

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS:
PREDIÇÃO DE CLASSES E ATRIBUTOS PARA O
MUNICÍPIO DE ITAJUBÁ, MINAS GERAIS**

Thais Gabriela Gonçalves

Itajubá (MG)

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Thais Gabriela Gonçalves

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS:
PREDIÇÃO DE CLASSES E ATRIBUTOS PARA O
MUNICÍPIO DE ITAJUBÁ, MINAS GERAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Dra. Nívea Adriana Dias Pons

Coorientadora: Dra. Eliane Guimarães Pereira Melloni

**Itajubá (MG)
2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Thais Gabriela Gonçalves

**MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS:
PREDIÇÃO DE CLASSES E ATRIBUTOS PARA O
MUNICÍPIO DE ITAJUBÁ, MINAS GERAIS**

**Dissertação submetida a banca examinadora em 15 de março de
2019**

Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Banca examinadora:

Prof^ª. Dra. Nívea Adriana Dias Pons (Orientadora)

Prof^ª. Dra. Eliane Guimarães Pereira Melloni (Co-orientadora)

Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato

Dra. Vanessa Cristina Oliveira de Souza

**Março de 2019
Itajubá**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado a capacidade e a oportunidade de escolher e trilhar meus caminhos, sempre com fé e dedicação.

Aos meus pais, Antônio e Vera, e a meus irmãos, William e Talita, que mesmo desconhecendo meus sonhos, sempre me deram apoio para que eu corresse atrás deles.

Ao meu namorado, por toda confiança e incentivo.

Às companheiras de república que me acolheram e amparam neste período importante de minha vida.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) por proporcionar a realização de um sonho, pelo ensino e desafios proporcionados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) concessão da bolsa, que possibilitou a dedicação exclusiva à realização deste trabalho.

Aos professores do programa de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos que ao longo dos últimos anos compartilharam comigo seus ensinamentos e perspectivas, com paciência e dedicação.

Em especial, às professoras Nívea Pons e Eliane Melloni pela confiança, amizade, instrução, orientação e incentivo.

Aos técnicos Oswaldo, Josivaldo e André pela paciência e pelo tempo gasto comigo durante a coleta de campo e ensaios de laboratório.

Aos amigos do mestrado por tornar este desafio mais leve e alegre, pelos risos fáceis e companheirismo.

Enfim, a todos que de certa forma contribuíram para a realização de mais esta etapa!

RESUMO

A necessidade de informações referentes às características e distribuição dos solos é crescente e está diretamente associada ao desenvolvimento da agropecuária, do meio urbano e da conservação do meio ambiente como um todo. Um dos obstáculos associados à ausência de informação pedológica em escala adequada ao planejamento está na dificuldade de realização do levantamento tradicional de solo, que exige recursos humanos especializados, tempo e recursos financeiros. Como solução, vem sendo desenvolvida nas últimas décadas técnicas de Mapeamento Digital de Solos (MDS), como forma de otimizar o tempo e melhorar o mapeamento tradicional de solos, permitindo até mesmo a extrapolação de dados de solos para áreas inexistentes a partir de uma área piloto. O MDS é capaz de associar as informações físicas do terreno através de um processo lógico-matemático que torna possível prever a distribuição espacial das classes e propriedades dos solos. Neste sentido, o objetivo do trabalho é realizar o mapeamento digital de solos para o município de Itajubá- MG, a partir de um modelo de predição de solos, elaborado e treinado em áreas piloto previamente mapeadas do modo tradicional. O mapeamento tradicional abrangeu as etapas de levantamento das informações secundárias relacionadas às características físicas do terreno, coletas de amostras de solo em campo, caracterização física e química das amostras em laboratório e espacialização da informação para as áreas de interesse. O MDS passou pelas etapas de criação de pontos amostrais, extração da informação, geração da árvore de decisão a partir do algoritmo J48, aplicação e validação do modelo para a microbacia do Ribeirão Anhumas e, por último, a extrapolação da informação para o município de Itajubá. Os resultados demonstraram a presença de Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos distribuídos ao longo de toda microbacia, além da predominância da classe dos Argissolos Vermelhos, característicos de relevo forte ondulado. O levantamento de solos para a microbacia, além de suprir uma necessidade local da informação, permitiu que a área fosse adotada como piloto para o MDS para o município de Itajubá. O MDS aplicado ao município de Itajubá permitiu a elaboração de mapas de solos para uma área onde a informação de solos, até o momento, era inexistente. O método de predição por Árvore de Decisão, tendo como classificador o algoritmo J48, forneceu mapas de solos com acurácias que vão ao encontro com a literatura, indicando que o método pode ser aplicado para extrapolar informações de solos para áreas fisiográficas semelhantes.

Palavras-Chave: levantamento do solo, classificação do solo, pedologia, árvore de decisão.

ABSTRACT

The need for information on the characteristics and distribution of soils is increasing and is directly associated with the development of agriculture, the urban environment and the conservation of the environment as a whole. The lack of soil information on a scale suitable for planning occurs because of the difficulty of traditional soil mapping, which requires specialized human resources, time and financial resources. As a solution, Digital Soil Mapping (MDS) techniques have been developed in the last decades as a way to optimize the time and improve the traditional soil mapping, allowing even the extrapolation of soil data to non-existent areas of an area pilot. The MDS is able to associate the physical information of the terrain through a logical-mathematical process that makes possible to predict the spatial distribution of soil classes and properties. In this sense, the objective of the work is to perform the digital mapping of soils for the municipality of Itajubá-MG, based on a model of soil prediction, elaborated and trained in pilot areas previously mapped in a traditional way. The traditional mapping included the steps of surveying the secondary information related to the physical characteristics of the terrain, collecting soil samples in the field, physical and chemical characterization of the samples in the laboratory and spatialization of the information for the areas of interest. The MDS went through the steps of creating sampling points, extracting the information, generating the decision tree from the J48 algorithm, applying and validating the model for the Ribeirão Anhumas watershed, and, finally, the extrapolation of the information to the municipality of Itajubá. The results showed the presence of Latosols, Argisols, Cambisols and Gleissolos distributed throughout the microbasin, besides the predominance of the class of Red Argisols, characteristic of strong undulating relief. The soil survey for the microbasin, in addition to meeting a local information need, allowed the area to be adopted as a pilot for the MDS for the municipality of Itajubá. The MDS applied to the municipality of Itajubá allowed the preparation of soil maps for an area where soil information, so far, was non-existent. The method of prediction by Decision Tree, having as a classifier the algorithm J48, provided maps of soils with accuracy that meet the literature, indicating that the method can be applied to extrapolate information from soils to similar physiographic areas.

Keywords: soil classification, pedology, decision tree

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo dos processos geomorfológicos em uma vertente	21
Figura 2 - Quadro geral do mapeamento digital do solo	32
Figura 3 - Diagrama de Venn ilustrando a diferença de limites entre um conjunto Fuzzy e um conjunto Booleano.	34
Figura 4 - Treinamento do modelo a partir das variáveis ambientais de entrada	36
Figura 5 - Exemplo do funcionamento de uma árvore de decisão	38
Figura 6 - Esquema ilustrativo das etapas da Pesquisa	40
Figura 7 - Localização da área de estudo	41
Figura 8 - Processos erosivos identificados na microbacia do Ribeirão Anhumas. A) área degradada, com visíveis caminhos preferenciais de água e processos erosivos; B) e C) taludes sem cobertura vegetal e susceptíveis a perda de material por processos erosivos.....	43
Figura 9 – Localização dos principais cursos d’água do município de Itajubá – MG	44
Figura 10 - Mapeamento do Uso do Solo do município de Itajubá – MG	45
Figura 11 - Classes de Altitude do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	48
Figura 12 - Declividade do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	49
Figura 13 - Formas do Relevo presentes na paisagem	50
Figura 14 - Perfil de Curvatura do município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	52
Figura 15 - Plano de Curvatura do município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	53
Figura 16 - Classes de Solos do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	56
Figura 17 – Unidade Litológicas do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas	57
Figura 18 - Mapas com as topossequências selecionadas na microbacia do Ribeirão Anhumas: (a) Mapa de Classes de Altitude; (b) Mapa de Declividade; (c) Mapa de Classes do Solos; e,	59
Figura 19 – Amostras de Solos coletadas em campo, de cada ponto analisado	60
Figura 20 - Esquema dos parâmetros necessários para a caracterização do solo de cada perfil amostrado	61
Figura 21 – Sequência para geração do Mapa Digital de Solos	64
Figura 22 - Perfil 1 da Topossequência 1 (T1P1)	69
Figura 23 - Perfil 2 da Topossequência 1 (T1P2)	72

Figura 24 - Perfil 3 da Topossequência 1 (T1P2)	73
Figura 25 - Perfil 4 da Topossequência 1 (T1P4)	74
Figura 26 - Perfil 1 da Topossequência 2 (T2P1)	78
Figura 27 - Perfil 2 da Topossequência 2 (T2P2)	79
Figura 28- Perfil 3 da Topossequência 2 (T2P3)	80
Figura 29 - Perfil 4 da Topossequência 2 (T2P4)	81
Figura 30 - Perfil 1 da Topossequência 3 (T3P1)	84
Figura 31 - Perfil 2 da Topossequência 3 (T3P2)	85
Figura 32 - Perfil 3 da Topossequência 3 (T3P3)	86
Figura 33 - Perfil 4 da Topossequência 3 (T3P4)	87
Figura 34 - Perfil 1 da Topossequência 4 (T4P1)	91
Figura 35 - Perfil 2 da Topossequência 4 (T4P2)	92
Figura 36 - Perfil 3 da Topossequência 4 (T4P3)	93
Figura 37 - Perfil 3 da Topossequência 4 (T4P3)	94
Figura 38 – Distribuição dos solos da microbacia do Ribeirão Anhumas por meio do Mapeamento Tradicional	97
Figura 39 – Comparação entre Mapeamento Tradicional e Mapeamento Digital de Solos.....	98
Figura 40 - Classificação dos Solos das microbacias do Ribeirão Anhumas e Ribeirão José Pereira.	102
Figura 41 – Mapeamento Digital dos Solos de acordo com o relevo e considerando as Unidades Litológicas.....	103
Figura 42 - Mapeamento Digital dos Solos de acordo com o relevo (sem considerar as Unidades Litológicas)	105
Figura 43 – Mapeamento Digital dos Solos até o segundo nível categórico (Mapeamento III)	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas dos pontos amostrais.	68
Tabela 2 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 1	70
Tabela 3 - Caracterização química dos solos amostrados da Topossequência 1	71
Tabela 4 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 2	76
Tabela 5 - Caracterização química dos solos amostrados da Topossequência 2	77
Tabela 6 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 3	82
Tabela 7 - Caracterização química dos solos amostrados da Topossequência 3	83
Tabela 8 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 4	89
Tabela 9 - Caracterização química dos solos amostrados da Topossequência 4	90
Tabela 10 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital da microbacia do Ribeirão Anhumas.....	99
Tabela 11 – Quantificação das áreas das classes de solos dos diferentes mapeamentos.....	101
Tabela 12 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital de Itajubá (Mapeamento II)	105
Tabela 13 – Quantificação das áreas das Classes de Solos do Mapeamento II.....	106
Tabela 14 – Quantificação das áreas das Classes de Solos do Mapeamento III	108
Tabela 15 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital de Itajubá (Mapeamento III – 2º nível categórico).....	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Árvore de Decisão
AG	Acurácia Global
AMM	Área Mínima Mapeável
APP	Área de Proteção Permanente
ASC	<i>Australian Soil Classification</i>
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
Codemig	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CTI	Índice Topográfico Combinado
CX	Cambissolo Háptico
DEM	Modelo Digital de Elevação do Terreno
DP	Densidade de Partículas
DS	Densidade do Solo
Embrapa	Empresa de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNU	<i>General Public License</i>
GX	Gleissolo Háptico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDMH	Índice de Desenvolvimento Humano Médio
IF	Índice de Flocculação
K	Índice Kappa
LA	Latossolo Amarelo
LAdt	Latossolo Amarelo Distrófico típico
LV	Latossolo Vermelho
LVAdt	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico
LVAet	Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico
m%	Saturação por Alumínio
MDE	Modelo Digital de Elevação

MDS	Mapeamento Digital de Solo
MDT	Modelo Digital do Terreno
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
PV	Argissolo Vermelho
PV1	Argissolo Vermelho relevo ondulado
PV2	Argissolo Vermelho relevo forte ondulado
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
PVA1	Argissolo Vermelho-Amarelo relevo ondulado
PVA2	Argissolo Vermelho-Amarelo relevo forte ondulado
PVAda	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto
PVAdt	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico
PVda	Argissolo Vermelho Distrófico abrupto
PVdt	Argissolo Vermelho Distrófico típico
PVet	Argissolo Vermelho Eutrófico típico
REBIO	Reserva Biológica
RNA	Redes Neurais Artificiais
S	Soma de Bases
SBC	Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
T	Capacidade de Troca Catiônica Efetiva
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
V%	Saturação de Bases
VTP	Volume Total de Poros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Solo: Uma abordagem inicial.....	15
3.2	Relação Solo-paisagem	19
3.3	Levantamento e mapeamento tradicional dos solos	24
3.4	Mapeamento Digital dos Solos (MDS)	28
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1	Método de Pesquisa.....	40
4.2	Descrição da Área de Estudo	41
4.2.1	Hidrografia	42
4.2.2	Uso e Ocupação do Solo	42
4.2.3	Vegetação.....	46
4.2.4	Altimetria e Declividade	47
4.2.5	Formas do Relevo.....	50
4.2.6	Classes de Solos	54
4.2.7	Unidades Litológicas.....	54
4.3	Levantamento do Solo.....	58
4.3.1	Amostragem e caracterização dos perfis de solos	58
4.3.2	Análises Laboratoriais.....	61
4.4	Mapeamento Tradicional dos Solos	62
4.5	Mapeamento Digital dos Solos (MDS)	63
4.5.1	Mapeamento Digital dos Solos aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas.....	63
4.5.2	Mapeamento Digital dos Solos aplicado ao Município de Itajubá.....	65
4.5.3	Validação do Mapeamento Digital.....	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Descrição das Topossequências	67
5.1.1	Topossequência 1	69
5.1.2	Topossequência 2	75
5.1.3	Topossequência 3	81
5.1.4	Topossequência 4	88
5.2	Distribuição das Classes de Solos na microbacia do Ribeirão Anhumas.....	95
5.3	Mapeamento Digital aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas.....	98
5.4	Espacialização dos Solos para o Município de Itajubá	102
6	CONCLUSÃO	109
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	ANEXOS.....	120

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o processo de urbanização das cidades brasileiras ocorreu de forma desordenada, acarretando inúmeros problemas de qualidade de vida à população, bem como, a degradação progressiva dos recursos naturais, principalmente, dos mananciais remanescentes (BRAGA; SILVA; SCHAFFRATH; 2012). Embora haja, nos dias atuais, grandes debates sobre o meio ambiente, desenvolvimento e qualidade de vida, raramente o princípio desses aspectos é considerado, que é o processo de planejamento (COSTA; NISHIYAMA, 2012).

Legalmente, o planejamento municipal deve ocorrer por meio do Plano Diretor, instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana, obrigatório para municípios com mais de 20 mil habitantes (GOULART; TERCI; OTERO, 2016). O Plano Diretor do município de Itajubá foi aprovado pela Lei Complementar n. 008 de 30 de dezembro de 2003 (ITAJUBÁ, 2003) e, atualmente, encontra-se em fase de revisão. O momento é oportuno à realização de novos estudos, de modo que os resultados obtidos sejam capazes de propor melhorias a favor da preservação ambiental e da adequação do uso do solo.

Na literatura, as bacias hidrográficas são adotadas como unidade de planejamento, com a visão de que dentro de seus limites há a possibilidade de uma abordagem holística e participativa em prol do desenvolvimento sustentável (RITTER et al., 2015). Vindo ao encontro com esta proposta, a menor unidade de planejamento presente dentro dos limites municipais são as microbacias.

No presente estudo, foi adotada a microbacia do Ribeirão Anhumas como área de referência e de planejamento, uma vez que esta microbacia está inserida em sua totalidade no município de Itajubá, além de ser uma região com ausência de planos e projetos que assegurem a proteção ambiental a longo prazo.

No Plano Diretor, parte da microbacia do Ribeirão Anhumas está delimitada como área de expansão urbana, destinada ao crescimento futuro da cidade. No entanto, mesmo com o arcabouço legal que assegura a preservação de alguns ambientes, como as Áreas de Preservação Permanente (APP) dos cursos d'água (BRASIL, 2012), os novos empreendimentos residenciais estão sendo implantados, em descumprimento aos aspectos legais de proteção ambiental. Neste sentido, a ausência de planejamento em consonância com a ocupação desordenada, sem a preocupação com fatores ambientais, favorece, principalmente, os processos erosivos e o assoreamento dos cursos d'água, principais fontes de degradação ambiental presente na microbacia.

Problemas relacionados à erosão, assoreamento, degradação do solo, perda de biodiversidade, contaminação do lençol freático, gestão de recursos hídricos e manutenção dos ecossistemas, exigem informações precisas e detalhadas sobre o solo (ARRUDA; DEMATTÊ; CHAGAS, 2013; ZHANG; LIU; SONG, 2017). Para obter as informações sobre as características e distribuição dos solos é necessário o levantamento pedológico, que pode ser realizado de modo tradicional ou por meio do mapeamento digital que é apoiado em ferramentas computacionais.

O levantamento tradicional é amplamente difundido e baseia-se, em um primeiro momento, na análise fisiográfica da paisagem e delimitação das unidades de mapeamento onde possa acontecer mudança das classes de solo. Segue-se, então, para as etapas de amostragem, de levantamento do solo, de análises laboratoriais das amostras, classificação do solo e, posteriormente, ilustração das informações por meio de mapas. O processo é todo apoiado na experiência e na capacidade do pedólogo em identificar as diferentes fisionomias do terreno, além de conseguir correlacioná-las aos processos de formação e às classes de solos caracterizadas, contrário ao mapeamento digital que se apoia em ferramentas de geoprocessamento e *softwares* de linguagem de programação para auxiliar predição e espacialização das classes dos solos, a partir da correlação dos dados fisiográficos do terreno. O mapeamento digital, apesar de promissor, possui como dado primordial o mapeamento tradicional.

A carência de levantamento pedológico tradicional, além de ser um impeditivo aos estudos de alternativas de manejo e planejamento, impede a capacidade da predição de ocorrência de solos por outros métodos (TESKE; GIASSON; BAGATINI, 2015a).

A inexistência do levantamento pedológico impede o estudo da área e favorece ainda que novas áreas sejam ocupadas e urbanizadas em desacordo com as características suporte do ambiente, trazendo prejuízos da ordem ambiental, social e econômica. Segundo Carvalho, Nunes e Antunes (2013), as informações referentes às características pedológicas, quando elaboradas em escala apropriada ao planejamento local, subsidiam novos estudos de conservação dos recursos naturais, adequação do uso da terra e destinação adequada de áreas para atividades agrícolas e não agrícolas, como a urbanização.

O levantamento de informações referentes a distribuição dos solos na microbacia do Ribeirão Anhumas é inexistente, tornando a elaboração dos mapas de solos material essencial para o manejo adequado do solo, desenvolvimento de políticas públicas e iniciativas que controlem problemas ambientais identificados.

Estudos iniciais relacionados aos solos e ao levantamento pedológico do município de Itajubá foram iniciados na microbacia do Ribeirão José Pereira, também afluente do rio Sapucaí e inserida, em sua totalidade, no município de Itajubá. Os estudos abordaram aspectos referentes à distribuição e caracterização dos solos (LIMA, 2012) e capacidade de uso da terra (FLAUZINO et al., 2016).

A fim de complementar os trabalhos já iniciados no município no que tange a caracterização do solo em escala adequada ao planejamento, o presente trabalho propõe iniciar os estudos na microbacia do Ribeirão Anhumas, tendo como propósito a realização do mapeamento tradicional de solos como produto inicial do estudo. Posteriormente, será proposto um mapa pedológico para todo o município de Itajubá, a partir da simulação da distribuição dos solos, com auxílio do geoprocessamento. O levantamento realizado para todo o município subsidiará futuros estudos, com a finalidade de melhorar as políticas públicas referentes à ocupação adequada da área e à preservação ambiental.

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo busca introduzir, contextualizar e justificar o tema da pesquisa. No segundo, são apresentados os objetivos, geral e específicos, do trabalho desenvolvido. O terceiro capítulo contém a fundamentação teórica do trabalho, onde são descritos aspectos relacionados ao solo, como os processos de formação, distribuição na paisagem e os métodos aplicados na espacialização geográfica dos solos. No quarto capítulo estão descritos os processos metodológicos adotados, bem como, a descrição da área de estudo que abrange o município de Itajubá e a microbacia do Ribeirão Anhumas. O quinto capítulo apresenta os resultados e as discussões obtidos em cada etapa do trabalho. E, por fim, o sexto capítulo, onde são apresentadas as considerações finais e conclusões do trabalho desenvolvido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o mapeamento digital de solos para o município de Itajubá - MG, tendo como base duas áreas piloto, as microbacias do Ribeirão Anhumas e do Ribeirão José Pereira, caracterizadas previamente por meio do mapeamento tradicional.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar, por meio do levantamento tradicional, as características físicas e químicas dos solos da microbacia do Ribeirão Anhumas, adotando o método de topossequência para classificar o solo segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS);
- Gerar o modelo de predição de solo usando ferramentas computacionais;
- Aplicar e validar o modelo de predição de solos através do Mapeamento Digital de Solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas;
- Extrapolar o mapeamento de solos para o município de Itajubá através do modelo preditor.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A abordagem teórica do presente trabalho abrange, em um primeiro momento, o conceito geral de solo e seus processos de formação. Em seguida, são abordados os aspectos que condicionam a distribuição dos solos na paisagem e as implicações técnicas associadas a este contexto. Em um terceiro momento, a abordagem inclui aspectos categóricos do levantamento e da classificação dos solos, além das peculiaridades do mapeamento tradicional. E, por último, o mapeamento digital dos solos, realizado de maneira computacional e os principais métodos aplicados a esta finalidade.

3.1 Solo: Uma abordagem inicial

A palavra Solo origina do latim *solum*, cujo significado está associado à suporte, base para as atividades humanas, ou superfície que sustenta a vida. O conhecimento dos solos torna-se cada vez mais necessário, em razão da sua importância na agropecuária, no desenvolvimento urbano, na conservação do meio ambiente, entre outros (RIZZO; DEMATTÊ; LACERDA, 2015).

O termo pode adquirir diferentes sentidos dependendo da finalidade para o qual é empregado, por exemplo, como meio para o desenvolvimento das plantas, na visão dos engenheiros agrônomos, como produto do intemperismo, pelos pedólogos, como material para fundação de obras civis, para os engenheiros civis, entre outros (MILLER, 1993; KÄMFP; CURI, 2015). Neste sentido, as informações geradas por segmento tendem a complementar-se, fornecendo subsídio às atividades que afetam diretamente o solo.

Na abordagem de Lepsch (2013), o solo é um indivíduo teórico, um táxon (ou uma classe) de um sistema de classificação, representado por imagens (chamadas “perfis de solo”). As imagens podem receber denominações conceituais de acordo com um dado sistema de classificação e os locais aproximados da presença desses objetos são delimitados nos mapas.

Para Campos (2012), o conceito é baseado na estrutura da matriz do solo, onde o material é analisado como um corpo tridimensional, constituído de: fase sólida, por meio dos minerais e matéria orgânica organizados espacialmente; líquida, por meio da solução do solo; e gasosa, espaço ocupado pelo ar nos vazios do solo. Nesta concepção, a parte solúvel tem

relação direta com a translocação, dissolução e percolação de constituintes minerais e orgânicos pela água que auxilia nos processos de evolução do solo.

A concepção do solo como um corpo natural surgiu com o russo Dokuchaev em 1877, ao considerar o solo como um material em constante evolução, originário de uma rocha-mãe (posteriormente, material de origem) situada em determinada posição do relevo, sujeita à ação do clima e dos organismos ao longo do tempo (COELHO; GIASSON, 2010; WERLANG et al., 2013). Mais tarde, o conceito de solo foi equacionado por Jenny (1941), passando a ser considerado um produto formado a partir da ação conjunta de cinco fatores de formação: material de origem, organismos, clima, tempo e relevo.

A ação da decomposição das rochas por meio de um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos é denominado intemperismo. Estes diferentes processos atuam simultaneamente em diferentes intensidades ao longo do tempo, num processo dinâmico e subsequencial, formando solos com diferentes características (ESPINDOLA, 2017).

Por esta razão, a formação do solo é descrita como complexa e inclui diversos processos, entre eles, as reações de adição, perda, transformação, transporte de material no interior do perfil e rearranjo mecânico. Estes processos podem ocorrer isoladamente ou associados e vão depender da condição ambiental específica a que cada solo está submetido (BUOL et al., 1973 apud OLIVEIRA, 2008; KÄMPF; CURI, 2012).

Os estudos sistemáticos sobre os fatores de formação do solo são relativamente escassos no Brasil. Uma das dificuldades levantada por Araújo et al. (2014) é a complexidade em amostrar vários níveis de um fator, mantendo os demais constantes. Para superar tais dificuldades os autores selecionaram uma região em Lavras, Minas Gerais, com a presença de diferentes materiais litológicos, cuja distância entre eles fosse pequena o suficiente para que os outros fatores de formação se mantivessem similares.

Os autores constataram estreitas relações dos solos com seu material de origem em alguns pontos amostrados, como por exemplo, dos Argissolos sobre filito e gnaisse que apresentaram predominância nítida de caulinita derivada a partir das micas no filito e de micas e feldspatos, no caso do gnaisse. Em contrapartida, os autores encontraram descontinuidade desta relação em outros pontos amostrais, sugerindo contribuição alóctone para os Argissolos derivado de itabirito, uma vez que este solo apresentou alta fertilidade, condição inesperada, visto que o itabirito apresenta, tipicamente, baixos teores de nutrientes. No entanto, a relação deste com o material de origem foi observada pela presença de cascalho e calhaus compostos exclusivamente por fragmentos do itabirito. A área adotada permitiu avaliar o controle exercido por diferentes litologias na mineralogia e nas demais características do solo, concluindo que a

natureza litológica está intimamente ligada às propriedades do solo mesmo após muitos anos de evolução.

Dentre os fatores de formação, é sobre o material de origem que incidem todos os demais processos, alterando inicialmente, propriedades físicas e minerais das rochas, dando origem aos solos. Para solos maduros, mais intemperizados, as características ligadas ao material de origem são menos perceptíveis quando comparados com solos mais jovens. Solos menos intemperizados guardam muitas características e propriedades químicas, físicas, mineralógicas e, às vezes, morfológicas da rocha que o deu origem.

Ter conhecimento sobre o material de origem permite entender a variação do grau de consolidação, da granulometria e composição e, conseqüentemente, algumas características químicas do solo. Para solos autóctones, isto é, desenvolvidos *in situ* a partir da litologia subjacente, as características fundamentais como textura, mineralogia e complexo sortivo podem depender mais fortemente do material de origem do que dos demais fatores (KÄMPF; CURI, 2012; ARAÚJO et al., 2014).

No Brasil, os solos apresentam-se, de modo geral, altamente intemperizados e homogêneos, como por exemplo os Latossolos, desenvolvidos a partir de litologias distintas (ARAÚJO et al., 2014). Neste sentido, uma das dificuldades que os especialistas encontram ao estudar solos com desenvolvimento acentuado está relacionada com a dificuldade de distinguir se o material de origem é de natureza *in situ* ou transportada. Neste caso, faz-se necessário uma avaliação mais completa, como a mineralogia e sedimentologia de cada horizonte pedológico para conclusões mais palpáveis (ESPINDOLA, 2017).

Além do material de origem, a atuação dos organismos também interfere nas características do solo. A presença de fauna, flora e microrganismos promovem a desagregação da rocha por meio da ação química dos compostos orgânicos e pela infiltração da água no material rochoso.

A vegetação atua tanto na forma inicial do intemperismo, com a colonização das rochas por líquens, quanto na metabolização de compostos orgânicos por meio das espécies superiores, capazes também, de controlar a disponibilidade de água para as reações de intemperismo. A fauna e os microrganismos contribuem para a formação de agregados estruturais estáveis no solo, unindo partículas individuais por meio de secreções e micélios, ou através da bioturbação, onde partículas do solo são transferidas entre os horizontes e de local (KÄMPF; CURI, 2012).

A dinâmica da matéria orgânica influencia as características químicas e de fertilidade dos solos. A atuação da fauna, flora e microrganismos pode ocorrer, além da bioturbação, por meio da biociclagem, adição de matéria orgânica, proteção e agregação do solo (LIMA, 2012).

Logo, a quantificação das frações que compõem a matéria orgânica é essencial para a compreensão dos processos pedogenéticos, tendo em vista que estes refletem ou induzem as propriedades dos solos (CANELLAS et al., 2000).

Em países temperados, as baixas temperaturas dificultam o processo de incorporação da biomassa, fazendo com que os solos destas regiões possuam uma camada superior, com característica orgânica, mais espessa. Em países tropicais, como o Brasil, as altas temperaturas e altos índices pluviométricos atuam como catalizadores das reações químicas, sendo, deste modo, a camada orgânica dos solos brasileiros menos espessas devido à rápida ciclagem dos compostos orgânicos e inorgânicos.

Os processos pedogenéticos estão em constante transformação e evolução, condicionados ao clima que atua como catalizador, ou fator retardatário de alguns processos. No Rio Grande do Sul, por exemplo, o clima foi o principal fator associado à gênese e à alteração dos perfis de solo da classe dos Neossolos Litólicos e Regolíticos, que cobrem cerca de 20% do território (PEDRON; AZEVEDO; DALMOLIN, 2012)

O clima, além da interferência na ciclagem de compostos, interfere diretamente no processo de intemperismo, principalmente o químico, responsável pela transformação dos minerais primários. Sendo assim, solos que se desenvolvam sobre o mesmo material de origem, podem apresentar diferentes graus de evolução dependendo das condições climáticas as quais estão submetidos, portanto apresentam classes distintas.

O clima quente e úmido da região Amazônica faz que com predomine Latossolos e Argissolos desenvolvidos sobre rochas intensamente intemperizadas. No entanto, apesar do clima local, o estudo desenvolvido por Horbe et al. (2007) constatou que os solos derivados da Formação Solimões, são pouco evoluídos, justamente por localizar-se em uma região de clima quente e chuvoso, que favorece intensa lixiviação.

Atualmente, informações referentes a alguns fatores climáticos e de terreno, como a temperatura do ar e precipitação, podem ser geradas interpolando os dados obtidos por estações meteorológicas. Mais ainda, com o avanço das técnicas de sensoriamento remoto, informações referentes à umidade superficial, temperatura e evapotranspiração podem ser detectadas remotamente e usadas para caracterizar as condições climáticas (ZHANG; LIU; SONG, 2017).

O tempo, como fator de formação de solos, se refere ao período em que os fatores ativos, clima e organismos, atuam sobre o material de origem, condicionados pelo relevo. Para Oliveira (2008) quanto mais tempo o solo ficar sob influência dos demais fatores de formação, mais sujeito estará a uma série continuada de transformações que alterará suas propriedades químicas e físicas.

A estimativa do grau de maturidade de solo não está ligada apenas ao tempo em que a rocha está exposta aos processos de intemperismo, mas a intensidade com que estes processos atuam. O solo é avaliado como maduro a partir da diferenciação de seus horizontes. Quanto maior o número de horizontes e maior a sua espessura, mais maduro é o solo (JENNY, 1941).

Quando a área apresenta pequena extensão geográfica, com características fisiográficas semelhantes, os fatores de formação do solo, como material de origem, organismos e clima, podem apresentar pequenas variações espaciais. Nesses locais, o relevo é o principal fator envolvido no delineamento das classes de solo encontradas nestas paisagens (WOLSKI et al., 2017).

O relevo condiciona a exposição do solo a diferentes fatores climáticos e afeta diretamente seu desenvolvimento. As diferentes formas da paisagem expressas pelo relevo provocam variações nos atributos do solo em magnitudes diferenciadas, dependentes de um local específico da paisagem. Solos localizados em regiões altas e de relevo suave (chapadas) apresentam solos mais maduros, enquanto locais baixos e declivosos apresentam solos mais jovens (LIMA, 2012).

Diante do exposto, fica claro a inter-relação dos fatores de formação (material de origem, organismos, clima, tempo e relevo) associados aos diferentes tipos de solos de uma região. As características químicas, físicas e biológicas do solo estão diretamente ligadas aos processos de formação, no entanto, o modo de distribuição do solo na paisagem está condicionada, basicamente, às condições de relevo (SILVA et al, 2001; MEIRELES et al., 2012; ESPINDOLA, 2017).

3.2 Relação Solo-paisagem

A estreita relação entre solo e paisagem é avaliada por diversos autores como a base do mapeamento de solos (LOSS et al., 2011; CAMPOS, 2012; MEIRELES et al., 2012; TESKE; GIASSON; BAGATINI, 2015a). Apesar dos demais fatores de formação influenciarem as propriedades do solo, o relevo é destacado como o fator condicionante da ocorrência de cada classe de solo nas devidas porções da vertente (MEIRELES et al., 2012; CAMPOS, 2012; LEPSCH, 2013; SCHAETZL, 2013).

As regiões da vertente onde a relação solo-paisagem é similar, são denominadas Unidades de Mapeamento. Dentro de cada unidade pressupõe-se que ocorra uma classe ou um

agrupamento de classes de solo característico da unidade, e diferente da unidade ao lado. A segmentação da paisagem tem como objetivo individualizar as regiões do terreno com comportamento similar para orientar os processos de levantamento e mapeamento dos solos. Para a delimitação correta de cada unidade de mapeamento é preciso levantar as características da vertente e, atualmente, estas características podem ser obtidas por meio do sensoriamento remoto e do geoprocessamento.

Com efeito, cada vez mais trabalhos associam a variabilidade dos solos com a dependência espacial incorporando métodos de geoprocessamento e sensoriamento remoto através dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIG (ou GIS do inglês, *Geographic Information System*) são ferramentas capazes de produzir, armazenar, processar, analisar e representar inúmeras informações sobre o espaço geográfico. Este sistema inclui o *hardware* (parte física do processamento), o *software* para processamento dos dados, a informação espacial, os procedimentos computacionais e os recursos humanos.

Os dados de sensoriamento remoto fornecem informações iniciais sobre a superfície terrestre e permitem que informações secundárias, bem como alguns índices topográficos sejam extraídos através dos métodos de análise digital do terreno. Tais processos são usados para auxiliar no processo de mapeamento dos solos.

É crescente a demanda por modelos de elevação e atributos geomorfométricos derivados para representação contínua do terreno em formato digital (PINHEIRO et al., 2012). O principal dado de sensoriamento remoto usado no mapeamento de solos é o Modelo Digital de Elevação (MDE). Os MDEs e os atributos dele derivados, associados ao processamento computacional estão se tornando cada dia mais utilizados para o mapeamento de solos. Como dado inicial, o MDE fornece informação referente à altimetria e, a partir dele são processadas as demais variáveis que caracterizam as vertentes, onde destacam-se as variáveis declividade, perfil de curvatura, plano de curvatura, orientação das vertentes e direção do fluxo.

Na literatura, os atributos derivados do MDE recebem diversas denominações, como aspectos topográficos do terreno, atributos topográficos (CAMPOS, 2012), atributos do terreno (CHAGAS; FERNANDES FILHO; BHERING, 2013), covariáveis ambientais (ARRUDA; DAMATTÊ; CHAGAS, 2013), variáveis morfométricas (CARMO et al., 2016), variáveis geomorfométricas (COELHO; GIASSON, 2010; DIAS et al., 2016), entre outros. No presente trabalho, a análise da vertente através de parâmetros do relevo será denominada geomorfologia e seus atributos individuais serão denominados variáveis geomorfométricas.

No trabalho realizado por Ippoliti-Ramiro et al. (2005), as pedoformas (classificação de formas de relevo – geoformas – em correspondência com os tipos de solos) da região de Viçosa,

MG, foram delineadas a partir das variáveis geomorfométricas: elevação, declividade e curvatura do terreno. Os autores observaram uma boa correlação entre o tipo de solo e sua posição na vertente, através das pedoformas delimitadas. A exatidão global obtida foi de 72 %, indicando que o delineamento inicial da paisagem por meio das características do relevo auxilia nas etapas de levantamento, classificação e mapeamento do solo.

Solos em declives são conectados, em termos de processo, como elos de uma cadeia (SCHAETZL, 2013), onde a perturbação de uma característica essencial interfere em outra sequencialmente abaixo, tornando o estudo das vertentes imprescindível para entendimento da distribuição dos solos.

Dalrymple et al. (1968 apud CARMO et al., 2016) apresentaram um modelo hipotético dos processos geomorfológicos dominantes na superfície em uma vertente (Figura 1). Campos (2012) ressalta ainda que o modelo é composto por nove unidades, podendo estar parcialmente ausentes, ou repetidas na toposequência.



Figura 1 - Modelo dos processos geomorfológicos em uma vertente

Fonte: Adaptado de Dalrymple et al. (1968) apud Carmo et al. (2016)

Solos maduros são mais estáveis e mais velhos e normalmente são encontrados nos topos, estando associados a ambientes deposicionais, enquanto superfícies mais jovens ocorrem em áreas de maior declive, considerados ambientes erosionais (SILVA et al., 2001). No trabalho

realizado por Meireles et al. (2012) foi observado a presença de Latossolo Vermelho distroférico típico no topo do seguimento de relevo plano, avaliado pelos autores como cronologicamente mais velho, mais estável e homogêneo que os demais da topossequência. Como esperado, o solo identificado no ombro da encosta, Nitossolo Vermelho eutroférico, cuja declividade supera os 50%, pôde ser descrito como um solo mais jovem em função do seu constante rejuvenescimento pela posição que ocupa no relevo.

Neste mesmo sentido, Campos et al. (2008) ao verificarem a variação espacial da perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas, comprovaram que solos mais antigos e mais estáveis, localizados na parte mais alta e plana da vertente, possuem menores valores de perda de solo e erodibilidade quando comparados com solos das superfícies geomorfológicas de relevos movimentados e de caráter deposicional .

Silva et al. (2001) explicam que o caráter erosional é dependente da topografia e favorece a remoção das camadas superficiais do solo. A topografia com declividade acentuada promove o aumento do escoamento superficial da água e, conseqüentemente, menor percolação desta no perfil, podendo causar a diminuição da intensidade de intemperismo e a presença de solos mais jovens localizados na meia encosta.

O processo de perda de material das encostas, principalmente de argila, é denominado *eluviação*, a palavra provém do latim a partir da junção do prefixo “e” que significa fora e “lavare” que pode ser associado a “lavar”. De modo similar, a porção do relevo que recebe a deposição de argila passa pelo processo de *iluviação*, palavra também derivada do latim, onde o prefixo “il” significa dentro e “lavere”, como explicado, lavar, indicando a região de acúmulo do material, seja no perfil da encosta, seja no horizonte do solo.

A taxa de erosão (erosão/deposição), assim como o teor de água no solo e o fluxo (convergente/divergente), estão associados com a curvatura de uma vertente, também denominada de forma do relevo (MOORE et al., 1991 apud IPPOLITI-RAMIRO et al., 2005).

A forma do relevo (convergente/ divergente/ côncavo/ convexo) interfere tanto no fluxo de água quanto no carreamento de sedimentos. No trabalho desenvolvido por Canellas et al. (2000), o contorno convexo no terço médio e superior da encosta, desenvolvida sobre embasamento cristalino, provocou intensa movimentação lateral de água e redução na infiltração, diminuindo a intensidade de pedogênese. Por outro lado, nos perfis situados no terço inferior da encosta, os processos de pedogênese foram intensificados e ocorreram maior diferenciação dos horizontes, pois a superfície côncava do relevo favoreceu a retenção e infiltração vertical de água.

Os fluxos de sedimentos são geralmente facilitados pela água e variam, previsivelmente, em função da posição na encosta. Para relevos suaves e planos, os solos podem ser mais espessos em função da acumulação lenta de sedimentos ao longo dos anos (SCHAETZL, 2013).

As superfícies geomórficas são resultantes dos fenômenos ocorridos ao longo dos anos e a sucessão destes fenômenos é refletida nas quebras de gradiente do terreno, desde que elas não estejam condicionadas por diferenças marcantes da litologia local (DANIELS; HAMMER, 1992). Os autores acrescentam ainda que, quando se estuda a evolução do solo, a identificação das unidades geomórficas pode ser executada através de critérios topográficos, estratigráficos e com a identificação do material de origem. Entretanto, quando o objetivo é delimitar as superfícies geomorfológicas para fins de mapeamento pedológico, os critérios normalmente adotados são limitados às características do relevo e, quando possível, às informações referentes ao material de origem.

Foi o que Chagas, Fernandes Filho e Bhering (2013) fizeram ao correlacionar os solos encontrados na área de estudo com o material de origem e o relevo. Constataram influência direta entre as variáveis geomorfométricas adotadas (elevação, declividade, aspecto, plano de curvatura, radiação solar, índice topográfico combinado (CTI) e litologias dominantes) e a distribuição dos solos. As litologias dominantes tiveram influência direta na distribuição dos solos com os solos derivados de migmatitos, apresentando mudança textural abrupta, diferentemente dos solos originados dos granulitos, com mudança suave. A presença dos Neossolos Litólicos foi associada à declividade média de 63%, e os Cambissolos associados à declividade média de 36%. A declividade e o CTI explicaram a ocorrência dos Argissolos Amarelos, Vermelho-Amarelos e dos Gleissolos em relevo suavizado. Diferenças na profundidade foram condicionadas pela curvatura do terreno, com áreas côncavas apresentando solos menos profundos (saprólíticos) do que nas áreas convexas.

Outro aspecto relacionado ao relevo e ao material de origem é a cor do solo, principal fator na diferenciação dos horizontes em campo. Chagas, Fernandes Filho e Bhering (2013) encontraram Argissolos derivados dos granulitos, com ocorrência em relevo forte ondulado ou montanhoso, em encostas voltadas para norte, com maior incidência de radiação solar, que apresentam coloração vermelha e características eutróficas, enquanto os Argissolos das encostas voltadas para sul (< radiação solar) foram vermelho-amarelados e distróficos. Os autores afirmam ainda que a maior radiação solar incidente sobre as encostas voltadas para norte tornam estas encostas relativamente mais quentes e mais secas (maior evapotranspiração) do que aquelas voltadas para sul, o que parece favorecer a formação de hematita em relação à goethita, uma vez que as temperaturas elevadas e o maior potencial redox acelera a

mineralização da matéria orgânica, que interfere na fertilidade do solo e na disponibilidade de Fe^{3+} , favorecendo a desidratação da ferrihidrita à hematita.

Como explanado, diferentes atributos interferem na distribuição e nas características físicas e químicas do solo. Na visão de Santos et al. (2015), uma das maiores dificuldades dos levantamentos e mapeamentos detalhados de solos é perceber até onde se estende a continuidade lateral de cada uma das classes de solo e na delimitação das unidades de mapeamento, para isso, é fundamental conhecer as relações solo-paisagem.

O método mais usual neste sentido, é correlacionar o levantamento tradicional de solos em campo aos métodos matemáticos estatísticos e geoprocessamento, também chamados de sistemas híbridos.

3.3 Levantamento e mapeamento tradicional dos solos

O objetivo do levantamento dos solos é individualizar os *pedons* (perfil de solo) similares (*polipedons*) de maneira que seus atributos sejam comuns dentro da unidade e diferentes de uma área para a outra (SANTOS et al., 2015). Ou seja, é a organização e o agrupamento dos solos com características semelhantes por meio da avaliação de suas características morfológicas.

A análise morfológica é a forma de caracterizar o solo segundo suas características anatômicas (cor, espessura de horizontes, textura, estrutura, porosidade, consistência, cerosidade, presença de nódulos e concreções de minerais) e ambientais (localização, topografia, vegetação, altitude, drenagem, erosão, pedregosidade e uso), permitindo a correta diferenciação dos solos na paisagem (CAMPOS et al., 2008; CAMPOS, 2012; ARRUDA; DAMATTÊ; CHAGAS, 2013)

A análise de solos é composta pelo levantamento e mapeamento do solo. Na etapa de levantamento, os solos são classificados e descritos segundo suas características químicas, físicas e mineralógicas, permitindo inferir a delimitação das unidades de mapeamento. Já o mapeamento busca interpretar as características isoladas da classificação em consonância com as características da paisagem, permitindo a espacialização dos dados e a elaboração do mapa de distribuição dos solos de acordo com os atributos morfológicos do terreno.

Neste sentido, a identificação dos padrões morfológicos é realizada a partir de diversos percursos e campanhas de campo, estabelecendo assim, a distribuição espacial, a extensão e os

limites entre as unidades de mapeamento e a identificação dos pontos amostrais (RESENDE et al., 2007; SILVA; CANDEIAS; ARAÚJO FILHO, 2015).

Os métodos de amostragem mais comumente adotados para fins de coleta de dados são: investigação ao longo de transecções; levantamento de áreas-piloto; sistema de malhas, caminhamento livre e estudos em topossequência (LEGROS, 2006; NEUMANN, 2012). A amostragem por transecções é realizada em intervalos definidos, para detectar características do solo e variações da paisagem. O levantamento por áreas-piloto é indicado quando a pesquisa é de natureza genética. Enquanto que a amostragem por sistemas de malhas é aplicada em área menores, quando há projeto de uso intensivo do solo. O caminhamento livre é adotado quando o pedólogo usa sua própria experiência para identificar as áreas de amostragem. Já no método por topossequência, a variação do solo é dada em função das superfícies geomórficas (IBGE, 2007).

O método por topossequência é usado como sinônimo do termo catena em alguns processos de levantamento do solo. No entanto, o método de amostragem por catena foi proposto a partir da concepção de lateralidade do solo, onde os perfis verticais de solo sucedem-se numa vertente a partir da deposição de sedimentos causados pelos processos erosivos da encosta, comandados pela topografia (MILNE, 1935 apud WERLANG et al., 2013; PENNOCK, 2003; SCHAETZL, 2013). Todavia, a partir da década de 1960, o conceito foi ampliado, e a cobertura do solo passou a ser vista como uma unidade com volume. Foi enfatizado o estudo de topossequência ao longo de encostas, considerando os aspectos bidimensionais das coberturas pedológicas, não mais enfatizando o solo como um indivíduo em perfis verticais, mas sim como um material volumoso. O solo passa a ser associado como uma cobertura pedológica que recobre toda a extensão das encostas, vertical e lateralmente no sentido da vertente, intimamente relacionada com os outros elementos da paisagem, especialmente o relevo (WERLANG et al., 2013).

O método mais usual adotado em pedologia para fins de classificação do solo em microbacia é por topossequência, abrangendo todas as porções do relevo, onde pressupõe-se alteração da classe de solo, permitindo sua extrapolação para áreas fisiograficamente próximas (CANELLAS et al., 2000; MEDEIROS et al., 2013). Para a adoção do método de amostragem em topossequência, a área deve apresentar uniformidade de clima, do material de origem e da vegetação original (CANELLAS et al., 2000).

Após a delimitação das unidades de mapeamento, segue-se para etapa de classificação dos solos. Para Loss et al. (2011), a classificação do solo é parte do processo de levantamento de solos que vai além da distribuição geográfica dos solos de uma dada área, pois abrange um

inventário das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos, apresentando a classificação taxonômica e interpretativa dos mesmos.

No Brasil, a classificação dos solos começou a ser estruturada em 1947 com a criação da Comissão de Solos do Centro Nacional de Pesquisa de Ensino e Pesquisas Agronômicas (CNEPA), do Ministério da Agricultura, a partir da ideia de elaborar um mapa pedológico de todo território nacional (LEPSCH, 2013). A ideia inicial era classificar os solos brasileiros aproximando da legenda dos grandes grupos da classificação americana.

O mapeamento foi iniciado pela Comissão de Solos (depois transformada na EMBRAPA-SOLOS) e, devido à dimensão do país, foi dada prioridade para os mapas de solos do tipo exploratórios e de reconhecimento, de escala 1:1.000.000 e 1:500.000, respectivamente (LEPSCH, 2013; KER et al., 2012). No entanto, após as pesquisas de campo de reconhecimento e exploratórias, a legenda precisou de adaptações, já que as características dos solos nacionais (tropicais) diferem dos solos das áreas temperadas (KER et al., 2012).

Entre 1970 e 1985, o Projeto RADAM BRASIL se dedicou a mapear várias partes do Brasil (especialmente na Bacia Amazônica) usando, como mapa-base, imagens aéreas de radar. A interpretação dessas imagens e o trabalho de campo produziram uma série de dados importantes, base para muitos estudos atualmente, como os mapas temáticos sobre solos, geologia, geomorfologia, vegetação, uso potencial da terra e capacidade de uso dos recursos naturais renováveis (LEPSCH, 2013).

Em 1979, a partir dos dados oriundos das pesquisas de campo, foi elaborada a primeira estruturação da classificação brasileira dos solos, também nomeada de Primeira Aproximação. Outras três aproximações foram necessárias para chegar à versão preliminar do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos que se tem hoje no país: em 1981 (Segunda Aproximação), em 1988 (Terceira aproximação) e em 1997 (Quarta Aproximação). A versão final foi divulgada no Congresso Brasileiro de Ciência do Solo em 1999. Em 2003 a classificação passou por revisão, onde foram reajustados algumas classes e horizontes diagnósticos. Após a revisão, a segunda edição do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) foi publicada em 2006.

O SiBCS é um sistema taxonômico, morfopedológico, multicategórico e de abrangência nacional (KER et al., 2012; LEPSCH, 2013). Este sistema está dividido em seis níveis, porém, atualmente, a classificação está organizada só até o 4º nível categórico, pois faltam informações necessárias para a caracterização dos 5º e 6º níveis, família e série, respectivamente.

Sua divisão em níveis categóricos tem como principal objetivo facilitar a organização das informações e o entendimento das ordens de solos. O primeiro nível abrange 13 classes de

solos (as ordens dos Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos, e Vertissolos), seguidos por outras três categorias já definidas: subordem, grande grupo e subgrupo, onde cada nível representa um conjunto de informações que caracterizam os solos.

Como visto, o processo de classificação é complexo e busca hierarquizar os solos a partir de suas características intrínsecas. Para tal processo, a classificação segue procedimentos normativos estabelecidos pela área da Pedologia. No Brasil, destacam-se como materiais normativos para a classificação dos solos o Manual de Métodos de Análise de Solos (EMBRAPA, 1997), o Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (SANTOS et al., 2005), o SiBCS (EMBRAPA, 2018) e o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007).

No trabalho realizado por Lepsch (2013) são debatidas as necessidades de um mapeamento detalhado para o Brasil. O autor ressalta que, para as séries de solo brasileiras serem oficialmente identificadas, primeiramente devem ser mapeadas de acordo com modelos conceituais solo-paisagem, os quais levam em consideração, não só a imagem dos perfis de solo e/ou os conceitos dos táxons do SiBCS, mas principalmente, a geomorfologia, estratigrafia e hidrologia.

A metodologia tradicional, por meio dos procedimentos normativos para levantamento e classificação dos solos, é baseada em levantamentos de campo, onde a densidade de amostragem varia de acordo com a escala final e com o nível de detalhe do mapa que se deseja obter (SILVA et al., 2013a).

Neste sentido, o mapeamento de solos exige informações complementares em escala adequada para a correta elaboração de dados de solos ou de seus atributos. Para Silva, Candeias, Araújo Filho (2015), quanto mais detalhada a escala de trabalho, mais se intensifica o número de exames no campo e, por conseguinte, há um incremento de disponibilidade de tempo e custo para execução dos trabalhos de mapeamento de solos, dificultando a atividade em diversos níveis.

Outra dificuldade do processo é a espacialização da informação por meio do mapeamento de solo que, ao contrário do levantamento, não segue procedimentos normativos. É nesta etapa que se busca espacializar as classes de solo a partir das amostras classificadas do campo. O processo de mapeamento adotado no Brasil baseia-se em um processo empírico e não codificado, como ressalta Santos et al. (2015), sendo dependente do conhecimento “tácito” e experiência previamente adquirida pelo pedólogo.

Neumann (2012) afirma que o método de análise tradicional possui precisão e eficácia limitados, principalmente pelas técnicas de cartografia baseada em polígonos e pelo processo

manual de produção de mapas de solo que considera a transição de solos de modo abrupto entre uma unidade de mapeamento e outra. Nesta abordagem, o modelo tradicional pode ser considerado como não realístico, porque os limites naturais na paisagem tendem a ser mais graduais.

A fim de tornar o processo menos dependente da experiência do profissional, atualmente, estão sendo elaborados métodos que se baseiam nas relações entre a classificação dos solos e fisiografias do terreno (IPPOLITI-RAMIRO et al., 2005). Isso significa que estão sendo elaboradas metodologias de mapeamento, com auxílio de ferramenta computacional, capazes de extrapolar os dados coletados e classificados do campo para áreas morfologicamente semelhantes, reduzindo o número de amostras e tornando o processo menos dispendioso.

3.4 Mapeamento Digital dos Solos (MDS)

Nas últimas décadas, houve uma crescente demanda por informações acerca da distribuição espacial de propriedades e classes de solos. E como forma de suprir esta necessidade, foram desenvolvidas técnicas computacionais mais modernas, com o objetivo de melhorar a manipulação, a análise e a distribuição de dados na predição espacial e Mapeamento Digital de Solos (TEN CATEN et al., 2011; PINHEIRO et al., 2012).

Para Minasny e McBratney (2016), o mapeamento digital do solo requer três componentes: a entrada na forma de métodos observacionais de campo e de laboratório, o processo usado em termos de sistemas de inferência espacial e não-espacial e a saída na forma de sistemas de informação espacial do solo, que inclui saídas na forma de mapas de previsão, juntamente com a incerteza da predição.

O Mapeamento Digital de Solos (MDS) permite associar as variáveis ambientais às informações referentes aos solos, por meio de processos computacionais. A associação de ambas informações através de um processo lógico-matemático torna possível prever a distribuição espacial das classes e propriedades dos solos (GIASSON et al., 2013). Segundo Arruda, Demattê e Chagas (2013), a correlação entre os dados obtidos em campo com as informações sobre a paisagem pode ser processada em ambiente SIG, com auxílio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, aumentando ainda mais a precisão do mapeamento.

O auxílio das ferramentas computacionais no levantamento e mapeamento de solos teve início ainda na década de 70. Mas a expansão deu-se na década de 80, devido aos avanços

tecnológicos nas áreas de tecnologia da informação, sensoriamento remoto, estatística, posicionamento global, e mais recentemente, acesso instantâneo à informação através da rede mundial de computadores (TEN CATEN et al., 2012).

Segundo Zhang, Liu e Song (2017), o início do mapeamento digital de solos ocorreu na década de 1990 quando técnicas quantitativas para levantamento de solo e mapeamento foram desenvolvidas com base na análise das relações entre propriedades e fatores de formação do solo (variáveis ambientais).

No entanto, o Brasil teve seu primeiro trabalho publicado na área de MDS apenas em 2006 (GIASSON et al., 2006). A incorporação tardia desta técnica pelos cientistas nacionais pode estar relacionada: (i) à demora na disponibilização de *software* e *hardware* no país; (ii) ao conservadorismo de muitos pedólogos que relutam em utilizar sistemas automatizados capazes de contribuir para o mapeamento de solos; (iii) à carência de pessoal qualificado para o emprego da tecnologia da informação na ciência do solo; (iv) à popularização mais recente no Brasil de tecnologias como sistema de posicionamento global e sensoriamento remoto (TEN CATEN et al., 2012).

Os pedólogos brasileiros estão gradativamente aderindo ao MDS, principalmente pelo advento dos Sistemas de Informação Geográfica e das geotecnologias. Em geral, o potencial dos SIGs para análise de solos está associado à rapidez no processamento das informações, nas diversas variáveis que a ferramenta é capaz de gerar e na confiabilidade dos resultados fornecidos (NEUMANN, 2012).

Como o levantamento tradicional de solos exige qualificação da equipe, deslocamento de todos os envolvidos na etapa de coleta, custos com transporte e análises, além da alta demanda de tempo, que torna o processo ainda mais oneroso (SILVA et al., 2013a), o MDS surge como alternativa para aumentar a viabilidade da execução de levantamentos de solos, uma vez que utiliza, principalmente, informações digitais relacionadas ao relevo (HÖFIG; GIASSON; VENDRAME, 2014) que podem ser processadas e correlacionadas em menor tempo e com menor custo.

Ippoliti-Ramiro et al. (2005) acrescentam ainda que, dentre as vantagens da análise digital do terreno, está a possibilidade de separação das unidades de mapeamento que, em algumas ocasiões, geram dúvidas ao pedólogo. A análise digital permite a definição automática ou semiautomática das unidades morfológicas da paisagem por meio da adoção das principais variáveis geomorfométricas, como elevação, declividade, orientação e a curvatura da superfície terrestre.

Outro método de mapeamento ocorre por meio da combinação das classificações tradicionais de perfis de solo, classificações feitas com espectroscopia de infravermelho visível (vis-NIR) e mapeamento digital de classe de solo. A junção destas técnicas tem como objetivo principal atualizar os mapas de solo elaborados em pequenas escalas. O método foi aplicado por Teng et al. (2018) para a ampliação da escala do mapa da Austrália, disponível pela *Australian Soil Classification (ASC)* em escala de 1:2.000.000, onde foram capazes de produzir um novo mapa de solos de resolução de 1×1 km, com taxa de erro global de 55,6%. A incorporação do infravermelho visível permitiu a extração de informações de forma rápida e barata, sendo possível obter também informações referentes à cor do solo, teor de óxido de ferro, mineralogia de argila, carbonato, matéria orgânica, quantidade de água presente e distribuição de tamanho de partículas.

A integração da espectroscopia vis-NIR, sensoriamento remoto e MDS está possibilitando o mapeamento de grandes regiões escassamente amostradas do mundo. O estudo ainda é recente, porém, muito promissor.

Esta facilidade de processamento de informações geográficas é avaliada por Sarmiento (2010) como o fator primordial para o número crescente de estudos voltados à aplicação da ferramenta na predição de propriedades ou classes de solo, bem como, o advento da pedometria. Segundo McBratney et al. (2000), a pedometria é o ramo da ciência dos solos que aplica métodos matemáticos e estatísticos para o estudo da distribuição e gênese do solo.

A abordagem pedométrica para o mapeamento de solos é bastante diferente da abordagem tradicional. No mapeamento tradicional, a predição dos tipos de solos é baseada na fotointerpretação e previsão dos tipos de solos. Os mapas produzidos são na forma de polígonos e a escala é dependente do processo de amostragem. No MDS, a informação sobre os tipos de solos é produzida a partir de técnicas de geoestatística, e os mapas produzidos são dependentes da resolução dos dados iniciais (NEUMANN, 2012).

Com base no conhecimento dos padrões regionais de solos, o processamento digital da informação permite a extrapolação das relações solo-paisagem de uma área mapeada, definida como área de referência para regiões onde estas relações ainda não são bem conhecidas. (LAGACHERIE; VOLTZ, 2000; TEN CATEN et al., 2011).

O mapeamento digital do solo está se tornando uma ferramenta poderosa para aumentar os detalhes espaciais das informações do solo em grandes áreas, o que é essencial para tratar de questões agronômicas e ambientais (VINCENT et al., 2018). Para Höfig, Giasson e Vendrame (2014), a extrapolação das relações solo-paisagem para áreas adjacentes e fisiograficamente semelhantes, com uso de informações obtidas de uma área de referência, não tem sido feita,

apesar do processo ser capaz de reduzir a escassez de mapas de solos em grande escala, em muitos países.

Vale ressaltar que a produção de mapas por meio de técnicas do MDS pode ser dificultada pela falta de mapas pedológicos tradicionais de referência (TESKE; GIASSON; BAGATINI, 2015b). Na ausência de uma área de referência, há possibilidade de treinar os modelos preditivos em pontos de observação por meio da validação de campo, realizada por meio da identificação, coleta e caracterização do solo de forma a representar as unidades de mapeamento (SILVA et al., 2013a; DIAS et al., 2016).

Outra dificuldade do MDS levantada por Zhang, Liu e Song (2017) é que a maioria das pesquisas nesta área adota atributos do terreno como as principais variáveis preditoras e, no entanto, em áreas de baixo relevo, como planícies, os fatores de formação geralmente não variam com as condições do solo ao longo do espaço. Deste modo, os atributos do terreno para estas áreas não devem ser usados efetivamente no MDS. A variação das propriedades do solo nestes mapeamentos ainda permanece um desafio.

Conforme abordado, é visto que algumas dificuldades precisam ser enfrentadas com relação ao mapeamento do solo, como a simulação da heterogeneidade do solo na escala regional, o mapeamento do solo em terrenos planos e a relação entre mapeamento do solo e a espectroscopia do solo. Logo, é necessário que mais técnicas computacionais sejam desenvolvidas para a predição da distribuição dos solos, além do aperfeiçoamento para prever outros atributos como cor, textura, espectro, temperatura e umidade do solo (ZHANG; LIU; SONG, 2017).

Embora diversas metodologias tenham sido elaboradas, ainda não há procedimentos, padrões ou protocolos estabelecidos e aceitos para a geração de MDS. É difícil listar o melhor método de previsão de solos, cuja precisão seja alta, principalmente quando os estudos abordam extrapolação da informação para áreas adjacentes não mapeadas. As relações solo-paisagem variam nas diferentes paisagens, dificultando a adoção de um método padrão.

3.4.1 PRINCIPAIS MÉTODOS E TÉCNICAS APLICADAS AO MDS

As técnicas de MDS buscam relacionar as variáveis geomorfométricas da área de estudo de forma lógica, identificando as regiões onde há semelhança de parâmetros e características do relevo que permitam cada classe de solo. A Figura 2 ilustra os métodos de MDS e seus

principais componentes, incluindo dados existentes do solo, variáveis ambientais, amostragem de solo, modelos preditivos e suas aplicações relevantes.

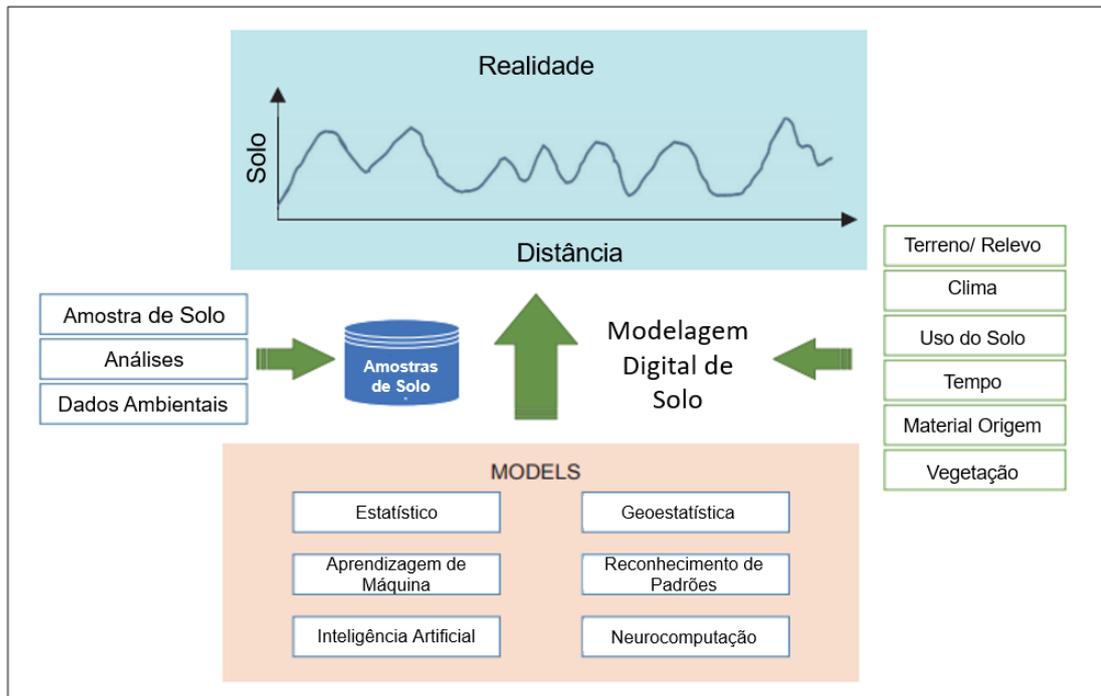


Figura 2 - Quadro geral do mapeamento digital do solo

Fonte: Zhang, Liu e Song (2017)

Há diversos métodos de predição de distribuição e classes de solo que podem ser processadas em ambiente computacional. As técnicas de processamento e análise de dados mais utilizados são: geoestatística (*kriging*), lógica de conjuntos difusos (lógica *Fuzzy*), redes neurais artificiais, regressões múltiplas e árvores de decisão (SARMENTO, 2010).

Geoestatística

A geoestatística surgiu na África do Sul, quando Krige (1951) verificou que para encontrar sentido nas variâncias das concentrações de ouro era preciso levar em conta as distâncias entre as amostras e, assim, surgiu o conceito da geoestatística ou teoria das variáveis regionalizadas, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (GREGO; OLIVEIRA, 2015). Ou seja, a geoestatística parte do princípio que quanto mais próximas as amostras, mais parecidas entre si elas se apresentam.

O termo krigagem é em homenagem ao autor, Danie Gerhardus Krige, e o método consiste em ponderar os vizinhos mais próximos do ponto a ser estimado, obedecendo os critérios de não tendenciosidade, que significa que, em média, a diferença entre valores estimados e observados para o mesmo ponto deve ser nula e ter mínima variância (BOISVERT; DEUTSCH, 2011).

A hipótese básica sob a qual a geoestatística se baseia é que dados vizinhos são mais parecidos que dados distantes. O semivariograma é um “medidor” do grau de semelhança entre vizinhos (GREGO; OLIVEIRA, 2015). Ele pode ser estimado pela Equação 1:

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_1) - Z(x_1 + h)]^2 \quad (1)$$

Em que: $y(h)$ equivale a Semivariância estimada; $N(h)$, Número de pares de observações; $Z(x_1)$ e $Z(x_1 + h)$ separados pela distância h . Para que a variável avaliada tenha dependência espacial é necessário que o semivariograma seja crescente com a distância.

Segundo Valeriano e Prado (2001), a técnica da krigagem minimiza o erro (ou variância) associado a cada estimativa. Além da estimativa do valor da variável, a técnica possibilita a estimativa da variância amostral para cada ponto.

As principais limitações da técnica geoestatística univariada da krigagem estão relacionadas: a) à hipótese de estacionaridade requerida e que frequentemente não é encontrada em conjuntos de dados de campo; b) à grande quantidade de dados necessários para definir a autocorrelação espacial, e c) às situações de complexidade do terreno e dos processos de formação do solo (McBRATNEY et al., 2000).

No trabalho realizado por Yoshida e Stolf (2016) foram levantadas as características geomorfológicas e os atributos físicos e químicos do horizonte superficial dos solos. Foi utilizado krigagem no modelo de semivariograma exponencial. O método permitiu espacializar todas as informações separadamente para a área de estudo. Destaca-se, aqui, a importância da espacialização dos atributos químicos, como fator essencial para a classificação dos solos. Os modelos permitiram destacar as regiões onde os atributos são fortemente encontrados, e as regiões menos expressivas, com mudança gradual dos padrões, assim como ocorre no ambiente.

Lógica de conjuntos difusos (Lógica Fuzzy)

A lógica *Fuzzy* foi criada por Lofti A. Zadeh no início de 1960, e é considerada como análise algébrica de mapas não cumulativa ou análise lógica (NEUMANN, 2012). A teoria dos conjuntos *Fuzzy* foi desenvolvida para tratar dos problemas do processamento de informações da linguagem natural, na qual existem conceitos centrais bem definidos, mas a definição de fronteiras é vaga (LIMA, 2013), como ilustra a Figura 3.

A aplicação dos métodos *Fuzzy* permite manipulação de informações incertas e imprecisas, assim como acontece com o raciocínio humano. No mapeamento de solos, o método possibilita a definição da ocorrência de classes de solos na paisagem sem o estabelecimento de limites rígidos e, por esta razão, mais adequados às mudanças graduais que ocorrem na transição de uma classe de solo para outra. Assim, quando há alteração do relevo, por exemplo, é perceptível a passagem gradual das características do solo, sem mudança brusca. Esta funcionalidade do método tem atraído a atenção de estudiosos devido à habilidade em capturar e representar a natureza contínua da variação espacial do solo (SARMENTO, 2010; NEUMANN, 2012; LIMA, 2013).

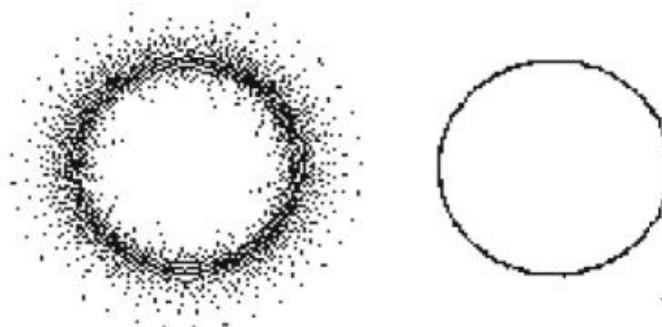


Figura 3 - Diagrama de Venn ilustrando a diferença de limites entre um conjunto Fuzzy e um conjunto Booleano.
Fonte: Burrough (1998)

O emprego da Lógica Fuzzy para o MDS possibilita a alocação de indivíduos (*pedons*), de acordo com o grau de pertinência do indivíduo em relação a cada classe de solo mapeada. A limitante do processo está na escala de trabalho, ou seja, se a escala for pequena, é perfeitamente viável trabalhar com lógica booleana, sem nenhum prejuízo maior para as conclusões. Se o trabalho for em grande escala será indicado o uso da Lógica Fuzzy, atrelado ao bom conhecimento do comportamento da variável ambiental, para definir o tipo de função de pertinência e os limites que serão usados (LIMA, 2013).

Redes Neurais

Outra técnica importante empregada para obter mapas de solos digitais é por meio das Redes Neurais Artificiais (RNA). As redes realizam o processamento de dados e atuam por modelos baseados no funcionamento do cérebro humano. São compostas por unidades de processamento simples operando em paralelo, permitindo o estabelecimento de relações matemáticas entre as variáveis ambientais e as classes de solos (NEUMANN, 2012; ARRUDA; DEMATTÊ; CHAGAS, 2013).

As principais vantagens das RNA levantadas por Neumann (2012) incluem a possibilidade de manipulação de grande número de dados e a capacidade de generalização. O método tem a habilidade de manipular os dados adquiridos de diferentes fontes e com diferentes níveis de precisão. Segundo Lima (2013), as vantagens das RNA estão na capacidade de aprender e ser treinada por meio de exemplos; por apresentar bom desempenho em tarefas mal definidas (quando falta o conhecimento explícito sobre como encontrar uma solução); e por não requerer conhecimento a respeito de eventuais modelos matemáticos.

No trabalho realizado por Arruda, Demattê e Chagas (2013), a etapa de treinamento e validação das redes neurais foi executada por meio das variáveis geomorfométricas das áreas de referência, considerando o tamanho do pixel de 20 m (Figura 4). Na etapa de treinamento, a taxa de aprendizado foi de 0,2 e o número de ciclos de aprendizagem foi de 10.000. Os autores identificaram por meio da RNA um padrão nas modificações das propriedades químicas e granulométricas dos solos, e isto indica a possibilidade de extrapolar as feições para áreas não mapeadas e obter resultados satisfatórios. As variáveis geomorfométricas declividade e elevação foram os dados ambientais que mais se destacaram na distinção e predição das classes de solos pelas redes neurais. A exatidão global média obtida foi de 69,94% e índice Kappa de 65,86%.

Quanto às dificuldades encontradas, os autores ressaltaram que áreas fisiograficamente semelhantes com presença de solos diferentes causam dúvidas ao algoritmo. O comportamento semelhante das covariáveis ambientais para os Latossolos e Argissolos, por exemplo, dificultou a separação das classes pela abordagem empregada. A mesma dificuldade foi constatada no campo, já que essas classes de solos ocorreram em condições de relevo similares (ARRUDA; DEMATTÊ; CHAGAS, 2013).

Para avaliar a eficiência da utilização de dois classificadores distintos, Chagas, Vieira e Fernandes Filho (2013) aplicaram os métodos de RNA e algoritmo da máxima verossimilhança (Maxver) na predição de classes de solos em uma área na região noroeste do Estado do Rio de

Janeiro. As variáveis geomorfométricas adotadas foram: elevação, declividade, aspecto, plano de curvatura e índice topográfico combinado (CTI) e índices argilominerais e de óxido de ferro, além do índice de vegetação NDVI (Índice por Diferença Normalizada, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), derivados de uma imagem do sensor ETM+ do LANDSAT 7. Os autores validaram os métodos por meio de 126 pontos de referência coletados no campo e identificaram que o classificador com base na RNA produziu exatidão superior (73,81%) ao classificador Maxver (57,94%) para as variáveis selecionadas.

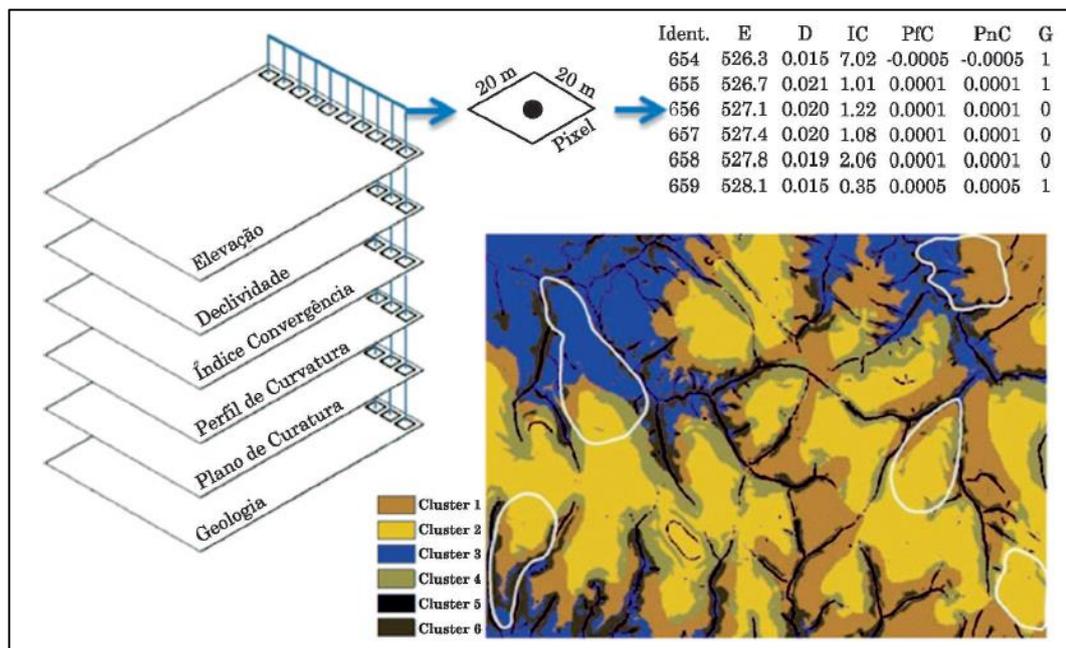


Figura 4 - Treinamento do modelo a partir das variáveis ambientais de entrada

Fonte: Arruda, Demattê e Chagas (2013)

Os resultados obtidos por Arruda, Demattê e Chagas (2013), e Chagas, Vieira e Fernandes Filho (2013) mostraram que a utilização de atributos do terreno, juntamente com dados de sensoriamento remoto em uma abordagem por RNA, pode contribuir para facilitar o mapeamento de solos no Brasil.

Regressões Múltiplas

As regressões lineares múltiplas assumem a existência de uma relação linear entre a variável dependente e duas ou mais variáveis independentes (NEUMANN, 2012). Uma variável ou conjunto de variáveis independentes ou preditoras possuem um efeito causal sobre a variável

dependente ou resposta. Por exemplo, no caso de três variáveis independentes, a regressão linear múltipla pode ser escrita como a Equação 2.

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2)$$

Sendo Y a variável dependente (ou variável resposta), x_1 , x_2 , x_3 são as variáveis independentes, a é o intercepto e b_1, b_2, b_3 são os coeficientes angulares das variáveis independentes. O intercepto representa o valor de Y quando os valores das variáveis independentes for zero, e o coeficiente indica a taxa de alteração de Y para cada unidade de incremento na variável independente correspondente (BAILEY et al., 2003).

Normalmente, as equações de regressão linear múltiplas são calculadas por meio do método de mínimos quadrados e o grau de associação entre a variável dependente. Enquanto que as variáveis independentes são expressas pelo coeficiente de determinação (R^2), cuja significância estatística é avaliada com base no teste F ou teste t (SARMENTO, 2010).

As regressões logísticas, contrárias às regressões lineares, são calculadas pelo método da máxima verossimilhança. O método assume que a variável dependente é categórica e é bastante adotada quando o objetivo é calcular a probabilidade de um evento. Coelho e Giasson (2010) afirmam que por ser utilizada mais de uma variável independente, o modelo é considerado múltiplo e, pelo fato de predizer mais que duas classes de solo, é considerado multinomial.

As variáveis adotadas por Coelho e Giasson (2010) para a regressão logística abordam aspectos relacionados a declividade, perfil de curvatura, elevação, curvatura planar, e índice de umidade topográfico. O método, com legenda simplificada, apresentou acurácia global de 67,36% e Kappa de 33,14%.

No trabalho realizado por Bailey et al. (2003), a regressão linear foi aplicada para identificar e extrapolar classes de solos para áreas não mapeadas. O modelo foi calibrado para uma área de referência, correspondente a 27% da área total, onde foi estabelecida a relação entre as variáveis geomorfométricas declividade, orientação de vertente e altitude, com a variável dependente “série do solo”, e, posteriormente, foi expandido para a área total. Apesar da precisão global obtida de 65%, os autores afirmam que o desempenho do modelo é limitado pela precisão das variáveis empregadas.

Árvore de Decisão

Os algoritmos por árvore de decisão simulam o processo de abstração humana através de uma categorização hierárquica, obtendo regras similares a uma chave de classificação. O método é baseado em algoritmos de aprendizagem de máquina que estabelecem modelos através de exemplos (SARMENTO, 2010).

Uma árvore de decisão geralmente começa com um único nó que se divide em possíveis resultados. Cada um desses resultados leva a nós adicionais que se ramificam em outras possibilidades. Assim, cria-se uma forma de árvore, como mostra a Figura 5.

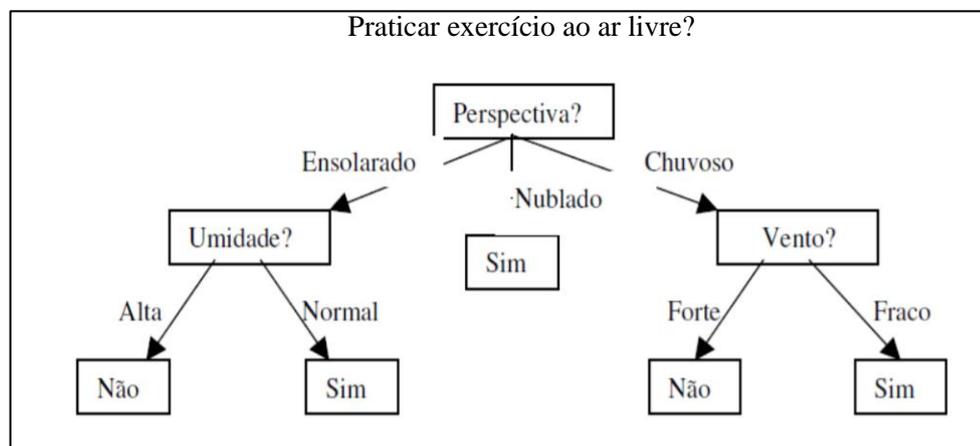


Figura 5 - Exemplo do funcionamento de uma árvore de decisão

Fonte: Witten e Frank (2005)

A técnica de processamento por árvores de decisão é abordada por Zhang, Liu e Song (2017) como sendo a técnica mais empregada no mapeamento de solos, devida a sua previsão robusta do tipo de solo, espessura do horizonte e da possibilidade de quantificação do carbono orgânico.

No trabalho de Wolski et al. (2017), a técnica de árvore de decisão foi utilizada para a construção do modelo preditivo em uma área de referência (equivalente a 1,5% da área total), e sua posterior extrapolação para áreas não mapeadas. Foram adotados 8 variáveis geomorfométricas: elevação, índice topográfico de umidade, perfil de curvatura, plano de curvatura, orientação de vertente, declividade e distância vertical da rede de drenagem. A validação do MDS, com pontos de observação de campo, resultou em 66,1% de exatidão global e 36% de índice Kappa.

O modelo por árvore de decisão é superior a outros métodos de predição de MDS, no entanto, existem diferenças no desempenho entre algoritmos de árvores de decisão, não permitindo, ainda, a seleção de apenas um algoritmo adequado à extrapolação e expansão da cobertura de solo para áreas circunvizinhas não mapeadas (GIASSON et al., 2011; GIASSON et al., 2013).

No trabalho realizado por Giasson et al. (2013), ao testar a aplicação de cinco algoritmos de árvores de decisão, os autores observaram que nenhuma combinação de algoritmo foi capaz de mapear todas as classes de solo presente no mapa de referência. A dificuldade está na localização de algumas classes de solos que ocorreram em áreas muito pequenas. Os autores ressaltam, ainda, a necessidade de ser realizada a verdade de campo, como forma de melhorar a qualidade dos dados.

A partir da abordagem sobre os métodos aplicados ao MDS, torna-se perceptível que as ferramentas computacionais são importantes na etapa de espacialização dos solos na paisagem, no entanto, não substituem os levantamentos tradicionais de solo, apenas os complementam e otimizam o tempo. A associação de ambas técnicas, levantamento tradicional e mapeamento digital de solos, além de tornar os resultados mais confiáveis, permitem a extrapolação dos dados para áreas maiores, fato este, capaz de suprir a carência de material pedológico e melhorar a escala de diversos mapas.

Para o presente trabalho, o método adotado foi o Mapeamento Digital apoiado no processamento lógico por Árvore de Decisão. Segundo Teske, Giasson e Bagatini (2015b) as árvores de decisão são robustas e permitem o uso de variáveis preditoras tanto nominais como numéricas. O método vem sendo a principal escolha de diversos autores (COELHO; GIASSON, 2012; GIASSON et al., 2011; CATEN et al., 2013; HÖFIG et al., 2014; WOLSKI et al., 2017) por possuir uma representação intuitiva que torna o modelo de classificação fácil entendimento, interpretação e discussão. Outra vantagem da adoção do algoritmo J48 para desenvolvimento do mapeamento digital está na geração de regras que permitem que os dados sejam inseridos de maneira mais simples nos softwares de geoprocessamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Método de Pesquisa

O presente trabalho traz uma abordagem qualitativa e quantitativa. Qualitativa, quanto ao levantamento, caracterização e distribuição dos solos na paisagem, e quantitativa, ao empregar métodos computacionais para extrapolação da informação para uma área maior, com aplicação de métodos estatísticos para validação dos resultados.

Ressalta-se, ainda, que o método do presente trabalho é de natureza explicativa, sob a forma de pesquisa experimental. Avalia-se as características físicas, químicas e mineralógicas do solo que permitam explicar sua distribuição na paisagem, entendendo este padrão, de forma a possibilitar a extrapolação da informação para áreas adjacentes. Todo o processo é dependente do levantamento de campo e de análises laboratoriais das amostras do solo.

Neste sentido, o trabalho pode ser dividido em duas partes. O primeiro referente ao levantamento e mapeamento do solo para a microbacia do Ribeirão Anhumas, adotada como área de referência. Subdivide-se em três etapas: (i) Trabalho de escritório, para levantamento do estado da arte, elaboração de mapas temáticos e delimitação das possíveis unidades de mapeamento; (ii) Abertura de perfis, descrição morfológica e análises laboratoriais para determinação de atributos físicos e químicos das amostras de solo, bem como, classificação de cada perfil amostrado; e (iii) espacialização dos dados para a microbacia por meio do mapeamento. Em uma segunda etapa, será possível a extrapolação da informação pedológica para todo o município de Itajubá, por meio do mapeamento digital de solos, realizado em ambiente SIG. Na Figura 6 é apresentado um esquema ilustrativo das etapas da pesquisa.

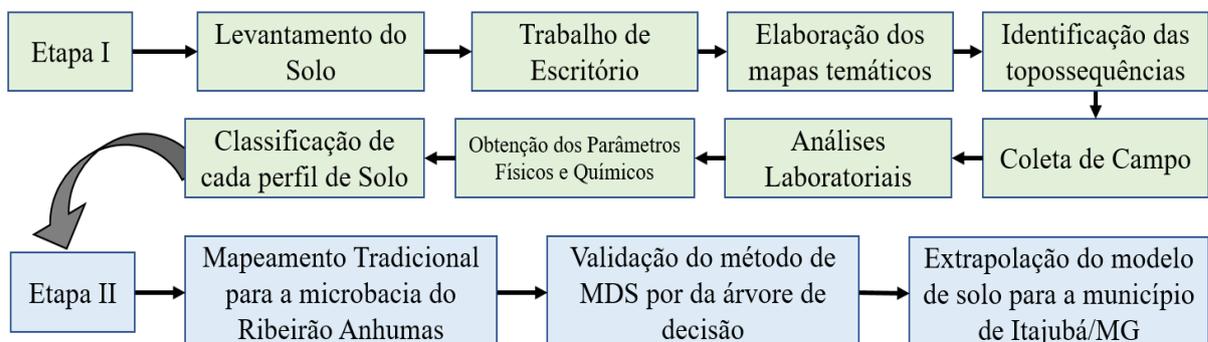


Figura 6 - Esquema ilustrativo das etapas da Pesquisa

Fonte: Org. do autor (2019)

4.2 Descrição da Área de Estudo

O município de Itajubá está localizado na região sul do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 45°32'30" O 22°20'00" S e 45°14'30" O e 22°33'00" S. Limita-se, ao norte, pelos municípios de São José do Alegre e Maria da Fé; a leste, com Delfim Moreira; ao sul, com Wenceslau Bráz e Piranguçu; e, a oeste, por Piranguinho (Figura 7).

Segundo o Atlas de Desenvolvimento Humano (2013), o município possui 43 bairros, sendo 35 urbanos e 8 rurais, densidade demográfica de 311,56 hab/km² e, Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM) de 0,787, considerado alto, quando comparado com a média nacional de 0,727. Itajubá possui área de 294,835 km² e população estimada de 90.658 habitantes, segundo Censo de 2010 (IBGE, 2010). Da população total, 82.764 habitantes são residentes na área urbana, e isto equivale a 91,29 % da população municipal.

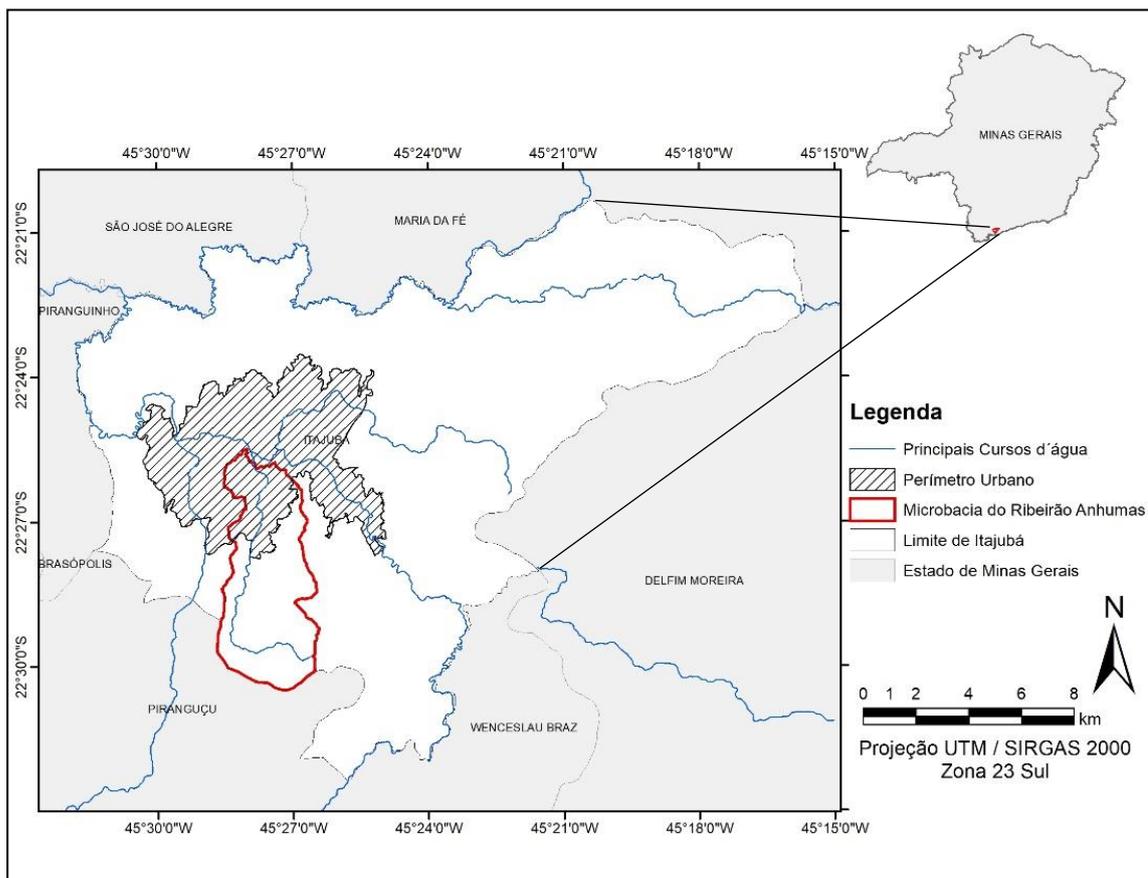


Figura 7 - Localização da área de estudo

Fonte: Org. do autor (2019)

Situado nos limites meridionais da zona intertropical e sob influência da elevada altitude da região, o clima da área de estudo é do tipo Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), segundo classificação climática de Köppen, com oscilações bruscas de temperatura e predominância de ventos NE. A precipitação média acumulada anual é de 1.409,5 mm, chegando ao maior nível nos meses de dezembro e janeiro.

4.2.1 Hidrografia

Itajubá situa-se na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, cuja nascente se encontra na cidade de Campos do Jordão – SP. O Rio Sapucaí atravessa a zona urbana da cidade, iniciando-se no bairro urbano Santa Rosa e findando-se no bairro Santos Dumont (BARROS, 2015). Dentro dos limites municipais, circundam os rios Sapucaí e Lourenço Velho e os Ribeirões Anhumas, José Pereira, Piranguçu e Água Preta.

Dentre os cursos d'água e as microbacias presentes em Itajubá, destaca-se a microbacia do Ribeirão Anhumas, adotada neste estudo como área de referência. O Ribeirão Anhumas é afluente do rio Sapucaí na sua região média, e o encontro de suas águas ocorre dentro do perímetro urbano de Itajubá. O comprimento do Ribeirão Anhumas é de 1,23 km com área de drenagem de aproximadamente 23,53 km², correspondente a 8% de todo território municipal.

4.2.2 Uso e Ocupação do Solo

Historicamente, a ocupação do solo no município de Itajubá desenvolveu-se às margens do Rio Sapucaí, com intenso processo de urbanização ao longo de sua bacia de inundação. Além da ocupação do vale fluvial, com a ampliação das atividades comerciais e o aumento da população, iniciou-se também a ocupação indevida das áreas de encosta e ao longo de rodovias. Atualmente, uma das maiores dificuldades da gestão pública municipal é o ordenamento territorial. Mesmo com a implantação do Plano Diretor em 2003, muitas regiões não puderam adequar-se às exigências legais, uma vez que a infraestrutura já estava implantada.

Parte do perímetro urbano municipal abrange a microbacia do Ribeirão Anhumas. Na porção norte da microbacia encontra-se a região urbanizada, restrita à região de menor altitude e relevo suave. Esta região faz parte da área de expansão urbana municipal, sendo possível observar, atualmente, a instalação de novos loteamentos residenciais. A instalação dos novos empreendimentos aconteceu sem que os aspectos ambientais fossem cuidadosamente

atendidos. Diante disto, é visível os processos erosivos decorrentes da forma de implantação dos loteamentos, como ilustra a Figura 8, onde alguns taludes apresentaram-se sem cobertura vegetal e susceptíveis a perda de material por processos erosivos, principalmente, em épocas chuvosas.



Figura 8 - Processos erosivos identificados na microbacia do Ribeirão Anhumas. A) área degradada, com visíveis caminhos preferenciais de água e processos erosivos; B) e C) taludes sem cobertura vegetal e susceptíveis a perda de material por processos erosivos.

Fonte: Org. do autor (2019)

O perímetro urbano do município é ilustrado na Figura 9, juntamente com sua abrangência sobre a microbacia do Ribeirão Anhumas. Ao avaliar o crescimento urbano para o município de Itajubá para 2030, Maltauro (2018) identificou que alguns bairros inseridos na microbacia do Ribeirão Anhumas possuem característica de crescimento horizontal, no entanto, a direção de crescimento segue para áreas com baixa aptidão à urbanização ambientalmente sustentável.

A microbacia é uma das mais representativas do município e está inserida em sua totalidade dentro dos limites municipais e, apesar da delimitação do perímetro urbano e das previsões futuras, a região é pouco urbanizada e predomina ocupações características de zona rural, como mostra a Figura 10.

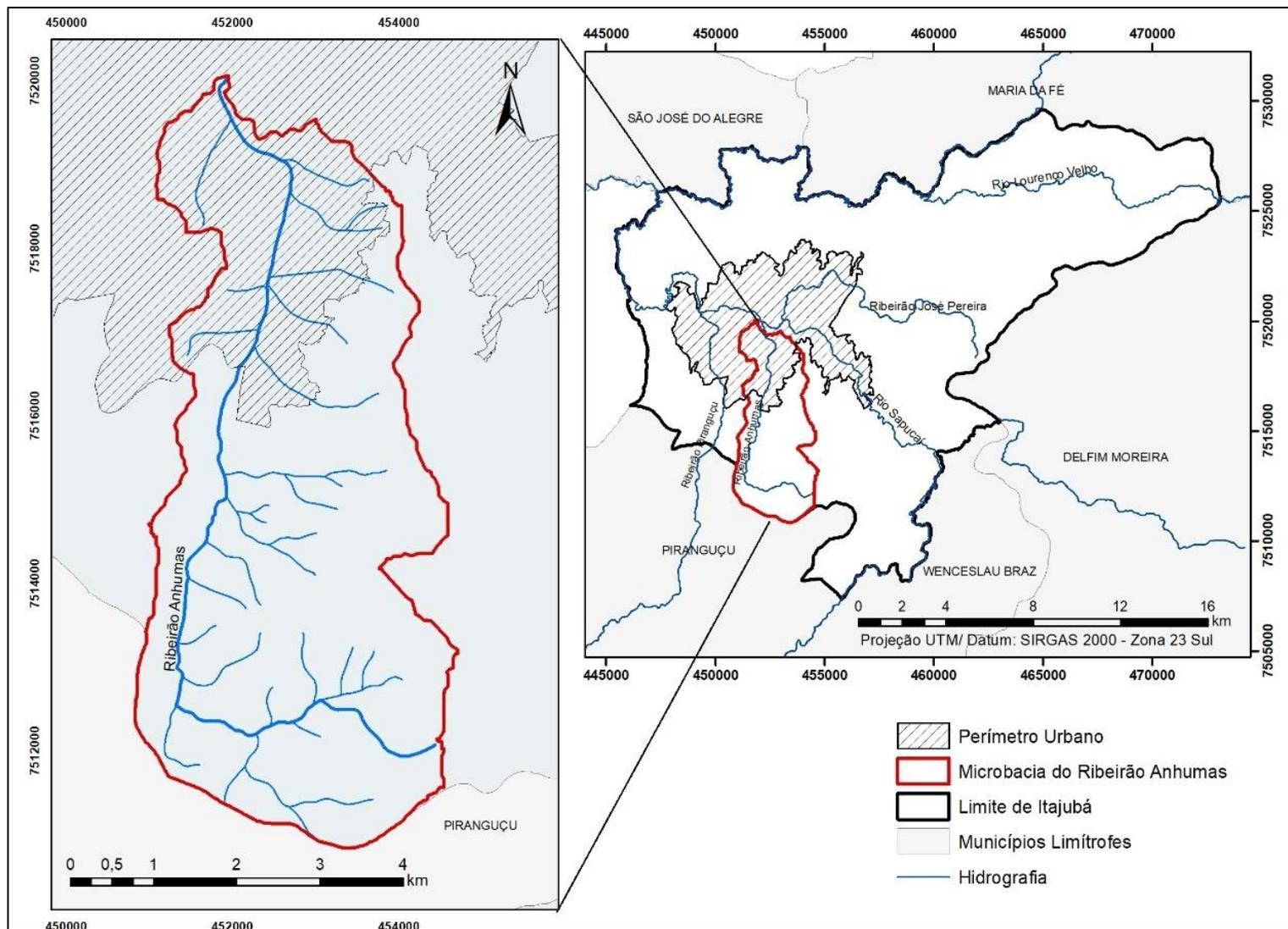


Figura 9 – Localização dos principais cursos d'água do município de Itajubá – MG

Fonte: Org. do autor (2019)

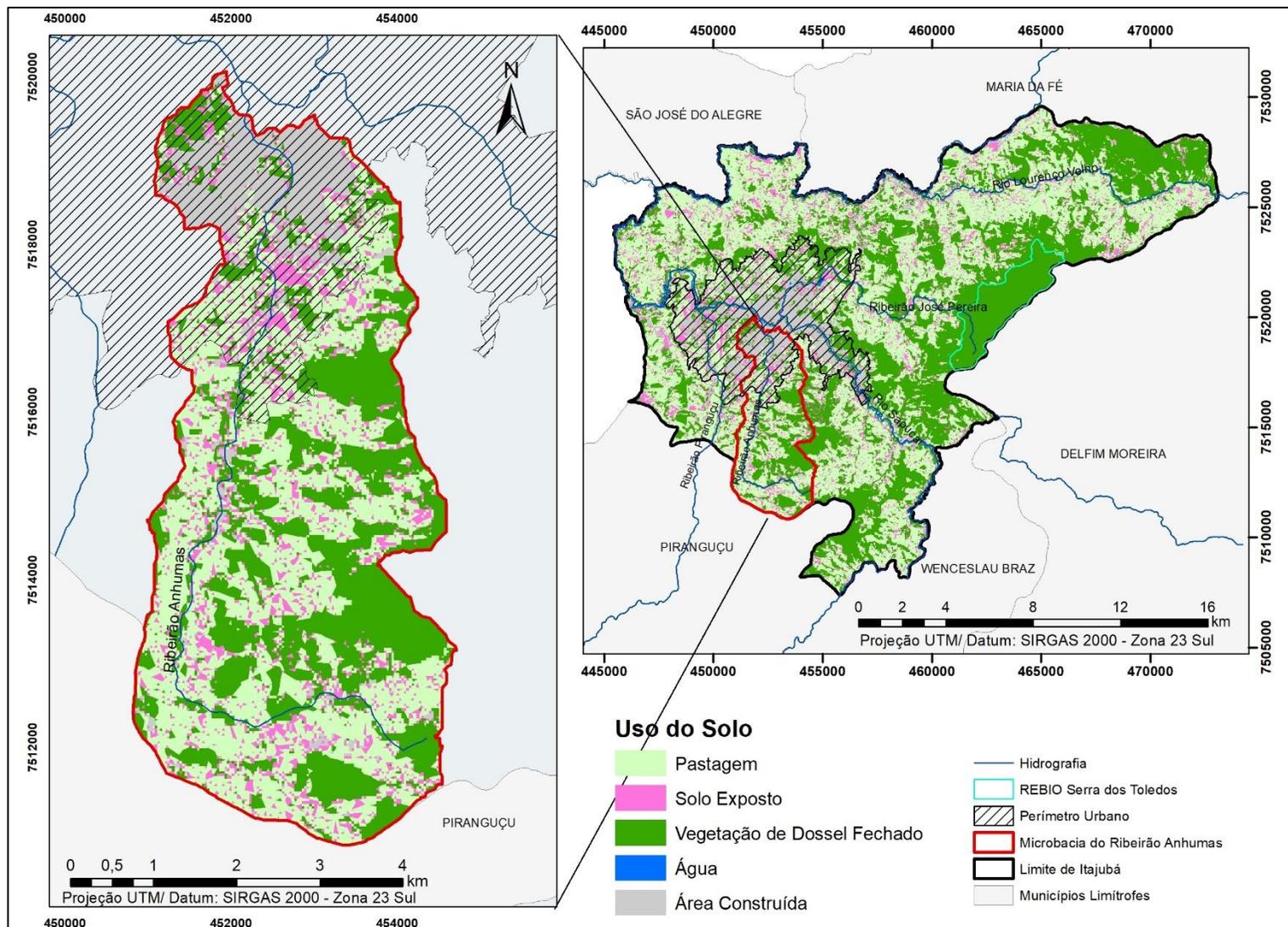


Figura 10 - Mapeamento do Uso do Solo do município de Itajubá – MG

Fonte: Carvalho (2018).

4.2.3 *Vegetação*

O município de Itajubá está localizado no interior do Bioma Mata Atlântica, no entanto, detém apenas 10% (2769 ha) da vegetação correspondente ao cenário de 2008, ano da aprovação da Lei da Mata Atlântica, Lei 11.428 de 2006, instituída pelo Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008 (BARROS, 2015). Destaca-se, neste contexto, a Reserva Biológica da Serra dos Toledos (REBIO Serra dos Toledos), importante Unidade de Conservação presente no município. A REBIO Serra dos Toledos conserva sua cobertura vegetal original, característica de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Mista, apesar de apresentar vegetação secundária.

Outra importante Unidade de Conservação no município de Itajubá é o Parque Estadual de Anhumas, criado em 1983 e inaugurado em 1987. O Parque, com 22 hectares, é hoje uma importante unidade ecológica de conscientização sobre conservação do meio ambiente.

O restante do município apresenta remanescentes de Mata Atlântica, com Floresta Semi-caducifólia Latifoliada Tropical e Floresta Sub-Caducifólia Subtropical de Araucária, ocorrendo também áreas de transição de cerrado e campo (ecótono) (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ, 2018).

Dentro dos limites da microbacia do Ribeirão Anhumas há alguns fragmentos de vegetação nativa, representando 33,61 % da área. Grande parte das áreas preservadas localizam-se em regiões de maiores altitudes e em declividades acentuadas, restringindo-se, principalmente, a alguns topos de morros.

O principal uso do solo é a pastagem, que abrange 42,22 % da área, onde a vegetação é composta, basicamente, por braquiária nas áreas de pastagens e presença de alguns arbustos e árvores de pequeno porte nas partes mais altas do relevo. As pastagens ocupam cerca de 42,22% da área. A composição florestal destas regiões é, basicamente, compreendida por espécies exóticas, como a braquiária e, em algumas poucas áreas, ocorre espécies consorciadas com nativas, principalmente, quando localizados próximos a fragmentos florestais.

Apesar do uso do solo ser voltado à pastagem para bovinocultura, a região ainda apresenta alguns topos de morros bem preservados, com vegetação de grande porte e dossel contínuo. Dentre as áreas amostradas, algumas apresentaram topos de morros com vegetação preservada, sendo uma propriedade com vegetação de cabeceira em estágio inicial de sucessão, árvores espaçadas e presença de arbustos, enquanto outras apresentam árvores de grande porte e dossel contínuo, característica de Mata Atlântica.

4.2.4 Altimetria e Declividade

O município apresenta altitudes que variam entre 1915 m (Pedra de Santa Rita) e 845 m (cota do Rio Sapucaí), com média de 842 metros de altitude (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ, 2018). O mapa de altitude, Figura 11, permite identificar a REBIO Serra dos Toledos, localizada na região sudeste do município, nas altitudes acima de 1300m, importante região produtora de água. Nas áreas baixas, onde localiza-se a planície de inundação do Rio Sapucaí, encontra-se também o núcleo urbano do município de Itajubá. O município de Itajubá, no geral, apresenta relevo forte ondulado e montanhoso, favorecido por sua localização entre as encostas da Serra da Mantiqueira.

Com base nas imagens de Sensoriamento Remoto, com resolução de 30 metros, foram obtidas as informações quanto às características físicas do terreno. A informação referente a classes de altitude foi gerada a partir do fatiamento da Imagem ASTER GDEM (datada de 17 de outubro de 2011) com 30m de resolução, obtidas gratuitamente através da plataforma EarthExplorer do USGS, e recortada para a área de interesse. A informação referente à declividade foi obtida por meio do processamento da imagem no software ArcGIS10.2 (ESRI, 2014), com aplicação da ferramenta *Slope*.

Desta forma, delimitando a informação para a microbacia do Ribeirão Anhumas, a altitude varia de 830 a 1650 metros, sendo a região norte da microbacia representada pelas menores altitudes e declividades mais suaves, que favorece o processo de urbanização. Nesta região localiza-se também a planície fluvial do Ribeirão Anhumas. Em contrapartida, relevo forte ondulado e montanhoso predominam na microbacia, principalmente nas áreas de maior altitude. A região da microbacia mais movimentada é a parte sul, apresentando declividades acima de 75% em alguns pontos.

O mapa de declividade, Figura 12, facilita a visualização do grau de inclinação do terreno segundo intervalos de classes pré-estabelecidos. No presente trabalho foi adotada a classificação estabelecida pela Embrapa (1997), onde declividades de 0-3 % representam relevo plano; 3-8 %, relevo suavemente ondulado; 8-20 %, ondulado; 20-45%, forte ondulado; 45-75%, montanhoso e, acima de 75%, relevo escarpado.

Além da caracterização da área de estudo, os mapas de altitude e declividade foram usados como principais variáveis geomorfométricas para o mapeamento tradicional e digital dos solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas e para o município de Itajubá.

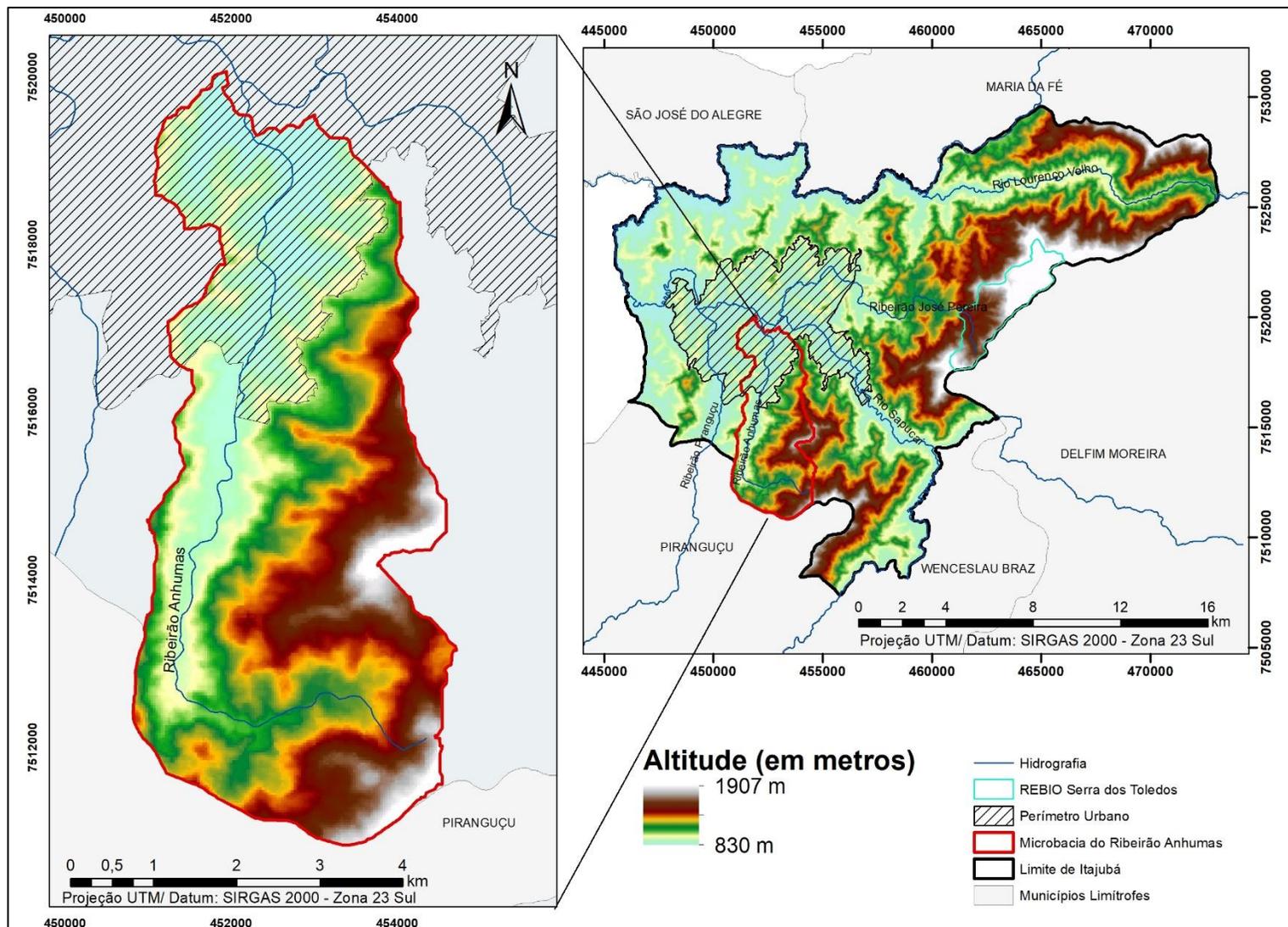


Figura 11 - Classes de Altitude do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019)

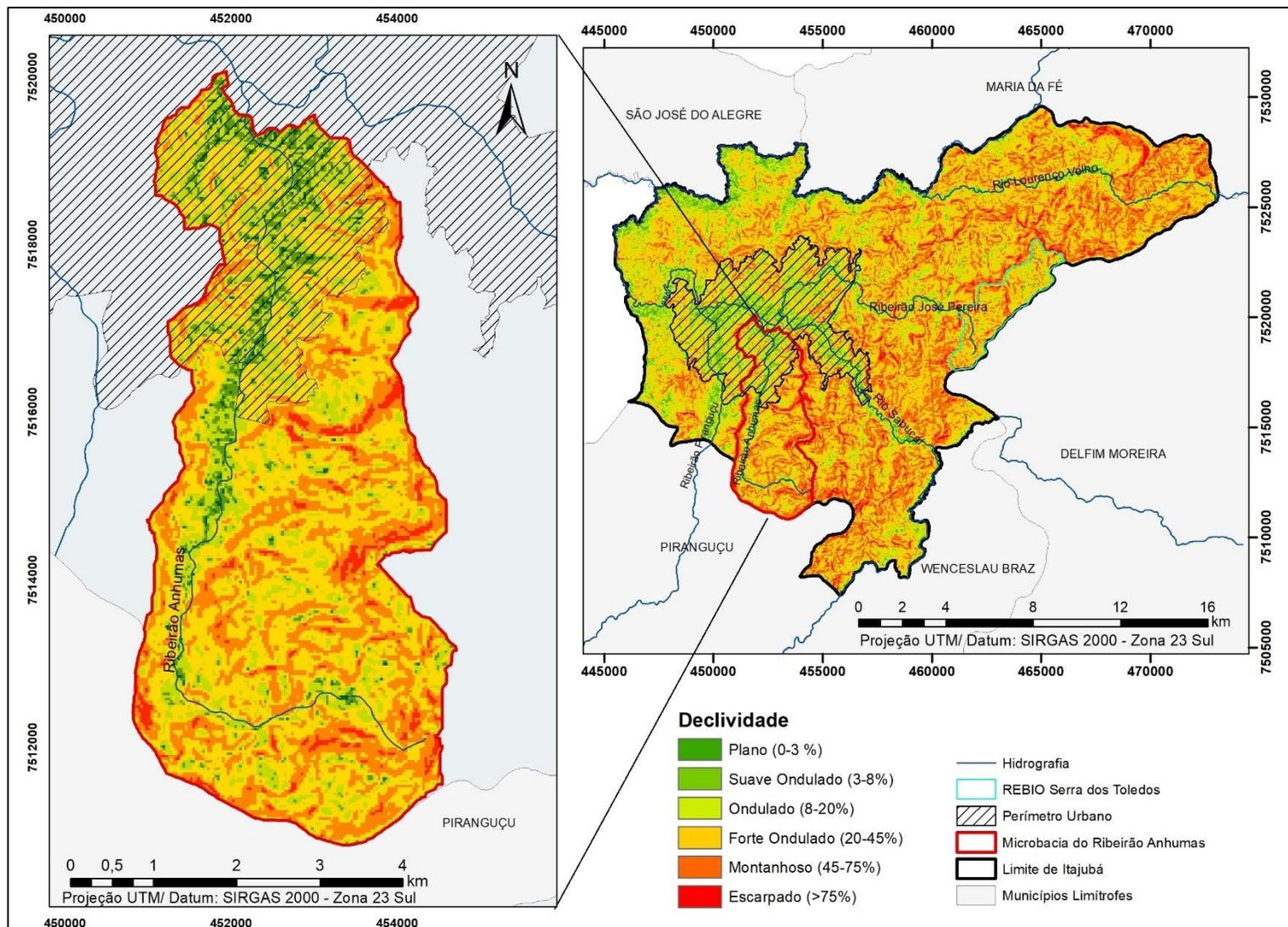


Figura 12 - Declividade do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019)

4.2.5 Formas do Relevo

As indicações das formas do relevo, quando divididas, fornecem as classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo) da paisagem (VALERIANO; ROSSETTI, 2008). Estas informações, assim como a altimetria e a declividade, são produtos gerados a partir do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE).

As componentes declividade e orientação das vertentes (aspecto) são resultantes da primeira derivação do MDE e, por conseguinte, a segunda derivada representa a curvatura da superfície, usualmente expressa em curvatura vertical (na direção da declividade) e curvatura horizontal (ao longo da curva de nível) (TRENTIN; ROBAINA, 2016). A curvatura vertical, também chamada de *perfil de curvatura*, refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, enquanto a curvatura horizontal, ou *plano de curvatura*, refere-se ao caráter divergente/convergente do terreno (CARMO et al., 2016), ilustrados na Figura 13.

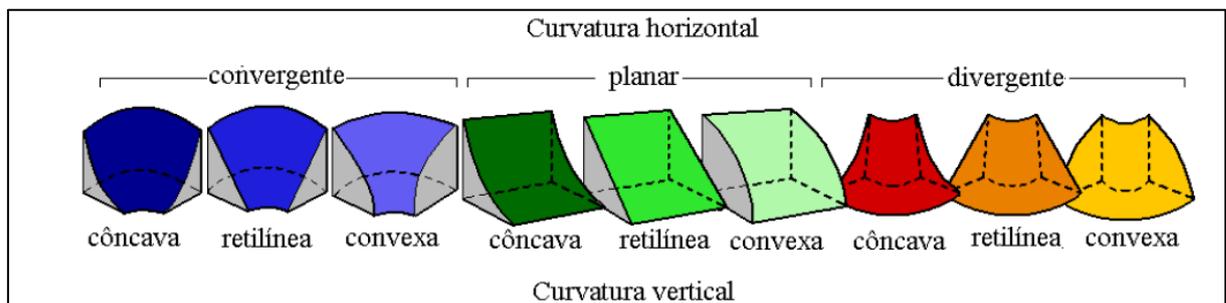


Figura 13 - Formas do Relevo presentes na paisagem

Fonte: Valeriano (2008)

As imagens adotadas no presente trabalho para determinação das formas do relevo foram adquiridas gratuitamente através da plataforma TOPODATA (VALERIANO, 2008), com resolução espacial de 30m, recortadas para as áreas de interesse. Na imagem referente ao perfil de curvatura, os valores positivos correspondem aos terrenos convexos e, os negativos, aos terrenos côncavos. Analogamente, na imagem do plano de curvatura, os valores negativos referem-se às superfícies convergentes e as positivas, às superfícies divergentes. As Figuras 14 e 15 ilustram a distribuição destas formas de terreno na área de estudo.

A distribuição do perfil de curvatura apresenta forte relação com mapas pedológicos e geológicos. Está relacionada com o tipo de substrato e com processos de formação do relevo. Com relação aos processos atuais, esta variável está relacionada aos processos de migração e

acúmulo de matéria através da superfície (sobretudo água), proporcionados pela gravidade (VALERIANO, 2008).

No município de Itajubá, os padrões dos perfis côncavos e convexos são bem distribuídos, sendo a região leste do município com maiores representações côncavas e região oeste, convexas. Dentro dos limites da microbacia do Ribeirão Anhumas o perfil convexo é dominante, ocupando, principalmente, a região do vale fluvial (Figura 14).

Já o plano de curvatura desempenha papel importante sobre o balanço hídrico e o equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese, uma vez que a variável está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície (VALERIANO, 2008).

Os planos tendem a ser intercalados entre si, como visto no padrão do município de Itajubá e, também, na microbacia do Ribeirão Anhumas. Os planos ocorrem intercalados em curtas distâncias, impedindo identificar, estatisticamente, a variação da sua distribuição no relevo municipal (Figura 15).

A partir das características do relevo, é possível obter também as informações quanto ao fluxo acumulado e direção preferencial do fluxo de água. O fluxo acumulado é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento e pode ser associado ao fator comprimento de rampa aplicado em duas dimensões. O fluxo acumulado, também denominado área de captação, apresenta obtenção complexa, manual ou computacional, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo) (VALERIANO, 2008). Para elaboração do dado foi utilizada a ferramenta *Flow Accumulation* do programa ArcGIS10.2 (ESRI, 2014).

Para Sobrinho et al. (2010), a direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir. A direção de fluxo de água foi obtida a partir da ferramenta *Flow Direction* do programa ArcGIS10.2 (ESRI, 2014).

As informações referentes ao perfil e plano de curvatura, juntamente com os dados de fluxo acumulado e direção de fluxo, são informações que contribuem para a distribuição do solo na paisagem, logo, são variáveis que também foram adotadas para o treinamento do modelo preditor de solo na etapa de Mapeamento Digital de Solos.

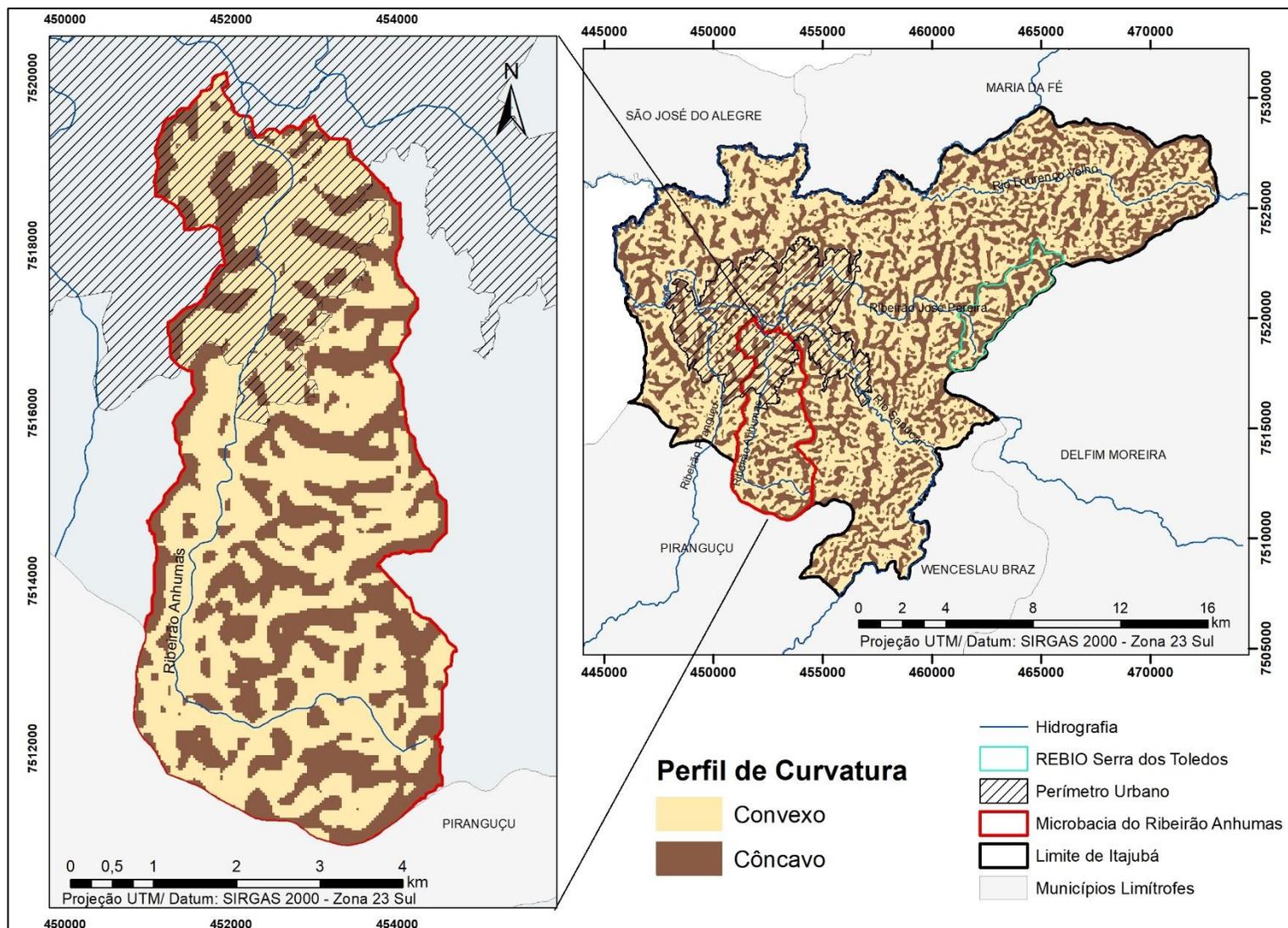


Figura 14 - Perfil de Curvatura do município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019)

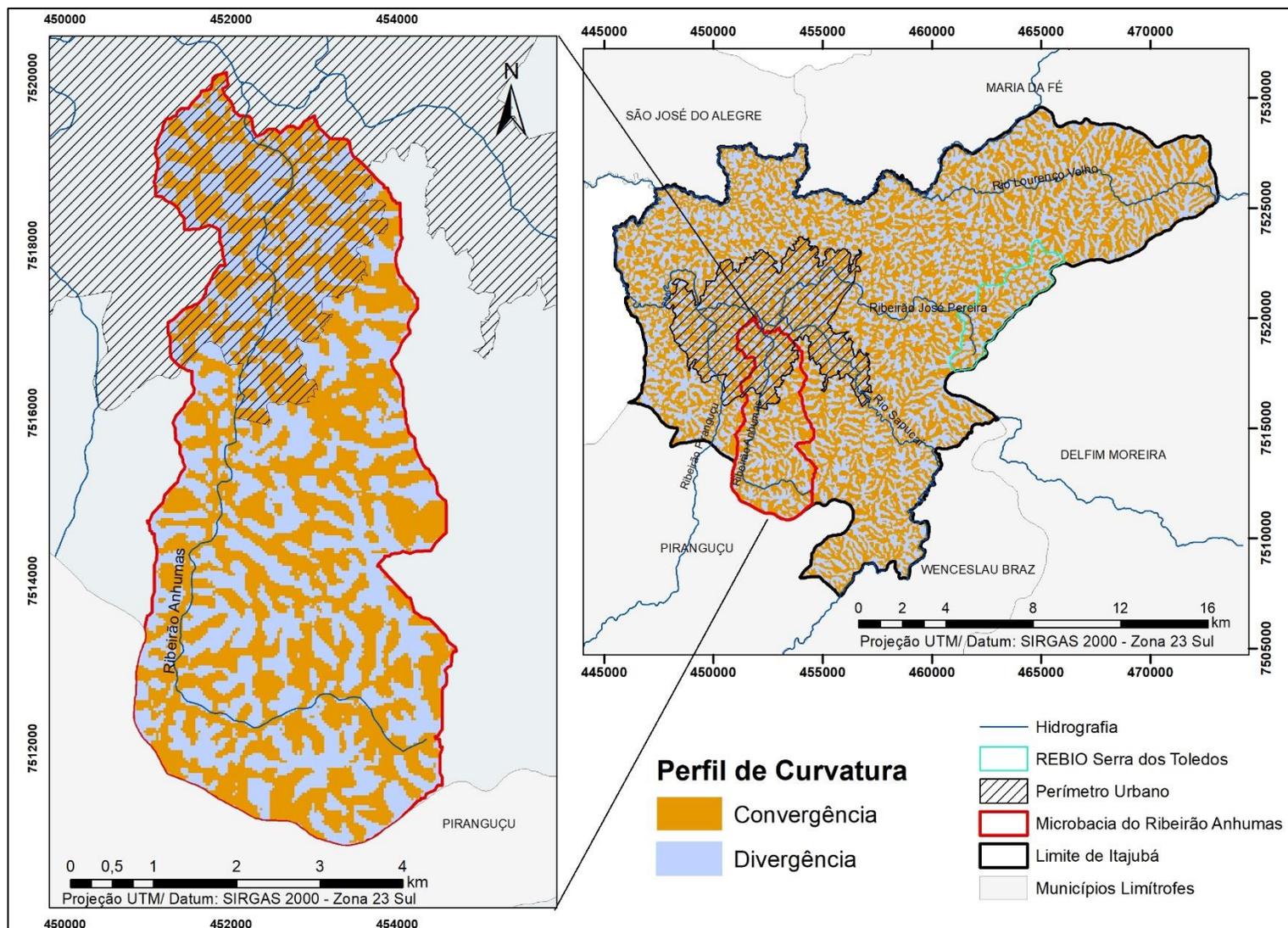


Figura 15 - Plano de Curvatura do município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019).

4.2.6 *Classes de Solos*

Para delimitação das Unidades de Mapeamento foi adotado, como informação norteadora, os mapas de solos do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2010). Para a configuração desse mapa foi utilizado o software ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014).

O mapa de solos do Estado de Minas Gerais foi elaborado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) em parceria com o Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Universidade Federal de Lavras (UFLA) em 2010, na escala 1: 600.000.

Neste levantamento as unidades de mapeamento de solos identificadas para o município de Itajubá foram: Argissolo vermelho-amarelo distrófico típico A moderado textura média/argilosa de relevo suave ondulado e ondulado (PVAd2); Argissolo vermelho-amarelo distrófico típico A moderado textura média/argilosa em consonância com Latossolo vermelho-amarelo distrófico típico A moderado textura argilosa e Cambissolo háplico distrófico típico A moderado textura variando de siltosa a argilosa, todos em fase de floresta subcaducifólia, relevo ondulado e forte ondulado (PVAd8); e, Argissolo vermelho distrófico típico A moderado/fraco textura média/argilosa em fase de floresta subperenifólia e relevo forte ondulado (PVAd). A distribuição dos agrupamentos de solos segue ilustrada na Figura 16.

As mesmas unidades de solos foram encontradas nos limites da microbacia do Ribeirão Anhumas, ou seja, PVAd2, que representa o agrupamento dos Argissolo vermelho-amarelo, PVAd8, onde estão associados Argissolos, Latossolos e Cambissolos e, PVAd com presença de Argissolo vermelho. Devido à pouca representação geográfica (0,94% da área da microbacia) e à dificuldade de acesso a Unidade PVAd8, o grupo não foi amostrado em campo.

4.2.7 *Unidades Litológicas*

A identificação geológica de Itajubá (Figura 17) foi fundamentada no estudo realizado pela CPRM em parceria com a Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig) e Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2014, na escala 1:100.000, onde foram localizadas as seguintes Unidades (CPRM, 2014):

- Suíte Bragança Paulista;
- Complexo Varginha-Guaxupé, litofácies paragnaisse migmatítico;

- Complexo Varginha-Guaxupé, litofácies ortognaisse migmatítico;
- Depósito aluvial.

Segundo o Código Brasileiro de Nomenclatura Estratigráfica (SBG, 1986), os *Complexos* são formados por associação de rochas de diversos tipos (sedimentares, ígneas ou metamórficas), enquanto *Suíte* é constituída pela associação de diversos tipos de uma classe de rocha intrusiva ou metamórfica de alto grau (sob altas temperaturas).

A Unidade Suíte Bragança Paulista é composta por tonalito e granodiorito foliados. Os tonalitos são constituídos essencialmente por quartzo (mais de 20% dos minerais félsicos presentes) e plágioclásio (oligoclásio a andesina), além de anfibólio (hornblenda) e biotita. Enquanto os granodiorito foliados são rochas ígneas, composta por quartzo, plagioclásio (oligoclásio) e feldspato potássico (microclínio ou ortoclásio), além de hornblenda e biotita.

O Complexo Varginha-Guaxupé com litofácies de paragnaisse migmatítico possui como constituição básica o paragnaisse, biotita, xisto, migmatito, quartzito, metamarga sobre ortogranulito e ortognaisse. Caracterizam por mineralogia de materiais claros e leves, ricos em silício, oxigênio, alumínio, sódio e potássio, e com baixos teores de ferro e magnésio. São mais ácidas e dão origem a solos mais amarelados.

Já os Complexo Varginha-Guaxupé com litofácies de ortognaisse migmatítico, possui constituição básica dada por ortognaisse migmatítico com metaultramáfica e granitóides associados e, eventualmente, piroxênio granulito. As rochas ditas básicas são menos ricas em silício e mais ricas em minerais contendo magnésio e ferro. Seus minerais são mais opacos e os solos originados destas rochas costumam ser mais avermelhados.

Por fim, o depósito aluvial, constituído por sedimentos clásticos inconsolidados, que corresponde às partículas depositadas fisicamente, como os grãos de quartzo e feldspato. Esses sedimentos são depositados pela água corrente, pelo vento e pelo gelo e formam camadas de areia, silte e cascalho.

O mapa das unidades litológicas também foi usado para o mapeamento digital dos solos, como uma das variáveis geomorfológicas necessárias a predição de classes de solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas e para o município de Itajubá.

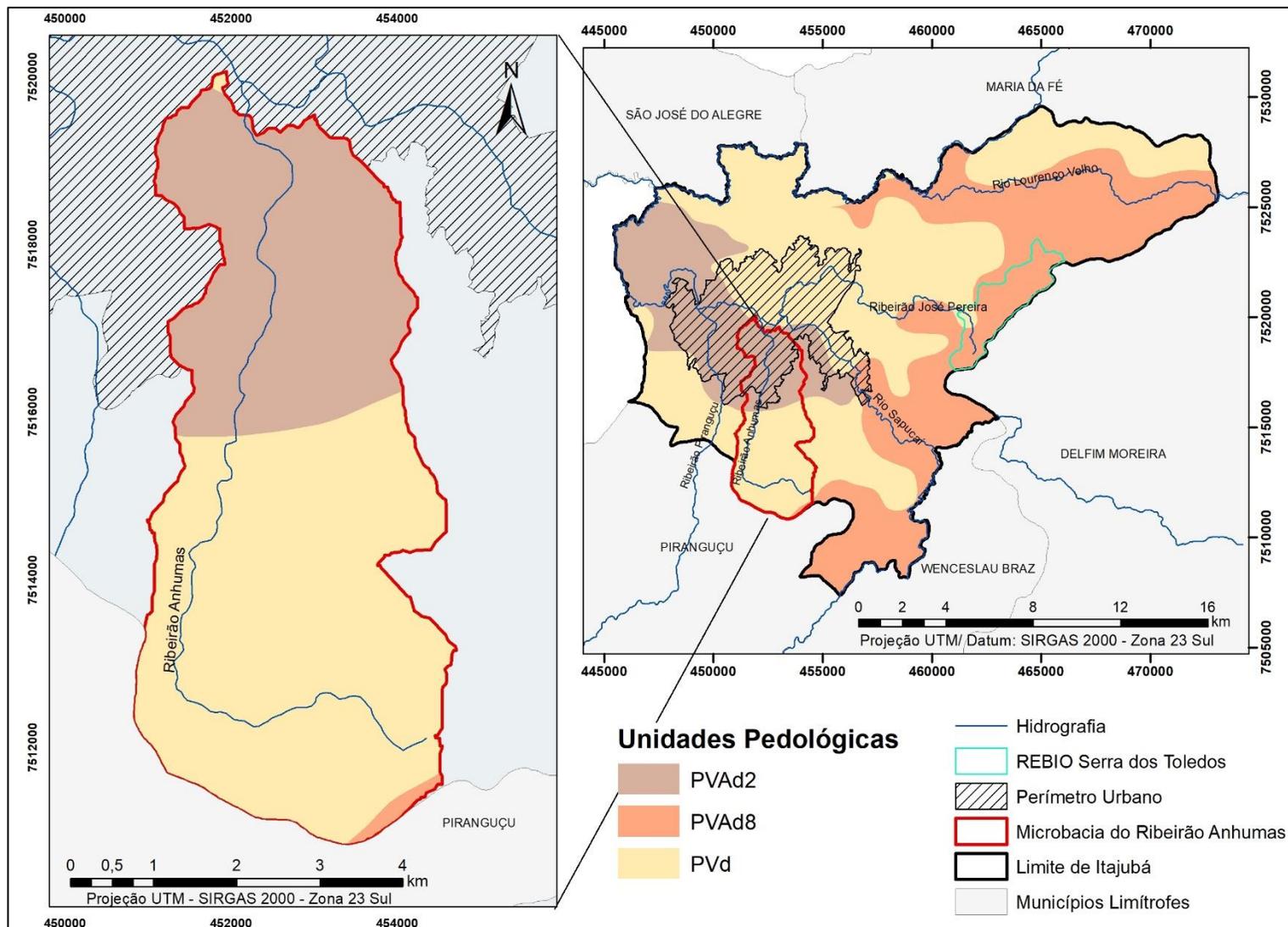


Figura 16 - Classes de Solos do Município de Itajubá, com destaque para a microbasia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019)

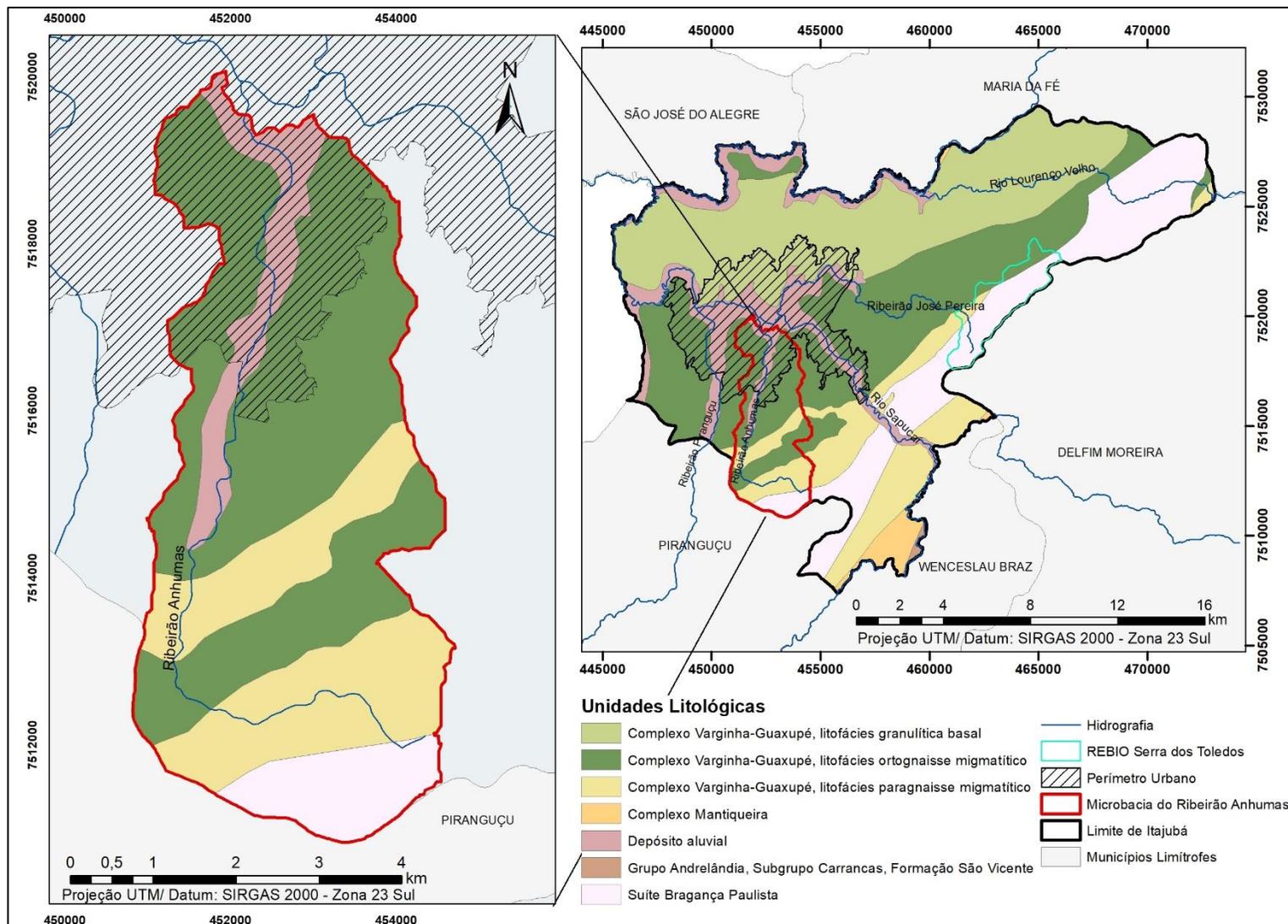


Figura 17 – Unidade Litológicas do Município de Itajubá, com destaque para a microbacia do Ribeirão Anhumas

Fonte: Org. do autor (2019)

4.3 Levantamento do Solo

4.3.1 Amostragem e caracterização dos perfis de solos

Para a etapa de identificação dos locais topossequências foram levantadas informações quanto a altitude, declividade, uso do solo, concavidade do terreno (perfil e plano de curvatura) e informações quanto ao material de origem.

A escala de trabalho foi definida de antemão, em 1:25.000 como forma de complementar os levantamentos de solos realizados por Lima (2012), também aplicado ao município de Itajubá. No entanto, não há na literatura um padrão de amostragem para levantamentos de solos em consonância com a escala de trabalho adotada. No levantamento de solos realizado por Loss et al. (2011) para a microbacia do Rio Bengala, Cachoeiras de Macacu, RJ, Brasil, a densidade de amostragem foi de 0,65 amostras/km² para uma escala de 1:50.000. No levantamento realizado por Lima (2012), para a microbacia do Ribeirão José Pereira, município de Itajubá, MG, a densidade de amostragem foi de 0,78 amostras/km² e escala final de trabalho de 1:25.000. No estudo de Arruda, Damattê e Chagas (2013) em uma área do município de Barra Bonita (SP), a densidade de amostragem foi de 0,23 amostras/km² para resolução de 20 x 20m, sendo a mesma densidade de amostras adotada por Dias et al. (2016) ao estudar a bacia sedimentar do São Francisco, com resolução do mapa final de 90 x 90m.

Nesse sentido, visto que o processo é dependente da experiência do pesquisador, neste trabalho os pontos de amostragem foram selecionados por meio da correlação entre as variáveis geomorfométricas em ambiente SIG, selecionando topossequências em pontos distintos da microbacia. As variáveis adotadas foram: altitude, declividade, perfis de curvatura (planar e perfil) e unidades litológicas.

A seleção de cada topossequência baseou-se também na observação da paisagem da microbacia por meio de visitas a campo para reconhecimento da área. Outro fator que interferiu na seleção das áreas foi a facilidade de acesso e a autorização prévia dos proprietários para desenvolvimento da pesquisa. A localização dos pontos amostrais está ilustrada na Figura 18.

Sendo assim, no presente estudo, foram amostrados e caracterizados 16 perfis de solo, obtendo uma densidade de amostragem de 0,68 amostras/km². A amostragem foi realizada em quatro topossequências ao longo da bacia e, em cada topossequência, quatro pontos amostrais: topo/interflúvio, ombro, meia encosta e sopé, sempre evitando locais com grande interferência antrópica.

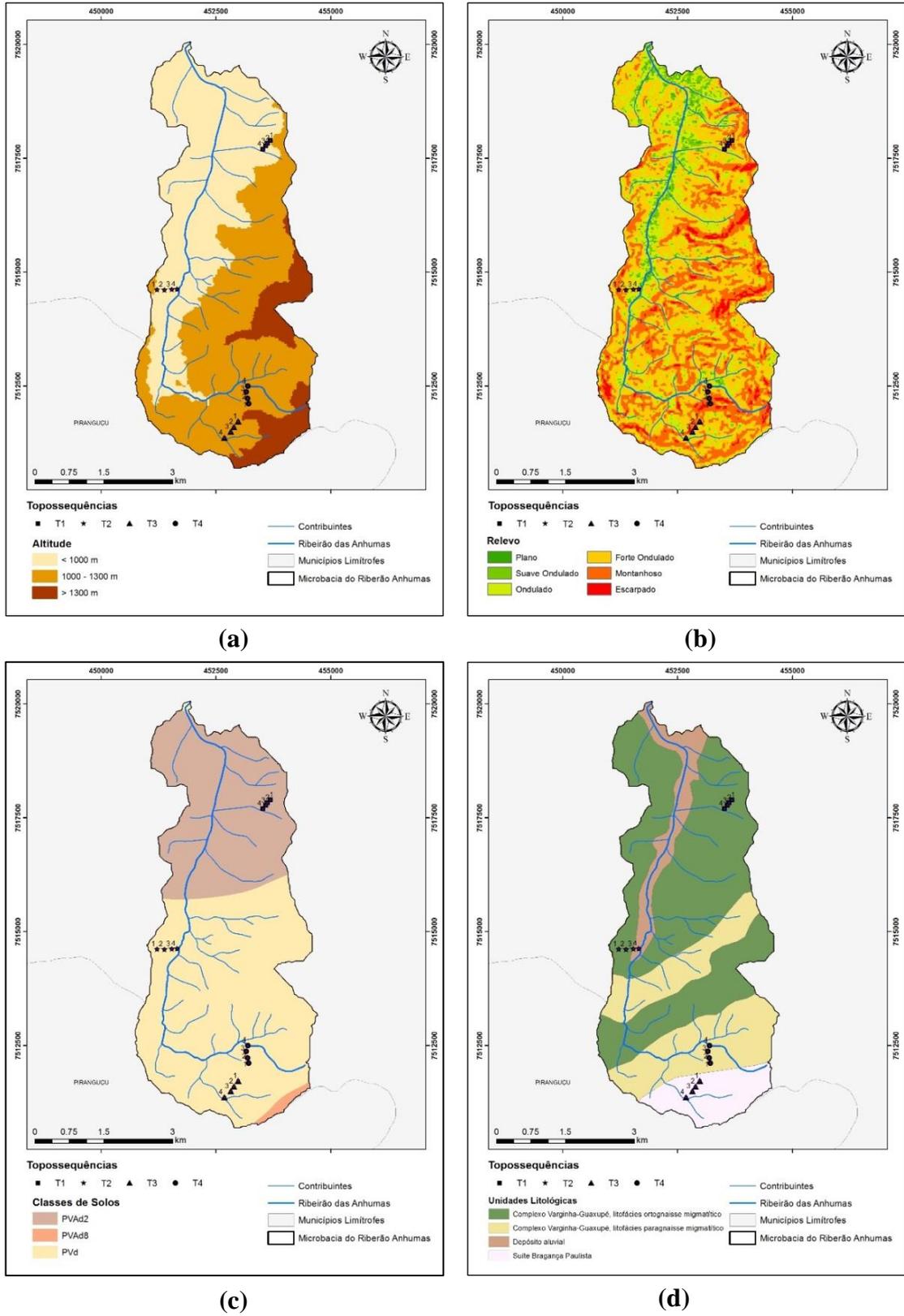


Figura 18 - Mapas com as topossequências selecionadas na microbacia do Ribeirão Anhumas: (a) Mapa de Classes de Altitude; (b) Mapa de Declividade; (c) Mapa de Classes do Solos; e, (d) Mapa de Unidades Litológicas

Fonte: Org. do autor (2019)

Durante a campanha de campo, foram levantadas as características morfológicas do solo de cada perfil analisado. Os dados referentes à espessura dos horizontes, cerosidade, presença de raízes e mosqueados foram anotados e fotografados. Com relação à paisagem, foram levantadas as características gerais e ambientais do local, como vegetação, uso do solo, posição na encosta, presença de erosão e pedregosidade, além da localização geográfica de cada trincheira com auxílio do GPS. As campanhas de campo aconteceram entre os meses de março e abril de 2018, e as amostras foram coletadas de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2005).

O método adotado para coleta de solo em campo foi por meio de minitrincheiras, abertas com auxílio de cavadeira reta, cavadeira articulada, enxada, enxadão e pá. O tamanho médio das minitrincheiras foi de 0,5 m de comprimento, 0,5 m de largura, e profundidade de 0,5 m, com sondagens de trado na base destas até 1,20 m de profundidade. Como a maior parte do trabalho foi realizada em áreas de pastagens, as minitrincheiras foram tampadas, impedindo o acidente e o acesso de animais.

A profundidade efetiva das trincheiras foi, em média, 120 cm, onde os solos foram coletados em todos os horizontes identificados. Em campo, a mudança de horizonte foi identificada pela mudança de coloração entre camadas de solo. Para cada horizonte foram coletados cerca de 1,5 kg de amostra deformada do solo, acondicionados em sacos plásticos reforçados, previamente identificados. Para análise de porosidade, foi necessário a coleta de amostra indeformada, realizada por meio do amostrador de Uhland. As amostras de cada perfil de solo estão ilustradas na Figura 19. As amostras de cada horizonte do perfil foram identificadas e enviadas para análise laboratorial.



Figura 19 – Amostras de Solos coletadas em campo, de cada ponto analisado

Fonte: Org. do autor (2019)

4.3.2 Análises Laboratoriais

A metodologia disponível no laboratório de Solos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) abrange a caracterização física das amostras. Sendo assim, para a caracterização química, as amostras foram enviadas para a Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os trabalhos laboratoriais obedeceram aos métodos utilizados para a caracterização analítica dos solos, contidos no Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017). As análises realizadas são ilustradas resumidamente na Figura 20.

No laboratório de solos da UNIFEI, a avaliação quanto a consistência do solo (seca, úmida, plasticidade e pegajosidade) foi realizado segundo a descrição de Santos et al. (2005). A análise de cor, principal atributo de diferenciação dos horizontes no campo, foi realizado por comparação com a Carta de Munsell. Para as demais análises, as amostras foram previamente secas ao ar e submetidas aos ensaios. Foram realizadas as análises de densidade de partículas (DP), pelo Método do Balão Volumétrico; textura, pelo Método da Pipeta; índice de floculação (IF); relação entre argila naturalmente dispersa e argila total. As análises foram realizadas para todos os horizontes de todos os perfis e em triplicata.

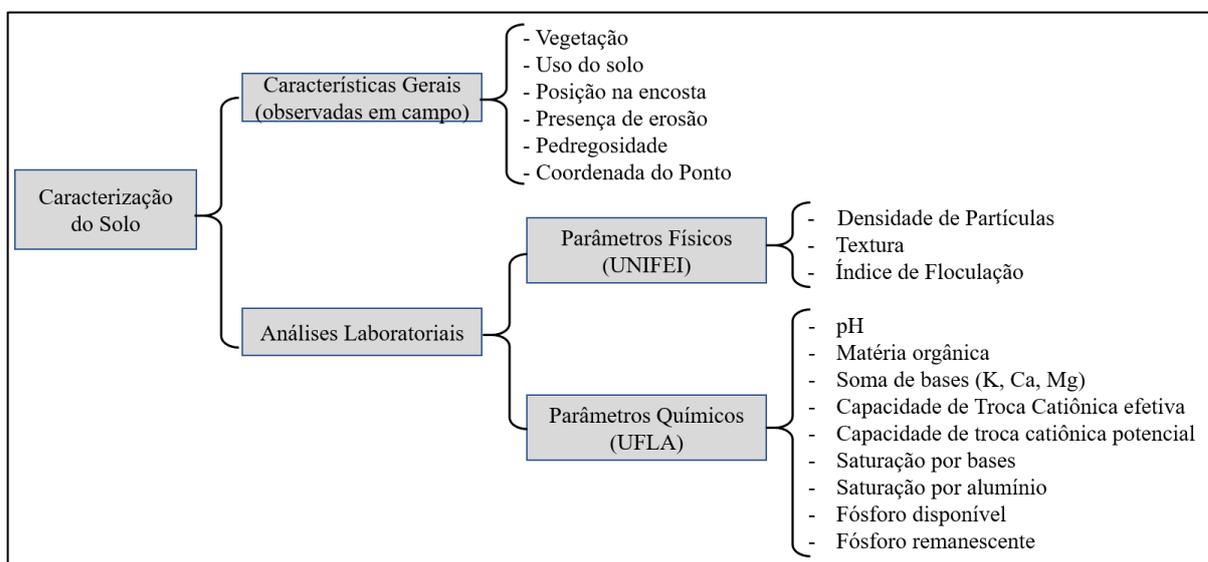


Figura 20 - Esquema dos parâmetros necessários para a caracterização do solo de cada perfil amostrado

Fonte: Org. do autor (2019)

As amostras indeformadas, obtidas pelo amostrador Uhland, foram secas em estufa e utilizadas para determinação da densidade do solo (DS) pelo Método do Anel Volumétrico e volume total de poros (VTP).

As análises químicas das amostras foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do solo do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2mm antes do envio à UFLA. Foram realizadas as análises referentes a: pH em água na relação 1:2,5 (solo: água) pelo método de McLean (1982); Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1N, analisados por titulometria (EMBRAPA, 2017); P e K extraídos pelo método Mehlich-1 e analisados por colorimetria e fotometria de chama respectivamente (EMBRAPA, 2017). O carbono orgânico é determinado por colorimetria, utilizando o método de Walkley e Black, descrito em EMBRAPA (2017). Saturação de bases (V%), soma de bases (S) e saturação por alumínio (m%) são calculadas e os valores são considerados em relação à Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais (CFSMG, 1999). Os valores de CTC efetiva (t) e CTC a pH 7,0 (T) são obtidos de maneira indireta através dos valores de acidez potencial, bases trocáveis e alumínio trocável (VETTORI, 1969).

Após os resultados das análises físicas e químicas os solos são classificados segundo critérios estabelecidos pela Embrapa (2006).

4.4 Mapeamento Tradicional dos Solos

Em ambiente SIG foi realizada a associação das informações, onde foram adotados os parâmetros altitude, declividade, perfil de curvatura, plano de curvatura, como recomendado por Ippoliti-Ramiro et al. (2005), acrescido das informações referentes às unidades litológicas.

Após a classificação de cada perfil do solo, os dados foram tabelados e inseridos no ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014), juntamente com as coordenadas de cada ponto. Os dados das classes de solo foram associados às variáveis geomorfométricas da microbacia do Ribeirão Anhumas, permitindo a espacialização da informação para toda microbacia.

A delimitação das superfícies morfológicas foi realizada manualmente por meio do geoprocessamento, uma vez que o objetivo nesta etapa foi a classificação tradicional dos solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas, apoiada na experiência do pedólogo em correlacionar as fisionomias do terreno com os processos de formação dos solos.

4.5 Mapeamento Digital dos Solos (MDS)

A etapa de Mapeamento Digital inicia-se com o MDS aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas como forma de validar a metodologia adotada para processamento da árvore de decisão. Em seguida, a mesma sequência de processamento foi aplicada para aquisição das informações geomorfológicas das duas microbacias piloto (Ribeirão Anhumas e Ribeirão José Pereira) tendo como finalidade o MDS aplicado ao município de Itajubá.

O processo de mapeamento digital de solos permite o uso de diversas informações geomorfológicas para treinar o modelo. Nesta etapa foram necessárias as variáveis geomorfológicas: altitude, declividade, unidades litológicas, plano de curvatura, perfil de curvatura, orientação de vertentes, direção de fluxo e fluxo acumulado.

A correlação entre as variáveis geomorfológicas e a classificação dos solos foi executada através de dois *softwares*, ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014) e Weka (WITTEN; FRANK, 2005). O sistema Weka é um *software* livre (de código aberto) para mineração de dados, desenvolvido em Java, dentro das especificações da GNU (*General Public License*). A mineração de dados pode ser definida como a transformação de grandes quantidades de dados em padrões e regras significativas. A tarefa de classificação inicia-se com a etapa de treinamento, onde os dados passam por um processo de aprendizado. Nesta fase, um algoritmo classificador é submetido a um conjunto de dados de treinamento que fornece, como resultado, a construção do classificador propriamente dito, semelhante a equação que correlaciona os dados de entrada. As características do programa, bem como as técnicas implantadas são descritas em Witten e Frank (2005), responsáveis pela implementação da ferramenta.

Árvore de Decisão foi o método adotado para o mapeamento digital de solos, tendo como classificador o algoritmo J48. O algoritmo (*J48*) é uma implementação em JAVA do algoritmo C4.5 (QUINLAN, 1993) no programa Weka (WITTEN; FRANK, 2005), que gera árvores de classificação a partir de um conjunto de dados de treinamento, sendo que em cada nó, o algoritmo escolhe um atributo que mais eficientemente subdivide o conjunto de amostras em subconjuntos homogêneos, as classes (GIASSON et al., 2013).

4.5.1 Mapeamento Digital dos Solos aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas

A sequência do processamento é ilustrada na Figura 20. Inicialmente, o banco de dados com as oito variáveis geomorfológicas foi criado no ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014) ilustrando espacialmente a distribuição das características do relevo sobre as áreas de estudo. Seguiu-se,

então, com a criação da malha de pontos aleatórios sobre a área da microbacia do Ribeirão Anhumas, totalizando 4706 pontos, representado 2 pontos por hectare. A malha de pontos foi criada por meio da ferramenta *Create Random Points*.

Após a criação da malha de pontos, foram extraídos os dados das oito variáveis geomorfométricas de cada ponto a partir da ferramenta *Extract multi values to point*. Ou seja, obtém-se nesta etapa uma tabela com 4706 linhas e 8 colunas, representando os pontos amostrais e as variáveis geomorfométricas associadas a cada ponto.



Figura 21 – Sequência para geração do Mapa Digital de Solos

Fonte: Org. do autor (2019)

Os dados foram extraídos do ArcGIS (ESRI, 2014) em formato de tabela e convertido para arquivo de formato .csv (*Comma-Separated Values*), formato simples de armazenamento, que agrupa as informações de arquivos de texto em planilhas para as trocas de dados com um banco de dados, onde as tabulações são separadas por vírgula. Este formato de dado é lido pelo programa WEKA (WITTEN; FRANK, 2005) para treinamento da árvore de decisão.

As informações extraídas do SIG foram, então, inseridas para o processamento no *software* WEKA (WITTEN; FRANK, 2005). Neste programa foi gerado o classificador para delimitação da distribuição dos solos para a microbacia, onde o modelo correlaciona os dados tabulados e fornece uma equação relacionada aos atributos da paisagem e a classificação do solo.

No *software* WEKA (WITTEN; FRANK, 2005), dentre as opções de processamento, optou-se pelo método de Validação Cruzada (*Cross-validation*), onde o conjunto dos pontos

amostrais são divididos em 10 subconjuntos, sendo 9 para geração da árvore e 1 para validação do modelo. Esse processo é repetido 10 vezes, com um subconjunto diferente reservado para avaliação (e excluído do treinamento) a cada vez, sendo assim, todos os subconjuntos passam por treinamento e validação. Foi adotado ainda, número mínimo de objetos igual a 10 e marcado como “Verdadeiro” a opção de redução de erro (`reduceErrorPruning = TRUE`).

Após a geração da árvore de decisão, o modelo de classificação gerado pelo J48 foi convertido em testes condicionais (regras de classificação em formato aceito pelo *software*), para então, ser inserido no ArcGIS para cruzamento dos atributos geomorfométricos no ambiente SIG. Os testes condicionais foram, então, executados utilizando o módulo Raster Calculator e seus operadores lógicos, nível a nível da árvore, até que se atingisse os nós finais, produzindo, como produto final, o Mapa Digital de Solos.

4.5.2 Mapeamento Digital dos Solos aplicado ao Município de Itajubá

Para o treinamento do algoritmo foram necessárias as informações da distribuição dos solos das duas microbacias: Ribeirão Anhumas e Ribeirão José Pereira. O mapeamento dos solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas foi realizado até o quarto nível categórico, segundo o SiBCS (2018), enquanto o levantamento para a microbacia do Ribeirão José Pereira foi realizado até o segundo nível categórico acrescido de informação do relevo. Diante disto, o mapeamento realizado no presente trabalho para o Ribeirão Anhumas passou por adequação, com agrupamento das classes até o segundo nível categórico junto com as características do relevo, igualando a legenda com o levantamento realizado por Lima (2012), permitindo o uso das duas microbacias na etapa de treinamento.

A microbacia do Ribeirão José Pereira cobre uma área de 39,74 km² que corresponde a 14% do território municipal. A região constitui-se em importante manancial hídrico por abrigar a Reserva Biológica Serra dos Toledos, o mais importante remanescente florestal protegido da região. Segundo Lima (2012), a porção oeste da sub-bacia é constituída por parte da zona urbana de Itajubá, e a porção leste pela zona rural, constituída por pequenas e localizadas atividades agrícolas, mas em maior parte por pastagens.

Assim como no MDS da microbacia do Ribeirão Anhumas, para a etapa de treinamento, foi criada uma malha de pontos totalizando 2 pontos por hectare, como recomendação por Bagatini, Giasson e Teske (2015). A malha de pontos foi criada por meio da ferramenta *Create Random Points* do ArcGIS 10.2 (ESRI, 2014) aleatoriamente distribuídos pelas duas microbacias, totalizando 12.654 pontos. As informações das oito variáveis geomorfométricas (altitude,

declividade, unidades litológicas, plano de curvatura, perfil de curvatura, orientação de vertentes, direção de fluxo e fluxo acumulado) foram extraídas para cada ponto, o arquivo foi convertido para extensão lida pelo software WEKA (WITTEN; FRANK, 2005) onde a árvore foi criada, possibilitando o Mapeamento Digital de Solos para o município de Itajubá através dos operadores lógicos do ArcGIS. Como visto, a sequência de processamento foi o mesmo aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas, diferindo apenas na quantidade de pontos amostrais.

4.5.3 Validação do Mapeamento Digital

A validação do processamento foi realizada estatisticamente através do índice Kappa e da Acurácia Global da Classificação (AG), ambos derivados de uma matriz de confusão. O índice Kappa (K) foi proposto por Cohen (1960) e descrito por Landis e Koch (1977), como um método estatístico para avaliar o nível de concordância ou reprodutibilidade entre dois conjuntos de dados. De modo geral, pode ser descrita como o método que fornece uma ideia do quanto as observações se afastam daquelas esperadas. O método foi adotado no presente estudo por fornecer uma avaliação mais conservadora dos resultados.

A acurácia global, proposto por Story e Congalton (1986), representa a porção de instâncias corretamente classificadas. É uma medida mais simples, sendo calculada pela soma do total dos pixels corretamente classificados, dividida pelo número total de pixels da matriz de confusão. Uma vez que os dados tenham apresentado valores aceitáveis, finaliza-se o mapa de referência e segue-se para a etapa de extrapolação dos dados para as áreas fisiograficamente semelhantes do município de Itajubá.

A matriz de confusão foi criada pelo próprio *software* Weka durante a geração da árvore de decisão. Os dados foram então tabelados no Excel onde foi possível obter, de maneira complementar, a Acurácia do Produtor (AP) e a Acurácia do Usuário (AU) (STORY; CONGALTON, 1986). Estas acurácias avaliam individualmente a correlação da classe do mapeamento tradicional com o mapeamento digital. A AP refere-se aos erros de exclusão ou omissão, não sendo atribuído à determinada classe os erros de classificação das demais classes. Já a AU refere-se à probabilidade de uma determinada classe ter sido classificada de maneira correta de acordo com os dados de referência (ANTUNES; LINGNAU, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo foi dividido em quatro tópicos principais, sendo o primeiro responsável por descrever cada topossequência amostrada por meio do inventário das características morfológicas, físicas e químicas dos perfis de solo, apresentando a classificação taxonômica e interpretativa dos mesmos. O segundo tópico apresenta a distribuição dos solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas por meio do mapeamento tradicional de solos. O terceiro apresenta a MDS aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas como forma de validação da metodologia. E, o quarto tópico apresenta e discute a extrapolação dos dados para o município de Itajubá por meio do MDS.

5.1 Descrição das Topossequências

A Tabela 1 ilustra as características físicas de cada ponto amostrado. É possível observar que a atividade predominante na microbacia é a pecuária, com o uso do solo destinado às pastagens e presença forte de braquiária em toda região.

O manejo do solo na microbacia necessita de técnicas conservacionistas, e esta deficiência é evidenciada na presença de processos erosivos em quase todas as topossequências amostradas. A Topossequência 1 apresenta erosão em sulcos na porção côncava convergente do relevo apesar da boa cobertura vegetal. Este processo erosivo pode estar associado às altas declividades do terreno, que superam os 30% em toda região. A topossequência 2, apesar de estar presente na região oeste na microbacia onde o relevo é menos movimentado e em altitudes mais baixas, apresentou erosão do terço médio da encosta causada pelo pastejo animal e falta de manejo adequado do solo.

A topossequência 3, presente na região de relevo movimentado da microbacia, não apresentou processo erosivo, e sim, superfícies do solo bem cobertas, topos de morros preservados e APP de curso d'água protegido. O mesmo não acontece na Topossequência 4, que apesar da proximidade geográfica, apresentou solo exposto nos terços superiores e médios da encosta, favorecido pela declividade acentuada, pastejo animal e ausência de técnicas de manejo do solo.

Tabela 1 - Características físicas dos pontos amostrais.

	<i>Ponto</i>	<i>Coordenadas (UTM)</i>		<i>Posição da Encosta</i>	<i>Declividade</i>	<i>Altitude</i>	<i>Uso do Solo</i>	<i>Vegetação</i>	<i>Erosão</i>	
<i>Topossequência Topossequência Topossequência Topossequência</i>	<i>1</i>	P 1	453682.16	7517893.09	Interflúvio	30,31 %	1000 m	Pastagem	Braquiária	Ausente
		P 2	453616.61	7517831.40	Ombro	55,40 %	966 m	Pastagem	Gramínea	Presente
		P 3	453585.34	7517772.88	Meia Encosta	39,37 %	939 m	Pastagem	Gramínea	Presente
		P 4	453522.68	7517698.90	Sopé	35,98 %	921 m	APP	Gramínea/arbustos	Ausente
	<i>2</i>	P 1	451217.21	7514619.97	Interflúvio	58,03 %	996 m	Pastagem	Braquiária/ arbustos	Presente
		P 2	451380.12	7514614.34	Ombro	27,19 %	931 m	Pastagem	Braquiária	Presente
		P 3	451540.13	7514620.99	Meia Encosta	12,83 %	908 m	Pastagem	Braquiária	Presente
		P 4	451654.42	7514627.50	Sopé	25,28 %	887 m	Pastagem	Braquiária	Ausente
	<i>3</i>	P 1	452983.53	7511725.83	Interflúvio	28,18 %	1263 m	Pastagem	Gramínea	Ausente
		P 2	452889.63	7511599.48	Ombro	38,29 %	1212 m	Pastagem	Gramínea	Ausente
		P 3	452818.53	7511494.71	Meia Encosta	54,57 %	1181 m	Pastagem	Arbustos	Ausente
		P 4	452684.34	7511363.74	Sopé	1,29 %	1157 m	APP	Árvores	Ausente
	<i>4</i>	P 1	453210.92	7512117.04	Interflúvio	54,50 %	1185 m	Pastagem	Braquiária	Presente
		P 2	453190.56	7512233.82	Ombro	69,25 %	1127 m	Pastagem	Braquiária	Presente
		P 3	453161.56	7512375.18	Meia Encosta	57,74 %	1078 m	Pastagem	Braquiária	Presente
		P 4	453195.46	7512504.43	Sopé	9,07 %	1049 m	Pastagem	Braquiária	Ausente

5.1.1 Topossequência 1

A topossequência 1 localiza-se próximo à região urbanizada da microbacia, em altitudes entre 830 e 1000m. A área apresenta como principal atividade a bovinocultura, com uso do solo destinado a pastagem. A área apresenta-se coberta por gramínea, no entanto, é possível identificar o início de processo erosivo na porção côncava da encosta onde localiza-se o caminho preferencial de água. Segundo o mapeamento da FEAM (2010), em escala 1:600.000 toda a topossequência enquadra-se na classe PVAd2, caracterizado por Argissolo Vermelho-amarelo distrófico típico A moderado textura média/argilosa. As informações morfológicas da Topossequência 1 são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

➤ Ponto 1 (T1P1) ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico, A moderado:

O perfil (Figura 22) localiza-se no topo da encosta (interflúvio), em relevo plano e em altitude de 1000m. Pastagem em boas condições e ausência de processos erosivos. Presença forte de raízes finas a médias nos primeiros 40 cm.

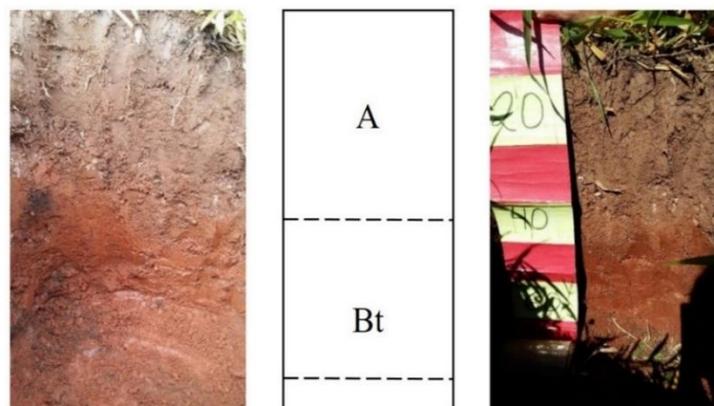


Figura 22 - Perfil 1 da Topossequência 1 (T1P1)

Fonte: Org. do autor (2019)

O perfil apresenta descontinuidade de material entre os horizontes A e B textural (Bt1), com presença de seixos rolados há 30 cm de profundidade, indicando deposição de material alóctone. O Horizonte A apresenta textura média, estrutura em grãos simples, com 47,55 % de areia e 26,32% de argila. O teor de matéria orgânica é máximo no horizonte, com teor de 32,7 g.kg-1. A saturação por alumínio também apresenta valor máximo em A e decresce com a profundidade, diferente da saturação por bases que é mínima em A, com 56,54%. Apresenta ainda consistência ligeiramente dura quando seco, friável quando úmido, e, não plástica e não pegajosa quando molhado.

Tabela 2 - Caracterização física dos solos amostrados da Toposequência 1

Horiz.	Prof.	Areia	Silte	Argila	S/A	IF	DP	Cor Úmida	Transição	Textura	Estrutura
	(cm)	------(%)-----				(%)	Kg dm ⁻³				
T1P1: ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico											
A	0 - 30	47,55	26,32	26,13	1,00	81,66	2,25	7,5 YR 3/3		Textura média	fr; mo; gr
Bt1	40 - 60	32,60	27,14	40,26	0,67	58,25	2,70	2,5 YR 3/6	descontínua	Textura Argilosa	mo; fo; sa
Bt2	60 - 120	39,64	25,83	34,53	0,75	55,95	2,54	2,5 YR 4/6	plana; gradual	Textura média	mo; fo; sa
T1 P2: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico											
A	0-20	44,41	34,20	34,53	0,99	98,03	2,41	7,5 YR 3/3		Textura média	fr; mo; gr
BA	20 - 50	44,82	29,58	21,40	1,38	98,03	2,43	5 YR 4/6	irregular	Textura média	mo; fo; sa
Bt	50 - 12	30,23	24,31	45,46	0,53	95,60	2,37	2,5 YR 4/8	plana, gradual	Textura Argilosa	mo; fo; sa
T1 P3: CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico											
A	0 - 20	48,88	23,79	27,33	0,87	75,70	2,23	7,5 YR 3/3		Textura média	mo; sa
AB	20 - 60	48,27	25,26	26,46	0,95	63,66	2,46	7,5 YR 3/3	plana e gradual	Textura média	mo; sa
Bi	60 -120	46,18	29,36	24,46	1,20	64,07	2,46	10 YR 4/4	plana e gradual	Textura média	mo; sa
T1 P4: CAMBISSOLO HÁPLICO Tb distrófico latossólico											
A	0 - 20	56,92	26,35	16,73	1,58	74,92	2,27	10 YR 3/2		Textura média	mo; sa
Bi₁	20 -60	52,02	25,48	22,50	1,13	77,27	2,32	10 YR 4/6	plana e gradual	Textura média	mo; sa
Bw	60 - 90	43,42	22,85	33,73	0,68	62,73	2,39	10 YR 4/4	plana e gradual	Textura média	mo; sa

Horiz.: horizonte; Prof.: profundidade; S/A: relação silte/argila; IF: índice de floculação; VTP: volume total de poros; DS: densidade do solo; DP: densidade de partícula; fr: fraca; mo: moderada; as: blocos sub-angulares.

Tabela 3 - Caracterização química dos solos amostrados da Topossequência 1

Horiz.	Prof.	pH		Complexo Sortivo (cmol _c kg ⁻¹)								Valor (V)	Valor (m)	MO (g kg ⁻¹)	P rem. (mg kg ⁻¹)
		KCl	H ₂ O	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺	SB	CTC efetiva	CTC pH 7	%			
T1 P1: ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico															
A	0 - 30	4,42	5,2	0,649	3,28	1,39	0,21	4,09	5,32	5,53	9,41	56,54	3,8	32,7	40,03
Bt₁	40 - 60	4,78	6	0,253	4,54	1,01	0,06	2,08	5,80	5,86	7,88	73,65	1,02	7,3	30,94
Bt₂	60 - 100	4,64	5,8	0,276	4,87	1,13	0,07	2,17	6,28	6,35	8,45	74,28	1,1	9,7	34,18
T1 P2: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico															
A	0-23	4,19	5,3	0,144	1,88	0,6	0,33	4,94	2,62	2,95	7,56	34,72	11,19	27,4	37,3
AB	23 - 50	4,21	5,3	0,043	1,51	0,26	0,28	2,32	1,81	2,09	4,13	43,9	13,4	7,0	39,82
Bt	50 - 120	4,17	5,1	0,053	1,13	0,72	0,4	3,62	1,90	2,3	5,52	34,47	17,39	5,0	25,06
T1 P3: CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico															
A	0 - 20	4,2	5,5	0,141	2,29	0,77	0,18	4,83	3,20	3,38	8,03	39,87	5,33	31,7	31,44
Bi₁	20 - 60	4,32	5,5	0,056	3,23	0,10	0,15	3,91	3,39	3,54	7,3	46,38	4,24	16,9	29,41
Bi₂	60 -120	4,55	5,9	0,074	3,74	0,64	0,05	2,48	4,45	4,5	6,93	64,28	1,11	11,3	35,51
T1 P4: CAMBISSOLO háplico Tb distrófico latossólico, A moderado															
A	0 - 20	4,53	5,7	0,365	2,6	0,98	0,11	3,82	3,94	4,06	7,77	50,78	2,71	32,0	39,07
Bi₁	20 -60	4,16	5,1	0,071	1,31	0,15	0,46	3,31	1,53	1,99	4,84	31,64	23,12	9,1	28,56
Bw	60 - 100	4,33	5,8	0,069	1,66	0,39	0,2	1,86	2,12	2,32	3,98	53,25	8,62	2,8	31,8

O horizonte Bt₁ apresenta incremento de argila, chegando a 40,26%, o que é suficiente para que a relação B/A satisfaça a condição para Argissolo. O Horizonte Bt₁, de textura argilosa, possui espessura de 20 cm. A transição entre horizontes é ondulada e gradual, com cerosidade moderada. O horizonte Bt₁ apresenta coloração vermelho-escuro (2,5 YR 3/6), consistência dura (seca), friável (úmido), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (molhado). Há presença de minerais primários intemperizáveis em todo o perfil, com destaque para a camada de transição entre A e Bt₁. O horizonte Bt₂ continua a expressão do horizonte, com redução de argila para 34,53%, espessura de 60 cm, textura média, consistência muito dura, muito firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. A soma de bases, CTC efetiva e saturação por bases aumentam em profundidade, enquanto o teor de matéria orgânica diminui. O solo apresenta baixa atividade de fração argila (Tb). A saturação por base em Bt₁ e Bt₂ são superiores a 70% e conferem ao solo característica eutrófica.

➤ **Ponto 2 (T1P2) ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado.**

O perfil 2, Figura 23, localiza-se na meia encosta/ombro, em relevo montanhoso, pastagem em condições medianas de preservação. O terreno é usado para bovinocultura de leite e devido a declividade acentuada da área, parte do terreno encontra-se com marcas do pisoteio dos animais em curvas de nível, indicando início de processos erosivos.

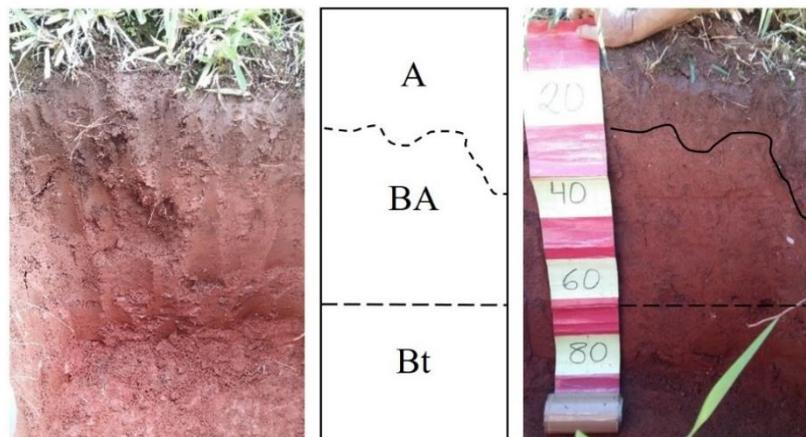


Figura 23 - Perfil 2 da Topossequência 1 (T1P2)

Fonte: Org. do autor (2019)

O perfil apresenta transição irregular entre os horizontes A e BA, e plana entre BA e Bt. O horizonte A moderado apresenta 23 cm de espessura, coloração bruno e bruno-escuro

(7,5YR5/4, seco e 7,5YR 3/3, úmido), textura franco argilosa e consistência ligeiramente dura quando seca e solta quando úmida. O teor de matéria orgânica é de $27,4 \text{ g.kg}^{-1}$, com forte presença de raízes nos primeiros 30 cm do solo. O horizonte de transição (BA) apresenta soma de bases, CTC efetiva e MOS semelhantes ao horizonte Bt, saturação por alumínio intermediária entre os horizontes superior e inferior. O horizonte A apresenta 21,4 % de argila enquanto o Bt apresenta 45,46 %, relação Bt/AB de 2,21, indicando acréscimo de argila no horizonte e mudança textural abrupta.

O horizonte Bt, com 60 cm de espessura, não apresenta contato com material de origem dentro dos 120 cm amostrados. Apresenta cerosidade fraca, textura argilosa, coloração avermelhada (2,5 YR 4/8, úmido) e consistência muito dura quando seco, muito friável quando úmido e, muito plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada. A saturação por bases em todo perfil é inferior a 50%, distrófico, e com baixa atividade da fração argila.

➤ **Ponto 3 (P3) CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico, A proeminente:**

O perfil localiza-se na meia encosta, na porção côncava do terreno. O relevo neste ponto é fortemente ondulado e ocorre há 939 metros de altitude. O local apresenta pastagem em boas condições, com presença de processo erosivo em áreas adjacentes. A mudança entre os horizontes ocorre de maneira plana, como ilustrado na Figura 24.

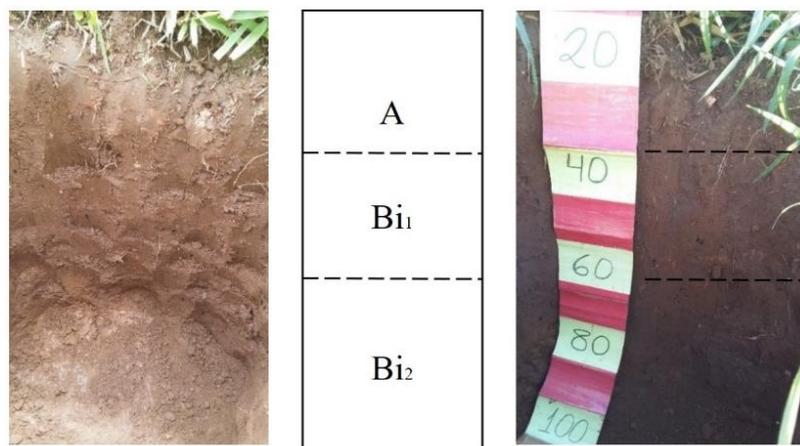


Figura 24 - Perfil 3 da Topossequência 1 (T1P2)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte A possui espessura de 10 cm, estrutura em grãos simples, coloração bruno escuro (7,5YR3/3, úmido), teor de matéria orgânica de $31,7 \text{ g.kg}^{-1}$, consistência dura quando

seca, firme quando úmida muito plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada e saturação por base de 39,87%, caracterizando horizonte A proeminente.

O teor de argila é uniforme em todo perfil, com textura média e predominância de cores brunadas escuras. Apresenta ausência da estrutura da rocha original, relação S/A maior que 0,7 e baixo índice de flocculação em todo o perfil.

A consistência é semelhante para os Horizontes Bi₁ e Bi₂, apresentando característica dura (seca), solta (úmida), muito plástica e ligeiramente pegajosa (molhada). Diferem pela cor, sendo Bi₁ bruno escuro (7,5 YR 3/3, úmido) e Bi₂ Bruno-amarelado-escuro (10 YR 4/4, úmido) e pela saturação por base, onde o horizonte Bi₁ apresenta saturação por base de 46,38% (distrófico), enquanto o horizonte Bi₂ apresenta 64,28% (eutrófico), ambos com argila de atividade alta.

➤ **Ponto 4 (T1P4) CAMBISSOLO háptico Tb distrófico latossólico, A moderado**

O perfil localiza-se próximo ao curso d'água e em altitude de 921 metros. O relevo do local é fortemente ondulado e ocorre a presença de afloramento rochoso em áreas adjacentes. O perfil apresenta pedregosidade e transição plana entre horizontes, como ilustrado na Figura 25. O horizonte A moderado apresenta espessura de 20 cm, textura franco-arenosa, com coloração Bruno-acinzentado muito escuro (10YR3/2, úmido) e consistência muito dura quando seco, friável quando úmido e plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada. Apresenta teor de matéria orgânica de 32,0 g.kg⁻¹ e valores de soma de base, CTC efetiva e a pH 7 superiores aos horizontes adjacentes.

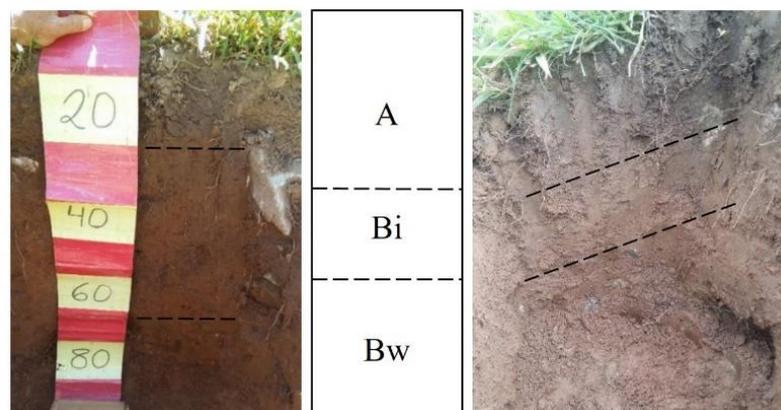


Figura 25 - Perfil 4 da Toposequência 1 (T1P4)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte Bi₁ apresenta espessura de 40 cm, textura média (franco-arenosa) e coloração bruno-amarelado-escuro (10YR4/6). A pedregosidade presente no horizonte é inferior a 5% do volume do perfil e permite o crescimento das raízes referente a presença de gramíneas, arbustos e árvores de pequeno porte. O teor de argila é pouco superior ao horizonte subjacente, a CTC sem correção para carbono é de 21,52 cmolc.dm⁻³, apresenta argila de atividade baixa e saturação por bases de 31,64%.

Enquanto o horizonte Bi₂ apresenta espessura 30 cm, franco-arenosa, textura média, baixos teores de silte (22,85%), relação silte/argila inferior a 0,7, CTC (sem correção para carbono de 11,89 cmolc.dm⁻³, argila de atividade baixa e consistência dura (seco), friável (úmido), muito plástica e ligeiramente pegajosa (molhada). Estas são características morfológicas similares às do B latossólico, no entanto, apresentam baixo índice de floculação (62,73%), alta saturação por base e mais que 5% de materiais intemperizáveis, além da pedregosidade, permitindo um Cambissolo com horizonte mineral que não atende aos requisitos para horizonte B latossólico dentro de 150 cm a partir da superfície do solo, sendo, então, classificado como Cambissolo háplico Tb distrófico latossólico.

5.1.2 Topossequência 2

A segunda topossequência localiza-se numa região de relevo mais suave, dentro do intervalo de declividade de 800 a 1000 metros. O material de origem da região abrange Ortognaisse migmatítico e depósito aluvionar. O grupo de solos da região, segundo o levantamento da FEAM (2010), é da classe Pvd, com forte presença de Argissolos Vermelhos distróficos típicos A moderado/fraco textura média/argilosa. Os pontos localizados no interflúvio e ombro apresentam-se em relevo côncavo e os pontos localizados na meia encosta e sopé localizam-se em relevo convexo. A topossequência 2 pertence a uma fazenda produtiva, com criação de gado leiteiro. As Tabelas 5 e 6 apresentam as características morfológicas da Topossequência 2.

Tabela 4 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 2

Horiz.	Prof.	Areia	Silte	Argila	IF	S/A	DP	Cor Úmida	Transição	Textura	Estrutura
	(cm)	-----(%)------			(%)		Kg dm ⁻³				
T2P1: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto, A moderado											
A	0-15	45,66	29,78	24,56	76,91	1,21	2,17	7,5 YR 2,5/3		Textura média	fc, gr
Bt ₁	15-60	44,32	10,94	44,75	100,00	0,24	2,27	5 YR 3/4	plana e difusa	Textura argilosa	mo; b.ang
Bt ₂	60-130	43,61	19,03	37,36	91,63	0,51	2,33	2,5 YR 3/6	plana e difusa	Textura argilosa	mo; b.ang
T2P2: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico, A moderado											
A	0-10	34,26	21,15	44,60	82,74	0,47	2,22	5YR 3/4		Textura argilosa	fo, gr
Bw	10-130	32,40	21,40	46,20	100,00	0,46	2,33	5YR 3/4	Ondulada	Textura argilosa	fo, gr
T2P3: LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico											
A	0 - 10	40,91	15,22	43,86	74,08	0,35	2,26	5 YR 3/4		Textura argilosa	fo, gr
AB	10 – 25	29,51	12,06	58,43	100,00	0,21	2,29	2,5 YR 3/6	Plana e gradual	Textura argilosa	fo, gr
Bw	25 – 110	22,50	23,81	53,70	100,00	0,44	2,35	2,5 YR 3/6	Plana e gradual	Textura argilosa	fo, gr
T2P4: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto											
A	0 - 15	40,22	19,98	39,80	74,74	0,50	2,25	7,5 YR 3/4		Textura argilosa	fr; gr
Bt ₁	15 - 50	31,22	8,55	60,23	95,21	0,14	2,32	2,5 YR 3/6	Plana	Muito argilosa	mo; b.sub
Bt ₂	50 - 100	27,37	12,00	60,63	100,00	0,20	2,32	2,5 YR 3/6	Ondulada	Muito argilosa	mo; b.sub

Horiz.: horizonte; Prof.: profundidade; S/A: relação silte/argila; IF: índice de floculação; VTP: volume total de poros; DP: densidade de partícula; fr: fraca; mo: moderada; as: blocos sub-angulares.

Tabela 5 - Caracterização química dos solos amostrados da Toposequência 2

Horiz.	Prof.	pH		Complexo Sortivo ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)								Valor (V)	Valor (m)	MO (g kg^{-1})	P rem. (mg kg^{-1})
		KCl	H ₂ O	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺	SB	CTC efetiva	CTC pH 7	%			
T2P1: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto, A moderado															
A	0-15	5,14	6,2	0,605	3,39	1,43	0,03	2,24	5,43	5,46	7,67	70,75	0,55	35,0	35,54
Bt ₁	15-60	5,33	6,2	0,550	2,33	0,74	0,05	1,59	3,62	3,67	5,21	69,51	1,36	6,5	24,24
Bt ₂	60-130	5,43	6	0,120	2,2	0,56	0,04	1,64	2,88	2,92	4,52	63,72	1,37	4,4	15,47
T2P2: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico, A moderado															
A	0-10	5,13	5,8	0,350	2,48	0,65	0,04	2,42	3,48	3,52	5,9	58,99	1,14	10,1	27,43
Bw	10-130	5,51	6,2	0,049	2,53	0,26	0,05	1,63	2,84	2,89	4,47	63,52	1,73	5,3	21,67
T2P3: LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, A moderado															
A	0-10	4,1	5,2	0,116	1,26	0,46	0,31	4,42	1,84	2,15	6,26	29,33	14,42	18,1	31,9
AB	10-25	4,52	5,3	0,074	1,37	0,35	0,15	3,5	1,79	1,94	5,29	33,92	7,73	9,1	23,78
Bw	25-110	5,34	5,4	0,024	0,89	0,35	0,05	1,96	1,26	1,31	3,22	39,24	3,82	3,6	13,84
T2P4: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto															
A	0-15	5,05	6,2	0,078	2,08	1,29	0,07	2,71	3,45	3,52	6,16	55,98	1,99	21,0	32,49
Bt ₁	15-50	4,11	4,7	0,030	0,55	0,19	0,57	4,37	0,77	1,34	5,14	14,99	42,54	7,4	20,3
Bt ₂	50-100	4,58	5,2	0,022	1,09	0,2	0,17	2,74	1,31	1,48	4,05	32,4	11,49	7,0	16,95

➤ **Ponto 1 (T2P1): ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto, A moderado**

O perfil localiza-se no topo da encosta, há 989 m de altitude, em relevo montanhoso e não apresenta processo erosivo. A vegetação local pode ser caracterizada como sendo de estágio secundário de sucessão, com presença de arbustos e algumas árvores distanciadas umas das outras. O perfil amostrado, Figura 26, apresentou grande quantidade de raízes nos primeiros 50 cm, algumas chegando a atingir 70 cm de profundidade.

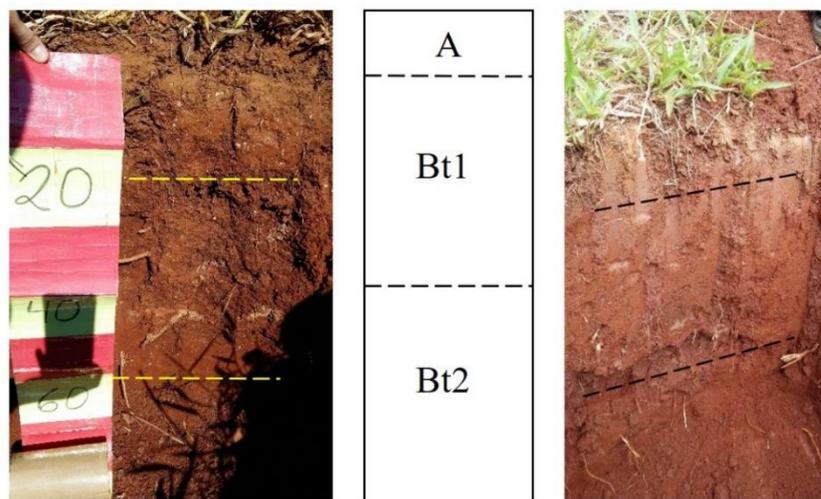


Figura 26 - Perfil 1 da Toposequência 2 (T2P1)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte A moderado, com 15 cm de espessura, apresenta coloração bruno-amarelado (10YR5/4, seco) e bruno muito escuro (7,5YR2,5/3, úmido), textura franca, consistência extremamente dura (seca), solta (úmida) e plástica e não pegajosa (molhada). O teor de matéria orgânica é de 35 g.kg⁻¹ e a soma de bases, saturação por bases, CTC efetiva e CTC a pH 7 são máximas em A e decrescem com a profundidade.

Solo moderadamente ácido, com transição entre horizontes plana e gradual. O horizonte Bt₁ apresenta teor de argila de 44,75%, incremento de mais de 20% do material, o que caracteriza mudança textural abrupta, uma vez que ocorre dentro de um intervalo de 7,5 cm. A coloração do solo neste horizonte é bruno avermelhado escuro (5 YR 3/4, úmido).

Os horizontes Bt₁ e Bt₂ apresentam consistência semelhante, sendo ligeiramente dura quando seco firme quando úmido, plástica e pegajosa quando molhado. Ambos horizontes apresentam coloração avermelhada, textura argilosa, alta saturação por base (eutrófico) e baixa

atividade da fração argila (Tb). Dentre as características químicas do perfil, o teor de potássio é o que mais diferencia os horizontes B texturais, sendo Bt₁ com 215,06 mg.dm⁻³ e Bt₂ com 46,85 mg.dm⁻³.

➤ **Ponto 2 (T2P2): LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico, A moderado**

O perfil localiza-se na quebra de gradiente do terreno, em região deposicional, com relevo suave ondulado e altitude de 921 m. A área é usada para bovinocultura e a pastagem apresenta-se parcialmente degradada, com presença de solo exposto. O horizonte A apresenta 10 cm de espessura, seguido por horizonte B com 120 cm, como mostra a Figura 27. O horizonte A apresenta 10,1 g.kg⁻¹ de matéria orgânica, consistência dura (seca), extremamente firme (úmido), não plástica e não pegajosa (molhada).

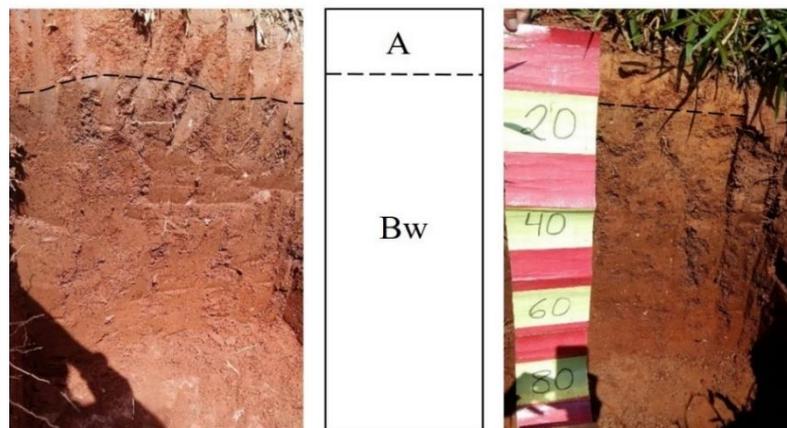


Figura 27 - Perfil 2 da Toposequência 2 (T2P2)

Fonte: Org. do autor (2019)

Ambos horizontes (A e Bt) apresentaram coloração Vermelho-amarelado (5YR 3/4) quando úmido. O perfil apresentou transição difusa entre os horizontes, aumento pouco significativo do teor de argila entre A e Bw, além de apresentar baixos teores de silte.

No horizonte Bw a relação S/A é de 0,46, com alto grau de flocculação no sub-horizonte mais afastado da superfície e menor teor de matéria orgânica. Apresentou também alta saturação por bases (63,52%, eutrófico) e consistência extremamente dura, extremamente firme, muito plástica e não pegajosa.

➤ **Ponto 3 (T2P3): LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, A moderado.**

O perfil está localizado na cota de 905 metros, em relevo plano, sob pastagem visivelmente degradada. A mudança entre os horizontes é plana e gradual (Figura 28). O horizonte A apresenta coloração bruno-escuro (5YR3/4), textura argilosa, e consistência extremamente dura quando seco, friável quando úmido e ligeiramente plástico e não pegajoso quando molhado. O teor de matéria orgânica é de 18,1 g.kg⁻¹, podendo caracteriza-se como A moderado.

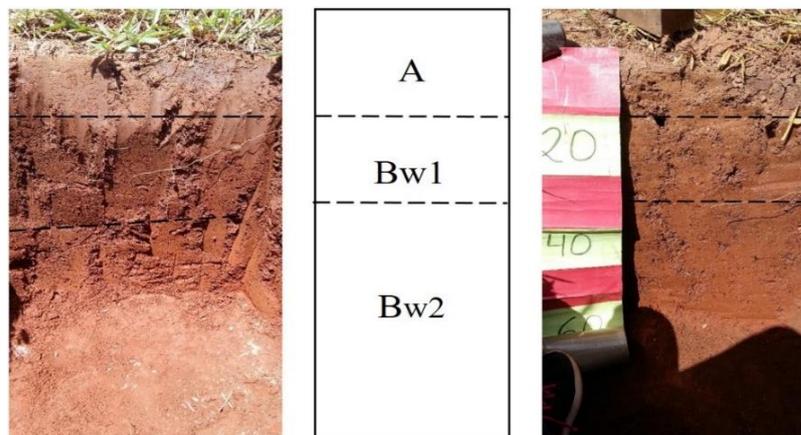


Figura 28- Perfil 3 da Toposequência 2 (T2P3)

Fonte: Org. do autor (2019)

A transição entre horizontes é gradual e plana, o horizonte subsequente, Bw₁, apresentara baixos teores de silte, relação silte/argila de inferior a 0,7, consistência dura (seco), friável (úmido) e ligeiramente pegajoso (molhado) e coloração vermelho escuro quando úmido (2,5YR3/6). Os horizontes Bw₁ e Bw₂ possuem baixos teores de CTC (efetiva e a pH 7), baixa saturação por base (distrófico) e baixa atividade da fração argila (Tb), e, a soma de base e o teor de matéria orgânica decrescentes com a profundidade.

➤ **Ponto 4 (T2P4): ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos abruptos, A moderado**

O perfil está localizado na parte baixa da encosta, em altitude de 876m e relevo próximo ao plano. O perfil apresenta transição entre horizontes bem definida como mostra a Figura 29. A espessura do horizonte A atinge 15 cm, com forte presença de raízes, teor de matéria orgânica de 21 g.kg⁻¹, coloração bruno-forte e bruno escuro (7,5YR5/6, seco e 7,5YR3/4, úmido), textura argilosa e consistência extremamente dura quando seco, dificultando a coleta do material.

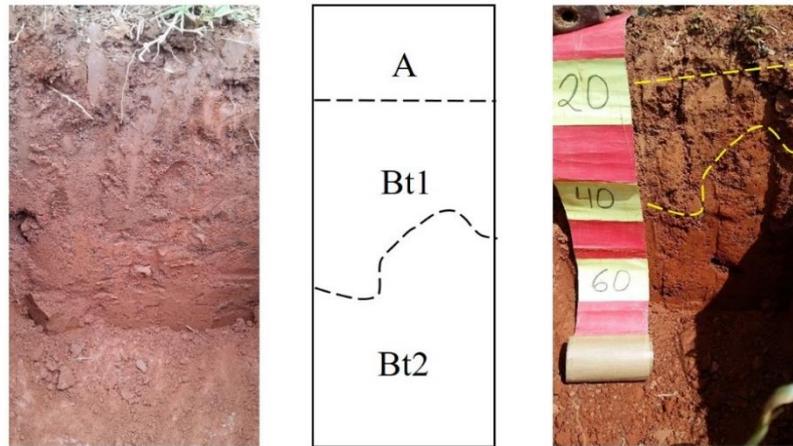


Figura 29 - Perfil 4 da Topossequência 2 (T2P4)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte Bt_1 apresentou consistência dura (seca), friável (úmida) e ligeiramente pegajosa (molhada) e coloração vermelho escuro (2,5YR3/6, úmido). O percentual de argila aumentou cerca de 20 % do horizonte A para o Bt_1 em um intervalo menor que 7 cm, caracterizando mudança textural abrupta e tornando a textura do solo muito argilosa, com teores de argila em torno de 60%. A relação S/A foi de 0,14 em Bt_1 e 0,20 em Bt_2 , com teores baixos de silte em Bt_1 (8,55 %), altos índices de floculação e baixa atividade da fração argila (Tb). A saturação por bases apresentou-se alta no horizonte A e baixa nos horizontes subsequentes, Bt_1 e Bt_2 (distrófico). A saturação por alumínio foi máxima em Bt_1 , com 42,54%, seguindo por Bt_2 com 11,49%.

5.1.3 Topossequência 3

A terceira topossequência localiza-se ao sul da microbacia e do município de Itajubá. É uma região pertencente à fazenda Bonanza, onde a pecuária é voltada ao gado leiteiro. Apesar de pecuária intensiva, os topos de morros são preservados, as nascentes e os cursos d'água possuem proteção vegetal, mesmo não atingindo o mínimo estabelecido na legislação. A topossequência está no intervalo de altitude entre 1000 e 1300 m, e possui como material de origem a unidade litológica Suíte Bragança Paulista. Segundo o mapeamento da FEAM (2010), os solos predominantes na região são pertencentes ao grupo Pdv, com predominância de Argissolo Vermelho distrófico típico A moderado, textura média (fraco) a argilosa, característico de floresta subperenifólia e relevo forte ondulado. A forma de relevo dominante na topossequência é caracterizada por ser côncavo e divergente. A Tabelas 6 e 7 mostram os atributos físicos e químicos dos perfis amostrado.

Tabela 6 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 3

Horiz.	Prof.	Areia	Silte	Argila	IF	S/A	DP	Cor Úmida	Transição	Textura	Estrutura
	(cm)	------(%)-----			(%)		Kg dm ⁻³				
T3P1: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrúptico, A húmico											
A	0 - 30	52,67	18,57	28,76	93,94	0,65	2,16	10 YR 2/2		Textura média	fo; gr
Bt₁	30 - 60	31,01	6,36	62,63	91,12	0,10	2,27	2,5 YR 3/6	plana e abrupta	Muito argilosa	mo; fo; sa
Bt₂	60 - 110	30,35	5,92	63,73	98,95	0,09	2,26	2,5 YR 3/6	plana e gradual	Muito argilosa	mo; sa
T3P2: ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos, A húmico											
A	0 - 40	52,17	18,60	29,23	95,12	0,64	2,26	10 YR 2/1		Textura média	fo, gr
Bt	40 - 120	31,10	9,80	59,10	94,64	0,17	2,26	5 YR 4/4	plana	Textura argilosa	Mo; fo; sa
T3P3: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A húmico											
A	0 - 30	52,95	13,49	33,56	90,49	0,40	2,23	10 YR 2/1		Textura média	mo, gr
AB	30 - 50	42,34	14,57	43,10	84,83	0,34	2,21	7,5 YR 3/3	plana	Textura argilosa	mo; sa
Bt	50 - 120	31,56	13,34	55,10	99,52	0,24	2,23	5 YR 4/6	plana e difusa	Textura argilosa	mo; sa
T3P4: GLEISSOLOS HÁPLICOS Ta Distróficos típicos											
A	0 - 20	62,70	23,13	14,16	90,31	1,63	2,23	7,5 YR 3/3		Textura média	fr, sa
Big	20 - 60	60,18	17,32	22,50	91,42	0,77	2,20	7,5 YR 2,5/3	plana e difusa	Textura média	fr, sa

Horiz.: horizonte; Prof.: profundidade; S/A: relação silte/argila; IF: índice de floculação; VTP: volume total de poros; DP: densidade de partícula; fr: fraca; mo: moderada; as: blocos sub-angulares.

Tabela 7 - Caracterização química dos solos amostrados da Toposequência 3

Horiz.	Prof.	pH		Complexo Sortivo ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)								Valor (V)	Valor (m)	MO (dag kg^{-1})	P rem. (mg kg^{-1})
		KCl	H ₂ O	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺	SB	CTC efetiva	CTC pH 7	%			
T3P1: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto, A húmico															
A	0 - 30	4,17	5,3	0,127	1,62	0,52	0,5	7,79	2,27	2,77	10,06	22,54	18,05	3,53	28,4
Bt₁	30 - 60	4,43	5,2	0,045	1,24	0,44	0,23	3,78	1,73	1,96	5,51	31,32	11,73	0,71	19,02
Bt₂	60 - 110	4,34	5	0,056	0,71	0,32	0,29	3,35	1,09	1,38	4,44	24,46	21,01	0,97	12,91
T3P2: ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos, A húmico															
A	0 - 40	4,06	5,4	0,141	2,35	0,81	0,6	6,1	3,3	3,9	9,4	35,12	15,38	3,39	32,1
Bt	40 - 120	3,82	4,9	0,065	0,43	0,38	1,73	7,79	0,88	2,61	8,67	10,1	66,28	1,19	13,65
T3P3: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A húmico															
A	0 - 30	4,44	5,4	0,115	2,84	0,89	0,39	5,4	3,85	4,24	9,25	41,57	9,2	4,68	26,39
AB	30 - 50	4,47	5,6	0,065	1,68	0,6	0,3	3,7	2,35	2,65	6,05	38,76	11,32	1,86	26,17
Bt	50 - 120	4,03	5	0,042	0,27	0,1	1,11	5,16	0,41	1,52	5,57	7,4	73,03	0,95	19,46
T3P4: GLEISSOLOS HÁPLICOS Ta Distróficos típicos															
A	0 - 20	4,22	5,2	0,197	2,75	1	0,23	5,58	3,95	4,18	9,53	41,42	5,5	3,65	31,22
Big	20 - 60	4,02	5,1	0,052	1,62	0,1	0,61	7,53	1,77	2,38	9,3	19,06	25,63	1,96	30,18

➤ **Ponto 1 (T3P1): ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico, A húmico**

Solo com transição bem definida entre os horizontes A e Bt₁, que ocorre de maneira plana e abrupta (Figura 30). O teor de argila no horizonte A é de 28,76%, textura média, e atinge 62,63% em Bt₁, textura muito argilosa. O horizonte A húmico possui 30 cm de espessura, com coloração bruno escuro (7,5 YR 3/2, seco e 10 YR 2/2, úmido) onde o valor e croma são inferiores a 4, com consistência macia, muito friável, ligeiramente plástica e não pegajosa. A saturação por base é baixa em A (com 22,54 %), enquanto o teor de matéria orgânica é alto (3,53 dag/kg).

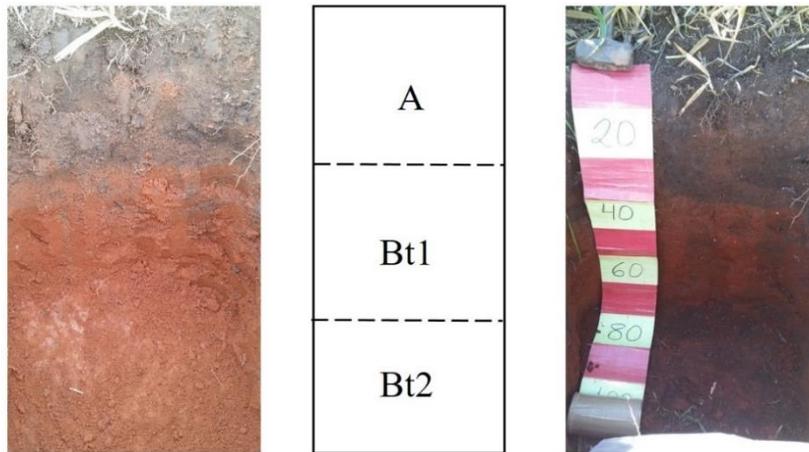


Figura 30 - Perfil 1 da Toposequência 3 (T3P1)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte Bt₁ possui espessura de 30 cm, coloração avermelhada (2,5 YR 3/6, úmido) e consistência muito firme (seca), friável (úmida), plástica e ligeiramente pegajosa (molhada). A saturação por bases de 31,32% em Bt₁ é a maior do perfil e, mesmo assim, confere ao solo característica distrófica. A atividade da fração argila é baixa e a saturação por alumínio é baixa neste horizonte.

Em Bt₂, a coloração é vermelha escura (2,5 YR 3/6, úmido) e a consistência é dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa (seca, úmida e molhadas, respectivamente). A relação S/A em Bt₁ e Bt₂ é de aproximadamente 0,10 indicando baixos teores de silte no perfil (em torno de 6%). O horizonte Bt₂ possui 50 cm de espessura, e difere de Bt₁ pela cor e por apresentar menor saturação por bases (24, 46%) e maior saturação por alumínio do perfil (21,01%). A CTC efetiva, a CTC a pH7 e o teor de matéria orgânica são maiores no horizonte

A e decrescentes ao longo do perfil. O solo apresenta baixa saturação por bases (distrófico) e atividade da fração argila baixa (Tb).

➤ **Ponto 2 (T3P2): ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos, A húmico**

O segundo ponto amostral da Topossequência 3 localiza-se em declividade forte ondulada, há 1224m de altitude e na região convexa do relevo, como mostra a Figura 31.

O horizonte A húmico possui 40 cm de espessura, forte presença de raízes e teor de matéria orgânica de $33,9 \text{ g.kg}^{-1}$, CTC efetiva, CTC potencial e saturação por bases são maiores em A e decrescem nas camadas subsequentes. A saturação por alumínio é baixa em Bt, com 72,11 %.

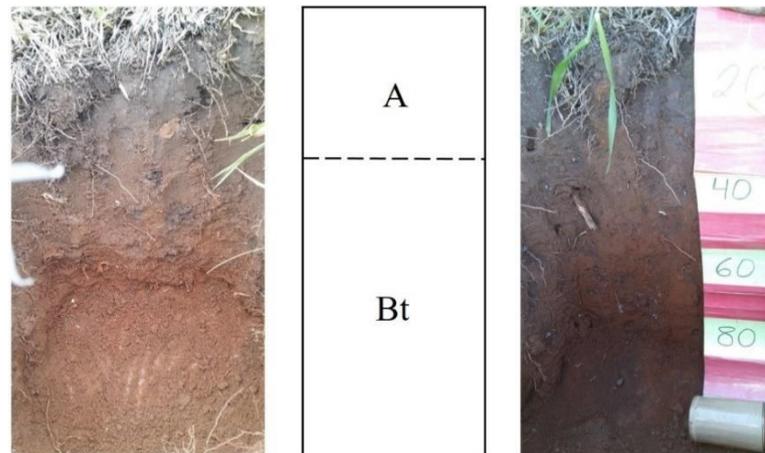


Figura 31 - Perfil 2 da Topossequência 3 (T3P2)

Fonte: Org. do autor (2019)

A espessura do horizonte Bt é de 80 cm, com transição entre horizontes plana e abrupta. O teor de argila aumenta de 29,23% em A para 60,80% em Bt e passa de textura média para muito argilosa. A cor do horizonte é bruno-avermelhado (5 YR 4/4, úmido) e a consistência é extremamente dura quando seca, firme quando úmida e, plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada. Apesar do alto teor de saturação por alumínio, o solo não possui caráter aluminoso por não apresentar alumínio extraível maior ou igual a 4 cmolc.kg^{-1} de solo. O horizonte Bt possui baixa saturação por bases (distrófico) e baixa atividade da fração argila (Tb).

➤ **Ponto 3 (T3P3): ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A húmico**

O ponto 3, localiza-se há 1191m de altitude, em declividade alta, sob uma área de cultivo de gramínea e arbustos, apresentando boa cobertura do solo e ausência de processos erosivos. O horizonte A húmico possui coloração bruno muito escuro (10 YR 2/1, úmido) como ilustra a Figura 32, e teor de matéria orgânica de 46,8 g.kg⁻¹. Possui 30 cm de espessura e consistência ligeiramente dura quando seca, solta quando úmida e não plástica e não pegajosa quando molhada. A soma de bases, CTC efetiva, CTC a pH 7 e saturação por bases são maiores em A e decrescem com a profundidade.

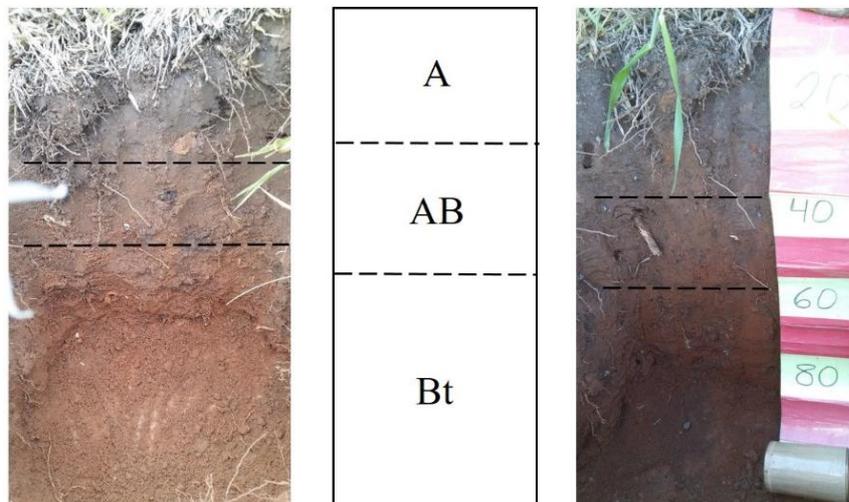


Figura 32 - Perfil 3 da Toposequência 3 (T3P3)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte de transição, AB, possui coloração intermediária entre A e Bt (7,5 YR 3/3), apresenta teor de argila e relação S/A no intervalo de A e Bt. Possui textura argilosa aproximando-se de Bt1 e índice de floculação, saturação por base, saturação por alumínio e fósforo remanescente próximas aos encontrados no horizonte A.

O horizonte Bt apresenta incremento de argila, com aumento de 33,56% em A para 57,43% de argila em Bt, no entanto, não caracteriza mudança textural abrupta por não acontecer dentro do intervalo de 7,5 cm. O horizonte apresenta, ainda, saturação por alumínio de 74,53% com alumínio extraível de 1,2 cmolc.dm⁻³, baixa saturação por bases (distrófico) e baixa atividade da fração argila (Tb).

➤ **Ponto 4 (T3P4): GLEISSOLOS HÁPLICOS Ta Distróficos típicos**

O ponto P4 localiza-se próximo ao curso d'água, possui vegetação característica de ambientes úmidos (taboa) e presença de hidromorfismo devido à disposição no relevo e planície com baixa declividade. O perfil possui profundidade efetiva de 80 cm, com forte presença de raízes nos primeiros 20 cm. O solo permanece periodicamente saturado por água o que caracteriza o processo de gleização em decorrência do ambiente redutor visivelmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante um período do ano.

O horizonte A, Figura 33, com espessura de 20 cm, possui consistência ligeiramente dura quando seca, solta quando úmida e muito plástica e não pegajosa quando molhada. Possui baixa saturação por bases, 41,42%, e teores mais elevados de matéria orgânica de 36,5 g.kg⁻¹ e CTC efetiva e potencial, com valores decrescentes em profundidade. De modo contrário, a saturação por alumínio é baixa na camada superior, com teores de 5,50%, e aumenta com a profundidade.

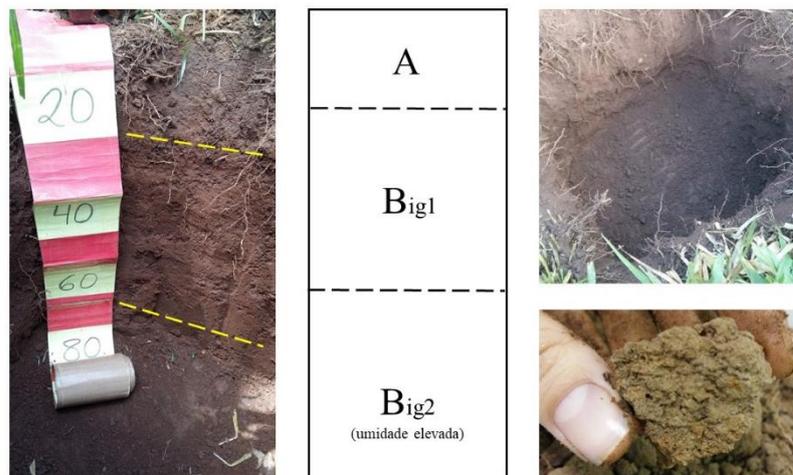


Figura 33 - Perfil 4 da Toposequência 3 (T3P4)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte B_{ig1} apresenta textura média, franca argilosa arenosa devido ao alto teor de areia. O processo de gleização confere ao solo cores predominantemente escuras, com cromas bastante baixos, próximos do neutro. O horizonte B_{ig1} apresenta ainda estrutura em blocos subangulares e manifestação de mosqueados, indicando ambiente redutor para o ferro (Figura 31). A consistência é macia quando seca, muito friável quando úmida e não plástica e não pegajosa quando molhada. O horizonte B_{ig1} possui baixa saturação por bases (19,06%), alta atividade da fração argila e saturação por alumínio de 25,63%

Já no horizonte B_{ig2} , o solo apresenta consistência extremamente dura (seca), firme (úmida), muito plástica e não pegajosa (molhada). A saturação por alumínio é máxima neste horizonte, com teores de 50,52%, com alta atividade da fração argila.

A presença de horizonte A húmico na Topossequência 3 pode ser explicado pela existência de duas estações climáticas bem definidas na região (uma chuvosa e outra seca), que favorece a desidratação dos compostos orgânicos na época seca e a rápida formação de compostos de elevado peso molecular, mais estáveis na estação úmida (MANZATTO et al., 1990; SILVA et al., 2013b). Associados a este aspecto, tem-se ainda a posição do relevo em que topossequência se encontra, e a boa proteção do solo, que evita os processos erosivos causados pela exposição do solo descoberto.

5.1.4 Topossequência 4

A topossequência 4 localiza-se nas regiões de maiores altitudes da microbacia, dentro do intervalo de 1000 a 1300m, apresenta, ainda, relevo de montanhoso, com declividades acima de 45%. Dente as Unidades Litológicas, a topossequência localiza-se no Complexo Varginha-Guaxupé, litofácies paragnaisse migmatítico. Na região, há presença de processos erosivos em estágios intermediários de desenvolvimento, onde é possível observar solo exposto, caminho preferencial de água e início de erosão laminar. Segundo o mapeamento existente, é predominante na região os solos da classe dos Argissolos Vermelhos distróficos típico A moderado, textura média (fraco) a argilosa, característico de floresta subperenifólia e relevo forte ondulado (FEAM, 2010). A caracterização é mostrada nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Caracterização física dos solos amostrados da Topossequência 4

Horiz.	Prof.	Areia	Silte	Argila	IF	S/A	DP	Cor Úmida	Transição	Textura	Estrutura
	(cm)	------(%)-----			(%)		Kg dm ⁻³				
T4P1: LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico											
A	0 - 20	52,43	14,50	33,06	94,16	0,44	2,22	10 YR 2/2		Textura média	fo, gr
AB	20 - 30	50,12	15,04	34,85	90,45	0,43	2,40	10 YR 3/3	plana e difusa	Textura média	mo, sa
Bw	30 - 110	45,55	16,16	38,30	92,92	0,42	2,33	10 YR 3/6	plana e difusa	Textura argilosa	mo, sa
T4P2: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abráptico, A proeminente											
A	0 - 18	48,86	20,68	30,46	92,61	0,68	2,06	10 YR 2/2		Textura média	fo; mo; gr
Bt₁	18 - 41	26,03	9,50	64,46	93,65	0,15	2,17	2,5 YR 2,5/4	plana e gradual	Muito argilosa	mo; fo; sa
Bt₂	41 - 90	26,04	6,90	67,06	97,16	0,10	2,19	2,5 YR 2,5/3	plana e gradual	Muito argilosa	mo; fo; sa
T4P3: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abráptico											
A	0 - 15	56,35	15,08	28,56	80,93	0,53	2,22	5 YR 3/4		Textura média	fc, gr
Bt₁	15 - 28	38,20	12,44	49,36	91,02	0,25	2,34	5 YR 3/4	plana e gradual	Textura argilosa	mo; sa
Bt₂	28 - 100	26,13	9,81	64,06	99,79	0,15	2,21	5 YR 3/4	plana e gradual	Muito argilosa	mo; sa
T4P4: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado,											
A	0 - 21	52,01	20,66	27,33	92,12	0,76	2,32	10 YR 2/2		Textura média	fo, sa
Bw₁	21 - 45	72,19	8,44	19,36	87,55	0,44	1,73	5 YR 3/3	irregular	Textura média	fo, sa
Bw₂	45 - 90	64,86	9,31	25,83	78,84	0,36	2,37	10 YR 3/3	irregular	Textura média	fo, sa

Horiz.: horizonte; Prof.: profundidade; S/A: relação silte/argila; IF: índice de flocação; VTP: volume total de poros; DP: densidade de partícula; fr: fraca; mo: moderada; as: blocos sub-angulares.

Tabela 9 - Caracterização química dos solos amostrados da Toposequência 4

Horiz.	Prof.	pH		Complexo Sortivo ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)								Valor (V)	Valor (m)	MO (g kg^{-1})	P rem. (mg kg^{-1})
		KCl	H ₂ O	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²	Al ³⁺	Al ³⁺ + H ⁺	SB	CTC efetiva	CTC pH 7	%			
T4P1: LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico															
A	0 - 20	3,83	5	0,170	1,86	0,62	1,31	9,83	2,65	3,96	12,48	21,24	33,08	3,95	20,77
AB	20 - 30	3,49	4,7	0,058	1,11	0,1	2,71	11,11	1,27	3,98	12,38	10,25	68,09	0,92	19,35
Bi	30 - 110	3,68	4,8	0,056	0,84	0,1	2,44	8,32	1	3,44	9,32	10,69	70,93	0,57	17,49
T4P2: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto, A proeminente															
A	0 - 18	4,72	5,6	0,730	3,92	3,22	0,13	4,83	7,87	8	12,7	61,99	1,62	6,48	37,65
Bt1	18 - 41	4,29	5,5	0,517	1,76	0,93	0,45	4,09	3,21	3,66	7,3	43,95	12,3	1,36	18,63
Bt2	41 - 90	4,16	5,1	0,578	1,11	0,65	0,7	4,78	2,34	3,04	7,12	32,86	23,03	1,16	15,14
T4P3: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto															
A	0 - 15	4,44	5	0,280	2,23	1,24	0,16	3,87	3,75	3,91	7,62	49,22	4,09	3,21	39,33
Bt1	15 - 28	4,17	5,2	0,078	1,28	0,53	0,36	3,54	1,89	2,25	5,43	34,78	16	0,8	30,78
Bt2	28 - 100	4,22	4,6	0,151	1,04	0,47	0,39	4,09	1,66	2,05	5,75	28,89	19,02	0,6	29,08
T4P4: LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado.															
A	0 - 21	4,45	5,4	0,318	4,41	1,04	0,13	5,05	5,77	5,9	10,82	53,31	2,2	4,1	32,92
Bt	21 - 45	4,41	5,9	0,143	1,16	0,11	0,22	2,96	1,41	1,63	4,37	32,35	13,5	1	32,28
Bt	45 - 90	4,52	5,8	0,155	2,19	0,4	0,14	3	2,75	2,89	5,75	47,74	4,84	1,38	32,1

➤ **Ponto 1 (T4P1): LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico**

O ponto 1 localiza-se em altitude de 1261 m, tendo como cobertura do solo gramínea. O local é parcialmente preservado, com boa cobertura do solo, presença de árvores e arbustos, e, ausência de processos erosivos. O relevo é montanhoso, com declividade superior a 45%. Há presença de solo exposto em região adjacente e afloramento rochoso, indicando gnaiss como material de origem. A saturação por bases é máxima neste horizonte, com valor de 21,24%. A Figura 34 ilustra o perfil amostrado.



Figura 34 - Perfil 1 da Toposequência 4 (T4P1)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte A, com presença de raízes nos primeiros 20 cm, possui teor de matéria orgânica de $3,95 \text{ dag.kg}^{-1}$. Apresenta ainda, textura média, coloração bruno amarelado escuro, e consistência ligeiramente dura quando seca, muito friável quando úmida e não plástica e não pegajosa quando molhada.

O horizonte de transição AB apresenta espessura de 10 cm e mescla características dos horizontes A e Bw, apresenta textura média e teor de argila de 34,85%. Os valores de CTC efetiva e a pH 7 aproximam dos valores quantificados do horizonte A, enquanto os teores de potássio, soma de bases e saturação por bases e por alumínio, aproximam-se de Bw.

A transição entre horizontes ocorre de maneira difusa, tendo o horizonte Bw espessura de 80 cm. O horizonte apresenta baixos teores de silte e um pequeno incremento da fração argila com o aumento da profundidade. Apresenta textura argilosa e consistência macia quando seca, friável quando úmida e plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada. Bw apresenta coloração bruno amarelo escuro (10 YR 3/6, úmido), alto grau de floculação e menor teor de

matéria orgânica, o que evidencia a pouca mobilidade das argilas e a alta resistência à dispersão. Apresenta baixa saturação por bases (distrófico) e argila de atividade baixa (Tb).

➤ **Ponto 2 (T4P2): ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto, A proeminente**

O ponto 2 localiza-se a 1128 m de altitude, em relevo forte ondulado. A área apresenta fraca cobertura do solo, presença de gramíneas e solo exposto. A Figura 35 ilustra o perfil amostrado. O horizonte A proeminente apresenta 18 cm de espessura, forte presença de raízes nos primeiros 15 cm, coloração escura com croma inferior a 3 quando seco e úmido (10 YR 3/3 e 10 YR 2/2, respectivamente), alto teor de matéria orgânica ($6,48 \text{ dag.kg}^{-1}$) e alta saturação por base (61,99%), se enquadrando como A proeminente.

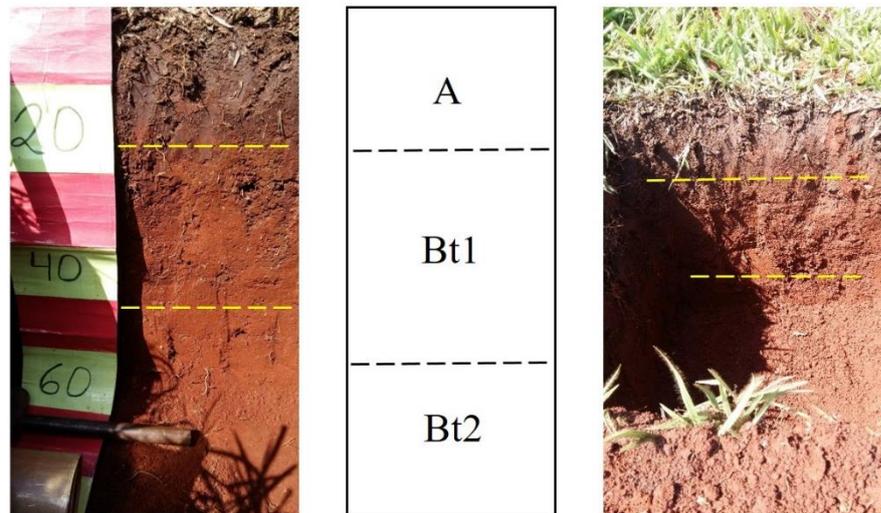


Figura 35 - Perfil 2 da Toposequência 4 (T4P2)

Fonte: Org. do autor (2019)

O teor de argila passa de 30,46% de A para 64,46 % em Bt, mudando de textura média para textura argilosa. A transição ocorre dentro do intervalo de 7,5 cm caracterizando mudança textural abrupta. O horizonte Bt₁ apresenta coloração vermelha (2,5YR2,5/4, úmido), cerosidade moderada, consistência muito dura (seco), muito firme (úmido), plástica e ligeiramente pegajosa (molhada). Apresenta baixa saturação por base (distrófico) e baixa atividade da fração argila (Tb).

O horizonte Bt₂ difere da camada superior por apresentar coloração mais avermelhada (2,5 YR 2,5/3, úmido), pequeno incremento de argila, redução na saturação por bases (de 43,95% em Bt₁ para 32,86% em Bt₂) e aumento da saturação por alumínio (de 12,30 % para 23,03%) e consistência extremamente dura (seco), muito firme (úmido), plástica e ligeiramente

pegajosa (molhado). Em ambos horizontes texturais a CTC efetiva, a CTC a pH 7, soma de bases e teor de matéria orgânica são semelhantes. Assim como o horizonte subjacente, Bt₂ é distrófico e com argila de atividade baixa (Tb).

➤ **Ponto 3 (T4P3): ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto, A moderado**

O ponto 3 localiza-se a 1071 m de altitude e em relevo ondulado, sob vegetação visivelmente degradada, com presença de solo exposto e início de processo erosivo. A Figura 36 ilustra o perfil T4P3.

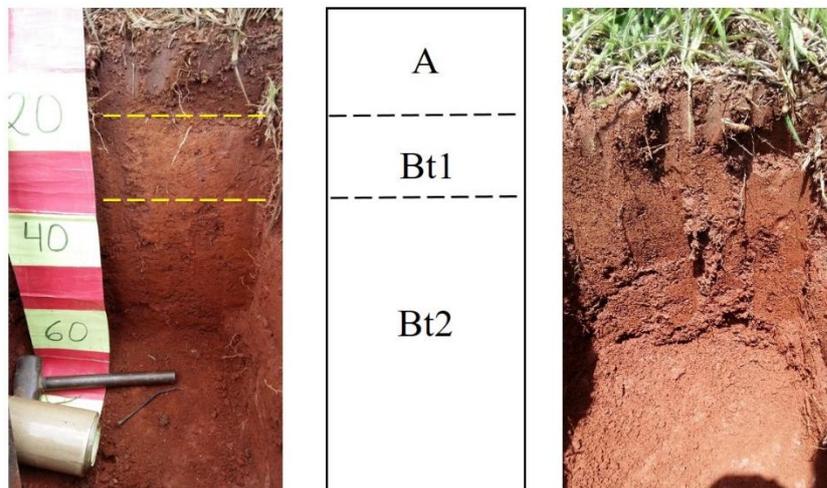


Figura 36 - Perfil 3 da Topossequência 4 (T4P3)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte A apresenta coloração bruno avermelhado escuro (5 YR 3/4, úmido), espessura de 15 cm e forte presença de raízes nos primeiros 15 cm. A consistência é extremamente dura, muito firme, plástica e não pegajosa (seco, úmido e molhado, respectivamente). A saturação por bases é máxima em A, com 49,22%, assim como o teor de matéria orgânica de 3,21 dag.kg⁻¹. De modo contrário, a saturação por alumínio é mínima no horizonte, com valor de 4,09%.

Houve incremento de argila de A para Bt₁ que atinge teores de 49,36% e textura argilosa. O horizonte apresenta espessura de 13 cm e o incremento ocorre dentro dos primeiros 7,5 cm, o que caracteriza mudança textural abrupta. A coloração é bruno-avermelhado-escuro quando úmido e vermelho-amarelado quando seco. A consistência é ligeiramente dura quando seco, solta quando úmido e ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa quando molhada.

O incremento de argila ocorre de Bt_1 para Bt_2 que apresenta 64,06%, e diferencia do horizonte sobrejacente pela coloração vermelha (5YR 4/6, seca). A textura média permanece, no entanto, a saturação por bases, teor de matéria orgânica, CTC (efetiva e potencial) reduzem com a profundidade. A saturação por alumínio aumenta para 19,02% e a consistência muda para muito dura (seco), friável (úmido) e plástica e ligeiramente pegajosa (molhado). A máxima expressão do solo no perfil ocorre no horizonte Bt_2 , que também apresenta mudança textural, solo distrófico e argila de atividade baixa.

➤ **Ponto 4 (T4P4): LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado.**

O ponto amostral P4 localiza-se na região plana da vertente, no terço inferior, em altitude de 1031m. O uso do solo é destinado a pastagem, com vegetação de gramínea em boas condições e ausência de processos erosivos. A transição entre horizontes é irregular de A para B_{w1} , e difusa de B_{w1} para B_{w2} , como mostra a Figura 37.

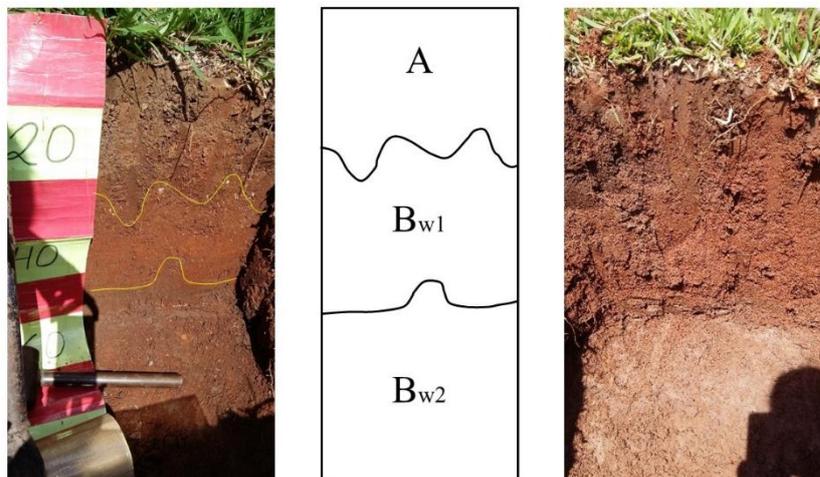


Figura 37 - Perfil 3 da Topossequência 4 (T4P3)

Fonte: Org. do autor (2019)

O horizonte A apresenta forte presença de raízes nos primeiros 20 cm, com teor de matéria orgânica de 41 g.kg^{-1} . O horizonte possui 21 cm de espessura e coloração é moderadamente amarelada (10YR5/4, úmido). A consistência é muito dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa (seco, úmido e molhado, respectivamente). A soma de bases, CTC (efetiva e a pH7) e saturação por bases são máximas em A e decrescem com a profundidade.

A diferenciação entre horizontes B_{w1} e B_{w2} é pouco nítida e a capacidade de troca de cátions são menores que $17 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ de argila. O teor de argila reduz moderadamente de A para os horizontes subsequentes, atingindo 16,33% em B_{w1} e 23,83% em B_{w2} . A relação textural de Bw (1 e 2) são inferiores a 0,7, além de apresentarem textura média e altos índices de floculação.

A redução do teor de matéria orgânica de 41 g.kg^{-1} (A) para 10 g.kg^{-1} (B_{w1}) e $13,8 \text{ g.kg}^{-1}$ (B_{w2}) com os altos índices de floculação indicam a pouca mobilidade das argilas e a alta resistência à dispersão.

A cor do solo em B_{w1} é bruno avermelhado escuro (5 YR 3/3, úmido) e em B_{w2} (bruno-escuro (10YR 3/3, úmido) caracterizando solos vermelhos-amarelos. Os horizontes latossólico apresentam baixa saturação por bases (distróficos) e argila de atividade baixa (Tb).

5.2 Distribuição das Classes de Solos na microbacia do Ribeirão

Anhumas

A distribuição dos perfis de solo ao longo de todas as topossequências avaliadas impõe um modelo mental de distribuição dos solos para microbacia do Ribeirão Anhumas, de encontro com o proposto por Ruhe (1956), onde o modelo de espacialização do solo acontece com solos menos evoluídos na alta vertente e mais espessos na média e baixa vertente.

A Topossequência 1 indicou a presença dos Argissolo Vermelho na região mais alta da vertente para os solos localizados à margem direita do Ribeirão Anhumas, seguidos por Cambissolos em relevo forte ondulado e montanhoso. De modo complementar a topossequência localizada à esquerda do Ribeirão Anhumas, onde predomina o relevo ondulado, o Argissolo Vermelho também foi localizado nos topos das vertentes de maior altitude. No entanto, o terço inferior houve predomínio de Latossolos, principalmente o Latossolo Vermelho-Amarelo presente em relevo suave ondulado.

Na região sul da microbacia, onde se encontram as topossequências 3 e 4, o relevo é movimentado, as altitudes atingem 1600 metros e faz com que as topossequências se complementem, indicando a presença de Latossolo Amarelo na região de maior altitude da microbacia onde o relevo aproxima-se do plano, Argissolo Vermelho no terço médio em relevo forte ondulado, seguido por Argissolo Vermelho-Amarelo nas áreas onde o relevo varia de suave ondulado a ondulado.

O vale fluvial do Ribeirão foi caracterizado pela presença de Gleissolo, indicando que o solo desta região permanece úmido durante um período ou durante todo ano, com a presença

de mosqueados que indicam a redução do Fe^{3+} . A deficiência de drenagem e baixa profundidade do lençol freático facilitam os fenômenos de redução, e assim a formação de solos hidromórficos. O Gleissolo apresentou argila de atividade alta, com valor superior a 35 cmolc/dm^3 , e o fato é explicado por Duchaufour (1998) que atribui o ocorrido à formação de minerais de argila 2:1 a partir de compostos solúveis liberados pelo intemperismo geoquímico, provenientes dos solos da parte superior das encostas e acumulados nestas áreas.

A espacialização dos solos na microbacia, como ilustra a Figura 37(A), foi condicionada à interpretação das variáveis geomorfométricas, principalmente quanto a altitude, relevo e posição na encosta. Segundo o levantamento de campo, o Argissolo esteve presente em todas as topossequências amostradas, indicando sua forte presença ao longo da microbacia. A presença de Argissolo Vermelho e Argissolo Vermelho-Amarelo nas regiões de meia encosta pode ser explicada pelo favorecimento do fluxo de água lateral, condição que facilita a remoção superficial de argila.

No trabalho de Chagas, Fernandes Filho e Bhering (2013) onde as classes dos Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos também ocuparam porções expressivas da área de estudo, a diferença de cor foi associada a diferença no regime de umidade do solo causado pela variabilidade no material de origem. Processo semelhante deve ser cuidadosamente associado à microbacia do Ribeirão Anhumas, uma vez o mesmo material de origem deu origem a diferentes Argissolos: Argissolos Vermelhos seguido por Argissolos Vermelhos-Amarelo em uma mesma topossequência.

A classe dos Cambissolos ficou condicionada à margem direita da microbacia, não sendo encontrada em outra região de características geomorfométricas semelhantes. O mesmo aconteceu para o Latossolo Amarelo, condicionado na região de maior altitude (1000 a 1300m) e em relevo suave ondulado.

No entanto, é válido ressaltar que as topossequências 1 e 2, possuem solos derivados de ortognaisse migmatítico e apresentam características avermelhadas mais expressivas que a topossequência 3, que possuem solos derivados de paragnaisse migmatítico, onde a expressão amarelada é mais evidente. A média do teor de magnésio dos solos presentes na topossequência 1 (T1), por exemplo é de $0,68 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e $0,59 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ na topossequência 2 (T2), enquanto a topossequência 3 (T3) apresenta média de $0,43 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$. O baixo teor de magnésio em T3 ocorre porque a predominância da coloração amarelada é associada a materiais ricos em silício, oxigênio, alumínio, sódio e potássio, e com baixos teores de ferro e magnésio, enquanto a predominância da cor vermelha é associada às rochas básicas, menos ricas em silício e mais ricas em minerais contendo magnésio e ferro, como T1 e T2.

Quanto à textura, os perfis apresentaram, de maneira geral, textura média, exceto nos Argissolos com mudança textural abrupta, onde a textura passou de média para argilosa em um intervalo menor que 7,5 cm. A característica abrupta aconteceu em diferentes toposequências, não permitindo associação com material de origem ou posição no relevo.

Os solos das duas primeiras toposequências, localizadas em altitudes de até 1300 metros e em relevo suave, apresentaram valores mais altos de saturação por base, com valores de até 74,28%, enquanto todos os perfis localizados em T3 e T4 apresentaram baixa saturação por bases (distróficos). No estudo de Klamt e Beatty (1972) e Uberti e Klamt (1984) houve a dominância de solos distróficos na posição de topos e eutrófico em posições de terraços e áreas escarpadas, contrário ao ocorrido na microbacia do Ribeirão Anhumas. Em T1 e T2, o solo apresentou característica eutrófica no topo, apesar do relevo forte ondulado, enquanto T3 e T4 não apresentaram solos eutróficos em nenhuma porção da vertente.

Para o mapeamento tradicional a litologia da microbacia pouco interferiu na espacialização dos solos, uma vez que diferentes materiais de origem resultaram na gênese de solos de mesmas classes. O mapeamento tradicional dos solos para a microbacia do Ribeirão Anhumas é ilustrado na Figura 38.

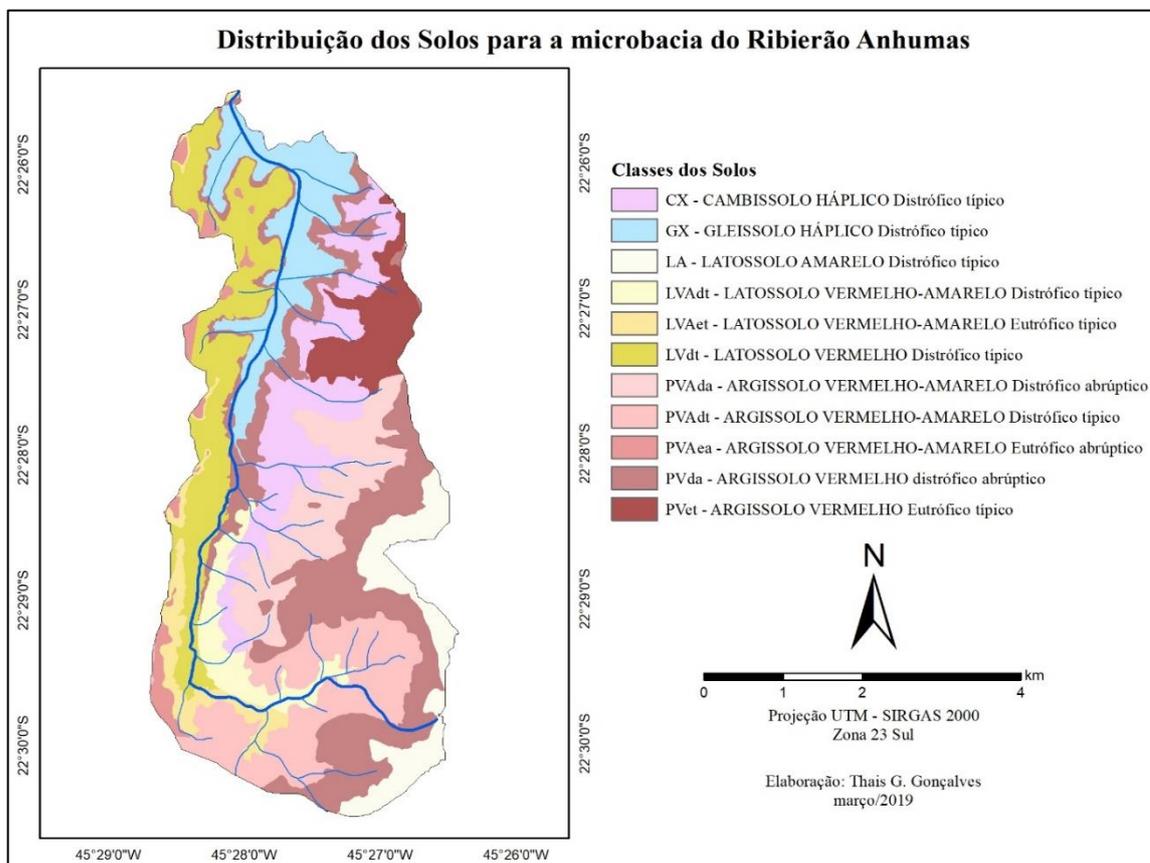
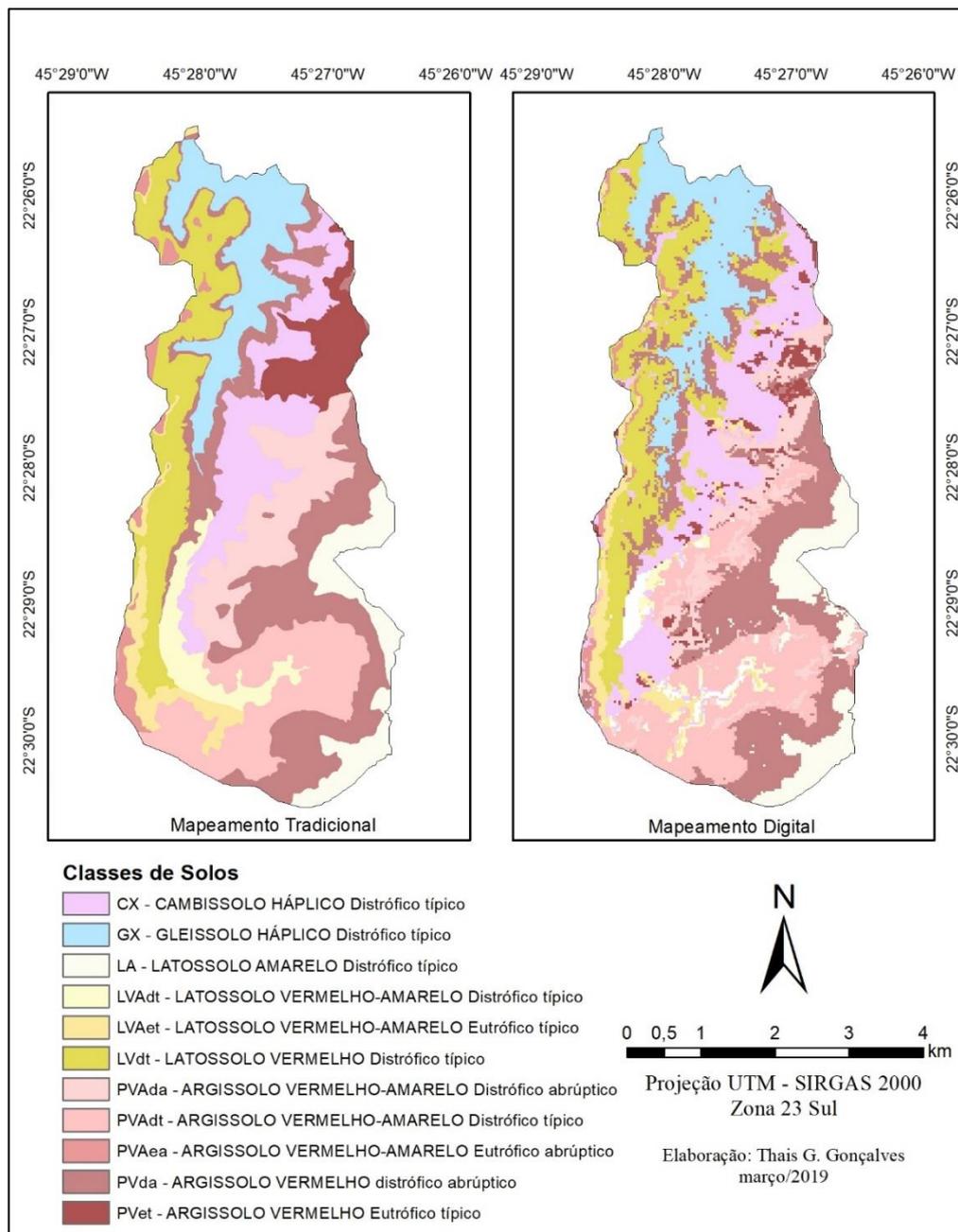


Figura 38 – Distribuição dos solos da microbacia do Ribeirão Anhumas por meio do Mapeamento Tradicional

5.3 Mapeamento Digital aplicado à microbacia do Ribeirão Anhumas

Inicialmente, foi realizado o mapeamento digital para a microbacia do Ribeirão Anhumas como forma de testar a metodologia. O mapeamento até o quarto nível categórico (que inclui ordem, subordem, grandes grupos e subgrupos) forneceu Acurácia Global de 66,96% e Kappa de 0,6205. A comparação entre os mapeamentos (tradicional e digital) podem ser observados na Figura 39, e na matriz de confusão na Tabela 10.



Obs.: Cores fora dos padrões estabelecidos com a finalidade de diferenciar as classes de solos até o quarto nível categórico

Figura 39 – Comparação entre Mapeamento Tradicional e Mapeamento Digital de Solos

Fonte: Org. do autor (2019)

Tabela 10 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital da microbacia do Ribeirão Anhumas

	PVAdt	PVAea	LA	LVAet	LVdt	PVda	GX	PVet	PVAda	CX	LVAdt	Acurácia do Usuário (%)	
PVAdt	365	18	15	20	24	0	51	11	9	0	1		71,01
PVAea	20	795	51	4	0	79	68	28	10	24	3		73,48
LA	20	36	231	4	4	0	0	110	35	1	7		51,56
LVAet	76	12	2	69	26	0	8	15	3	0	0		32,70
LVdt	26	0	0	15	107	5	14	11	3	0	6		57,22
PVda	0	49	0	0	0	407	12	0	0	0	0		86,97
GX	34	78	0	3	21	15	468	0	1	0	1		75,36
PVet	3	25	90	5	9	0	0	414	2	8	1		74,33
PVAda	106	15	59	0	1	0	5	0	50	0	1		21,10
CX	0	50	6	0	0	0	0	5	0	226	0		78,75
LVAdt	1	4	7	0	17	0	35	10	1	0	19		20,21
Acurácia do Produtor (%)													
	56,07	73,48	50,11	57,50	51,20	80,43	70,80	68,54	43,86	87,26	48,72		
Índice Kappa							0,6205						
Acurácia Global							66,96 %						

Obs: PVAdt - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico; PVAea - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupção; LA - LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico; LVAet - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico; LVdt - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; PVda - ARGISSOLO VERMELHO distrófico abrupção; GX - GLEISSOLO HÁPLICO Distrófico típico; PVet - ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico; PVAda - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupção; CX - CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico; LVAdt - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico.

Fonte: Org. do autor (2019)

Os resultados obtidos aproximam-se do encontrado por Coelho e Giasson (2010), Ten Caten et al. (2011) e Costa (2016). No trabalho de Coelho e Giasson (2010) a AG foi de 67,31% e Kappa de 0,3860 com a adoção do algoritmo J48 para avaliar a proximidade do mapa gerado por MDS com o levantamento de solo existente (tradicional) até o quarto nível categórico. No trabalho de Ten Caten et al. (2011), a AG foi de 61,79% e Kappa de 0,4612 para mapeamento de solos até o segundo nível categórico com adoção do mesmo algoritmo.

Processo semelhante foi adotado por Costa (2016) com a aplicação do algoritmo J48 para especializar o solo de para a microbacia Córrego Tarumãzinho no estado de Santa Catarina. O autor obteve acurácia global de 65,90% e Kappa de 0,57. Ao comparar diferentes métodos preditivos de solos, o autor ressaltou que o algoritmo J48 forneceu melhores resultados quando comparados com os métodos *Simple Chart* e *BFTree*.

O erro dos modelos na predição da classe de solo tende a ocorrer entre classes próximas na paisagem (TEN CATEN et al., 2011). O mapeamento digital tem por finalidade agrupar as informações de superfície fornecidas durante a fase de aprendizado de máquina, gerando um modelo de classificação, no entanto, as classes que ocupam pequena extensão territorial, ou mesmo, classes de solos que ocupam regiões com características fisiográficas semelhantes, são mais difíceis de serem agrupadas podendo causar confusão durante a etapa de geração da árvore

de decisão. Foi o que aconteceu com as classes dos PVAdt e PVAda que apresentaram os maiores valores de confusão. São classes localizadas lado a lado em áreas fisiográficas semelhantes.

Os vales fluviais são ocupados pela classe dos GX (Gleissolos Háplicos), diferindo muito das características da paisagem das demais classes de solos, sendo, desta forma, facilmente identificada pelo algoritmo. No entanto, a maior acurácia do produtor foi identificada na classe dos CX (Cambissolos Háplicos) com 87,26 %, indicando erro de omissão de 12,74%, seguido pela classe dos Gleissolos com acurácia do produtor de 70,80%.

As classes dos PVAda e LVAdt apresentaram acurácias do produtor mais baixas, com valores inferiores a 50%, indicando maior erro de omissão, tal fato pode ser associado a presença de ambas classes em paisagem semelhantes, com relevo ondulado e com predominância de perfil convexo. As mesmas classes apresentaram Acurácia do Usuário baixas, com valores de 21,10% e 20,21%, respectivamente, indicando a dificuldade do algoritmo em diferenciar as classes.

Vale ressaltar que há um erro embutido no Mapeamento Tradicional dos Solos. A acurácia adota o mapa tradicional como referência, no entanto, nele foram impostas as impressões e conhecimentos do pedólogo, podendo também apresentar erro de classificação. Isto indica que algumas áreas mapeadas no MDS podem estar mais corretas que o mapeamento tradicional, mesmo que a acurácia da classe tenha sido inferior ao esperado.

De maneira geral, o MDS identificou a presença dos Latossolos Amarelos localizados nas áreas mais altas e aplainadas; os Argissolos Vermelho-amarelos e Cambissolos nas encostas com maior declividade; os Latossolos Vermelho-amarelos e Argissolos Vermelhos nas encostas mais suaves e, nas várzeas, os Gleissolos.

Os Cambissolos, antes localizados numa posição restrita da microbacia, apresentam no MDS uma distribuição ao longo do vale fluvial, principalmente em relevo forte ondulado e perfil côncavo. O mesmo delineamento ocorre com a classe dos *Argissolos Vermelhos eutróficos típicos*, que passam a margear os Cambissolos, sendo melhor distribuído ao longo da microbacia.

Visualmente, o resultado gerado aproxima-se do levantamento tradicional de solos além de ter como vantagem um mapeamento com ausência de mudanças rígidas e abruptas entre as classes de solos.

Ao mensurar a área ocupada por cada classe de solo de ambos mapeamentos, como mostra a Tabela 11, foi possível observar que as classes dos CX, GX, LA, LVdt e PVAdt obtiveram um aumento de área. O valor mais expressivo foi a classe dos CX, com aumento de 3,01%. As

demais classes indicaram retração em área, principalmente os PVet, com redução de 2,72%, passando a ocupar 2,57% do território com MDS.

Tabela 11 – Quantificação das áreas das classes de solos dos diferentes mapeamentos

Classes de Solos	Mapeamento Tradicional		Mapeamento Digital	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
CX	281,72	11,36	356,02	14,38
GX	249,76	10,07	259,04	10,46
LA	160,04	6,46	164,88	6,66
LVAdt	100,60	4,06	66,89	2,70
LVAet	93,03	3,75	83,66	3,38
LVdt	326,68	13,18	356,04	14,38
PVAda	232,50	9,38	195,63	7,90
PVAdt	302,57	12,20	349,11	14,10
PVAea	55,19	2,23	27,00	1,09
PVda	545,76	22,01	554,04	22,38
PVet	131,27	5,29	63,72	2,57

Obs: PVAdt - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico; PVAea - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto; LA - LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico; LVAet - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico; LVdt - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico; PVda - ARGISSOLO VERMELHO distrófico abrupto; GX - GLEISSOLO HÁPLICO Distrófico típico; PVet - ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico; PVAda - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto; CX - CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico; LVAdt - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico.

Fonte: Org. do autor (2019)

As classes de solos encontradas na microbacia do Ribeirão Anhumas concordam com o estudado por Lima (2012) para a microbacia do Ribeirão José Pereira, indicando que ambas regiões podem ser usadas para o Mapeamento Digital dos Solos para o município de Itajubá, sem que haja incremento significativo de erro.

Para adoção das duas microbacias como áreas piloto, o mapeamento realizado para a microbacia do Ribeirão Anhumas passou por adequação sendo então reclassificada até o segundo nível categórico acrescido a informação referente ao relevo, igualando à legenda adotada por Lima (2012). Com a informação padronizada, os mapas se complementaram, como ilustra a Figura 40, permitindo o uso da informação para o MDS aplicado ao município de Itajubá.

A Unidade denominada *Cambissolos Háplicos* inclui o Cambissolo Háplico Ta Eutrófico e o Cambissolo Háplico Tb distrófico latossólico. Ambos horizontes amostrados em campo apresentaram horizonte B_{i1} distrófico, e B_{i2} eutrófico. No entanto, a máxima expressão do horizonte de T1P3 ocorreu em B_{i2} sendo denominado eutrófico, enquanto que em T1P4 o horizonte expressivo foi B_{i1} de característica distrófica. Estas classes de solos estão presentes em encostas erosionais e sob influência de relevo forte ondulado e montanhoso. A localização

dos solos na microbacia do Ribeirão Anhumas concorda com o estudado por Machado et al. (2018) onde Cambissolos localizados nesta região da encosta sofrem processos de perda de solo devido à erosão, possuindo ainda, alta pedregosidade e baixa profundidade efetiva.

Os Argissolos mapeados e inseridos na classe dos *Argissolos Vermelhos de relevo forte ondulado* abrangem os Argissolos Vermelhos Eutróficos, Argissolos Vermelhos Distrófico e Argissolos Vermelhos Distróficos Abrupticos. Esta unidade de mapeamento ocorre predominantemente em declives erosionais e parcialmente em encostas coluviais erosionais.

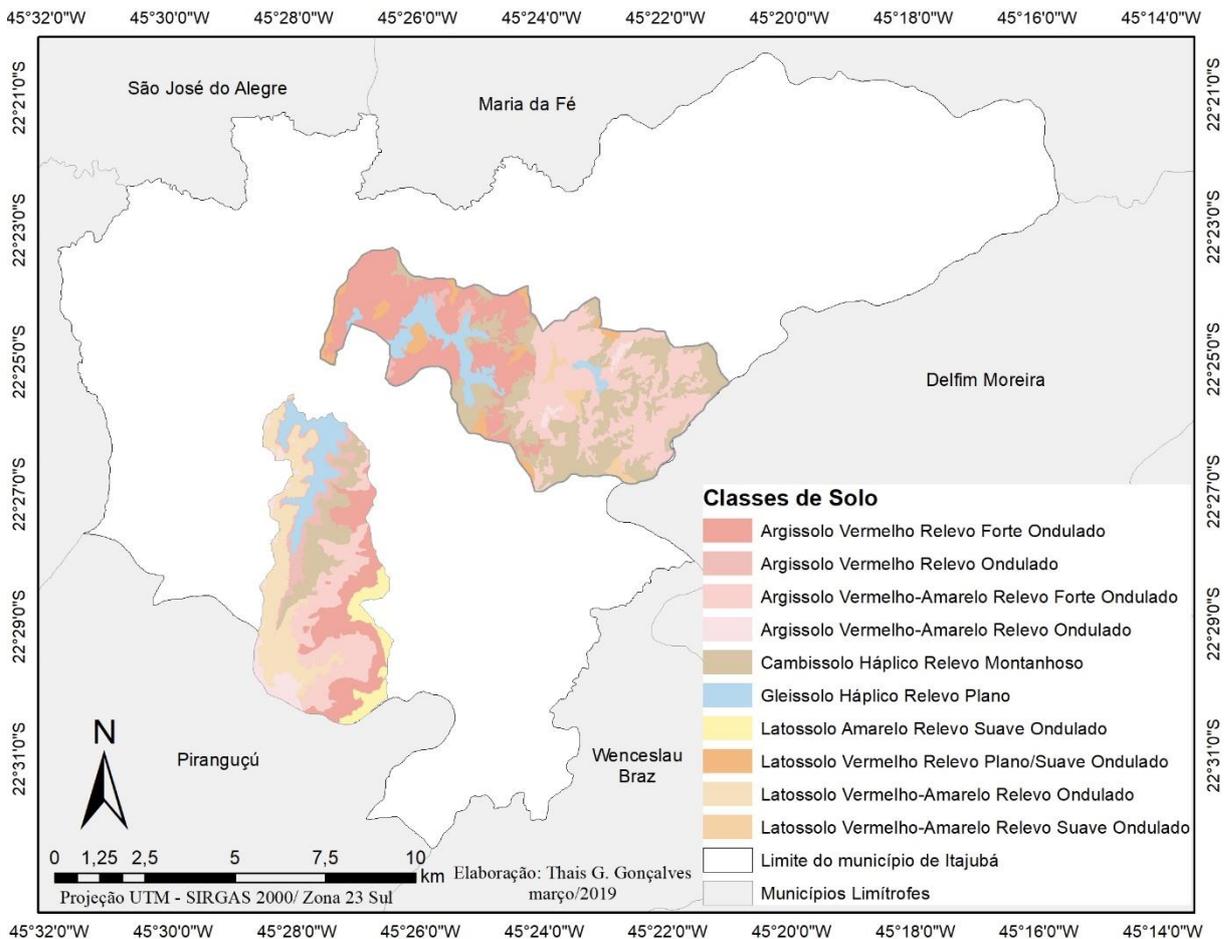


Figura 40 - Classificação dos Solos das microbacias do Ribeirão Anhumas e Ribeirão José Pereira.

Fonte: Org. do autor (2019)

5.4 Espacialização dos Solos para o Município de Itajubá

Os solos encontrados na microbacia do Ribeirão Anhumas também estavam presentes no mapeamento realizado por Lima (2012), indicando que o uso das duas microbacias para treinamento do classificador foi um fator essencial para o ganho de informação e abrangência das características necessárias para extrapolação dos solos para todo o município.

A microbacia do Ribeirão José Pereira, assim como do Ribeirão Anhumas, está inserida em sua totalidade no município de Itajubá e, juntas, representam as características fisiográficas do município. As microbacias compõem uma área de amostragem de 63 km², correspondente a 22% da área total do município.

Inicialmente, acreditou-se que a informação quanto as diferenças litológicas entre as duas microbacias seriam complementares e forneceriam resultados mais completos e mais fidedignos da espacialização dos solos, no entanto, os resultados diferiram do esperado. A Figura 41 (Mapeamento I) ilustra a confusão ocorrida entre as transições litológicas, com mudanças repentinas entre as classes de solos.

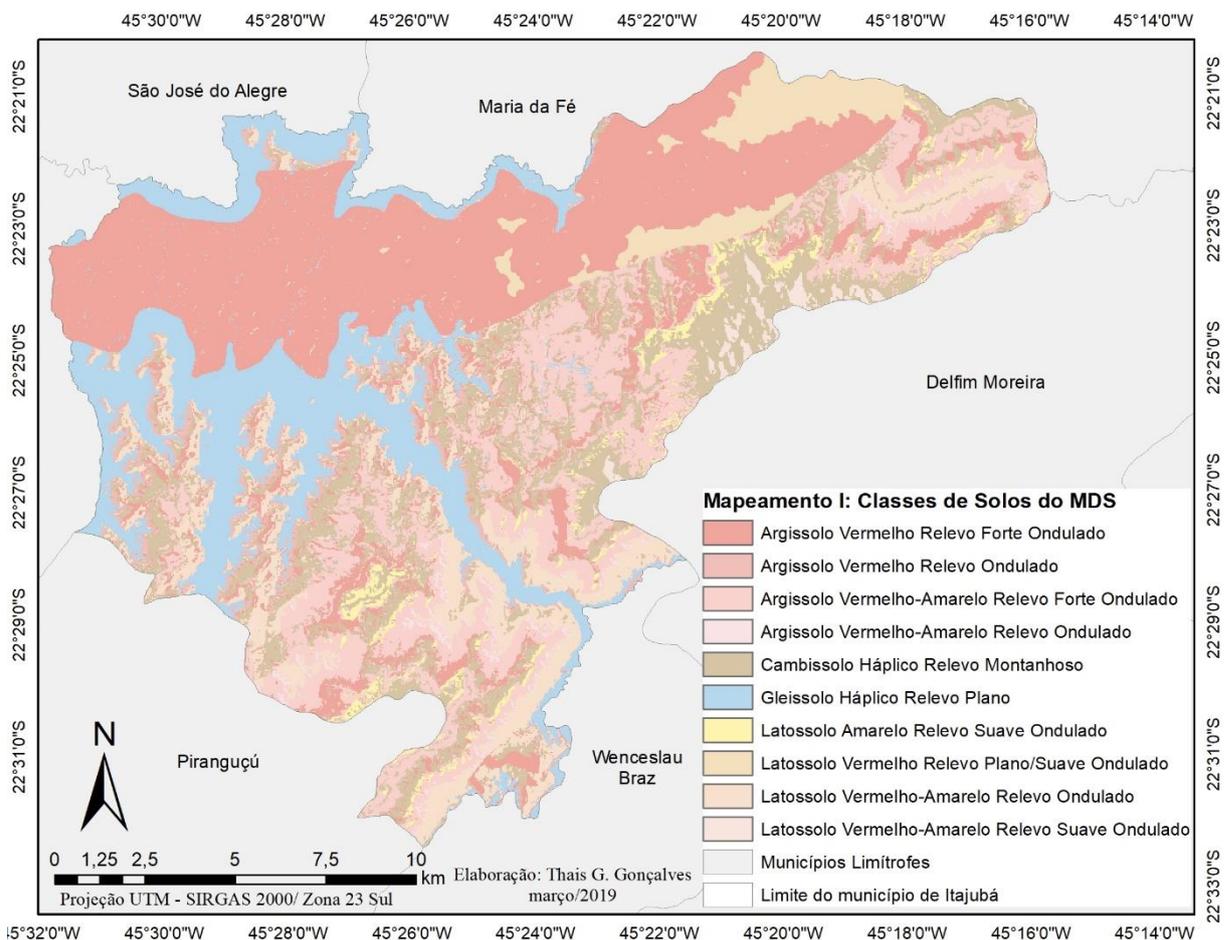


Figura 41 – Mapeamento Digital dos Solos de acordo com o relevo e considerando as Unidades Litológicas

Fonte: Org. do autor (2019)

O processo indicou que a adoção desta informação não foi favorável ao MDS para o município de Itajubá. O fato pode ser associado à pouca representatividade do material de origem no mapeamento tradicional dos solos, tanto para a microbacia do Ribeirão Anhumas, quanto para a microbacia do Ribeirão José Pereira. Para Ten Caten et al. (2011), essa

dificuldade por parte dos modelos pode ter origem no próprio delineamento que serviu de treinamento, uma vez que o solo não tem uma transição abrupta.

Dificuldade semelhante foi relatada por Chagas, Vieira e Fernandes Filho (2013) ao realizar o mapeamento digital a partir de redes neurais artificiais e algoritmo da máxima verossimilhança. Os autores afirmam que dentre as principais causas de erros detectadas na utilização dos classificadores destaca-se a heterogeneidade geológica da área aliada a problemas no mapa geológico.

Outro fator é a escala dos mapas adotados para o estudo. Os dados referentes às Unidades Litológicas foram utilizados com a intenção de correlacionar os solos com seu material de origem, no entanto, assim como destacado por Höfig, Giasson e Vendrame (2014), a pequena escala do mapa geológico usado para gerar o modelo pode não ter sido a mais adequada, o que fez com que as informações geológicas contribuíssem menos do que poderiam para a predição da ocorrência dos tipos de solos.

Neste sentido, foi realizado outro processamento, sem considerar as Unidades Litológicas (Mapeamento II), como mostra a Figura 42. O Mapeamento II apresentou resultados visualmente mais coerentes, com predomínio de Argissolo Vermelho nas regiões de relevo forte ondulado, presença dos Gleissolo no vale fluvial, e transição gradual entre classes de solo ao longo de todo território. Neste processamento as variáveis mais importantes na predição de classes do solo foram altitude e declividade, seguidas por orientação de vertente, direção do fluxo, fluxo acumulado, curvatura horizontal e curvatura vertical.

Naturalmente, os solos não apresentam mudanças rígidas entre classes de solos localizadas lado a lado, e neste sentido, o Mapeamento II vem ilustrar uma distribuição de solos mais homogênea e gradual. Para este segundo Mapeamento a Acurácia Global foi de 50,80%, e Índice Kappa de 0,3790 (Tabela 12). A extrapolação da informação apresentou acurácia mais baixa que o MDS aplicada a microbacia do Ribeirão Anhumas, que apresentou AG de 66,96% e índice Kappa de 0,6205.

Dias et al. (2016) afirmam que extrapolação da informação para áreas maiores reduz a acurácia dos mapas por presumir maior homogeneidade pedológica do que a existente na área de estudo. Processo semelhante foi observado por Bagatini, Giasson e Teske (2018) para extrapolação de dados de solos a partir do método de árvore de decisão utilizando *Simple Cart*, que apresentou redução da AG de 63% para 50%, e, para área complementar, redução de 68% para 54%.

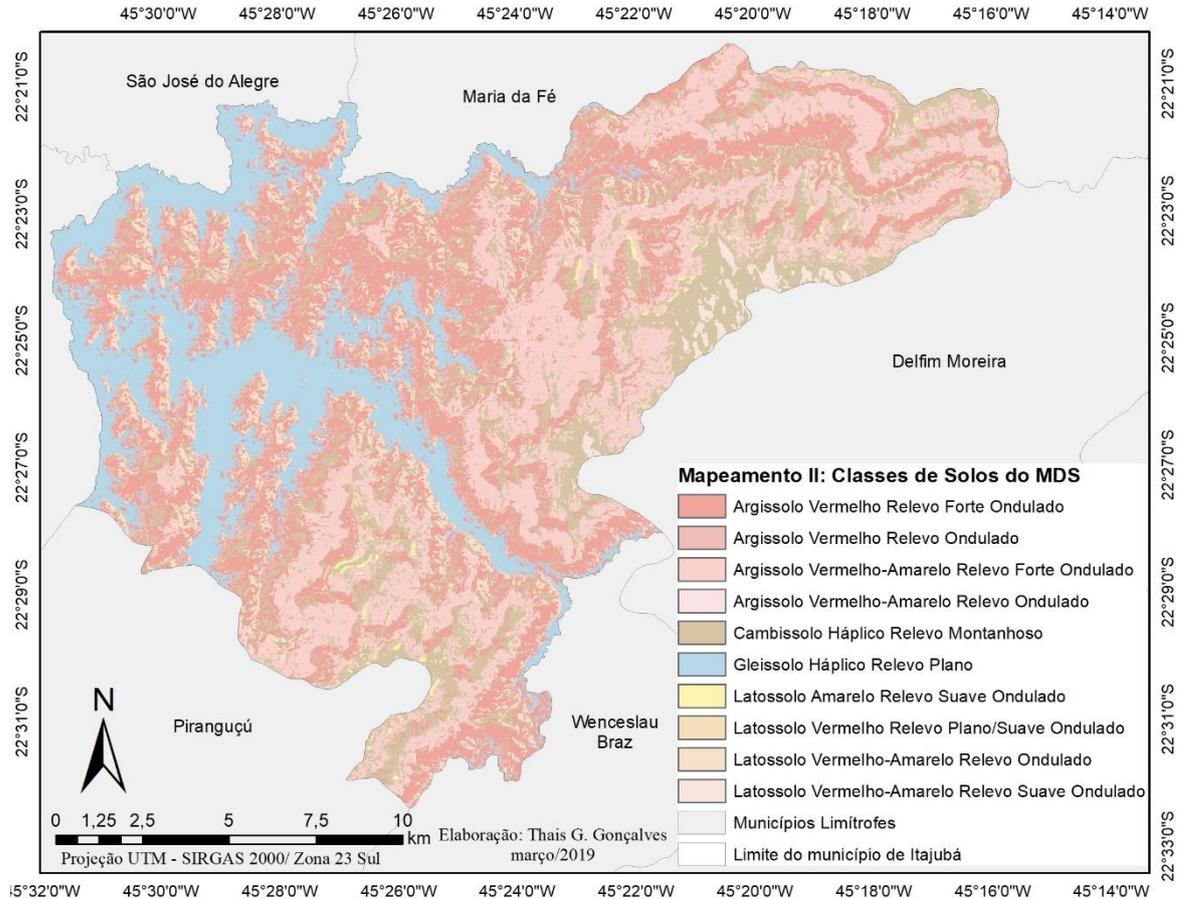


Figura 42 - Mapeamento Digital dos Solos de acordo com o relevo (sem considerar as Unidades Litológicas)

Fonte: Org. do autor (2019)

Tabela 12 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital de Itajubá (Mapeamento II)

	PVA1	LA	LVA1	PVA2	PV1	GX	PV2	CX	LV	LVA2	
PVA1	983	661	820	10	28	15	14	13	91	36	Acurácia do Usuário (%)
LA	399	1617	534	16	175	74	0	8	230	4	
LVA1	325	343	2523	15	4	0	4	16	30	31	
PVA2	48	161	75	16	7	7	0	5	47	0	
PV1	14	99	50	2	773	77	0	0	40	0	
GX	19	155	0	0	155	104	0	0	33	0	
PV2	22	12	73	0	0	0	44	1	0	0	
CX	22	50	160	2	0	1	0	19	19	0	
LV	159	430	77	6	40	27	0	1	299	0	
LVA2	111	7	117	0	0	0	0	0	0	52	
Acurácia do Produtor (%)											
	46,76	45,74	56,97	23,88	65,40	34,10	70,97	30,16	37,90	42,28	
Acurácia Global (AG)							50,80				
Índice Kappa							0,3790				

Obs: PVA1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Relevo Ondulado; LA- Latossolo Amarelo Relevo Suave Ondulado; LVA1 - Latossolo Vermelho-Amarelo Relevo Ondulado; PVA2- Argissolo Vermelho-Amarelo Relevo Forte Ondulado; PV1- Argissolo Vermelho Relevo Ondulado; GX - Gleissolo Háplico Relevo Plano; PV2 - Argissolo Vermelho Relevo Forte Ondulado; CX - Cambissolo Háplico Relevo Montanhoso; LV - Latossolo Vermelho Relevo Plano/Suave Ondulado; LVA2 - Latossolo Vermelho-Amarelo Relevo Suave Ondulado.

Fonte: Org. do autor (2019)

Por meio da matriz de confusão foi possível verificar as classes de solo que tiveram mais dificuldade em serem classificadas. Os dados indicam dificuldade do classificador ao segregar as classes dos PVA1, LA e LVA1. A acurácia do Usuário indica menores valores para as classes dos PVA2 e CX, com valores de 4,37% e 6,96%, as mesmas classes com valores baixos de acurácia do produtor, com valores de 23,88% e 34,10%, respectivamente. No geral, as classes foram muito confundidas com PV2, principalmente por ser uma classe com grande extensão territorial e por agrupar diferentes características geomorfométricas que são comuns a outras classes de solos.

A classe dos Cambissolos Háplicos ficou concentrada sobre o material litológico Suíte Bragança Paulista, ocupando área de 18,56%. O mesmo acontece com a Classe dos Gleissolos, localizados no vale fluvial, cuja Unidade Litológica é representada pelo Depósito aluvial, responsável por 17,68%. A classe dos Latossolos Vermelhos-amarelos presente em relevo suave ondulado não são representados sobre a litofÁCIE granulítica basal do Complexo Varginha-Guaxupé no Mapeamento I, em contrapartida, no Mapeamento II a classe é equilibradamente distribuída próxima ao vale fluvial, ocupando todo o município.

Tabela 13 – Quantificação das áreas das Classes de Solos do Mapeamento II

Classes de Solos		Área (ha)	%
PVA1	Argissolo Vermelho-Amarelo Relevo Ondulado	137,93	0,47
LA	Latossolo Amarelo Relevo Suave Ondulado	172,72	0,59
LVA1	Latossolo Vermelho-Amarelo Relevo Ondulado	1950,83	6,62
PVA2	Argissolo Vermelho-Amarelo Relevo Forte Ondulado	6624,52	22,49
PV1	Argissolo Vermelho Relevo Ondulado	822,70	2,79
GX	Gleissolo Háplico Relevo Plano	5208,65	17,68
PV2	Argissolo Vermelho Relevo Forte Ondulado	8688,36	29,49
CX	Cambissolo Háplico Relevo Montanhoso	5467,93	18,56
LV	Latossolo Vermelho Relevo Plano/Suave Ondulado	155,37	0,53
LVA2	Latossolo Vermelho-Amarelo Relevo Suave Ondulado	228,33	0,78

Fonte: Org. do autor (2019)

Como observado, a acurácia do processamento é dependente do bom conjunto de dados para treinamento. E como forma de avaliar a correlação entre a homogeneidade dos dados e a melhora na acurácia dos mapeamentos, foi realizado um novo mapeamento, o Mapeamento III, assumindo como amostra de treinamento a classificação dos solos nas áreas piloto até o segundo nível categórico (Classes e Subclasses de solos).

Ao reduzir a informação sobre a distribuição dos solos a nível de Classes e Subclasse, o modelo conseguiu absorver melhor as particularidades de cada classe de solo, evitando a

confusão entre áreas fisiográficas semelhantes. O mapa com a classificação dos solos até o segundo nível categórico por ser observado na Figura 43, juntamente com a quantificação das áreas presentes na Tabela 14.

O Mapeamento Digital de Solos para o município de Itajubá possui distribuição de solos próxima ao encontrado por Chaves (2016) no mapeamento do município de Carmo de Minas, Minas Gerais, com predominância dos Latossolos em relevo convexo em classes de declividade de até 45%, presença dos Cambissolos individualizados nas faixas de declividade mais acentuadas, acima de 70%, nas porções côncavas profundas das encostas, onde estão se instalando as redes de drenagem. O que difere no município de Itajubá é a presença marcante dos Argissolos, principalmente os Argissolos Vermelhos-Amarelos, distribuídos ao longo de todo território onde o relevo varia de ondulado a forte ondulado, e, a presença do Argissolos Vermelhos margeando o curso d'água, próximo ao Gleissolo Háptico.

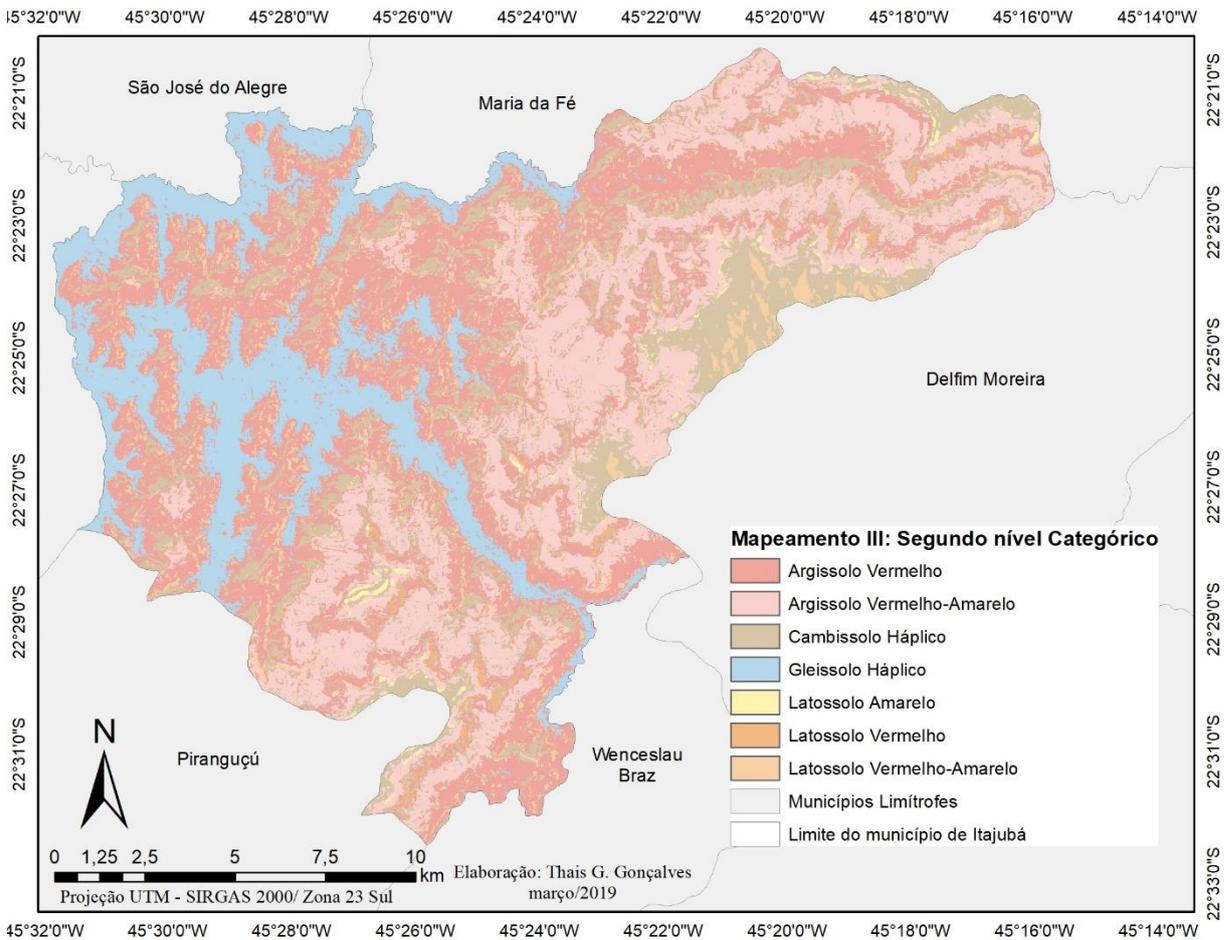


Figura 43 – Mapeamento Digital dos Solos até o segundo nível categórico (Mapeamento III)

Fonte: Org. do autor (2019)

Tabela 14 – Quantificação das áreas das Classes de Solos do Mapeamento III

	Classes de Solos	Área (ha)	%
CX	Cambissolo Háplico	5267.52	17.88
GX	Gleissolo Háplico	4714.21	16.00
LA	Latossolo Amarelo	173.99	0.59
LV	Latossolo Vermelho	289.11	0.98
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo	1323.21	4.49
PV	Argissolo Vermelho	10198.83	34.62
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	7490.70	25.43

Fonte: Org. do autor (2019)

Neste processamento a acurácia global foi de 54,69% e Kappa de 0,4038 (Tabela 15). Os valores de acurácias encontrados por Ten Caten et al. (2011) utilizando regressão logística múltipla, com escala final de trabalho de 1:50.000 e classificação dos solos até o segundo nível categórico demonstraram valores de AG de 39,29% de e Índice Kappa de 0,2106 com a extrapolação de mapas. Valor inferior quando comparado com os resultados de acurácia obtidos ao comparar o MDS da área piloto com o próprio mapeamento tradicional, onde a AG foi de 61,79% e Índice Kappa de 0,4612.

Valores mais elevados de acurácia para classificação dos solos até o segundo nível categórico foram encontrados por Wolski et al. (2017), onde a acurácia do mapa predito para uma área maior utilizando o método de árvore de decisão a partir o algoritmo J48, apresentou AG de 66,1% e Kappa de 0,36 a partir da validação com pontos de observação de campo e escala de trabalho de 1:50.000.

Tabela 15 - Matriz de Confusão do Mapeamento Digital de Itajubá (Mapeamento III – 2º nível categórico)

	CX	GX	LA	LV	LVA	PV	PVA		
CX	1003	640	870	18	23	83	36	Acurácia do Usuário (%)	37,52
GX	406	2129	544	21	222	189	7		60,52
LA	347	360	2759	10	8	56	26		77,37
LV	40	179	87	18	7	36	1		4,89
LVA	6	257	49	0	717	26	0		67,96%
PV	155	582	176	6	21	246	0		20,74
PVA	109	12	116	2	0	0	48		16,72
Acurácia do Produtor (%)									
	48,55	51,19	59,97	24,00	71,84	38,68	40,34		
Acurácia Global						54,69 %			
Índice Kappa						0,4038			

Fonte: Org. do autor (2019)

Como observado, a extrapolação de mapas para áreas fisiográficas semelhantes ainda é um desafio a ser superado. Em contrapartida, a adoção da técnica de mapeamento digital como forma de melhorar mapeamentos tradicionais vem se consolidando nos últimos anos, com valores de acurácia mais elevados e produção de mapas visualmente mais coerentes.

São diversos fatores envolvidos na acurácia dos mapas gerados por MDS, dentre eles a qualidade das variáveis geomorfométricas utilizadas, derivadas do MDE, a densidade amostral, o tamanho da área de estudo e a intensidade do efeito que o fator relevo exerce na gênese dos solos (SARMENTO et al., 2012; DIAS et al., 2016).

Vale ressaltar ainda, que os valores de acurácia obtidos para os mapeamentos do município de Itajubá foram dependentes do levantamento tradicional de solos realizados em duas microbacias distintas, previamente mapeadas por profissionais diferentes. E a diferença de experiências impostas no mapeamento tradicional das microbacias do Ribeirão José Pereira e Ribeirão Anhumas pode ser uma agravante para a ocorrência da confusão entre as classes de solos no mapeamento digital.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu a elaboração do levantamento e mapeamento de solos a microbacia do Ribeirão Anhumas, até então, inexistente em escala apropriada ao estudo local. O levantamento pedológico de solos realizado para a microbacia do Ribeirão Anhumas torna-se uma ferramenta de suma importância para futuros estudos de uso e ocupação da terra e manejo adequado do solo. Os resultados forneceram a levantamento de solo da região, juntamente com o mapa de distribuição dos solos para a microbacia, em escala de 1:25.000.

Com o mapeamento do Ribeirão Anhumas, o município possui até o presente momento, 22% do território mapeado a partir da técnica mapeamento tradicional de solos. Além do mapa de solos, o mapeamento fornece a descrição detalhada dos perfis de solo, incluindo o levantamento das informações morfológicas da paisagem e os parâmetros químicos e físicos de cada perfil amostrado.

O uso método por árvore de decisão a partir da adoção do algoritmo J48 mostrou-se adequado ao estudo de mapeamento digital de solos. A Acurácia Global obtida foi superior a 66%, com índice Kappa de 0,6205. O mapa digital aproxima-se do mapa convencional, demonstrando que a metodologia por árvore de decisão pode ser adotada para melhorar escalas e a distribuição de classes de solos de mapas existentes.

A extrapolação do mapa de solos para todo o município de Itajubá adotando duas áreas piloto abrangeu informações importantes da paisagem do município. As acurácias do mapeamento foram ao encontro com o estudado na literatura, e apresentaram, valores superiores, apesar da confusão entre algumas classes de solos.

A extrapolação de mapas a partir de áreas de referência ainda apresenta acurácias inferiores quando comparados às acurácias obtidas com a otimização de mapeamentos tradicionais. Isto indica que os mapeamentos digitais de solos para o município de Itajubá são complexos, tornando uma tarefa a ser investigada e complementada com trabalhos futuros.

Foi verificado que a variável geomorfológica Unidades Litológicas não foi significativa durante o processo de extrapolação dos dados, causando confusão entre as classes e criando transições abruptas entre classes de solos vizinhas. E, ao realizar o mapeamento sem a variável, obteve-se um mapa contínuo de solos, com classes bem distribuídas em todo território e ausência de transição abruptas entre classes.

A falta do levantamento de solos para o município de Itajubá foi suprida por meio do Mapeamento Digital de Solos. O mapeamento indicou que no território municipal de Itajubá predominam as classes dos Argissolos Vermelhos, característico de relevo forte ondulado, seguido pela classe dos Cambissolos Háplicos em relevo forte ondulado e os Gleissolos Háplicos localizados na área baixa e plana do município, predominantemente no vale fluvial do Rio Sapucaí.

Os resultados demonstram que o Mapeamento Digital de Solos por árvore de decisão, com adoção do algoritmo J48, é uma importante ferramenta potencial para predição e espacialização das classes e atributos dos solos para áreas onde a informação é inexistente. A vantagem do método está associada à redução dos custos com recursos materiais e financeiros inerentes do mapeamento tradicional de solos, redução do tempo para obter a informação e melhor correlação entre solo e paisagem. A aplicação de árvore de decisão neste contexto é atraente por ser um método que adota a mesma lógica de mapeamento, sendo de fácil manipulação e interpretação dos resultados gerados.

Ressalta-se, ainda, a necessidade do levantamento pedológico em campo (mapeamento tradicional) como forma de correlacionar de forma segura a relação existente entre solo e paisagem, além da importância da descrição morfológica do solo e do levantamento de seus atributos físico-químicos. Os métodos de mapeamento, tradicional e digital, são complementares e pesquisas neste sentido devem ser realizadas como alternativas de melhorar a acurácia dos mapas e aumentar o número de áreas mapeadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. Rio de Janeiro, PNUD, IPEA. Fundação João Pinheiro, 2013. Disponível em < http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/o_atlas/o_atlas_/>. Acesso em 04 de abril de 2018.

ARAÚJO, M. A.; PEDROSO, A. V.; AMARAL, D. C.; ZINN, Y. L. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 11-25, 2014.

ARRUDA, G. P.; DEMATTÊ, J. L.; CHAGAS, C. S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 327-338, 2013.

BAGATINI, T.; GIASSON, E.; TESKE, R. Seleção de densidade de amostragem com base em dados de áreas já mapeadas para treinamento de modelos de árvore de decisão no mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p.960-967, 2018.

BAILEY, N.; CLEMENTS, T.; LEE, J. T; THOMPSON S. Modelling soil series data to facilitate targeted habitat restoration: a polytomous logistic regression approach. **Journal of Environmental Management**, v.67, p. 395 – 407, 2003.

BARROS, D. P. Diagnóstico da cobertura vegetal da cidade de Itajubá/MG, utilizando geoprocessamento e proposta de plano de manejo. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

BOISVERT, J. B.; DEUTSCH, C. Programs for kriging and sequential Gaussian simulation with locally varying anisotropy using non-Euclidean distances. *Computers & Geosciences*, v.37, n.4, p.495-510, 2011.

BRAGA, K. A. A. F.; SILVA, F. F.; SCHAFFRATH, V. R. Microbacia do Igarapé do Gigante: unidade de planejamento para a gestão da bacia do Tarumã. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.5, n.1, p. 103-129, jan./abr. 2012.

BRASIL. Código Florestal. Lei 12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2012.

BURROUGH, P. A. Dynamic Modelling and GIS, Chapter 9. *In* Longley, P. S. M; BROOKS, R.; MacDONNEL; MACMILLAN, W. Geocomputation: a primer, 1998

CAMPOS, M. C. C. Relações solo-paisagem: conceitos, evolução e aplicações. **Ambiência**, Guarapuava, v.8, n.3, p. 963 – 982, set./dez. 2012.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D, M. Variação espacial da perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.9, dez, 2008.

CANELLAS, L. P.; BERNER, P. G.; SILVA, S. G.; SILVA, M. B.; SANTOS, G. A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma toposeqüência no estado do Rio de Janeiro. **Revista de Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.1, p. 133-142, 2000.

CARMO, A. M.; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R.; LOPES, P. S.; SABADIA, J. A. B. Avaliação de suscetibilidade à movimentos de massa, utilizando as variáveis morfométricas, para as Serras da porção sul do maciço central do Ceará. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 9, p. 1787-1804, 2016.

CARVALHO, C. C. N.; NUNES, F. C.; ANTUNES, M. A. H. Histórico do levantamento de solos no brasil: da industrialização brasileira à era da informação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 65, n. 5, p. 997-1013, 2013.

CARVALHO, M. B. Mapeamento das suscetibilidades a inundações e movimentos de massa usando SIG no município de Itajubá, MG. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

CHAGAS C. S.; VIEIRA, C. A. O.; FERNANDES FILHO, E. I. Comparison Between Artificial Neural Networks And Maximum Likelihood Classification in Digital Soil Mapping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 339-351, 2013

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; BHERING, S. B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 25, n.1, p. 147-162, 2013.

CHAVES, A. A. A; Distribuição dos solos associados ao cultivo de café de qualidade na Serra da Mantiqueira Mineira. 180 f. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

COELHO, F. F. GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com a utilização de sistemas de informação geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10, p. 2099-2106, 2010.

COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v.20, p. 37–46. 1960.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. CFMSG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação. Viçosa, MG, 1999. 359p.

COSTA, J. J. F. Mapeamento digital de solos com uso de árvores de decisão na microbacia Córrego Tarumãzinho, Águas Frias, SC. 2016. 81f. Dissertação (mestrado) Ciências do Solo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

- COSTA, A. M.; CURI, N.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F.; MARQUES, J.J. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do Horto Florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1272-1279, set./out., 2009.
- COSTA, R. A.; NISHIYAMA, L. Zoneamento ambiental das áreas urbana e de expansão urbana de Caldas Novas (GO): uma contribuição metodológica. **RA'E GA**, Uberlândia, v. 25, p. 343-372, 2012.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa de Unidades Litológicas. Escala 1:25000. Brasília: CPRM, 2014.
- DANIELS, R.B.; HAMMER, R.D. Soil Geomorphology. John Wiley & Sons, Toronto. 1992.
- DIAS, L. M. S.; COELHO, R. M.; VALLADARES, G. S.; ASSIS, A. C. C.; FERREIRA, E. P.; SILVA, R. C. Predição de classes de solo por mineração de dados em área da bacia sedimentar do São Francisco. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1396-1404, set. 2016.
- DUCHAUFOR, P. Handbook of pedology: soils, vegetation and environment. Rotterdam, A.A. Balkema, 1998. 264p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, p.212, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro nacional de pesquisa de solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 590 p.
- ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014
- ESPINDOLA, C. R. Material de origem do solo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 59-70, 2017.
- FEAM - UFV - CETEC - UFLA. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 16 de mar. de 2018.
- FLAUZINO, B. K.; MELLONI, E. G. P.; PONS, N. A. D.; LIMA, O. Mapeamento da Capacidade de Uso da Terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em subbacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 2, p.277-287, 2016.

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, p.262-268, 2006.

GIASSON, E.; SARMENTO E. C.; WEBER, E.; FLORES, C. A.; HASENACK. H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steep lands. **Scientia Agricola**, v.68, n.2, p.167-174, 2011.

GIASSON, E.; HARTEMINK, A. E.; TORNQUIST, C. G.; TESKE, R.; BAGATINI, T. Avaliação de cinco algoritmos de árvores de decisão e três tipos de modelos digitais de elevação para mapeamento digital de solos a nível semidetalhado na Bacia do Lageado Grande, RS, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.11, p. 1967-1973, 2013.

GOULART, J.; TERCI, E. T.; OTERO, E. V. Planos diretores e participação política: políticas públicas de planejamento entre o empresariamento e o estatuto da cidade. **Revista de Administração Pública**, v. 50, n. 3, p. 455-476, 2016.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. Conceitos Básicos da Geoestatística. In: OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. (Org). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o VESPER**. Brasília, Embrapa, 2015.

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

HORBE, A. M. C.; PAIVA, M. R. P.; MOTTA, M. B.; HORBE, M. A. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari – AM. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 81-90, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. COORDENAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS. Manual técnico de pedologia. 2. ed. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2007. 323 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo ... Rio de Janeiro: **IBGE**, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 de maio de 2018.

IPPOLITI-RAMIRO, G.A.; COSTA, L. M; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “mar de morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n.2, p. 269-276, 2005.

ITAJUBÁ. Lei Complementar n. 008 de 30 de dezembro de 2003. Dispõe sobre o Plano Diretor de Desenvolvimento de Itajubá, Itajubá, 2003.

JENNY, H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. New York, McGraw-Hill, p.281,1941.

KÄMFP, N.; CURI, N. Conceito de Solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (ed.). *Pesometria: Fundamentos*, Viçosa, MG, SBCS, 2012. 343 p.

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. eds. *Pedologia: Fundamentos*. Viçosa, SBCS, 2012. 343 p.

KLAMT, E.; BEATTY, M. T. Gênese Duma Sequência de Solos da Região do Planalto Médio Riograndense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Série Agronomia, Brasília, v. 7, p.99-109, 1972.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal South African**, n. 52, p. 119-139, 1951.

LAGACHERIE, P.; VOLTZ, M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference área and digital elevation data: a conditional probability approach. **Geoderma**, v. 97, p.187-208, 2000.

LANDIS, J. R.; KOCH, G.G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v.33, p. 159-174, mar. 1977.

LEGROS, J. P. *Mapping of soil*. Enfield: Science Pub., 2006. 411p.

LEPSCH, I. F. As necessidades de efetuarmos levantamentos pedológicos detalhados no Brasil e de estabelecermos as séries de solos. **Revista Tamoios**, São Gonçalo, v. 09, n.1, p. 03-15, jan./jun. 2013.

LIMA, O. Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG. 2012. 139f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

LIMA, L. A. S. Aplicação dos métodos semi-automático e lógica Fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi. 2013. 142f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LIMA, O. MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P. Antropização da zona de amortecimento da Reserva Biológica da Serra dos Toledos (Itajubá – MG) e seu efeito na qualidade do solo. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 373-381, jul./set. 2013.

LOSS, A. C.; CHAVES, D. A.; BERNINI, T. A.; COUTO, W. H.; DIVINO, L. M.; ANJOS, L. H. C.; FRANCELINO, M. R. Aplicação de modelo digital de elevação para o levantamento de solos da microbacia do Rio Bengala, Cachoeiras de Macacu, RJ, Brasil. **Interciência**, Caracas, v.36, n. 2, p. 121-127, 2011.

MACHADO, L. N.; LOSS, A.; BACIC, I. L. Z.; DORTZBACH, D.; LALANE, H. C. Characterization and mapping of soil classes of the Lajeado Pessegueiro watershed in Santa Catarina, Brazil. *Acta agronomica*, Palmira, v.67, n.2, p. 289-296, 2018.

- MALTAURO, R. F. Aplicação conjunta de modelo de projeção urbana e mapeamento de áreas aptas à urbanização sustentável no município de Itajubá (MG). 2018. 128f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- MANZATTO, H.R.H. Dinâmica da matéria orgânica em solo Glei Pouco Húmico cultivado com arroz inundado no Vale do São João. 1990. 143p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí. 1990.
- MCBRATNEY, A.B., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A., DUNBAR, T.M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, p. 293–327, 2000.
- MEDEIROS, P. S. C.; NASCIMENTO, P. C.; INDA, A. V.; SILVA, D. S. Caracterização e classificação de solos graníticos em topossequência na região sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n. 7, p. 1210-1217, jul. 2013.
- MEIRELES, H. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, G. T. Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 129-136, abr./jun. 2012.
- MILLER, F. P. A scope broader than its identity. **Soil Science**, v. 57, p. 299 - 564, 1993.
- MINASNY; B; McBRATNEY, A. B. Digital Soil Mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma**, v.264, p. 301-311, 2016.
- NEUMANN, M. R. B. Mapeamento Digital de Solos no Distrito Federal. 2012. 123f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- OLIVEIRA, J.B. Pedologia Aplicada. Piracicaba: FEALQ, 3 ed, p.592, 2008.
- PEDRON; F. A.; AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. Alteração mineralógica de Neossolos em uma clima-litossequência no Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 3, p. 451-458, mar., 2012
- PENNOCK, D.J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. **Soil & Tillage Research**, v.69, p.15–26, 2003.
- PINHEIRO, H. S. K.; CHAGAS, C. S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; ANJOS, L. H. C. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1384-1394, 2012.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. Itajubá. Disponível em <<http://www.itajuba.mg.gov.br>>. Acesso em: 20 maio 2018
- QUINLAN, J. R. C4.5: programs for machine learning. Sydney, Australian: Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 302p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: Base para Distinção de Ambientes, 5 ed. Editora: Ufla, 2007, 322p.

RITTER, L. G.; RENZ, V. D.; GARLET, G.; CHAGAS, P.; MANCUSO M. A.; HAAS, A.; CONCEIÇÃO, S. R. Manejo da micro bacia do Lajeado Pardo. **Holos**, Natal, v. 6, n. 31, p. 123-130, 2015.

RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; LACERDA, M. P. C. Espectros VIS-NIR do Solo e Fuzzy K-Médias Aplicados na Delimitação de Unidades de Mapeamento de Solos em Topossequências. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol.39, n.6, p. 1533-1543, 2015.

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

RUIZ, L. F. C.; TEN CATEN, A., DALMOLIN, R. S. D. Árvore de decisão e a densidade mínima de amostras no mapeamento da cobertura da terra. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.6, p.1001-1007, jun., 2014.

SANTOS, G.; BERTOL, I.; MIQUELLUTI, D. J.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. Agrupamento de pedons de Cambissolos húmicos com base em atributos físicos e químicos utilizando a estatística multivariada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol.39, n.2, p.350-360, 2015.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.100, 2005.

SARMENTO, E. C. Comparação entre quatro algoritmos de aprendizagem de máquina no Mapeamento Digital de Solos no Vale dos Vinhedos, RS, Brasil. 2010. 124f. Dissertação (mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2010.

SBG (COMISSÃO ESPECIAL DE NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA). Código brasileiro de nomenclatura estratigráfica guia de nomenclatura estratigráfica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, n. 4, p. 370-415, dez. 1986.

SCHAETZL, R. J. Catenas and Soils. **Treatise on Geomorphology**, v.4, p. 145–158, 2013

SILVA, C. C.; COELHO, R. M.; OLIVEIRA, S. R. M.; ADAMI, S. F. Mapeamento pedológico digital da folha Botucatu (sf-22-z-b-vi-3): treinamento de dados em mapa tradicional e validação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p. 846-857, 2013a.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA; M. G.; Schiavo, J. A.; Cooper, M.; Cavassani, R. S. Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de Carste na Serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.6, p. 1464-1480, 2013b.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO, R. A. M. Estudo de topossequência da Baixada Litorânea Fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p. 965-976, 2001.

SILVA, R. R.; CANDEIAS, A. L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Metodologia para o mapeamento de solos na escala 1:100.000 usando tecnologias da geoinformação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.1, n. 67, p. 3-14, jan./fev., 2015.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. Accuracy assessment: A user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, p. 397-399, 1986.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

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, nov. 2012.

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

TENG, H.; ROSSEL, R. A. V.; SHI, Z.; BEHRENS, T. Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. **Catena**, v. 164, p. 125-134, 2018.

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 Ciências do Solo**, Viçosa, v.39, p.14-20, 2015a.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Produção de um mapa pedológico associando técnicas comuns aos Mapeamentos Digitais de Solos com delineamento manual de unidades de mapeamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 950-959, 2015b.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Classificação das unidades de relevo através de parâmetros geomorfométricos. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n.3, p. 53-66, jul./set., 2016.

UBERTI, A. A.; KLAMT, E. Relações solossuperfícies geomórficas na encosta inferior do nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 8, p.229-234, 1984.

VALERIANO, M.M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p. 997- 1005, 2001.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: Teresa G. Florenzano. (Org.). **Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008, Cap. 3, p. 72-104.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 9).

VINCENT, S.; LEMERCIER, B.; BERTHIER, B.; WALTER, C. Spatial disaggregation of complex Soil Map Units at the regional scale based on soil-landscape relationships. **Geoderma**, Rennes, v.311, p. 130-142, 2018.

WERLANG, M. K.; FACCO, R.; AITA, R. A.; WERLANG, A. P.; Cobertura pedológica em toposequência de vertentes na área experimental do departamento de solos/ campus da Universidade Federal de Santa Maria. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 190-205, dez., 2013.

WITTEN, I. H; FRANK, E. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, Morgan Kaufmann Publishers, 2 ed., 2005. 558p.

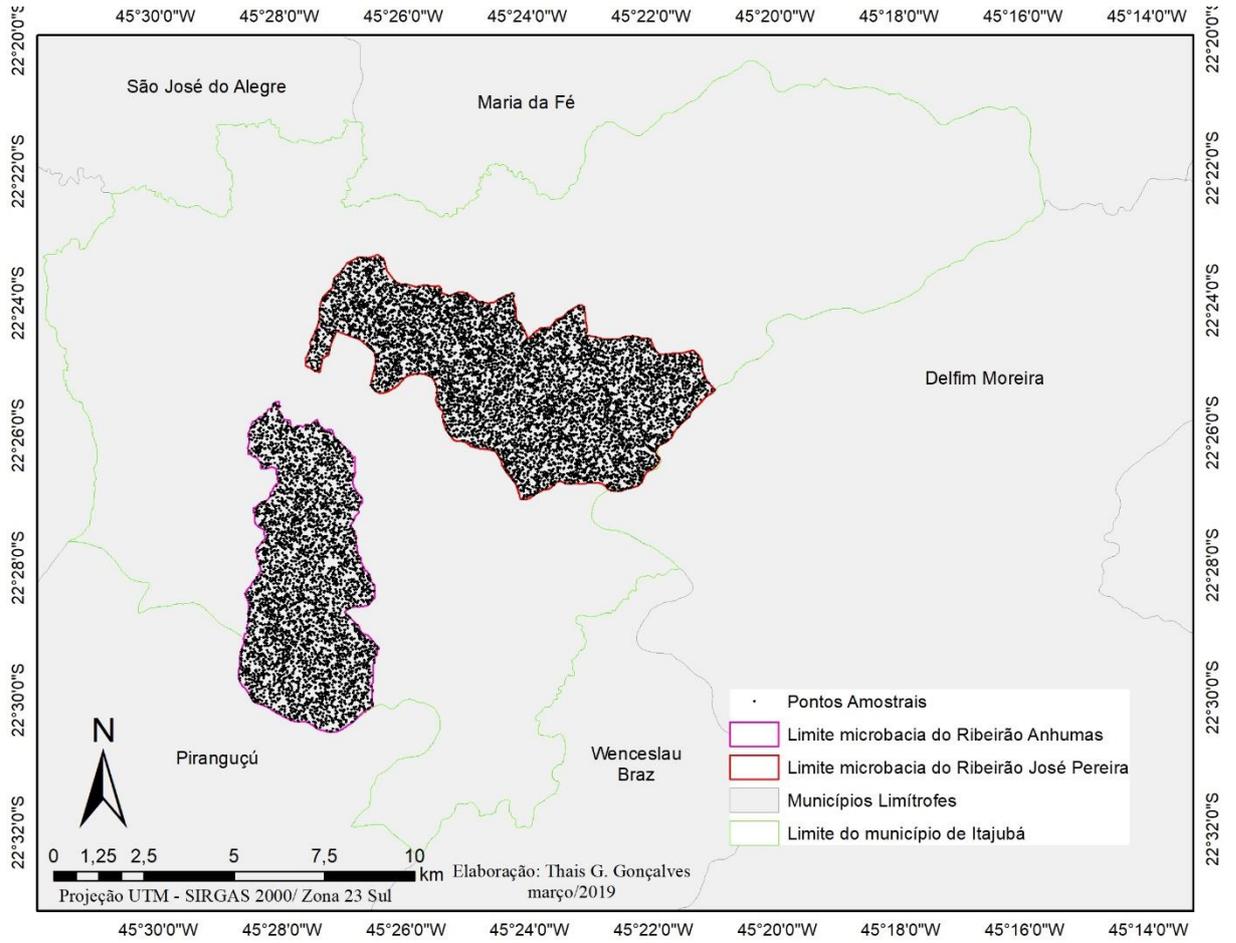
WOLSKI, M. S. DALMOLIN, R. S. D.; FLORES, C. A.; MOURA-BUENO, J. M.; TEN CATEN, A.; KAISER, D. R. Digital soil mapping and its implications in the extrapolation of soil-landscape relationships in detailed scale. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.52, n.8, p. 633-642, ago. 2017.

YOSHIDA, F. A.; STOLF, R. Mapeamento digital de atributos e classes de solos da UFSCar-Araras/SP. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, São Carlos, vol. 3, n. 1, p.1-11, 2016.

ZHANG, G.; LIU, F.; SONG, X. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 12, p. 2871–2885, 2017.

ANEXOS

Pontos amostrais para mapeamento do solo para o município de Itajubá/MG:



Árvore de Decisão para a Microbacia do Ribeirão Anhumas:

=== Run information ===

Schema: weka.classifiers.trees.J48 -R -N 3 -
 Q 1 -M 10
 Relation: Pontos_Anhumas_CSV
 Instances: 4710
 Attributes: 9
 Altitude
 Geologia
 FlowDir
 FlowAcc
 Aspect
 Declividade
 CH
 CV
 Solo
 Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree

```

Altitude <= 1049
| Altitude <= 901
| | Altitude <= 865
| | | Altitude <= 852: g (223.0/25.0)
| | | Altitude > 852
| | | | FlowDir <= 2: e (32.0/18.0)
| | | | FlowDir > 2
| | | | | FlowDir <= 64
| | | | | Aspect <= 212.062
| | | | | Declividade <= 3.031: g
| | | | | (23.0/8.0)
| | | | | Declividade > 3.031: f
| | | | | (31.0/7.0)
| | | | | Aspect > 212.062
| | | | | Aspect <= 340.278: g
| | | | | (71.0/16.0)
| | | | | Aspect > 340.278: f (10.0/6.0)
| | | | | FlowDir > 64
| | | | | Declividade <= 10.765: f
| | | | | (11.0/4.0)
| | | | | Declividade > 10.765: e (12.0/5.0)
| | | | | Altitude > 865
| | | | | Aspect <= 171.327: e (193.0/34.0)
| | | | | Aspect > 171.327
| | | | | FlowDir <= 16
| | | | | Altitude <= 873
| | | | | CV <= 0.363: f (15.0/7.0)
| | | | | CV > 0.363
| | | | | FlowAcc <= 0: g (10.0/2.0)
| | | | | FlowAcc > 0: f (14.0/5.0)
| | | | | Altitude > 873: f (100.0/21.0)
| | | | | FlowDir > 16
| | | | | Altitude <= 878: f (25.0/8.0)
| | | | | Altitude > 878
| | | | | CH <= 0.5: e (26.0/16.0)
| | | | | CH > 0.5: f (23.0/13.0)
| | | | | Altitude > 901
| | | | | Aspect <= 155.695
| | | | | Altitude <= 953
| | | | | CV <= 0.5028: e (102.0/21.0)
| | | | | CV > 0.5028
| | | | | Altitude <= 931: e (33.0/5.0)
| | | | | Altitude > 931: b (22.0/10.0)
| | | | | Altitude > 953
| | | | | Altitude <= 1007: d (85.0/23.0)
| | | | | Altitude > 1007
| | | | | Aspect <= 31.675
| | | | | FlowAcc <= 3: a (10.0/5.0)
| | | | | FlowAcc > 3: i (10.0/4.0)
| | | | | Aspect > 31.675
| | | | | Geologia <= 3: a (16.0/9.0)
| | | | | Geologia > 3: b (14.0/2.0)
| | | | | Aspect > 155.695
| | | | | Geologia <= 3
| | | | | Altitude <= 974: k (22.0/2.0)
| | | | | Altitude > 974
| | | | | Altitude <= 1039
| | | | | CV <= 0.4567
| | | | | Declividade <= 40.673
| | | | | FlowDir <= 8: k (12.0/2.0)
| | | | | FlowDir > 8
| | | | | Altitude <= 1005: d
| | | | | (11.0/2.0)
  
```

```

| | | | | Altitude > 1005
| | | | | CV <= 0.3221: k
| | | | | (11.0/4.0)
| | | | | CV > 0.3221: d
| | | | | (15.0/8.0)
| | | | | Declividade > 40.673: j
| | | | | (14.0/7.0)
| | | | | CV > 0.4567: k (14.0/6.0)
| | | | | Altitude > 1039: k (27.0/15.0)
| | | | | Geologia > 3
| | | | | CV <= 0.5512
| | | | | Altitude <= 966: j (194.0/78.0)
| | | | | Altitude > 966
| | | | | CV <= 0.3511: j (35.0/20.0)
| | | | | CV > 0.3511
| | | | | CH <= 0.5367
| | | | | Aspect <= 317.726: j
| | | | | (116.0/32.0)
| | | | | Aspect > 317.726: h
| | | | | (29.0/15.0)
| | | | | CH > 0.5367: j (31.0/20.0)
| | | | | CV > 0.5512
| | | | | Altitude <= 983: e (43.0/16.0)
| | | | | Altitude > 983: h (17.0/11.0)
| | | | | Altitude > 1049
| | | | | Altitude <= 1227
| | | | | Geologia <= 3
| | | | | Altitude <= 1135
| | | | | Altitude <= 1078: a (109.0/33.0)
| | | | | Altitude > 1078
| | | | | Geologia <= 1: a (20.0)
| | | | | Geologia > 1
| | | | | FlowDir <= 4: a (42.0/2.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | Declividade <= 21.637: a
| | | | | (35.0/4.0)
| | | | | Declividade > 21.637
| | | | | Aspect <= 268.807: a
| | | | | (44.0/11.0)
| | | | | Aspect > 268.807
| | | | | Altitude <= 1104: a
| | | | | (16.0/5.0)
| | | | | Altitude > 1104: i
| | | | | (27.0/5.0)
| | | | | Altitude > 1135
| | | | | Aspect <= 142.853
| | | | | Aspect <= 77.005
| | | | | Altitude <= 1169: a (14.0/7.0)
| | | | | Altitude > 1169: f (21.0/3.0)
| | | | | Aspect > 77.005: c (22.0/8.0)
| | | | | Aspect > 142.853
| | | | | Geologia <= 1: a (38.0/6.0)
| | | | | Geologia > 1
| | | | | FlowDir <= 4: a (18.0/5.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | Altitude <= 1190
| | | | | Declividade <= 25.532: i
| | | | | (25.0/8.0)
| | | | | Declividade > 25.532
| | | | | CV <= 0.4499: a
| | | | | (54.0/24.0)
| | | | | CV > 0.4499: i (30.0/3.0)
| | | | | Altitude > 1190
| | | | | Aspect <= 289.274: a
| | | | | (22.0/8.0)
| | | | | Aspect > 289.274: f
| | | | | (17.0/8.0)
| | | | | Geologia > 3
| | | | | Altitude <= 1073
| | | | | CV <= 0.385: i (12.0)
| | | | | CV > 0.385: j (47.0/27.0)
| | | | | Altitude > 1073
| | | | | FlowDir <= 4: f (42.0/28.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | FlowDir <= 64
| | | | | CH <= 0.5333
| | | | | Declividade <= 47.746
| | | | | Altitude <= 1199
| | | | | CH <= 0.4567: i (21.0/4.0)
| | | | | CH > 0.4567: h (50.0/9.0)
| | | | | Altitude > 1199: f (13.0/7.0)
| | | | | Declividade > 47.746: i
| | | | | (72.0/25.0)
| | | | | CH > 0.5333: i (40.0/19.0)
| | | | | FlowDir > 64: i (10.0/4.0)
| | | | | Altitude > 1227
  
```

```

| | | | | Altitude <= 1359
| | | | | FlowDir <= 2
| | | | | Aspect <= 138.764
| | | | | CH <= 0.5067: c (16.0/5.0)
| | | | | CH > 0.5067: f (10.0/2.0)
| | | | | Aspect > 138.764: f (13.0)
| | | | | FlowDir > 2: f (370.0/25.0)
| | | | | Altitude > 1359: c (168.0/18.0)
  
```

Number of Leaves : 70

Size of the tree : 139

Time taken to build model: 0.03 seconds

=== Stratified cross-validation ===
 === Summary ===

Correctly Classified Instances	3152
66.9214 %	
Incorrectly Classified Instances	1558
33.0786 %	
Kappa statistic	0.6201
Mean absolute error	0.0719
Root mean squared error	0.1975
Relative absolute error	49.3214 %
Root relative squared error	73.1557 %
Total Number of Instances	4710

=== Detailed Accuracy By Class ===

Class	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall
F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	
0,627	0,710	0,068	0,562	0,710
0,735	0,581	0,924	0,571	j
0,735	0,735	0,079	0,735	0,735
0,508	0,656	0,920	0,807	f
0,413	0,516	0,054	0,501	0,516
0,540	0,456	0,912	0,491	i
0,835	0,327	0,012	0,561	0,327
0,730	0,409	0,899	0,417	k
0,713	0,572	0,023	0,512	0,572
0,281	0,521	0,936	0,482	d
0,828	0,870	0,024	0,803	0,870
0,286	0,817	0,982	0,850	g
?	0,754	0,047	0,708	0,754
?	0,688	0,943	0,737	e
?	0,743	0,046	0,685	0,743
?	0,674	0,953	0,753	a
?	0,207	0,014	0,438	0,207
?	0,276	0,904	0,347	h
?	0,787	0,007	0,873	0,787
?	0,818	0,978	0,884	c
?	0,202	0,004	0,487	0,202
?	0,305	0,914	0,260	b
?	0,000	0,000	?	0,000 ?
?	0,484	0,000	0	0,484
?	0,669	0,047	?	0,669
?	?	0,935	0,680	?

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h i j k l <--
classified as
365 18 15 21 24 0 51 11 8 0 1 0 | a =
j
20 75 51 4 0 79 68 28 10 24 3 0 | b =
f
20 36 231 4 4 0 0 110 35 1 7 0 | c =
i
75 12 2 69 26 0 9 15 3 0 0 0 | d = k
25 0 0 16 107 5 14 11 3 0 6 0 | e =
d
0 49 0 0 0 407 12 0 0 0 0 0 | f = g
34 78 0 3 21 15 470 0 1 0 1 0 | g =
e
3 25 90 5 9 0 0 414 2 8 1 0 | h = a
106 15 59 1 1 0 5 0 49 0 1 0 | i = h
0 50 6 0 0 0 0 5 0 226 0 0 | j = c
1 4 7 0 17 0 35 10 1 0 19 0 | k = b
1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 | l = 0
  
```

Árvore de Decisão – Mapeamento II

=== Run information ===

Scheme: weka.classifiers.trees.J48 -R -N 3 -
Q 1 -M 10
Relation: Pontos_Itajuba_CSV-
weka.filters.unsupervised.attribute.Remove-R6
Instances: 12657
Attributes: 8
Altitude
Declividade
cv_norm
ch_norm
Aspect
FlowAcc
FlowDir
Solos
Test mode: 10-fold cross-validation

=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree

```

Altitude <= 974
| Altitude <= 873
| | Altitude <= 859
| | | cv_norm <= 0.3937
| | | | FlowDir <= 16
| | | | | FlowDir <= 2: f (37.0/20.0)
| | | | | FlowDir > 2
| | | | | Altitude <= 858
| | | | | Declividade <= 1.1888: g
| | | | | (11.0/5.0)
| | | | | Declividade > 1.1888: f
| | | | | (66.0/11.0)
| | | | | Altitude > 858: f (42.0/5.0)
| | | | | FlowDir > 16
| | | | | Altitude <= 851: f (39.0/8.0)
| | | | | Altitude > 851
| | | | | Declividade <= 10.7654: g
| | | | | (29.0/20.0)
| | | | | Declividade > 10.7654: e
| | | | | (21.0/6.0)
| | | | | cv_norm > 0.3937: f (245.0/21.0)
| | | | | Altitude > 859
| | | | | Declividade <= 6.6458
| | | | | Altitude <= 868
| | | | | Altitude <= 867
| | | | | cv_norm <= 0.3574: g (14.0/5.0)
| | | | | cv_norm > 0.3574
| | | | | cv_norm <= 0.3936: f
| | | | | (22.0/2.0)
| | | | | cv_norm > 0.3936: g
| | | | | (29.0/18.0)
| | | | | Altitude > 867: f (82.0/29.0)
| | | | | Altitude > 868: f (61.0/39.0)
| | | | | Declividade > 6.6458
| | | | | Aspect <= 157.094
| | | | | FlowDir <= 64
| | | | | Declividade <= 21.4073: g
| | | | | (91.0/46.0)
| | | | | Declividade > 21.4073: c
| | | | | (48.0/20.0)
| | | | | FlowDir > 64: c (28.0/13.0)
| | | | | Aspect > 157.094
| | | | | Aspect <= 330.887
| | | | | ch_norm <= 0.4067: g (14.0/7.0)
| | | | | ch_norm > 0.4067
| | | | | FlowDir <= 4: g (36.0/21.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | FlowDir <= 32
| | | | | Altitude <= 865
| | | | | cv_norm <= 0.3689: g
| | | | | (10.0/3.0)
| | | | | cv_norm > 0.3689: f
| | | | | (15.0/2.0)
| | | | | Altitude > 865
| | | | | FlowDir <= 16
| | | | | Altitude <= 869
| | | | | ch_norm <= 0.5: e
| | | | | (18.0/7.0)
| | | | | ch_norm > 0.5: f
| | | | | (11.0/3.0)
| | | | | Altitude > 869: f
| | | | | (29.0/14.0)
| | | | | FlowDir > 16: f
| | | | | (10.0/4.0)
| | | | | FlowDir > 32: g (14.0/9.0)
| | | | | Aspect > 330.887: e (33.0/24.0)
| | | | | Altitude > 873

```

```

| | Aspect <= 171.193
| | | Aspect <= 86.1859
| | | | cv_norm <= 0.3718
| | | | | Altitude <= 954
| | | | | Altitude <= 925
| | | | | ch_norm <= 0.3233: c
| | | | | (13.0/5.0)
| | | | | ch_norm > 0.3233
| | | | | cv_norm <= 0.3038
| | | | | Declividade <= 18.4652: c
| | | | | (12.0/3.0)
| | | | | Declividade > 18.4652: h
| | | | | (26.0/6.0)
| | | | | cv_norm > 0.3038
| | | | | Declividade <= 25.4422
| | | | | FlowAcc <= 9: g
| | | | | (10.0/3.0)
| | | | | FlowAcc > 9: h
| | | | | (12.0/4.0)
| | | | | Declividade > 25.4422: c
| | | | | (32.0/14.0)
| | | | | Altitude > 925
| | | | | Aspect <= 53.0272
| | | | | Aspect <= 6.5321: g
| | | | | (12.0/3.0)
| | | | | Aspect > 6.5321: h (10.0/4.0)
| | | | | Aspect > 53.0272: c (10.0/6.0)
| | | | | Altitude > 954: c (15.0/9.0)
| | | | | cv_norm > 0.3718
| | | | | Aspect <= 35.4634
| | | | | FlowAcc <= 0: g (31.0/22.0)
| | | | | FlowAcc > 0
| | | | | ch_norm <= 0.4767: g
| | | | | (15.0/7.0)
| | | | | ch_norm > 0.4767
| | | | | cv_norm <= 0.4751: h
| | | | | (23.0/4.0)
| | | | | cv_norm > 0.4751: g
| | | | | (11.0/6.0)
| | | | | Aspect > 35.4634: c (182.0/113.0)
| | | | | Aspect > 86.1859
| | | | | Altitude <= 925
| | | | | Aspect <= 142.352
| | | | | ch_norm <= 0.4533: c (26.0/11.0)
| | | | | ch_norm > 0.4533
| | | | | Aspect <= 125.2
| | | | | Altitude <= 889
| | | | | ch_norm <= 0.5133: g
| | | | | (18.0/7.0)
| | | | | ch_norm > 0.5133: c
| | | | | (15.0/7.0)
| | | | | Altitude > 889
| | | | | cv_norm <= 0.5188: g
| | | | | (66.0/23.0)
| | | | | cv_norm > 0.5188: c
| | | | | (23.0/14.0)
| | | | | Aspect > 125.2
| | | | | ch_norm <= 0.5033: g
| | | | | (41.0/13.0)
| | | | | ch_norm > 0.5033: c
| | | | | (28.0/10.0)
| | | | | Aspect > 142.352: g (76.0/25.0)
| | | | | Altitude > 925: g (191.0/94.0)
| | | | | Aspect > 171.193
| | | | | Altitude <= 911
| | | | | FlowDir <= 16
| | | | | Altitude <= 898
| | | | | cv_norm <= 0.2842: g (13.0/2.0)
| | | | | cv_norm > 0.2842
| | | | | FlowAcc <= 118
| | | | | Aspect <= 232.539
| | | | | ch_norm <= 0.4933: g
| | | | | (30.0/18.0)
| | | | | ch_norm > 0.4933: f
| | | | | (40.0/25.0)
| | | | | Aspect > 232.539
| | | | | ch_norm <= 0.5567: e
| | | | | (126.0/60.0)
| | | | | ch_norm > 0.5567: g
| | | | | (10.0/7.0)
| | | | | FlowAcc > 118: g (10.0/2.0)
| | | | | Altitude > 898
| | | | | Declividade <= 44.1352
| | | | | ch_norm <= 0.4533: g
| | | | | (15.0/4.0)
| | | | | ch_norm > 0.4533
| | | | | FlowDir <= 4: g (15.0/5.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | Aspect <= 268.866

```

```

| | | | | Declividade <= 25.5599:
| | | | | g (12.0/8.0)
| | | | | Declividade > 25.5599: e
| | | | | (23.0/8.0)
| | | | | Aspect > 268.866: g
| | | | | (30.0/18.0)
| | | | | Declividade > 44.1352: e
| | | | | (16.0/9.0)
| | | | | FlowDir > 16
| | | | | cv_norm <= 0.3116
| | | | | FlowDir <= 32: g (11.0/1.0)
| | | | | FlowDir > 32: e (10.0/4.0)
| | | | | cv_norm > 0.3116
| | | | | ch_norm <= 0.46
| | | | | Declividade <= 19.0585: h
| | | | | (17.0/5.0)
| | | | | Declividade > 19.0585: g
| | | | | (13.0/4.0)
| | | | | ch_norm > 0.46
| | | | | Declividade <= 10.5163: c
| | | | | (13.0/7.0)
| | | | | Declividade > 10.5163
| | | | | Aspect <= 335.854: g
| | | | | (63.0/47.0)
| | | | | Aspect > 335.854: h
| | | | | (30.0/19.0)
| | | | | Altitude > 911
| | | | | cv_norm <= 0.492
| | | | | FlowDir <= 8: g (135.0/47.0)
| | | | | FlowDir > 8
| | | | | Altitude <= 936
| | | | | FlowAcc <= 42
| | | | | Altitude <= 915: g
| | | | | (18.0/12.0)
| | | | | Altitude > 915
| | | | | Declividade <= 47.083
| | | | | Aspect <= 310.03
| | | | | Aspect <= 246.541: g
| | | | | (13.0/3.0)
| | | | | Aspect > 246.541
| | | | | FlowDir <= 16
| | | | | Declividade <=
| | | | | 21.3412: g (12.0/2.0)
| | | | | Declividade >
| | | | | 21.3412: h (27.0/12.0)
| | | | | FlowDir > 16: g
| | | | | (14.0/6.0)
| | | | | Aspect > 310.03: h
| | | | | (20.0/2.0)
| | | | | Declividade > 47.083: g
| | | | | (20.0/10.0)
| | | | | FlowAcc > 42: h (10.0/6.0)
| | | | | Altitude > 936
| | | | | ch_norm <= 0.3833: c
| | | | | (12.0/6.0)
| | | | | ch_norm > 0.3833
| | | | | Declividade <= 39.308
| | | | | FlowAcc <= 2
| | | | | FlowDir <= 16: g
| | | | | (17.0/9.0)
| | | | | FlowDir > 16: h
| | | | | (37.0/17.0)
| | | | | FlowAcc > 2: h (54.0/37.0)
| | | | | Declividade > 39.308: h
| | | | | (69.0/27.0)
| | | | | cv_norm > 0.492
| | | | | Altitude <= 964
| | | | | Altitude <= 927
| | | | | cv_norm <= 0.5533: g
| | | | | (19.0/8.0)
| | | | | cv_norm > 0.5533: c
| | | | | (20.0/11.0)
| | | | | Altitude > 927: g (92.0/42.0)
| | | | | Altitude > 964: g (28.0/17.0)
| | | | | Altitude > 974
| | | | | Altitude <= 1354
| | | | | Altitude <= 1078
| | | | | Altitude <= 1027
| | | | | Declividade <= 13.5548
| | | | | cv_norm <= 0.3094: c (24.0/11.0)
| | | | | cv_norm > 0.3094
| | | | | Altitude <= 1006: g (25.0/15.0)
| | | | | Altitude > 1006: d (24.0/6.0)
| | | | | Declividade > 13.5548
| | | | | FlowDir <= 4
| | | | | Declividade <= 58.9942
| | | | | cv_norm <= 0.2762: c
| | | | | (15.0/8.0)
| | | | | cv_norm > 0.2762
| | | | | cv_norm <= 0.62

```

Altitude <= 1012: g
 (110.0/51.0) Altitude > 1012
 Altitude <= 1017: h
 (12.0/5.0) Altitude > 1017
 Aspect <= 120.097: d
 (10.0/4.0) Aspect > 120.097: g
 (10.0/4.0) cv_norm > 0.62: h (14.0/9.0)
 Declividade > 58.9942: g
 (24.0/14.0) FlowDir > 4
 Aspect <= 77.9885
 cv_norm <= 0.3204: c
 (13.0/3.0) cv_norm > 0.3204: h
 (51.0/23.0) Aspect > 77.9885
 ch_norm <= 0.5933
 Altitude <= 988
 FlowDir <= 8: g
 (31.0/12.0) FlowDir > 8
 ch_norm <= 0.51
 cv_norm <= 0.4677
 Aspect <= 331.227:
 g (41.0/24.0) Aspect > 331.227: h
 (10.0/3.0) cv_norm > 0.4677: g
 (11.0/5.0) ch_norm > 0.51: g
 (25.0/12.0) Altitude > 988
 Declividade <= 29.7743
 Altitude <= 1013: h
 (55.0/39.0) Altitude > 1013: d
 (33.0/17.0) Declividade > 29.7743
 Altitude <= 1008
 ch_norm <= 0.5233
 FlowDir <= 8: g
 (11.0/3.0) FlowDir > 8
 Altitude <= 994:
 h (11.0/6.0) Altitude > 994: g
 (44.0/26.0) ch_norm > 0.5233: h
 (24.0/11.0) Altitude > 1008: g
 (103.0/62.0) ch_norm > 0.5933: g (16.0/2.0)
 Altitude > 1027
 Declividade <= 41.0621
 cv_norm <= 0.4927
 Declividade <= 7.3525
 FlowDir <= 4
 Altitude <= 1044
 Declividade <= 0
 ch_norm <= 0.4733: j
 (10.0/5.0) ch_norm > 0.4733: d
 (11.0/3.0) Declividade > 0: d
 (10.0/3.0) Altitude > 1044: d (13.0)
 FlowDir > 4: d (57.0/18.0)
 Declividade > 7.3525
 Aspect <= 222.614
 FlowAcc <= 66
 ch_norm <= 0.4633: d
 (44.0/21.0) ch_norm > 0.4633
 ch_norm <= 0.55: d
 (137.0/32.0) ch_norm > 0.55: h
 (10.0/7.0) FlowAcc > 66: d (17.0/2.0)
 Aspect > 222.614: d
 (242.0/118.0) cv_norm > 0.4927
 cv_norm <= 0.661
 Aspect <= 95.7106: i
 (18.0/11.0) Aspect > 95.7106
 cv_norm <= 0.5137: g
 (16.0/11.0) cv_norm > 0.5137
 FlowDir <= 16

Declividade <= 19.8397:
 d (16.0/5.0) Declividade > 19.8397
 cv_norm <= 0.5505: d
 (13.0/6.0) cv_norm > 0.5505: g
 (21.0/11.0) FlowDir > 16: d
 (16.0/10.0) cv_norm > 0.661
 Altitude <= 1051: g (11.0/6.0)
 Altitude > 1051: h (10.0/6.0)
 Declividade > 41.0621
 Aspect <= 124.695
 Declividade <= 47.5125: h
 (13.0/9.0) Declividade > 47.5125
 Altitude <= 1060: a (30.0/11.0)
 Altitude > 1060: d (10.0/3.0)
 Aspect > 124.695
 ch_norm <= 0.5533
 Altitude <= 1058: g
 (108.0/60.0) Altitude > 1058
 Aspect <= 298.54
 Aspect <= 244.29
 cv_norm <= 0.408: d
 (11.0/4.0) cv_norm > 0.408: g
 (24.0/13.0) Aspect > 244.29
 Aspect <= 283.496: c
 (19.0/10.0) Aspect > 283.496: h
 (10.0/5.0) Aspect > 298.54: d
 (32.0/18.0) ch_norm > 0.5533: h (14.0/4.0)
 Altitude > 1078
 Altitude <= 1190
 Aspect <= 135.666
 Altitude <= 1138
 cv_norm <= 0.4198
 FlowAcc <= 29
 FlowAcc <= 9
 FlowDir <= 1: h (13.0/6.0)
 FlowDir > 1
 ch_norm <= 0.4967: h
 (25.0/13.0) ch_norm > 0.4967: d
 (17.0/2.0) FlowAcc > 9: h (13.0/5.0)
 FlowAcc > 29: d (10.0/1.0)
 cv_norm > 0.4198
 ch_norm <= 0.4733: d
 (19.0/13.0) ch_norm > 0.4733
 Declividade <= 49.7964: d
 (72.0/32.0) Declividade > 49.7964
 FlowDir <= 16: i
 (16.0/10.0) FlowDir > 16: d
 (26.0/13.0) Altitude > 1138
 cv_norm <= 0.3308: b (14.0/5.0)
 cv_norm > 0.3308
 cv_norm <= 0.6664
 FlowDir <= 32
 ch_norm <= 0.5033: d
 (26.0/13.0) ch_norm > 0.5033: h
 (19.0/12.0) FlowDir > 32
 Altitude <= 1149: d
 (10.0/6.0) Altitude > 1149
 Altitude <= 1176
 cv_norm <= 0.4024: h
 (11.0/1.0) cv_norm > 0.4024: d
 (10.0/4.0) Altitude > 1176: h
 (14.0/7.0) cv_norm > 0.6664: g (10.0/2.0)
 Aspect > 135.666
 cv_norm <= 0.5441
 Declividade <= 24.738: d
 (168.0/59.0) Declividade > 24.738
 cv_norm <= 0.3015
 Aspect <= 293.356: d
 (11.0/1.0)

Aspect > 293.356
 FlowAcc <= 3: d (11.0/7.0)
 FlowAcc > 3: h (12.0/2.0)
 cv_norm > 0.3015
 Aspect <= 295.866: d
 (373.0/98.0) Aspect > 295.866
 cv_norm <= 0.5009
 FlowDir <= 16: d
 (17.0/6.0) FlowDir > 16
 FlowDir <= 32
 Declividade <= 50.2766
 Altitude <= 1116
 Aspect <= 324.628: h (13.0/5.0)
 Aspect > 324.628: d (10.0/2.0)
 Altitude > 1116:
 d (41.0/12.0) Declividade > 50.2766: d (53.0/28.0)
 FlowDir > 32: d
 (55.0/18.0) cv_norm > 0.5009: d
 (31.0/9.0) cv_norm > 0.5441
 Declividade <= 24.4001: d
 (50.0/16.0) Declividade > 24.4001
 Altitude <= 1116: g (51.0/31.0)
 Altitude > 1116: d (80.0/52.0)
 Altitude > 1190
 FlowDir <= 2: h (134.0/91.0)
 FlowDir > 2
 FlowDir <= 64
 Altitude <= 1222: d (185.0/88.0)
 Altitude > 1222
 ch_norm <= 0.5667
 Altitude <= 1326
 cv_norm <= 0.3485
 Altitude <= 1270: g
 (21.0/10.0) Altitude > 1270: d
 (79.0/42.0) cv_norm > 0.3485
 FlowAcc <= 11
 FlowDir <= 4: g
 (44.0/13.0) FlowDir > 4
 FlowAcc <= 0
 FlowDir <= 16
 FlowDir <= 8
 Aspect <= 231.71: g (16.0/3.0)
 Aspect > 231.71: d (11.0/6.0)
 FlowDir > 8: g
 (26.0/11.0) FlowDir > 16: g
 (81.0/24.0) FlowAcc > 0
 ch_norm <= 0.4667
 FlowDir <= 16:
 d (13.0/6.0) FlowDir > 16:
 g (15.0/6.0) ch_norm > 0.4667
 Aspect <= 243.595: g (52.0/25.0)
 Aspect > 243.595
 cv_norm <= 0.5527
 FlowDir <= 16: h (58.0/33.0)
 FlowDir > 16:
 g (62.0/33.0) cv_norm > 0.5527
 Altitude <= 1280: h (12.0/1.0)
 Altitude > 1280: g (10.0/4.0)
 FlowAcc > 11: g
 (70.0/22.0) Altitude > 1326
 Declividade <= 38.9649
 Altitude <= 1336

```

| | | | | cv_norm <= 0.4437: d
(20.0/5.0)
| | | | | cv_norm > 0.4437: g
(10.0/4.0)
| | | | | Altitude > 1336: d
(43.0/11.0)
| | | | | Declividade > 38.9649: g
(73.0/43.0)
| | | | | ch_norm > 0.5667
(17.0/10.0)
| | | | | Aspect <= 228.366: g
(40.0/18.0)
| | | | | Aspect > 228.366: h
(40.0/18.0)
| | | | | FlowDir > 64
| | | | | Declividade <= 62.8201
| | | | | Altitude <= 1312: h (52.0/26.0)
| | | | | Altitude > 1312: d (19.0/6.0)
| | | | | Declividade > 62.8201: i
(22.0/13.0)
| | | | | Altitude > 1354
| | | | | Altitude <= 1563
| | | | | Declividade <= 44.011
| | | | | cv_norm <= 0.5882
| | | | | Altitude <= 1377: d (81.0/26.0)
| | | | | Altitude > 1377
| | | | | ch_norm <= 0.4567
| | | | | Altitude <= 1482: d (71.0/25.0)
| | | | | Altitude > 1482: h (15.0)
| | | | | ch_norm > 0.4567
| | | | | Declividade <= 31.9883: d
(180.0/37.0)
| | | | | Declividade > 31.9883
| | | | | Aspect <= 288.268
| | | | | Altitude <= 1467
| | | | | Altitude <= 1447
| | | | | FlowDir <= 4
| | | | | cv_norm <= 0.4034:
h (10.0/4.0)
| | | | | cv_norm > 0.4034:
d (19.0/7.0)
| | | | | FlowDir > 4: d
(31.0/8.0)
| | | | | Altitude > 1447: d (14.0)
| | | | | Altitude > 1467
| | | | | FlowAcc <= 1: d
(25.0/6.0)
| | | | | FlowAcc > 1
| | | | | Aspect <= 180.864: h
(13.0/3.0)
| | | | | Aspect > 180.864: d
(15.0/5.0)
| | | | | Aspect > 288.268
| | | | | FlowDir <= 32
| | | | | ch_norm <= 0.5167
| | | | | cv_norm <= 0.4424: d
(10.0/6.0)
| | | | | cv_norm > 0.4424: b
(10.0/3.0)
| | | | | ch_norm > 0.5167: h
(23.0/13.0)
| | | | | FlowDir > 32: h (12.0/5.0)
| | | | | cv_norm > 0.5882
| | | | | Altitude <= 1512
| | | | | Altitude <= 1471: d (44.0/23.0)
| | | | | Altitude > 1471: h (26.0/5.0)
| | | | | Altitude > 1512
| | | | | cv_norm <= 0.7318: h (17.0/8.0)
| | | | | cv_norm > 0.7318: b (10.0)
| | | | | Declividade > 44.011
| | | | | cv_norm <= 0.3409: b (20.0/7.0)
| | | | | cv_norm > 0.3409
| | | | | FlowDir <= 64
| | | | | FlowDir <= 8
| | | | | ch_norm <= 0.5533
| | | | | FlowDir <= 2
| | | | | Declividade <= 49.1213: h
(10.0/4.0)
| | | | | Declividade > 49.1213
| | | | | ch_norm <= 0.5133: h
(11.0/3.0)
| | | | | ch_norm > 0.5133: d
(11.0/4.0)
| | | | | FlowDir > 2: d (55.0/23.0)
| | | | | ch_norm > 0.5533: h (10.0/5.0)
| | | | | FlowDir > 8
| | | | | Altitude <= 1465
| | | | | Altitude <= 1401
| | | | | ch_norm <= 0.5367: h
(71.0/40.0)
| | | | | ch_norm > 0.5367: g
(12.0/5.0)
| | | | | Altitude > 1401

```

```

| | | | | cv_norm <= 0.3799: d
(12.0/5.0)
| | | | | cv_norm > 0.3799
| | | | | ch_norm <= 0.52: h
(61.0/28.0)
| | | | | ch_norm > 0.52
| | | | | cv_norm <= 0.5093: d
(12.0/6.0)
| | | | | cv_norm > 0.5093: b
(14.0/4.0)
| | | | | Altitude > 1465: h (90.0/19.0)
| | | | | FlowDir > 64: d (26.0/10.0)
| | | | | Altitude > 1563
| | | | | Aspect <= 146.07
| | | | | Altitude <= 1634: h (17.0/6.0)
| | | | | Altitude > 1634: j (35.0/6.0)
| | | | | Aspect > 146.07: h (102.0/11.0)

```

Number of Leaves : 234
Size of the tree : 467

Time taken to build model: 0.12 seconds

==== Stratified cross-validation ====
==== Summary ====

```

Correctly Classified Instances 6430
50.8019 %
Incorrectly Classified Instances 6227
49.1981 %
Kappa statistic 0.379
Mean absolute error 0.1197
Root mean squared error 0.2541
Relative absolute error 73.6321 %
Root relative squared error 89.1308 %
Total Number of Instances 12657

```

==== Detailed Accuracy By Class ====

F-Measure	MCC	ROC Area	Precision	Recall	Class
0.412	0.281	0.734	0.451	0.368	h
0.491	0.314	0.755	0.469	0.529	g
0.654	0.518	0.858	0.612	0.767	d
0.074	0.091	0.763	0.109	0.044	i
0.691	0.663	0.952	0.732	0.733	f
0.270	0.254	0.902	0.269	0.223	e
0.411	0.449	0.911	0.362	0.289	j
0.113	0.136	0.814	0.128	0.070	a
0.327	0.279	0.856	0.316	0.288	c
0.254	0.266	0.918	0.313	0.181	b
0.485	0.374	0.815	0.482	0.508	Weighted Avg.

==== Confusion Matrix ====

```

a b c d e f g h i j <-
classified as
983 661 820 10 28 15 14 13 91 36 |
a = h
399 1617 534 16 175 74 0 8 230 4 |
b = g
325 343 2523 15 4 0 4 16 30 31 |
c = d
48 161 75 16 7 7 0 5 47 0 | d =
i
14 99 50 2 773 77 0 0 40 0 | e =
f
19 155 0 0 155 104 0 0 33 0 | f =
e
22 12 73 0 0 0 44 1 0 0 | g = j
22 50 160 2 0 1 0 19 19 0 | h =
a
159 430 77 6 40 27 0 1 299 0 | i
= c
111 7 117 0 0 0 0 0 0 52 | j = b

```



```

| | | | | Declividade <=
70.7981: a (38.0/16.0)
| | | | | Declividade >
70.7981: f (10.0/2.0)
| | | | | FlowAcc > 4: a
(12.0/1.0)
| | | | | FlowAcc <= 8: f (14.0/4.0)
| | | | | FlowDir > 32
| | | | | Aspect <= 342.255: g
(12.0/5.0)
| | | | | Aspect > 342.255: f
(10.0/6.0)
| | | | | FlowDir > 64
| | | | | Declividade <= 32.3671
| | | | | FlowAcc <= 0: a (19.0/4.0)
| | | | | FlowAcc > 0: g (12.0/4.0)
| | | | | Declividade > 32.3671
| | | | | Altitude <= 1309: f (40.0/21.0)
| | | | | Altitude > 1309
| | | | | Declividade <= 53.2858: g
(15.0/6.0)
| | | | | Declividade > 53.2858: d
(11.0/4.0)
| | | | | Altitude > 1362
| | | | | Altitude <= 1564
| | | | | cv_norm <= 0.6928
| | | | | Declividade <= 45.9358
| | | | | Altitude <= 1473: g (440.0/143.0)
| | | | | Altitude > 1473
| | | | | FlowAcc <= 27
| | | | | cv_norm <= 0.5588
| | | | | Aspect <= 309.094
| | | | | ch_norm <= 0.4867: a
(32.0/13.0)
| | | | | ch_norm > 0.4867: g
(63.0/16.0)
| | | | | Aspect > 309.094: a
(22.0/12.0)
| | | | | cv_norm > 0.5588: a (34.0/9.0)
| | | | | FlowAcc > 27: a (12.0)
| | | | | Declividade > 45.9358
| | | | | Altitude <= 1459
| | | | | Altitude <= 1402
| | | | | FlowDir <= 32
| | | | | Aspect <= 310.365
| | | | | FlowDir <= 4: g (18.0/8.0)
| | | | | FlowDir > 4
| | | | | Declividade <= 50.8913:
g (13.0/4.0)
| | | | | Declividade > 50.8913
| | | | | Altitude <= 1382: f
(14.0/3.0)
| | | | | Altitude > 1382: a
(11.0/7.0)
| | | | | Aspect > 310.365: a
(15.0/5.0)
| | | | | FlowDir > 32: g (28.0/17.0)
| | | | | Altitude > 1402
| | | | | cv_norm <= 0.3799: c
(17.0/7.0)
| | | | | cv_norm > 0.3799
| | | | | FlowAcc <= 2
| | | | | Aspect <= 195.524: g
(14.0/6.0)
| | | | | Aspect > 195.524
| | | | | FlowDir <= 16: c
(24.0/14.0)
| | | | | FlowDir > 16: a
(22.0/14.0)
| | | | | FlowAcc > 2
| | | | | Declividade <= 60.5548
| | | | | Aspect <= 265.347: g
(10.0/6.0)
| | | | | Aspect > 265.347: a
(11.0/6.0)
| | | | | Declividade > 60.5548: a
(20.0/6.0)
| | | | | Altitude > 1459: a (135.0/42.0)
| | | | | cv_norm > 0.6928
| | | | | cv_norm <= 0.791
| | | | | ch_norm <= 0.5767: c (21.0/9.0)
| | | | | ch_norm > 0.5767: g (10.0/5.0)
| | | | | cv_norm > 0.791: c (12.0/1.0)
| | | | | Altitude > 1564
| | | | | Aspect <= 147.724
| | | | | Altitude <= 1633: a (17.0/7.0)
| | | | | Altitude > 1633: e (32.0/3.0)
| | | | | Aspect > 147.724: a (108.0/15.0)

```

Number of Leaves : 219
 Size of the tree : 437

Time taken to build model: 0.13 seconds

=== Stratified cross-validation ===
 === Summary ===

```

Correctly Classified Instances 6920
54.6733 %
Incorrectly Classified Instances 5737
45.3267 %
Kappa statistic 0.4036
Mean absolute error 0.1401
Root mean squared error 0.2755
Relative absolute error 71.6613 %
Root relative squared error 88.1358 %
Total Number of Instances 12657

```

=== Detailed Accuracy By Class ===

	TP Rate	FP Rate	Precision	Recall
F-Measure	MCC	ROC Area	PRC Area	
Class				
a	0,375	0,107	0,485	0,375
b	0,297	0,734	0,449	0,605
c	0,605	0,222	0,512	0,605
d	0,555	0,365	0,770	0,534
e	0,774	0,203	0,600	0,774
f	0,676	0,534	0,860	0,647
g	0,049	0,005	0,240	0,049
h	0,081	0,097	0,762	0,108
	0,680	0,024	0,718	0,680
	0,698	0,672	0,949	0,714
	0,207	0,034	0,386	0,207
	0,270	0,231	0,830	0,325
	0,000	0,000	?	0,000
	?	0,496	0,000	0
	0,167	0,006	0,403	0,167
	0,236	0,249	0,903	0,280
Weighted Avg.	0,547	0,147	?	0,547
	?	?	0,811	0,525

=== Confusion Matrix ===

```

a b c d e f g h <-- classified as
1003 640 870 18 23 83 0 36 | a = a
406 2129 544 21 222 189 0 7 | b = f
347 360 2759 10 8 56 0 26 | c = g
40 179 87 18 7 36 0 1 | d = d
6 257 49 0 717 26 0 0 | e = b
155 582 176 6 21 246 0 0 | f = e
1 1 0 0 0 1 0 1 | g = 0
109 12 116 2 0 0 0 48 | h = c

```