

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Amanda Ribeiro de Oliveira

***RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM E MODELO DE PREDIÇÃO
DE SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO,
SETE LAGOAS (MG)***

Belo Horizonte
2016

Amanda Ribeiro de Oliveira

***RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM E MODELO DE PREDIÇÃO
DE SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO,
SETE LAGOAS (MG)***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental

Linha de pesquisa: Pedologia

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Monteiro da Costa

Co-orientador: Dr. João Herbert Moreira Viana

Belo Horizonte
2016

O48r
2016

Oliveira, Amanda Ribeiro de.

Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG) [manuscrito] / Amanda Ribeiro de Oliveira. – 2016.

v, 74 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Adriana Monteiro da Costa.

Coorientador: João Herbert Moreira Viana

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2016.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Pedologia.

Inclui bibliografias.

1. Levantamentos do solo – Teses. 2. Mapeamento do solo – Sete Lagoas (MG) – Teses. 3. Mapeamento digital – Sete Lagoas (MG) – Teses. 4. Paisagens – Sete Lagoas (MG) – Teses. I. Costa, Adriana Monteiro da. II. Viana, João Herbert Moreira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 631.4(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM E MODELO DE PREDIÇÃO DE SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS (MG)

AMANDA RIBEIRO DE OLIVEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

Aprovada em 31 de agosto de 2016, pela banca constituída pelos membros:

Adriana Monteiro da Costa

Prof(a). Adriana Monteiro da Costa - Orientadora
Universidade Federal de Minas Gerais

João Herbert Moreira Viana

Prof(a). João Herbert Moreira Viana
Embrapa

Michele Duarte de Menezes

Prof(a). Michele Duarte de Menezes
Universidade Federal de Lavras

Cristiane Valéria de Oliveira

Prof(a). Cristiane Valéria de Oliveira
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2016.

Aos meus pais, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo apoio e motivação em todos os momentos.

À professora Adriana Monteiro pela orientação, confiança, ensinamentos, paciência, carinho e amizade.

Ao pesquisador João Herbert pela co-orientação, disposição, ensinamentos e amizade.

À equipe de geologia, professor Jarbas Sampaio, Samuel Amaral e Maria Vitória, pelo auxílio nos trabalhos de campo e pelo mapa litológico.

Aos professores e membros da banca de qualificação e defesa Cristiane Oliveira, Michele Menezes e Fábio Oliveira, pelas críticas e sugestões apresentadas para o enriquecimento deste estudo.

Aos meus grandes amigos de Morada Nova de Minas, por compreenderem a minha ausência e por me apoiarem deste o início.

Aos amigos da Universidade, em especial a Lilian Machado e a Melissa Lima, por sempre me lembrarem de que tudo iria dar certo!

Ao Iago pelo apoio e auxílio nas revisões textuais e produção cartográfica.

À toda a equipe do Centro de Sensoriamento Remoto (CSR/UFMG) pelas sugestões e auxílio na construção e execução do modelo digital de solos. Em especial agradeço a equipe de Geoprocessamento: William Costa, Isabella Lorenzini, Welisson Wendel e Lílian Machado, inclusive por tornar meus dias mais alegres!

Ao sr. Alberto, sr. Ronaldo, sr. Mauro Abreu, sr. Roberto Teixeira, sr. Gilson que autorizaram a coleta de amostras de solos em suas propriedades e me atenderam de forma muito solícita. Agradeço também ao César, o melhor guia da região!

Aos colegas Klinsmann, Brunno, Jonas e Luiz Fernando, por me acompanharem e ajudarem nos trabalhos de campo.

Às funcionárias do Laboratório de Solos da Embrapa Milho e Sorgo, Enedir, Rosana e Fabiane, pelo auxílio com as amostras de solos.

Aos estagiários da Embrapa Milho e Sorgo, Fernanda e Rafael, pela grande ajuda nos trabalhos de campo.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela infraestrutura e análise dos solos coletados.

À Fapemig, pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

Ao Centro Aeroespacial Alemão (DLR) pela disponibilização do modelo digital de elevação do projeto TanDEM-X.

RESUMO GERAL

Localizada na região periurbana do município de Sete Lagoas, Minas Gerais, a bacia do córrego Marinheiro caracteriza-se pela alta relevância no contexto geográfico no qual está inserida, sendo alvo de impactos da expansão urbana e especulações quanto ao seu potencial hídrico. O objetivo geral deste trabalho consistiu no estudo das relações solo-paisagem da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG), e na proposição de um modelo de predição de solos para a bacia. Realizou-se um mapeamento convencional semidetalhado de solos e uma análise das interações entre altitude, declividade, litologia, fitofisionomia e solos a partir do cruzamento dos mapas temáticos. O modelo digital de solos foi construído a partir do método de pesos de evidência e executado na plataforma de modelagem *open source* Dinamica EGO. Utilizou-se uma amostragem de 42 perfis de solos e 157 pontos de verificação analisados e descritos em campo como variável resposta. O levantamento convencional de solos compreendeu 21 unidades de mapeamento, caracterizando uma alta variabilidade de classes de solos para uma área de 14,8 km². Os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos foram as classes mapeadas de maior ocorrência espacial na bacia, enquanto que os Cambissolos Háplicos foram os de maior participação entre as unidades de mapeamento. A partir de uma análise inicial das relações entre material de origem, fitofisionomias e variáveis topográficas derivados do modelo digital de elevação de alta resolução espacial, foi possível constatar uma alta variabilidade fisiográfica na bacia. O relevo irregular na porção montante e em pontos localizados da bacia demonstrou maior associação com os granito-gnaisses do Complexo Belo Horizonte e com os calcários da Formação Sete Lagoas, enquanto as áreas de declives mais suaves predominaram sobre material de siltitos da Formação Serra de Santa Helena. As diferentes litologias, no geral, demonstraram maior influência nas propriedades físicas e morfológicas dos solos do que nas classes propriamente ditas. O modelo digital de solos resultou em um mapa de probabilidade para cada uma das 16 classes de solos identificadas, os quais foram combinados em um único mapa resultando em 12 unidades de mapeamento (UM). Os Latossolos, Argissolos e Cambissolos foram os solos de maior ocorrência entre as UMs, sendo a primeira classe a de maior participação total (\cong 50%). Quando comparados visualmente, os mapas de solos predito e convencional apresentaram similaridades entre os delineamentos e as distribuições das unidades de mapeamento. A validação do mapa predito resultou em uma acurácia global de 71,4%, demonstrando a eficiência do modelo na predição da ocorrência espacial das classes de solos. O mapeamento digital demonstrou ser uma técnica promissora por possibilitar a sua reprodutibilidade para regiões sem informações e com fisiografia semelhante, otimizando recursos e tempo.

Palavras-chave: modelo digital de elevação, mapeamento convencional de solos, modelo digital de solos, unidades de mapeamento.

GENERAL ABSTRACT

Located in the peri-urban area of the city of Sete Lagoas, Minas Gerais, Marinheiro stream watershed is characterized by high relevance in the geographical context in which it inserted, been the target of impacts of urban expansion and speculation on its water potential. The aim of this work is the study of soil-landscape relationships of Marinheiro stream watershed, Sete Lagoas (MG), and the proposition of a soil prediction model for the watershed. It conducted a semi-detailed conventional soil mapping and an analysis of interactions between elevation, slope, lithology, phytophysionomy and soil from crossing the thematic maps. The digital soil model was built from the weights of evidence method and executed on the modeling platform open source Dinamica EGO. It was used a sample of 42 soil profiles and 157 checkpoints analyzed and described in the fieldwork as the result variable. The conventional soil survey comprised 21 mapping units and 19 soil suborders, featuring a high variability of classes for an area of 14.8 km². “Latosolos” (Brazilian soil classification system’s classes) were the mapped classes of higher spatial occurrence in the watershed, while “Cambissolos Háplicos” (Brazilian soil classification system’s classes) presented the highest participation among the mapping units. From an initial analysis of the relations between lithology, phytophysionomies and topographic variables derived from a digital elevation model of high spatial resolution, It was possible to identify a high variability physiographic in the watershed. Irregular relief in the upstream portion and at points located in the watershed showed a higher association with the granite-gneiss of Belo Horizonte Complex and calcareous of the Sete Lagoas Formation, while the more gentle slopes areas predominated over siltstones materials of Serra de Santa Helena Formation. The different lithologies in general showed greater influence on physical and morphological properties of soils than in the classes. The digital soil model resulted in a probability map for each 16 soil classes identified, which were combined into a single map, resulting in 12 mapping units (MU). “Latosolos”, “Argissolos” and “Cambissolos” (Brazilian soil classification system’s classes) were the most frequent soil on the MU. “Latosolos” was the class with higher participation (\cong 50%). When compared visually, the predicted and conventional soil maps showed similarities between the outlines and the distribution of mapping units. The predicted map validation has resulted in a global accuracy of 71,4%, demonstrating the efficiency of the model for predicting the spatial occurrence of soil classes. The digital mapping proved to be a promising technique for enabling its reproducibility for regions without information and with similar physiographic, optimizing resources and time.

Key-words: digital elevation model, conventional soil mapping, digital soil model, mapping units.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO GERAL.....	ii
GENERAL ABSTRACT.....	iii
SUMÁRIO.....	iv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	5
CAPÍTULO 1: SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO: LEVANTAMENTO E RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM.....	7
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	11
2.2 Base de dados.....	12
2.3 Mapeamento convencional semidetalhado de solos.....	13
2.4 Modelo solo-paisagem.....	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
3.1 Análise fisiográfica da área de estudo.....	15
3.2 Mapa convencional de solos.....	15
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
CAPÍTULO 2: MODELO DE PREDIÇÃO APLICADO AO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS (MG).....	32
RESUMO.....	32
ABSTRACT.....	33
1. INTRODUÇÃO.....	34
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	37
2.2 Modelo Digital de Solos.....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43

3.1 Análise preliminar.....	43
3.2 Mapas de probabilidade.....	44
3.3 Mapa de predição de solos.....	45
3.4 Validação.....	49
3.5 Análise geral.....	49
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
CONCLUSÃO GERAL.....	57
APÊNDICES.....	59

INTRODUÇÃO GERAL

A compreensão das variáveis que compõe o meio físico e seus processos é fundamental para o planejamento e a gestão ambiental e territorial (SILVEIRA, 2010; MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003). Por permitir analisar os diferentes elementos da paisagem de maneira integrada, as bacias hidrográficas têm se mostrado um tipo de unidade adequada para estudos ambientais. Em vista disso, a bacia do córrego Marinheiro apresenta uma grande relevância no contexto geográfico no qual está inserida, principalmente no que se refere à manutenção da quantidade e qualidade de sua água, como tributário do ribeirão Jequitibá, e este, por sua vez, como afluente do Rio das Velhas.

A bacia localiza-se na região periurbana do município de Sete Lagoas, próximo ao limite com Prudente de Morais - MG, e é alvo de impactos da expansão urbana de ambos os municípios e especulações quanto ao seu potencial hídrico. Destaca-se que o abastecimento de água em Sete Lagoas e Prudente de Morais é realizado por meio de fontes subsuperficiais através de poços artesianos, os quais nos últimos anos têm enfrentado sérios problemas relacionados à exploração sem controle de suas águas, direcionando a um futuro conflito pelo uso desse recurso na região. O córrego Marinheiro é ainda a principal fonte de abastecimento hídrico das propriedades agrícolas às suas margens, e da água de irrigação do Centro de Pesquisas de Milho e Sorgo da Embrapa, usada nos experimentos para o desenvolvimento dos sistemas de produção e pesquisas de adequação de tecnologias de cultivo e manejo.

No entorno da bacia, verifica-se uma rápida expansão da mancha urbana de Sete Lagoas, como é possível observar pelo grande número de loteamentos no seu entorno, adjacente aos interflúvios da porção a montante. Estes, associados à presença de pastagens degradadas, às áreas com solo exposto, aos cultivos morro abaixo e às estradas sem proteção, vêm promovendo o assoreamento do córrego, impactando e reduzindo assim a resiliência da bacia (COSTA *et al.*, 2015).

A importância de estudos na bacia não se deve apenas à preocupação com o seu potencial hídrico. Compreendendo uma área de aproximadamente 14,8 km², a bacia possui espécies ameaçadas de extinção, como o faveiro-de-wilson

(*Dimorphandra wilsonii Rizzini*) (JBRJ, 2014) e áreas de proteção ambiental, representadas pelas feições cársticas.

O entendimento da dinâmica dos elementos constituintes da bacia é de fundamental importância como subsídio à gestão dos recursos naturais existentes de forma a orientar e direcionar políticas públicas e ações de manejo e conservação na área. Os modelos de paisagem são ferramentas pertinentes quando se pretende obter uma análise integrada dos aspectos físicos, já que combinam feições da superfície terrestre, componentes de subsuperfície e variáveis climáticas, caracterizando importantes técnicas auxiliares e potencialmente úteis nos levantamentos de solo e nos estudos detalhados de seus atributos (PENNOCK e VELDKAMP, 2006; CAMPOS, 2012). A possibilidade de se trabalhar as relações entre elementos da paisagem, a partir de informações espacializadas, facilita a compreensão da geografia dos solos, assim como a predição do comportamento destes (CAMPOS *et al.*, 2007).

Os mapeamentos de solos têm se tornado uma demanda cada vez maior diante dos cenários de intensificação da produção agrícola, do aumento da produção de bioenergia, da criação de zoneamentos agroecológicos e da crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental (TEN CATEN *et al.*, 2011). Para o planejamento de uso da terra, os mapeamentos de solos são ferramentas essenciais para a identificação de vulnerabilidades e potencialidades na paisagem em geral, devido as múltiplas funções dos solos, seja como fonte de nutrientes para as plantas, seja como filtro e reservatório de água e suporte para desenvolvimento de vidas animal e vegetal.

Entretanto, apesar da sua grande importância, os mapeamentos de solos em escalas mais detalhadas ainda são muito escassos no Brasil. No contexto nacional, após os mapeamentos exploratórios do projeto RADAMBRASIL, na década de 70, poucos mapeamentos foram realizados. Isto é reflexo da ausência de políticas públicas destinadas a este fim, associada aos altos custos, tempo de execução e da ausência de mão de obra especializada para tal. Esse cenário indica a necessidade de novos métodos quantitativos para solucionar as lacunas de mapeamentos e atender a crescente demanda da sociedade por informações de solos em escalas adequadas ao planejamento (SILVEIRA *et al.*, 2012).

Neste contexto e com a crescente utilização de Sistemas de Informação Geográficas (SIGs), o Mapeamento Digital de Solos (MDS) surge como uma importante técnica de predição e espacialização de solos. Estudos em MDS trabalham com a organização e análise de grandes conjuntos de dados por meio de modelos numéricos e diferentes metodologias.

Diversos estudos têm testado diferentes métodos e modelos de predição espacial de solos (GIASSON *et al.*, 2006; FIGUEIREDO *et al.*, 2008; NOLASCO-CARVALHO, FRANCA-ROCHA e UCHA, 2009; GIASSON *et al.*, 2011; TEN CATEN *et al.*, 2011; SIRTOLI *et al.*, 2013; TESKE *et al.*, 2015), buscando propor a otimização dos processos de mapeamento e modelagem de dados e o aumento da qualidade dos produtos gerados. Entretanto, o MDS ainda caminha para a sua consolidação como ferramenta e muitos dos modelos preditores de solo (MPS) ainda necessitam de ajustes metodológicos para o aumento da acurácia dos resultados gerados.

A motivação de se trabalhar com MPS consistiu na tentativa de criação de um modelo com potencial preditivo eficiente e alta performance. Ademais, além do mapa de solos predito, há ainda possibilidades de se gerar novos conjuntos de dados e novas interpretações sobre diferentes temáticas, além de permitir a extrapolação da distribuição espacial dos solos para áreas com características fisiográficas semelhantes.

O objetivo geral deste trabalho consistiu no estudo das relações solo-paisagem da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG), e na proposição de um modelo de predição de solos para a bacia.

Os objetivos específicos deste estudo foram: (i) realizar o mapeamento semidetalhado de solos da bacia do córrego Marinheiro; (ii) analisar e discutir as relações solo-paisagem da área de estudo, a partir de atributos pedológicos, topográficos, litológicos e fitofisionômicos; (iii) desenvolver e avaliar a performance de um modelo de predição de solos (MPS) gerado pelo método de pesos de evidência (AGTERBERG & BONHAM-CARTER, 1990; BONHAM-CARTER, 1994) implementado na plataforma de modelagem Dinamica EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2002).

Para alcançar o objetivo proposto, dividiu-se este estudo em dois capítulos em formato de artigo. O primeiro compreende as discussões das relações solo-

paisagem, considerando o mapa convencional de solos; e o segundo aborda o MDS e a avaliação de um MPS gerado para a área de estudo, tendo como referência o mapa semidetalhado de solos produzido no contexto do capítulo anterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events. In: APCOM Symposium, 22, 1990, Berlin. *Proceedings...* Berlin: [s.n.], 1990. p. 381-395.

BONHAM-CARTER, G. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Nova York: Pergamon, 1994. 398 p.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litosseqüência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 3, p. 519-529, 2007.

CAMPOS, M. C. C. Relação solo-paisagem: conceitos, evolução e aplicações. *Ambiência*, v. 8, n. 3, p. 963-982, 2012.

COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R.; VIANA, J. H. M. V. Manejo do solo. *Revista Manuelzão*, Belo Horizonte, n. 75, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/xLU9Vu>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

FIGUEIREDO, S. R.; S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; Nascimento, P. C. Uso de Regressões Logísticas Múltiplas para Mapeamento Digital de Solos no Planalto Médio do RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2779-2785, 2008.

GIASSON, E.; CLARKE, R. T.; INDA JUNIOR, A. V.; MERTEN, G. H.; TORNQUIST, C. G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in Southern Brazil. *Scientia Agricola*, São Paulo, v. 63, n. 3, p. 262-268, 2006.

GIASSON, E.; SARMENTO, E. C.; WEBERL, E.; FLORES, C. A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steeplands. *Scientia Agricola*, São Paulo, v. 68, p. 167-174, 2011.

Jardim Botânico do Rio de Janeiro - JBRJ. Plano de Ação Nacional para a Conservação do Faveiro-de-wilson (*Dimorphandra wilsonii* Rizzini) / Eline Matos Martins... [et al.]. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio, 2014. 52 p.

MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos. *Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos: Métodos Paradigmas e Novas Técnicas*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 19 p.

NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 1, p. 46-55, 2009.

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

SILVEIRA, C. T. *Análise Digital do Relevo na Predição de Unidades Preliminares de Mapeamento de Solos: Integração de Atributos Topográficos em Sistemas de*

Informações Geográficas e Redes Neurais Artificiais. 2010. 154 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. E.; SILVA, C. R. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n. 2, p. 125-137, 2012.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; BOTELHO, M. F.; MANTOVAN, L. E. Pedometria apoiada em atributos topográficos, índices espectrais e geologia com uso de redes neurais artificiais. *Geociências*, Rio Claro, v. 32, n. 3, p. 516-531, 2013.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C.; CERQUEIRA, G. Dinamica - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.

TEN CATEN, A. DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1170-1176, 2011.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação de esquemas de amostragem para treinamento de modelos preditores no mapeamento digital de classes de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 1, p. 14-20, 2015.

CAPÍTULO 1

SOLOS DA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO: LEVANTAMENTO E RELAÇÕES SOLO-PAISAGEM

RESUMO

Os modelos solo-paisagem são importantes ferramentas para a compreensão da distribuição geográfica dos solos, permitindo analisá-los como um corpo natural em interação com diferentes variáveis ambientais. O estudo das relações entre os solos e os elementos da paisagem, sejam estes de superfície ou subsuperfície, apresentam uma abordagem analítica com vistas a auxiliar a identificação e o mapeamento de solos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar e discutir as relações solo-paisagem da bacia do córrego Marinheiro, a partir de observações realizadas em campo, atributos topográficos, litológicos e fitofisionômicos, e um levantamento semidetalhado de solos. Verificou-se uma forte assimetria geomorfológica na bacia evidenciada por diferentes compartimentos fisiográficos e formas de vales em trechos distintos do canal fluvial. As classes de declividade ondulada e forte ondulada mostraram-se predominantes e bem distribuídas, enquanto que as áreas de declives mais suaves apresentaram maior expressividade nas porções de menor elevação da bacia. Entre os três tipos litológicos mapeados do Grupo Bambuí e do Complexo Belo Horizonte, os siltitos da Formação Serra de Santa Helena foram os de maior ocorrência na bacia. O mapa de solos gerado apresentou 21 unidades de mapeamento e 19 subordens de solos. Os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos prevaleceram entre as demais classes, predominando nas regiões de menor altitude e nos topos de morros de topografia menos declivosa, caracterizando-se como a ordem de maior ocorrência espacial na bacia. No entanto, os Cambissolos Háplicos foram aqueles de maior participação entre as unidades de mapeamento. As diferentes litologias, no geral, demonstraram maior influência nas propriedades físicas e morfológicas dos solos do que nas classes propriamente ditas. A grande variabilidade de solos mapeados está relacionada principalmente à diversidade litológica e topográfica da bacia.

Palavras-chave: modelos de paisagem, levantamento de solos, unidades de mapeamento.

CHAPTER 1

SOILS OF MARINHEIRO WATERSHED: LIFTING AND SOIL-LANDSCAPE RELATIONSHIPS

ABSTRACT

The soil-landscape models are important tools for the comprehension of geographic distribution of the soils allowing analyze them as a natural body in interaction with different environmental variables. The study of the relationship between soil and landscape elements, whether surface or subsurface, present an analytical approach in order to help the identification and soil mapping. In this context, this study aims to analyze and discuss the soil-landscape relationships of Marinheiro stream watershed, from observations in fieldworks, topographic, lithologic and phytophysionomic attributes, and a semi-detailed soil survey. It was verified a strong geomorphological asymmetry in the watershed evidenced by different physiographic features and forms valleys in different stretches of the river channel. The slope classes wavy and strong wavy showed to be predominant and well distributed, while the more gently sloping areas obtained higher expression in the lower elevation portions of the watershed. Among the three lithological types mapped of the Bambuí Group and Complex Belo Horizonte, the siltstone of the Serra de Santa Helena Formation were the most frequent in the watershed. The soil map generated comprised 21 mapping units and 19 soil suborders. “Latossolos Vermelhos” and “Vermelho-Amarelos” (Brazilian soil classification system’s classes) prevailed among the other classes, predominating in the regions of lower elevation and hilltops of topography less steep, characterizing itself as the order of higher spatial occurrence in the basin. However, “Cambissolos Háplicos” (Brazilian soil classification system’s classes) were those of greater participation among the mapping units. The different lithologies in general showed greater influence on physical and morphological properties of soils than in the classes. The great variability of mapped soil is mainly related to lithologic and topographic diversity of the watershed.

Key-words: landscape models, soil survey, mapping units.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de paisagem são técnicas auxiliares importantes e potencialmente úteis nos levantamentos de solo e nos estudos detalhados de seus atributos. A identificação de áreas de solos homogêneos ou com alta fragilidade são algumas das possibilidades desses modelos (CAMPOS *et al.*, 2006).

O estudo das relações solo-paisagem tem usado abordagens analíticas eficazes em levantamentos detalhados dos solos e do relevo, ao combinar feições da superfície terrestre, componentes de subsuperfície e atributos do solo (PENNOCK e VELDKAMP, 2006; CAMPOS, 2012). A geomorfologia de uma área apresenta forte relação com os processos de formação e desenvolvimento dos solos, assim como os solos são importantes indicadores da evolução das coberturas superficiais (MULLA e McBRATNEY, 1999; PENNOCK e VELDKAMP, 2006; SIRTOLI *et al.*, 2008). Da mesma forma, a litologia também apresenta um papel fundamental nos estudos da relação solo-paisagem para a compreensão da variabilidade espacial dos atributos do solo (VIDAL-TORRADO e LEPSCH, 1999; MARQUES JÚNIOR e LEPSCH, 2000; TERAMOTO *et al.* 2001; CAMPOS *et al.*, 2007). Ambos os componentes litológicos e geomorfológicos da paisagem, analisados de forma integrada, caracterizam uma abordagem pedolitogeomorfológica nos estudos ambientais, a qual é cada vez mais discutida em trabalhos científicos em diferentes escalas e formas, tais como Rossi e Queiroz Neto (2001), Teramoto *et al.* (2001), Motta *et al.* (2002), Ippoliti *et al.* (2005), Sirtoli *et al.* (2008), Sanchez *et al.* (2009), Carvalho Filho *et al.* (2010).

A maioria dos modelos de paisagem têm como foco as interações solo-relevo, sendo os mais conhecidos a catena (MILNE, 1935), a superfície geomórfica (RUHE, 1956; DANIELS *et al.*, 1971), as unidades de vertente (DALRYMPLE *et al.*, 1968) e a curvatura do terreno (TROEH, 1965). Outros indicadores também são considerados, tais como a vegetação (ROSSI e QUEIROZ NETO, 2001; RAMOS *et al.*, 2006; RUGGIERO *et al.*, 2006), parâmetros hidrológicos (MOORE *et al.*, 1991) e mineralogia (ESPINDOLA e CARVALHO, 1986). Estes indicadores, apesar de muito discutidos, são pouco explorados em trabalhos sobre relações solo-paisagem, para a identificação e mapeamento de solos (CAMPOS, 2012). Esse tipo de modelo é fundamental para estudos de pedogênese, de levantamento e classificação de solos,

estimativas de movimentos de massa e planejamento do uso da terra (MENDONÇA-SANTOS e SANTOS, 2003; SILVEIRA, 2010; CAMPOS, 2012).

Com o avanço das geotecnologias, a utilização de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e de MDE (Modelos Digitais de Elevação), no campo científico, tem crescido, o que possibilitou a produção e o tratamento de grandes volumes de dados e informações essenciais aos mapeamentos de solos. A análise digital do terreno introduz grandes vantagens em relação ao método tradicional (análise estereoscópica de fotografias aéreas), uma vez que permite a quantificação morfológica e morfométrica da superfície terrestre, essencial ao estudo dos processos dinâmicos da paisagem, além de ser uma alternativa rápida e acessível (IPPOLITI *et al.*, 2005).

A possibilidade de trabalhar as relações entre elementos da paisagem a partir de informações espacializadas facilita a compreensão da geografia dos solos, assim como a predição do comportamento destes (CAMPOS *et al.*, 2007). A interrelação entre os fatores de formação do solo e os processos pedogenéticos tem sido investigada cada vez mais a partir de SIGs e de plataformas de modelagem, permitindo a identificação de padrões e quantificações de variáveis ambientais, como pode ser observado nos trabalhos de Sirtoli *et al.* (2008) e Ten Caten *et al.* (2011).

Escolheu-se utilizar neste estudo uma abordagem tridimensional da paisagem a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução (12 m) para a identificação e análise da variabilidade espacial dos atributos do solo na bacia do córrego Marinheiro. Os produtos e interpretações gerados servirão como base para estudos regionais e de áreas adjacentes futuros, e como fonte de dados para a gestão eficiente da bacia e a preservação dos seus recursos naturais.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar e discutir as relações solo-paisagem da bacia do córrego Marinheiro, localizada em Sete Lagoas (MG), a partir de um levantamento semidetalhado de solos, observações realizadas em campo e atributos topográficos, litológicos e fitofisionômicos.

Geologicamente, a área de estudo está localizada no Cráton do São Francisco. A litologia local é formada por unidades litoestratigráficas do Complexo Belo Horizonte, onde prevalecem litologias do tipo gnaiss, e por unidades da Formação Sete Lagoas (Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), com presença de calcarenitos, calcissiltitos e micritos; e da Formação Santa Helena, com predomínio de rochas sedimentares do tipo siltito e folhelho; sendo as duas Formações pertencentes ao Grupo Bambuí e Supergrupo São Francisco (TULLER, 2009). Em relação à geomorfologia, a bacia encontra-se em um ambiente cárstico, o qual está relacionado à presença de lagoas, cavernas, dolinas e uvalas na região (GALVÃO, HALIHAN E HIRATA, 2015). Sobre o material de pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem depósitos coluviais, predominantemente argilosos, os quais constituem as superfícies de aplainamento, com declividades suaves a planas (CPRM, 1994).

2.2 Base de dados

Para estruturação da base cartográfica digital, foram utilizadas como fontes primárias de dados: imagens de satélite IKONOS (2016), com resolução espacial de 1 m; pontos de checagem em trabalhos de campo e Modelo Digital de Elevação (MDE) de 2014, proveniente do satélite TanDEM-X do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), de resolução espacial de 12 m (WESSEL, 2013).

A partir do MDE, por meio de técnicas de geoprocessamento, foram extraídos os atributos do terreno, sendo eles primários (altimetria e declividade) e secundário (rede de drenagem). O *software* utilizado para criação e processamento de toda a base de dados foi o ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012).

As fitofisionomias foram identificadas e mapeadas a partir da imagem de satélite IKONOS (2016) e visitas de campo, com checagem da bibliografia pertinente (COSTA *et al.*, 2015). Utilizaram-se informações de localização, estrutura e porte para a determinação das classes (IBGE, 2012). A delimitação das classes fitofisionômicas foi realizada manualmente em ambiente SIG.

O mapa litológico de referência² foi confeccionado a partir da caracterização das unidades litoestratigráficas presentes na área. Esta caracterização foi desenvolvida em várias etapas, envolvendo: a) a interpretação de imagens de satélite; b) a consulta bibliográfica e a mapas preexistentes de projetos de mapeamento geológico, como o Projeto Vida (CPRM, 1991), de escala 1:50.000, e a Série Programa Geologia do Brasil (CPRM, 2009), de escala 1:100.000; c) trabalhos de campo.

2.3 Mapeamento convencional semidetalhado de solos

As etapas do mapeamento pedológico incluíram a análise dos atributos do terreno, para caracterização física da área de estudo e orientação da amostragem de solos; prospecções de campo; caracterizações morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas; classificação taxonômica e espacialização das unidades de mapeamento de solos.

O método de prospecção utilizado para o levantamento dos solos foi o de observações ao longo de transectos, buscando-se identificar a maior variabilidade de solos na área, sendo as observações orientadas principalmente pela compartimentação do relevo e litologia local. Ao longo da prospecção foram feitas observações em cortes de estradas e barrancos e medições sempre que houve indicação de mudança das classes de solos e/ou de seus atributos. A escolha de perfis representativos para a bacia foi orientada por meio de atributos gerados a partir do MDE, imagem de satélite *RapidEye* (2012), levantamento litológico e trabalhos de campo exploratórios.

Foram descritos perfis completos de solos e realizados pontos de checagem (APÊNDICE A). Todos os pontos de amostragem foram georreferenciados, utilizando-se receptor GPS. A descrição e coleta dos perfis foram realizadas conforme Santos et al. (2013). Foram coletadas amostras deformadas em todos os horizontes para análises físicas e químicas, conforme Donagema et al. (2011). A classificação e o mapeamento dos solos foram realizados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013) e os Procedimentos

² SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R. Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.

normativos de levantamentos pedológicos (SANTOS et al., 1995). No Apêndice B são apresentados alguns dos perfis amostrados.

2.4 Modelo solo-paisagem

A forte assimetria geomorfológica na bacia, associada à sua área relativamente pequena, levaram à escolha de não se adotar um modelo solo-paisagem específico, mas sim realizar uma análise integrada dos aspectos da paisagem. Blocos diagramas e perfis topográficos foram elaborados, nos *softwares* Surfer 10, QGIS 2.16 e Inkscape³, para a melhor compreensão da distribuição espacial das unidades de mapeamento na área de estudo. As interações entre os solos, altitude, declividade, litologia e fitofisionomia foram estabelecidas a partir do cruzamento dos mapas temáticos.

³ Surfer 10: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>
QGIS 2.16: <http://www.qgis.org/en/site/>
Inkscape: <https://inkscape.org/pt/>

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise fisiográfica da área de estudo

A partir da análise das relações entre material de origem, fitofisionomias e variáveis topográficas derivados do MDE foi possível constatar uma alta variabilidade fisiográfica na bacia (FIGURA 2). As porções nas margens direita e esquerda do córrego Marinheiro ocupam áreas muito distintas, sendo a primeira a de maior extensão (10,1 km²). As classes de declividade ondulada e forte ondulada mostraram-se predominantes e bem distribuídas, enquanto que as áreas de declives mais suaves obtiveram maior expressividade nas porções de menor elevação da bacia. Essa configuração topográfica assimétrica evidenciou dois padrões de vales fluviais para o córrego Marinheiro. O trecho inicial do córrego apresenta sentido Sul-Norte, no entanto, após 1,2km observa-se uma mudança abrupta de direção para Sudoeste-Nordeste, sendo as proximidades deste ponto de inflexão constituídas pelos vales mais confinados da bacia. Este trecho corresponde a um vale encaixado sob controle estrutural de uma falha inferida relacionada ao graben descrito na área urbana de Sete Lagoas por Galvão *et al.* (2016). Dirigindo-se a jusante, os vales da bacia do Marinheiro tornam-se cada vez mais abertos e, conseqüentemente, menos confinados, com planícies fluviais mais expressivas.

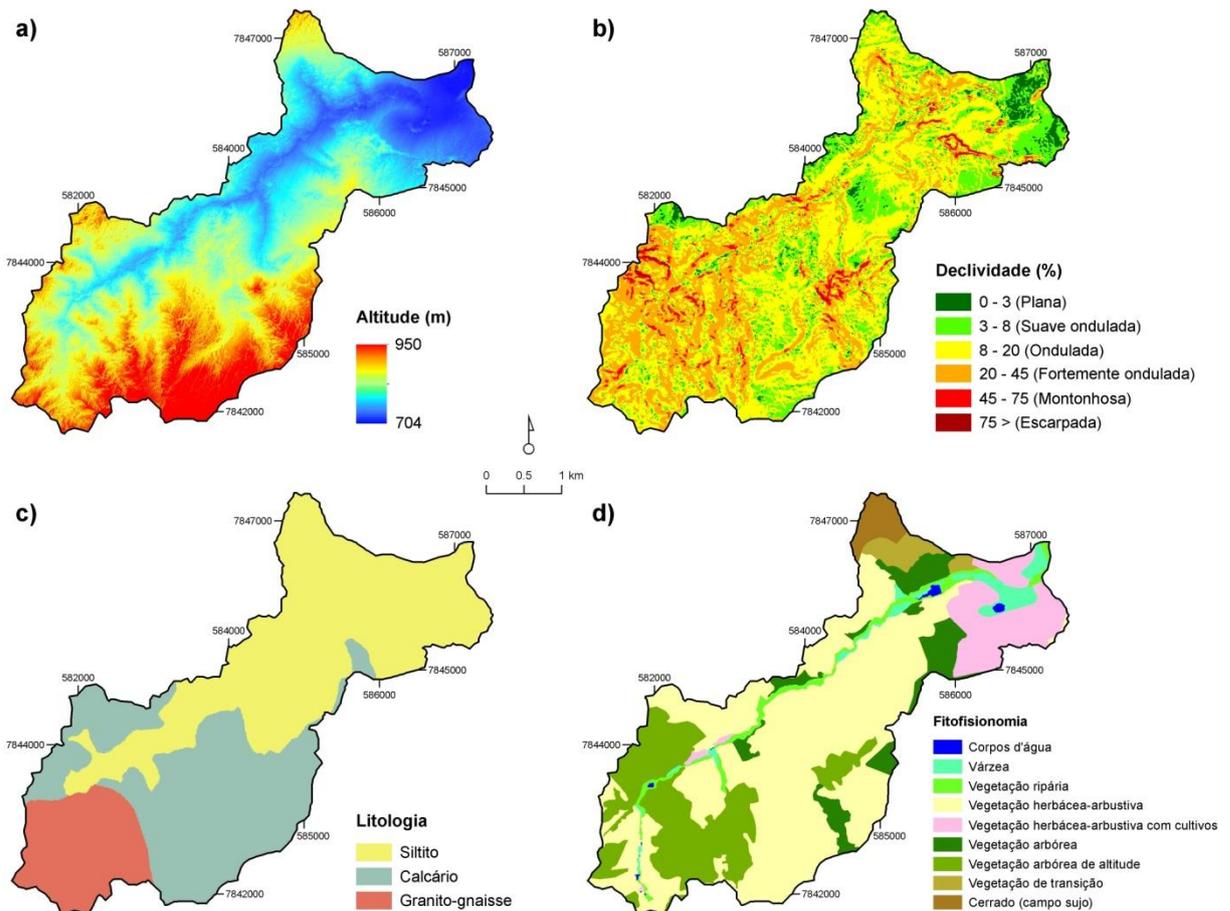


Figura 2 – Variáveis utilizadas para análise das relações solo-paisagem: (a) altitude, (b) declividade, (c) litologia e (d) fitofisionomia.

Entre os três grupos litológicos mapeados, os siltitos da Formação Serra de Santa Helena ocuparam a maior área na bacia, com 7,2 km², seguido dos calcários, da Formação Sete Lagoas, e do granito-gnaiss, do Complexo Belo Horizonte, com 5,5 e 2,2 km², respectivamente, o que possibilitou observar um predomínio de materiais de origem do Grupo Bambuí.

Na montante da bacia (Sudoeste), onde se localizam as principais cabeceiras de drenagens, é possível observar um relevo movimentado, com interflúvios abruptos e altitudes elevadas (FIGURA 3A). Nessa região prevalecem fitofisionomias arbóreas de altitude e herbáceo-arbustivas, sendo esta última caracterizada por extensas áreas de pastagem sob granito-gnaiss em alto estágio de degradação e com presença de grandes manchas de solo exposto. As planícies de inundação e os corredores de mata ciliar são estreitos e de baixa expressão em termos de área. As maiores declividades estão concentradas nas ocorrências de afloramentos de calcários, observando-se declives acima de 75% e escarpas de paredões.

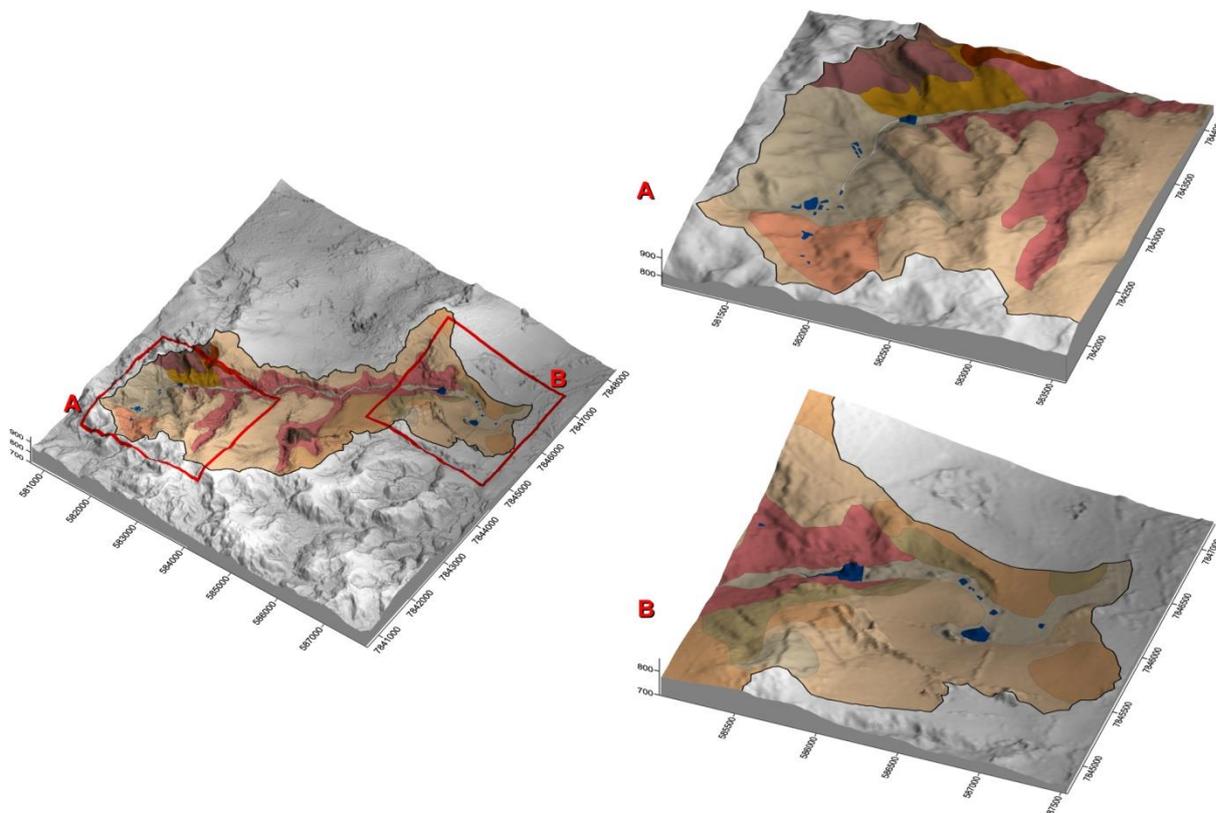


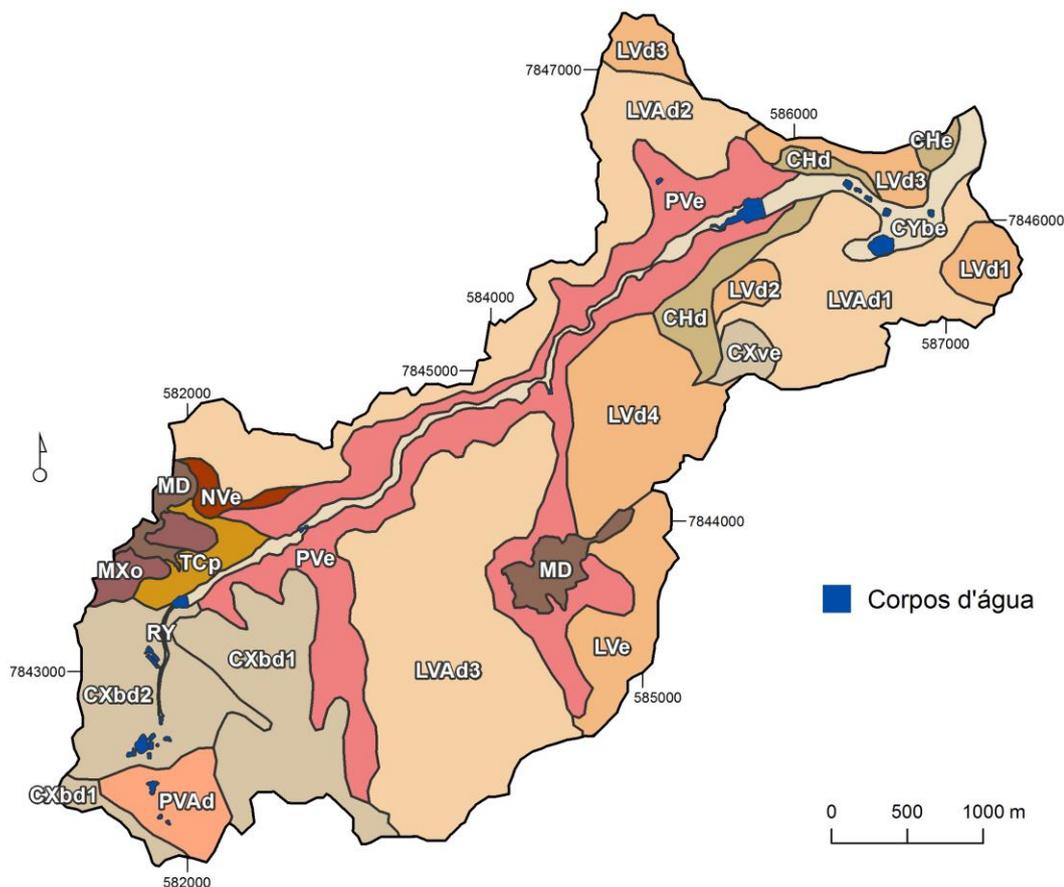
Figura 3 – Representação esquemática dos diferentes compartimentos fisiográficos da bacia: (A) montante e (B) jusante.

Na porção central da bacia destaca-se um maciço rochoso proeminente de calcário exposto associado a ocorrências de “mata seca” sobre o mesmo e floresta estacional semidecidual no seu entorno. Dolinas características do carste desenvolvido em áreas sob manto pedológico espesso também são observadas na área.

À medida em que se aproxima da porção a jusante da bacia (Nordeste), as declividades e os interflúvios tornam-se mais suaves (FIGURA 3B). Associada ao material de siltito sobrejacente aos calcários, encontram-se as áreas mais rebaixadas da bacia, com altitudes entre 704 e 800 m, caracterizadas por uvalas amplas e suaves. Nessa região encontram-se formações vegetacionais de cerrado e floresta estacional semidecidual, amplas várzeas e matas ripárias, e terraços fluviais com camadas muito espessas de sedimentos de origem do Grupo Bambuí (verificou-se em campo profundidades de até 3,4 m). Nas áreas de fitofisionomia herbácea-arbustiva com cultivo encontram-se os sistemas de irrigação da Embrapa Milho e Sorgo e plantações de eucalipto.

3.2 Mapa convencional de solos

O mapeamento de solos realizado na bacia resultou em 21 unidades de mapeamento (UM), as quais compreendem 19 subordens de solos de oito classes distintas, sendo elas: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos e Nitossolos (FIGURA 4). No Apêndice C é apresentada a legenda estendida das UMs.



- CHd** CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico
- CHe** CAMBISSOLO HÚMICO Eutrófico (proposta)
- CXbd1** CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico
- CXbd2** CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico + ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico + Afloramento rochoso
- CXve** CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico + Afloramento rochoso
- CYbe** CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico + GLEISSOLOS MELÂNICOS Ta Eutróficos
- LVA d1** LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico.
- LVA d2** LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico
- LVA d3** LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico + LATOSSOLO AMARELO Distrófico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico
- LVd1** LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico
- LVd2** LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico
- LVd3** LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico
- LVd4** LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico + LATOSSOLO AMARELO Distrófico
- LVe** LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico
- MD** CHERNOSSOLO RÊNDZICO Órtico + CHERNOSSOLO RÊNDZICO lítico + LUVISSOLO CRÔMICO Pálico + Afloramento rochoso
- MXo** CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico + Afloramento rochoso
- NVe** NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico
- PVAd** ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico nitossólico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico
- PVe** ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico + NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico + LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico
- RY** NEOSSOLO FLÚVICO + Afloramento rochoso
- TCp** LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico

Figura 4 – Mapa convencional de solos semidetalhado⁴.

⁴ As classes de solos Chernossolos não foram classificadas até o 4º nível categórico, uma vez que não havia informações suficientes para a verificação de atendimento aos critérios do SiBCS (EMBRAPA, 2013).

A unidade de mapeamento LVAd3 é a de maior extensão espacial, compreendendo 2,64 km² da área total da bacia (17,9 %), e corresponde a uma associação de Latossolos Vermelho-Amarelos com Latossolos Vermelhos, Latossolos Amarelos e Cambissolos Háplicos (TABELA 1). As outras UMs principais foram PVe (Argissolo Vermelho eutrófico), com 2,60 km² (17,6 %), e LVAd2 (Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico), com 1,53 km² (10,3 %).

Tabela 1 – Áreas das Unidades de Mapeamento (UM).

Unidades de Mapeamento		Área (km ²)	Área (%)
CHd	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico	0,37	2,5
CHe	CAMBISSOLO HÚMICO eutrófico (proposta)	0,05	0,4
CXbd1	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico	1,25	8,4
CXbd2	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico + ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico + Afloramento de rochoso	0,92	6,2
CXve	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico + Afloramento de rochoso	0,12	0,8
CYbe	CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico + GLEISSOLOS MELÂNICOS Ta Eutróficos	0,61	4,2
LVAd1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico	1,19	8,0
LVAd2	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico	1,53	10,3
LVAd3	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico + LATOSSOLO AMARELO Distrófico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico	2,64	17,9
LVd1	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico	0,20	1,4
LVd2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	0,10	0,7
LVd3	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	0,39	2,6
LVd4	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico + LATOSSOLO AMARELO Distrófico	1,02	6,9
LVe	LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	0,56	3,8
MD	CHERNOSSOLO RÊNDZICO Órtico + CHERNOSSOLO RÊNDZICO lítico + LUVISSOLO CRÔMICO Pálico + Afloramento de rochoso	0,33	2,2
MXo	CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico + Afloramento de rochoso	0,18	1,2
NVe	NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico	0,10	0,7
PVAd	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico nitossólico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico	0,37	2,5
PVe	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico + NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico + ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico + LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico	2,60	17,6

	nitossólico		
RY	NEOSSOLO FLÚVICO + Afloramento de rochoso	0,01	0,1
TCp	LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico	0,22	1,5

Considerando os componentes principais das unidades de mapeamento, as classes de solos de maior área relativa na bacia foram os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Argissolos Vermelhos, respectivamente (TABELA 1). Por outro lado, quando contabilizada a participação nas UMs, os Cambissolos Háplicos e os Latossolos Vermelhos, nessa ordem, foram as classes de maior ocorrência.

Em relação a distribuição das classes de solos na paisagem, as regiões de relevo suave ondulado a ondulado e de baixa concentração de rugosidade, tanto nas áreas mais rebaixadas quanto nos topos de morros, favoreceram a ocorrência de solos mais profundos (FIGURA 5). Os Latossolos Vermelhos, Amarelos e Vermelho-Amarelos das unidades de mapeamento LVAd1, LVAd2, LVAd3, LVd1, LVd2, LVd3, LVd4 e LVe ocorreram em litologias do Grupo Bambuí, predominantemente sobre siltitos (FIGURAS 5 e 6). Além disso, compreenderam quase que totalmente os topos de morros e interflúvios das porções central e jusante da bacia, inclusive nas áreas registradas com as maiores altitudes da bacia (> 925 m) (FIGURA 6). Associadas aos Latossolos estão, predominantemente, fitofisionomias de cerrado, de floresta estacional semidecidual e de transição entre os dois tipos, de portes arbóreo e herbáceo-arbustivo, e as áreas de plantio da Embrapa.

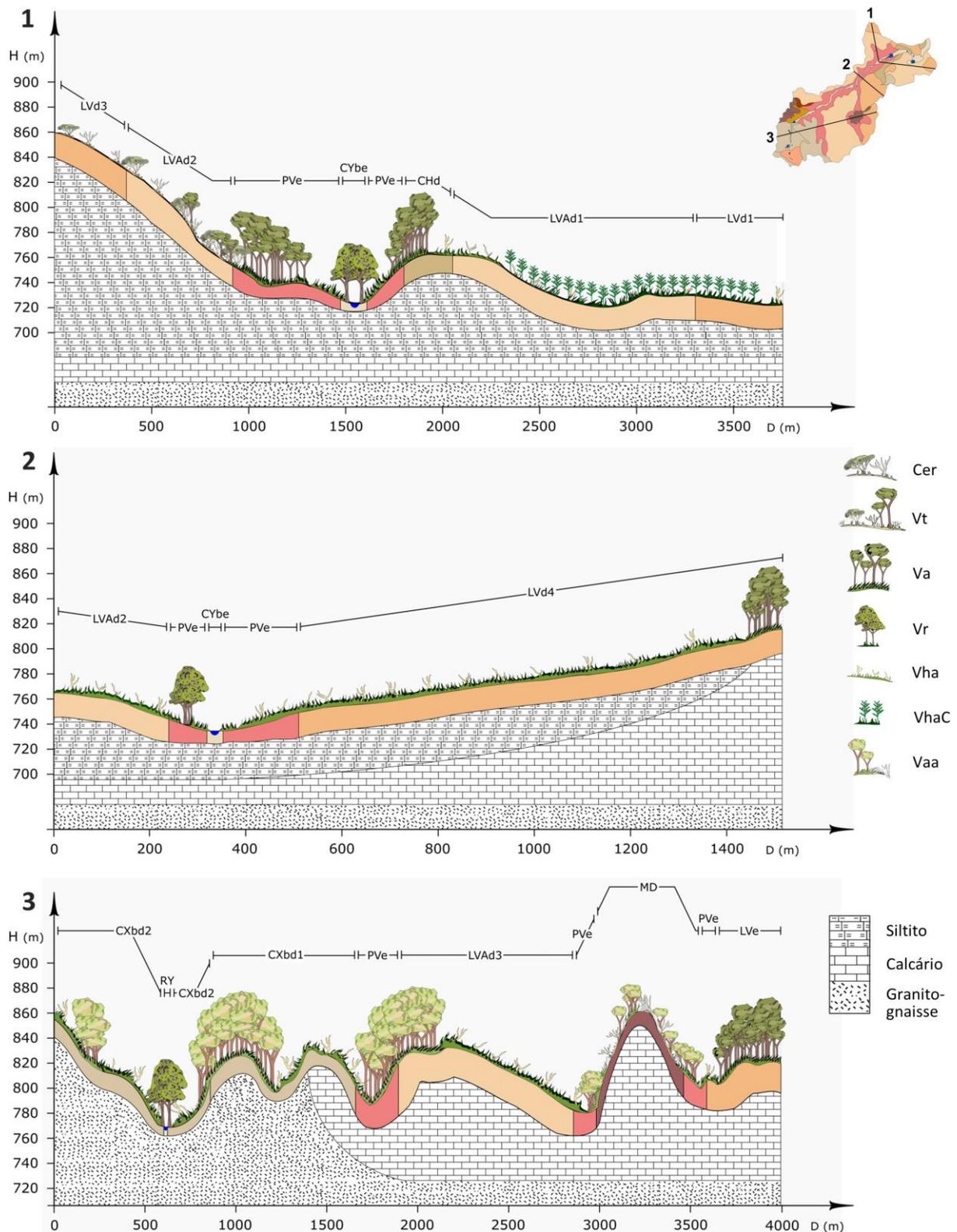


Figura 5 – Perfis topográficos de três transectos na bacia.

*A escala litológica não é real.

**Fitofisionomias: Var - Várzea; Vr - Mata Ripária; VhaC - Vegetação Herbáceo-Arbustiva em Área de Cultivo; Vha - Vegetação Herbáceo-Arbustiva; Cer – Cerrado; Vt - Vegetação de transição Cerrado/Mata Atlântica; Va - Vegetação Arbórea; Vaa - Vegetação Arbórea de Altitude.

***UMs: CHd - Cambissolo Húmido distrófico; CXbd - Cambissolo Háptico Tb distrófico; CVbe – Cambissolo Flúvico Tb eutrófico; LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVe - Latossolo Vermelho eutrófico; MD - Chernossolo Rêndzico; PVe - Argissolo Vermelho eutrófico; RY - Neossolo Flúvico.

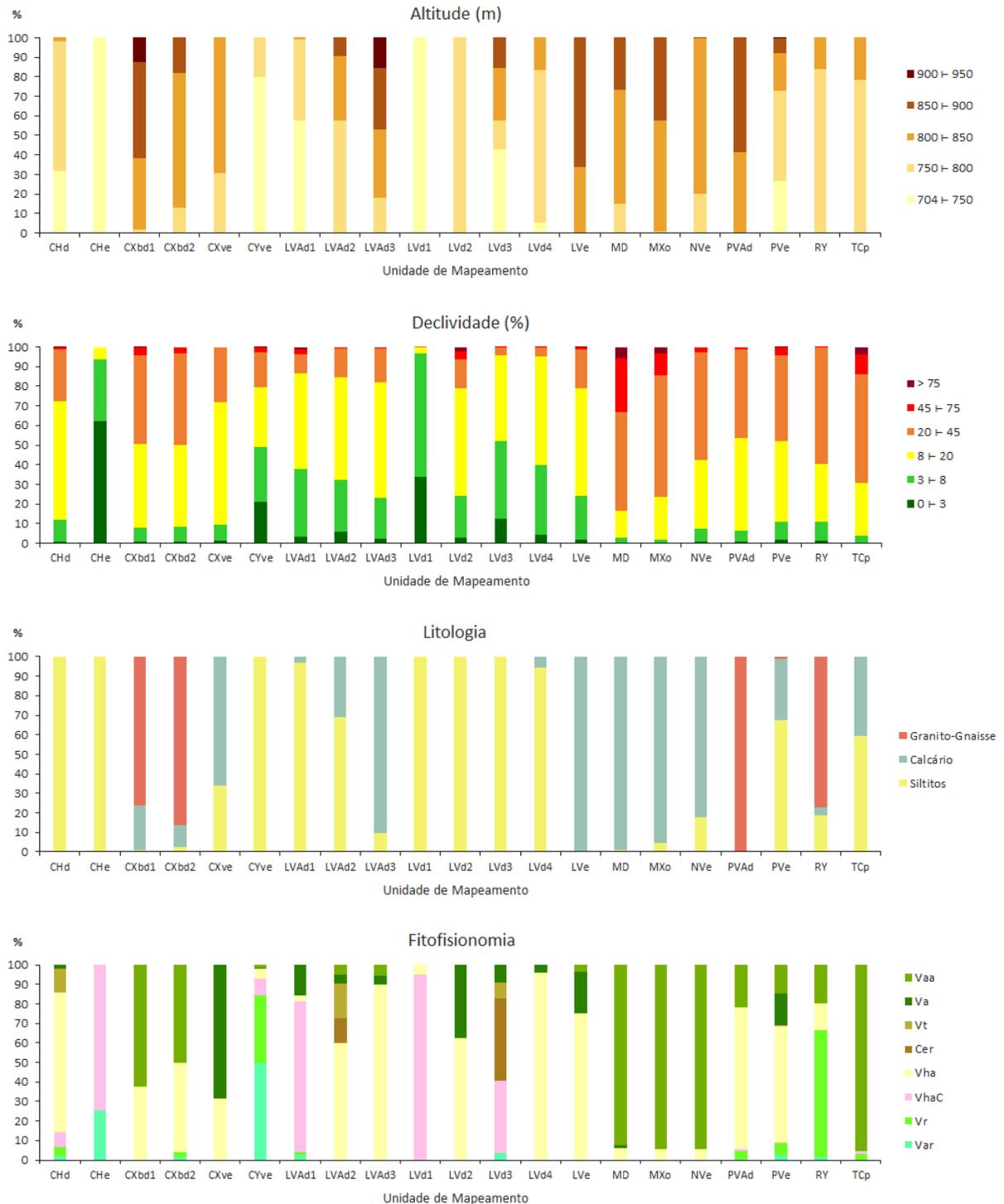


Figura 6 – Relação dos aspectos de paisagem com as Unidades de Mapeamento (UM).

*Fitofisionomias: Var - Várzea; Vr - Mata Ripária; VhaC - Vegetação Herbáceo-Arbustiva em Área de Cultivo, Vha - Vegetação Herbáceo-Arbustiva, Cer - Cerrado, Vt - Vegetação de transição Cerrado/Mata Atlântica, Va - Vegetação Arbórea, Vaa - Vegetação Arbórea de Altitude.

**UMs: CHd - Cambissolo Húmico distrófico; CHe - Cambissolo Húmico eutrófico; CXbd - Cambissolo Háptico Tb distrófico; CXve - Cambissolo Háptico Ta eutrófico; CYbe - Cambissolo Flúvico Tb eutrófico; LVAAd - Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVe - Latossolo Vermelho eutrófico; MD - Chernossolo Rêndzico; MXo - Chernossolo Háptico órtico; NVe - Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVe - Argissolo Vermelho eutrófico; RY - Neossolo Flúvico; TCp - Luvissoilo Crômico pálico.

***A tabela não desconsiderou os erros embutidos do MDE e as limitações de escala dos mapeamentos de litologia e fitofisionomia.

Os Chernossolos Rêndzicos e Háplicos das unidades de mapeamento MD e MX prevaleceram em áreas com alta concentração de rugosidade do terreno, com declividades predominantes entre 20 e 75 % (forte ondulado e montanhoso), além de ocorrências em declives escarpados (> 75 %) (FIGURA 6). As duas UMs estão distribuídas em maiores proporções entre altitudes de 775 a 875 m, sob formações vegetacionais arbóreas, inclusive “mata seca”, e sobre afloramentos rochosos associados ao calcário.

Os Gleissolos Háplicos (GX), Gleissolos Melânicos, Cambissolos Flúvicos (CY) e Neossolos Flúvicos (RY), das unidades de mapeamento CYbe e RY, encontram-se predominantemente em áreas de várzea e mata ripária. A UM CYbe ocorreu predominantemente nos siltitos do Grupo Bambuí, 70 % da área da UM RY foi verificada sobre material de granito-gnaiss, associado a afloramentos rochosos (FIGURA 6). Os Gleissolos e os Cambissolos Flúvicos ocorreram em maiores proporções nas áreas de menores altitudes da bacia, entre 704 e 775 m, onde o relevo prevalente é plano a ondulado. Os Neossolos Flúvicos, por outro lado, foram mapeados em áreas de topografia mais irregular dentro de um intervalo altimétrico de 775 a 825 m.

As unidades de mapeamento CHd e CHe compreenderam Cambissolos Húmicos e Háplicos em áreas sobre siltitos e sedimentos retrabalhados da Formação Serra de Santa Helena. Esses solos localizam-se nas porções mais rebaixadas da bacia e estão associados a uma alta variabilidade topográfica (entre 0 e 45 %) e a fitofisionomias de porte herbáceo-arbustivo em áreas de reserva legal e de cultivo.

Os Cambissolos Háplicos das unidades de mapeamento CXbd1, CXbd2 e CXve, ocorreram principalmente em áreas de declividades onduladas e forte onduladas entre as cotas 775 e 900 m. Os solos distróficos são predominantemente derivados do granito-gnaisses da região montante da bacia, enquanto que os eutróficos foram identificados estritamente sobre material do Grupo Bambuí, próximos a afloramentos de calcário. A ocorrência dos Cambissolos Háplicos, no geral, se deu em maiores proporções sob fitofisionomias arbóreas. Os Argissolos Vermelho-Amarelos e os Cambissolos Háplicos da unidade de mapeamento PVAd ocorreram em condições fisiográficas muito semelhantes aos solos das UMs CXbd1 e CXbd2.

As unidades de mapeamento NVe e TCp, ocorreram em condições geográficas semelhantes. Ambas as unidades se concentraram em áreas restritas do quadrante oeste da bacia, sob uma cobertura vegetal arbórea em um relevo ondulado e forte ondulado. Elas encontram-se dispostas sob material de siltito e calcário em altitudes que variam predominantemente entre 750 e 850 m.

A unidade de mapeamento PVe apresentou uma alta variabilidade de subordens de solos, sendo elas: Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, e Nitossolos, Luvisolos e Cambissolos Háplicos. Estes solos foram observados principalmente nos terços médio e inferior da vertente em declives que variam entre suave ondulado e forte ondulado. A grande extensão dessa UM compreendeu altimetrias variadas, as quais se concentraram entre cotas de 725 a 850 m. Também se verificou uma alta diversidade fitofisionômica na UM PVe, sendo as formações florestais de estratos herbáceo e arbustivo as de maior expressão espacial. A ocorrência dos solos dessa unidade de mapeamento se deu em proporções de quase 99 % sobre materiais de siltito e calcário do Grupo Bambuí (FIGURA 6).

A partir dos transectos dos perfis esquemáticos, é possível observar o predomínio de unidades de mapeamento de Latossolos (LVAd1, LVAd2, LVAd3, LVd1, LVd3, LVd4 e LVe) como solo principal em unidades de vertente com declives mais suaves, em contraste com as de Cambissolos (CHd, CXbd1 e CXbd2) e Chernossolos (MD) em áreas de topografia irregular (FIGURA 5). Os Argissolos, Nitossolos, Luvisolos e Cambissolos da UM PVe ocorreram em posições intermediárias da paisagem, entre os Latossolos e os solos hidromórficos (FIGURA 5) e entre os Latossolos e os Chernossolos associados ao afloramento de calcário da região central da bacia (FIGURA 5). A unidade de mapeamento RY apresentou uma ocorrência mais restritiva, devido às condições fisiográficas locais, que a CYbe.

Ao analisar as amostras descritas em campo, verificou-se que a litologia apresentou maior relação com as propriedades físicas e morfológicas dos solos do que a classificação em si. Como é possível observar na Figura 7, a partir da composição textural dos perfis descritos em campo, os solos formados a partir de rochas metapelíticas, predominantemente siltitos da Formação Serra de Santa Helena, apresentaram elevada concentração de argila, com destaque para os Latossolos, os quais compreenderam textura muito argilosa, com proporções acima de 70 % de argila. Os solos sob material do granito-gnaiss, do Embasamento

Cristalino, por outro lado, apresentaram valores das frações argila e areia próximos ente si.

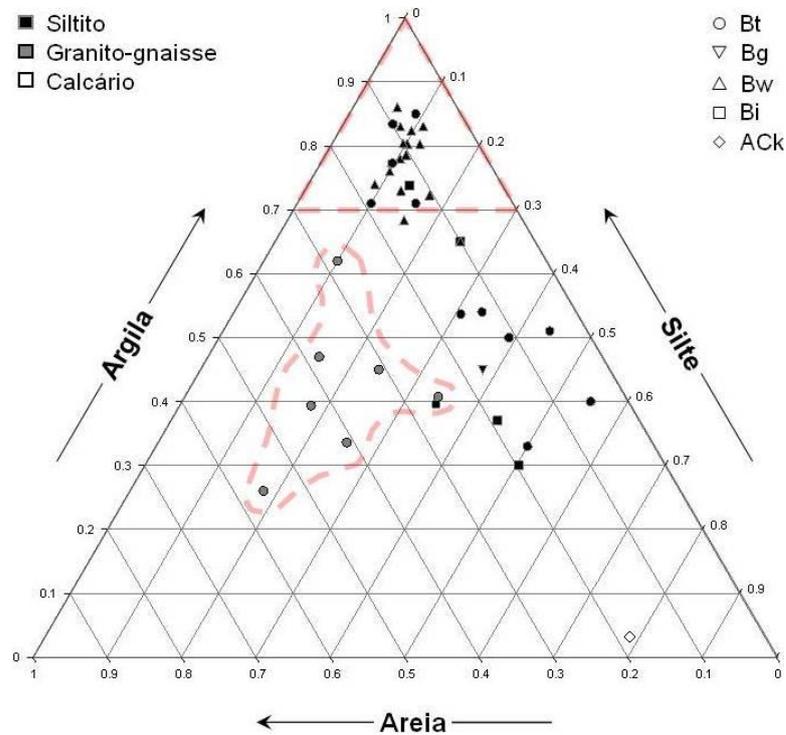


Figura 7 – Distribuição textural de horizontes diagnósticos selecionados por litologia.

A grande variabilidade de solos mapeados está relacionada principalmente a diversidade litológica, fitofisionômica e topográfica da bacia. A posição do solo na paisagem é um importante condicionante na sua formação, a qual associada à morfologia do relevo e a disponibilidade hídrica apresenta significativo controle sobre os processos pedogenéticos, influenciando diretamente na velocidade do fluxo de água superficial e subsuperficial, na morfogênese e na deposição de sedimentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A grande diversidade de solos identificados e mapeados na bacia do córrego Marinheiro foi possibilitada devido à grande variabilidade geomorfológica, fitofisionômica e litológica existente.

As diferentes litologias, no geral, demonstraram maior influência nas propriedades dos solos do que nas classes propriamente ditas.

Os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos foram as classes de solo de maior ocorrência espacial na bacia, enquanto os Cambissolos Háplicos se mostraram aqueles de maior participação entre as 21 unidades de mapeamento identificadas.

Constatou-se uma forte assimetria na bacia evidenciada pelas características topográficas e pela variação morfológica do vale em diferentes compartimentos fisiográficos.

.
.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, M. C. C. Relação solo-paisagem: conceitos, evolução e aplicações. *Ambiência*, v. 8, n. 3, p. 963-982, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de Paisagem e sua Utilização em Levantamentos Pedológicos. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Sergipe, v. 6, n. 1, p. 104-114, 2006.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litosseqüência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 3, p. 519-529, 2007.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 8, p. 903-916, 2010.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. *Informações básicas para a gestão territorial: Região de Sete Lagoas – Lagoa Santa*. Caracterização geomorfológica. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1994.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Mapeamento geológico da região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Morais, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000) – Texto Explicativo. In: Projeto Vida. Belo Horizonte: CPRM, 1991. (versão CD-ROM, 2003).

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Projeto Sete Lagoas – Abaeté. Belo Horizonte: CPRM, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/9xk0t3>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

COSTA, T. C. C.; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, L. M. T.; VIANA, J. H. M. Probabilistic Classification of Tree and Shrub Vegetation on Phytogeographic System. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, v. 4, p. 315-330, 2015.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. *Geomorphology*, v. 12, p. 60-76, 1968.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Advances in Agronomy*, v. 23, p. 51-87, 1971.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. *Manual de métodos de análise do solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 2011. 230p.

ESPÍNDOLA, C. R.; CARVALHO, W. A. Relações entre a natureza dos solos e suas posições na paisagem na Bacia de Capivara, Botucatu (SP). *Científica*, v. 14, p. 29-37, 1986.

ESRI: ArcGIS 10.1. Redlands, California: Environmental Systems Research Institute; 2012.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeol Journal*, v. 23, n. 7, p. 1499-1513, 2015.

GALVÃO, P.; HIRATA, R.; CORDEIRO, A.; BARBATI, D.; PEÑARANDA, J. Geologic conceptual model of the municipality of Sete Lagoas (MG, Brazil) and the surroundings. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, v. 88, n. 1, p. 35-53, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271p.

IPPOLITI, G. A.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R.; SOUZA, E. Análise digital do terreno: Ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de "Mar de Morros" (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 2, p. 269-276, 2005.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. *Geociências*, Rio Claro, v. 19, p. 90-106, 2000.

MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos. *Mapeamento Digital de Classes e Atributos de Solos: Métodos Paradigmas e Novas Técnicas*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 19 p.

MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. *Soil Research*, v. 4, p. 183-198, 1935.

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

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, p. 869-878, 2002.

MULLA, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil Spatial Variability. In: SUMMER, M. E. *Handbook of Soil Science*. New York: CRC Press, 1999. p. A321-A351.

PANOSO, L. A.; RAMOS, D. P.; BRANDÃO, M. *Solos do campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 5. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

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

RAMOS, M. V. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. W. Veredas do triângulo mineiro: solos, água e uso. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 30, n. 2, p. 283-293, 2006,

ROSSI, M.; QUEIROZ NETO, J. P. Relações solo-paisagem em regiões tropicais úmidas: o exemplo da Serra do Mar em São Paulo, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, v. 14, p. 11-23, 2001.

RUGGIERO, P. G. C.; PIVELLOI, V. R.; SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E.; PIRES NETO, A. G. Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos?. *Acta Botanica Brasílica*. [online], v. 20, n. 2, p. 383-394, 2006.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Science*, v. 82, p. 441-445, 1956.

SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V. Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.

SANCHEZ. R. B.; JÚNIOR. J. M.; SOUZA. Z. M. de. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.

SANTOS, H. G. dos; HOCHMÜLLER, D. P; CAVALCANTI, A. C.; RÊGO, R. S.; KER, J. C.; PANOSO, L. A.; AMARAL, J. A. M. do. *Procedimentos normativos de levantamentos pedológico*. Brasília: Embrapa-SPI, 1995. 101p.

SANTOS, H. G. dos; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B.; LUMBRERAS, J. F.; ANJOS, L. H. C. dos; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. A. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 6. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2013. 92p.

SILVEIRA, C. T. *Análise Digital do Relevo na Predição de Unidades Preliminares de Mapeamento de Solos: Integração de Atributos Topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e Redes Neurais Artificiais*. 2010. 154 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SIRTOLI A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Scientia Agraria*, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.41, n. 5, p. 812-816, 2011.

TERAMOTO, E. R.; LEPSCH, I. F.; VIDAL-TORRADO, P. Relações solo, superfície geomórfica e substrato geológico na microbacia do ribeirão Marins (Piracicaba - SP). *Scientia Agrícola*, v. 58, p. 361-371, 2001.

TROEH, F.R. Landform equations fitted to contour maps. *Soil Science Society American Journal*, v. 263, p. 616-27, 1965.

TULLER, M. P. Carta geológica. *Programa Geologia do Brasil*. Serviço geológico do Brasil - CPRM. Escala 1:100.000. 2009.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S.; COOPER, M. Pedogênese em uma seqüência Latossolo-Podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 4, p. 909-921, 1999.

WESSEL, B. *TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document*. Project Report. EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.0. 2013. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/93565/>>.

CAPÍTULO 2

MODELO DE PREDIÇÃO ESPACIAL APLICADO AO MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS NA BACIA DO CÓRREGO MARINHEIRO, SETE LAGOAS (MG)

RESUMO

Informações advindas de levantamentos de solos, como suas propriedades e distribuição, são essenciais para o planejamento do manejo e uso da terra, otimização da expansão urbana e rural, e preservação ambiental. Em função da necessidade de suprir uma crescente demanda por levantamentos de solos detalhados no Brasil, o Mapeamento Digital de Solos (MDS) surge como uma importante técnica de predição e espacialização de solos, que permite otimizar os mapeamentos, tornando-os mais rápidos, reproduzíveis e viáveis economicamente. Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar a performance de um modelo de predição de solos (MPS) para a bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG). O modelo proposto foi criado a partir do método de pesos de evidência implementado no *software* livre Dinamica EGO. A amostragem de solos utilizada como variável resposta foi composta por 42 perfis e 157 pontos de verificação, todos analisados e descritos em trabalhos de campo. Foram gerados mapas de probabilidade para cada uma das 16 classes de solos amostradas, os quais apresentaram alta correlação espacial com a paisagem. As altas probabilidades (acima de 95%) de cada classe foram combinadas em um único mapa de solos, do qual resultaram 12 unidades de mapeamento (UM). A partir de 500 pontos gerados aleatoriamente e outros 28 pontos extras verificados em campo, foi realizada a validação do mapa predito pelo método de comparação por *overlay* com o mapa de referência. Latossolos, Argissolos, Nitossolos e Cambissolos foram as classes de maior ocorrência entre as UMs, sendo a primeira com maior participação total, de aproximadamente 50%. Quando comparados visualmente, os mapas de solos predito e o de referência obtido por métodos convencionais apresentaram similaridades entre os delineamentos e as distribuições das unidades de mapeamento, observando-se uma compatibilidade entre os mapas de 81,8% e 81,5%, respectivamente. No entanto, houve no mapa predito ocorrências de solos que, no mapa convencional não encontraram correspondência, como as manchas de Chernossolos. De modo geral, o modelo digital apresentou um desempenho satisfatório na predição da ocorrência espacial das classes de solos na bacia, caracterizando-se como uma técnica promissora por possibilitar que regiões sem informações sejam previamente mapeadas, otimizando custos e tempo de mapeamento.

Palavras-chave: levantamento de solos, pesos de evidência, Dinamica EGO, unidades de mapeamento de solos.

CHAPTER 2

SPATIAL PREDICTION MODEL APPLIED TO DIGITAL MAPPING SOIL IN MARINHEIRO STREAM WATERSHED, SETE LAGOAS (MG)

ABSTRACT

Informations coming from soil surveys, as their properties and distribution, are essential for management and land use planning, optimization of urban and rural expansion, and environmental preservation. Because of the need to supply a growing demand for detailed soil surveys, Digital Mapping Soil (MDS) emerges as an important technique of soil prediction and distribution, which allows to optimize the mappings, making them faster, replicable and viable economically. In this context, the aim of this study is to develop and evaluate the performance of a soil prediction model (SPM) for the Marinheiro stream watershed, Sete Lagoas (MG). The proposed model was created from the weights of evidence method implemented the open source software Dinamica EGO. The soil sample used was composed of 42 soil profiles and 157 check points, all analyzed and described in fieldworks. Probability maps were generated for each of the 16 sampled soil classes, which showed high spatial correlation with the landscape. The high probability (over 95%) of each class were combined into a single soil map, which resulted in 12 mapping units (MU). From 500 points randomly generated and another 28 extra points checked in the fieldworks, it was performed the validation of the predicted map by the method of comparison by overlay with the reference map. "Latosolos", "Argissolos", "Nitossolos" and "Cambissolos" (Brazilian soil classification system's classes) were the most frequent classes among the MUs, and the first class has the highest total participation, approximately 50%. When compared visually, the predicted and conventional soil maps showed similarities between the outlines and the distribution of mapping units, observing a compatibility between the maps of 81.8% and 81.5%, respectively. However, there was in the predicted map soils occurrences that in the conventional map did not find any matching, like "Chernossolos" (Brazilian soil classification system's classes) spots of MU "MX". In general, the digital model presented a satisfactory performance in predicting the spatial occurrence of soil classes in the watershed, characterizing itself as a promising technique for enabling that regions without information are previously mapped, optimizing costs and mapping time.

Key-words: soil survey, weights of evidence, Dinamica EGO, soil mapping units.

1. INTRODUÇÃO

O uso e a ocupação racionais da terra, bem como a conservação dos recursos naturais, estão ligados diretamente ao reconhecimento das potencialidades e fragilidades dos tipos de solos, tornando os mapeamentos pedológicos ferramentas cada vez mais importantes. Informações advindas de levantamentos de solos, como suas propriedades e distribuição, são essenciais para o planejamento do manejo e uso dos solos, otimização da expansão urbana e rural, e preservação ambiental (FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

A escassez de mapeamentos de solos detalhados na maior parte do território nacional representa um obstáculo para o adequado planejamento do uso da terra (TEN CATEN *et al.*, 2012), uma vez que a escala de mapeamento deve ser compatível com seu uso. A baixa oferta é consequência do abandono da política de mapeamento detalhado sistemático a partir da última década do século passado. A isto, soma-se o custo oneroso, o longo prazo gasto nos mapeamentos de solos convencionais e a falta de mão de obra especializada. Diante dessas dificuldades, e em função da necessidade de mapas detalhados, surge uma demanda por novos métodos quantitativos para identificação e avaliação de classes e atributos dos solos, que permitam otimizar os mapeamentos, tornando-os mais rápidos, reproduzíveis e viáveis economicamente.

Neste contexto e com a crescente utilização generalizada de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), o Mapeamento Digital de Solos (MDS) surge como uma importante técnica de predição e espacialização de solos, auxiliada por bases de dados espaciais, observações e conhecimentos da área a ser mapeada e coleta de pontos amostrais em campo (McBRATNEY *et al.*, 2003; FIGUEIREDO, 2006; CARRÉ *et al.*, 2007; COELHO, 2010). Perfis de solos e covariáveis ambientais são utilizadas como dados de entrada para o treinamento de modelos matemáticos, para a predição espacial de classes de solos em áreas com baixa densidade de amostragem, permitindo que regiões sem informações sejam previamente mapeadas (RYAN *et al.*, 2000). Entre as vantagens do MDS estão a eliminação da subjetividade na delimitação das unidades de mapeamento, a otimização do uso de recursos humanos, a redução global de custos e a possibilidade de extrapolação para novas áreas adjacentes, ao reproduzir o modelo para áreas com características

fisiográficas semelhantes (LAGACHERIE *et al.*, 1995; TEN CATEN *et al.*, 2011; HÖFIG, GIASSON e VENDRAME, 2014).

Para Minasny e McBratney (2007), a qualidade dos dados utilizados para o MDS determina a melhor ou pior resposta do modelo, implicando diretamente na predição espacial das propriedades do solo, para além da sofisticação do método estatístico desenvolvido. Austin *et al.* (2006) afirmam que, independente da quantidade e diversidade de variáveis disponíveis, para o mapeamento de determinado evento, deve-se considerar o conhecimento e a habilidade do analista como um fator mais relevante que o método adotado.

Algumas técnicas têm sido reproduzidas em modelos de predição de solos, sendo as principais: regressões logísticas múltiplas (GIASSON *et al.*, 2006; FIGUEIREDO *et al.*, 2008), lógica fuzzy (NOLASCO-CARVALHO, FRANCA-ROCHA e UCHA, 2009; MENEZES *et al.*, 2014), modelos logísticos com aplicação de componentes principais (TEN CATEN *et al.*, 2009), redes neurais (CHAGAS, 2006; SIRTOLI *et al.*, 2013) e árvore de decisão ou classificação (MORAN e BUI, 2002; GIASSON *et al.*, 2011; TESKE *et al.*, 2015).

Outra técnica potencial ainda não aplicada em mapeamentos de solos é a de pesos de evidência (AGTERBERG & BONHAM-CARTER, 1990; BONHAM-CARTER, 1994). Essa técnica baseia-se na correlação de variáveis e combinação de evidências para a predição do evento modelado. A plataforma de modelagem *Dinamica EGO* desenvolvida pelo CSR/UFMG⁵ (SOARES-FILHO *et al.*, 2002) incorporou esse método ao implementar ferramentas e operadores que possibilitam realizar interações entre variáveis espaciais, a partir de pesos definidos pelo modelador. Diversos autores têm utilizado o método de pesos de evidência implementado pelo *Dinamica* em estudos ambientais, tais como Mas *et al.* (2011), Silvestrini *et al.* (2011), Soares-Filho *et al.* (2012), Yanai *et al.* (2012). Este software livre ainda oferece submodelos de calibração e validação, permitindo ao usuário realizar todas as etapas necessárias para a criação de modelos espacialmente explícitos em um único ambiente de modelagem.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar o desempenho de um modelo de predição espacial de solos (MPS) para a bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG) - gerado pelo método de pesos de evidência,

⁵ <http://csr.ufmg.br/dinamica/>

implementado na plataforma de modelagem Dinamica EGO, a partir de um mapa de referência.

Formação Sete Lagoas (Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), com presença de calcarenitos, calcissiltitos e micritos; e da Formação Santa Helena, com predomínio de rochas sedimentares do tipo siltito e folhelho; sendo as duas Formações pertencentes ao Grupo Bambuí e Supergrupo São Francisco (TULLER, 2009). Em relação à geomorfologia, a bacia encontra-se em um ambiente cárstico, o qual está relacionado à presença de lagoas, cavernas, dolinas e uvalas na região (GALVÃO, HALIHAN E HIRATA, 2015). Sobre o material de pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem depósitos coluviais, predominantemente argilosos, os quais constituem as superfícies de aplainamento, com declividades suaves a planas (CPRM, 1994).

2.2 Modelo Digital de Solos

O método utilizado para a predição das classes de solos foi o de pesos de evidência (AGTERBERG & BONHAM-CARTER, 1990; BONHAM-CARTER, 1994). Essa técnica estatística de inferência espacial consiste em um método Baysiano adaptado para estudos de mudanças temporais e espaciais do uso da terra e integrado aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

O processo de identificação de pesos de evidência se constitui na sobreposição e análise de mapas temáticos para identificação de combinações de evidência, pixel a pixel, buscando detectar a ocorrência ou não do objeto investigado em suporte a uma hipótese, a partir de uma transição espacial. Este processo caracteriza-se, portanto, na correlação espacial entre variáveis, formulação matemática de probabilidades e combinação de evidências (BONHAM-CARTER, 1994; BOLENEUS *et al.*, 2001) e pode ser exemplificada pela seguinte equação:

$$P\{i \rightarrow j | V_1 \cap V_2 \cap V_3 \dots \cap V_n\} = e^{\frac{\sum W_N^+}{1 + e^{\sum W_N^+}}}$$

Onde, $i \rightarrow j$ representa a transição de um estado inicial para um estado final, dado um conjunto de variáveis explicativas ($V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$), as quais são computadas de forma independente, a partir dos pesos de evidência de ocorrência de um evento (W^+). Valores positivos favorecem o evento modelado (quanto maior o valor, mais forte é a associação), enquanto que valores negativos indicam efeito inibidor. Valores iguais ou próximos de zero, por outro lado, não representam associações (BONHAM-CARTER, 1994).

Os pesos são calculados para cada classe do tema evidência e estão diretamente correlacionados com as estimativas da variável resposta. Em outras palavras, os pesos são definidos a partir da associação calculada entre as ocorrências de classes de solos conhecidas e os valores nos mapas são utilizados como preditores. Esse processo é então repetido para todas as possíveis combinações entre as camadas, produzindo um mapa de probabilidade para cada tipo de solo.

Os passos para a predição de solos foram implementados na plataforma de modelagem *Dinamica EGO* (Environment for Geoprocessing Objects) (SOARES-FILHO *et al.*, 2002), onde modelos espacialmente explícitos são executados por meio de operadores matemáticos denominados *functores* (FIGURA 2), além de fornecer algoritmos e submodelos para calibração e validação dos produtos gerados (SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

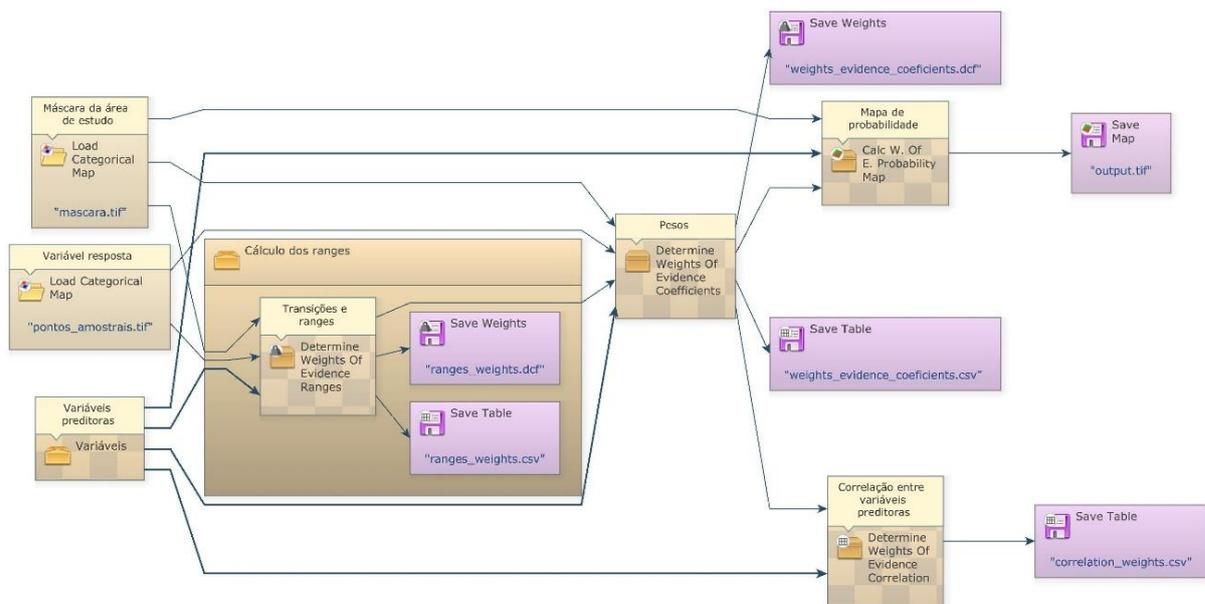


Figura 2 – Modelo de predição de solos implementado no Dinamica EGO.

A amostragem de solos utilizada como variável resposta no modelo foi composta de 42 perfis⁶ e 157 pontos de verificação (APÊNDICE A), todos analisados em trabalhos de campo. Para cada classe de solo identificada utilizou-se informações de primeiro e segundo Nível Categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS *et al.*, 2013).

⁶ Entre os 42 perfis, quatro são de Viana e Costa (2016) e um de Vasconcelos *et al.* (2015).

Para avaliar o potencial de predição para cada classe de solo, a partir das relações entre as variáveis preditivas e as amostras de treinamento, construiu-se um modelo a partir das seguintes etapas:

Preparação da base de dados de entrada (*inputs*): A escolha das variáveis de entrada fundamentou-se em estudos anteriores e na disponibilidade de dados para a área de estudo, levando-se em consideração a análise local de fatores determinantes. Essas variáveis são: mapa litológico, elaborado por Sampaio *et al.* (2016, dados não publicados); mapa de fitofisionomias, confeccionado a partir de uma imagem de satélite Ikonos (2016) e visitas de campo, com checagem de bibliografia pertinente; altimetria, declividade, curvatura planar e de perfil geradas a partir da extensão “Spatial Analyst” do *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012); distância de corpos d’água mais próximos, a partir da rede drenagem extraída do MDE e corrigida por pontos de checagem em campo; Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), segundo Sampaio e Augustin (2014); e Índice de Umidade Topográfica (IUT), gerado a partir da extensão “Topographic Wetness Index” do *software* ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012). As variáveis topográficas primárias e secundárias foram geradas a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de 2014 proveniente do satélite TanDEM-X do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), possuindo resolução espacial de 12 m (WESSEL, 2013). Os dados de *input* foram modificados para atender às seguintes regras: possuir formato matricial de mesmas propriedades espaciais (tamanho de célula, número de linhas e colunas) e serem mapas categóricos (definiu-se intervalos para categorização das variáveis contínuas).

Análise exploratória e seleção de variáveis: Para a criação dos mapas de probabilidade de ocorrência para cada classe de solo, definiu-se os intervalos (*ranges*) para categorização das variáveis contínuas, preservando-se a estrutura dos dados, os quais inicialmente tem valor de peso igual a zero. Para cada intervalo foi calculado o número de transições possíveis pixel a pixel (i = área de estudo/máscara e j = ocorrências de solos amostrados) e os seus respectivos pesos de evidência, contraste (efeito associação/repulsão) e teste de significância estatística. Para a aceitação das variáveis selecionadas para a análise de modelagem, é imprescindível considerar a avaliação da independência espacial entre os pares de mapas para explicar a ocorrência de mesmas classes de solos. A

plataforma *Dinamica* oferece um grupo de métodos de correlação de variáveis, entre eles o Índice de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty*). Este método de tabulação cruzada avalia a dependência espacial em pares de variáveis preditivas, pressupondo-se que valores superiores a 0,5 (ou 50%) indicam alto grau de associação entre elas e, logo, redundância de informações (BONHAM-CARTER, 1994). Em pares com alta correção espacial entre si, deve-se desprezar a variável que menos contribui para a explicação da transição observada. Neste estudo, o limiar de corte foi fixado em 0,4.

Após ajustar o modelo, este foi executado para cada transição especificada somando-se os pesos de evidência e resultando em um mapa de probabilidade de ocorrência para cada classe de solo.

Calibração: Essa etapa consiste na adequação dos parâmetros e ajustes dos pesos de evidência do modelo, de forma a reproduzir com maior nível de certeza os dados empíricos e a realidade observada (ALMEIDA, 2004). Ao estabelecer os pesos para os intervalos das variáveis de *input*, considerou-se que entre um intervalo e outro não poderia haver mudanças bruscas de valores, com exceção para variáveis categóricas, já que as mudanças de solos na paisagem são graduais. Entretanto, os pesos calculados pelo *software* Dinamica muitas vezes apresentam alta variabilidade entre os *ranges* (-1 a +1), sendo necessários ajustes nos mesmos. Essa calibração foi realizada a partir do conhecimento aprofundado das características fisiográficas da bacia, adquirido a partir de um grande número de trabalhos de campo realizados, e consulta a literatura e *experts*, sendo estes últimos também familiarizados com a área de estudo. Além disso, foram realizadas análises visuais comparativas entre os mapas de probabilidade gerados, levando-se em consideração os ruídos resultantes. Em relação à computação dos ruídos, a análise da significância de conjuntos de pixels duvidosos, ou seja, que apresentaram células vizinhas sem padrão contínuo, foi realizada a partir da constatação ou ausência de pontos amostrais.

Delimitação das UMs: O delineamento das unidades de mapeamento foi realizado manualmente, a partir da combinação das manchas de alta probabilidade de certeza, entre 95% e 100%, de cada classe de solo predita. Levou-se em consideração a escala e a proporção de ocorrência dessas manchas e as que apresentaram sobreposição significativa foram agrupadas em uma mesma unidade

de mapeamento. O solo principal de cada UM foi determinado a partir da maior quantidade de perfis descritos existentes na área delimitada.

Validação: Para a avaliação do produto final, o mapa de predição de solos, foram considerados 28 pontos extras coletados em trabalhos de campo (APÊNDICE D). Outros 500 pontos aleatórios foram gerados na área de estudo para fins de comparação com o mapa de solos resultante do levantamento convencional em escala semidetalhada realizado por Oliveira *et al.* (2016, dados não publicados). Estes pontos foram sobrepostos ao mapa de referência para a extração das informações de classes por unidade de mapeamento e posterior comparação com o mapa modelado. Pressupõe-se como uma concordância se pelo menos uma das classes de solos que compõem uma determinada unidade de mapeamento ocorrer simultaneamente nos dois mapas avaliados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise preliminar

A escolha das variáveis entre aquelas disponíveis como *inputs* do modelo se deu a partir do Índice de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty*). Entre as variáveis preditoras selecionadas, não houve pares com alta associação entre si (> 40%), sendo 28% o maior valor de associação identificado (TABELA 1). Dessa forma, todas as variáveis preditoras propostas inicialmente foram utilizadas no modelo.

Tabela 1 – Matriz de correlação entre variáveis preditoras a partir do índice de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty*).

	Alt	Curv H	Curv V	Decliv	Dist	Fito	ICR	IUT	Lito
Alt	-								
Curv H	0.0106	-							
Curv V	0.0226	0.0980	-						
Decliv	0.0287	0.0551	0.0336	-					
Dist	0.1293	0.0025	0.0074	0.0065	-				
Fito	0.1549	0.0452	0.0477	0.0615	0.1019	-			
ICR	0.0419	0.0876	0.0815	0.2233	0.0069	0.0996	-		
IUT	0.0161	0.0530	0.0404	0.0489	0.0058	0.0280	0.0394	-	
Lito	0.2812	0.0243	0.0243	0.0336	0.1486	0.2090	0.0579	0.0149	-

*Alt - Altitude; Curv H - Curvatura Horizontal; Curv V - Curvatura Vertical, Decliv - Declividade; Dist - Distância a Corpos D'água; Fito - Fitofisionomia; ICR - Índice de Concentração de Rugosidade; IUT - Índice de Umidade Topográfica; Lito - Litologia.

Ainda que baixa, as variáveis declividade e ICR apresentaram, dentre os outros pares, uma das maiores associações entre si (22%). Apesar de compreenderem informações semelhantes, essas variáveis representaram importâncias distintas no modelo. O ICR contribuiu com uma maior uniformidade do terreno, auxiliando na geração de manchas mais homogêneas nos mapas gerados pelo modelo, enquanto que a declividade apresentou maior poder de discretização das classes de solos e maior potencial de identificação de ocorrências de pequenas áreas.

3.2 Mapas de probabilidade

A execução do modelo de predição de solos resultou em mapas de probabilidade (MP), de formato matricial, para cada uma das 16 classes de solo informadas na variável resposta (pontos amostrais) (FIGURA 3). Em cada mapa gerado, os pixels representam valores entre 0 e 1 de probabilidade de ocorrência da classe de solo na paisagem.

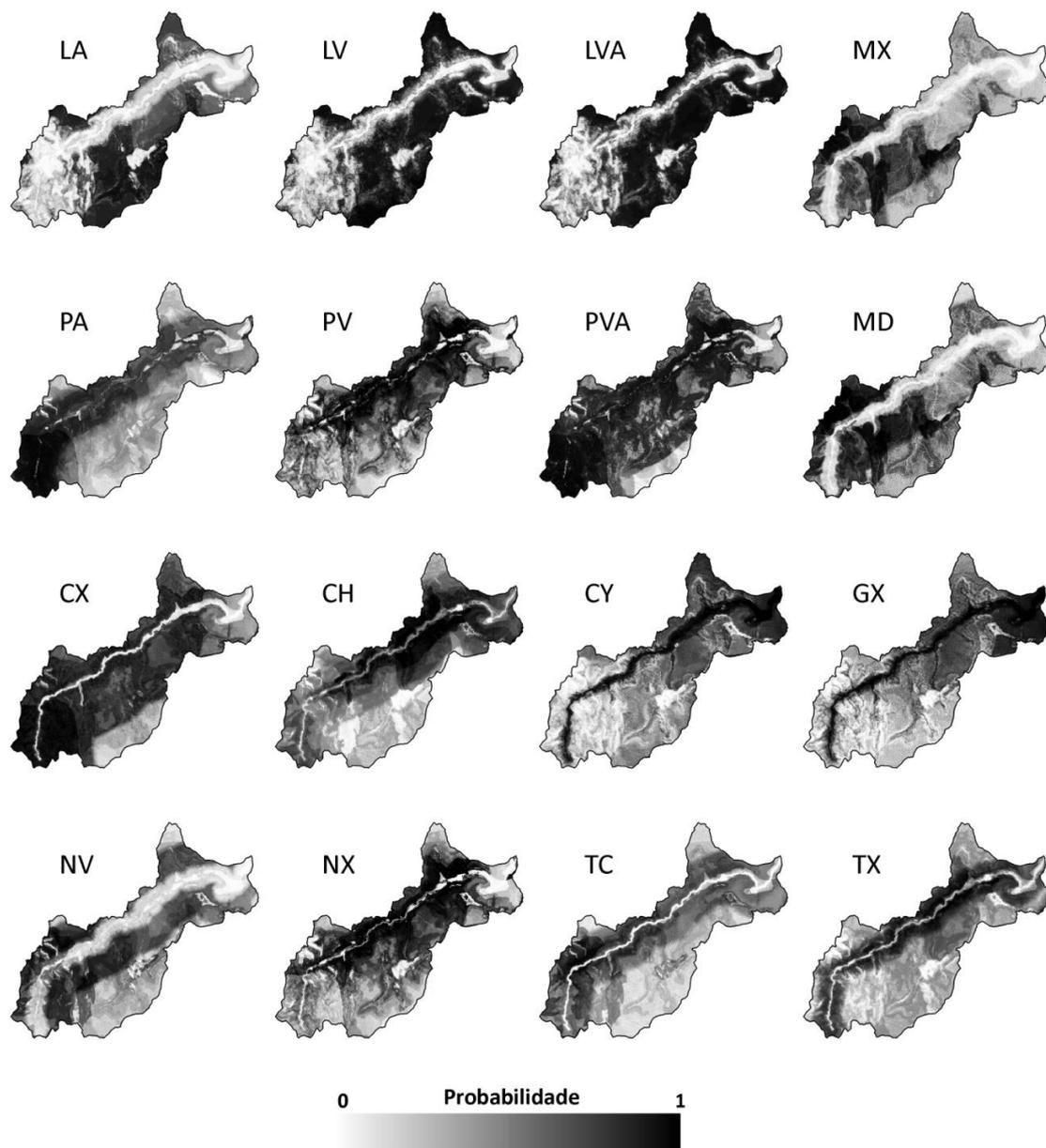


Figura 3 – Mapas de probabilidade de ocorrência por classe de solo na área de estudo. LA (Latosolo Amarelo), LV (Latosolo Vermelho), LVA (Latosolo Vermelho-Amarelo), MX (Chernossolo Háplico), MD (Chernossolo Rêndzico), PA (Argissolo Amarelo), PV (Argissolo Vermelho), PVA (Argissolo Vermelho-Amarelo), CX (Cambissolo Háplico), CH (Cambissolo Húmico), CY (Cambissolo Flúvico), GX (Gleissolo Háplico), NV (Nitossolo Vermelho), NX (Nitossolo Háplico), TC (Luvissoilo Crômico), TX (Luvissoilo Háplico).

De maneira geral, os mapas de probabilidade apresentaram uma alta correspondência visual com a paisagem, obtendo um potencial preditivo satisfatório e uma resposta positiva ao método de pesos de evidência.

Os atributos utilizados no modelo não foram capazes de diferenciar os Latossolos Vermelhos dos Vermelhos-Amarelos. Essas duas classes se mostraram altamente correlacionadas com condições fisiográficas semelhantes, além de compreenderem uma alta variabilidade de amostras relativamente próximas umas das outras. As altas probabilidades de ocorrência dos Latossolos Amarelos se deram nas mesmas áreas das outras duas classes, porém em menores proporções.

Os Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, os Cambissolos Húmicos e os Nitossolos e Luvisolos Háplicos, também apresentaram um padrão de distribuição espacial semelhante, uma vez que a localização dos solos amostrados também se encontrou em paisagens similares. Já os Argissolos Amarelos apresentaram maior correlação com os Argissolos Vermelho-Amarelos da porção a montante da bacia. Os Luvisolos Crômicos e os Nitossolos Vermelhos ocorreram em maiores proporções em áreas específicas da área de estudo, o que proporcionou ao modelo maior capacidade de discretização.

A ocorrência dos Cambissolos Háplicos se deu de forma mais distribuída na área de estudo em decorrência da grande variabilidade espacial em que as amostras se encontram. As manchas de alta probabilidade de ocorrência de Chernossolos Rêndzicos e Háplicos, por sua vez, se mostraram pouco distintas entre si. Os solos hidromórficos, Gleissolos Háplicos e Cambissolos Flúvicos, também pouco diferiram entre si, uma vez que ambos se desenvolvem em ambientes muito específicos e diferentes das outras classes.

3.3 Mapa de predição de solos

Os MPs evidenciaram variações de ocorrências de tipos de solos na paisagem de forma detalhada. Cartograficamente, a distribuição espacial de grandes quantidades de classes de solos, como é observado neste estudo, é inviável e de baixa legibilidade, dificultando a interpretação da ocorrência dos solos e, logo, suas delimitações (TESKE *et al.*, 2015). Dessa forma, gerou-se 12 unidades de mapeamento a partir das 16 classes de solos amostradas.

A combinação dos MPs de cada classe de solo em um único mapa, contendo apenas valores entre 95 e 100% de probabilidade de ocorrência para cada pixel, pode ser observada na Figura 4A. As UMs de maior representatividade na área de estudo foram a LV2 e a PV, respectivamente com 5,8 e 2,7 km² (TABELA 2). As classes de ordem Latossolo, Argissolo, Nitossolo e Cambissolo foram as de maior ocorrência entre as unidades de mapeamento, sendo a primeira a com maior participação total (aproximadamente 50%).

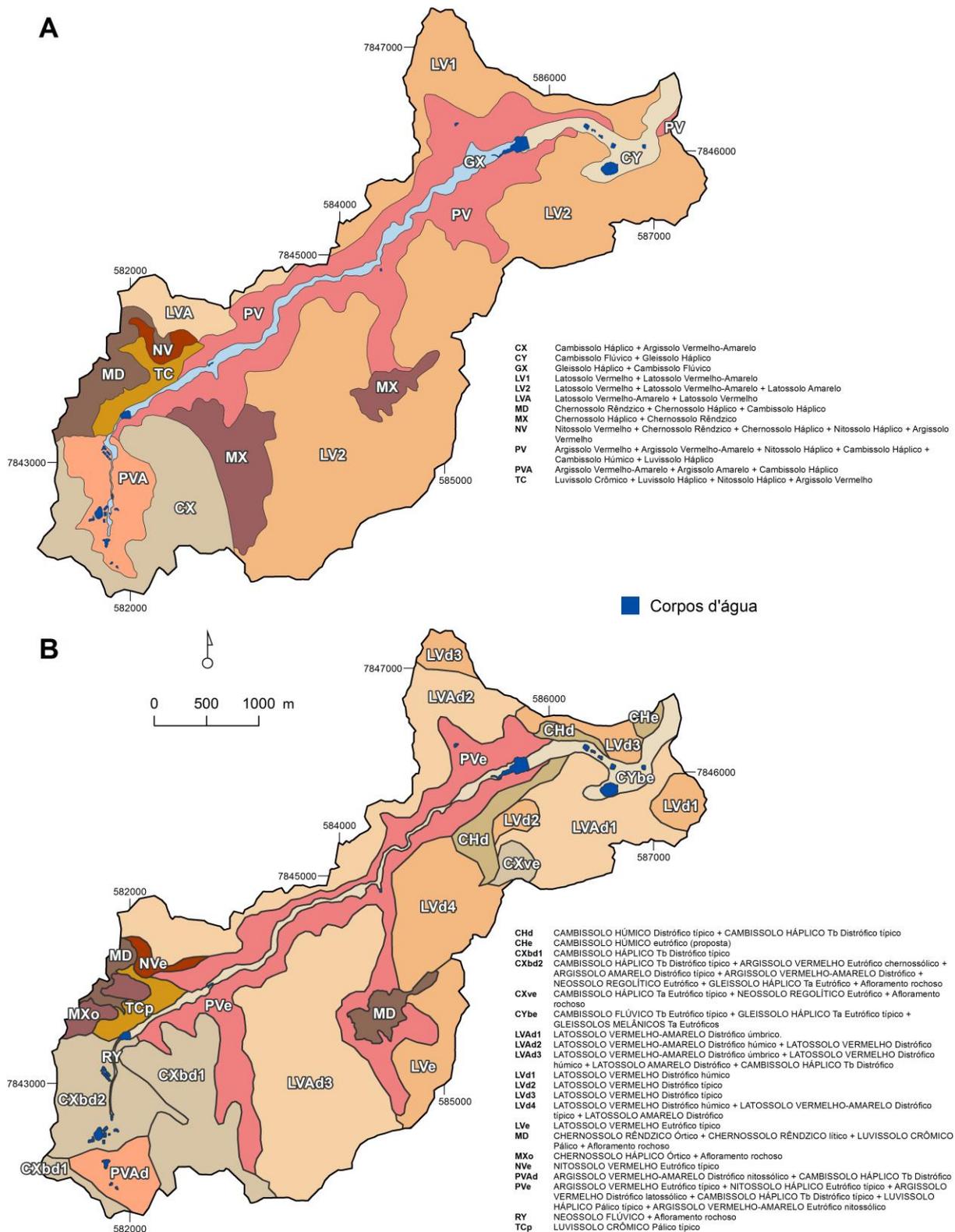


Figura 4 – Comparação entre os mapas de solos (a) mapa de solos predito pelo método de pesos de evidência; (b) mapa de solos de referência (convencional).

Tabela 2 – Áreas das unidades de mapeamento (UM) do mapa de solos predito pelo método de pesos de evidência.

Unidades de Mapeamento		Área	
		km ²	%
CX	Cambissolo Háplico + Argissolo Vermelho-Amarelo	1,4	9,8
CY	Cambissolo Flúvico + Gleissolo Háplico	0,4	2,8
GX	Gleissolo Háplico + Cambissolo Flúvico	0,4	2,8
LV1	Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo	1,2	7,8
LV2	Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Amarelo	5,8	39,1
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Vermelho	0,4	2,9
MD	Chernossolo Rêndzico + Chernossolo Háplico + Cambissolo Háplico	0,4	3,0
MX	Chernossolo Háplico + Chernossolo Rêndzico	0,9	6,2
NV	Nitossolo Vermelho + Chernossolo Rêndzico + Chernossolo Háplico + Nitossolo Háplico + Argissolo Vermelho	0,1	0,7
PV	Argissolo Vermelho + Argissolo Vermelho-Amarelo + Nitossolo Háplico + Cambissolo Háplico + Cambissolo Húmico + Luvisso Háplico	2,7	18,5
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo + Argissolo Amarelo + Cambissolo Háplico	0,7	4,5
TC	Luvisso Crômico + Luvisso Háplico + Nitossolo Háplico + Argissolo Vermelho	0,3	1,8

Quando comparados visualmente, os mapas de solos predito e o de referência obtido por métodos convencionais apresentaram similaridades entre os delineamentos e as distribuições das unidades de mapeamento (FIGURAS 4A e 4B). Entretanto, há no mapa de solos predito ocorrências de solos que no mapa convencional não encontraram correspondência. Na UM MX, por exemplo, há manchas de ocorrência de Chernossolos onde no mapa de referência consta informações para outros tipos de solos, entre eles Argissolos e Cambissolos, predominantemente. Afloramentos de calcário foram identificados no levantamento geológico nesta área, o que indica que a possibilidade de ocorrências de Chernossolos deve ser considerada. A ausência de pontos de amostragem de solos, no levantamento convencional, pode ter levado ao não mapeamento da classe nesta área.

As maiores discordâncias observadas entre os mapas encontram-se na região a jusante da bacia. O mapa de solos convencional apresentou unidades de mapeamento com maior detalhe, como é possível observar a partir das UM LVd1, LVd2, LVd3, CHe e CHd. No mapa digital, essas cinco UM correspondem a apenas duas, sendo estas LV1 e PV.

3.4 Validação

A validação realizada a partir dos pontos de checagem em campo apresentou uma acurácia global de 71,4 %, sendo 20 pontos concordantes dentre os 28. Este resultado se mostrou elevado, demonstrando a efetividade do modelo na predição de ocorrência espacial dos solos da bacia. A comparação por *overlay* entre os mapas de solos, predito e convencional, nos 500 pontos aleatórios gerados resultou na concordância de 409 pontos, representando uma porcentagem de acerto de 81,8 %. Essa técnica comparativa permitiu considerar todas as possibilidades de classes de solos de cada unidade de mapeamento do mapa de referência.

3.5 Análise geral

O método proposto permite ao modelador reproduzir o seu conhecimento da área de estudo e do objeto mapeado de forma dinâmica. Porém, modelos matemáticos possuem limitações, que muitas vezes comprometem os resultados de tal forma a não se obter uma representação espacial aceitável do evento modelado, ou neste caso, uma correlação solo-paisagem satisfatória. Entre as limitações mais comuns estão a baixa amostragem e resolução dos dados de entrada.

Neste trabalho, as amostras utilizadas no modelo de predição foram todas verificadas e descritas em campo. As variáveis topográficas utilizadas foram geradas a partir de um MDE de resolução espacial original de 12 m e os mapas de litologia e fitofisionomia foram corrigidos e detalhados a partir de coletas e observações realizadas em trabalhos de campo.

Apesar dos resultados satisfatórios, no geral, o modelo de predição de solos proposto também apresentou algumas limitações estruturais que comprometeram em certos aspectos a sua performance e, logo, os produtos resultantes. Apesar dos detalhamentos realizados, o mapa litológico utilizado como variável preditiva apresentou uma área mapeada como calcário superestimada em comparação a aquela observada em campo e nas descrições morfológicas dos perfis. Em contrapartida à alta resolução dos dados de *input* derivados do MDE, houve a grande ocorrência de ruídos nos produtos finais, os quais dificultaram a delimitação das unidades de mapeamento. A grande ocorrência de ruídos implicou em um nível significativo de fragmentação das manchas das classes preditas, dificultando em

alguns momentos a identificação de padrões espaciais. Uma possível fonte de erro, no caso deste trabalho, é o próprio modelo usado, um modelo digital de terreno com dados brutos em que parte das elevações corresponde a objetos acima da superfície, como árvores e construções, e que não são passíveis de correção por filtros. Entretanto, para os solos de ocorrência espacial restrita, como os solos hidromórficos, a alta resolução se mostrou diferencial, permitindo a identificação e a predição dos mesmos. Em relação aos pesos de evidência, os pesos de repulsão (negativos) muitas vezes demonstraram maior capacidade preditiva do que os pesos de atração (positivos). A restrição a condições ambientais específicas para determinadas classes de solo no modelo auxiliou na identificação de manchas de alta probabilidade de ocorrência na área mapeada.

As limitações presentes nos mapeamentos de solos não são reservadas especificamente aos meios automatizados. Assim como os modelos digitais, o sistema hoje utilizado para classificações de forma convencional também prediz os tipos de paisagem favoráveis ao desenvolvimento de determinados tipos de solos. O que diferencia as duas formas de mapeamento são basicamente os métodos, uma vez que a maioria das variáveis utilizadas são as mesmas (atributos topográficos e litológicos, imagens de satélite, visitas a campo...), assim como o analista.

O método de predição digital apresenta menos subjetividade na delimitação das manchas de classes de solos individuais. Entretanto, para que o resultado seja coerente com o sistema e a literatura, o analista muitas vezes precisa realizar grandes quantidades de testes, inclusive para que os pesos das variáveis estejam em concordância com o que foi diagnosticado em campo, o que muitas vezes não ocorre. As condições fisiográficas informadas em literatura para a explicação da ocorrência de solos em determinados ambientes muitas vezes são muito específicas, o que dificulta o seu mapeamento, principalmente se este for de maior escala de detalhe, e a delimitação das suas extensões. Solos como Argissolos, Nitossolos e Luvisolos, por exemplo, apresentam condições ambientais de desenvolvimento semelhantes, como constatado no modelo de solos predito, em específico a unidade de mapeamento PV. Logo, o modelo matemático calcula altas probabilidades de ocorrência para cada classe nas mesmas áreas, resultando em sobreposições espaciais que muitas vezes não estão de acordo com a realidade.

Apesar das limitações existentes, a modelagem digital de solos é uma técnica viável e promissora por possibilitar que regiões sem informações sejam previamente mapeadas, otimizando custos e tempo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento da área de estudo, adquirido a partir dos diversos trabalhos de campo realizados, associado à qualidade do banco de dados, foi fundamental no processo de predição das classes de solos na bacia.

A densidade de amostragem utilizada no modelo de predição foi considerada suficiente para o mapeamento realizado na escala proposta. Entretanto, se houvesse um maior número de pontos amostrais, o modelo apresentaria melhores respostas aos pesos de evidência, otimizando o processo de calibração e delimitação das unidades de mapeamento.

Destaca-se a importância de incorporar as variáveis litologia e fitofisionomia ao modelo, devido à alta correlação espacial identificada com as classes de solos. A utilização de apenas atributos derivados do modelo digital de elevação resultaria em um poder de predição limitado e de baixa distinção entre as diferentes classes na paisagem.

O mapeamento digital de solos realizado apresentou um alto desempenho na predição das classes de solos, demonstrando aplicabilidade por permitir a sua extrapolação para regiões onde inexitem informações e que apresentam fisiografia semelhante à área modelada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events. In: APCOM Symposium, 22., 1990, Berlin. *Proceedings...* Berlin: [s.n.], 1990. p. 381-395.

ALMEIDA, C. M. *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil*. 2004. 161 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 2004.

AUSTIN, M.P., BELBIN, L., MEYERS, J.A., DOHERTY, M.D., LUOTO, M. Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: role of artificial data and theory. *Ecological Modelling*, v. 199, p. 197-216, 2006.

BOLENEUS, D. E.; RAINES, G. L.; CAUSEY, J. D.; BOOKSTROM, A. A.; FROST, T. P.; HYNDMAN, P. C. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling. In: United States Geological Survey. [Menlo Park, CA]: U.S. Dept. of Interior, U.S. Geological Survey, 2001. p. 501-512.

BONHAM-CARTER, G. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Nova York: Pergamon, 1994. 398 p.

CARRÉ, A.B MCBRATNEY, T. MAYR, L. MONTANARELLA. Digital Soil Assessments: beyond DSM F. *Geoderma*, v. 142, v. 69-79, 2007.

CHAGAS, C. S. *Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros*. 2006. 239 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

COELHO, F. F.; Giasson, E.; Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.40, n. 10, p. 2099-2106, 2010.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Journal of Educational and Measurement*. v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

COSTA, T. C. C.; SILVA, A. F.; OLIVEIRA, L. M. T.; VIANA, J. H. M. Probabilistic Classification of Tree and Shrub Vegetation on Phytogeographic System. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, v. 4, p. 315-330, 2015.

ESRI: ArcGIS 10.1. Redlands, California: Environmental Systems Research Institute; 2012.

FIGUEIREDO, S. R. *Mapeamento supervisionado de solos através do uso de regressões logísticas múltiplas e Sistema de Informações Geográficas*. 2006. 46 f. (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

FIGUEIREDO, S. R.; S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; Nascimento, P. C. Uso de Regressões Logísticas Múltiplas para Mapeamento Digital de Solos no Planalto Médio do RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2779-2785, 2008.

GIASSON, E.; CLARKE, R. T.; INDA JUNIOR, A. V.; MERTEN, G. H.; TORNQUIST, C. G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in Southern Brazil. *Scientia Agricola*, São Paulo, v. 63, n. 3, p. 262-268, 2006.

GIASSON, E.; SARMENTO, E. C.; WEBERL, E.; FLORES, C. A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steeplands. *Scientia Agricola*, São Paulo, v. 68, p. 167-174, 2011.

HÖFIG, P.; GIASSON E.; VENDRAME, P. R. S. Mapeamento digital de solos com base na extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 49, n. 12, p. 958-966, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. 2. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2012. 271p.

LAGACHERIE, P.; LEGROS, J. P.; BURROUGH, P. A. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*, v. 65, p. 283-301, 1995.

MAS, J. F.; KOLB, M.; HOUET, T.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. C. Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, v. 21, p. 405-430, 2011.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, v. 117, p. 3-52, 2003.

MENEZES, M. D.; SILVA, S. H. G.; MELLO, C. R.; OWENS, P. R.; CURI, N. Solum depth spatial prediction comparing conventional with knowledge-based digital. *Scientia Agricola*, São Paulo, v. 71, n. 4, p. 316-323, 2014.

MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., 2007. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with Matérn covariance function. *Geoderma*, v. 140, p. 324-336.

MORAN, C. J.; BUI, E. Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 16, p. 533-549, 2002.

NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 1, p. 46-55, 2009.

RYAN, P.J., MCKENZIE, N.J., O'CONNELL, D., LOUGHHEAD, A.N., LEPPERT, P.M., JACQUIER, D., ASHTON, L. Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. *Forest Ecology Management*, v. 138, n. 1-3, p. 139-157, 2000.

SAMPAIO T. V. M.; AUGUSTIN C. H. R. R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a Cartografia Geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 1, p. 47-60, 2014.

SANTOS, H. G. dos; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B.; LUMBRERAS, J. F.; ANJOS, L. H. C. dos; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. A. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

SILVESTRINI, R. A.; SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D.; COE, M.; RODRIGUES, H. O.; ASSUNÇÃO, R. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, v. 21, p. 1573-1590, 2011.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; BOTELHO, M. F.; MANTOVAN, L. E. Pedometria apoiada em atributos topográficos, índices espectrais e geologia com uso de redes neurais artificiais. *Geociências*, v. 32, n. 3, p. 516-531, 2013.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C.; CERQUEIRA, G. Dinamica - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; SILVESTRINI, R.; NEPSTAD, D.; BRANDO, P.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A.; COE, M.; LOCKS, C.; LIMA, L.; HISSA, L.; STICKLER, C. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landscape Ecology*, v.27, p. 585-598, 2012.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; COSTA, W. *Modeling environmental dynamics with Dinamica EGO*. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/tutorial.html>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; RUIZ, L. F. C.; SEBEM, E.; PEREIRA, R. S. P. Mapeamento digital de solos através da aplicação de componentes principais em modelos logísticos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p. 7677-7684.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.41, n. 5, p. 812-816, 2011.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, n. 11, p. 1989-1997, 2012.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação de esquemas de amostragem para treinamento de modelos preditores no mapeamento digital de classes de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 1, p. 14-20, 2015.

TULLER, M. P. Carta geológica. *Programa Geologia do Brasil*. Serviço geológico do Brasil - CPRM. Escala 1:100.000. 2009.

VASCONCELOS, B. N. F.; ABRAHÃO, W. A. P.; GUEVARA, Y. Z. C.; MORAES, M. L. B.; PIRES, C. V. Seleção, coleta e confecção de monólitos dos solos do Estado de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35., 2015, Natal. *Anais...* Natal: [s. n.], 2015.

VIANA, J. H. M.; COSTA, T. C. C. Solos sob fragmentos florestais na transição da Mata Atlântica para o Cerrado na região central de Minas Gerais. *Boletim de pesquisa da Embrapa Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, 2016. No prelo.

WESSEL, B. TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document. Project Report. EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GS-PS-0021, Issue 3.0, 2013.

YANAI, A. M.; FEARNside, P. M.; ALENCASTRO GRAÇA, P. M. L.; NOGUEIRA, E. M. Avoided deforestation in Brazilian Amazonia: Simulating the effect of the Juma Sustainable Development Reserve. *For. Ecol. Manag.*, v. 282, p. 78-91. 2012.

CONCLUSÃO GERAL

Os modelos digitais de solos têm se mostrado uma alternativa muito útil em situações onde inexistem informações ou mapas pedológicos de grande escala. Essa técnica permite a predição de solos em locais de difícil acesso e em áreas não contempladas por programas de pesquisa ou de interesse comercial. O método de pesos de evidência, em especial, aplicado ao MDS, possibilita a explicitação da informação, ou seja, torna possível a reaplicação do modelo em outras áreas com características fisiográficas semelhantes, e a melhor compreensão da distribuição espacial de diferentes tipos de solos. Outras vantagens observadas estão na redução da subjetividade de lidar com mapas de probabilidades de ocorrências e de delimitar as unidades de mapeamento. Em contrapartida, como têm-se a dependência direta da qualidade do banco de dados utilizado e das covariáveis ambientais escolhidas como dado de entrada do modelo.

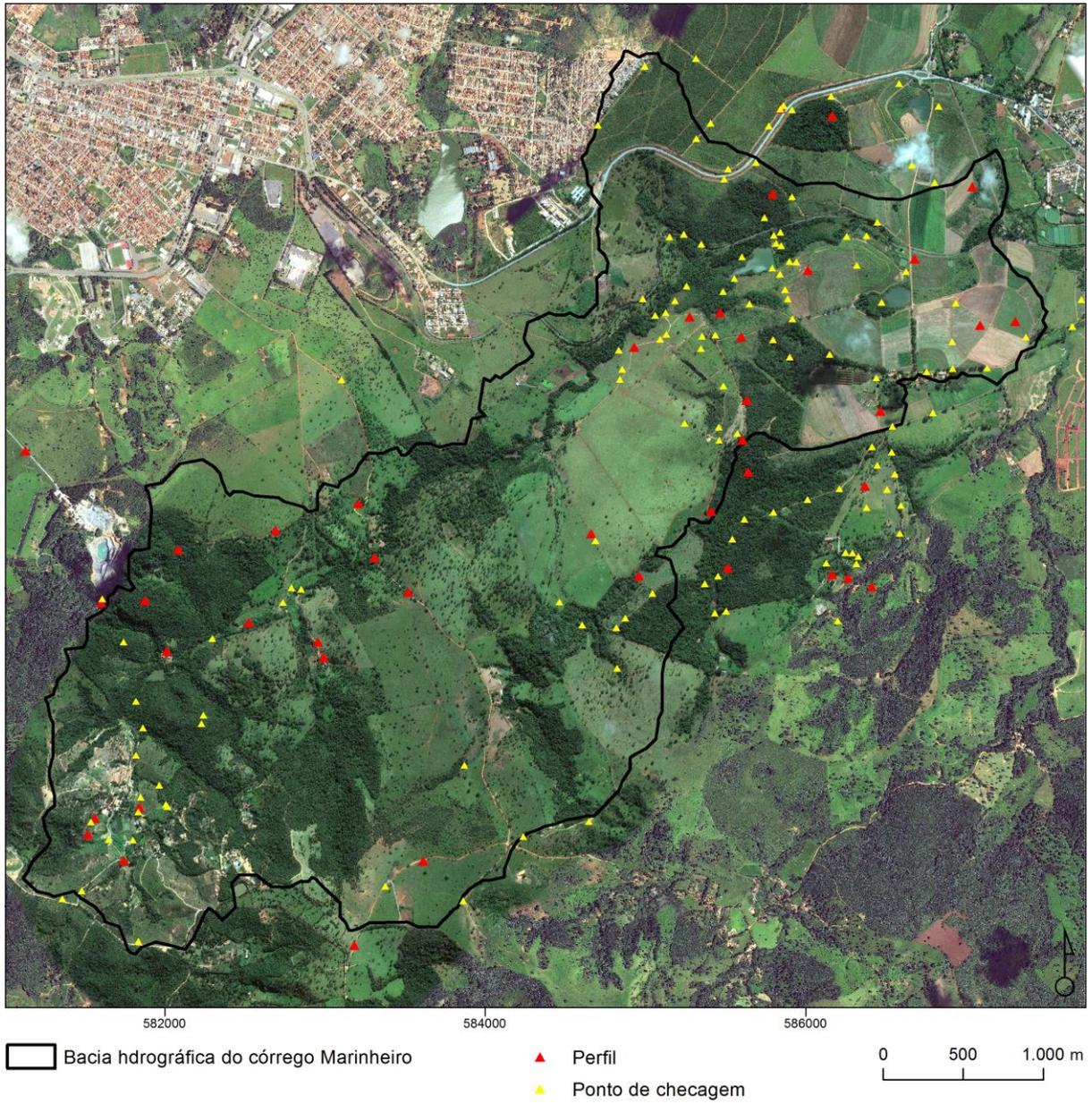
O MDS é ainda uma aproximação dos mapas pedológicos elaborados por métodos tradicionais. As novas ferramentas digitais são complementares, ou seja, auxiliam o mapeamento, apesar de virem ganhando cada vez mais visibilidade com o aumento da capacidade de processamento dos computadores e da acessibilidade à sistemas de informação geográficas e produtos de sensores remotos. Entretanto, em ambos os métodos, os trabalhos de campo e o conhecimento das relações solo-paisagem são fundamentais ao mapeamento.

Ao comparar os dois métodos de mapeamento de solos utilizados neste estudo, digital e tradicional, observou-se que os custos iniciais são os mesmos. Em ambos foi necessária a realização de diversas campanhas de trabalhos de campo para amostragem de solos, análises em laboratórios de amostras coletadas e retornos a campo para novos registros de perfis complementares e coleta de pontos para validação dos mapas. A maior vantagem em termos econômicos observada, neste caso, foi que o modelo criado para a bacia do córrego Marinheiro poderá ser extrapolado para regiões adjacentes, orientando as novas coletas, diminuindo o número de amostras necessárias e, logo, os custos com despesas de campo e laboratório.

O mapeamento digital de solos, no geral, tem muito ainda a desenvolver para conseguir o nível de precisão do mapeamento tradicional, porém, já foi provada em diversos trabalhos, como neste, que a técnica detém um grande potencial.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Perfis e pontos complementares amostrados.



APÊNDICE B – Descrição morfológica e análises física e química de alguns dos perfis descritos.



PERFIL: 06

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico

DATA: 03/03/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Fazenda Marinheiro, Município de Sete Lagoas (MG) -19.481778 S, -44.187861 W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Corte de estrada em terço inferior de encosta sob pastagem.

ELEVAÇÃO: 742 m

LITOLOGIA: Siltito

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

RELEVO LOCAL: Suave ondulado

EROSÃO: Ligeira

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Estacional Semidecidual

USO ATUAL: Pastagem

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap1 0 – 11 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/3, úmida); argila com cascalho; moderada pequena e muito pequena blocos subangulares; friável, muito plástica e pegajosa; transição clara e plana.
- Ap2 11 – 22 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmida); franco-areno-argilosa; forte pequena e média blocos subangulares; friável, muito plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e irregular.
- Bt1 22 – 48 cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmida); franco-areno-argilosa; moderada grande prismática que se desfazem em moderada pequena blocos subangulares; cerosidade comum e moderada; friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.
- Bt2 48 – 70 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmida); franco-areno-argilosa; moderada grande prismática que se desfazem em moderada pequena blocos subangulares; cerosidade comum e moderada; friável, plástica e pegajosa; transição gradual e plana.

Bt3 70 – 116⁺ cm, vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmida); argila; forte média e grande blocos subangulares que se desfazem em forte pequena e média prismática; cerosidade abundante e forte; firme, muito plástica e muito pegajosa.

RAÍZES: Muitas muito finas e finas nos horizontes Ap1 e Ap2; comuns e finas nos horizontes Bt1 e Bt2.

OBSERVAÇÕES: Tradagem até 1,20 m.

Hz.	Prof.	Cor	Granulometria			pH		ΔpH	C org.
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl		
	cm	úmida	g/kg					g/kg	
Ap1	11	7,5 YR 3/3	170.1	337.3	492.6	5.3	4.6	-0.7	44.3
Ap2	22	7,5 YR 3/4	179.7	347.9	472.4	5.6	4.7	-0.9	27.7
Bt1	48	5 YR 4/6	155.9	306.7	537.4	5.7	4.8	-0.9	14.7
Bt2	70	5 YR 3/4	108.1	318.8	573.1	5.9	4.8	-1.1	10.9
Bt3	116	5 YR 5/6	62.4	339.6	597.9	6.0	4.7	-1.3	6.9
Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico					
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr
cmolc/dm ³			%	g/kg					
10.9	0.0	32.4	68.6	-	-	-	-	-	-
7.5	0.0	26.9	59.0	-	-	-	-	-	-
7.1	0.0	22.0	59.8	-	-	-	-	-	-
7.9	0.0	23.6	58.3	33.0	21.8	5.8	0.8	2.6	2.2
6.9	0.0	16.0	71.4	-	-	-	-	-	-



PERFIL: 15

CLASSIFICAÇÃO: NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico

DATA: 12/04/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Município de Sete Lagoas (MG), -19.495535 S, -44.206531 W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Corte de estrada em terço inferior da encosta sob pastagem.

ELEVAÇÃO: 758 m

LITOLOGIA: Siltito

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí

RELEVO LOCAL: Fortemente ondulado

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

EROSÃO: Moderada

DRENAGEM: Moderadamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Mata ripária

USO ATUAL: Pastagem

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap1 0 - 9 cm, bruno muito escuro (7,5YR 2,5/3, úmida); argila com cascalho; moderada muito pequena granular; plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.
- Ap2 9 - 45 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmida); argila com cascalho; moderada média, pequena e muito pequena blocos subangulares; ligeiramente dura e friável; plástica e pegajosa; transição gradual e plana.
- Bt1 45 - 88 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmida); franco-argilosa; forte média, pequena e muito pequena prismática; cerosidade abundante e forte; dura, muito friável, plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.

- Bt2 88 - 1,22 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmida); franco-argilosa; forte média e pequena prismática; cerosidade abundante e forte; dura, friável, plástica e pegajosa; transição gradual e ondulada.
- BC 1,22 - 2,0⁺ cm, amarelo (10YR 7/6, úmida), matriz; bruno-avermelhado (5YR 4/4), cerosidade; franco-argilosa; forte média prismática; cerosidade abundante e forte; dura, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas muito finas, raras finas e médias no horizonte Ap1; muitas muito finas e comuns finas no horizonte Ap2; muitas muito finas, comuns finas e raras grossas no horizonte Bt1; raras grossas e finas no horizonte Bt2; raras grossas e muito finas no horizonte BC.

OBSERVAÇÕES: Presença de minerais de quartzo de tamanho cascalho no horizonte Ap1; presença de concreções de manganês ao longo do perfil; cerosidade avermelhada no solo amarelo; cerosidade no horizonte C, sendo este observado 1 m abaixo do perfil.

Hz.	Prof. cm	Cor úmida	Granulometria			pH		ΔpH	C org. g/kg
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl		
				g/kg					
Ap1	11	7,5 YR 3/3	170.1	337.3	492.6	5.3	4.6	-0.7	44.3
Ap2	22	7,5 YR 3/4	179.7	347.9	472.4	5.6	4.7	-0.9	27.7
Bt1	48	5 YR 4/6	155.9	306.7	537.4	5.7	4.8	-0.9	14.7
Bt2	70	5 YR 3/4	108.1	318.8	573.1	5.9	4.8	-1.1	10.9
Bt3	116	5 YR 5/6	62.4	339.6	597.9	6.0	4.7	-1.3	6.9
Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico					
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr
cmolc/dm ³			%	g/kg					
10.9	0.0	32.4	68.6	-	-	-	-	-	-
7.5	0.0	26.9	59.0	-	-	-	-	-	-
7.1	0.0	22.0	59.8	-	-	-	-	-	-
7.9	0.0	23.6	58.3	33.0	21.8	5.8	0.8	2.6	2.2
6.9	0.0	16.0	71.4	-	-	-	-	-	-



PERFIL: 22

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico

DATA: 11/08/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Embrapa Milho e Sorgo (pivô 2), Município de Sete Lagoas (MG), -19.482179 S, -44.170587 W,

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira em parte rebaixada de divisor de águas em sela próximo ao centro de pivô central.

ELEVAÇÃO: 739 m

LITOLOGIA: Siltitos

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí

RELEVO LOCAL: Suave ondulado

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Fortemente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Estacional Semidecidual

USO ATUAL: Agricultura irrigada

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap1 0 - 24 cm, bruno muito escuro (7.5YR 2.5/3, úmida); argila com cascalho; moderada pequena e média blocos sub-angulares; muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.
- Ap2 24 - 44 cm, bruno muito escuro (7.5YR 2.5/3, úmida); argila; moderada média e grande blocos sub-angulares; muito plástica e pegajosa; transição gradual e plana.
- AB1 44 - 76 cm, bruno avermelhado escuro (5YR 3/4, úmida); argila; fraca média e grande blocos sub-angulares/ forte muito pequena granular; muito plástica e pegajosa; transição difusa e plana.
- AB2 76 - 113 cm, bruno avermelhado escuro (5YR 3/4, úmida); argila; fraca média e grande blocos sub-angulares/ forte muito pequena granular; plástica e pegajosa; transição difusa e plana.

- AB3 113 - 148 cm, bruno avermelhado escuro (5YR 3/4, úmida); argila; fraca média e grande blocos sub-angulares/ forte muito pequena granular; muito plástica e pegajosa; transição difusa e plana.
- Bw1 148 - 220 cm, vermelho escuro (2.5YR 3/6, úmida); argila com cascalho; forte muito pequena granular; plástica e pegajosa; transição difusa e plana.
- Bw2 220 - 325⁺ cm, vermelho escuro (2.5YR 3/6, úmida); argila com cascalho; forte muito pequena granular; ligeiramente plástica e pegajosa; transição difusa e plana.

RAÍZES: Comuns muito finas e médias, nos horizontes Ap1 e Ap2.

OBSERVAÇÕES: trincheira aberta por retroescavadeira próxima ao centro do pivô central entre terraços, sob palhada de sorgo. Perfil com fragmentos soltos de rocha carbonática a aproximadamente 50 cm em uma das paredes, atribuída a antiga pavimentação de drenagem de estrada abandonada. Área em uso há pelo menos 100 anos (campo de sementes de algodão do Ministério da Agricultura na década de 20). A trincheira se encontra próxima ao divisor de águas da bacia em ponto baixo do divisor em sela. Carvões grandes comuns no perfil, distribuídos em pontos isolados em todas as profundidades, e concentrados em uma faixa a aproximadamente 1,5 m de profundidade. Concreções amareladas e cascalhos de quartzo concentrados nos horizontes Bw1 e Bw2.

Hz.	Prof. cm	Cor úmida	Granulometria			pH		Δ pH	C org. g/kg
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl		
Ap1	24	7,5 YR 2.5/3	220.0	100.0	680.0	5.6	4.9	-0.7	27.5
Ap2	44	7,5 YR 2.5/3	220.0	120.0	660.0	6.5	6.1	-0.4	19.2
AB1	76	5 YR 3/4	160.0	110.0	730.0	7.0	6.2	-0.8	12.0
AB2	113	5 YR 3/4	170.0	120.0	710.0	7.0	6.3	-0.7	12.0
AB3	148	5 YR 3/4	170.0	110.0	720.0	7.0	6.2	-0.8	11.3
Bw1	220	2,5 YR 3/6	170.0	90.0	740.0	6.2	5.0	-1.2	6.9
Bw2	325	2,5 YR 3/6	150.0	100.0	750.0	5.0	4.8	-0.2	3.8

Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico					
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr
cmolc/dm ³			%	g/kg					
6.92	0.08	19.0	53.6	-	-	-	-	-	-
7.42	0.07	14.6	77.2	-	-	-	-	-	-
5.82	0.07	8.9	90.1	-	-	-	-	-	-
5.77	0.07	10.0	81.0	-	-	-	-	-	-
5.59	0.07	8.6	89.9	-	-	-	-	-	-
2.40	0.08	8.0	40.3	-	-	-	-	-	-
1.04	0.11	3.8	36.2	24.6	22.4	6.5	0.9	1.9	1.6



PERFIL: 23

CLASSIFICAÇÃO: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico

DATA: 15/09/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Fazenda Paredão, Município de Sete Lagoas (MG), -19.510397 S, -44.223103 W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Corte de estrada em terço inferior da encosta sob pastagem.

ELEVAÇÃO: 854 m

LITOLOGIA: Granito-gnaiss

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Supergrupo Belo Horizonte

RELEVO LOCAL: Forte ondulado

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

EROSÃO: Forte

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta Estacional Semidecidual

USO ATUAL: Pastagem (degrado em regeneração)

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap1 0 - 9 cm, bruno (10YR 4/3, úmida); bruno (10YR 4/3, seca); Franco-argiloarenosa; moderada muito pequena e pequena blocos sub-angulares; firme e dura; muito plástica e ligeiramente pegajosa; transição irregular e ondulada.
- Ap2 9 - 17 cm, bruno (7.5YR 4/3, úmida); bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, seca); Franco-argiloarenosa; moderada muito pequena, pequena e média blocos sub-angulares; ligeiramente dura e friável, plástica e pegajosa; transição irregular e ondulada.
- BA 17 - 33 cm, bruno-forte (7.5YR 5/6, úmida); amarelo-brunado (10YR 6/6, seca); Franco-argiloarenosa; moderada média e grande prismática que se desfazem em moderada pequena e muito pequena prismática; dura e muito friável; plástica e pegajosa; transição irregular e ondulada.
- B1 33 - 76 cm, bruno-forte (7.5YR 5/6, úmida); amarelo-brunado (10YR 6/6, seca); Franco-argiloarenosa; maciça; ligeiramente dura e muito friável; plástica e pegajosa; transição gradual e plana.
- B2 76 - 130⁺ cm, amarelo-avermelhado (7.5YR 6/6, úmida); amarelo-avermelhado (7.5YR 6/6, seca); Franco-argiloarenosa; maciça; ligeiramente dura e muito friável; plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas muito finas e finas nos horizontes Ap1, Ap2 e BA; comuns muito finas e finas no horizonte B1 e B2.

OBSERVAÇÕES: Presença de muito cascalho no horizonte B1; muita atividade biológica em todo o perfil.

Hz.	Prof.	Cor	Granulometria			pH		Δ pH	C org.
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl		
	cm	úmida	g/kg					g/kg	
Ap1	9	10 YR 4/3	600.0	170.0	230.0	5.6	4.7	-0.9	15.9
Ap2	17	7,5 YR 4/3	560.0	180.0	260.0	5.6	4.1	-1.5	10.8
BA	33	7,5 YR 5/6	560.0	180.0	260.0	5.5	4.0	-1.5	7.8
B1	76	7,5 YR 5/6	560.0	180.0	260.0	5.6	4.0	-1.6	5.2
B2	130	7,5 YR 6/6	500.0	220.0	280.0	5.9	3.9	-2.0	4.3
Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico					
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr
cmolc/dm ³			%	g/kg					
4.9	0.1	32.3	66.5	-	-	-	-	-	-
2.7	0.5	22.0	47.7	-	-	-	-	-	-
1.8	0.7	16.6	42.8	-	-	-	-	-	-
1.8	0.5	14.1	50.4	21.2	13.2	2.2	0.3	2.7	2.5
1.2	1.0	12.8	33.5	-	-	-	-	-	-



PERFIL: 31

CLASSIFICAÇÃO: LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico

DATA: 15/10/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Fazenda Changrilá, Município de Sete Lagoas (MG) 19,500887 S, 44,218867 W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Corte de estrada em terço médio sob vegetação nativa.

ELEVAÇÃO: 793 m

LITOLOGIA: Siltitos

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí

RELEVO LOCAL: Montanhoso

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

EROSÃO: Laminar ligeira

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Transição Cerradão/Floresta Estacional Semidecidual

USO ATUAL: Pastagem degradada / "encapoeirada"

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap1 0 - 40 cm, bruno-escuro (7,5YR 3/4, úmido), bruno (7,5YR 5/4, seco); argila; forte pequena e média blocos sub-angulares e forte pequena e média prismática; extremamente dura e muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.
- Bt 40 - 106 cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmido), vermelho-amarelado (5YR 4/6, seco); argila; forte grande e muito grande prismática; cerosidade abundante e forte; extremamente dura e friável, plástica e pegajosa; transição clara e irregular.
- BC 106 - 140⁺ cm, vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmido), amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, seco); argila; moderada média e grande blocos angulares e moderada pequena e média prismática; muito dura e friável, muito plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas muito finas e finas, comuns médias e grossas nos horizontes Ap e Bt; comuns muito finas e finas no horizonte BC.

OBSERVAÇÕES: Perfil em beira de estrada.

Hz.	Prof.	Cor	Granulometria			pH		Δ pH	C org.
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl		
	cm	úmida	g/kg					g/kg	
Ap	40	7,5 YR 3/4	130.0	510.0	360.0	5.3	4.3	-1.0	17.3
Bt	106	5 YR 4/6	50.0	550.0	400.0	6.0	4.8	-1.2	3.5
BC	140	5 YR 5/8	100.0	500.0	400.0	5.9	4.3	-1.6	6.6
Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico				Ki	Kr
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂		
cmolc/dm ³			%	g/kg					
10.5	0.3	45.6	63.8	-	-	-	-	-	-
9.7	0.1	27.5	87.8	25.6	17.4	7.7	0.4	2.5	1.9
9.4	0.3	30.8	76.1	-	-	-	-	-	-



PERFIL: 33

CLASSIFICAÇÃO: CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico

DATA: 15/10/2015

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: Fazenda Changrilá, Município de Sete Lagoas (MG), -19.498029 S, -44.220179 W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Trincheira em topo de morro sob vegetação nativa.

ELEVAÇÃO: 856 m

LITOLOGIA: Siltito

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí

RELEVO LOCAL: Montanhoso

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa

ROCHOSIDADE: Não rochosa

EROSÃO: Não aparente

DRENAGEM: Bem drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Mata seca

USO ATUAL: Pastagem

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A 0 - 12 cm, bruno-escuro (7,5YR 2.5/3, úmido), bruno-escuro (7,5YR 3/3, seco); franco-argilo-arenosa; moderada muito pequena e pequena blocos sub-angulares; extremamente dura e friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição gradual e plana.
- AB 12 - 23 cm, bruno-avermelhado (5YR 4/4, úmido), bruno-avermelhado (5YR 4/4, seco); argiloarenosa; moderada pequena e média blocos sub-angulares; extremamente dura e muito friável, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.
- Bt 23 - 46 cm, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 2.5/3, úmido), vermelho (2,5YR 4/6, seco); argila; forte média e grande blocos sub-angulares; muito dura e friável, muito plástica e pegajosa; transição gradual e irregular.
- BC 46 - 53⁺ cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmido), vermelho-amarelado (5YR 4/6, seco); argiloarenosa; forte média e grande blocos sub-angulares; extremamente dura e friável, muito plástica e muito pegajosa.

RAÍZES: Muitas muito finas, finas, médias, grossas e muito grossas nos horizontes A, AB e Bt; comuns finas, finas, médias, grossas e muito grossas no horizonte BC.

Hz.	Prof. cm	Cor úmida	Granulometria			pH		Δ pH	C org. g/kg	
			Areia	Silte	Argila	H ₂ O	KCl			
			g/kg							
A	12	7,5 YR 2.5/3	200.0	510.0	290.0	6.2	5.7	-0.5	39.5	
AB	23	5 YR 4/4	180.0	500.0	320.0	5.8	4.8	-1.0	15.1	
Bt	46	2,5 YR 2.5/3	170.0	500.0	330.0	5.6	4.2	-1.4	11.7	
BC	53	5 YR 4/6	160.0	480.0	360.0	5.6	4.2	-1.4	9.5	
Complexo Sortivo				Ataque Sulfúrico						
S	Al ³⁺	T	V	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr	
cmolc/dm ³			%	g/kg						
16.2	0.1	64.4	86.5	-	-	-	-	-	-	
12.4	0.1	51.8	74.6	-	-	-	-	-	-	
13.1	0.2	54.5	72.6	17.9	11.4	5.0	0.3	2.7	2.1	
11.5	0.3	42.5	75.1	-	-	-	-	-	-	

APÊNDICE C - Descrição das unidades de mapeamento do mapa de solos convencional.

UM - Descrição taxonômica dos solos

CHd - CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico; relevo ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico; relevo suave ondulado.

CHe - CAMBISSOLO HÚMICO eutrófico (proposta); relevo suave ondulado.

CXbd1 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico; relevo forte ondulado e montanhoso.

CXbd2 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico; relevo forte ondulado + ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico; relevo forte ondulado + ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico; relevo ondulado + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico; relevo ondulado + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico; relevo ondulado + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico; relevo ondulado + Afloramento rochoso.

CXve - CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico; relevo suave ondulado + NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico; relevo ondulado + Afloramento rochoso.

CYbe - CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico; relevo plano + GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico; relevo suave ondulado + GLEISSOLOS MELÂNICOS Ta Eutróficos; relevo suave ondulado.

LVAd1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico; relevo suave ondulado.

LVAd2 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico; relevo suave ondulado + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico; relevo suave ondulado.

LVAd3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico; relevo ondulado + LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; relevo suave ondulado + LATOSSOLO AMARELO Distrófico; relevo suave ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico; relevo ondulado.

LVd1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; relevo suave ondulado.

LVd2 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; relevo suave ondulado.

LVd3 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; relevo ondulado.

LVd4 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico; relevo suave ondulado + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico; relevo suave ondulado + LATOSSOLO AMARELO Distrófico; relevo ondulado.

LVe - LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico; relevo suave ondulado.

MD - CHERNOSSOLO RÊNDZICO Órtico; relevo montanhoso + CHERNOSSOLO RÊNDZICO lítico; relevo montanhoso + LUVISSOLO CRÔMICO Pálico; relevo forte ondulado + Afloramento rochoso.

MXo - CHERNOSSOLO HÁPLICO Órtico; relevo montanhoso + Afloramento rochoso.

NVe - NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico; relevo montanhoso.

PVAd - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico nitossólico; relevo forte ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico; relevo ondulado.

PVe - ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico; relevo forte ondulado + NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico; relevo forte ondulado + ARGISSOLO VERMELHO Distrófico latossólico; relevo forte ondulado + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico; relevo forte ondulado + LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico; relevo suave ondulado + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico; relevo suave ondulado.

RY - NEOSSOLO FLÚVICO; relevo forte ondulado + Afloramento rochoso.

TCp - LUVISSOLO CRÔMICO Pálico típico; relevo montanhoso.

APÊNDICE D – Pontos de checagem utilizados para validação.

