Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Compartimentação da paisagem via relevo e rede de drenagem e sua relação com
atributos e classes de solos

Fellipe Alcantara de Oliveira Mello

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2019

Fellipe Alcantara de Oliveira Mello
Bacharel em Geografia

**Compartimentação da paisagem via relevo e rede de drenagem e sua relação com
atributos e classes de solos**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Mello, Fellipe Alcantara de Oliveira

Compartimentação da paisagem via relevo e rede de drenagem e sua relação com atributos e classes de solos / Fellipe Alcantara de Oliveira Mello. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

64 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Rede de drenagem 2. Compartimentação automática da paisagem 3. Mapeamento digital de solos 4. Estereoscopia digital I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Nilton e Ivanilza.

A minha vó Terezinha e ao meu avô Sr. Alcides (em memória).

A Ana Franchi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo sustento e por sempre me surpreender com sua bondade. Sem isso seria impossível caminhar.

Agradeço imensamente à minha família, pois sempre me apoiaram e deram suporte em todos os momentos desse caminho.

Agradeço em especial ao meu Pai, Nilton. Todo o seu esforço valeu a pena. Reconheço que se não fossem os seus finais de semana perdidos eu não estaria aqui. Serei eternamente grato e sei que está orgulhoso.

Agradeço à minha mãe pelo amor e carinho. A condição de fazer esse curso era você estar bem e hoje está curada. O tempo passou mas a saudade ainda aperta. Obrigado por me incentivar sempre.

Agradeço à meu irmão Luccas. Nunca se contente com pouco, seja o melhor que puder em tudo. Você vai mais longe do que pode imaginar.

Agradeço à Ana, minha noiva, meu amor. Você deixou a caminhada mais leve e mais bela. Obrigado pelo apoio e compreensão nos tempos difíceis. Você é uma mulher incrível! Te amo!

Agradeço à minha segunda família, Nivaldo e Hilda. Obrigado por me tratarem como filho e não pouparem esforços para ajudar quando preciso. Vocês também tornaram a caminhada muito mais fácil. Viva o vinho!

Agradeço aos novos irmãos Taís, Pedro e Sara. A caminhada está só começando.

Agradeço aos amigos e a Igreja no Jupia.

Agradeço à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade concedida. Agradeço aos professores que muito contribuíram para meu crescimento acadêmico e profissional.

Agradeço ao meu orientador Prof Dr. José Alexandre Melo Demattê, pela oportunidade, confiança e incentivo ao meu trabalho.

Agradeço ao Grupo de Geotecnologias em Ciência do Solo (GeoCiS) pelo apoio diário que ofereceram ao meu trabalho.

Agradeço o apoio de Clécia, André, Diego, Arnaldo e Raul. Os companheiros de sala que contribuíram muito neste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. IMPORTÂNCIA E EVOLUÇÃO DO MAPEAMENTO DE SOLOS	9
1.2. HISTÓRICO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS NA CIÊNCIA	10
1.3. O PAPEL DA GEOPEDOLOGIA NO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1. ÁREA DE ESTUDO E BASES GEOGRÁFICAS	15
2.2. PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DE RELEVO E REDE DE DRENAGEM.....	18
2.3. COMPARTIMENTAÇÃO DA PAISAGEM	19
2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PAISAGEM DA ÁREA DE ESTUDO: PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DO RELEVO E REDE DE DRENAGEM.....	25
3.2. CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DO RELEVO E REDE DE DRENAGEM	29
3.3. RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS DO SOLO E REDE DE DRENAGEM	32
3.4. COMPARTIMENTAÇÃO DA PAISAGEM	36
3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA: OS ATRIBUTOS DO SOLO NOS COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM..	43
3.6. COMPARTIMENTAÇÃO DA PAISAGEM E CLASSES PEDOLÓGICAS	52
4. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS	56

RESUMO

Compartimentação da paisagem via relevo e rede de drenagem e sua relação com atributos e classes de solos

As fotografias aéreas, bem como as técnicas de estereoscopia, foram amplamente utilizadas para estudos ambientais e da paisagem. Com o avanço do mapeamento digital de solos os parâmetros da rede de drenagem foram sendo substituídos por parâmetros derivados do relevo, nas metodologias de predição de atributos do solo. No entanto, a literatura é ampla na atribuição da rede de drenagem como um fator determinante no mapeamento de solos, havendo a necessidade de desenvolver técnicas para inserir as características dos canais nos diferentes métodos de mapeamento do solo. Dessa forma, objetiva-se desenvolver um mapa de compartimentação da paisagem, através da rede de drenagem e um modelo digital de elevação (MDE), ambos com alta resolução espacial, visando avaliar as suas correlações com os atributos do solo (teor de argila nas profundidades 0-20 e 80-100 cm, gradiente textural, Ferro total (Fe_2O_3) e a cor do solo) e classes pedológicas. Tais procedimentos poderão auxiliar na produção de métodos base para relacionar a paisagem com a pedologia e o mapeamento. A área de estudo está localizada no município de Rio das Pedras, no estado de São Paulo, Brasil, com 538 km². O levantamento da rede de drenagem foi realizado a partir de fotografias aéreas com a visualização em 3D por estereoscopia digital. O MDE foi criado a partir de curvas altimétricas com equidistância vertical de 5 m. A partir das características da rede de drenagem e do relevo foram calculados os parâmetros morfométricos que representassem os dois elementos ao longo de toda a área de estudo. Com o processamento dos parâmetros foi utilizada a técnica fuzzy k-médias para fazer uma compartimentação da paisagem não supervisionada. Os resultados mostraram que a densidade de drenagem (DD) possui uma correlação negativa com os teores de argila ($r = - 0.63$), enquanto a correlação com o gradiente textural foi positiva ($r = 0.42$). O ferro total (Fe_2O_3) apresentou baixa variabilidade na área e não resultou em correlações significativas. A maior correlação foi com o matiz ($r = 0.67$), determinando solos mais amarelos nos locais de maior DD. A compartimentação da paisagem separou bem as posições do relevo em relação a DD. Cada compartimento se apresentou como uma unidade de mapeamento, havendo relação direta com classes pedológicas.

Palavras-chave: Rede de drenagem; Compartimentação automática da paisagem; Mapeamento digital de solos; Estereoscopia digital

ABSTRACT

Landscape compartmentation through relief and drainage network and its relation with soil attributes and soil classes

Aerial photographs, as well as stereoscopy were widely used for environmental and landscape studies. As digital soil mapping techniques have been developed, drainage network was replaced for relief parameters. However, literature studies have shown vast attribution between drainage network and soil mapping, bringing the need to develop ways to insert the drainage parameters on different soil mapping strategies. Therefore, this study aims to create a landscape compartment map through drainage network and a digital elevation model (DEM), both with high spatial resolution, in order to evaluate its correlation with five soil attributes (clay content at 0-20 and 80-100 cm, textural gradient, total Iron (Fe_2O_3) and color) and soil classes. With these procedures it will be possible to create base methods to associate landscape with pedology and mapping. The study area has 538 km² and is located at Rio das Pedras municipality in the state of São Paulo, Brazil. The drainage network was created using aerial photographs with digital stereoscopy in 3D and the DEM with altimetric curves. These two geographic basis were used to calculate morphometric parameters that represents the patterns along the study area. The parameters were processed with fuzzy k-means technique to create a non-supervised landscape compartments map. Results showed that drainage density (DD) had a negative correlation with clay content ($r = - 0.63$), while textural gradient was positive ($r = 0.42$). The (Fe_2O_3) had low spatial variability, resulting in non-significant results. The greatest correlation was achieved with soil color ($r = 0.67$), indicating yellow soils at high DD landscapes. The landscape compartment was able to distinguish the relief positions related to DD. Each compartment was assumed as a soil map unit, presenting straight connections with soil classes.

Keywords: Drainage network; Non-supervised landscape compartment; Digital soil mapping; Digital stereoscopy

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância e evolução do mapeamento de solos

O Brasil se destaca mundialmente pelo volume de sua produção agrícola (Brasil, 2017). Desde o início de suas atividades comerciais a agricultura esteve presente como importante função econômica (Embrapa, 2018).

Com o aumento expressivo da população mundial e consequente aumento da necessidade por alimentos, é essencial que a eficiência da produção seja alcançada (Brasil, 2017). Para tanto, é fundamental o conhecimento das áreas agricultáveis, a saber, sua capacidade produtiva e as técnicas ideais de manejo e conservação. Nesse contexto, o Brasil se apresenta como um país de importante exportação agrícola e o solo se insere como crescente objeto de estudo, sendo amplamente relacionado com a geração de riqueza de um país (Hartemink et al., 2008).

Além de estudos sobre a fertilidade dos solos, bem como seus atributos físicos e químicos, os mapas de solo se apresentam como ferramentas de grande importância e valor para o planejamento urbano, construção civil e conservação de ecossistemas (Demattê et al., 2016). De maneira geral, os mapas de solo em todo o mundo não estão em escalas detalhadas e a sua produção pode ser custosa e demorada, tornando a sua realização muitas vezes inviável Schoeneberger et al. (2012).

O primeiro mapeamento de solos a nível nacional foi realizado pelo projeto RADAM BRASIL na década de 1970 (Mendonça-Santos e Santos, 2007). Foram utilizadas imagens de radar feitas por aerolevantamentos para criar mapas de geologia, geomorfologia, vegetação, solos e potencial de uso da terra da região da Amazônia. Em 1976 o trabalho se estendeu para todo o território nacional, gerando mapas que auxiliaram o Brasil no conhecimento da sua paisagem.

Em décadas posteriores foram desenvolvidos outros mapas de solos a nível nacional, como os produzidos pela Embrapa (2001). No entanto, apesar de sua importância para o conhecimento dos solos nacionais, a escala do trabalho era de nível exploratório e esquemático transmitindo apenas uma noção geral dos tipos de solos existentes nas regiões brasileiras.

Com o passar dos anos foi sendo desenvolvido o mapeamento de solos chamado tradicional. Os conhecimentos eram aplicados em incursões de campo nas quais havia necessidade de aberturas de várias trincheiras onde se realizava a descrição dos atributos do

solo como textura, cor, estrutura, entre outros e a coleta de amostras de terra encaminhadas para análises de laboratório (Lepsch, 2007). Esse tipo de estudo é dificultado para grandes áreas devido a demora na abertura das trincheiras e ao custo elevado das análises físicas e químicas (Embrapa, 2013).

Dessa forma, o mapeamento detalhado de solos foi desenvolvido apenas em áreas pequenas, como fazendas e propriedades agrícolas. A dificuldade em mapear áreas grandes detalhadamente afeta o conhecimento maior das terras, podendo prejudicar o seu uso e manejo (Demattê et al., 2016).

Uma das técnicas que auxiliaram o mapeamento de solos foi a utilização de fotografias aéreas e as técnicas de estereoscopia (Rose e Letzer, 1975; Smith et al., 2006)

1.2. Histórico das fotografias aéreas na ciência

Em paralelo ao desenvolvimento dos estudos sobre os solos como ciência, eram desenvolvidas as técnicas de fotografia. As primeiras fotografias são do início do século XIX, porém apenas nos anos de 1850 as primeiras fotografias aéreas foram feitas (Figura 1a) (Graham e Roger, 1986).

Em meados do século XIX foi obtida a primeira fotografia aérea da história por Gaspard-Felix Tournachon quando um balão atingiu pouco mais de 300 m de altura e fotografou partes da cidade de Paris, França (Graham e Roger, 1986). Até o início do século XX várias técnicas foram sendo desenvolvidas para realizar fotografias aéreas, como balões, pipas e pombos (Figura 1b).

Finalmente as fotografias aéreas alcançaram outro patamar no início da Primeira Guerra Mundial. Inicialmente, a utilização de aviões foi apenas para o reconhecimento visual sem câmeras, eram feitos esboços do terreno e os soldados reportavam o que viam (Figura 1c) (Stichelbaut, 2006).

No entanto, os ingleses começaram a utilizar câmeras para saber a posição do inimigo e rapidamente todos os países adotaram tal técnica. O uso de aviões para realizar fotografias aéreas revolucionou a forma como os países atuavam na guerra, com o reconhecimento amplo de áreas inimigas através de muitas fotografias (Stichelbaut, 2006). A guerra também proporcionou grandes avanços nas tecnologias fotográficas e na qualidade das câmeras, tendo em vista que as fotos passaram a ser tiradas a mais de 4000 m (Figura 1c).

Figura 1: a. primeira fotografia aérea realizada na cidade de Boston, EUA, em 1860 por James Wallace Black. b. câmeras acopladas a pipas, balões e pombos para realizar fotografias aéreas das cidades dos EUA e Europa. c. fotografias aéreas tiradas em aviões durante a Primeira Guerra Mundial para reconhecimento de áreas inimigas.

Após as duas grandes guerras mundiais do século XX a tecnologia como um todo avançou sem precedentes. Dessa forma, a fotografia também avançou de maneira consistente. Todo o trabalho e esforço dos pioneiros do século XIX tornou os avanços da fotografia possíveis, principalmente com o reconhecido valor das informações provenientes de uma imagem aérea (Mills et al., 1997).

Além da utilidade militar, as fotografias aéreas também passaram a ser ferramenta importante para uma série de desenvolvimentos no planejamento urbano e também na ciência. Com as melhorias na qualidade das fotografias e com o surgimento das imagens de satélite esses dados passaram a ser fundamentais para muitos estudos desde o final da Segunda Guerra Mundial até os dias de hoje (Stichelbaut, 2006).

A geologia foi a primeira área da ciência a utilizar as fotografias aéreas de forma mais presente. Entre os anos de 1950-1960 inúmeras obras como livros e artigos científicos foram publicados afim de explorar as novas possibilidades de mapeamento trazidas pelas fotografias.

Fisher (1953, 1955, 1958, 1960, 1962), Ray (1956, 1958, 1960), Ray e Fisher (1960), estão entres os autores mais atuantes no desenvolvimento de técnicas de fotointerpretação para a geologia. De acordo com Ray (1960) a interpretação geológica de fotografias aéreas é baseada no reconhecimento de tons, cor, textura, padrões, formas e tamanho. Sendo a escala e a estereoscopia fundamentais na interpretação. Contudo, é importante salientar a grande diversidade de trabalhos publicados por diferentes autores durante esse período e nos anos seguintes.

A pedologia, no entanto, estava em processo de consolidação como ciência no século XX. Em 1975 foi produzida a primeira versão do U.S. Soil Taxonomy, o sistema de classificação de solos dos EUA e em 1998, após anos de desenvolvimento, a UNESCO-FAO realizou a primeira edição do World Reference Base (WRB), um sistema de classificação para os solos do mundo (Buol et al., 2011).

De certa forma o mapeamento de solos com utilização de fotografias aéreas foi posterior ao uso na geologia. Os geólogos utilizaram e desenvolveram técnicas de mapeamento que foram apropriadas pelos pedólogos e adaptadas para seu uso.

William Battle Cobb em 1923 (Cobb, 1923) sugeriu o uso de aviões tanto para a observação direta da paisagem e também para a construção de mapas fotográficos e posteriormente mapas base para o mapa final de solos, implementando o uso de fotografias aéreas na pesquisa. Outros pesquisadores como Lueder (1959) e Buringh (1954, 1960) também tiveram contribuições relevantes no uso de fotografias para o mapeamento de solos.

Trabalhos como França (1968), Gevaerd (1974) e Souza (1975) despontaram como estudos no Brasil utilizando a rede de drenagem e fotografias aéreas para mapeamento de solos. Os resultados dos trabalhos foram positivos na validação do mapeamento com as análises das amostras de solo.

As técnicas de aerofotogrametria seguiram como importante ferramenta nas décadas de 1980 e 1990, resultando em dissertações de mestrado e teses de doutorado avançando as pesquisas e o mapeamento de solos no estado de São Paulo (Politano, 1980; Manechini, 1981; Leão, 1983; Pfeifer, 1984; Demattê, 1992; Silva, 1993).

1.3. O papel da geopedologia no mapeamento digital de solos

Na medida em que as técnicas e ferramentas computacionais avançaram surgiram novos meios de realizar mapas de solos, o chamado mapeamento digital de solos (McBratney et al., 2000). Essa metodologia surgiu frente à lentidão e alto custo do mapeamento tradicional e pode ser definida como a criação e utilização de sistemas de informações espaciais de solos, através do uso métodos observacionais de campo e laboratório, combinados com sistemas de inferências espacial e não espacial (Lagacherie e McBratney, 2007).

As ferramentas do mapeamento digital têm evoluído, juntamente com a maior difusão de bases geográficas, como imagens de satélites, e técnicas de geoprocessamento. Entretanto, a tecnologia não busca excluir o tradicional sendo, auxiliar na renovação e reutilização de bases de dados antigas e tradicionais, utilizando métodos de geoprocessamento e estatística (Rossiter, 2008).

As técnicas do mapeamento de solos são amplas e apresentam inúmeras aplicações (Lagacherie, 2008). Um dos elementos da paisagem abordado nessas técnicas é o relevo, base da geomorfologia para compreensão dos sistemas climático, biogeográfico, geológico e antrópico e sua manifestação na paisagem (Ruhe, 1975; Christofolletti, 1980).

De acordo com Schaetzl e Anderson (2005) os solos são tão ligados ao formato do relevo que surgiu o conceito de geomorfologia do solo. Birkeland (1999) definiu as pesquisas na área como o estudo de solos e seu uso, evolução da paisagem, idade e estabilidade do relevo, processos de superfície e climas do passado.

Atualmente os estudos buscam utilizar modelos digitais de elevação para gerar elementos derivados do relevo, podendo assim caracterizar a paisagem quantitativamente através de geoprocessamento (Miller e Schaetzl, 2014).

Os estudos de Zinck et al. (2016) comprovam que a geomorfologia integrada com a pedologia acelera e melhora o levantamento de solos. As características externas da superfície ajudam a delinear as unidades de solo, enquanto as características internas do relevo ajudam a entender o processo de formação do solo.

A geopedologia é uma abordagem muito utilizada no mapeamento digital de solos, interpretando os processos de evolução das vertentes e associando seu desenvolvimento aos solos (Miller e Schaetzl, 2015; Shaetzl e Miller, 2016).

Não apenas os canais intermitentes, mas todos os canais que possam drenar as águas pluviais podem indicar uma relação direta com os solos presentes em um determinado local (Demattê et al., 2011). Relevos mais planos e estáveis, conseqüentemente predominam a

infiltração interna sobre o escoamento superficial. Por outro lado, na medida em que o relevo é mais acidentado há maior desenvolvimento de canais, estando relacionado com a geologia do local e também aos solos (Christofolletti, 1980).

Estudos utilizando a rede de drenagem buscaram determinar as variações dos solos em diferentes padrões de drenagem (Carvalho et al., 1990; França e Demattê, 1990; Demattê e Demétrio, 1995; Demattê e Demétrio, 1998; Obi Redy et al., 2004; Pissarra et al., 2004; Demattê et al., 2011).

No geral os autores encontraram solos que seguiam os padrões abordados pelas teorias geomorfológicas. Solos com horizontes subsuperficiais muito argilosos, com horizontes litoplínticos ou solos jovens com o saprolito próximo a superfície oferecem dificuldade a drenagem interna. São solos mal drenados e consequentemente há maior desenvolvimento dos canais de drenagem, oriundos da erosão superficial ocasionada pela pluviosidade.

A escolha da rede de drenagem como fator principal para identificar os solos parte de estudos que relacionavam as formas e volume dos canais com a geologia e pedologia (Fisher, 1955; Ray e Fisher, 1960; França, 1968; Politano, 1980; Manechini, 1981; Leão, 1983; Pfeifer, 1984; Silva, 1993). Os presentes trabalhos foram desenvolvidos na interface do conhecimento de geomorfologia e o papel dos canais de drenagem no

A hipótese do trabalho é de que a compartimentação automática de uma determinada paisagem esteja relacionada com atributos do solo, como teor de argila, razão textural e cor, que por sua vez apresentam relação com uma classe pedológica. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um método de compartimentação da paisagem através parâmetros derivados da rede de drenagem e do modelo digital de elevação (MDE), ambos com alta resolução espacial (5 m), visando avaliar as suas relações com os atributos do solo citados e classes pedológicas. Tais procedimentos poderão auxiliar na produção de métodos base para relacionar a paisagem com a pedologia e o mapeamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e bases geográficas

A área de estudo está localizada no município de Rio das Pedras, no estado de São Paulo, Brasil. A área possui 538 km² e seu relevo é predominantemente suave ondulado, com topos planos, áreas onduladas e altitude variando entre 500 e 700 m (Figura 2 c).

De acordo com Mezzalira (1966) a geologia da região é complexa, quando observou as classes: Ct (Período Carbonífero, formação Grupo Tubarão), constituída por arenitos, siltitos, varvitos, tilitos e conglomerados. Jbp (Período Jurássico, formação Botucatu Pirambóia), constituído por arenito, siltitos e folhelhos. Ksg (Período Cretáceo, formação Serra Geral), constituído por basalto, arenito, inter-trap e diabásio. Pc (Período Permiano, formação Grupo Estrada Nova Formação Corumbataí), constituído por siltitos, folhelhos, calcários e sílex. Pi (Período Permiano, formação Grupo Estrada Nova Formação Iratí), constituído por folhelhos, pirobetuminosos, dolomitos, siltitos e sílex (Figura 2 a).

Para a realização do trabalho foram utilizadas bases geográficas do banco de dados do Laboratório de Sensoriamento Remoto do Departamento de Ciência do Solo, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). Os dados utilizados têm por base Neto (2017) que desenvolveu mapas digitais de atributos do solo para a mesma área como, teor de argila, Fe₂O₃, CTC, entre outros.

A base para o desenvolvimento do trabalho foi a vetorização de uma rede de drenagem detalhada, realizada pelo método tradicional de fotogrametria. As técnicas de estereoscopia, há muito utilizadas no mapeamento de solos, foram empregues com ferramentas mais modernas. As fotografias foram utilizadas em seu formato digital, formando pares estereoscópicos, e a visualização da paisagem em 3D foi possível com o auxílio do programa Photomod Lite 6.3. O programa foi utilizado tanto para realizar a visualização do terreno em 3D quanto a vetorização da rede de drenagem.

A vetorização manual dos canais de drenagem foi escolhida ao invés do levantamento automático da rede de drenagem devido ao nível de detalhamento oferecido pelas fotografias aéreas. Apesar da maior praticidade da realização automática, foi priorizado o maior detalhe, identificando canais pequenos, que poderiam influenciar na relação do atributo em questão com as propriedades e características do solo.

Figura 2: Localização da área de estudo. a. Mapa geológico Mezzalira (1966). b. Mapa pedológico Oliveira e Prado (1989). c. Rede de drenagem detalhada construída através de estereoscopia digital.

Para a realização do trabalho foi necessário um computador com capacidade de visualização em 3D e um monitor apropriado para a visualização. Ao contrário dos estereoscópios antigos, foi utilizado óculos digital e um emissor do sinal 3D (Figura 3).

As fotografias foram obtidas através de levantamento aéreo realizado em 2011. Foram utilizadas mais de 400 imagens para produzir a rede de drenagem através de estereoscopia. Tais fotografias possuem alto poder de resolução (30 cm) e possibilitaram o mapeamento da rede drenagem em nível detalhado. A aproximação nas fotografias possibilitou a identificação de praticamente todos os canais. A escala do trabalho variou entre

1:15.000 e 1:30.000. Essa metodologia foi escolhida para que o detalhamento da rede de drenagem fosse maior do que os produtos de processamento digital automático, representando a quase totalidade dos canais de drenagem na paisagem.

Posteriormente, foi necessário realizar a conexão das extremidades das linhas. A versão gratuita do programa Photomod Lite não permitia a conexão das linhas criadas. Foi utilizada a ferramenta Snapping do programa ArcGIS 10.4.1 para que as linhas fossem conectadas. Ao mesmo tempo, foi realizado o ordenamento dos segmentos fluviais segundo Strahler (1952).

A rede de drenagem foi analisada de diferentes formas no presente trabalho. Uma delas foi a relação com mapas de atributos do solo como teor de argila, razão textural e matiz. Para isso, a rede de drenagem foi sobreposta em mapas digitais de atributos do solo, sendo analisados os parâmetros da rede de drenagem, frequência de rios (FR) (Equação 1) e a sinuosidade (Equação 2) (Tabela 2).

$$FR = \frac{N}{A}$$

Eq. 1

$$S = \frac{C}{R}$$

Eq. 2

A Equação 1 calcula a FR com base na razão entre o número de rios (N) e a área em que eles se encontram (A). Já a Equação 2 calcula a sinuosidade (S) com base no comprimento real do rio principal (C) em razão da distância em linha reta do início ao final do rio (R).

Primeiramente tais parâmetros foram relacionados com os atributos de solo visualmente. Após verificar certa relação entre a drenagem e os atributos do solo, os mapas digitais de atributos do solo foram reclassificados. Os mapas de teor de argila foram divididos em classes texturais segundo Embrapa (2013), o mapa de razão textural também foi reclassificado em diferentes níveis e o mapa de matiz foi dividido de acordo com a adaptação dos valores para a cor do solo.

Para cada polígono de classe textural, razão textural e cor foi feito um recorte da rede de drenagem e os cálculos para interpretar os padrões dos canais sobre os padrões do solo (Tabela 2).

2.2. Parâmetros morfométricos de relevo e rede de drenagem

Os estudos de geopedologia são baseados na geomorfologia e pedologia, sendo que, um dos fatores determinantes em ambas áreas de pesquisa é o regime hídrico (Zinck, 2016). Dessa forma, para avançar na caracterização quantitativa da área foi necessário utilizar um modelo digital de elevação (MDE), assim como nos diversos estudos de mapeamento digital de solos (Rizzo et al., 2016; Demattê et al., 2017, 2018).

Figura 3: Parâmetros do relevo e rede de drenagem. a. Reconstituição de fotografias aéreas e vetorização da rede de drenagem. b. Produção do modelo digital de elevação a partir da drenagem e curvas de nível 5 m. c. Cálculo dos parâmetros morfométricos da rede de drenagem. d. Cálculo dos parâmetros morfométricos do relevo.

Para produzir o MDE foi utilizada a rede de drenagem, pontos de elevação coletados em campo e um mapa de curvas altimétricas com equidistância vertical de 5 m, proveniente

da digitalização de cartas altimétricas do Instituto Geográfico de Campinas (IGC). As curvas de nível possibilitaram um detalhamento da área, necessárias para a construção dos parâmetros morfométricos do relevo. O MDE foi gerado através da ferramenta Topo to Raster, no programa ArcGIS 10.4.1. Foram utilizadas três bases geográficas, sendo as curvas de nível, a rede de drenagem e pontos de elevação, auxiliando na produção de um MDE mais próximo à realidade e possibilitando a produção dos parâmetros do relevo (Figura 3b).

Com a rede de drenagem e o modelo digital de elevação foram calculados os parâmetros morfométricos para a avaliação quantitativa da paisagem. Os parâmetros calculados podem ser divididos a partir de suas bases, resultando em parâmetros morfométricos referentes ao relevo, os quais utilizaram o MDE como dado de entrada (Figura 3d) e os parâmetros da rede de drenagem, os quais utilizaram as linhas os canais como dados de entrada (Figura 3c).

O desenvolvimento dos parâmetros morfométricos foram realizados no programa System for Automated Geoscientific analyses (SAGA GIS). Os algoritmos do SAGA GIS foram utilizados em uma extensão para o programa R, pois o tamanho da área causou uma dificuldade no processamento dos dados. Dessa forma, o programa R, em sua plataforma de programação, ofereceu maior capacidade para processar as informações.

Os parâmetros gerados estão na biblioteca de documentos do programa SAGA GIS chamada “análises do terreno”, nas seções de hidrologia, morfometria e canais. Os parâmetros escolhidos para desenvolver o trabalho foram selecionados a partir de sua relevância comprovada por outros estudos (Tabela 1).

2.3. Compartimentação da paisagem

A compartimentação da paisagem foi realizada em duas etapas. A primeira foi realizada no programa R, ao importar e processar as imagens referentes aos parâmetros morfométricos do relevo e da rede de drenagem. As imagens foram importadas para o programa utilizando o pacote de funções “Rgdal”, sendo corrigidas algumas diferenças entre os limites das imagens. Para eliminar a presença de pixels sem valores na imagem (N/A) eles foram substituídos por um valor representativo da média dos pixels da imagem (Hengl, 2009), deixando todas as imagens na mesma extensão.

Após a correção das incompatibilidades das imagens foi realizada uma análise de componentes principais (ACP). Utilizando o pacote “Stats” e com os parâmetros utilizados foi

construído um gráfico biplot, para a identificação dos parâmetros mais relevantes e a relação entre eles (Manly, 2008) (Figura 8a).

Ao identificar os parâmetros mais relevantes, foi utilizada uma análise estatística afim de obter um número ótimo de classes para realizar a compartimentação (Venables e Ripley, 2002). Dessa forma, a compartimentação da paisagem foi realizada pelo algoritmo de clusterização fuzzy k-médias, o qual necessita de um numero de clusters pré especificado (MacQueen, 1967).

Por definição, o método fuzzy k-médias de cluster utiliza os valores das matrizes (parâmetros) e, através de seus dados, a distância euclidiana (Venables e Ripley, 2002). O método é amplamente utilizado em trabalhos relacionados ao mapeamento digital de solos na predição e espacialização de atributos do solo, por exemplo (An et al., 2018; Heil et al., 2019).

O mapa de cluster, ou a compartimentação da paisagem, foi construído através do pacote “Stats”, sendo uma classificação não supervisionada das formas do relevo. Classificação feita a partir da distância Euclidiana entre os valores das matrizes (parâmetros) utilizadas.

O mapa foi exportado como um arquivo matricial em formato “tiff” ao utilizar o pacote “raster”. Ao visualizar o mapa, foi observado uma quantidade demasiada de pequenos compartimentos, chamados ruídos, naturais ao processamento digital. Para realizar a correção foi utilizado a função “majority filter” no programa SAGA GIS para filtrar tais ruídos, sendo a segunda etapa do processo de criação do mapa de cluster.

A função foi utilizada pois é adequada a filtrar imagens com matriz de valores classificatórios (Soulard et al., 2018). O mapa de cluster se enquadra em tal pré-requisito, pois cada número é correspondente a uma classe. A função funciona agrupando os pixels mais isolados ao compartimento mais significativo ao entorno.

Finalmente o mapa de compartimentos da paisagem foi finalizado e transformado de matriz para formato vetorial no programa ArcGIS, afim de que houvesse a continuidade das análises.

2.1. Análise estatística

A primeira análise estatística foi realizada entre os parâmetros utilizados na produção do cluster (Tabela 1). Foi produzida uma matriz de correlações, utilizando o método de Pearson para analisar o comportamento de um parâmetro em função do outro (Figura 6).

A correlação foi feita importando as imagens dos parâmetros para o programa R e analisando as bases de dados com os pacotes “raster”, “rgdal”, “Hmisc” e “corrplot”. Entre o processo, os dados foram normalizados e apresentaram nível de significância a 5 % de probabilidade.

Tabela 1: Parâmetros morfométricos do relevo e da rede de drenagem espacializados pela área de estudo e suas referências. Os parâmetros foram gerados com auxílio dos programas SAGA GIS, R e ArcGIS 10.4.1.

Parâmetro	Sigla	Descrição	Referência
Parâmetros do Relevo			
Aspecto	ASP	Variável classificatória, indica a orientação medida no sentido horário do Norte.	Florinsky, 2011
Curvatura Longitudinal	CL	Ângulo entre uma reta e um corte transversal que toca um ponto qualquer na superfície.	Knott e Viquerat, 2016
Curvatura de Perfil	CP	É paralela com a declividade e indica superfícies côncavas (+) e convexas (-).	Florinsky, 2011
Fator LS	LS	Parâmetro adimensional calcula o comprimento da declividade e inclinação.	Panagos et al., 2015
Índice de Rugosidade do Terreno	TRI	Grau de irregularidade da superfície indicado pela variação na elevação em uma área.	Riley et al., 1999
Declividade	SLOPE	Cálculo da declividade através da elevação.	Florinsky, 2011
Índice de Umidade do Terreno	TWI	Indica a tendencia de um local em drenar ou reter a água depositada sobre a superfície.	Beven e Kirkby, 1979.
Parâmetros da Rede de Drenagem			
Densidade de Drenagem	DD	Razão entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da bacia hidrográfica.	Christofolletti, 1980
Distância Horizontal ao Canal de Drenagem	HOFD	Distância horizontal calculada a partir de um ponto qualquer até o canal de drenagem mais próximo.	Ali e De Boer, 2010
Fluxo Superficial ao Canal de Drenagem	OFD	Distância real do percurso da água entre um ponto qualquer e o canal de drenagem mais próximo	Parsons et al., 2004
Nível de Base do Canal de Drenagem	CNBL	Interpolação entre a altitude do canal de drenagem e do entorno do canal, indicando o nível de base do canal.	Conrad et al., 2015
Altitude Acima do Canal de Drenagem	VDCN	Faz inferência sobre a profundidade do terreno baseado na altitude do ponto e o início dos canais de drenagem.	Rennó et al., 2008
Distância Vertical ao Canal de Drenagem	VOFD	Indica a distância de um ponto qualquer até o nível do canal de drenagem mais próximo.	Olaya, 2004

A partir da busca pela interpretação da compartimentação da paisagem, foi realizada uma análise de correlação entre os parâmetros da paisagem e os alguns atributos do solo (Figura 6).

As bases de informações sobre os atributos do solo foram obtidas do banco de dados do Laboratório de Sensoriamento Remoto do Departamento de Ciência do Solo, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). Foram utilizados cinco mapas digitais de atributos do solo, sendo o teor de argila nas camadas superficiais (0-20 cm) e subsuperficiais (80-100 cm), gradiente textural, teor de (Fe_2O_3) e matiz. Os mapas foram produzidos por Neto (2017), o qual realizou uma análise de dados espectrais em um mosaico de solo exposto produzido a partir de imagens do satélite Landsat-5.

Foram utilizados pontos amostrais aleatórios para realizar uma análise multivariada, na qual 80 % das amostras foi empregue para calibração da predição e 20 % para validação (Neto, 2017). Os dados de atributos do solo foram espacializados utilizando regressões multivariadas, correlacionando as amostras de calibração com atributos do relevo e as reflectâncias do mosaico de solo exposto.

Para a espacialização de atributos em subsuperfície foram utilizadas as reflectâncias obtidas por amostras de solo em análises de laboratório em conjunto com a reflectância dos sensores orbitais. As validações foram feitas com os 20 % das amostras aleatórias utilizando coeficientes de determinação como R^2 e RPIQ (Neto, 2017).

Para a determinação da cor do solo o matiz foi transformado em valor numérico, seguindo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2017). Estando definidos como, Vermelhos (≤ 12.5), Amarelo (≥ 17.5) e Vermelho Amarelo quando não atender a nenhum dos demais critérios.

A correlação foi feita utilizando os mapas produzidos por Neto (2017), uma vez que os pontos amostrais não foram suficientes para avaliar a variação dos solos dentre os clusters. A partir dos mapas foram extraídos 145 pontos aleatórios pela área de cada cluster, coletando os valores dos atributos do solo para a mesma área (Figura 4). O coeficiente de correlação resultante da relação entre os atributos do solo e os parâmetros do relevo e rede de drenagem foi calculado para cada cluster separadamente.

A correlação entre tais elementos foi a primeira tentativa para buscar avaliar a qualidade do cluster na perspectiva da separação de tipos de classes texturais, ou até mesmo classes pedológicas.

Figura 4: Exemplo da construção de uma matriz de correlações que avaliou a correlação entre os atributos do solo com os parâmetros do relevo e rede de drenagem.

Afim de avançar na interpretação dos clusters foram realizadas outras duas análises. A primeira foi a análise função discriminante (AFD), para entender quais atributos do solo se destacaram e foram mais importantes na diferenciação de cada cluster (Manly, 2008). A segunda análise realizada foi o teste de médias, sendo o teste de Tukey para valores com distribuição normal a nível de 5 % (Tabela 4) e o teste de Bonferroni para valores com distribuição não normal a nível de 5 % (Tabela 5).

O interesse em certificar os resultados compreende o processo de reconhecer a ocorrência de diferentes tipos de solos a partir de três bases fundamentais: posição do relevo (Christofolletti, 1980; Hall, 1983; Miller e Shaetzl, 2015; Shaetzl e Miller, 2016; Marques et al., 2018; Zeraatpisheh et al., 2018), rede de drenagem (Way, 1973; França e Demattê, 1990; Demattê e Demétrio, 1995; Demattê e Demétrio, 1998) e processo de evolução da encosta (Ruhe, 1956; Ruhe, 1960; Bouma, 1983; Van Breemen e Buurman, 2003; Shaetzl e Anderson, 2005; Kämpf e Curi, 2015).

A validação do método de compartimentação da paisagem se deu pelo cruzamento dos dados pertencentes a cada compartimento e a variabilidade dos atributos do solo e classes pedológicas neles contidos. Para isso foi utilizado o mapa pedológico realizado por Oliveira e Prado (1989) na escala 1:100.000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização da paisagem da área de estudo: parâmetros morfométricos do relevo e rede de drenagem

Parâmetros derivados do relevo têm auxiliado na caracterização e na delimitação de compartimentos da paisagem (Miller e Shaetzl, 2015; Shaetzl e Miller, 2016). Essas técnicas são utilizadas em diferentes áreas da pesquisa como pedologia, geologia, geomorfologia, geografia, biologia, entre outras (Hogg et al., 2018; Marques et al., 2018) (Figura 5). Os parâmetros foram calculados afim de representar qualitativamente e quantitativamente a paisagem da área de estudo.

O aspecto é representado por um dado categórico, apresentando-se normalmente distribuído (Figura 5a). Esse parâmetro não foi utilizado na análise estatística, pois seus valores não são compatíveis para essas análises (Florinsky, 2011).

A curvatura mapeou as áreas côncavas e convexas facilitando a identificação da sua variação ao longo do terreno. As áreas côncavas foram bem delineadas em posições inferiores no relevo. As áreas convexas também foram bem demarcadas nas partes mais altas da paisagem (Figura 5bc).

O fator LS também não possui uma distribuição normal em seus dados. Os valores são adimensionais, sendo o produto do comprimento da rampa e o grau do declive, no entanto, sua variação espacial é identificada na medida em que as superfícies mudam de declividade e saem de posições mais planas para mais íngremes (Figura 5d).

O MDE possui uma distribuição que possibilita a identificação das feições da paisagem e os canais de drenagem com precisão (Figura 5e). Todos os parâmetros calculados tiveram participação direta ou indireta dos dados de elevação. Seu papel na qualidade dos parâmetros foi satisfatório, uma vez que todos os parâmetros foram bons classificadores da paisagem.

Os dados do TRI possibilitaram o mapeamento da heterogeneidade do terreno (Figura 5g). Tal informação é utilizada para separar as áreas pouco e muito onduladas. As áreas com maior variação na elevação tiveram alto TRI, o que também foi indicativo de elevada densidade de drenagem.

A distribuição do parâmetro TWI apresentou maior tendência a normalidade (Figura 5h). Os locais onde há maior concentração de valores elevados TWI foram localizados em

posições superiores da paisagem. As áreas mais irregulares com maior variação da elevação representaram os menores valores de TWI.

O parâmetro CNBL apresentou um padrão semelhante ao MDE e sua distribuição foi constante em todo o terreno (Figura 5i). No entanto, o parâmetro não conseguiu identificar áreas de possíveis solos hidromórficos, tendo em vista o relevo sem planícies destacadas e com grande variação da elevação.

A DD, tradicionalmente utilizada nos estudos da paisagem, se destacou na caracterização do terreno. Seus valores entre 0 e 20 km/km² possibilitaram a caracterização da paisagem, separando as áreas com a rede de drenagem mais ou menos desenvolvida (Figura 5j).

Os parâmetros que analisaram medidas de distância na relação terreno e rede de drenagem, OFD, HOFD e VOFD são complementares e separaram as áreas de maior e menor densidade de drenagem (Figura 5 l, k e n). No entanto, tais dados sofreram influência de valores iguais a zero. Os pixels adjacentes ao canal de drenagem possuem uma distância mínima, interferindo na identificação de áreas com baixo desenvolvimento da rede de drenagem.

O HOFD e VOFD apresentaram as maiores distâncias em posições mais altas do relevo, pois com menos canais na área maior será a distância vertical e horizontal até o canal (Figura 5kn). O OFD também foi influenciado pelos pixels de valores próximos a zero (Figura 5l). Dessa forma, não se observa uma distribuição normal nesses parâmetros. Apesar desse fator as informações de distância foram componentes importantes na caracterização da paisagem e na correlação entre os atributos.

Ao contrário do OFD, o VDCN não utiliza um algoritmo de direção de fluxo superficial. Ele é uma medida de distancia vertical entre um ponto qualquer e a drenagem. Tal parâmetro representou as áreas mais próximas e mais distantes aos canais de drenagem (Figura 5m). Os topos mais isolados e as partes mais inferiores da paisagem foram bem identificadas, bem como os canais de drenagem.

Figura 5: Parâmetros morfométricos do relevo e rede de drenagem. a = aspecto; b = curvatura longitudinal; c = curvatura de perfil; d = fator LS; e = modelo digital de elevação; f = declividade; g = índice de rugosidade do terreno; h = índice de umidade do terreno; i = nível de base do canal de drenagem; j = densidade de drenagem; k = Distância horizontal ao canal de drenagem; l = fluxo superficial ao canal de drenagem; m = altitude acima do canal de drenagem; n = distância vertical ao canal de drenagem. Coordenada central: lat = 7.470.481 long = 233.200 m.

Figura 5: Continuação.

Figura 5: Continuação

3.2. Correlação entre parâmetros do relevo e rede de drenagem

A análise entre os parâmetros parte dos conceitos geomorfológicos de que a hidrologia é um dos fatores que controlam a paisagem, sendo fundamental no mapeamento de solos (Schaetzl e Anderson, 2005). Por isso, a análise de correlação mostrou o papel dos parâmetros morfométricos da rede de drenagem e sua relação com os do relevo (Figura 6). Tais correlações contribuem com estudos sobre o processo evolutivo da paisagem, relacionando o desenvolvimento da rede de drenagem e o relevo (Karimi et al., 2018). Dessa forma, a elevação (MDE) se mostrou significativa para representar a paisagem, gerando parâmetros que podem ser utilizados para diferentes fins, sendo um deles o mapeamento de solos.

O Aspecto do terreno não foi considerado, pois não pode ser analisado estatisticamente, uma vez que seus valores são classificatórios (Florinsky, 2011). As correlações envolvendo o MDE e os parâmetros da drenagem foram positivas definindo que quanto maior a elevação maior será a distância entre os canais. A correlação entre o MDE e OFD, por exemplo ($r = 0,49$), indica um padrão, ou seja, a distância entre um ponto qualquer na paisagem até o canal de drenagem mais próximo é maior nas posições mais elevadas da paisagem (Figura 6). Dessa forma, em posições mais baixas a distância entre um ponto qualquer e o canal mais próximo será menor.

A correlação entre a densidade de drenagem e o MDE ($r = -0,64$) seguiu o padrão encontrado por Demattê e Demétrio (1995) e Demattê e Demétrio (1998) no qual a DD elevada é representativa de vertentes declivosas em posições inferiores no relevo. Essas

posições possuem uma dissecação maior, com forte variação da elevação, dando a essas posições uma condição suscetível ao escoamento superficial da pluviosidade e baixa infiltração. Os resultados estão de acordo com Way (1973), quando relacionou a rede de drenagem bem desenvolvida com áreas rochosas impermeáveis e solos com pouca infiltração.

Ao estabelecer uma caracterização da área a partir da curvatura foi observado que a CP melhor identificou as variações na superfície do terreno. Thomas et al. (1999) apresentou a curvatura de perfil como o melhor parâmetro na correlação com as classes de solos e a textura. Na área de estudo a CP também separou as áreas entre côncavas e convexas, facilitando a interpretação e correlação com os demais parâmetros (Figura 5).

A partir da correlação entre a curvatura de perfil e os parâmetros TWI, DD e TRI (Figura 6) foi possível estabelecer um padrão, no qual as superfícies convexas apresentaram baixa DD e alto TWI. O TWI, como um indicativo de umidade, auxiliou na identificação de áreas onde há propensão a acumulação de água no solo. Dessa forma, a correlação entre CP e TWI ($r = -0,38$) indicou que em áreas de curvatura negativa (convexas) a infiltração de água no solo será maior, confirmando as tendências de encontrar solos mais profundos nas áreas mais elevadas da paisagem (Figura 6).

Valores menores para o TWI se localizaram em áreas de maior escoamento superficial. Para essas áreas a curvatura foi positiva, indicando o padrão da área em que áreas côncavas foram representativas de solos mais jovens e pouco profundos, concordando com Way (1973), Cassetti (1983) e Thomas et al., (1999). Ao observar o TWI com a DD observou-se a possibilidade de um auxílio prático no mapeamento de solos. Áreas convexas com elevado TWI possuem os menores valores de densidade de drenagem. Isso explica a correlação (DD x CP, $r = 0,37$ e DD x TWI, $r = -0,68$) entre os parâmetros, confirmando a rede de drenagem como aspecto determinante na compartimentação da paisagem (Figura 6).

O TRI, índice que indica a rugosidade do terreno, conseguiu separar as áreas entre suave onduladas e muito onduladas. As áreas de menor rugosidade foram correspondentes a baixa DD, elevado TWI e curvatura negativa. Enquanto os valores maiores de TRI estão em locais com rede de drenagem mais desenvolvida, indicando uma superfície mais irregular com tendência ao escoamento superficial e consequente aumento da rede de drenagem (Figura 6). Dessa forma, a correlação entre TRI e TWI ($r = -0,63$) é correspondente a estudos recentes que utilizam o TWI para avaliar a condição de umidade do solo (Figura 6) (Li et al., 2018; Raduła et al., 2018).

Figura 6: Matriz de correlações entre os parâmetros do relevo e da rede de drenagem. Relevo: ASP = Aspecto; CL = Curvatura longitudinal; CP = Curvatura de Perfil; LS = Fator LS; MDE = Modelo Digital de Elevação; SLOPE = Declividade; TRI = Índice de Rugosidade do Terreno; TWI = Índice de Umidade do Terreno. Rede de Drenagem: CNBL = Nível de Base do Canal de Drenagem;; DD = Densidade de drenagem; HOFD = Distância Horizontal ao Canal de Drenagem; OFD - Fluxo Superficial ao Canal de Drenagem; VDCN = Altitude Acima do Canal de Drenagem; VOFD = Distância Vertical ao Canal de Drenagem.

A declividade e o fator LS apresentam valores mais baixos nos relevos mais suaves (Figura 6). Observando o trabalho de Panagos et al. (2015) observa-se a declividade e o fator LS aumentando nas áreas mais elevadas. Isso é devido aos relevos montanhosos que apresentam escarpas íngremes, potencializando esses parâmetros. Para a área de estudo, o comportamento está mais adequado ao trabalho de Ferreira e Panagopoulos (2014) concentrando os maiores valores nas partes inferiores, justamente onde rede de drenagem é mais desenvolvida tornando o relevo mais ondulado e irregular.

A correlação entre o LS e TRI ($r = 0,83$) demonstra que o maior potencial de escoamento superficial está em áreas mais preenchidas pela rede de drenagem e com declividade maior. A correlação com o TWI ($r = -0,57$) também reforça a relação inversa

entre a declividade e a infiltração da água no solo apresentada por Christofolletti (1980) (Figura 6).

Apesar de não apresentar correlações muito altas com os parâmetros da paisagem, a OFD é um dos parâmetros mais importantes na utilização da rede de drenagem em um futuro mapeamento de solos. Sendo a distância percorrida no terreno até o canal de drenagem mais próximo, de acordo com as células de direção de fluxo preferencial, a OFD apresenta um comportamento inverso ao da DD em comparação com os demais parâmetros do relevo ($r = -0,6$) (Figura 6).

Em áreas onde a DD é elevada a distância entre canais é menor, uma vez que em áreas com menor desenvolvimento da rede de drenagem a distâncias entre os canais será maior. A correlação da OFD com o MDE ($r = 0,49$) demonstra essa relação na qual as distâncias entre canais chegaram a mais de 1 km (Figura 6).

As medidas de distância, como OFD, HOFD, VDCN e VOFD podem ser relacionadas a estudos de evolução da paisagem, que definem as posições da vertente para melhor compreendê-la (Schoeneberger, 2012; Miller e Shaetzl, 2015; Shaetzl e Miller, 2016; McAuliffe, 2018). Nas posições de topo e ombro da vertente Cassetti (1983) explica que há um predomínio dos processos pedogenéticos em relação aos morfogenéticos, ou seja, a infiltração de água será maior e, através do intemperismo químico das rochas, os solos serão mais profundos. De acordo com Jahn (1954) o balanço morfogenético das vertentes se dá na relação entre o intemperismo, pedogênese e o processo de erosão do regolito, confirmando a relação entre os parâmetros com o processo de evolução da paisagem.

As maiores distâncias para tais parâmetros estão justamente nas posições de topo e ombro. O relevo suave, entre plano e convexo, atende aos padrões apresentados na literatura e indicam solos mais desenvolvidos como Latossolos e Argissolos. Por outro lado, analisando as correlações negativas com a densidade de drenagem a área de estudo possui um padrão de acordo com o definido por Melton (1957) que definiu as vertentes mais curtas e de maior declividade como indicativos de alta DD (Figura 10). Enquanto as vertentes mais longas e com declives mais suaves como áreas de baixa DD.

3.3. Relação entre atributos do solo e rede de drenagem

É fato a relação entre os padrões da rede de drenagem e a ocorrência de solos (França e Demattê (1990, 1993); Demattê e Demétrio (1995, 1998). No entanto, apesar de tais estudos apresentarem essa relação, não houve um avanço na utilização da rede de drenagem para o mapeamento de solos, vide a ausência de metodologias em trabalhos sobre o mapeamento

digital (USDA, 2017; Hartemink et al., 2008). Outras variáveis como o relevo possuem papel determinante no mapeamento digital, mas a rede de drenagem não se inseriu da mesma maneira (Teng et al., 2018). Dessa forma, a rede de drenagem se insere como um fator importante do mapeamento de solos, sendo relacionada com os fatores de formação do solo: relevo e material de origem.

Com a utilização de mapas digitais de atributos do solo (Figura 7), foi possível identificar o comportamento da rede de drenagem em uma região conhecida diversificada em relação aos solos presentes na paisagem (Tabela 2). A diferença entre o desenvolvimento dos canais já é perceptível visualmente, ao observar a sobreposição da rede de drenagem sobre o mapa de atributos (Figura 7).

Figura 7: Sobreposição da rede de drenagem em quatro mapas de atributos do solo resultantes do trabalho de Neto (2017). a. teor de argila na camada A (g kg^{-1}); b. gradiente textural; c. teor de argila no horizonte B (g kg^{-1}); d. cor do solo representado pelo matiz do horizonte B.

Ao observar a Figura 7 a e c, correspondentes a sobreposição da rede de drenagem aos mapas de teor de argila nos horizontes A e B, respectivamente, é possível entender a variação do atributo do solo na medida em que a densidade de drenagem aumenta ou diminui.

Tal afirmação está de acordo com os trabalhos realizados por França e Demattê (1990, 1993), os quais afirmaram que solos com baixo potencial de drenagem interna

apresentam valores maiores de densidade de drenagem na superfície. Os solos com horizonte superficial (0-20 cm) arenoso estão onde há o maior desenvolvimento dos canais, ao passo que os solos com maiores teores de argila apresentaram menor DD. Coincidentemente, tais locais possuem elevada razão textural, o que oferece resistência à infiltração, explicando a maior DD nessas posições (Figura 7 b).

A rede de drenagem foi analisada quantitativamente em relação aos atributos do solo utilizados no estudo (Tabela 2). É possível observar, para os horizontes A e B, que a DD diminui na medida em que o teor de argila aumenta. Levando em consideração que as áreas mais argilosas estão localizadas nas partes mais elevadas da paisagem, há a confirmação da correlação negativa entre a DD e a elevação (Figura 6).

O comportamento encontrado em alguns locais da área de estudo está de acordo com o processo de evolução da paisagem explicado por Miller e Schaetzl (2016). Os autores apontam que os processos geomorfológicos de erosão e deposição ocorrem, de tal maneira, que acarretam em solos mais superficiais nas posições mais baixas da paisagem e solos mais desenvolvidos em zonas de estabilidade nas posições mais elevadas da paisagem.

No entanto, é preciso afirmar que os solos muito argilosos possuem propriedades físicas que dificultam a infiltração da água no solo (Cassetti, 1983). Seja por elevado gradiente textural, contato lítico próximo a superfície ou pelas propriedades físicas intrínsecas aos minerais de argila que retém a água em solos de baixa porosidade (Van Breemen e Buurman, 2002). Por isso, é importante ressaltar que as classes texturais mais relevantes no estudo são a média arenosa e média argilosa, as quais não oferecem tanta resistência à infiltração, permitindo a menor DD em áreas onde há teor de argila mais elevado (Tabela 2).

O local onde ocorreu a maior DD é o que apresenta os solos com menor teor de argila (Tabela 2). No entanto, os solos arenosos, onde seria esperado um maior potencial de drenagem interna, está em uma posição intermediária das vertentes, suscetível aos processos de erosão superficial (Miller e Schaetzl, 2016).

A erosão promove a retirada do horizonte A do solo e fazendo com que seja um solo raso, provavelmente com contato lítico ou com saprolito em processo de intemperismo, dificultando a drenagem interna e favorecendo a drenagem superficial (Schaetzl e Anderson, 2005; Christofolletti, 1980).

A fim de confirmar a ocorrência de solos rasos nos locais é possível observar os maiores valores de DD nos locais onde há maior gradiente textural (Tabela 2). Tal ocorrência está de acordo com os trabalhos de Demattê e Demétrio (1995, 1998) os quais encontraram

Argissolos e Cambissolos em locais de DD semelhante, ou seja, o horizonte subsuperficial impede a infiltração da pluviosidade até o lençol freático, promovendo a erosão superficial.

Tabela 2: Padrões da rede de drenagem em relação as classes texturais dos horizontes A e B do solo, classes do gradiente textural e a cor do solo.

Classes	Área	Extensão dos canais	DD ¹	Nº Rios	FR ²	Ordem fluvial ³	Sinuosidade ⁴
	km ²	km	km/km ²		rios/km ²		
Camada A							
Muito arenosa	20.2	269	13.3	1750	87	1 - 6	1.65
Arenosa	29.1	457	15.7	2536	87	1 - 6	1.64
Média arenosa	109.1	1187	10.8	7473	69	1 - 7	1.1
Média argilosa	152.3	1297	8.5	7627	50	1 - 7	1.05
Argilosa	162.3	525	3.2	2319	14	1 - 6	1.1
Camada B							
Muito arenosa	0.7	9	12	83	113	1 - 4	1.06
Arenosa	3.4	45	13	345	100	1 - 5	1.23
Média arenosa	42.5	447	10.5	3046	72	1 - 6	1.3
Média argilosa	83.5	927	11	6203	74	1 - 7	2.0
Argilosa	340.7	1637	4.8	10059	29	1 - 7	1.14
Muito argilosa	3.7	18	5	29	27	1 - 5	1.04
Gradiente textural							
0 - 1	3.6	17.5	4.8	135	36	1 - 4	1.05
1 - 1.5	319.1	1655	5.18	10266	32	1 - 7	1.46
1.5 - 1.7	77.9	1124	14	5944	76	1 - 7	1.07
1.7 - 1.8	21.5	626	29	2794	129	1 - 7	1.22
1.8 - 2	25.3	549	21	2815	111	1 - 6	1.13
>2	25.5	361	14	1988	77	1 - 6	1.07
Matiz ⁵							
Vermelho	33.8	119	4	286	8	1 - 6	1.1
Vermelho Amarelo	436.6	2450	5.6	17318	39	1 - 7	1.88
Amarelo	4.7	58	12	399	84	1 - 5	1.18

¹Densidade de drenagem; ²Frequência de rios; ³Ordem fluvial segundo Strahler (1952); ⁴Baseada no comprimento de um dos canais principais ocorridos; ⁵Cor do solo definida por Neto (2017) definindo-a pela interpolação do matiz.

Ao observar o mapa de gradiente textural, é possível perceber a concentração dos valores mais elevados onde há maior desenvolvimento da rede de drenagem (Figura 7 b). Tais áreas também possuem relevo ondulado e irregular, com alto TRI, e consequente baixo TWI (Figura 5 g, h).

Dessa forma, é possível afirmar que o grau de desenvolvimento da rede de drenagem pode auxiliar no delineamento de classes texturais para o mapeamento digital (Tabela 2). Solos com horizonte subsuperficial argiloso, caracterizando um Argissolo (Embrapa, 2013), oferecem resistência a infiltração da água no solo. Consequentemente, a superfície contará com mais canais, decorrentes da erosão pelo escoamento superficial.

Isso explica a ocorrência de rede de drenagem muito desenvolvida em um local com horizonte superficial arenoso (Figura 7 a), o gradiente textural influencia diretamente na quantidade de canais na superfície (Figura 7 b), corroborando com Demattê e Demétrio (1998). A diferença da DD em solos com baixo e elevado gradiente textural é significativa e a frequência de rios (FR) também aumenta na medida em que o gradiente textural é maior (Tabela 2).

A sinuosidade dos canais também implica na capacidade da superfície em drenar ou acumular as águas pluviais (Way, 1973). Sendo assim, as áreas com maior razão textural foram as que apresentaram córregos de maior sinuosidade (Tabela 2).

São vários os fatores que podem ocasionar tal resistência em subsuperfície como horizonte B incipiente (Bi - ocorrência em Cambissolos), horizonte B textural (Bt - ocorrência em Argissolos), horizonte plântico, litoplântico ou concrecionário (ocorrência em Plintossolos), contato lítico (ocorrência em Neossolos Litólicos e Regolíticos) (Embrapa, 2013).

Em locais onde a camada subsuperficial é arenosa, os canais apresentam baixa sinuosidade (Tabela 2). Confirmando a análise sobre a capacidade do solo em favorecer ou impedir a percolação de água. Dessa forma, a rede de drenagem avaliada com os parâmetros DD, FR e sinuosidade pode contribuir na delimitação de solos com horizontes subsuperficiais de textura argilosa ou com contato lítico, deixando os mapas finais mais precisos.

3.4. Compartimentação da paisagem

Para a evolução da análise espacial e posterior correspondência com pedologia, foi realizada uma compartimentação da paisagem através dos parâmetros do estudo. Os parâmetros foram processados como variáveis em uma análise de componentes principais – ACP, a qual possibilitou identificar sua variância e relações (Figura 8 a). No gráfico, os

vetores representam as variáveis e os pontos são todos os pixels de todos os parâmetros. Através da ACP observou-se que as componentes principais 1 (PC1), 2 (PC2), 3 (PC3) e 4 (PC4) foram as mais destacadas na explicação da variabilidade total dos dados (Figura 8c).

O gráfico biplot, abordou a relação entre a PC1 (30 %) e a PC2 (17 %), com um total de 47 % de explicação da variabilidade dos dados. Apesar da explicação do valor não ser tão alto, foi possível estabelecer relações importantes. Alguns parâmetros como captação, aspecto, curvatura tangencial, curvatura longitudinal e o nível de base do canal de drenagem se apresentaram muito próximo à média e não explicaram a grande parte da variabilidade (Figura 8 a).

Os parâmetros MDE, HOFD, OFD, VOFD e VDCN apresentaram um comportamento semelhante na ACP. A intensidade das variáveis, observada através de seus vetores, é similar, indicando associação de tais parâmetros nos padrões da paisagem. Essa tendência foi comprovada através da análise de correlação, a qual apresentou valores positivos entre todos esses parâmetros (Figura 6).

No entanto, é possível observar a pouca quantidade de pixels com forte interação com tais parâmetros, principalmente os que são relacionados a drenagem (Figura 8 a). Isso ocorre, pois, os valores mais expressivos desses parâmetros estão nas posições mais elevadas do relevo, as quais não representam grande parte da área de estudo, aproximadamente 14 % do total.

Outro conjunto de parâmetros destacados pela ACP foram o Slope, TRI e Fator LS com intensidades semelhantes e posição negativa nas PC1 e PC2 (Figura 8 c). Ao observar as direções dos vetores, se comparadas com os apresentados anteriormente, encontra-se uma relação aproximadamente perpendicular (Figura 8 a). Essa análise sobre os vetores é indicativa da relação entre as variáveis, ela indica que não há relação, ou a relação é baixa e negativa entre eles. A análise de correlação reforça essa tendência, uma vez que os resultados foram negativos entre os dois grupos de parâmetros (Figura 8 c).

Figura 8: Análise estatística complementar a construção cluster para compartimentação da paisagem. a. análise de Componentes Principais com todos os parâmetros; b. número ideal de classes para o cluster; c. variabilidade dos dados para cada parâmetro nas quatro componentes principais. ASP = Aspecto; CL = Curvatura longitudinal; CNBL = Nível de Base do Canal de Drenagem; CP = Curvatura de Perfil; DD = Densidade de drenagem; HOFD = Distância Horizontal ao Canal de Drenagem; LS = Fator LS; MDE = Modelo Digital de Elevação; OFD - Fluxo Superficial ao Canal de Drenagem; SLOPE = Declividade; TRI = Índice de Rugosidade do Terreno; TWI = Índice de Umidade do Terreno; VDCN = Altitude Acima do Canal de Drenagem; VOFD = Distância Vertical ao Canal de Drenagem.

A intensidade dos vetores também foi acompanhada de uma quantidade significativamente maior de pixels. Essa tendência é maior do que para os demais vetores no gráfico, definindo tais parâmetros como responsáveis por explicar a maior parte da variabilidade dos dados (Figura 8 a). Isso ocorre devido a maior parte da área possuir os valores mais expressivos de Slope = 11° e Fator LS = 16, ou seja, nas posições mais baixas do relevo onde a rede de drenagem é mais desenvolvida e o relevo mais irregular.

O TWI também se comportou de maneira divergente aos demais parâmetros, apresenta uma relação negativa com o Slope, LS, TRI e GD o que também foi confirmado na análise de correlação (Figura 8 a).

Após a análise do comportamento dos parâmetros na ACP, foi realizada uma análise para obtenção do número ideal de classes a ser aplicado na ferramenta de agrupamento fuzzy k-médias, com base em Venables e Ripley (2002) e Hengl (2009). Após o processamento das

imagens foi obtido um número ideal de 11 classes (Figura 8 b). No entanto, no processamento de filtragem o cluster 6 foi suprimido devido seu menor tamanho em área (0,3 km²).

A tentativa de compartimentar a paisagem automaticamente é sempre desafiadora, pois, com muitas metodologias, escolher o melhor caminho deve ser algo cuidadoso. No entanto, foram observados resultados satisfatórios não apenas na perspectiva do relevo, mas também da rede de drenagem (Figura 9).

Figura 9: Mapa de compartimentos da paisagem por agrupamentos (cluster).

Ao utilizar o mapa de cluster na avaliação da variabilidade dos atributos do solo, foi percebida a baixa representatividade de alguns compartimentos. Como a rede de drenagem foi muito detalhada, alguns compartimentos acabaram sendo um contorno das feições dos canais.

Dessa forma, os compartimentos da paisagem mais representativos foram os utilizados para as análises de correlação com os atributos do solo. Os clusters analisados foram o 1, 3, 4, 8, 10 e 11 (Figura 9).

O cluster 1 está relacionado a locais de baixa DD, com poucos canais de primeira ordem e com canais principais longos (± 5 km). A declividade é baixa ($0 - 5^\circ$) com relevo plano e suave ondulado (Embrapa, 2004).

Dessa forma, o cluster 1 não possui relevo dissecado por rede de drenagem, havendo uma variação pequena na declividade entre topo e sopé da encosta e relevo suave ondulado, com pouca correlação entre a elevação e os atributos do solo (Figura 10 a). Nesses locais predominam os solos de textura arenosa com gradiente textural elevado, aumentando a rede de drenagem no local (Figura 7).

O cluster 3 está localizado entre a encosta superior e o sopé da encosta (Miller e Shaetzl, 2015) (Figura 10). Sua declividade é mais acentuada ($8 - 11^\circ$) e sua rede de drenagem é muito desenvolvida, chegando a 14 km/km^2 . A DD elevada indica um predomínio do escoamento superficial sobre a infiltração influenciado pela concavidade da superfície e solos pouco profundos.

Há uma diferença marcante entre os clusters 3 e 1, a dissecação do relevo pela rede de drenagem. Dessa forma, os mapas de atributos indicam uma variação maior nessas áreas (Figura 7). O gradiente textural também é mais expressivo no cluster 3 com valores entre 1,5 – 2,0 nas áreas mais irregulares.

Solos arenosos deveriam apresentar menor desenvolvimento da rede de drenagem, no entanto, os valores do gradiente textural acentuados indicam que uma camada argilosa em subsuperfície favorece o escoamento superficial (Miller e Schaetzl, 2016). Em áreas com relevo irregular a interpretação dos processos pedológicos é mais complexa do que em superfícies bem estruturadas (Zinck, 2016), a translocação lateral e a erosão superficial, regulados pela topografia e drenagem, são agentes importantes na formação do solo dessas áreas.

Para os estudos de geopedologia (Zinck, 2016), existe o cuidado de se avaliar a particularidade de cada vertente, não adotando os processos simples de evolução da paisagem para classificar as áreas. No entanto, há tendência em encontrar maior variação de solos em superfícies instáveis como a do cluster 3 (Figura 10 b). Isso é devido aos processos erosionais, déficit na infiltração e deposição não uniforme dos sedimentos (Hall, 1983).

Em relevo ondulado e forte ondulado sobressaem-se solos com baixo potencial de infiltração (Lacerda et al., 2008) como foi observado nas superfícies do compartimento 3, as quais apresentaram solos com elevado gradiente textural (Figura 7 b).

Figura 10: Elevação do terreno (MDE) e rede de drenagem em recorte para cada compartimento da paisagem. a. cluster 1; b. cluster 3; c. cluster 4; d. cluster 8; e. cluster 10; f. cluster 11.

O cluster 4 se localiza em áreas onde há um canal principal, ou seja, em áreas predominantemente planas, com baixa declividade (Figura 10 c). Pode se afirmar que esse compartimento identificou as posições mais inferiores da paisagem, próximas aos talwegues.

Os talvegues são as posições mais inferiores da vertente, onde está o canal de drenagem, com superfície levemente côncava e com possíveis planícies de inundação (Huggett, 2007).

Estudos em planícies de inundação são amplamente desenvolvidos tanto pela importância do ecossistema quanto para a agricultura e segurança contra inundações de áreas urbanas (Miller et al., 2012; Brown e Norris, 2018; Cao et al., 2018; Ling et al., 2018). No contexto da pedologia são áreas com lençol freático próximo a superfície, deixando o solo passível a saturação sazonal e consequente processos redutores (Kämpf e Curi, 2015).

As áreas pouco declivosas do cluster 4 representam um potencial para ocorrer solos rasos e hidromórficos, como Gleissolos (Figura 15). Solos mal drenados possuem o lençol freático próximo à superfície em grande parte do tempo, indicando a condição de umidade do compartimento (Bouma, 1983) também reforçada pelos valores baixos de VDCN (0 – 46 m) (Figura 5 n).

O cluster 8 se distingue dos demais pois possui a menor densidade de drenagem entre todos os compartimentos (Figura 10 d). A metodologia utilizada foi capaz de mapear os topos do relevo, as posições mais elevadas em toda área de estudo (600 – 700 m). Tais áreas são predominantemente convexas e possuem também os maiores valores de VDCN (Figura 5 n), indicando prováveis solos profundos e bem drenados. Tais superfícies são estáveis, propiciam um ambiente de drenagem interna e intemperismo intenso, concordando com os padrões estabelecidos pela geo pedologia (Shaetzel e Anderson, 2005; Lacerda et al., 2008; Shaetzel e Miller, 2016).

Superfícies estáveis, como os topos da paisagem, apresentam baixa DD (Vasques et al., 2015), tornando o cluster 8 um ambiente comum para identificar solos mais desenvolvidos em uma região. De acordo com Hall (1983) o topo da vertente, ou interflúvio, quando tem mais de 30 m de largura, é um dos compartimentos mais estáveis da paisagem. De acordo com Shaetzel e Anderson (2005) essa posição da paisagem sofre processos erosionais, no entanto é possível afirmar que as superfícies são estáveis, como abordou Kämpf e Curi (2015) predominando um ambiente de intensa intemperização química expressando os Latossolos.

O cluster 10 também está localizado em posições superiores do relevo, mais precisamente entre o ombro e a encosta superior da vertente (Figura 10 e). A sua superfície é em maioria convexa, com declividade média de 8 ° e a densidade de drenagem é baixa com média igual a três.

O cluster 11 se localiza entre a encosta inferior e o sopé da encosta, é uma posição com alta DD e declividade acentuada (11 °). O compartimento representa as áreas em que os solos são mal drenados, havendo preferência pelo escoamento superficial. A rede de

drenagem se desenvolve pelo compartimento atingindo em grande parte a ordem fluvial 3 (Strahler, 1952), o que indica um desenvolvimento elevado para uma área relativamente pequena.

Como salientou Casseti (1983) essas posições do relevo com declividade mais acentuada predominam os processos erosivos pelo escoamento superficial. Consequentemente os solos dessas posições podem ser mais rasos, similar ao encontrado por Marques et al. (2018) em uma área próxima, os solos são arenosos nessas posições, com menores teores de argila do que em posições superiores do relevo.

3.5. Análise estatística: os atributos do solo nos compartimentos da paisagem

A partir do mapa de compartimentos da paisagem e do nível de caracterização alcançado é possível afirmar que a técnica Fuzzy k-médias foi apropriada. A princípio pelas características do relevo e da rede de drenagem e posteriormente pela sua correlação e diferenciação dos atributos do solo.

As correlações entre os parâmetros da paisagem e drenagem com os atributos do solo mostrou melhor resultado para DD, sendo negativa com os teores de argila no horizonte A e B e positiva com o gradiente textural e o matiz (Figura 11). De acordo com Demattê et al., 2011, áreas com DD baixa apresentam solos com teor de argila maior, estando de acordo com os solos encontrados na área (Figura 7 a, c).

Nas vertentes mais dissecadas pela rede de drenagem pode se intensificar o processo de eluviação, espessando o horizonte E e formando Argissolos (Ker et al., 2015). Os resultados confirmaram essa relação ao apresentar correlação positiva ($r = 0.42$) entre a DD e o gradiente textural, sabendo que as áreas com canais de drenagem apresentaram maior declividade e concavidade (Figura 5 c).

Outro atributo do solo bem correlacionado com a paisagem é o matiz, indicando a cor do solo, altamente dependente das suas condições de umidade (Hall, 1983). Sabendo que a rede de drenagem não é tão desenvolvida no cluster 1 (Figura 10 a), pode-se afirmar que os solos tendem a ser bem drenados, intensificando os processos de eluviação e intemperismo dos minerais (Buol et al., 2011). A partir dos estudos de (Neto, 2017) sobre a cor dos solos na área de estudo, foi observada a predominância da cor vermelho amarelo no cluster 1 (Figura 7 d).

A correlação não foi suficiente para identificar relações entre a paisagem e os atributos do solo, com os melhores resultados variando entre -0.2 e 0.26. No entanto, os solos

do cluster 3 são mais arenosos havendo uma correlação negativa entre o teor de argila e a DD como observado no cluster 1 (Figura 11).

Figura 11: Análise de correlação entre os parâmetros do relevo e rede de drenagem com cinco atributos do solo. A figura representa as correlações mais significativas. CNBL = Nível de Base do Canal de Drenagem; CP = Curvatura de Perfil; DD = Densidade de drenagem; MDE = Modelo Digital de Elevação; OFD - Fluxo Superficial ao Canal de Drenagem; TRI = Índice de Rugosidade do Terreno; TWI = Índice de Umidade do Terreno.

A análise de correlação do CNBL e MDE também indicou a elevação como um fator determinante na diferenciação do cluster 4 em relação aos demais, com pouca variação ao redor dos canais principais (Figura 6). Tal análise está de acordo com Van Breemen e Buurman (2002) que indicam os processos hidromórficos em superfícies planas de solos mal drenados.

A DD apresentou correlação negativa com os teores de argila nas camadas A e B e positiva com o matiz, indicando a tendência da região em associar a rede de drenagem com solos arenosos de cor amarela. No entanto, o parâmetro TWI, indicativo de umidade no solo, apresentou correlação positiva com os teores de argila (Figura 11). Essas inferências estão de acordo com os estudos de Kidd et al. (2014) e Malone et al. (2018) que estudaram as relações físicas entre a drenagem do solo e seus atributos como cor, textura, entre outros.

O TWI se apresenta como parâmetro significativo para o mapeamento de áreas argilosas na paisagem, considerando as posições do relevo. Zeraatpisheh et al. (2018) também apresentou correlações significativas entre o teor de argila e parâmetros da paisagem, como o TWI, indicando a forte relação da paisagem com a variabilidade dos atributos do solo.

Ao analisar a AFD foi confirmada a mudança nas características do solo, como fora explicado através das análises de correlação. Foram utilizadas 145 amostras aleatórias, extraídas dos mapas de atributos do solo, produtos de processamento digital. O resultado apontou que a semelhança entre os solos dos compartimentos diminui, na medida em que as posições da paisagem mudam (Figura 12).

Figura 12: Análise da função discriminante. Funções de classificação dos atributos do solo por compartimentos da paisagem.

Foram geradas três informações para o entendimento da diferença entre os compartimentos realizados, sendo elas a função de classificação (Figura 12), o gráfico de distância de Mahalanobis (Figura 13) e a matriz de confusão (Tabela 3). Os atributos mais significativos na diferenciação das áreas foram o teor de argila nos horizontes A e B e o matiz. Enquanto o teor de ferro (Fe_2O_3) e o gradiente textural foram apresentaram menor variabilidade entre os compartimentos.

Era esperado que o teor de argila fosse determinante nessa diferenciação, decorrente dos processos da evolução da vertente já trabalhado e explicado por outros estudos (Obi Redy et al., 2004; Pissarra et al., 2004; Demattê et al., 2011). Da mesma maneira a cor também era esperada ter uma relação com os compartimentos, sendo totalmente influenciada pela drenagem dos solos que é diferente em cada compartimento (Campos e Demattê, 2004).

Sendo assim, o cluster 8 foi o mais destacado entre as áreas, levando em consideração a argila como o principal diferenciador, o seu alto teor no horizonte A e B foi determinante. Percebe-se o afastamento do centroide do cluster 8 em relação aos demais, afastamento também representado pela matriz de confusão, a qual indica 80.7 % de acerto nas amostras da área, identificando a singularidade da área (Figura 13).

A posição de topo do cluster 8 também é a mais isolada na paisagem, pois está nas posições mais altas (Figura 10 d). Além disso, os atributos de solos analisados também apresentaram diferença dos demais clusters, validando o compartimento como uma unidade de mapeamento de solo.

Figura 13: Centroides das observações amostrais dos compartimentos da paisagem.

O cluster 3, identificado como o de maior declividade e com maior irregularidade do relevo, decorrente da elevada densidade de drenagem também foi destacado pela análise estatística. O compartimento possui uma relação negativa com os teores de argila, pois os solos nessas posições são mais arenosos (Figura 11). Sua distância central em relação aos demais foi a segunda maior do estudo (Figura 13).

Ao observar o cluster 3 foi possível perceber que 55.1 % das amostras retiradas da imagem foram representativas para representar os solos da área. As demais foram confundidas com outros compartimentos em outras posições do relevo. O cluster que mais se confundiu com o compartimento em questão foi o cluster 4, justamente o que apresenta também uma elevada DD e está em uma posição similar ao do cluster 3 (Tabela 3).

Os clusters 1, 4, 10 e 11 apresentaram uma assertividade de menos da metade das observações (Tabela 3). Não houve diferença significativa em relação aos outros compartimentos, ou seja, os atributos do solo utilizados para identificar as variações não

foram suficientes para explicar a compartimentação da paisagem pelas suas características pedológicas. No entanto, foram encontradas várias evidências de que as áreas separadas pelos parâmetros do relevo e da rede de drenagem poderiam apresentar relações com a pedologia (Figura 7, 11). Outros atributos do solo podem auxiliar a interpretar a compartimentação e aprimorar o mapeamento digital de solos.

Tabela 3: Matriz de confusão com porcentagem de acerto das amostras para os compartimentos da paisagem.

de\para	Cluster 1	Cluster 10	Cluster 11	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 8	Total	% correto
Cluster 1	34	49	34	5	9	14	145	23,45%
Cluster 10	26	55	17	4	6	37	145	37,93%
Cluster 11	26	22	41	24	27	5	145	28,28%
Cluster 3	9	1	17	80	37	1	145	55,17%
Cluster 4	13	3	33	56	39	1	145	26,90%
Cluster 8	1	25	2	0	0	117	145	80,69%
Total	109	155	144	169	118	175	870	42,07%

Com os resultados da AFD foi possível identificar que os teores de argila, o gradiente textural e a cor do solo são diferentes entre os clusters (Figura 12). Portanto a compartimentação da paisagem, apesar de ser não supervisionada, pode auxiliar nas práticas de mapeamento de solos.

Afim de continuar a verificação do comportamento dos atributos do solo dentre os compartimentos da paisagem, foi realizado um teste de médias.

O teste de Tukey mostrou que os dados de Argila no horizonte A e o matiz possuem normalidade a nível de 5 % de significância (Tabela 4). O teor de argila no horizonte B, o teor de fe (Fe_2O_3) e o gradiente textural não apresentaram normalidade a nível de 5 %, dessa forma foi realizado o teste de Bonferroni afim de entender o comportamento desses atributos em cada compartimento da paisagem (Tabela 5).

O teste de Tukey apresentou a argila no horizonte A como um fator determinante na diferenciação dos clusters (Tabela 4). Segundo a análise, o compartimento 11 apresentou pequena diferença dos demais, corroborando com a AFD (Tabela 3). Houve semelhança entre os clusters 10-1 e 4-3, ou seja, o atributo em questão não foi determinante para diferenciá-los.

Os demais compartimentos se mostraram bem diferentes em relação ao teor de argila no horizonte A, concordando com a discussão realizada a partir da AFD e das diferentes posições do relevo que ocupam (Tabela 3).

Assim como em outros estudos, a argila nos horizontes superficiais tem sido utilizada para o mapeamento digital de solos, tendo em vista sua alta correlação com os parâmetros do relevo (Fongaro et al., 2018; Poppiel et al., 2018). Assim, com a identificação da variação do

teor de argila entre os clusters, é possível afirmar que a compartimentação foi satisfatória no sentido de separar áreas com classes texturais diferentes.

O matiz foi importante na diferenciação dos compartimentos da paisagem. Apesar da maior parte da área de estudo estar mapeada com solos vermelho amarelos, houve diferenciação significativa pelo valor do matiz.

Em comparação com a argila no horizonte A, o matiz foi mais expressivo em diferenciar o cluster 11 (Tabela 4). No entanto, o cluster apresenta cor semelhante com os compartimentos 1 e 4.

Tabela 4: Teste Tukey para avaliação da semelhança entre os compartimentos da paisagem em relação a variabilidade dos atributos do solo. Os atributos dos solos utilizados possuem normalidade, $p > 0.05$.

Clusters	Argila A				Matiz			
	Estimate	Std. Error	Pr(> t)		Estimate	Std. Error	Pr(> t)	
3 - 1 == 0	-142.53	22.82	< 0.001	***	10.703	1.168	< 0.001	***
4 - 1 == 0	-160.92	22.82	< 0.001	***	6.448	1.168	< 0.001	***
8 - 1 == 0	142.89	22.82	< 0.001	***	-7.041	1.168	< 0.001	***
10 - 1 == 0	11.9	22.82	0.9953		-2.083	1.168	0.4773	
11 - 1 == 0	-72.81	22.82	0.0183	*	3.786	1.168	0.0155	*
4 - 3 == 0	-18.39	22.82	0.9665		-4.255	1.168	0.0039	**
8 - 3 == 0	285.42	22.82	< 0.001	***	-17.745	1.168	< 0.001	***
10 - 3 == 0	154.43	22.82	< 0.001	***	-12.786	1.168	< 0.001	***
11 - 3 == 0	69.72	22.82	0.0282	*	-6.917	1.168	< 0.001	***
8 - 4 == 0	303.81	22.82	< 0.001	***	-13.49	1.168	< 0.001	***
10 - 4 == 0	172.82	22.82	< 0.001	***	-8.531	1.168	< 0.001	***
11 - 4 == 0	88.11	22.82	0.0017	**	-2.662	1.168	0.204	
10 - 8 == 0	-130.99	22.82	< 0.001	***	4.959	1.168	< 0.001	***
11 - 8 == 0	-215.7	22.82	< 0.001	***	10.828	1.168	< 0.001	***
11 - 10 == 0	-84.71	22.82	0.003	**	5.869	1.168	< 0.001	***

A forma como o matiz foi diferente entre os compartimentos intensifica a discussão sobre a importância da geopedologia, em que há necessidade do conhecimento dos processos das vertentes como fator decisivo na gênese de um solo (Zinck, 2016). O regime hídrico de uma região, bem como o potencial de infiltração, retenção e escoamento superficial da pluviosidade são fatores importantes no processo de formação dos solos, tornando-se fundamental entendê-los para compreender o processo de formação da cor como atributo característico do solo (Buol et al., 2011).

O teste de Bonferroni aplicado ao teor de argila no horizonte B encontrou quatro grupos diferentes, demonstrando a variação na área. A semelhança entre o cluster 1 com o 10

e 11 continuou representada pelo atributo em questão, apresentando baixa variação de solos nas áreas (Tabela 5).

Os clusters 3 e 4 também foram caracterizados como semelhantes, havendo baixa variação do atributo em suas áreas (Tabela 5). As áreas são locais de deposição de sedimentos erodidos de partes mais altas do relevo e de sedimentos aluviais pelo transporte e cheia dos rios (Miller e Schaetzl, 2016). Os processos anteriormente descritos e já estudados por outros pesquisadores explicam como tais áreas possuem a tendência aos solos arenosos (Marques et al., 2018).

Novamente o cluster 8 foi diferente dos demais, sua peculiaridade foi reconhecida por praticamente todos os testes e análises realizadas.

O teor de Fe do solo não foi um atributo capaz de diferenciar os clusters de maneira significativa (Tabela 5). O cluster 1 e 4 foram os mais diferentes, enquanto os demais apresentaram semelhança para o atributo. O compartimento 10 foi o que mais apresentou semelhança com os demais.

Tabela 5: Teste de Bonferroni realizado para atributos do solo que não apresentaram normalidade em seus dados. Teste realizado para avaliação da semelhança entre os compartimentos da paisagem em relação a variabilidade dos atributos do solo.

Clusters	Argila B	Fe ₂ O ₃	Gradiente Textural
1	ab	"a"	"a"
3	"c"	"bc"	"b"
4	"c"	"b"	"b"
8	"d"	"ac"	"c"
10	"a"	"abc"	"d"
11	"b"	"bc"	"ad"

O gradiente textural foi um atributo satisfatório para confirmar as diferenças entre os compartimentos realizados. Foram encontrados quatro grupos principais, apenas o cluster 11 apresentou semelhança com os compartimentos 1 e 10, como já identificado em outras análises (Tabela 5).

Portanto, os clusters extraídos de forma automática representam variações de atributos do solo ao longo da paisagem. Isso é garantido pelo percentual de classes texturais em cada um dos compartimentos (Figura 14).

Ao observar as classes textuais na camada B, pode-se afirmar que não houve diferença significativa, sendo a maior parte argilosa (Figura 14b). Os clusters 3 e 4 apresentaram variações maiores com solos médio arenosos e médio argilosos. Suas posições

no relevo, encosta superior e inferior, são suscetíveis a essas classes texturais, tendo em vista a dificuldade de desenvolvimento do solo em decorrência da erosão superficial (Schaetzl e Anderson, 2005).

O cluster 8, identificado como parte superior do relevo (Figura 10 d), possui classes muito argilosas em 5 % de sua área. Apesar de pouco, ressalta o padrão das posições superiores encontradas na região da área de estudo (Figura 15).

Por outro lado, a compartimentação da paisagem identificou mais variações texturais na camada A (Figura 14a). O mapa identificou áreas de textura predominantemente média, cluster 3 e 4.

Como também as áreas de textura argilosa, como o cluster 8. Ao comparar a variação textural com a posição do compartimento na paisagem. Por exemplo, em uma topossequência estaria o cluster 8 no topo, o cluster 10 na transição entre o topo e encosta e o cluster 11 na encosta (Figura 10). Ao comparar essa sequência com a Figura 14 é possível perceber que a textura argilosa diminui do topo em direção as partes mais baixas e irregulares da paisagem (Figura 14a).

Da mesma forma pela qual as classes texturais variam ao longo dos clusters, o gradiente textural também foi diferente. Contudo, é perceptível um equilíbrio entre tal atributo ao longo dos clusters. Mais uma vez o gradiente textural se apresenta mais intenso nas posições mais inferiores e mais onduladas do relevo.

Os clusters 3 e 4 são os que apresentam maior gradiente textural no estudo, como abordado anteriormente, estão em um relevo ondulado, com rede de drenagem muito desenvolvida (Figura 10). No entanto, o cluster 8 apresenta um gradiente textural baixo, tendo em vista a sua posição estável na paisagem.

Finalmente, os clusters apresentaram variações significativas nas classes texturais. Para mapear a textura do solo na profundidade 0-20 cm a compartimentação da paisagem pode oferecer um auxílio, aprimorando o detalhamento dos limites em um mapa digital de solos.

Os atributos mais relacionados com a compartimentação foram os teores de argila, gradiente textural e a cor. A cor do solo pode também ser um fator a ser identificado com base na análise da rede de drenagem. Com o mapeamento de uma área pelo seu alto desenvolvimento da rede de drenagem, houve maior correlação com a cor amarela, tornando a metodologia aplicável a correlações com o mapeamento da cor do solo.

Figura 14: Percentual de classes texturais e gradiente textural para cada cluster. a. camada A (0-20 cm); b. camada B (80-100 cm); c. razão textural (teor de argila B/teor de argila A).

3.6. Compartimentação da paisagem e classes pedológicas

Após a identificação dos atributos que mais se destacam em cada cluster foi certificado que a extração de compartimentos de forma automática e não supervisionada é capaz de mapear as diferenças nos atributos do solo.

Após as correlações e análises dos atributos do solo com os parâmetros do relevo e rede de drenagem, tornou-se necessária uma avaliação dos compartimentos a partir das classes pedológicas presentes (Figura 15).

Figura 15: Percentual de classes pedológicas em cada compartimento da paisagem. LE = Latossolo Escuro; LV = Latossolo Vermelho; TE = Terra Escura; PE = Argissolo Escuro; PL = Argissolo Latossólico; PV = Argissolo Vermelho; LR = Neossolo Regolítico; Li = Neossolo Litólico; G = Gleissolo; CB = Cambissolo.

Apesar do desafio em construir um mapa de compartimentação automática da paisagem, com as análises realizadas pode-se dizer que a metodologia foi satisfatória. Uma vez que, analisando os clusters através da rede de drenagem e do relevo foi possível encontrar relações com atributos e classes de solo. Relações as quais foram comprovadas pelas análises estatísticas.

No cluster 1 predominam os Latossolos e Argissolos (Figura 15). A rede de drenagem é relativamente bem desenvolvida (Figura 10a). Seu relevo é composto por rampas longas de ondulação suave, comum aos solos presentes.

O cluster 3 identificou algumas das relações mais interessantes com a pedologia. O seu relevo é peculiar dentro da área de estudo, com superfície ondulada e muito dissecada pela rede de drenagem (Figura 10b). Os solos possuem horizonte superficial arenoso, mas com gradiente textural, comprovado pela ocorrência de classes pedológicas (Figura 15). O

Argissolo Vermelho e o Neossolo Litólico representam locais desse tipo, com rede de drenagem muito desenvolvida.

O cluster 4 está nas posições mais inferiores da vertente (Figura 10c). Esse compartimento delineou os canais de drenagem mais profundos nos vales, se aproximando do talvegue e em alguns locais planície de inundação. Pelo relevo irregular e alta DD era esperado encontrar solos rasos com baixo potencial de infiltração. Isso foi provado tanto nas análises estatísticas, quanto na avaliação das classes pedológicas (Figura 15). No compartimento ainda ocorrem 10 % de Gleissolos, comum nas planícies inferiores na paisagem, em locais mal drenados.

O cluster 8 é o que mais se distancia dos demais em relação a suas características pedológicas (Figura 13). O compartimento está no topo da paisagem, em superfícies consideradas estáveis, com solos profundos e bem drenados. A posição do cluster na paisagem já se apresentou como uma unidade de mapeamento, o que foi comprovado pelos solos argilosos (Figura 14) e pelas classes pedológicas (Figura 15), sendo o cluster com maior percentual de Latossolos e com a menor densidade de drenagem.

O cluster 10 está em uma posição intermediária da vertente, na transição entre o topo e o começo da encosta. Suas características são similares ao cluster 11, porém nele ainda predominam os solos mais desenvolvidos (Figura 15).

Já no cluster 11 os Neossolos litólicos estão mais presentes juntamente com os Argissolos. O compartimento está em uma posição média da vertente e possui rede de drenagem mais desenvolvida. Como sua superfície é mais ondulada, favorecem os processos de erosão superficial, não havendo o desenvolvimento horizontal dos solos.

4. CONCLUSÃO

1. A rede de drenagem é um importante parâmetro a ser inserido no mapeamento digital de atributos do solo, tendo em vista que a sua densidade foi correlacionada a textura e gradiente textural.

2. A compartimentação automática através de parâmetros do relevo e rede de drenagem apresentou importantes relações com atributos de solo como a textura, gradiente textural e cor.

3. A utilização de parâmetros do relevo e rede de drenagem permite identificar mais variações na paisagem, possibilitando aprimorar a identificação de classes pedológicas.

4. Sugere-se continuar estudos de modelagem entre os padrões do relevo e rede de drenagem na extração de informações de atributos do solo e classes pedológicas.

REFERÊNCIAS

- An Y, Yang L, Zhu AX, Qin C, Shi JJ. Identification of representative samples from existing samples for digital soil mapping. *Geoderma*. Elsevier B.V.; 2018;311:109–119.
- Birkeland PW. *Soils and geomorphology*. New York: Oxford University Press; 1999.
- Bouma J. Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. In: Wilding LP, Smeck NE, Hall GF. *Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions*. Elsevier, New York. 1983.
- Brasil. Projeções do agronegócio – Brasil 2016/17 a 2026/27 – projeções de longo prazo. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2017; 125
- Brown J, Norris MD. Detecting soil and plant community changes in restored wetlands using a chronosequence approach. *Wetl Ecol Manag*. Springer Netherlands; 2018;26:299–314.
- Buol SW, Southard RJ, Graham RC, McDaniel PA. *Soil genesis and classification*. John Wiley & Sons. Sixt edition. 2011.
- Buringh P. The analysis and interpretation of aerial photographs in soil survey and land classification. Lecturer in soil science and pedological interpretation of aerial photographs, International Training Centre for Aerial Survey, Delft, The Netherlands. 1954.
- Buringh P. The applications of aerial photographs in soil surveys. In: *Manual of photographic interpretation*. Washington: American Society Photogrammetry. 1960;633-666.
- Campos RC, Demattê JAM. Cor do solo: UMA abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do Método para fins de classificação de solos. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2004;28:853–863.
- Cao L, Wang X, Fox AD. Letter to the editor regarding: Sponge Wetlands: restoring functional flood relief to China's great rivers. *Wetl Ecol Manag*. Springer Netherlands; 2018;26:729–731.
- Carvalho WA, França GV, Curi PR. Aplicação de análise multivariada na discriminação de unidades de solo, mediante parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas, em Botucatu, SP. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*; 1990;14:195-203.
- Cassetti, V. *Geomorfologia*. 1983.
- Christofolletti A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 2ª ed. 1980.
- Cobb WB. Possibilities of the airplane in soil survey work. In: *Amer. Assoc. Soil Survey Workers. Bull. IV, vol. 1*, 1923.

- Demattê JAM. Utilização de parâmetros de drenagem com o auxílio de fotografias aéreas, na caracterização de solos desenvolvidos de rochas eruptivas no estado do Paraná. [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1992.
- Demattê JAM, Demétrio VA. Fotointerpretação de padrões de drenagem de bacias hidrográficas na caracterização de solos desenvolvidos de rochas eruptivas básicas no estado do Paraná. *Sci Agric*. 1995;52:569–577.
- Demattê JAM, Demétrio VA. Caracterização de solos por padrões de drenagem e sua relação com índices de intemperismo. *Pesqui Agropecu Bras*. 1998;33:87–95.
- Demattê JAM, Ferreira FP, Alves MR, Campos RC. Fotopedologia E Pedologia Espectral Orbital Associadas No Estudo De Solos Desenvolvidos De Basalto. *Bragantia*. 2011;70:122–131.
- Demattê JAM, Fongaro CT, Rizzo R, Safanelli JL. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote Sens Environ*. Elsevier; 2018;212:161–175.
- Demattê JAM, Morgan CSL, Chabrilat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra FS, Vasques GM Wetterlind. Spectral Sensing from Ground to Space in Soil Science: State of the Art, Applications, Potential, and Perspectives. In: *Land resources monitoring, modeling, and mapping with remote sensing*. Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton. 2016.661-732.
- Demattê JAM, Sayão VM, Rizzo R, Fongaro CT. Soil class and attribute dynamics and their relationship with natural vegetation based on satellite remote sensing. *Geoderma*. Elsevier; 2017;302:39–51.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Mapa de Solos do Brasil (1:5,000,000). Rio de Janeiro, 1 map. 2001.
- Embrapa. Avaliação da Aptidão Agrícola das terras: proposta metodológica. 2004.
- EMBRAPA. Mapeamento de solos do tradicional ao digital. Doc 316. 2013;316:52.
- Embrapa. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. Embrapa. 2018;212.
- Ferreira V, Panagopoulos T. Seasonality of soil erosion under Mediterranean conditions at the Alqueva dam watershed. *Environ Manage*. 2014;54:67–83.
- Graham R, Roger ER. Manual of aerial photography. Londres: Focal Press. 1986; 346.
- Fischer WA. Photogeologic studies of Artic Alaska and other areas, in *Selected papers in on photogeology and photo interpretation: U.S. Research and Development. Board*, Washington, D.C. 1953;207-214.
- Fischer WA. Photogeologic instruments used by the U.S. Geological Survey. *Photogrammetric Engineering*. 1955;21:32-39.

- Fischer WA. Color aerial photography in photogeologic interpretation: Photogrammetric Engineering. 1958;24:545-549.
- Fischer WA. Spectral reflectance measurements as a basis for film-filter selection for photographic differentiation of rock units, Geological Survey Research, Short papers in the geological science. 1960;136.
- Fischer WA. Color aerial photography in geologic investigations, Photogrammetric Eng. 1962;28:133-139.
- Florinsky IV. Digital terrain analysis in soil science and geology. Elsevier Academic Press, Amsterdam. 2011;379.
- Fongaro C, Demattê JAM, Rizzo R, Safanelli JL, Mendes WS, Dotto AC, Vicente L, Franceschini, MHD, Ustin, S. Improvement of Clay and Sand Quantification Based on a Novel Approach with a Focus on Multispectral Satellite Images. Remote Sensing. 2018. V.10.
- França GV. Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicadas a solos da região de Piracicaba. [Tese] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1968.
- França G, Demattê J. Parâmetros da rede de drenagem de solos da região de Iracemápolis (SP). An da Esc Super Agric. 1990.
- Gevaerd I. Parâmetros fotoanalíticos de três unidades de solos da região nordeste Paranaense. [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1974.
- Hall GF. Pedology and geomorphology. In: Wilding LP, Smeck NE, Hall GF (eds) Pedogenesis and soil taxonomy. I concepts and interactions. Elsevier, Amsterdam. 1983; 117–140.
- Hartemink AE, McBratney AB, Mendonça-Santos ML, editors. Digital soil mapping with limited data. New York: Springer; 2008; 69-80.
- Heil J, Häring V, Marschner B, Stumpe B. Advantages of fuzzy k-means over k-means clustering in the classification of diffuse reflectance soil spectra: A case study with West African soils. Geoderma. Elsevier; 2019;337:11–21.
- Hengl T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping, 2nd Edition. 2009.
- Huggett RJ. Fundamentals of geomorphology. Routledge, New York. 2007.
- Hogg OT, Huvenne VAI, Griffiths HJ, and Linse K. On the ecological relevance of landscape mapping and its application in the spatial planning of very large marine protected areas. *Sci. Total Environ.* 2018. 626, 384–398
- Jahn A. Balance de denudation du versant, czasopismo Geograficzne. 1954;38-64.

- Kämpf N, Curi N. Conceito de solo e sua evolução. In: Ker JC, Curi N, Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P. *Pedologia fundamentos*. SBCS: Viçosa, MG. 2012; 343.
- Karimi A, Esfandiarpour BI, Ghasemzadeh GM. Description of Soil Evolution in Southern Mashhad City Using Jenny's and Johnson and Watson-Stegner's Conceptual Models. *Pedosphere*. 2018;28:656–665.
- Ker JC, Curi N, Schaefer CEGR, Vidal-Torrado P. *Pedologia fundamentos*. SBCS: Viçosa, MG. 2015; 343.
- Kidd DB, Malone BP, McBratney AB, Minasny B, Webb MA. Digital mapping of a soil drainage index for irrigated enterprise suitability in Tasmania, Australia. *Soil Res*. 2014;52:107–119.
- Lacerda MPC, Queménéur JJG, Andrade H, Alves HMR, Vieira TGC. Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes B textural e B nítico na paisagem de Lavras (MG). *Rev Bras Cienc do Solo*. 2008;32:271–284.
- Lagacherie P. Digital soil mapping: a state of the art. In: Hartemink AE, McBratney AB, Mendonça-Santos ML, editors. *Digital soil mapping with limited data*. New York: Springer; 2008; 69-80.
- Lagacherie P, McBratney AB. Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. In: Lagacherie P, McBratney AB, Voltz M. *Digital soil mapping an introductory perspective*. Amsterdam: Elsevier; 2007; 3-24.
- Leão SRF. Interpretação fotográfica de características do relevo e da rede de drenagem em dois solos do Distrito Federal. [Tese] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1983.
- Lepsch IF. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de textos. 2007.
- Lueder DR. *Aerial photographic interpretation: principles and applications*. New York: McGraw-Hill. 1959;462.
- Ling JE, Hughes MG, Powell M, Cowood AL. Building a national wetland inventory: a review and roadmap to move forward. *Wetl Ecol Manag*. Springer Netherlands; 2018;26:805–827.
- Li X, McCarty GW, Lang M, Ducey T, Hunt P, Miller J. Topographic and physicochemical controls on soil denitrification in prior converted croplands located on the Delmarva Peninsula, USA. *Geoderma*. Elsevier; 2018. 309:41–49.
- MacQueen JB. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press. 1967; 1:281-297

- McAuliffe JR. Landscape Evolution, Soil Formation, and Ecological Patterns and Processes in Sonoran Desert Bajadas. *Ecol Monogr.* John Wiley & Sons, Ltd; 2018;64:111–148.
- McBratney AB, Odeh IOA, Bishop TFA, Dunbar FA, Shatar TM, An Overview of Pedometric Techniques for Uses in Soil Survey. *Geoderma*, Amsterdam, 2000. v. 97, p. 293-327.
- Malone BP, McBratney AB, Minasny B. Description and spatial inference of soil drainage using matrix soil colours in the Lower Hunter Valley, New South Wales, Australia. *PeerJ*. 2018;6:e4659.
- Manechini C. Utilização de fotografias aéreas na comparação de sistemas de amostragem e estudo das redes de drenagem de três solos da região de Tambaú - SP. [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1981.
- Manly BFJ. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução/ 3 ed. – Porto Alegre: Bookman. 2008; 229
- Marques KPP, Demattê JAM, Miller BA, Lepsch IF. Geomorphometric segmentation of complex slope elements for detailed digital soil mapping in southeast Brazil. *Geoderma Reg.* Elsevier B.V.; 2018;14:e00175.
- Melton MA. An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology. Technical report, n11. 1957.
- Mendonça-Santos ML, Santos HG. The state of the art of brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. In: Lagacherie P, McBratney AB, Voltz M. Digital soil mapping an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier; 2007; 39-54.
- Miller BA, Crumpton WG, van der Valk AG. Wetland hydrologic class change from prior to European settlement to present on the Des Moines Lobe, Iowa. *Wetl Ecol Manag.* 2012;20:1–8.
- Mezzalana S. Folha geológica de Piracicaba:SF 23-M 300. Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo; 1966.
- Miller BA, Schaetzl RJ. The historical role of base maps in soil geography. *Geoderma.* Elsevier B.V.; 2014;230–231:329–339.
- Miller BA, Schaetzl RJ. Digital Classification of Hillslope Position. *Soil Sci Soc Am J.* 2015;79:132.
- Mills JP, Newton I, Twiss SD. Photogrammetry from archived digital imagery for seal monitoring. *Photogramm Rec.* 1997;15:715–724.

Neto LGM. Mapeamento pedológico digital via regressão geograficamente ponderada e lógica booleana: uma estratégia integrada entre dados espectrais terrestres e de satélite. [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2017.

Obi Reddy GP, Maji AK, Gajbhiye KS. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - A remote sensing and GIS approach. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2004. 6:1–16.

Oliveira JB, Prado H. Carta pedológica semidetalhada do estado de São Paulo: Folha Piracicaba (SF 23-Y-A-IV). Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, Mapa, escala 1:100.000. 1989.

Panagos P, Borrelli P, Meusburger K. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*. 2015;5:117–126.

Pfeifer RM. Fotointerpretação de bacias hidrográficas e amostras circulares de redes de drenagem dos solos do Parque Estadual da Ilha do Cardoso (SP). [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1984.

Pissarra TCT, Politano W, Ferraud AS. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2004; 28:297-305.

Poppiel RR, Lacerda MPC, Junior, MPO, Demattê JAM, Romero, DJ, Sato MV, Júnior LRA, Cassol LFM. Surface Spectroscopy of Oxisols, Entisols and Inceptisol and Relationships with Selected Soil Properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2018. 42.

Raduła MW, Szymura TH, Szymura M. Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecol Indic*. Elsevier; 2018. 85:172–179.

Politano W. Estudo fotointerpretativo sobre a morfometria das áreas de dois solos podzólicos vermelho-amarelos. [Tese] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1980.

Ray RG. Photogeologic procedures in geologic interpretation and mapping: U.S. Survey Bull. 1956;1043-A: 1-21.

Ray RG. Color aerial photography: *Western Miner and Oil Rev*. 1958;31:35-37.

Ray RG. Aerial photographs in geologic interpretation and mapping. Washington, U.S. Govt. Print. Off., 1960.

Ray RG, Fischer WA. Quantitative photography, a geologic research tool. *Photogrammetric Engineering*, Washington. 1960;26:143-150.

- Rizzo R, Demattê JAM, Lepsch IF, Gallo BC, Fongaro CT. Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis-NIR spectral library and terrain attributes. *Geoderma*. Elsevier B.V.; 2016;274:18–27.
- Rose, J., Letzer, J. Drumlin measurements: a test of the reliability of data derived from 1:25,000 scale topographic maps. *Geological Magazine*. 1975. 112, 361–371.
- Rossiter DG. Digital soil mapping as a component of data renewal for areas with sparse soil data infrastructures. In: Hartemink AE, McBratney A, Mendonça-Santos ML, editors. *Digital soil mapping with limited data*. New York: Springer; 2008; 69-80.
- Ruhe RV. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Sci*. 1956; 82:441–455
- Ruhe RV. Elements of the soil landscape. *Trans 7th Intl Congr Soil Sci (Madison)*. 1960 4:165–170.
- Ruhe RV. *Geomorphic processes and surficial geology*. Geomorphology. Houghton Mifflin. Boston; 1975.
- Schaetzl R, Anderson S. *Soils genesis and geomorphology*. New York: Cambridge University Press; 2005.
- Schaetzl RJ, Miller BA. Use of soil maps and surveys to Interpret soil-landform assemblages and soil-landscape evolution. In: Zinck JA, Metternicht G, Bocco G, Del Valle H, editors. *Geopedology an integration of geomorphology and pedology for soil and landscape studies*. Springer International Publishing Switzerland; 2016;251-234.
- Schoeneberger PJ, Wysocki, D.A. Benham, C. Soil Survey Staff. *Field book for describing and sampling soils*, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 2012.
- Silva LC. Fotointerpretação de redes de drenagem e caracterização do relevo de dois solos do município de São Pedro - SP. [Tese] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1993.
- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3 ed ver. Amp. – Brasília – DF: Embrapa, 2013; 353.
- Smith MJ, Rose J, Booth S. Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: An evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality. *Geomorphology*. 2006;76:148–165.
- Soil Science Division Staff. *Soil survey manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C. 2017.

- Soulard CE, Acevedo W, Stehman SV. Removing rural roads from the national land cover database to create improved urban maps for the United States, 1992 to 2011. *Photogramm Eng Remote Sensing*. 2018;84:101–109.
- Souza MLP. Fotointerpretação das redes de drenagem de três solos com horizonte B latossólico ocorrentes no município de Ponta Grossa -PIt [Dissertação] - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1975.
- Stichelbaut B. The application of First World War aerial photography to archaeology: The Belgian images. *Antiquity*. 2006. 80:161–172.
- Strahler AN. Hypsometric analysis of erosional topography. *Geol. Soc. America Bulletin*. 1952; 63:117-142.
- Teng HT, Viscarra Rossel RA, Shi Z, Behrens T. Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. *Catena*. Elsevier; 2018;164:125–134.
- Thomas AL, King D, Dambrine E, Couturier A, Roque J. Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma*. 1999. 90:291–305.
- Van Breemen N, Buurman P. Soil formation. Kluwer Academic Publishers. 2002
- Vasques GM, Demattê JAM, Viscarra Rossel RA, Ramírez López L, Terra FS, Rizzo R, De Souza Filho CR. Integrating geospatial and multi-depth laboratory spectral data for mapping soil classes in a geologically complex area in southeastern Brazil. *Eur J Soil Sci*. 2015;66:767–779.
- Venables WN, Ripley BD. *Modern Applied Statistics with S*. Springer. 2002.
- Way DS. *Terrain analysis: A guide to site selection using aerial photographic interpretation*. Dowden, Hutchinson e Ross, Inc. 1973.
- Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Jafari A, Tajik S, Finke P. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*. Elsevier; 2018;1–8.
- Zinck JA. Relationships between geomorphology and pedology: brief review. In: Zinck JA, Metternicht G, Bocco G, Del Valle H, editors. *Geopedology an integration of geomorphology and pedology for soil and landscape studies*. Springer International Publishing Switzerland; 2016.