raios-X no Solo da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: (a) óxido de silício (sílica); (b) óxido de alumínio; (c) óxido de Ferro; (d) óxido de Titânio.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 01	Áreas Superficiais, Densidade e Capacidade de Troca Catiônica de Alguns Importantes Sorventes e, a Dependência do pH na Sorção de Metais.....	22
Quadro 02	Crítérios Adotados na Padronização dos Dados Cartográficos.	32
Quadro 03	Resumo das Observações Morfológicas dos Perfis de Solo Estudados na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.	50
Quadro 04	Coeficiente de Correlação entre as Variáveis do Solo com a Porosidade e a Densidade do Solo.....	56
Quadro 05	Coeficiente de correlação entre Al^{3+} e variáveis: pH do solo em $CaCl_2$, teor de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, e teor de argila nas amostras de solo estudadas.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Distribuição das Classes de Declividade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	44
Tabela 02	Distribuição das Classes de Curvatura de Vertente em Planta na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	44
Tabela 03	Distribuição das Classes de Curvatura de Vertente em Perfil na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	44
Tabela 04	Distribuição das Classes do Índice Topográfico de Umidade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	47
Tabela 05	Distribuição das Classes do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	RELAÇÕES MORFOPEDOLÓGICAS E A VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO QUÍMICA	13
2.1	MORFOPEDOLOGIA NA PAISAGEM	13
2.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A ÁGUA	16
2.3	A DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO: FLUXO SUPERFICIAL	18
2.4	VULNERABILIDADE MORFOPEDOLÓGICA À CONTAMINAÇÃO	20
3	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	24
3.1	SEGMENTOS DA VERTENTE ESTUDADA	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS	31
4.1.1	Levantamento Topográfico Altimétrico	32
4.1.2	Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)	35
4.1.3	Geração dos Atributos Primários	35
4.1.4	Geração de Atributos Secundários	36
4.2	RECONHECIMENTO DO SOLO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO	37
4.3	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS	38
4.3.1	Análises físicas dos solos	39
4.3.2	Análises Químicas do Solo	41
4.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS	42
5.2	RECONHECIMENTO DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS	49
5.3	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS	53
5.4	PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS	56
5.5	CONSIDERAÇÕES QUANTO A VULNERABILIDADE MORFOPEDOLÓGICA A CONTAMINAÇÃO	60
6	CONCLUSÕES	65
	REFERENCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades que envolve as atividades industriais e a mudança nos hábitos de consumo, apesar de positivos sob a ótica econômica, são marcados pela intensa exploração dos recursos naturais e grandes transformações na superfície terrestre, sendo responsáveis por mudanças ambientais complexas, incluindo casos de contaminação do solo e, conseqüentemente, dos mananciais hídricos superficiais.

A contaminação ocorre por diferentes pressões e impactos, derivados, principalmente, de intervenções antrópicas nos diferentes usos da terra, associados à vulnerabilidade do sistema a determinado fator de risco externo. Nos casos de contaminação química, uma série de efeitos adversos pode ser desencadeada, visto que, os processos de difusão e mobilização podem distribuir o contaminante pelo solo, disponibilizando-o para absorção das plantas ou o carreando para fontes de água de consumo animal e humano.

A vulnerabilidade do solo, pela ótica geomorfológica, encontra-se arraigada nas relações existentes entre a morfogênese e a pedogênese. Muitos pesquisadores, por exemplo: Quinton e Catt (2007); Siefert e Santos (2012); Zheng et al. (2012); Buchanan (2013) e Melland et al. (2015), entre outros, têm relacionado os mecanismos de geração de escoamento superficial ao processo de transporte e acúmulo de contaminantes. Siefert e Santos (2012) consideram que, os mecanismos de geração de escoamento superficial atuam como vetores primários na condução de possíveis poluentes em direção aos rios, especialmente, nos processos que envolvem a poluição difusa em bacias hidrográficas. Razão pela qual, a fração fina erodida pode atuar como um veículo de transporte para nutrientes e contaminantes do solo (QUINTON; CATT, 2007).

Outra abordagem interessante é a apresentada por Gburek et al. (2000) que abordam o conceito de áreas de fontes crítica (AFC), as quais, representam porções específicas dentro de uma bacia hidrográfica, que são mais vulneráveis à lixiviação, seja em escoamento superficial ou em fluxo subterrâneo. De acordo com os autores, essa condição de vulnerabilidade depende da coincidência de dois conjuntos de fatores: 1) fator fonte (solo, cultura e manejo); e 2) fator transporte (escoamento superficial, erosão, fluxo subsuperficial e processos de canal). Esse entendimento está fortemente relacionado às áreas hidrologicamente ativas ou às

áreas variáveis de afluência, as quais são condicionadas, também, pela forma da vertente (HEWLETT; HIBBERT, 1967).

A vertente, sistema de interesse nessa pesquisa, apresenta grande importância, pois, integra um conjunto de elementos que se inter-relacionam e envolve fluxos e processos que propiciam transferências de energia e matéria. (SEIBERT et al., 2007). Essas transferências, regidas, principalmente, por forças gravitacionais, hidráulicas e químicas, variam no tempo e no espaço, “resultando em diferenciações e descontinuidades de processos, formas e materiais em cada segmento da vertente.” (THOMAZ; ROSS, 2006, p.24). De modo que, a caracterização morfopedológica possibilita o entendimento físico-hídrico como contribuição para a identificação e compreensão da influência do relevo na vulnerabilidade do solo à contaminação difusa.

Nesse entendimento, foi selecionada, como área de estudo “Arroio da Fazenda”, uma forma geomorfológica de topo plano e alongado, com orientação SE-NW, área total de aproximadamente 64 ha e, cerca de, 55 m de amplitude altimétrica. Suas vertentes: oriental (Vr) e ocidental (Vc), apresentam formas distintas, predominando na Vr o relevo suave ondulado e forma convexa - planar. Em contrapartida, na Vc o relevo se mostra mais ondulado com segmentos convexos, côncavos e retilíneos integrados. As condições de uso e manejo do solo, climáticas e de matriz litológica, são similares, favorecendo o melhor entendimento da influência do relevo nos processos de formação do solo, no potencial de lixiviação e carreamento de partículas e substâncias químicas. Além disso, apresenta relevo e litologia representativos da cidade de Ponta Grossa.

Para a presente pesquisa foi traçado um transecto perpendicular na área de estudo, composta por dois segmentos de vertente (um em cada vertente). O segmento na vertente oriental (Vr) apresenta forma convexo-planar com amplitude altimétrica de aproximadamente onze (11) metros, a inclinação média de 6,8% é distribuída quase uniformemente ao longo dos cento e sessenta e dois (162) metros de comprimento. Já o segmento na vertente ocidental (Vc) apresenta forma complexa, com porções côncavas, convexas e retilíneas. Com (18) metros de amplitude altimétrica, a inclinação média de 6,9 % é resultado do balanço entre áreas de declive acentuado e as porções planas, distribuídos nos seus duzentos e sessenta e dois (262) metros de comprimento.

Esta pesquisa que se justifica, de um lado, quanto ao tema porque trata de uma questão recorrente em áreas rurais, especialmente naquelas cujas expansões de atividades agrícolas com significativo uso e consumo de substâncias poluidoras se fortalece na mesma razão em que solo/água são submetidos às ameaças da contaminação. Por outro lado, pela escolha da área de experimentação por considerá-la como morfopedologicamente representativa para o município de Ponta Grossa.

Tem-se como objetivo geral da pesquisa:

- a) Realizar a caracterização morfopedológica de modo a subsidiar a análise da vulnerabilidade do frente a possibilidade de contaminação por elementos químicos.

A metodologia empregada para alcançar tal objetivo inclui, além de um substancial embasamento teórico, expresso minimamente numa Revisão de Literatura, um conjunto de procedimentos técnicos que vão desde a elaboração de cartogramas, modelos digitais, passando pela seleção de critérios de escolha da mais adequada área de experimento, topografia, coletas e análises variadas de duas topossequência dos solos que recobrem uma unidade de relevo inserida na sub-bacia do Arroio da Fazenda, situada na periferia norte de Ponta Grossa.

Os resultados obtidos foram expostos em gráficos e quadros e discutidos à luz da revisão de literatura que precede a sua exposição.

2 RELAÇÕES MORFOPEDOLÓGICAS E A VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO QUÍMICA

2.1 MORFOPEDOLOGIA NA PAISAGEM

A partir dos avanços e interações conceituais nos campos das ciências da Terra, percebeu-se que solo e relevo são componentes de sistemas complexos, e sua organização e da rede de realimentação fazem com que as características de cada um dos elementos interfiram na dinâmica dos fluxos e processos, propiciando transferências de energia e matéria. Seibert et al. (2007) argumentam que os aspectos topográficos como declividade, curvatura e elevação condicionam os fluxos de água e a redistribuição dos elementos e materiais do solo ao longo das vertentes, imprimindo variabilidade de atributos na sucessão pedológica. Essa perspectiva permitiu estabelecer uma relação entre a geometria do relevo, os processos de pedogênese e morfogênese e com o potencial de lixiviação e carreamento de partículas e substâncias químicas.

Intimamente ligada aos processos morfopedológicos, a declividade afeta a intensidade de processos como erosão e redistribuição de sedimentos, além de interferir na capacidade de drenagem local (SEIBERT et al., 2007). Nesse sentido, Fox, Bryan e Price (1997), num ensaio em laboratório, constataram que com o aumento da declividade a taxa de infiltração tendeu a diminuir. Mais recentemente, Cunha et al. (2016), trabalhando em uma topossequência no noroeste do estado do Paraná, obtiveram resultados diferentes, ou seja, as taxas de infiltração aumentaram com a elevação do grau de declividade. Tais resultados foram atribuídos às diferenças nas condições de porosidade e drenagem hidráulica dos perfis de solo, bem como à influência da declividade na velocidade do escoamento subsuperficial, que pode ter favorecido o fluxo hídrico nas camadas superiores.

Relacionadas à variação da declividade, as curvaturas vertical e horizontal imprimem a forma das vertentes (SCHAERTZL; ANDERSON, 2005). A primeira expressa o formato da vertente (côncavo/convexo) quando observada em perfil, e a última refere-se ao caráter convergente/ divergente dos fluxos sobre a superfície, considerado o plano horizontal, como exemplificado na *Figura 01* (VALERIANO, 2003, 2008, 2008a).

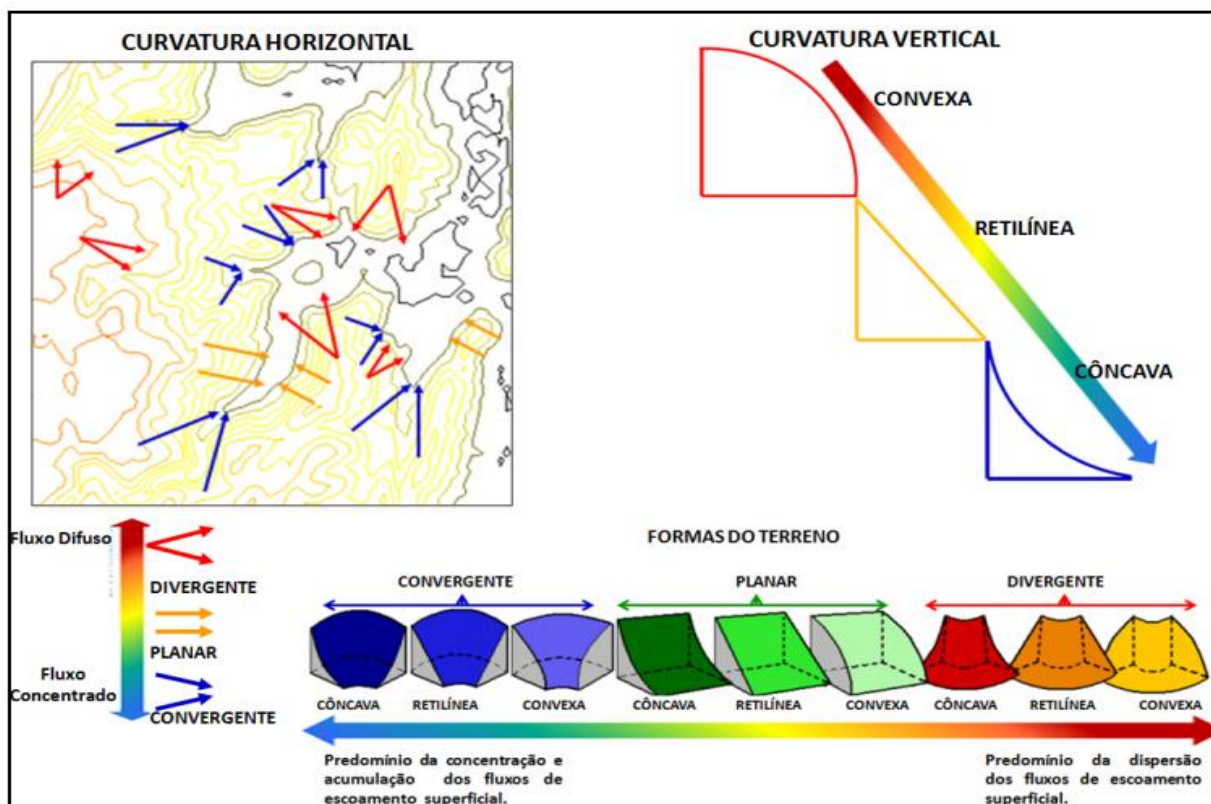
De acordo com o autor, a curvatura vertical tem sua atuação decorrente da combinação dos efeitos da declividade e comprimento da rampa, nos diferentes segmentos da vertente. Nas vertentes côncavas, a declividade é mais acentuada na alta vertente, diminuindo gradativamente em direção às partes mais baixas. Nos segmentos mais íngremes, as partículas de solo podem mover-se mais rapidamente do que aquelas mais suaves e localizadas abaixo. Como resultado, os fluxos de material sofrem uma aceleração relativa em partes da superfície e desaceleração em outras (SHARY; SHARAYA; NITUSOV, 2002).

Fazlollahi Mohammadi et al. (2016), em um estudo no Iran, observaram que as vertentes com perfil côncavo apresentaram solos mais rasos do que aquelas com inclinação convexa e que, em áreas de maior declividade, o desenvolvimento pedogenético também se mostrou menor. Em um experimento em laboratório, Rieke-Zapp e Nearing (2005) perceberam que na parte superior da vertente côncava o fluxo é direcionado para a área central levando à formação de sulcos, enquanto, mais a baixo, com a linearização da superfície a concentração do fluxo diminui e o material em suspensão passa a ser depositado. Normalmente, essa característica faz com que as vertentes côncavas apresentem menor perda global de solo do que as convexas e/ou retilíneas, como em Souza et al. (2003), Sanches et al. (2009) e Sensoy e Kara (2014).

Já, a curvatura horizontal atua no direcionamento dos fluxos hídricos e na concentração do escoamento superficial. Nessa perspectiva, Huggett (1975) afirma que a redistribuição de materiais de solo é um processo tridimensional, onde as linhas de fluxos são direcionadas a partir da curvatura do terreno. Sendo que, os contornos convexos levam a fluxos divergentes, enquanto os côncavos promovem fluxos convergentes (*Figura 04*). Estes últimos desenvolvem maiores zonas de saturação dos solos e em menor tempo, comparando com os planos e com os convexas (SABZEVARI; TALEBI; SHAMSAI, 2010).

Percebe-se então que, conforme discutido por Gerrard (1992), as propriedades do solo estão relacionadas, em parte, ao resultado da interação entre a forma do declive e os processos de erosão e deposição, haja vista que, o movimento da água e do material é regido pela configuração geométrica do relevo, onde os fluxos e processos podem adicionar ou esgotar seletivamente certas características físicas ou químicas do solo.

Figura 01 – Variáveis Morfométricas



Fonte: SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. Londrina: **Geografia**, vol. 22, n. 1, 2013.

O entendimento desses processos é facilitado com o uso de modelos digitais de elevação (MDE) e da parametrização de seus atributos topográficos. Estes, segundo Moore et al. (1993), são divididos em primários e secundários. Os atributos primários são derivados diretamente do MDE e incluem variáveis como declividade, área de contribuição específica, plano e perfil de curvatura. Os secundários (ou compostos) resultam de combinações dos atributos primários, que podem ser utilizados como índices para caracterizar a variabilidade espacial de processos que ocorrem na paisagem, como a distribuição do conteúdo de água no solo ou o potencial de erosão. Inclui o índice topográfico de umidade (ITU), índice de corrente de máximo fluxo (ICMF) e o índice de capacidade de transporte de sedimentos (ICTS).

Muitos pesquisadores têm utilizado os MDE e seus atributos para estudar as relações entre o relevo, solo e os processos neles atuantes. Seibert et al. (2007) relacionou atributos topográficos com as características do solo na Suécia. Nowatzki e Santos (2014) utilizaram índices topográficos discretizados de MDE para

especializar a distribuição dos potenciais solos da bacia hidrográfica do rio Pequeno em Antonina – PR. Wu et al. (2016) utilizaram o MDE para gerar o ITU e o relacionaram com a camada de transmissibilidade do solo em meio digital, para delimitar áreas hidrologicamente sensíveis em Nova Jersey (EUA).

De acordo com Buchanan et al (2014) os índices calculados, a partir dos atributos topográficos, são uma alternativa simples que pode ser aplicada de forma eficiente, auxiliando em decisões de gerenciamento ambiental. Contudo é necessário observar a resolução dos dados utilizados na elaboração do MDE e, sua adequação à escala do modelo, pois aquela tem impacto significativo sobre o cálculo dos atributos do terreno, de modo que baixas resoluções podem levar a perda de representatividade (CAPOANE; COSTA; KUPLICH, 2017).

Nesse contexto, os modelos de elevação digital (MDE) e os índices topográficos, discretizados a partir daqueles, tem se mostrado como importantes ferramentas para compreensão das relações entre solo e relevo, e sua influência no processo de redistribuição de sedimentos e contaminação difusa.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A ÁGUA

Formado ao longo de centenas e milhares de anos, o solo pode ser entendido como um corpo natural, tridimensional e dinâmico (PENNOCK; VELDKAMP, 2006). Composto por minerais, gases, água e substâncias orgânicas (REICHARDT; TIMM, 2012), exerce um papel integrador entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera. Seus componentes se encontram misturados em complexos padrões, sendo que, aproximadamente, metade do seu volume é composto por partículas sólidas e a outra parte é constituída por poros preenchidos por solução aquosa ou ar (HILLEL, 1998).

A quantidade e o tamanho dos poros interferem significativamente no armazenamento e movimento de água, areação do solo e distribuição das raízes (PIRES et al., 2008), bem como no transporte e reação de produtos químicos e na residência da biota. Isto porque, poros maiores favorecem a areação (REICHARDT; TIMM, 2012) e a drenagem por gravidade, enquanto que, nos microporos prevalece o movimento por capilaridade (BEVEN; GERMAN, 1982).

O espaço poroso é formado pelo arranjo espacial (estrutura) e influenciado pela distribuição, quanto ao tamanho (textura) das partículas sólidas do

solo. De modo arbitrário, as partículas minerais podem ser dispostas em três classes principais: areia (de 0,05 a 2,00 mm); silte (de 0,002 a 0,05 mm); e argila (menor que 0,002 mm) (REICHARDT; TIMM, 2012). Schaertzl e Anderson (2005), citando Brakensiek e Rawls (1994), destacam que, em solos com textura mais grossa (com grande quantidade de areia), a água se move mais rápido no fluxo saturado, porque aqueles possuem poros maiores e pouca superfície específica para atrair esta com forças matriciais. Já, em solos ricos em argila, os poros são menores e, normalmente, não são interligados. Contudo, os solos argilosos bem estruturados podem apresentar uma quantidade significativa de macroporos entre os agregados. Sendo que, “a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo” (MESQUITA; MORAES, 2004, p. 965).

A estrutura do solo envolve diferentes processos de agregação e fragmentação (LE BISSONNAIS; LE SOLDER, 1995; LE BISSONNAIS, 1996). A matéria orgânica humidificada, complexos de metal polivalentes, óxidos de ferro, hifas fúngicas, raízes, por exemplo, atuam como agentes de agregação (TISDALL; OADES, 1982). Por outro lado, alguns mecanismos e características físicas e físico-químicas do solo atuam inibindo a agregação ou rompendo os agregados (NIMMO, 2004). Os mais comuns estão associados à adição súbita de líquidos, impactos das gotas de chuva, dissolução e dispersão química (como a presença de sódio permutável) e manejo do solo (EMERSON, 1967; LE BISSONNAIS; LE SOLDER, 1995; LE BISSONNAIS, 1996). Quando os agregados se tornam instáveis, as partículas de argila podem dispersar e, pelo fluxo de água, se espalham obstruindo os poros e formando crostas na porção mais superficial do solo, o que reduz a infiltração de água (TISDALL; OADES, 1982) aumentando, conseqüentemente, o escoamento superficial e a perda de solo pela erosão hídrica (BESALATPOUR et al., 2013).

Pelo exposto, percebe-se que a estrutura do solo é afetada por processos naturais e pelas práticas de manejo. Nesse sentido, Horn et al. (1995) destacam que a circulação de maquinários promove a compactação e o aumento da densidade do solo, retardando a infiltração, a condutividade hidráulica e a difusão de íons e gases. Por outro lado, as raízes mortas e animais escavadores proporcionam incremento na quantidade de poros grandes, facilitando a drenagem (COELHO NETTO, 2009).

Huggett (1975) destaca que a porosidade do solo tende a reduzir com a profundidade (aumento da densidade aparente), diminuindo, assim, sua

condutividade hidráulica, haja vista que, parte da água percolada não consegue entrar nas camadas menos permeáveis (mais profundas) rápido o suficiente, sendo defletida lateralmente como fluxo de retorno (*throughflow*), o que é comum em períodos de chuva prolongados ou eventos hidrológicos de pico. Além disso, diferenças bruscas na textura como lentes de argila ou de areia tendem a retardar o movimento da frente de molhamento, especialmente, devido ao potencial matricial. A água acumulada acima dessa faixa, em áreas declivosas, pode deslocar-se lateralmente sob efeito da gravidade.

2.3 A DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO: FLUXO SUPERFICIAL

A interação da água com a cobertura pedológica influencia quase todos os aspectos de formação e do comportamento dos solos e do relevo, desde o intemperismo até as taxas de perda por lixiviação, transporte e deposição de sedimentos e de compostos químicos. Coelho Netto (2009) destaca que, esses processos têm como ponto de partida o ciclo hidrológico, o qual possui na precipitação um importante fator-controle, onde o volume, a distribuição temporal e as intensidades de chuvas individuais (volume/duração) afetam a natureza e a magnitude dos fluxos e processos em determinada área. Além das características das chuvas, os mecanismos de entrada da água no solo são influenciados por outros fatores, como o impacto causado pelas gotas (*splash*), o manejo do solo, a declividade, as propriedades do solo, etc. (MU et al., 2015).

De acordo com Horton (1933, 1936), o solo atua como uma superfície que separa a água precipitada, em duas partes: (a) a que infiltra no solo; e (b) a que escoia pela superfície. A infiltração pode ser definida como o movimento da água através da superfície do solo (BETSON, 1964), e a taxa na qual a superfície do solo, em determinada condição, pode absorver a água da chuva corresponde à capacidade de infiltração (HORTON, 1936). Esta depende de variáveis como: a macroporosidade, selamento superficial, tipo de manejo, cobertura vegetal, entre outros (por ex. Alves Sobrinho et al., 2003; Bono et al., 2012; Cunha et al., 2015).

A capacidade inicial de infiltração muda em função da umidade do solo, aproximando-se da taxa de percolação quando a saturação é alcançada (BETSON, 1964). Isso porque, o maior teor inicial de umidade do solo diminui o efeito das forças capilares e majora o efeito da gravidade, aumentando a velocidade com que a

frente de molhamento se move e diminuindo a taxa de infiltração (GRAY; NORUM, 1967). No entanto, Mu et al. (2015) perceberam que o efeito do teor prévio de umidade do solo na taxa de infiltração diminuiu gradualmente com o aumento de intensidade das chuvas. Castillo, Gómez-Plaza e Martínez-Mena (2003), constataram que a resposta hidrológica após altas tempestades é independente do teor inicial de água do solo, porém, é significativo no escoamento em tempestades de média e baixa intensidade.

Segundo Horton (1936), quando a capacidade de infiltração é superada pela quantidade de chuva precipitada, o excedente forma uma fina camada e, após preencher as pequenas depressões na superfície, a água começa a se mover por influência da inclinação e da gravidade (HILLEL, 1998), iniciando o escoamento superficial. Esse processo depende da operação de vários sistemas de fluxo contínuos e interdependentes. Por exemplo, Dunne e Black (1970), constataram em seu estudo que a maior parte do escoamento superficial foi produzida em pequenas áreas saturadas (mantidas pelo escoamento subsuperficial provenientes da vertente a montante), as quais variaram sazonalmente ou durante a tempestade em função da topografia, geologia, do solo, da umidade antecedente e das características da precipitação.

Nesse contexto, Hewlett e Hibbert (1967) explicam que quando o fluxo subterrâneo de água, da área a montante, excede a capacidade do perfil do solo, a água chega à superfície formando canais efêmeros. Esse processo, conhecido como expansão das áreas de afluência, está ligado à extensão das áreas saturadas resultantes dos processos desencadeados a partir da precipitação, onde a ação combinada dos processos de infiltração, escoamento superficial e escoamento de retorno, condicionados também pela forma da vertente, proporcionam o aparecimento de áreas variáveis de afluência (AVAs).

Walter et al. (2000), destacam que o escoamento da maioria dessas áreas se desloca rapidamente em direção a cursos de água perenes e, potencialmente, tendem a formar um elo hidrológico direto entre a paisagem e as massas de águas superficiais primárias. Quando esta ligação existe, essas áreas podem ser consideradas áreas hidrológicamente sensíveis (AHS), pois tendem a representar um mecanismo de transporte rápido para potenciais poluentes.

Hillel (1998) explica que o escoamento superficial, normalmente, começa como fluxo laminar, o qual apresenta um comportamento ordenado como uma série

de lâminas que deslizam umas sobre as outras. O aumento da velocidade ou a redução da viscosidade do fluido podem tornar o fluxo turbulento o que afeta a transportabilidade das partículas de solo, visto que, a turbulência tende a manter as partículas em suspensão por mais tempo, além de aumentar a capacidade da água em separar as partículas do solo. À medida que o fluxo acelera e ganha força erosiva, eventualmente, cria canais, os quais, ao se fundirem, podem aprofundar levando a fluxos maiores. Sendo que o estresse do cisalhamento causado entre o fluido e a superfície varia em função da densidade e profundidade do fluido e da inclinação do leito.

Na mesma perspectiva, Rieke-Zapp e Nearing (2005), em um estudo em laboratório, perceberam que a incisão dos sulcos (largura e profundidade) foi influenciada pela concentração do fluxo, controlada pela direção da inclinação, declividade e pela área de contribuição da vertente. Para os autores, este fato demonstra que a forma da vertente tem um impacto significativo nos padrões de incisão e na perda de solo.

2.4 VULNERABILIDADE MORFOPEDOLÓGICA À CONTAMINAÇÃO

Na literatura, o termo vulnerabilidade apresenta diferentes conotações que variam de acordo com a orientação e perspectiva das diferentes áreas do conhecimento científico (CUTTER, 1996; CUTTER, et al., 2003). De modo geral, pode ser entendida como um estado de sensibilidade a danos causados por exposição a situações de estresse, somada à incapacidade (ou dificuldade) de resistir, se adaptar e/ou se recuperar dessas perturbações, por exemplo, em: Adger et al., (2009), Nathan (2009) e Zhang et al. (2017). Sendo assim, um processo complexo que engloba múltiplas dimensões, as quais muitas vezes são cumulativas (NATHAN, 2009) e, ocorrem em várias escalas espaciais e temporais (ADGER et al., 2009).

A vulnerabilidade do solo, pela ótica geomorfológica, encontra-se arraigada nas relações existentes entre a morfogênese e a pedogênese. No Brasil, especialmente, está fundamentada no princípio da ecodinâmica de Tricart (1977), como em: Ribeiro e Campos (2007); Rovani e Mota et al. (2013); Silva Neto (2013); Vieira (2016) e Xavier et al. (2016), focada, principalmente, na perda de solo por erosão hídrica. Nos referidos trabalhos, normalmente, tem-se adotado a metodologia

proposta por Crepani et al. (2001), na qual são considerados diferentes temas: a) geologia (grau de coesão das rochas, porosidade, faturamento); b) geomorfologia (dissecação do relevo pela drenagem, amplitude altimétrica e declividade); c) pedologia (grau de desenvolvimento/ maturidade do solo); d) vegetação (densidade de cobertura vegetal; e) clima (pluviosidade total, intensidade pluviométrica, distribuição sazonal).

Muitos pesquisadores, por exemplo: Quinton; Catt, (2007); Cadwladar et al., (2012); Zheng et al. (2012), Buchanan et al (2013) e Melland et al. (2015), entre outros, têm relacionado os mecanismos de geração de escoamento superficial ao processo de transporte e acúmulo de contaminantes. Siefert e Santos (2012) consideram que, os mecanismos de geração de escoamento superficial atuam como vetores primários na condução de possíveis poluentes em direção aos rios, especialmente, nos processos que envolvem a poluição difusa em bacias hidrográficas. Razão pela qual, a fração fina erodida pode atuar como um veículo de transporte para nutrientes e contaminantes do solo (QUINTON; CATT, 2007).

Melland et al. (2016), em um estudo na planície costeira de Queensland (Austrália), constaram que uma parcela significativa de herbicida foi mobilizada durante o escoamento superficial, sendo que os sedimentos em suspensão, foram enriquecidos em relação à camada superficial do solo (25 cm). De acordo com os autores, a perda de herbicidas, pelo escoamento superficial, e o enriquecimento dos sedimentos foram influenciados pelas características do solo, do composto químico e do potencial de escoamento.

Gburek et al. (2000) trazem uma importante discussão ao abordarem o conceito de *áreas de fontes críticas* (AFC), as quais, representam porções específicas dentro de uma bacia hidrográfica, que são mais vulneráveis à lixiviação, seja em escoamento superficial ou em fluxo subterrâneo. De acordo com os autores, essa condição de vulnerabilidade depende da coincidência de dois conjuntos de fatores: 1) fator fonte (solo, cultura e manejo); e 2) fator transporte (escoamento superficial, erosão, fluxo subsuperficial e processos de canal), o qual está fortemente relacionado às áreas hidrologicamente ativas ou às áreas variáveis de afluência (HEWLETT; HIBBERT, 1967). Onde, há interseção da AHS com áreas fonte de poluentes delimita a AFC.

Moraes e Horn (2009) relacionaram a vulnerabilidade química do solo ao Chumbo com a capacidade de resistência e resiliência do ambiente em reter o

contaminante. Nesse entendimento a fase solúvel e trocável é a que apresenta maior risco, logo as áreas mais vulneráveis são aquelas onde a mobilidade do metal é maior. Vidal et al. (2009) avaliam que a sorção se configura em um dos principais processos responsáveis pelo destino dos metais pesados no compartimento pedológico, sendo a capacidade de sorção proporcional à área superficial e à densidade de carga superficial do sorvente (ver *Quadro 01*). Assim, em meios porosos, os sólidos sorventes mais importantes para metais são os argilominerais, a matéria orgânica (MO) e os óxi-hidróxidos de Ferro e Manganês (LANGMUIR et al., 2003).

Quadro 01 – Áreas Superficiais, Densidade e Capacidade de Troca Catiônica de Alguns Importantes Sorventes e, a Dependência do pH na Sorção de Metais

Sorbent Mineral/Phase	Surface Area (m ² /g)	Site Density (sites/nm ²)	Site Density (mmol sites/g)	CEC (meq/100g)	pH Dependence
Kaolinite	10 to 38	1.3 to 3.4	0.022 to 0.21	3 to 15	Strong
Illite and chlorite	65 to 100	0.4 to 5.6	0.043 to 0.93	10 to 40	Slight
Smectite-montmorillonite	600 to 800	0.4 to 1.6	0.4 to 2.1	80 to 150	Absent or negligible
Organics in soils, humic materials ^a	260 to 1300	2.31	1.0 to 5.0	110 to 500	Strong
Mn oxyhydroxides	143 to 290	2 to 18	0.48 to 8.7	100 to 740	Strong
Fe(III) oxyhydroxides (ferrihydrite)	250 to 600	20	8.3 to 20	100 to 740	Strong

Fonte: LANGMUIR, D. et al. Issue Paper on the Environmental Chemistry of Metals. U.S. Environmental Protection Agency Risk Assessment Forum. Washington, DC. 2005. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/enviro_chemical.pdf>. Acesso em 10/02/2017.

Segundo Dube et al. (2000) as argilas do tipo 2:1 são mais significativas, na capacidade de sorção do solo, pois, apresentam área de superfície interna e capacidade de troca catiônica maior que as argilas 1:1 e, conseqüentemente, maior competência na imobilização de elementos químicos, como os metais.

A matéria orgânica tem sua importância relacionada à associação com cátions, formando complexos estáveis com os metais, especialmente, com cátions multivalentes. De acordo com Langmuir et al. (2003) a MO, assim como a caulinita,

mantém suas cargas negativas em pH baixo, de modo que a sorção de cátions metálicos aumenta com a elevação do pH. No entanto, o aumento da fração de um metal complexado eleva a solubilidade dos minerais desse metal, influenciando também na adsorção à matéria orgânica ou superfícies minerais. Complexos metálicos com sulfato, flúor, cloreto e fosfato são mais estáveis e importantes em pH abaixo de 7, enquanto os complexos de carbonato e hidróxido de metal tornam-se mais significantes em pH acima de 6-8. Além disso, os íons de hidrogênio competem com os cátions metálicos, de modo que a adsorção pelo óxido férrico hidratado, por exemplo, é baixa em sistemas ácidos, mas, aumenta com a elevação do pH. Em contrapartida, os oxiânions de Arsênio, Molibdênio, Selênio e Cromo tendem a ser desorvidos do óxido férrico hidratado com a elevação do pH, devido a competição com os íons OH (EPA, 2007).

Percebe-se que os processos de sorção e desorção de elementos químicos, na cobertura pedológica, são afetados pelo pH da solução do solo. Uma vez que o pH modifica a capacidade de troca catiônica, criando condições que podem aumentar ou diminuir a mobilidade de um determinado contaminante (EPA, 2007). Pagnanelli et al. (2003), comparando os resultados obtidos em seu estudo para absorção de Chumbo e Zinco a *Sphaerotilus natans* com os alcançados por Esposito et al. (2001) para Cobre e Cádmio, observa que a tendência é que a absorção de metal aumente com a elevação do pH. Os autores destacam que este fato não ocorre somente devido à competição dos íons de hidrogênio em pH baixo, mas também em decorrência da natureza fracamente ácida dos locais ativos no adsorvente, cuja desprotonação com pH crescente favorece a absorção de metal, sendo que, o metal mais ácido é mais adsorvido que o mais fraco, predominando a especiação do metal às características do adsorvente.

3 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

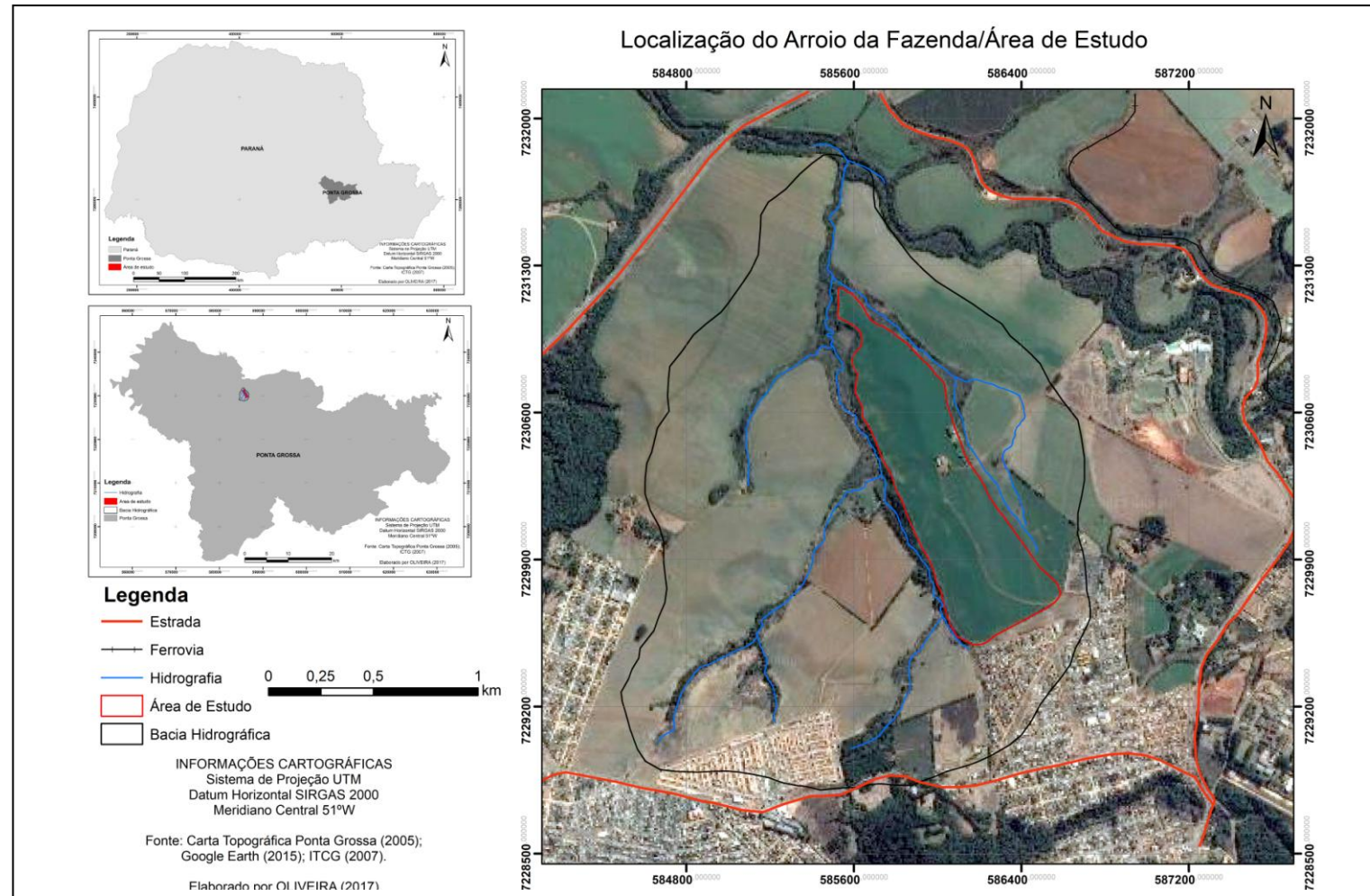
A área selecionada para verificar as propriedades do solo está situada no setor Norte de Ponta Grossa (*Figura 02*), cidade de porte médio (IBGE, 2015) que integra a região Centro-oriental do Paraná (MINEROPAR, 2006). Trata-se de uma porção agrícola, de aproximadamente 64 ha e, cerca de, 55 m de amplitude altimétrica, cercada pelo corredor industrial (N), Rodovia PR151 pelos bairros Jardim Esplanada, Boa Vista e Santa Mônica (ESW). As condições de uso e manejo do solo são as mesmas em toda extensão da área de estudo. Sendo de uso agrícola, sob cultivo no sistema de plantio direto há mais de quarenta (40) anos, com rotação de culturas: feijão/soja – milho/aveia.

Está assentada, de acordo com MINEROPAR (2006), em terrenos das unidades geológicas da seção Siluro-devoniana, representada pelo Grupo Paraná: Formação Furnas e Ponta Grossa (membro Jaguariaíva), e do Carbonífero Superior pelo Grupo Itararé (Lagoa Azul e Campo Mourão).

Geologicamente tem-se o predomínio do membro Jaguariaíva da Formação Ponta Grossa, composta por folhelhos cinza escuros, muito micáceos, com laminação plano-paralela, com raras intercalações e lentes centimétricas de composição siltico/arenosas. Na sua porção norte tem-se a Formação Furnas, considerada uma unidade com corpos de geometria tabular que tem em sua composição arenitos brancos de granulação média a grossa, micáceos e feldspáticos, de matriz caulinita e estratificação cruzada com níveis conglomeráticos (MINEROPAR, 2005, 2006, 2007).

O arranjo estrutural mostra-se complexo com intensa interação entre falhas de direção NW e NE (*Figura 03*) e, diferenças bruscas de espessura das unidades Formação Lagoa Azul e Ponta Grossa, dentro de cada bloco estrutural (MINEROPAR, 2006, 2007). Este contexto lito-estrutural está inserido na unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, na unidade morfoescultural Segundo Planalto Paranaense, subunidade Planalto de Ponta Grossa, proporcionando que tal configuração possa ser atribuída, em parte, à influência da estrutura geológica regional, representada pelo Arco de Ponta Grossa (MELO et al., 2003) e dos processos comandados pela ação pluvial, característica das regiões subtropicais (AB' SABER, 2003). Como resultado tem-se uma área que possui um

Figura 02 - Localização da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.



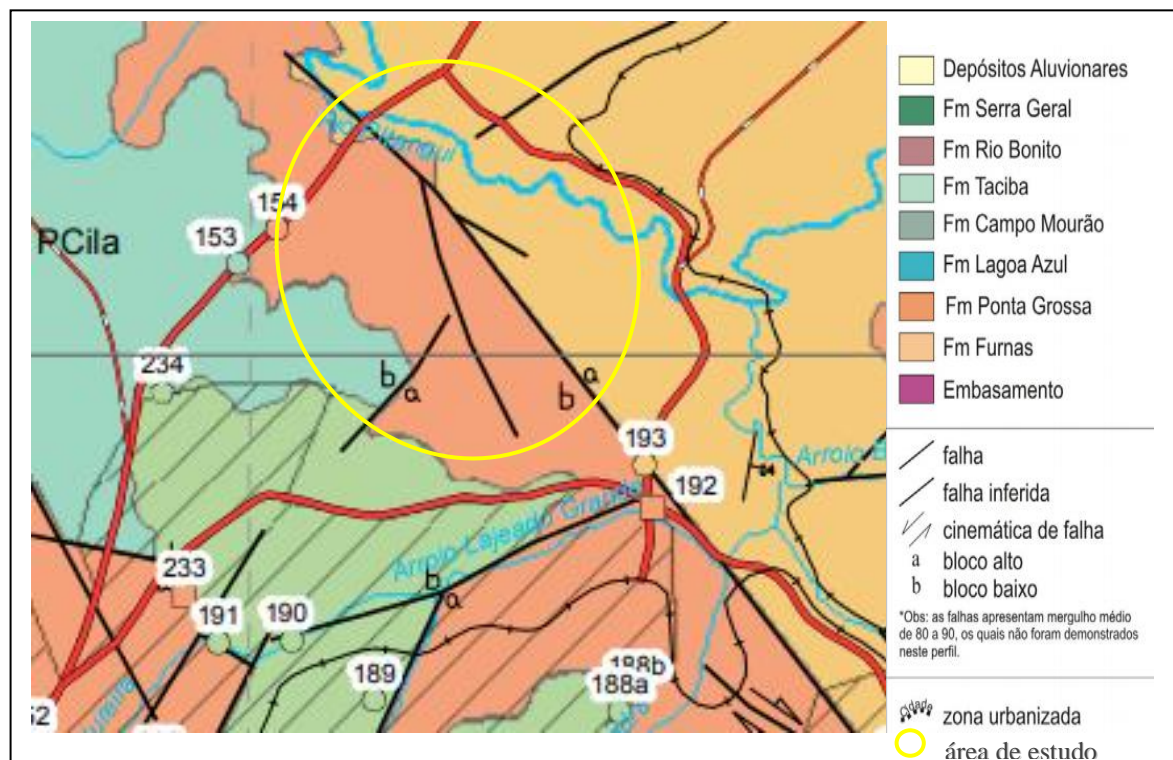
Fonte: da autora (organização)

Nota: Imagem Google Earth (2015).

relevo, acidentado, com dissecação média e predominância de topos alongados, vertentes retilíneas e côncavas, com vales em “U” e, direção geral da morfologia NW-SE (ITCG, 2018)

Em termos de relevo, a colina selecionada apresenta duas vertentes longas (> 270 m) em perfil e médias em planta (< 270m), cujos limites são dados por canais fluviais de 2ª ordem, do tipo controlados. O rio que limita a colina à esquerda é de 3ª ordem enquanto aquele à direita da colina é de 2ª ordem (STRAHLER, 1952). A colina apresenta o topo plano e alongado, com orientação SE-NW enquanto as vertentes, oriental (Vr) e ocidental (Vc), apresentam formas distintas, tanto em planta como em perfil. A Vr expõe um perfil suavemente ondulado com forma convexa – planar (Figura 01). Em contrapartida, a Vc apresenta superfície -perfil- mais movimentada, pela sequência de segmentos convexos, côncavos e retilíneos, do topo à base.

Figura 03 - Litologia da Área de Estudo Arroio da Fazenda.



Fonte: MINEROPAR. **Mapa Geológico Folha de Ponta Grossa** (1:100.000), 2006. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/mapeamento/Mapa_Geologico_Ponta_Grossa_100000_2006.pdf.> Acesso em 24 jul. 2017.

Observação: adaptado pela autora.

Originalmente a vegetação compunha-se de campos naturais, compostos de estepes entremeadas por florestas subtropicais (MAACK, 1948), pertencente ao Bioma da Mata Atlântica, como Floresta Ombrófila Mista Aluvial (AB' SABER, 2003; IBGE, 2014; ITCG, 2009). Típica de climas influenciados por diferentes fatores macroclimáticos, como as massas de ar de baixa pressão da Zona Equatorial Atlântica e, de alta pressão da frente polar anticiclônica do Atlântico Sul, que migram na direção Sul durante os meses de verão e inverno, respectivamente (MAACK, 2012). Bem como, pelas variações irregulares que ocorrem na integração do oceano com a atmosfera que levam aos fenômenos *El Niño* ou *La Niña* (SIMEPAR, 2018). A precipitação média anual é de 1500 mm (SIMEPAR, 2018), com ocorrência de chuvas orográficas, isto pela influência exercida pela escarpa devoniana. (MELO, et al., 2010).

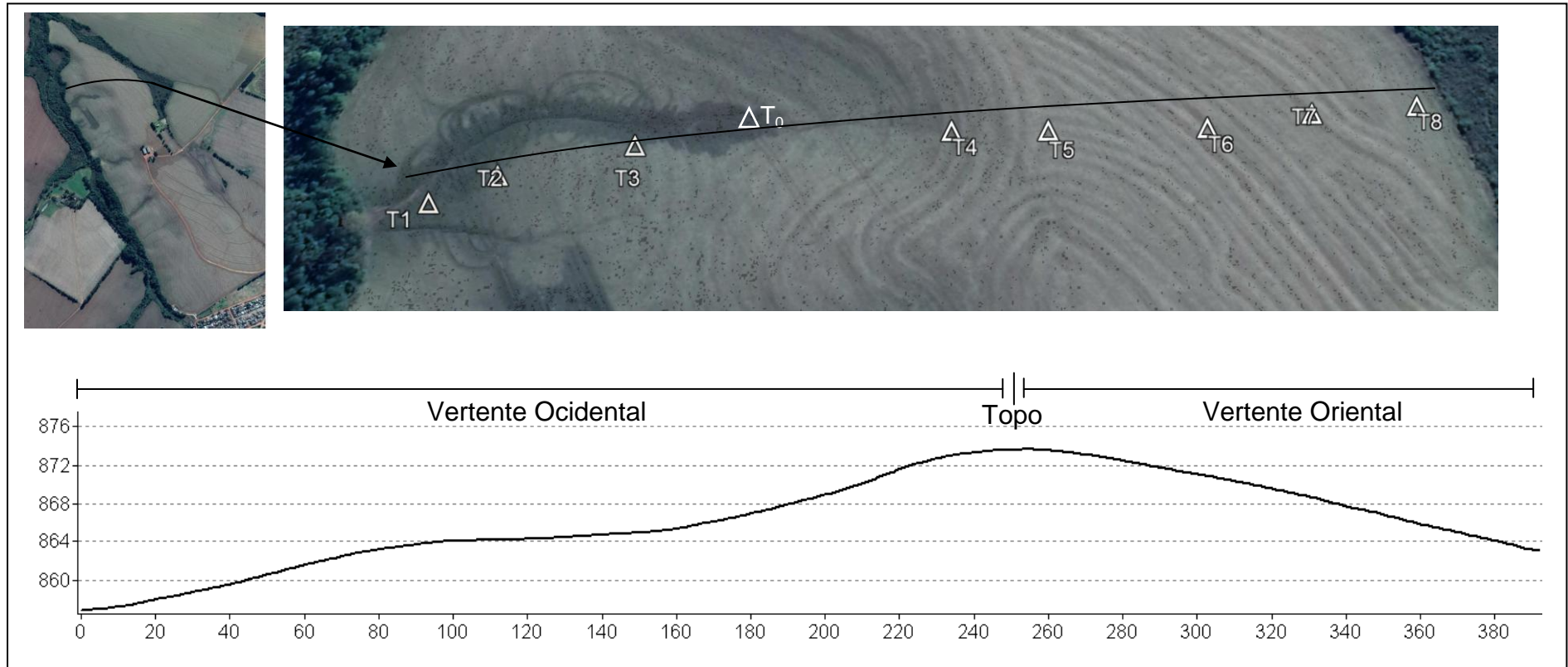
Refletindo este quadro natural, os solos aí desenvolvidos são classificados, de acordo com EMBRAPA (2005), como Latossolos Vermelhos Distróficos e Cambissolos Háplicos Tb Distróficos, os mesmos que predominam no município. Cabe destacar que essa classificação é em escala pequena (1: 250.000).

3.1 SEGMENTOS DA VERTENTE ESTUDADA.

A escolha dos segmentos de vertente, estudados nessa pesquisa, se baseou no entendimento de que a forma da vertente interfere tanto na dinâmica dos diferentes fluxos de energia e matéria, quanto na redistribuição de água e materiais de solo, ou seja, influencia na distribuição de elementos químicos do solo, inclusive na dispersão de contaminantes.

Nesse contexto foi definido um transecto perpendicular na área de estudo, como demonstrado na *Figura 04*, abrangendo dois segmentos de vertente (um na *Vr* e outro na *Vc*). O segmento de vertente oriental apresenta forma convexo-planar com amplitude altimétrica de aproximadamente onze (11) metros, onde a inclinação média de 6,8% é distribuída quase uniformemente ao longo dos cento e sessenta e dois (162) metros de comprimento em planta. Já, o segmento da vertente ocidental apresenta forma complexa, com porções côncavas, convexas e retilíneas. Com dezoito (18) metros de amplitude altimétrica, a inclinação média de 6,9 % é resultado do balanço entre áreas de declive acentuado e outras planas, distribuídos nos seus duzentos e sessenta e dois (262) metros de comprimento em planta.

Figura 04 – Segmentos de Vertente na Área de Estudo “Arroio da Fazenda” – Perfil Transversal da colina.



Fonte:imagens Google Earth.

Organização: Da autora.

Legenda: — Transecto; T_n△ Trincheira ~ Perfil Topográfico

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para a caracterização morfopedológica da área de estudo, de modo a subsidiar estudos de vulnerabilidade à contaminação.

Os procedimentos empregados na pesquisa foram realizados em três ambientes distintos, mas de forma integrada, a saber:

- a) **Em gabinete:** As leituras e revisão da literatura; construção e desconstrução-reconstrução das técnicas, dos objetivos; tratamento e análise dos dados; geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), de Índice Topográfico de Umidade (ITU) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos; interpretação dos resultados e construção de texto.
- b) **Em campo:** o maior tempo de trabalho, para reconhecimento da área, seleção dos pontos amostrais, coletas prévias de amostras de solo, reconhecimento dos perfis de solo e levantamento topográfico altimétrico.
- c) **Em Laboratório:** as análises das amostras de solo: em laboratório privado _ *INTERPARTNER* – para análises químicas, no LAGEF- para as análises físicas (de textura) e no Complexo de Laboratórios Multiusuários (CLABMU) da UEPG para análise de fluorescência das amostras de solo.

A revisão de literatura foi a fase mais longa da pesquisa, pois se inicia e acompanha a pesquisa até a sua conclusão, permitindo afirmar-se que o sistema morfopedológico é extremamente complexo seja pelas inter-relações solo-relevo, seja pelas interações solo-água e possíveis contaminantes.

Assim, esta pesquisa não se estendeu à questão da vulnerabilidade da área à contaminação por algum elemento em especial, detendo-se na identificação das condicionantes morfopedológicas a ela relacionada. Sem a pretensão de esgotar a questão relativa às reações e transformações físico-químicas que ocorrem entre relevo-solo e um composto ou elemento químico específico, esta pesquisa se dedicou a trazer uma leitura geográfica que contribua para estudos futuros relacionados a vulnerabilidade destes solos contaminação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

Os atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários. Os atributos primários são calculados diretamente a partir dos dados de elevação como: declividade e curvatura da vertente. Estes auxiliam na percepção das áreas com maior potencial de energia, direcionamento e mudança da velocidade dos fluxos hídricos, mantendo relevância com a produção de sedimentos e perda de solo associada à poluição de fontes superficiais de água. Enquanto, os secundários, como: Índice Topográfico de Umidade (ITU) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (ICTS) são obtidos a partir da combinação de atributos primários e, descrevem ou caracterizam a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem, tais como a distribuição do conteúdo de água no solo ou o potencial de erosão (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991), facilitando decisões de gerenciamento ambiental direcionadas.

O ITU fornece uma medida relativa do estado de umidade de uma determinada área (BUCHAMAN et al., 2013). De acordo com Capoane, Costa e Kuplich (2017), ele especifica as zonas com potencial de saturação hídrica e geração de escoamento, oferecendo uma base para a interpretação do comportamento hidrológico na paisagem. Isto é útil na identificação de áreas hidrologicamente sensíveis às atividades potencialmente poluidoras.

O ICTS relaciona a área de contribuição específica e a declividade da vertente (MOORE, GRAYSON e LADSON, 1991), de modo que, quanto mais elevado o valor dessas variáveis, maior será a capacidade do fluxo hídrico de transportar partículas de solo. O conhecimento da capacidade de transporte de sedimentos na vertente tem importância para estudos de vulnerabilidade a contaminação difusa, pois a fração erodida do solo pode atuar como veículo de transporte de contaminantes, como apontado por Quinton e Catt (2007).

Nesta pesquisa, a parametrização dos atributos foi realizada em ambiente SIG, com auxílio do software ArcGIS versão 10.1 (ESRI, 2012). Os dados foram georreferenciados conforme Sistema Geodésico de Referência vigente, o SIRGAS 2000, sendo definidos os parâmetros descritos no Quadro 02.

Os dados de elevação disponíveis, para a área de estudo, apresentavam resolução espacial de 30 metros, a qual se mostrou inadequada à escala de

trabalho. Optou-se, desse modo, pela realização de levantamento topográfico altimétrico e geração de curvas de nível com equidistância de 01 (um) metro.

Quadro 02: Critérios Adotados na Padronização dos Dados Cartográficos.

Elementos Cartográficos	Critérios
Limite espacial	Área de estudo: duas vertentes de uma Forma de relevo no interior de uma sub-bacia periurbana
Projeção cartográfica	Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM)
Fuso	22 – Sul – Mediano Central: 51 ^o
Datum horizontal	SIRGAS 2000
Datum vertical	Imbituba – SC
Resolução do MDE	1 m/pixel

Organização: Da autora.

4.1.1 Levantamento Topográfico Altimétrico

Os levantamentos topo-altimétricos foram realizados com equipamentos do Laboratório de Geodésia e Levantamentos da UEPG¹, utilizando-se de uma Estação Total Leica TC 407, a qual permite a obtenção automatizada de informações referentes à distância horizontal e desnível entre dois pontos, bem como realiza o cálculo das coordenadas dos pontos ocupados pelo refletor, a partir de uma orientação prévia.

O plano de levantamento pautou-se no estabelecimento de três poligonais fechadas, tendo as duas primeiras cinco pontos de fixação da Estação, e a última três pontos. Cada poligonal tem, no mínimo, um “Ponto de Estação” em comum com a vizinha, como representado na Figura 06.a. Com o equipamento topográfico, foram realizadas visadas de Ré e Vante, totalizando seiscentos e oitenta e quatro (684) pontos irradiados (vide Figura 06.b).

O tratamento dos dados foi realizado pelo aplicativo *Posição*, integrado ao software AutoCAD® 2015. O referido aplicativo faz a leitura automática dos dados

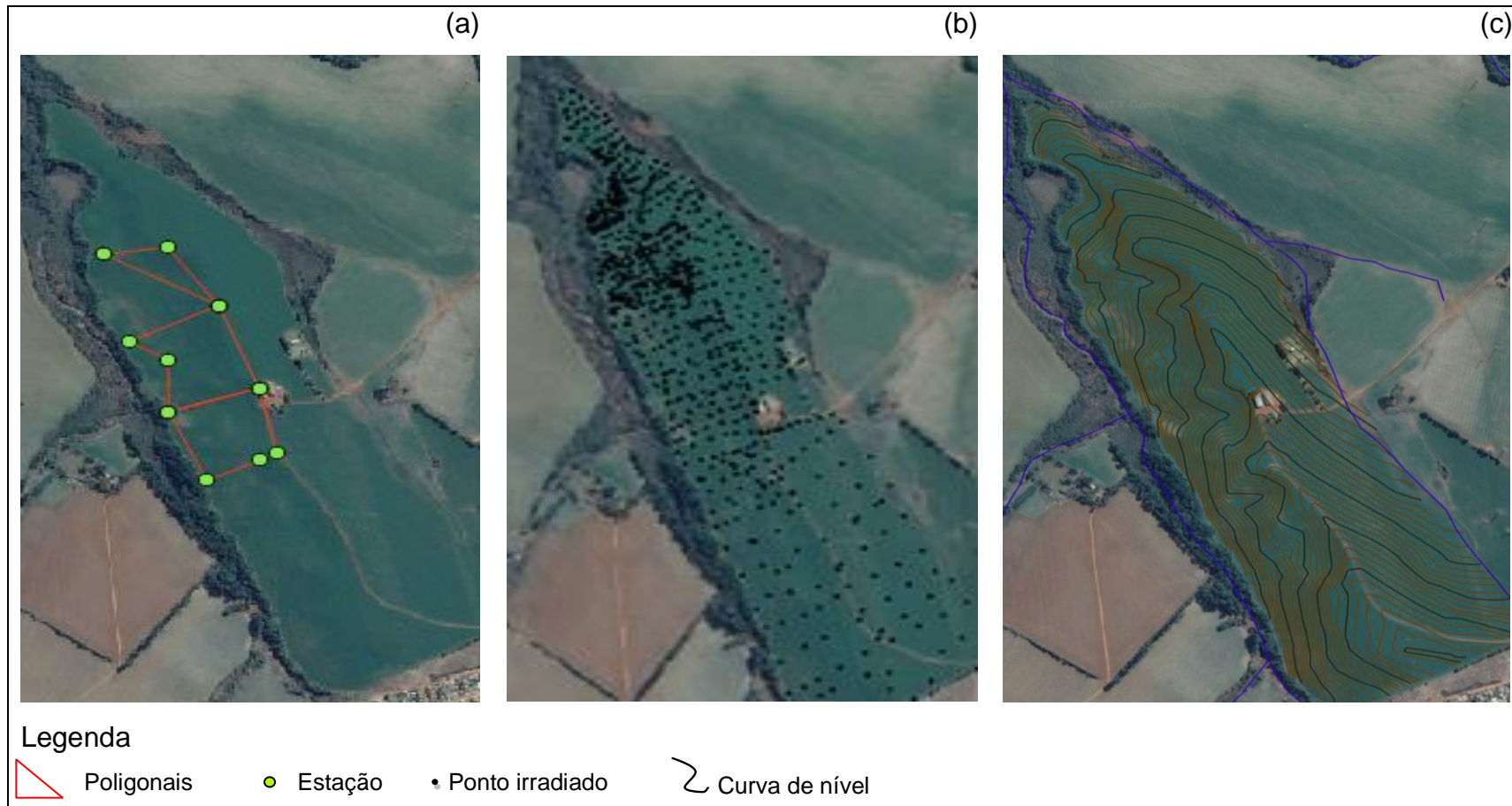
¹. Sob a coordenação e auxílio da Prof. Dra. Andréia Tedesco – UEPG.

da Estação Total; detecta a sequência, realizando o cálculo de poligonais, bem como o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. “A configuração de tolerância estabelecida, neste trabalho foi: 0° 04’00” (angular); 1:1000 (linear); e 50 mm \sqrt{k} (altimétrico).

A partir da malha de pontos, obtida no levantamento topográfico altimétrico, foram geradas curvas de nível com equidistância de um (1) metro (Figura 06.c). Estas foram originadas pelo aplicativo *Posição* com a interpolação dos pontos pelo método de triangulação TIN, com restrições de Delawnebey.

Para estabelecer a orientação, foram obtidas as coordenadas planas e altimétricas em cada vértice (Ponto de Estação), através do receptor de sinal Global Positioning System (GPS) Laica SR 20. O receptor foi programado no modo de operação estático rápido, com taxa de gravação/rasteio de dez (10) segundos e máscara de corte de quinze graus. O tempo mínimo de leitura foi definido como sendo de vinte (20) minutos. As coordenadas planas e altimétricas foram referenciadas ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e ao International Terrestrial Reference Frame (ITRF), através do CSRS *Precise Point Positioning* -PPP (GPS- PPP) disponibilizado no site do IBGE.

Figura 06 - Procedimentos de Levantamento Topográfico Altimétrico na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.



Fonte: Da autora.

Nota: (a) Poligonais estabelecidas; (b) Pontos irradiados; (c) Curvas de níveis geradas.

4.1.2 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para geração do MDE, foram utilizados os dados obtidos a partir do levantamento topográfico altimétrico (pontos cotados e curvas de nível) e da demarcação das linhas de drenagem do Arroio da Fazenda. Empregou-se o método *Topo To Raster (TOPOGRIDE)*, baseado no programa *ANUDEM (Australian National University Digital Elevation Model)*, presente no software *ESRI ArcGIS 10.1*. Tal método apresenta características do interpolador Inverso do Quadrado da Distância, proporcionando a utilização da drenagem e outros corpos d'água como elemento de suavização e precisão, gerando modelos hidrológicamente consistentes (FERNANDES; MENESES, 2005).

Inicialmente foi verificada a consistência da base de dados vetorial, analisando e corrigindo-se os erros de topologia e de posição. Sendo gerados e avaliados os gráficos de quantil-quantil (QQPlot), para eliminação de possíveis erros de extrapolação.

A resolução espacial horizontal adotada foi de um metro por pixel, tendo sido obtida de acordo com a proposta de Hengl (2006) para MDE em escala de trabalho, através da equação:

$$R = SN \times 0,0005 \quad (1)$$

Onde,

R = resolução espacial horizontal (m/pixel);

SN = escala do levantamento (considerada 1: 2.000).

4.1.3 Geração dos Atributos Primários

Os atributos topográficos: declividade, plano e perfil de curvatura foram discretizados a partir do MDE. A declividade foi determinada por vizinhança. A curvatura em planta e em perfil foram modeladas utilizando a proposta das variáveis direcionais de Zevenbergen e Thorne (1987).

Para representação da curvatura em planta o modelo foi classificado em segmentos convergentes (<-0,3), planares (- 0,3 a 0,3) e divergentes (>0,3). Já, para

representação da curvatura em perfil o modelo foi classificado em segmentos convexos ($<-0,3$), retilíneos ($-0,3$ a $0,3$) e côncavos ($>0,3$).

Todos os atributos foram gerados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), através do software ArcGIS 10.1.

4.1.4 Geração de Atributos Secundários

Os atributos topográficos secundários: Índice Topográfico de Umidade (ITU) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (ICTS) foram obtidos com o auxílio do software ArcGIS 10.1, a partir da combinação de atributos primários e de vizinhança global.

Neste trabalho, a Área de Contribuição Específica (A_c) foi calculada pelo método D-Infinito (D^∞), com o auxílio da extensão TauDEM 5.1 do software *ESRI/ArcGIS®* 10.1. Nesse método, o ângulo de direção do fluxo é obtido de acordo com a direção mais íngreme, considerando-se as oito (8) faces triangulares formadas em uma janela de células 3×3 .

O ITU foi determinado conforme *Equação 02*:

$$ITU = \ln \frac{A_c}{\tan \beta} \quad (2)$$

Onde:

ITU = índice topográfico de umidade (%);

A_c = área de contribuição;

β = ângulo de inclinação.

O Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (ICTS) foi modelado a partir dos modelos de declividade e de acumulação de fluxo, conforme descrito em Moore, Grayson e Ladson (1991), aplicando-se a *Equação 03*.

$$\tau = \left(\frac{A_c}{22,13} \right)^{0,6} \left(\frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (3)$$

Onde:

τ = índice de capacidade de transporte de sedimentos (%)

A_c = área de contribuição específica

β = ângulo de inclinação

4.2 RECONHECIMENTO DO SOLO E COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO

O reconhecimento dos solos seguiu os critérios preconizados no Manual de Classificação dos Solos - EMBRAPA (2011), até o terceiro nível de categorização. A identificação das classes de solos foi realizada em razão do horizonte diagnóstico; da saturação por bases; da classe textural; do tipo de horizonte A, e das características intermediárias entre classes e relevo.

Para a classificação dos solos foram realizadas prospecções por meio de tradagens e abertura de trincheiras (*Figura 07*). As tradagens foram feitas ao longo de dois segmentos de vertente com trado tipo “holandês”. As trincheiras foram abertas em topossequência, sendo cinco na vertente ocidental, três na vertente oriental e uma no topo. Todas as trincheiras foram abertas no mesmo dia, com auxílio de uma retroescavadeira.

Para definição dos pontos de amostragem foram observadas as variações topográficas e posição do solo na paisagem, evitando-se áreas com alteração antrópica excessiva (estradas, marcas de pneu de trator, revolvimento do solo, etc).

Foram coletas dois tipos de amostra de solo: (a) amostras indeformadas de 0 cm até 40 cm de profundidade, a cada dez centímetros; (b) amostras deformadas, coletadas de 0 cm até 80 cm (quando o solo atingia essa profundidade), buscando-se respeitar as camadas de solo.

Figura 07 - Reconhecimento dos Solos e Coleta de Amostras na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.



Fonte: Da autora.

Legenda: (a) Tradagem; (b) abertura de trincheiras

4.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS

No Laboratório de Geografia Física (LAGEF) da UEPG, as amostras deformadas foram secas ao ar (exceto aquelas para análise de umidade atual), destorroadas e passadas em peneira de 2mm. Depois, foram homogeneizadas e quarteadas, sendo que, de cada amostra foram separados cerca de 04 torrões (> 1cm) do solo seco, para avaliação da cor pela Carta de Munsell.

Após preparadas, cada uma das amostras passou por análise da Umidade Residual e realizado o Cálculo do Fator f , conforme método da EMBRAPA (2011), tendo sido utilizados 10 gramas de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). O cálculo do fator f é importante para correção dos valores das análises quando se utiliza TFSA.

As amostras indeformadas foram armazenadas nos respectivos cilindros, devidamente tampados, mantidas em pé em recipiente de plástico rígido, na geladeira, em 4°C. Posteriormente foram encaminhadas para o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para análise.

4.3.1 Análises físicas dos solos

Foram realizadas análises físicas do solo, buscando caracterizar as propriedades que influenciam nos processos de infiltração e circulação de solutos, como textura, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, densidade do solo, argila dispersa em água e grau de floculação da argila.

A análise da textura dos solos foi feita no LAGEF, pelo método da pipeta conforme proposto por Almeida et al. (2012), com algumas adaptações. Para individualização das partículas minerais as amostras foram submetidas à dispersão física e química, associadas. Para dispersão química, foram utilizados 25 ml de solução de hidróxido de sódio 1N e, aproximadamente, 100 ml de água destilada, para cada amostra de 20 g de terra fina seca ao ar. A desagregação mecânica foi realizada por agitação lenta em aparelho tipo *Wagner*, a 60 rpm por 16 horas. A separação da areia total foi feita por peneiramento (diâmetro e malha de 0,053 mm) e, as frações de silte e argila, por meio de sedimentação das partículas na suspensão, segundo a lei de Stokes. Para cada grupo de amostras analisadas foi realizada uma prova em branco.

A quantificação da fração de areia total foi feita por pesagem do material retido na peneira e calculada para expressar a proporção Kg Kg^{-1} . O teor de silte foi obtido pela pesagem da suspensão “silte + argila” coletada, imediatamente, após a agitação da solução (para homogeneização), na profundidade de 05 cm, conforme definido em Almeida et al. (2012), e pelos cálculos utilizando as Equações 04 e 05, adaptadas de Ruiz (2005). A quantidade de argila foi obtida pela aferição da massa da suspensão coletada, depois de decorrido o tempo de sedimentação da fração silte a 05 cm de profundidade.

Para a obtenção do teor de argila dispersa em água e do grau de floculação da argila, foi utilizado o mesmo método empregado para avaliação da textura do solo, porém, sem a utilização de dispersante químico.

$$T_{(S+Arg)} = \left[\frac{(M_{(S+Arg+D)} - M_D) \left(\frac{v_T}{v_C} \right)}{M_{TFSA}} \right] f \quad (4)$$

$$T_S = T_{(S+Arg)} - T_{Arg} \quad (5)$$

Nas quais:

f = fator de correção para terra fina seca em estufa (105°C)

M_{at} = massa areia total (g)

$M_{(Arg+D)}$ = massa argila + dispersante (g)

M_D = massa do dispersante (g)

M_{TFSA} = massa de TFSA (g)

$M_{(S+Arg+D)}$ = massa de silte + argila + dispersante (g)

T_{Arg} = teor de argila (Kg Kg⁻¹)

$T_{(S+Arg)}$ = teor de silte + argila (Kg Kg⁻¹)

T_S = teor de silte (Kg Kg⁻¹)

V_C = volume coletado (ml)

As análises de Densidade do Solo (D_s), Porosidade total (P_t), microporosidade (M_i) e macroporosidade (M_a) foram realizadas pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais, do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), conforme descrito em Camargo et al, 2009 utilizando amostras indeformadas em cilindros de aço inoxidável, com capacidade de 100 cm³ (50 mm de altura e 50 mm de diâmetro interno). A D_s foi determinada pelo método do anel volumétrico, enquanto a P_t foi considerada igual a umidade de saturação em volume. Já a M_i foi obtida pelo método da mesa de tensão com nível de sucção correspondente a 60 cm de altura de coluna d'água, e a M_a foi calculada subtraindo o teor de M_i de P_t .

4.3.2 Análises Químicas do Solo

As análises químicas, abaixo relacionadas, têm o objetivo de verificar a presença de atributos do solo que possam influenciar na retenção e/ou dispersão do contaminante na cobertura pedológica.

As análises de: teor de matéria orgânica (método de Walkley-Black), pH do solo (em KCl), CTC, saturação por bases e saturação por alumínio, foram realizados pelo Laboratório *Interpartner*², o qual emprega os métodos preconizados no boletim técnico de Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos, possuindo selo de certificação de qualidade (emitido pelo IAC) e pela Comissão Estadual de Laboratórios de Análises Agronômicas (CELA-PR). Para as referidas análises, a extração de Ca e Mg trocáveis foi realizada por KCl 1M. A acidez potencial (H + Al) foi obtida com acetato de cálcio, e K foi com solução de Mehlich.

A quantificação dos óxidos e de metais pesados (elementar) foi realizada com o equipamento Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, por dispersão de comprimento de onda, com modo de análise rápido EZ ANALYZE, e varredura de Boro a Urânio. Isto foi realizado no Complexo de Laboratórios Multiusuários (CLABMU), da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Foram analisadas amostras de solo total (sem fracionamento) e, da fração argila. A argila foi separada do solo durante o processo para análise da textura, sendo separada do silte por sedimentação, seguindo a Lei de Stokes. Para essas análises, as amostras (solo total e fração argila) foram secas ao ar (ou em estufa a 40°C), pulverizadas em gral com pistilo, e peneiradas em peneira de 43 µm.

4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram realizadas análises de correlação linear simples entre as variáveis (PEARSON; FILON, 1898), com o objetivo de identificar o grau de dependência entre elas. As análises foram realizadas no programa R, versão 3.3.1 (R Core Team, 2016).

² O Laboratório Interpartner tem como responsável técnico o engenheiro químico Evaldo Bilerbeck Júnior (CREA/PR nº 39185/D) e está situado na Rua Barão Basílio Machado, nº 25, bairro de Oficinas no município de Ponta Grossa – PR.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

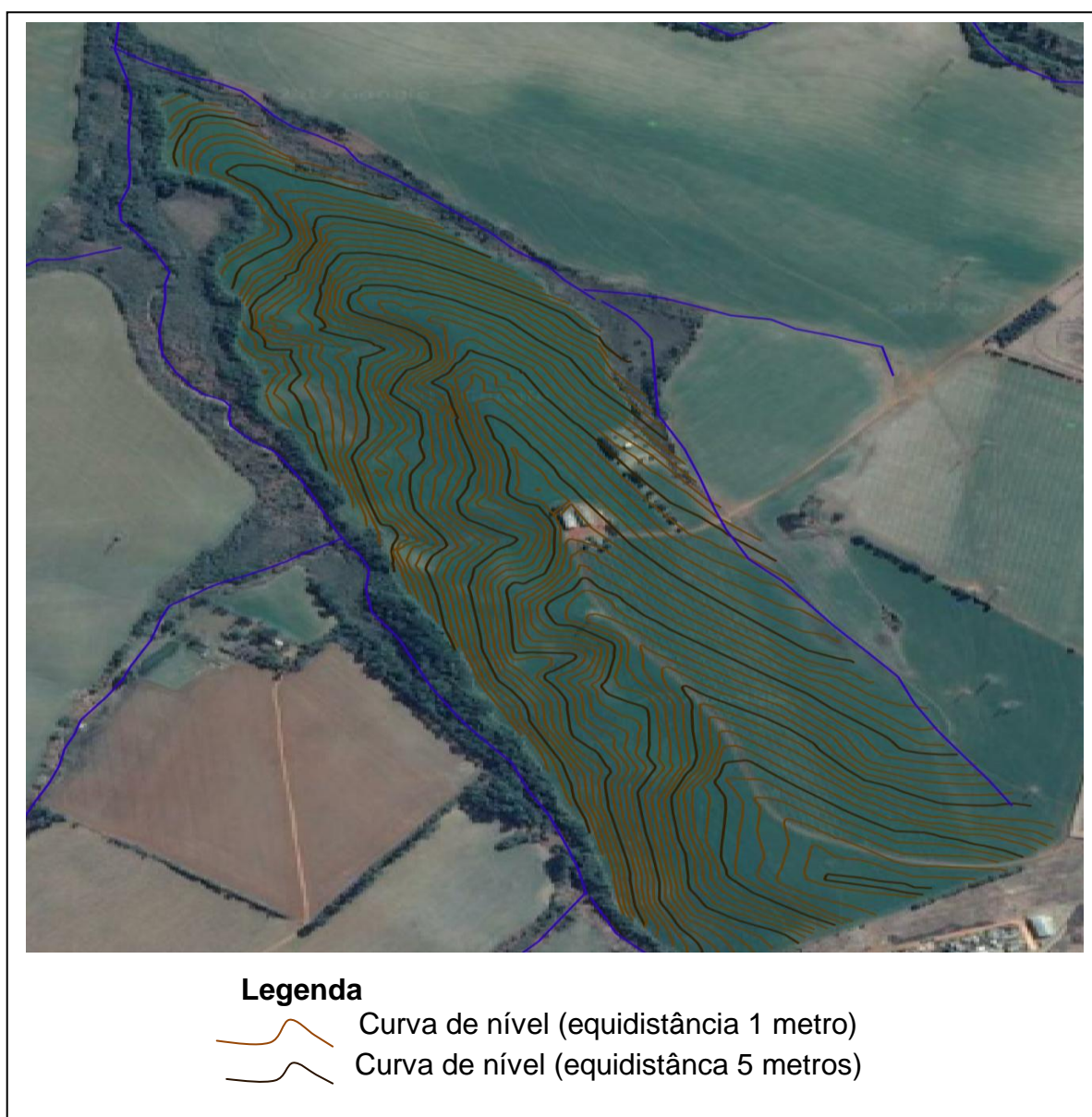
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

A partir do levantamento topográfico altimétrico obteve-se um total de 684 (seiscentos e oitenta e quatro) pontos, sendo 10 (dez) através do receptor de sinal GPS (Global Positioning System) e 674 (seiscentos e setenta e quatro) por irradiação com a estação total. A execução do levantamento possibilitou a obtenção de dados de altimetria em pontos característicos do relevo da área de estudo (divisores de água, vales, mudança de declive). Permitindo gerar curvas de nível com 01 (um) metro de equidistância (*Figura 07*). Bem como, o modelo digital de elevação (MDE), a partir do qual foram discretizados os atributos topográficos primários (declividade e curvatura da vertente) e secundários (Índice Topográfico de Umidade e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos).

A distribuição das classes de declividade, para área de estudo, está representada na *Tabela 01* e na *Figura 08.a.*. Percebe-se o predomínio do relevo suave ondulado, especialmente na vertente oriental (Vr). Porções mais declivosas aparecem principalmente na alta e baixa vertente ocidental (Vc). Nesta última, o gradiente de inclinação descreve segmentos convexos, côncavos e retilíneos integrados.

A curvatura da vertente em planta e em perfil, discretizada para a área de estudo, é demonstrada nas *Tabelas 02 e 03* e, na *Figura 08.b.c.*. Observa-se predomínio de segmentos de vertente classificados como planares (em planta) e retilíneos (em perfil), especialmente na Vr. Os segmentos divergentes e convexos aparecem, principalmente, ao longo dos divisores de água, enquanto os convergentes e côncavos estão mais presentes na Vc. A modelagem quanto à curvatura de vertente, em planta e em perfil, mostrou-se consistente com as observações em campo.

Figura 08 - Curvas de Nível Geradas com Equidistância de Um Metro – Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.



Fonte: Da autora.

Tabela 01: Distribuição das Classes de Declividade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”

Declividade	Área (ha)	% da Área
0 a 3 %	2,36	3,68
3 a 8 %	32,53	50,70
8 a 13%	22,87	35,66
13 a 20 %	6,31	9,83
> 20 %	0,09	0,14
Total	64,17	100

Fonte: Da autora.

Tabela 02: Distribuição das Classes de Curvatura de Vertente em Planta na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”:

Curvatura do Segmento de Vertente	Área (ha)	% da área
Convergentes (<-0,3)	4,16	6,48
Planares (-0,3 a 0,3)	54,33	84,68
Divergentes (>0,3)	5,67	8,84
Total	64,17	100

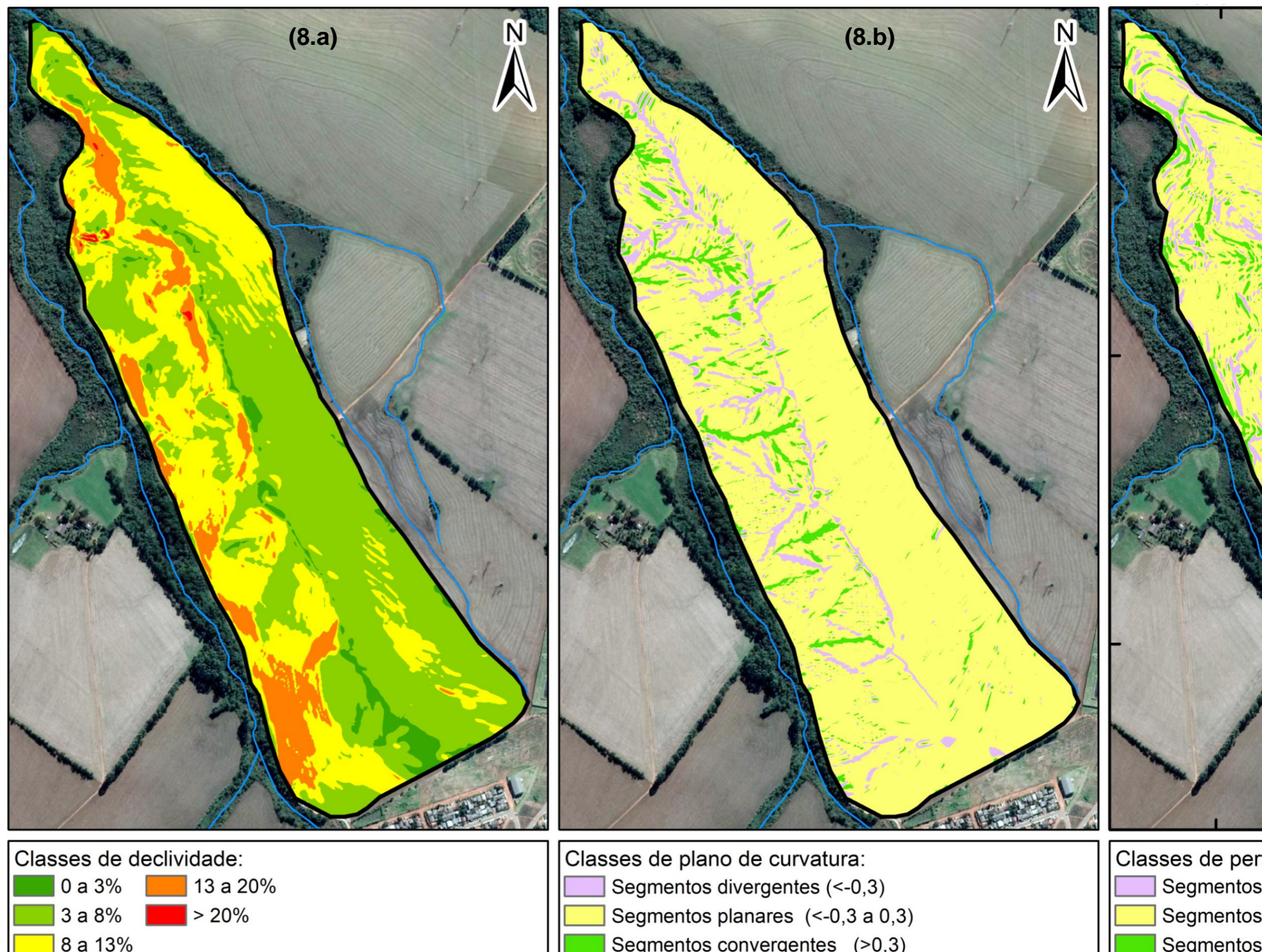
Fonte: Da autora.

Tabela 03: Distribuição das Classes de Curvatura de Vertente em Perfil na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”:

Curvatura do Segmento de Vertente	Área (ha)	% da área
Côncavos (<-0,3)	5,91	9,22
Retilíneos (-0,3 a 0,3)	51,38	80,07
Convexos (>0,3)	6,87	10,71
Total	64,17	100

Fonte: Da autora.

Figura 09 - Atributos Topográficos Primários da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.



A distribuição, para a área de estudo, dos atributos topográficos secundários: Índice Topográfico de Umidade (ITU) e Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos (ICTS) está representada nas *Tabelas 04 e 05* e nas *Figura 09.a. e 09.b.*

Tabela 04: Distribuição das Classes do Índice Topográfico de Umidade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”:

Classe do ITU (%)	Área (ha)	Porcentagem
<6	26,84	41,82
6 a 7,5	30,27	47,17
7,5 a 9,0	6,29	9,81
9,0 a 10,5	0,58	0,90
>10,5	0,20	0,30
Total	64,16	100

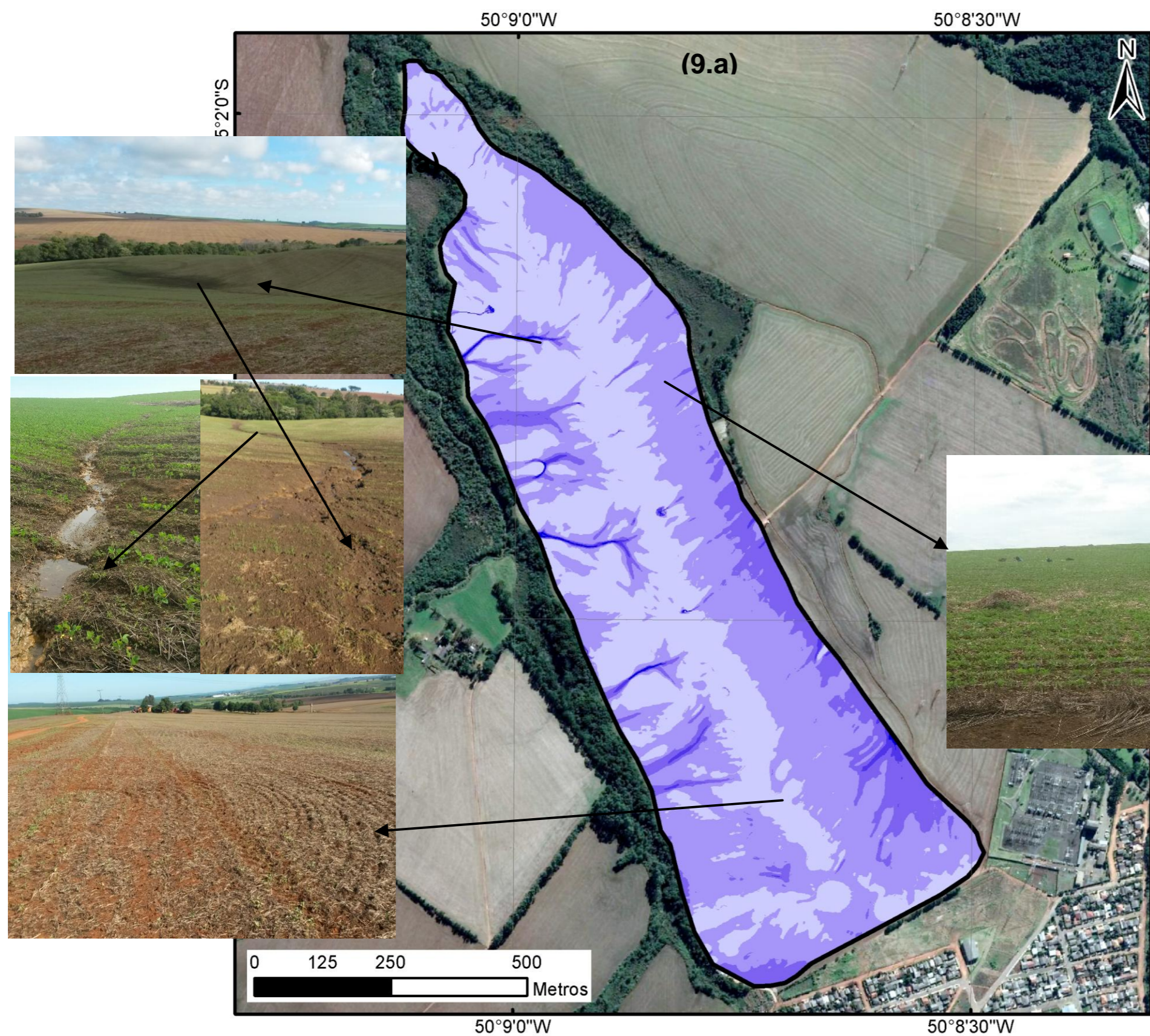
Fonte: Da autora.

Tabela 05: Distribuição das Classes do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”:


Classe de ICTS (%)	Área (ha)	Porcentagem
<1	41,11	64,07
1 a 10	7,03	10,95
10 a 25	7,21	11,24
25 a 50	6,13	9,55
>50	2,68	4,18
Total	64,16	100

Fonte: Da autora.

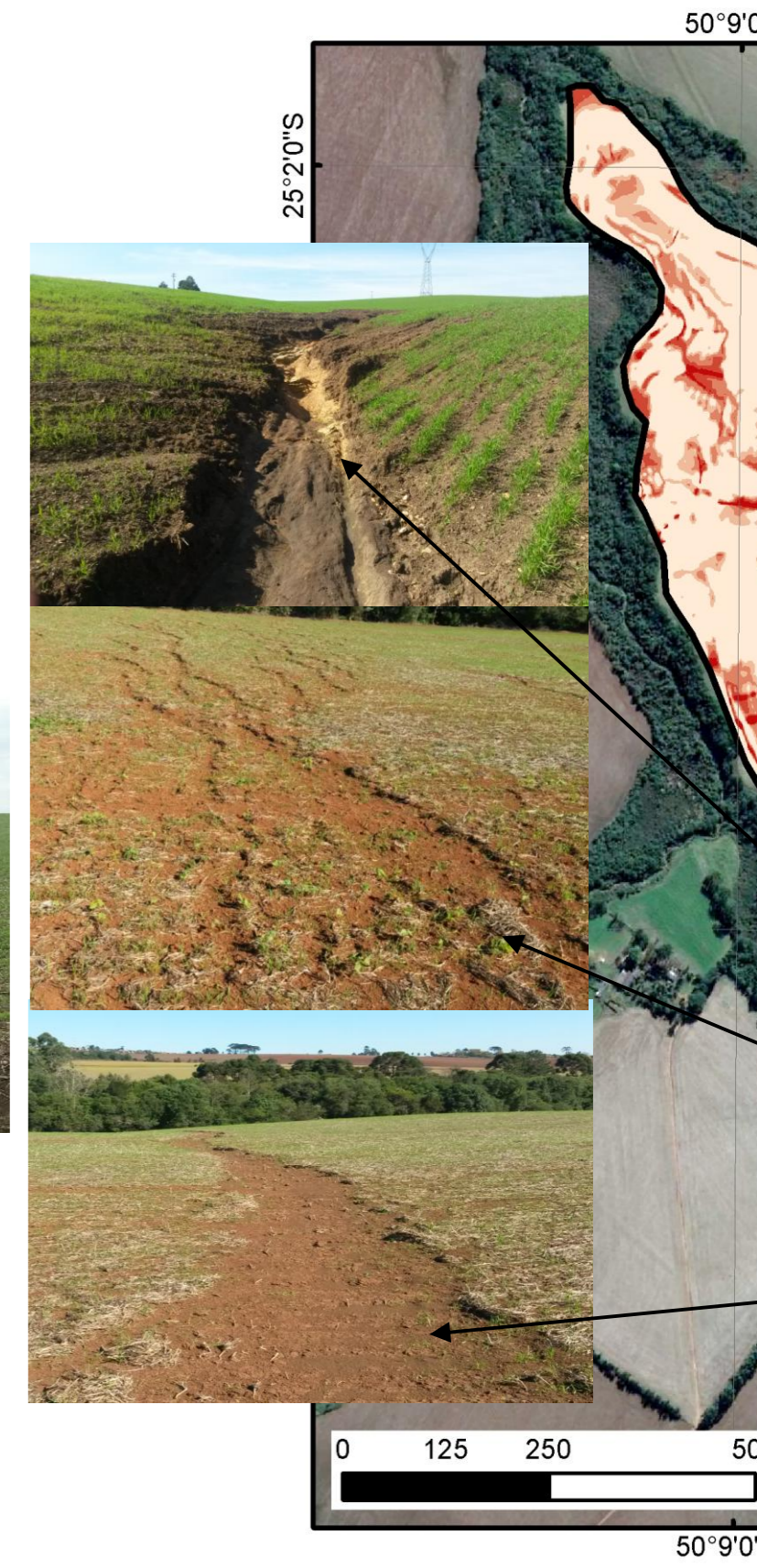
Figura 10 - Atributos Topográficos Secundários da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.




ITU:

 <6 %

Fonte dados: Luciane Gryczak (2018).
 Basemap: acervo Google Earth (2017).
 Org. dados: Luciane Gryczak (2018)



CTS:

 <1 %

A análise dos atributos topográficos da área de estudo, e das observações em campo, evidenciou a assimetria do relevo existente entre as vertentes oriental e ocidental. Na *Vr* predomina a forma convexo-planar com inclinação suave, enquanto na *Vc* o relevo mostra-se ondulado apresentando segmentos côncavo-convergentes e convexo-planares interligados, com porções mais declivosas, principalmente, na alta e baixa vertente. Essa assimetria favorece variações na velocidade e direcionamento dos fluxos hídricos e, conseqüentemente, diferentes condições de umidade do solo, como demonstrado na *Figura 09.a.*

Na *Vr*, a configuração do relevo favorece a distribuição do fluxo hídrico no topo e nas porções mais altas, sendo que o teor de umidade tende a aumentar, gradativamente, da média a baixa vertente. Isso devido há maior influência da área de acumulação à montante e proximidade ao canal fluvial. Na *Vc* os segmentos côncavo-convergentes promovem a concentração do fluxo hídrico, com redução da velocidade do escoamento na média vertente, onde o relevo tende a plano. O que favorece a formação de zonas úmidas e de saturação hídrica, bem como, caminhos preferenciais de escoamento (*rills*) no centro das porções côncavas. Estes últimos funcionam como canais efêmeros durante e após precipitações pluviométricas. A ocorrência de segmentos *convexos-planares* e maior declividade na baixa *Vc* proporcionam menor acúmulo de umidade nessa porção da vertente, em comparação com a *Vr*.

A diferente configuração do relevo, nas vertentes oriental e ocidental, também propicia variações na capacidade de transporte de sedimentos, como demonstra a *Figura 9.b.* Na *Vr* a curvatura convexo-planar associada à inclinação predominantemente suave, e ao comprimento de vertente mais curto, proporciona menor aporte de energia cinética durante o escoamento superficial, resultando em valores baixos de ICTS. O que indica menor poder de carreamento de partículas pelo escoamento superficial. Em campo não foram visualizados lineamentos erosivos ao longo da *Vr*, mas pode-se notar a deposição no sopé da vertente, o que indica a ocorrência de processos erosivos laminares. Já na *Vc*, nos segmentos onde ocorre a convergência de fluxo hídrico, há a formação de sulcos profundos e ravinas onde o ICTS é elevado. Assim como nas porções convexo-planares, especialmente nos segmentos retilíneos mais declivosos. Nessas áreas foi observada a ocorrência de muitos sulcos de erosão.

5.2 RECONHECIMENTO DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS

O resumo, das características morfológicas dos perfis de solo estudados, na área de estudo, está exposto no *Quadro 03*. Na *Figura 10* é apresentado o perfil topográfico do transecto com as topossequências: ocidental e oriental, bem como as ilustrações dos perfis de solo nas trincheiras. As propriedades físicas do solo são apresentadas nas *Figuras 11 e 12*. A *Figura 11* demonstra a distribuição das frações granulométricas do solo, bem como da Argila Dispersa em Água. Enquanto a *Figura 12* exhibe a distribuição dos valores de densidade e porosidade do solo.

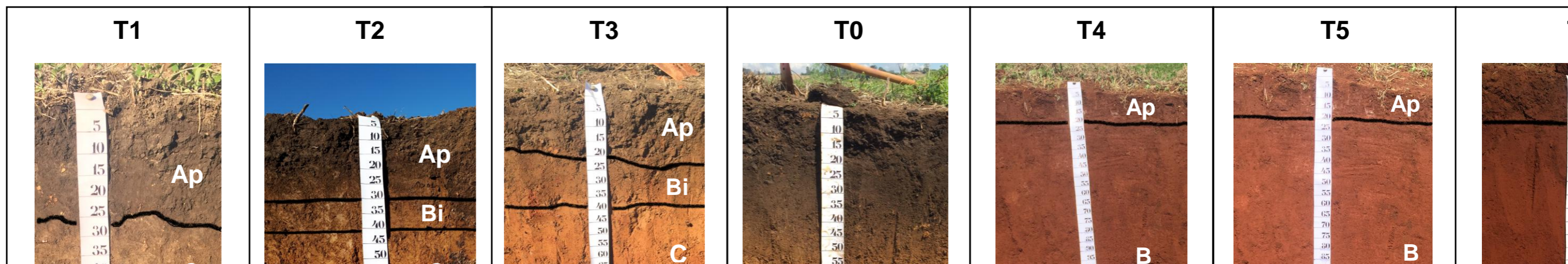
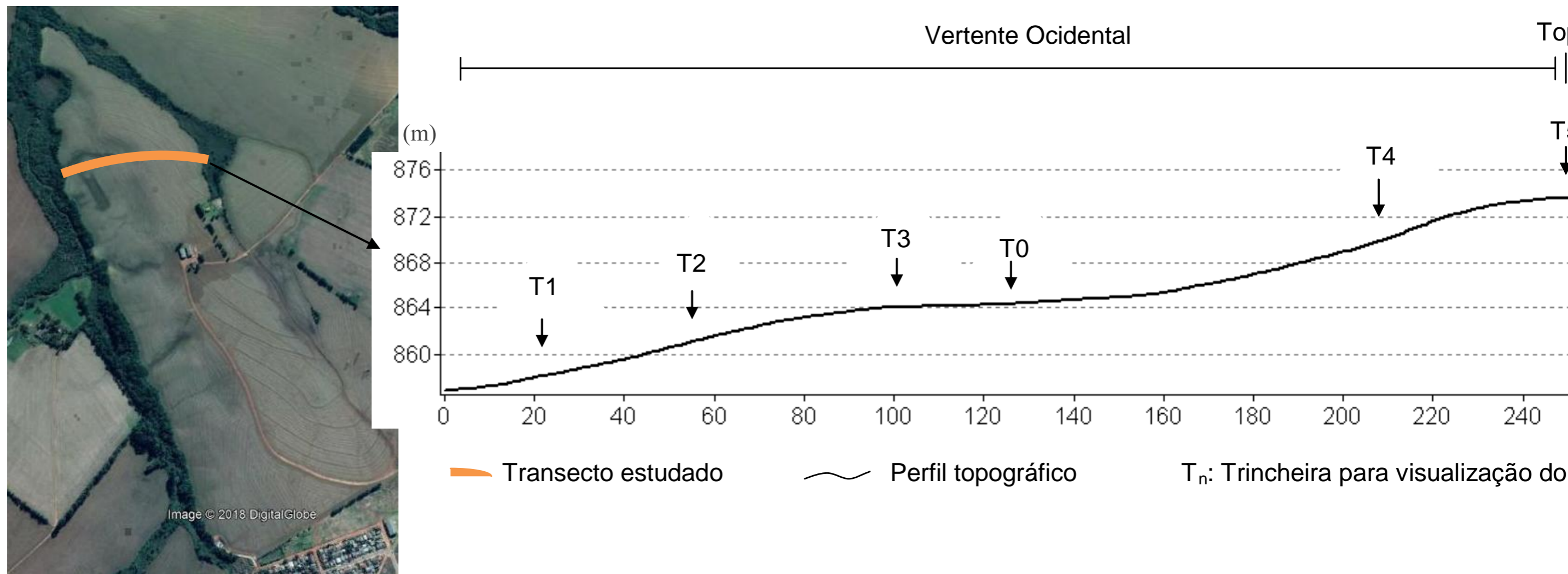
No *Quadro 03* são apresentadas as correlações das frações granulométricas e de argila dispersa em água (ADA), com a densidade e porosidade do solo. Onde, percebe-se que a microporosidade mantém correlação positiva com o teor de argila e negativa com o de areia e de ADA. Já os resultados alcançados para a D_s demonstram correlação positiva com os de areia e argila dispersa em água. Sabe-se que maiores teores de areia tendem a aumentar o valor da densidade do solo (LIBARDI, 2005). Enquanto, a influência da ADA possivelmente reside na eluviação das partículas de argila das camadas superficiais durante a percolação da água, obstruindo os poros e iluviando as camadas subsequentes. Bem como pelo transporte seletivo dessa fração durante o escoamento superficial. Os pontos T4, T5 e T6 são os que apresentam os maiores percentuais de ADA até a profundidade de 40 cm, reduzindo em maior profundidade.

Os resultados para as análises de: teor de matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por Al^{3+} e pH em $CaCl_2$, para as amostras de solos estudadas, estão demonstrados na *Figura 13*. Já o *Quadro 04* apresenta a correlação estatística existente entre a saturação por alumínio e as demais variáveis químicas citadas, bem como com o teor de argila do solo. Na *Figura 14* são apresentados os teores de óxidos de silício, alumínio, ferro e titânio por fluorescência de raios – X.

Quadro 03: Resumo das Observações Morfológicas dos Perfis de Solo Estudados na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”.

T 1 - NEOSSOLO LITÓLICO		T 2 - CAMBISSOLO HÁPLICO TB DISTRÓFICO		T 3 - CAMBISSOLO HÁPLICO TB DISTRÓFICO	
Vertente:	Ocidental	Vertente:	Ocidental	Vertente:	Ocidental
Posição	Baixa vertente	Posição	Baixa vertente	Posição	Média vertente
Declividade	4%	Declividade	9%	Declividade	< 2%
Drenagem	Drenado	Drenagem	Drenado	Drenagem	Imperfeitamente drenado
Uso do solo	plantio direto	Uso do solo	Plantio direto	Uso do solo	Plantio direto
Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 25 cm	Estrutura granular, pequena e friável	Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 30 cm	Estrutura granular, média e firme	Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 20 cm	Estrutura granular, média e firme
	Cor predominante: 2,5YR 3/1		Cor predominante: 7,5YR 3/1		Cor predominante: 7,5YR 4/3
	Muito pegajoso		Ligeiramente pegajoso		Ligeiramente pegajoso
	Muito plástico		Plástico		Ligeiramente plástico
	Muito argiloso = 65,1 %		Muito argiloso = 64,4 %		Muito argiloso = 70,5 %
	V = 23,93 (%)		V = 29,41 (%)		V = 33,29 (%)
	MO = 63,06 g/dm ³		MO = 43,93 g/dm ³		MO = 57,63 g/dm ³
C = 36,58 g/dm ³	C = 25,48 g/dm ³	C = 33,43 g/dm ³			
Camada C Profundidade: 25 a 45 cm	Sem estrutura	Horizonte: Bi Profundidade: 30 a 40 cm	Estrutura granular, média e firme	Horizonte: Bi Profundidade: 20 a 40 cm	Estrutura granular, média e firme
	Cor predominante: 10 YR 3/2		Cor predominante: 10 YR 4/3		Cor predominante: 10 YR 4/3
	Ligeiramente pegajoso		Ligeiramente pegajoso		Ligeiramente pegajoso
	Ligeiramente plástico		Ligeiramente plástico		Ligeiramente plástico
	Muito argiloso = 64,6 %		Muito argiloso = 66,1 %		Muito argiloso = 67,3 %
	V = 21,04 (%)		V = 35,42 (%)		V = 18,37 (%)
	MO = 58,31 g/dm ³		MO = 41,84 g/dm ³		MO = 45,27 g/dm ³
C = 33,82 g/dm ³	C = 24,27 g/dm ³	C = 26,26 g/dm ³			
Observação	Contato com a rocha em 45 cm.	Observação	Concreções entre 45 a 65 cm.	Observação	Concreções entre 30 a 35 cm
T 5- LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO		T 6- LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO		T 7- LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO	
Vertente:	Topo	Vertente:	Oriental	Vertente:	Oriental
Posição	Topo	Posição	Alta vertente	Posição	Média vertente
Declividade	< 2 %	Declividade	9%	Declividade	11%
Drenagem	Bem drenado	Drenagem	Bem Drenado	Drenagem	Drenado
Uso do solo	Plantio direto	Uso do solo	Plantio direto	Uso do solo	Plantio direto
Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 20 cm	Estrutura granular, pequena e muito friável	Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 15 cm	Estrutura granular, muito pequena e muito friável	Horizonte: Ap Profundidade: 0 a 25 cm	Estrutura granular, pequena e muito friável
	Cor predominante: 2,5YR 3/4		Cor predominante: 2,5YR 3/4		Cor predominante: 2,5YR 3/4
	Ligeiramente pegajoso		Ligeiramente pegajoso		Ligeiramente pegajoso
	Ligeiramente plástico		Ligeiramente plástico		Ligeiramente plástico
	Argiloso = 51,4 %		Argiloso = 53,6 %		Argiloso = 57,5 %
V = 48,68 %	V = 61,92 %	V = 41,39 (%)			

Figura 11 - Perfil Topográfico das Topossequências Estudadas com a Distribuição dos Pontos de Abertura de Trincheiras na Área de Estudo



Na vertente ocidental, em sua porção baixa (T1) foi identificado o Neossolo Litólico, que apresenta horizonte *Ap* diretamente sobre a camada *C* intemperizada, apresenta baixa saturação por bases e elevada saturação por Al^{3+} . Nos pontos T2 e T3, baixa e média-vertente ocidental, respectivamente, ocorre o Cambissolo Háplico Tb Distrófico, os quais apresentam mosqueados e concreções ferruginosas (plintita), provavelmente em função dos processos de umedecimento e secagem dessas seções. A saturação por bases é baixa, e a saturação por Al^{3+} chega a ultrapassar 50% no T2. Já na alta-vertente (T4) foi identificado o LVd profundo e bem drenado, com presença de raízes finas até um metro e oitenta centímetros. Com textura muito argilosa, apresenta grande quantidade de microporos. A saturação por Alumínio (Al^{3+}) se mostra menor em comparação com a média e baixa *Vc*.

No Topo (T5), que têm uma conformação convexo-planar, bem como nas porções Alta (T6) e Média (T7), da vertente oriental, aparece o Latossolo Vermelho Distrófico profundo (> 2m) e bem drenado. Observou-se grande quantidade de microporos, característico da textura argilosa. O horizonte diagnóstico apresenta saturação por bases média a baixa e, baixa saturação por Alumínio. Na baixa *Vr* (T8), o desenvolvimento do solo é menor que aquele do terço médio, podendo ser classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico. Este apresenta-se imperfeitamente a mal drenado, com afloramento de água à 75 (setenta e cinco) centímetros de profundidade. O horizonte B apresenta cerca de 60 cm, saturação por bases média a baixa e baixa saturação por Al^{3+} .

Percebe-se que os solos na topossequência da *Vc*, exceto na alta vertente, são mais rasos que os da *Vr*. O menor desenvolvimento da cobertura pedológica, nessas porções do relevo, pode ser justificado pelos episódios de saturação do solo que interferem nas reações químicas e reduzem o intemperismo. Como observado na trincheira T0, localizada em uma área de convergência de fluxos e com relevo tendendo ao plano, onde a presença de água foi percebida a 1,25 m de profundidade. E, pela atuação dos processos de morfogênese associados ao escoamento superficial, nas porções com maior declividade e aporte de matéria orgânica na baixa vertente.

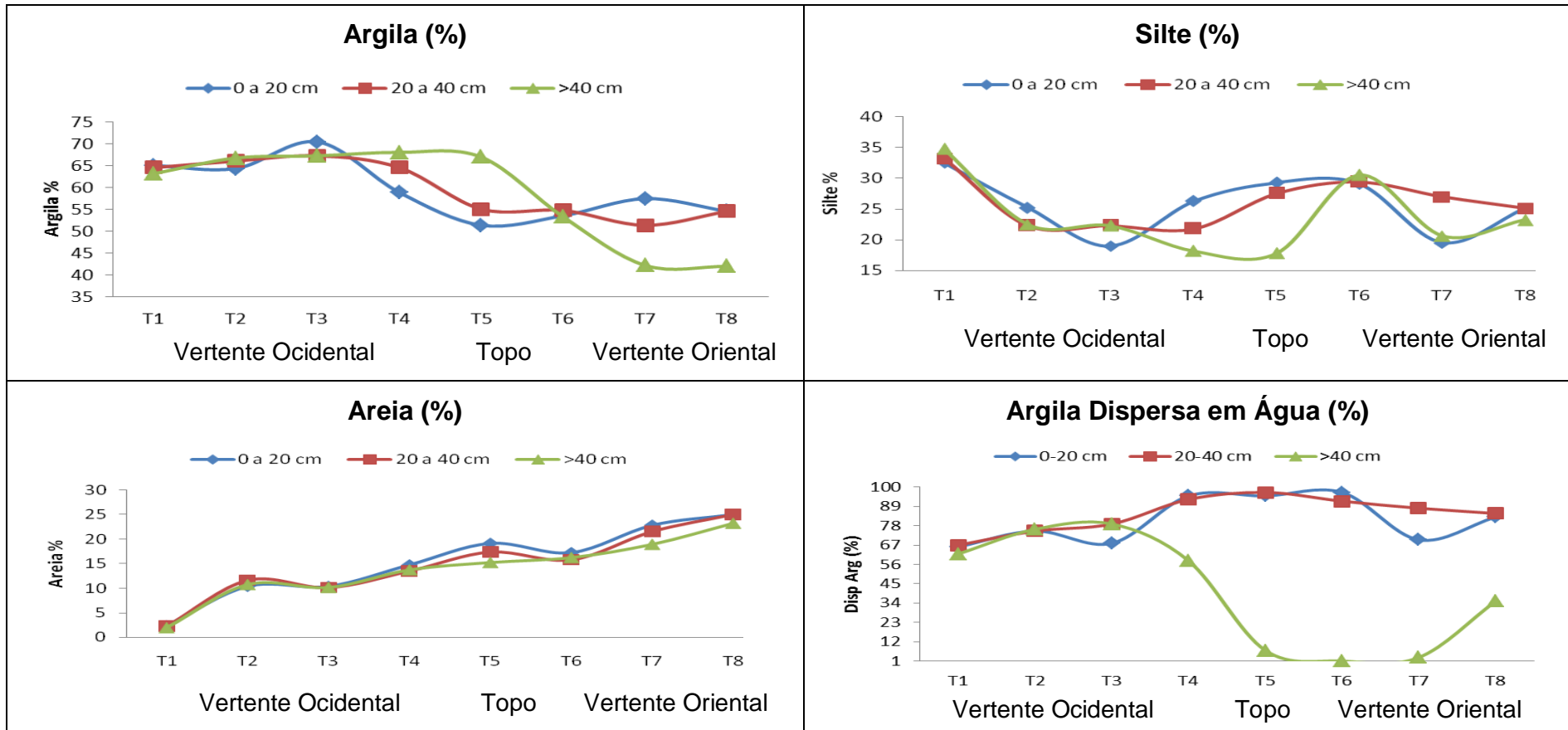
5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS

Nesta pesquisa, foram avaliadas as propriedades físicas: textura, argila dispersa em água, densidade e porosidade. Os valores referentes à textura e a argila dispersa em água estão representadas na *Figura 11*, e na *Figura 12* os de densidade do solo, porosidade total, micro e macroporosidade.

Quanto a textura, nota-se que nos pontos T1, T2 e T3 os valores se mostram similares nas diferentes profundidades, com percentuais superiores a 60%, o que pode ser justificado pela posição do solo e perfil de curvatura, que configuram esses segmentos como áreas de deposição, bem como, a influência do Folhelho Ponta Grossa. Nos pontos T4 e T5 é perceptível um decréscimo na quantidade de argila nas camadas superficiais, que pode ser em decorrência de eluviação para as camadas mais profundas, e/ou de mobilização seletiva pelo escoamento superficial. O percentual de areia é baixo nos dois segmentos de vertente, partindo de aproximadamente 2% no ponto T1 até cerca de 25% no T8. A distribuição granulométrica encontrada concorda com as obtidas por Sá (1995) e Fasolo et al. (2002) para solos na região, sob o sítio Formação Ponta Grossa. Já, os teores de argila dispersa em água formam altos nas camadas superficiais, especialmente nos pontos T4, T5 e T6, com redução significativa em profundidade, o que indica a influência do manejo do solo como possível fator dispersante.

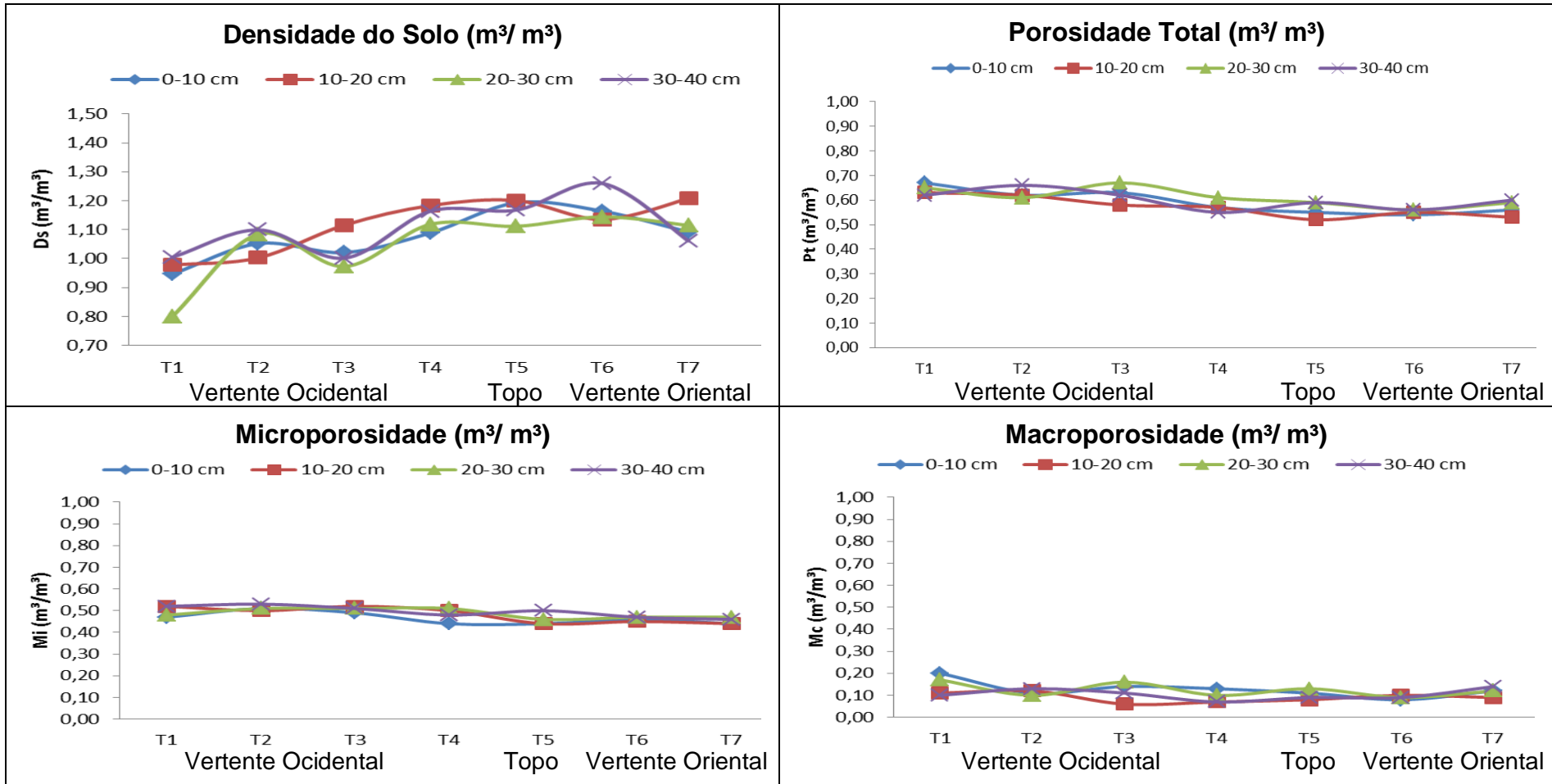
Em geral, os solos analisados são porosos com predomínio de microporos e baixa porosidade efetiva. Aparentemente, na Vc o solo demonstra maior porosidade no topo (T5) e na topossequência oriental, e conseqüentemente menor densidade do solo. Essa também foi à percepção em campo, durante a coleta das amostras. Cabe destacar que em solos argilosos, como os encontrados na área de estudo, tendem naturalmente a predominância de microporos.

Figura 12 - Granulometria no Solo nas Topossequencias na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: Teor de Argila; Teor de Silte; Teor de Areia; Teor de Argila Dispersa em Água.



Fonte: Da autora.

Figura 13: Densidade Global e Porosidade na Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: Densidade do Solo, Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade.



Fonte: Da autora.

Quadro 04: Coeficiente de correlação entre a textura com a porosidade, densidade do solo e argila dispersa em água.

Variáveis	Densidade do Solo		Porosidade Total		Macroporosidade		Microporosidade	
	r	p	r	p	r	p	r	p
Areia	0,56	0,002	-0,73	<0.001	0,37	0,05	-0,65	<0.001
Silte	-0,08	0,68	0,07	0,74	0,21	0,28	-0,13	0,50
Argila	-0,50	0,006	0,68	<0.001	0,22	0,27	0,74	<0.001
ADA	0,54	0,002	-0,59	<0.001	-0,39	0,04	-0,42	0,03

Fonte: Da autora.

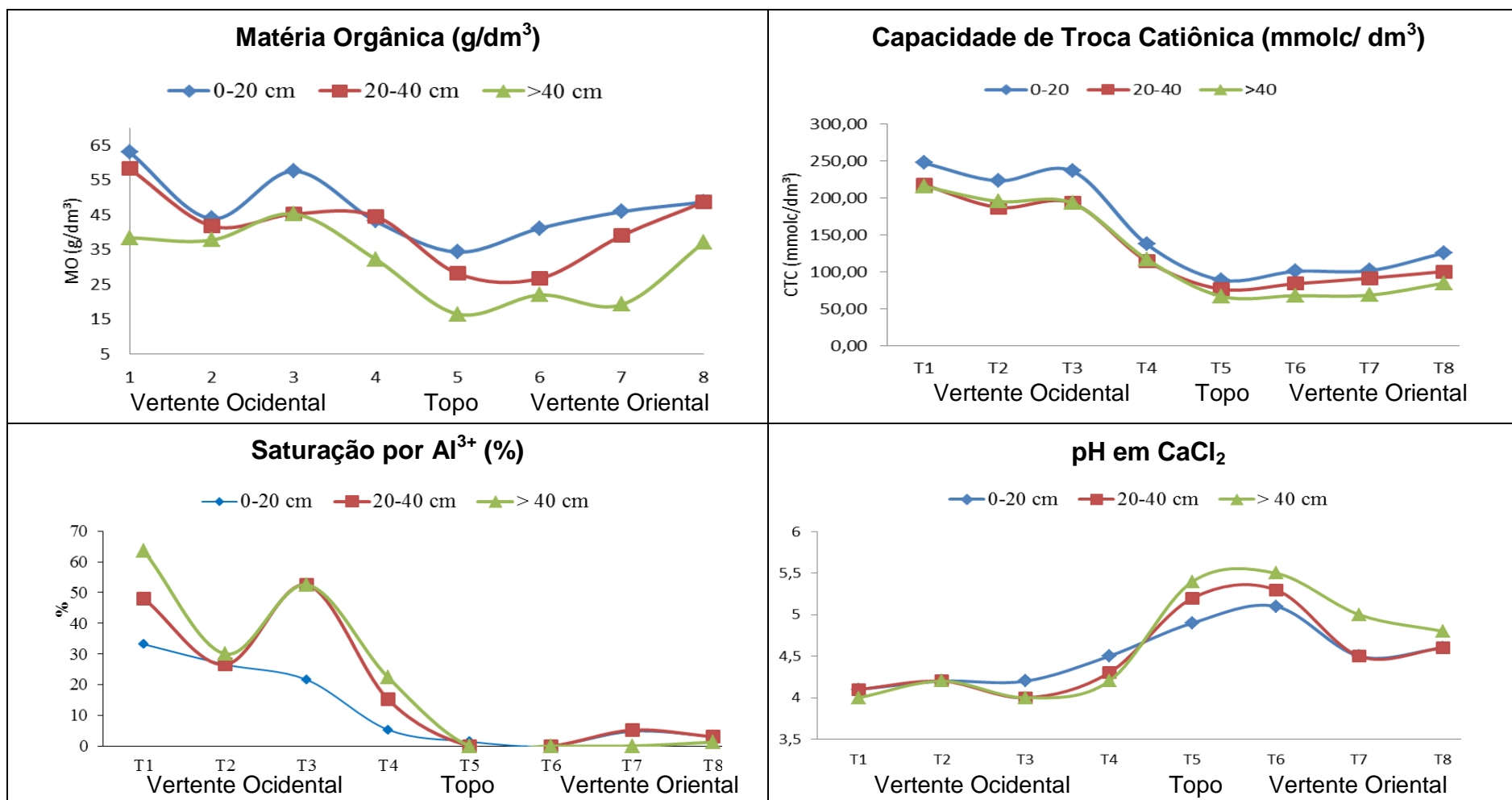
Legenda: ADA: Argila Dispersa em Água.

A densidade do solo permaneceu na faixa considerada comum para solos argilosos (de 0,9 a 1,6 mg/Kg segundo Reichardt e Timm (2012)). E, possuem similaridade aos obtidos por Giarola, Silva e Imhoff (2002) para os solos, com grande teor de argila, no Sul do Brasil. No *Quadro 04*, observa-se que os resultados alcançados para a *Ds* demonstraram correlação positiva com os de areia e argila dispersa em água (ADA). Sabe-se que maiores teores de areia tendem a aumentar o valor da densidade do solo (LIBARDI, 2005). Enquanto a influência da ADA possivelmente se refere à eluviação das partículas de argila das camadas superficiais durante a percolação da água, obstruindo os poros e iluviando as camadas subsequentes. Bem como pelo transporte seletivo dessa fração durante o escoamento superficial.

5.4 PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS SOLOS NAS TOPOSSEQUÊNCIAS ESTUDADAS

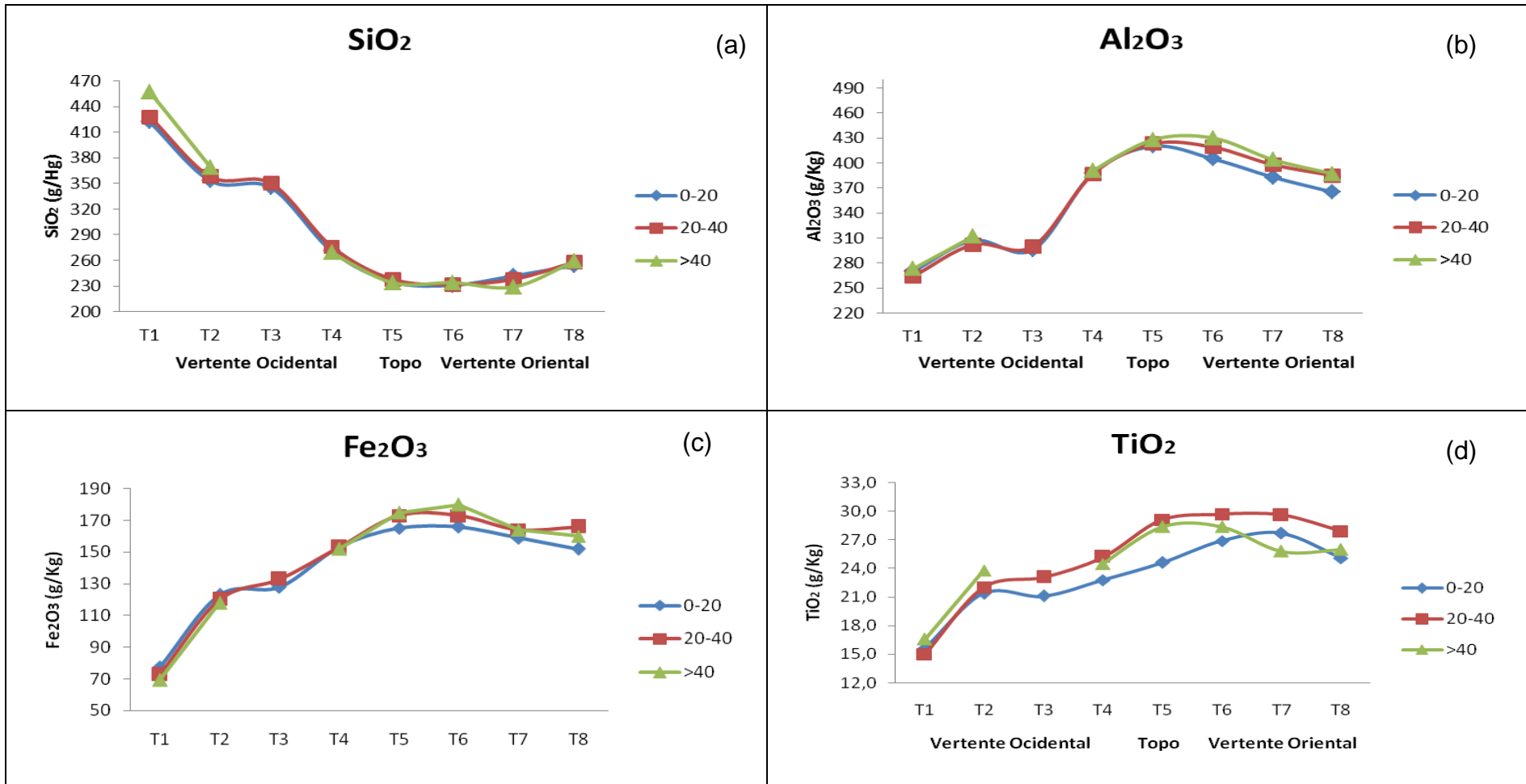
Foram analisadas as propriedades químicas: matéria orgânica, CTC, teor de saturação por Al^{3+} e pH do solo, sendo que os resultados estão apresentados na *Figura 13*. Teores de óxidos de Silício, Alumínio, Ferro e Titânio também foram avaliados, e os valores encontrados constam na *Figura 14*. No *Quadro 05* são apresentados os coeficientes de correlação entre Al^{3+} e variáveis: pH do solo em $CaCl_2$, teor de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, e teor de argila nas amostras de solo estudadas.

Figura 14: Propriedades Químicas do Solo nas Topossequências Estudadas: Matéria Orgânica, Capacidade de Troca Catiônica, Saturação por Al^{3+} , e pH em CaCl_2 .



Fonte: Da autora.

Figura 15 - Teor de Óxidos por Fluorescência de Raios-X no Solo da Área de Estudo “Arroio da Fazenda”: (a) óxido de silício (sílica); (b) óxido de alumínio; (c) óxido de Ferro; (d) óxido de Titânio.



Fonte: Da autora.

Quadro 05: Coeficiente de correlação entre Al^{3+} e variáveis: pH do solo em $CaCl_2$, teor de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, e teor de argila nas amostras de solo estudadas.

Variáveis	Al^{3+} (%)	
	r	p
pH em $CaCl_2$	-0,82	<0.001
MO	0,67	<0.001
CTC	0,82	<0.001
Argila	0,79	<0.001

Fonte: Da autora

Legenda: MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica.

Quanto à matéria orgânica, percebe-se que as maiores concentrações localizam-se nas camadas de solo superficial (0 – 20 cm), sendo os maiores valores encontrados nos pontos T1 e T3, os quais correspondem a áreas de deposição da vertente ocidental, ou seja, nessas áreas há contribuição de *MO* proveniente do entorno à montante. Já os menores teores aparecem nos segmentos de maior declividade onde o carreamento de material do solo é favorecido, como nos pontos T2, T4 e T6. Cabe destacar que a área de estudo se encontra sob o sistema de plantio direto a mais de 40 (quarenta) anos, proporcionando aporte de matéria orgânica, especialmente nas camadas mais superficiais da cobertura pedológica. O teor de matéria orgânica apresentou correlação positiva com os valores de CTC e Al^{3+} .

Os valores de CTC são mais elevados na vertente ocidental, especialmente nos pontos T1 e T3, coincidindo com maiores teores de matéria orgânica e saturação por alumínio. Percebe-se uma redução acentuada na CTC, na alta V_c (T4), em comparação com as porções baixa e média dessa vertente. Bem como no topo (T5) e nos pontos da vertente oriental.

A saturação por Al^{3+} também é mais elevada na V_c , com destaque para os pontos T1 e T3, onde podem ser considerados tóxicos para as plantas. No topo e na V_r os valores variam de zero a cinco por cento. A dissolução do Al é intensificada pelo baixo *pH* do solo, o que é ratificado pela correlação negativa e significativa encontrada entre os valores de *pH* e Al^{3+} .

Quanto aos valores de *pH*, nota-se que para todos os pontos amostrados, o solo apresenta acidez média a alta, ou seja, inferior a 5,5 (Thomé J., 1997), no entanto, na *Vc* o solo mostra-se mais ácido em comparação com o Topo e com a *Vr*. O *pH* ácido é de ocorrência comum em solos tropicais, como demonstrado constantemente na literatura. No município de Ponta Grossa, Cairos et al. (2002) encontrou valores de *pH* em CaCl_2 variando entre 4,0 a 5,1; Cambri (2004) entre 4,2 a 4,8 e; Sá (1995) de 3,7 a 4,7.

Observando a *Figura 14*, percebe-se que na vertente ocidental prevalecem valores mais elevados de SiO_3 . Os teores de óxidos de alumínio, ferro e titânico foram superiores nos Latossolos, em comparação as concentrações verificadas nos solos menos desenvolvidos (Neossolo e Cambissolo), na média e baixa vertente ocidental. Isto concorda com Santos et al. (2010), que estudando uma topossequência no Vale do Paraíba (RJ), perceberam que quanto maior o grau pedogenético dos solos, mais intensa é a perda de *Si*, *Ca* e *P* ocorrendo também aumento relativo de *Fe*, *Al* e *Ti*. Os valores obtidos para os Latossolos, na área de estudo, são similares aos observados por Goncalves et al (2008) em um LVd do município de Ponta Grossa.

5.5 CONSIDERAÇÕES QUANTO A VULNERABILIDADE MORFOPEDOLÓGICA A CONTAMINAÇÃO

A vulnerabilidade do solo, na Geomorfologia, encontra-se arraigada nas relações existentes entre a morfogênese e a pedogênese. Sendo, no Brasil, mais focada à perda de solo por erosão hídrica (por exemplo: Ribeiro e Campos (2007); Rovani e Mota et al. (2013); Silva Neto (2013); Vieira (2016) e Xavier et al. (2016)). Enquanto a contaminação do solo está ligada ao processo de acúmulo e transporte de elementos químicos, dependendo, em grande parte, da interação entre líquido-sólido e os processos de transporte e sedimentação (QUINTON; CATT, 2007; CADWLADER et al., 2012; ZHENG et al. 2012; BUCHANAN 2013; MELLAND et al., 2015), os quais são fortemente influenciados pela configuração do relevo, como pode ser observado na área de estudo “Arroio da Fazenda”. Nesta, foi possível

constatar o favorecimento a variações na velocidade e direcionamento dos fluxos hídricos, proporcionando diferentes condições de umidade do solo.

No topo e na alta V_r e V_c , nas porções convexas, os valores do ITU são baixos (< 6%), o que favorece a formação de solos mais profundos e bem drenados. Em contrapartida, os segmentos do tipo côncavo, perpendiculares aos declives na V_c , promovem a convergência dos fluxos aumentando a concentração hídrica nessas áreas, e como na área de estudo essas porções do relevo também apresentam concavidade tangencial, há o favorecimento de formação de zonas de umidade.

Essas diferentes condições de umidade interferem nas condições oxidantes e redutoras nos solos, podendo influenciar também nas relações de sorção de contaminantes metálicos com a fase sólida da cobertura pedológica. O ambiente oxidante favorece a adsorção ou coprecipitação de metais com hidróxidos de ferro, enquanto o redutor proporciona a dissolução, com conseqüente liberação dos metais associados para solução (EPA, 2007). O que torna as zonas úmidas mais vulneráveis à lixiviação (GBUREK et al, 2000) e, considerando-se a existência de uma ligação hidrológica direta entre esses locais e as massas hídricas, os possíveis contaminantes presentes no solo serão transportados para a água pluvial pelo escoamento (WALTER et al, 2000). Além de que, como observado na área de estudo, a concentração do fluxo levou ao aparecimento de caminhos preferenciais de escoamento (rills) no centro das porções côncavas, os quais funcionam como canais efêmeros durante e após precipitações pluviométricas.

Na presente pesquisa foi possível observar que, a diferente configuração do relevo nas vertentes oriental e ocidental também propicia variações na capacidade de transporte de sedimentos. De modo que, na V_r os segmentos convexo-planares associados à declividade suave proporcionam valores baixos de ICTS e menor poder de carreamento de partículas pelo escoamento superficial. Enquanto na V_c , nos segmentos côncavos com convergência de fluxo hídrico, o ICTS é elevado, observando-se em campo a existência de sulcos ravinados nestes locais. E nos segmentos retilíneos da V_r foi observada a ocorrência concentrada de sulcos, especialmente onde a declividade é acentuada (> 20°).

Os processos erosivos mantêm relevância nos estudos de vulnerabilidade a contaminação, visto que, conforme destacado por Hillel (2004) a erosão hídrica é um importante mecanismo de transporte de produtos químicos agrícolas. Para Siefert e Santos (2002), as partículas de solo podem atuar como veículo no transporte de contaminantes em direção aos rios. Cadwalader et al (2011), ao estudar o transporte físico de arsênio e chumbo via escoamento superficial, constataram que quantidades significativas de As e Pb adsorvidos às partículas de solo foram transportados para o rio. Zengh et al (2012), observaram que os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos são transportados no escoamento adsorvidos à matéria orgânica. Melland et al (2015) ao analisar as perdas de herbicidas, dissolvidas e as aderidas aos coloides, constataram que mais de 50% do contaminante presente no escoamento estava dissolvido, e que 11 a 47% foram transportados na fração particulada.

A capacidade de sorção (absorção e adsorção) dos contaminantes na fração sólida é proporcional à área superficial e à densidade de carga superficial das partículas de solo (sorventes) (VIDAL et al., 2009). No caso de contaminantes metálicos os sólidos sorventes mais importantes são os argilominerais, a matéria orgânica (MO) e os óxi-hidróxidos de Ferro e Manganês (LANGMUIR et al., 2003). Na área de estudo os solos identificados são argilosos na Vr e, muito argilosos na Vc, superando a 60% nos pontos T1, T2 e T3. Cabe destacar que em solos argilosos, como os encontrados na área de estudo, tendem naturalmente a predominância de microporos. Estes, também estão mais sujeitos a compactação, já que os macroporos, normalmente provenientes dos espaços entre os agregados e da biota, são impactados pelo manejo do solo, especialmente nas camadas superficiais. A baixa porosidade efetiva tende a reduzir a percolação de contaminantes para as camadas mais profundas do solo, porém em casos de pico de precipitação essa condição pode favorecer o escoamento superficial e o carreamento de eventuais contaminantes para os rios, especialmente a partir de áreas com grande porcentagem de argila dispersa em água – como observado no topo e na alta vertente (pontos T4, T5 e T6) da área de estudo.

A dispersão da argila em água é consequência do rompimento de agregados do solo. Quando isso ocorre, além da argila o solo perde nutrientes e

libera contaminantes dissolvidos na solução ou adsorvidos às partículas do solo, sendo mobilizados para às águas superficiais.

Quanto à matéria orgânica, os maiores valores encontrados foram encontrados nos pontos T1 e T3, os quais correspondem a áreas de deposição da vertente ocidental. Enquanto os menores percentuais aparecem nos segmentos de maior declividade onde o carreamento de material do solo é favorecido, como os pontos: T2, T4 e T6 da área de estudo. A *MO*, como discutido no Capítulo 2, apresenta alta capacidade de troca catiônica (CTC) (RONQUIM, 2010) o que faz com que atue de forma importante no processo de atenuação e interação com contaminantes, podendo se ligar a alguns metais como cobre, níquel e chumbo, em *pH* próximo de 5 (Mc BRIDE, 1994), bem como formar complexos metálicos com íons, como Cadmio e Cromo, retendo-os no solo. Os grupos funcionais de ácidos orgânicos tipicamente presentes na matéria orgânica têm uma alta afinidade por cátions metálicos (EPA, 2007).

Na área de estudo, os valores de CTC mais elevados foram obtidos na vertente ocidental, nos pontos T1 e T3, coincidindo com maiores teores de matéria orgânica e de saturação por Alumínio. A dissolução do Al é intensificada pelo baixo *pH* do solo, o que é ratificado pela correlação negativa e significativa encontrada entre os valores de *pH* e Al^{3+} .

Em todos os pontos amostrados, os valores de *pH* do solo foram inferiores a 5,5 indicando acidez média a alta (Thomé J., 1997). Sendo que, na vertente ocidental os valores não ultrapassam a 4,5. A maior acidez na vertente ocidental da área de estudo pode ser explicada pela intensificação da lixiviação das bases, bem como, pelo processo de umedecimento e secagem do solo, o qual interfere nas reações químicas do solo (PALMIERI e LARACH, 2010). Vale lembrar que, o *pH* modifica a capacidade de troca catiônica criando condições que podem aumentar ou diminuir a mobilidade de determinados contaminantes (EPA, 2007). Normalmente, baixos valores de *pH* mantêm os metais solúveis favorecendo a mobilidade (FETTER, 1993). Esses padrões são revertidos para os metalóides, como As, que existem como espécies aniônicas (EPA, 2007).

Pagnanelli et al. (2003) observaram que a absorção de Chumbo e Zinco reduziu com a diminuição do *pH*, enquanto Martins e Figueiredo (2014), observaram

que o Arsênio apresenta baixa solubilidade em solos ricos em óxidos de ferro e pH ácido. Cabe destacar que, a retenção e a mobilidade de metais no solo dependem de complexas interações entre a fase líquida e a sólida, tanto orgânica quanto mineral (BRADY, 1989), sendo que a matéria orgânica e os oxi-hidróxidos são importantes sorventes, e possuem carga superficial fortemente dependente do pH (EPA, 2007).

Segundo Langmuir et al. (2003), os oxi-hidróxidos de ferro tendem a apresentar forte capacidade de adsorver ou coprecipitar metais traço em ambiente básico a neutro, mas a medida que o meio se acidifica, tende a ocorrer a dissolução dos óxidos, os quais se tornam muito solúveis em *pH* abaixo de 3-4. Alleoni et al. (2005) encontrou correlação positiva entre a adsorção de cádmio e teor de óxidos de ferro e de alumínio. Nascentes (2006) observou que Cu, Pb e Cr ficaram retidos no solo, o que o autor atribuiu a afinidade desses metais aos óxidos de ferro e a caulinita, bem como a possíveis precipitações associadas ao pH do solo e da solução. Lange (2012) relacionou a retenção de arsênio lixiviado de cinzas de carvão à presença de óxidos hidratados de alumínio e ferro no solo e, a afinidade do As a esses óxidos.

6 CONCLUSÕES

A influência das características morfológicas das vertentes, na distribuição dos solos, ficou evidente na área desta pesquisa. Ela ocorre através dos processos hidrológicos, condicionados pelas formas de relevo.

A modelagem dos atributos topográficos, especialmente do Índice Topográfico de Umidade, do Índice de Máximo Fluxo, e do Índice de Capacidade de Transporte de Sedimentos mostrou-se uma ferramenta importante nos estudos geomorfológicos. Observações empíricas confirmaram a formação de zonas úmidas nas porções côncavo-convergentes da vertente ocidental, e a ocorrência de sulcos proeminentes nas áreas indicadas com maior capacidade de transporte de sedimentos. Cabe destacar que a boa representação dos atributos topográficos é devida a resolução do MDE, adequada para a escala de estudo. O MDE foi gerado a partir de dados do levantamento topográfico altimétrico, proporcionando representação do relevo da área de estudo compatível com a escala de detalhe.

A influência do relevo sobre a distribuição dos solos também pode ser observada a partir das análises químicas das amostras de solo, como teor de matéria orgânica que é superior nas áreas favoráveis a deposição, ou nos percentuais de óxidos de ferro e alumínio, estes superiores nas porções com melhor drenagem. Tanto a MO quanto os óxidos (Fe_2O_3 e Al_2O_3) são atuantes na adsorção de contaminantes metálicos (LANGMUIR et al, 2003). O pH se mostrou menos ácido no topo e na Vr, o que provavelmente é reflexo de aplicações de corretivos no solo.

A análise da textura da cobertura pedológica evidenciou a influência da Formação Ponta Grossa, predominando solos muito argilosos em ambas vertentes, mesmo nos solos mais jovens. Normalmente os solos argilosos são considerados mais resilientes quanto à contaminação química, visto que a grande área superficial específica da fração argila tende a adsorver certos contaminantes reduzindo sua mobilidade. Contudo, a fração fina pode atuar como um veículo no transporte de contaminantes durante a erosão hídrica. Situação que pode ser potencializada com a dispersão da argila em água, a qual é elevada nos pontos T4, T5 e T6 da área de estudo.

A porosidade total, a microporosidade e a densidade responderam como esperado para solos com grande teor de argila, mostrando-se porosos e com predominância de microporos.

De modo geral, a caracterização morfopedológica realizada nesta pesquisa, evidenciou a influencia do relevo em atributos do solo relevantes na mobilidade e/ou retenção de contaminantes, especialmente ions metálicos, no solo. Contudo são necessários maiores estudos, especialmente no sentido de quantificar o potencial de carreamento de contaminantes, por escoamento superficial, para os rios.

REFERÊNCIAS

- AB' SABER, A. N. **Os domínios de natureza do Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003, p. 160.
- ADGER, W N.; EAKIN, H.; WINKELS, A. Nested and Teleconnected Vulnerabilities to Environmental Change. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n.3. Exeter: University of Exeter (ORE), 2009. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/i25595068>>. Acesso em: 16 mar. 2016. p. 150-157.
- ALLEONI, R. F. et. al. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. **Acta Sci. Agron**, v. 27, n. 4, 2005, p. 729-737.
- ALMEIDA B. G. et al. **Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil**. Comunicado Técnico 66: Embrapa, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br>>. Acesso em: 10 abr. 2016. p. 1-11.
- ALVES SOBRINHO, T. et. al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, vol. 7, n.2, 2003.
- BESALATPOUR, A. A. et al. Estimating wet soil aggregate stability from easily available properties in a highly mountainous watershed. **Catena**, vol. 111, 2013, p. 71-79.
- BETSON, R.P. What is watershed runoff? **Journal of Geophysical Research**, v. 69, nº 8, 1964, p. 1541-1552.
- BONO, J. A. M. et al. Infiltração de Água no solo em um Latossolo Vermelho da Região Sudeste dos Cerrados com Diferentes Sistemas de Uso e Manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, vol. 36, n. 6, 2012.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. D. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Tradução: LEPSCH, I. F. 3 ed. São Paulo: Brookman, 2013.
- BUCHANAN, B. P. et al. A phosphorus index that combines critical source areas and transport pathways using a travel time approach. **Journal of Hydrology**, vol. 486, 2013, p.123-135.
- BUCHANAN, B. P. et al. Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, vol. 18, 2014, p. 3279–3299.
- CAMBRI, M. A. **Calagem e Formas de Alumínio em Três Localidades sob Sistema de Plantio Direto**. Tese de Doutorado em Agronomia. USP: Piracicaba, 2004.

CARDOSO, M. R. A. Epidemiologia Ambiental. In: PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, 2005, p. 87-113.

CASTILLO, VM; GOMEZ-PLAZA, A; MARTÍNEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, vol. 284, 2003, p. 114-130.

CETESB Companhia Ambiental de São Paulo. **Texto Explicativo Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB. 2013. Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/relacao-de-areas-contaminadas/>>. Acesso em: 3 abr. 2015.

COELHO NETO, A. L. Hidrologia de Vertente na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009, p. 93-148.

COUTO, R. da R.. **Vulnerabilidade do Solo a Poluição por Fósforo, Cobre e Zinco, em Áreas sob Aplicação de Dejetos de Suínos** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CREPANI, E. et al. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 2001. 25p. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf>> Acesso em: 02 abr. 2016.

CUNHA, J. L. X. L. et al. Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. **Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, vol. 19, n. 11, 2015.

CUTTER, S. L. Vulnerability to Environmental Hazards. **Progress in Human Geography**, vol. 20, ed. 04, 1996, p. 529-539.

CUTTER, S. L.; BURUFF, B. J.; SHIRLEY, L. Social Vulnerability to Environmental Hazards. **Social Science Quarterly**, vol. 84, 2003, p. 242-261.

DIAS, J.C.; LIMA, W. N. Comparação de Métodos para Determinação de Matéria Orgânica em Amostras Ambientais. **Revista Científica UFPA**, vol. 4, 2004, p.16.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resources Research**, vol. 6, 1970, p. 1296-1311.

DUZGOREN-AYDIN, N. S.: Comparative study of weathering signatures in felsic igneous rocks of Hong Kong. **Chem. Spec. Bioavailab**, vol. 14, 2003, p.1–18.

EBELING, A. G. et. al. Relação entre Acidez e outros Atributos Químicos em Solos com Teores Elevados de Matéria Orgânica. **Bragantia**. v. 67, n. 2. Campinas: IAC, 2008. Disponível em: <<http://ucsj.redalyc.org/articulo.oa?id=90867219>> ISSN 0006-8705>. Acesso em 12. fev. 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação do Solo**. EMBRAPA: 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997, p. 212.

EMERSON, W. W. A Classification of Soil Aggregates Bared on their coherence in water. **Australian Journal of Social Research**, n. 5, 1967, p. 47-57.

EPA – Environmental Protection Agency. **Framework for Metals Risk Assessment**, 2007. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-09/documents/metals-risk-assessment-final.pdf>>. Acesso em: 10, jul. 2017.

FASOLO, P.J. et al. Caracterização dos solos do Município de Castro, PR. **Embrapa Solos**: Rio de Janeiro (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 9), 2002.

FAZLOLLAHI MOHAMMEDI, M. et al. Slope gradient and slope effects on soil profiles in the northern mountainous forests of Iran. **Eurasian Soil Science**, vol. 49, ed 12, 2016, p. 1366-1374.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de Áreas Contaminadas de Minas Gerais 2014**. Belo Horizonte: 2014, p. 26. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/GESTAO_AREAS_CONTAMINADAS/inventrio%20de%20reas%20contaminadas%20-%202014.pdf>.

FERNANDES, M. C.; MENEZES, P. M. L. de. **Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real**: um estudo de caso no maciço da Tijuca-RJ. In. Anais do XII Simpósio Brasileiro do Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. INPE, 2005, p. 2985-2992.

FOX, D. M.; R.B. BRYAN, PRICE, A. G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. **Geoderma**, vol. 80, 1997, p. 181-194.

GERRARD, J. **Soil Geomorphology**: an integration of pedology and geomorphology. Chapman & Hall: 1992.

GIANDON, P. Soil Contamination by Diffuse Inputs. In: Armon R., Hänninen O. (eds) **Environmental Indicators**. Springer, Dordrecht, 2015.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In SOPPER, W.E.; LULI, H.W. (eds.), **Forest hydrology**, New York: Pergamon Press, 1997, p. 90 -275.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, vol.35, 1995, p.23-36.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions of the American Geophysical Union**, vol. 14, 1933, p.446-460.

HORTON, R. E. Hydrologic inter-relations of water and soils. **Proceedings of the Soil Science Society of America**, vol. 1, 1936, p. 401-429.

HUGGET, R. J. Soil Landscape Systems: a model of soil genesis. **Geoderma**, vol. 13, p. 1-22, 1975.

HILLEL, D. Environmental Soil Physics. New York, Academic Press, 1998. 771p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**, 2ª ed. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>> Acesso em: 06 set. 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). **Infográficos: dados gerais dos municípios**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br>> Acesso em: 01 set. 2017.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **Gerenciamento de Áreas Contaminadas do Estado do Rio Janeiro Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas – 2ª Edição**. 2014, p. 14. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdy4/~edisp/inea0068530.pdf>>.

ITCG – Instituto de Terras Cartografia e Geociências. **Mapa Geomorfológico - Estado do Paraná (1:50.000)**. 2008. Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>> Acesso em: 06 set. 2017.

ITCG – Instituto de Terras Cartografia e Geociências. **Formações Fitogeográficas - Estado do Paraná (1:50.000)**. 2009. Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>>. Acesso em: 06 set. 2017.

KABATA-PENDIAS, A. PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. CCR Pres, 3 ed., 2001.

LANGMUIR, D. Aqueous environmental chemistry. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997, 600 p.

LANGMUIR, D. et al. Issue paper on the environmental chemistry of metals. U.S. Environmental Protection Agency Risk Assessment Forum 1200: Pennsylvania, 2003. Disponível em: <http://oaspub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=379035> Acesso em: 10/04/2017.

LE BISSONNAIS, Y. **Aggregate stability and assesement of soil crustability and erodibility: I Theory and methodology.** European Journal of Soil Science, vol. 47, 1996, p. 425-437.

LE BISSONNAIS, Y; LE SOLDER, C. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. **Étude et Gestion des Sols**, vol. 2, nº 1, 1995, p. 43-56.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná.** Curitiba: José Olympio, 2012.

MARTINS, J.; FIGUEIREDO, B. R. Testes de mobilidade de chumbo e arsênio em solo contaminado em Apiaí (SP). **Geochimica Brasiliensis**, v. 28, 2014, p. 189-200.

MELLAND, et al. Spot spraying reduces herbicide concentrations in runoff. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 20, 2016, p. 4009-4020.

MELO, M. S. et al. Sedimentação Quaternária no Espaço Urbano de Ponta Grossa – PR. v. 22. São Paulo, UNESP: **Geociências**, n. 1, 2003, p. 33-40.

MELO, M. S.; GUIMARAES, G. B.; SANTANA, A. C. (2010). Fisiografia da bacia do rio Pitangui. In: GEALH, A.M.; MELO, M.S.; MORO, R.S. (Orgs.). **Pitangui, rio de contrastes: seus lugares, seus peixes, sua gente.** Ponta Grossa: UEPG, 2010, Cap. 1, p. 11-21.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia de Solos.** SBCS, Viçosa, 2009.

MENEGUZZO, I. S. Considerações a Respeito do Conceito de Depressão Periférica Aplicado ao Segundo Planalto Paranaense. Londrina: **Geografia**, v. 14, n. 2, 2005; p. 243-247.

MINEROPAR. **Carta Geológica do Estado do Paraná – Folha Ponta Grossa (1:250.000), 2005.** Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geologia/PDF_Mapas_Geo_250000/Ponta_Grossa.PDF> Acesso em 13 mai. 2017.

MINEROPAR. **Mapa Geológico Folha de Ponta Grossa (1:100.000), 2006.** Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/mapeamento/Mapa_Geologico_Ponta_Grossa_100000_2006.pdf> Acesso em 24 jul. 2017.

MINEROPAR. **Mapeamento Geológico da Folha Ponta Grossa (1:100.000) – Relatório Final. 2007.** Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/mapeamento/Relatorio_Folha_Ponta_Grossa_2007.pdf> Acesso em 20 ago. 2017

NIMMO, J.R. Aggregation: physical aspects. In: HILLEL, D. **Encyclopedia of Soils in the Environment.** London, Academic Press, 2005, p. 28-35.

MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: A review of Hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, vol. 5, 1991, p. 3-30.

MORAES, S. L. de; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. de S. (orgs). **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo /BNDES. ed.1. São Paulo: 2014, p. 395.

MORESCHI, I. C.; PAES, R. Pe., CALHEIROS, D. F. Poluição Difusa na Bacia Hidrográfica do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul. *Engineering and Science*, vol. 2, ed. 4, 2015, p. 72-86.

MOTA, L. H. S. O. et al. Vulnerabilidade à degradação dos solos do município de Campinas, SP. **Geografia**: Londrina, vol. 22, n. 3, p. 65-79, 2013.

MU, W. et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Soil Moisture Content on Different Growing Stages of Spring Maize. **Water**, vol. 7, 2015, p. 2990-3008.

NATHAN F. Natural Disasters, Vulnerability and Human Security. In: Brauch H.G. et al. (eds). **Facing Global Environmental Change**. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace. vol 4, 2009. p. 1121-1129.

NOWATZKI, A.; SANTOS, L. J. C. Mapeamento Digital de Solos por Pedometria com Base em Atributos Topográficos da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno. **R. Ra'e Ga**, vol. 32, 2014, p. 198-211.

OADES, J. M. **Soil organic matter and structural stability**: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, vol. 76, 1984, p. 319-337.

PAGNANELLI, F. et al. Metal speciation and pH effect on Pb, Cu, Zn and Cd biosorption onto *Sphaerotilus natans*: Langmuir-type empirical model. **Water Research**, Amsterdam, vol. 37, 2003, p. 627-633.

PALMIERI, F.; LARACH, J. O. I. Pedologia e Geomorfologia. In: GUERRA, A.J. T.; CUNHA, S. B. da (Orgs). **Geomorfologia e meio ambiente**. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010, p. 59-122.

PENNOCK, D. J.; VELDKAMP, A. Advances in landscape-scale soil research. **Geoderma**, vpl. 133, 2006, p. 1-5.

PHILIPPI JR, A.; MALHEIROS, T. F. Saneamento e Saúde Pública: integrando homem e ambiente. In: PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, 2005, p. 3-31.

PIRES, L. F. et al. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, 2008, p. 297-304.

QUINTON, J. N.; CATT, J. A. Enrichment of heavy metals in sediment resulting from soil erosion on agricultural fields. **Environ. Sci. Technol.**, vol. 41, 2007, p. 3495-3500.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. 2 ed. Barueri, SP: Malone: 2012.

RIBEIRO, F.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, 2007, p. 628–636.

RIEKE-ZAPP, D. H.; NEARING, M. A. Slope Shape Effects on Erosion: a laboratory study. **SoilSci. Soc. America Journal**, vol.69, 2005, p. 1463-1471.

ROVANI, F. F. M.; VIERA, M. Vulnerabilidade Natural do Solo de Silveira Martins-RS. **Revista Floresta e Ambiente**, vol. 23, n. 2, 2016, p. 151-160.

RONQUIM, C. C. Cesar Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. – Campinas: **Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2010.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **R. Bras. Ci. Solo**, vol. 29, 2005, p. 297-300.

SABZEVARI, T. et al. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, vol 14, 2010, p. 891–900.

SANTOS, A. C. et al. Gênese e Classificação de Solos numa Topossequência no Ambiente de Mar de Morros do Médio Vale do Paraíba do Sul, RJ. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 344, 2010, p.1297-131.

SÁ, M. F. M. **Os solos dos Campos Gerais**. In: Patrimônio Natural dos Campos Gerais do Paraná. Ponta Grossa: UEPG, 2007.

SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SORENSEN, R. “Topographical influences on soil properties in boreal forests”. **Geoderma**, 2007, vol. 141, p. 139-148.

SENSOY, H; KARA, O. Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall condition. **iForest – Biogeosciences and Forestry**, vol. 7, 2014, p.110-114

SHARY, A. P.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, vol. 107, 2002, p. 1-32.

SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. dos. Mecanismos de Geração de Escoamento e Áreas Hidrologicamente Sensíveis: uma abordagem hidrogeomorfológica para

delimitação de áreas de preservação permanente. **RA´E GA**, vol. 24, 2012, p. 227-257.

SILVA NETO, J. C. A. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. Londrina: **Geografia**, vol. 22, n. 1, 2013, p. 05-25.

SILVEIRA, C. T. 2010. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SCHAERTZL, R.; ANDERSON, A. **Soil Genesis end Geomorphology**. New York: Cambridge University Press, 2005.

TARBOTON, D. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, vol.33, n.2, 1997, p. 309-319.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008a, p. 72.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de textos, cap. 03, 2008, p. 72-104.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 7, n. 3, 2003, p. 539-546.

VIDAL, M; SANTOS, M. J.; ABRAO, T.; RODRIGUEZ, J.; RIGOL, A. Modeling competitive metal sorption in a mineral soil. **Geoderma**, vol. 149, 2009, p. 189-198.

WALTER, M. T. et al. Hidrologically Sensitive Areas: Variable Source Area Hydrology Implications for Water Quality Risk Assessment. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 3, 2000, p. 277-284.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis, chapter 1. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, 2000, p.1-27.

XAVIER, R.A.; MACIEL, J.S.; SILVA, V.M.A. Vulnerabilidade geológica – geomorfológica da folha Boqueirão – **REGNE**, Paraíba, vol. 2, n. especial, 2016, p. 294-303.

ZALÁN, P. V. et al. Bacia do Paraná. In: G.P.R. GABAGLIA & E.J. MILANI (Coord.) **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro, PETROBRAS.1991, p.135-168.

ZEVENBERGEN, L.W.; THORNE, C.R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 12, 1987, p.47-56.

ZHANG J.; SUN J.; MA B.; DU W. Assessing the ecological vulnerability of the upper reaches of the Minjiang River. **PLoS ONE** vol. 12 n. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181825>. Acesso em: 17 Mar. 2018.

ZHENG, Y. et al. Enrichment behavior and transport mechanism of soil-bound PAHs during rainfall-runoff events. **Environmental Pollution**, n. 171, 2012, p.85-92.