

LIGIA FARIA TAVARES DE SOUZA

**MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS EM ÁREA DE CONTATOS
GEOLÓGICOS NO ALTO PARANAÍBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729m
2017 Souza, Ligia Faria Tavares de, 1991-
Modelagem de processos erosivos em área de contatos
geológicos no Alto Paranaíba / Ligia Faria Tavares de Souza. –
Viçosa, MG, 2017.
ix, 133f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Liovando Marciano da Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Erosão - Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG :
Mesorregião). 2. Solo - Uso. 3. Voçorocas. 4. Sensoriamento
remoto. 5. Mineração de dados (Computação). I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de
Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22 ed. 631.458151


LIGIA FARIA TAVARES DE SOUZA

**MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS EM ÁREA DE CONTATOS
GEOLÓGICOS NO ALTO PARANAÍBA**

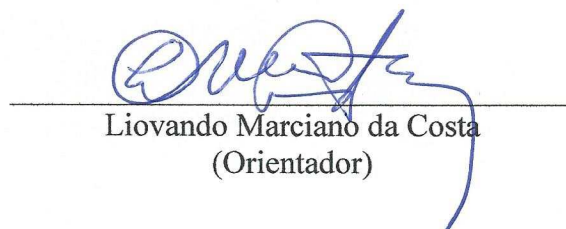
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2017.


Márcio Rocha Francelino


Fábio Soares de Oliveira


Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Coorientador)


Liovando Marciano da Costa
(Orientador)

“Mãe, são três letras apenas as deste nome bendito,
Também o céu tem três letras e nelas cabe o infinito.”

Mario Quintana

À minha mãe, que fez seus os meus sonhos,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria das Graças, pela força e por sempre ter sido o melhor exemplo para mim, e por toda a luta para realizar os meus sonhos. Ao meu pai, Nelson, *in memoriam*, pelo amor e carinho em vida.

Ao meu namorado, Leonardo, por ser meu apoio nas horas difíceis, conselheiro e confiante, por todo o amor e toda a confiança sempre. Agradeço também à toda sua família por terem me acolhido tão carinhosamente.

À minha irmã, Paula, e à minha prima, Laura, quase outra irmã.

À Universidade Federal de Viçosa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela oportunidade de estudo todos esses anos e pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao meu co-orientador, professor Elpídio, por ter aberto as portas do Departamento de Solos para mim ainda na graduação, por todos os conselhos e ensinamentos, e pela acolhida no Laboratório de Geoprocessamento.

Ao meu orientador, professor Liovando, pela orientação, pela amizade, pela paciência e pela confiança no meu trabalho.

Aos amigos que acompanharam de perto a execução dessa dissertação, Gabriela Coelho, Daniel Borel, Paula Maron, Nathalie Sena e Leiliane Bozzi. Aos amigos da Geografia, das repúblicas, da Economia e do Departamento de Solos, essenciais para finalizar essa etapa.

Ao Pablo, pelo auxílio durante toda a execução da dissertação, nos trabalhos de campo, nas análises laboratoriais e nas discussões.

Aos laboratoristas do Departamento de Solos, Claudinho, Chico, Jorge, Carlos, Carlinhos e Adriana.

Aos funcionários do Departamento de Solos e da Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, especialmente à Luciana e ao Nayan.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, por todo o conhecimento.

A todos que fizeram do mestrado e da minha vivência em Viçosa uma experiência única, muito obrigada.

“Que nada nos defina. Que nada nos sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância.”

Simone de Beauvoir

BIOGRAFIA

LIGIA FARIA TAVARES DE SOUZA, filha de Maria das Graças Faria Coelho e Nelson Tavares de Souza, nasceu na cidade de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, no dia 11 de setembro de 1991.

Ingressou no curso de Geografia na Universidade Federal de Viçosa no ano de 2009 e fez intercâmbio para a Universidade do Porto no primeiro semestre de 2012. Graduou-se Bacharela em Geografia em março de 2014. Ingressou no Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, do Departamento de Solos da mesma instituição, em março de 2015.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO 1 - ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS DO MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS	5
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. ÁREA DE ESTUDO	7
2.1. Localização e Aspectos Socioeconômicos.....	7
2.2. Geologia	8
2.3. Geomorfologia	12
2.4. Pedologia.....	14
2.5. Clima e Vegetação	16
2.6. Uso e Ocupação do Solo	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Amostragem	17
3.2. Análises Físicas	21
3.3. Análises Químicas.....	22
3.4. Análises Mineralógicas	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Caracterização Física.....	23
4.2. Caracterização Química	29
4.3. Caracterização Mineralógica.....	34
5. CONCLUSÕES	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
CAPÍTULO 2 - SELEÇÃO DE COVARIÁVEIS PELO ALGORITMO RANDOM FOREST PARA CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS	53
RESUMO.....	53
ABSTRACT.....	53
1. INTRODUÇÃO.....	54
2. ÁREA DE ESTUDO	57

3. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
3.1. Base de Dados	59
3.2. Covariáveis Preditivas.....	61
3.3. Amostragem	66
3.4. Classificação da Imagem.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. Seleção de Covariáveis.....	68
4.2. Classificação do Uso e Ocupação	75
5. CONCLUSÕES	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
CAPÍTULO 3 - PREDIÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS ATRAVÉS DA SELEÇÃO DE COVARIÁVEIS PELO ALGORITMO RANDOM FOREST PARA O MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS	93
RESUMO.....	93
ABSTRACT.....	93
1. INTRODUÇÃO.....	94
2. ÁREA DE ESTUDO	97
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	100
3.1. Base de Dados	100
3.2. Covariáveis Preditivas.....	101
3.3. Amostragem	105
3.4. Classificação dos Processos Erosivos	105
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
4.1. Seleção de Covariáveis.....	106
4.2. Predição dos Processos Erosivos.....	119
5. CONCLUSÕES.....	125
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
CONCLUSÕES GERAIS	132

RESUMO

SOUZA, Ligia Faria Tavares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Modelagem de Processos Erosivos em Área de Contatos Geológicos no Alto Paranaíba.** Orientador: Liovando Marciano da Costa. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

O objetivo do estudo foi averiguar a relação da dinâmica erosiva com os aspectos ambientais do município de Lagoa Formosa, com ênfase na geologia. Para tanto, foi necessário mapear o uso e ocupação do solo e a probabilidade de ocorrência de processos erosivos através de técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, além da caracterização dos solos amostrados na região. Para a obtenção dos mapas, foram utilizadas técnicas de mineração de dados através do algoritmo Random Forest para selecionar as covariáveis mais importantes para a classificação do uso e ocupação do solo e para a predição dos processos erosivos. As covariáveis foram obtidas por meio de dados do IBGE, CODEMIG e EMBRAPA, além de imagens Landsat-8 e SRTM, e foram trabalhadas no software R e ArcGIS 10.1. Em campo, foram amostrados seis perfis de solos, com coleta de amostras para cada horizonte. Em laboratório, foram realizadas análises físicas como granulometria, argila dispersa em água, densidade aparente, densidade de partículas, cor dos solos, e estabilidade de agregados via seca e via úmida, além de análises químicas de rotina, metais pesados e carbono orgânico total, e análises mineralógicas da fração argila e da terra fina seca ao ar (TFSA) pelo ataque sulfúrico e pela fluorescência de raios-X. Em Lagoa Formosa, a maior parte do município está ocupada com atividades agropecuárias, sendo que as pastagens influenciam majoritariamente o desenvolvimento de voçorocas e solo exposto, que são os processos erosivos identificados para a região. As análises dos solos mostraram sua relação com o material de origem, sendo mais um indicador da importância da geologia para o desenvolvimento dos solos e dos processos erosivos. A predição dos processos erosivos selecionou a distância dos contatos geológicos, sendo mais uma evidência da sua importância para seu desenvolvimento. As voçorocas da região estão relacionadas ao contato da Formação Lagoa Formosa com as Coberturas Elúvio-Coluvionares principalmente pela diferença textural, que facilita o avanço erosivo em subsuperfície. O solo exposto é resultado da formação de solos rasos sobre as rochas da Formação Lagoa Formosa que estão majoritariamente horizontalizadas, que dificultam a infiltração da água e conseqüentemente a pedogênese. Há apenas a formação de horizonte A de baixa fertilidade natural, que não se mantem em eventos pluviométricos de alta intensidade e/ou contínuos.

ABSTRACT

SOUZA, Ligia Faria Tavares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Modelling of Erosion Processes in Area of Geological Contacts in the Alto Paranaíba.** Advisor: Liovando Marciano da Costa. Co-advisor: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

This study aimed to investigate the relations between the erosive dynamics and the environmental aspects of the Lagoa Formosa county, focusing on the geology. For that matter, the land use and land cover and the probability of erosion processes were mapped using Geoprocessing and Remote Sensing techniques, and samples of soil profiles collected on field were analyzed for its characterization. The maps were obtained through data mining techniques using the Random Forest algorithm to select the most important co-variables to the land use and land cover classification and to the prediction of erosion processes. The co-variables were obtained with IBGE, CODEMIG and EMBRAPA and with Landsat-8 and SRTM imagery that were processed on the R software and ArcGIS 10.1. On field, six soil profiles were described and sampled in each horizon. On the laboratory, physical analysis were made to characterize granulometry, water dispersed clay, bulk density, soil color, and aggregate stability on dry and humid conditions. Routine chemical analyses were made including heavy metals and total organic carbon. The mineralogical analyses were determined through sulfuric attack and x-ray fluorescence to the clay fraction and air dried soil samples (≤ 2 mm). In Lagoa Formosa, the major area of the county is based on farming activities, where pastures influence greatly the development of gullies and exposed soil, these two being the erosion process identified to the area. The soil analyses showed its relation to the parent material, being another indicator of the importance of geology to the development of soils and erosive processes. The prediction of the erosion processes selected the distance from the geological contacts, another evidence of its importance to development of erosion. The gullies are related to the contact between the Lagoa Formosa Formation with the sedimentary covers from the Tertiary, mostly because of the textural difference among them, which makes easier for the erosion to advance in subsurface. The exposed soil is a result of shallow soils generated above the rocks of the Lagoa Formosa Formation that are mostly horizontalized that tend to hamper the water infiltration and consequently the pedogenesis. There is only the formation of an A horizon of low natural fertility that is removed in events of intense and/or continuous rain.

INTRODUÇÃO GERAL

A região do Alto Paranaíba, junto ao Triângulo Mineiro, configura uma das 12 mesorregiões do estado de Minas Gerais, composta de 66 municípios divididos em sete microrregiões. A região tem sua economia voltada principalmente para a agricultura, e abrange as bacias hidrográficas do Rio Grande, do Rio Paranaíba e do Rio São Francisco, possuindo um contexto interessante no que diz respeito à sua Geologia, Geomorfologia e Pedologia. Considerando a importância desses aspectos, o município de Lagoa Formosa, localizado na microrregião de Patos de Minas, foi selecionado como área de estudo principalmente pela sua diversidade geológica.

Lagoa Formosa está no Centro-Oeste do estado de Minas Gerais, possui população de aproximadamente 18.100 habitantes (IBGE, 2017), e tem sua economia baseada na atividade agropecuária. A cultura de maior destaque é o milho, e mais de 50% da área total é destinada às pastagens, de acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006).

A geologia da região é bastante diversa, e apresenta quatro unidades estratigráficas que condicionam outras características, como relevo, vegetação, hidrografia e pedologia. O embasamento local é dado pela Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí, constituídos por rochas metassedimentares, com destaque para os siltitos. O Grupo Areado é pouco expressivo na área, correspondendo a menos de 7% do seu total, e é representado principalmente por arenitos. O Grupo Mata da Corda é composto por rochas vulcânicas e subvulcânicas ultrabásicas. As Coberturas Terciárias da região são expressas em lateritas e em sedimentos argilo-arenosos. No caso das Coberturas Detrito-Lateríticas, essas foram originadas pela ação intempérica principalmente das rochas do Grupo Mata da Corda. As Coberturas Elúvio-Coluvionares são compostas por sedimentos variados, resultados da erosão das unidades fanerozóicas e pré-cambrianas e do intemperismo dos arenitos (UHLEIN et al., 2011).

As rochas da Formação Lagoa Formosa sofreram erosão, o que resultou na formação de um paleorrelevo irregular. Dessa forma, quando houve a deposição do Grupo Areado no Cretáceo Inferior, essas rochas se assentaram de forma discordante sobre a base. O mesmo ocorre para o magmatismo do Grupo Mata da Corda no Cretáceo Superior, que está sobreposto ao Grupo Areado e à Formação Lagoa Formosa através de discordância erosiva (UHLEIN et al., 2011).

O magmatismo do Grupo Mata da Corda causou diferenças nos mergulhos das rochas da base, o que é possível observar em campo, já que existem rochas pelíticas horizontalizadas e verticalizadas no município. Isso afeta a erosão das rochas subjacentes, razão pela qual muitos dos arenitos do Grupo Areado foram erodidos e compõem coberturas terciárias, além de afetar a formação dos solos na região. Locais onde as rochas estão horizontalizadas possibilitaram o depósito desses sedimentos. Além disso, esse evento magmático também criou um planalto, responsável pela separação das bacias do Rio São Francisco e do Rio Paranaíba (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011).

Com o auxílio de geotecnologias, é possível mapear o uso e ocupação do solo, além de relacioná-lo com outras variáveis ambientais para entender sua espacialização. O *Random Forest* é um classificador que se baseia em árvores de decisão para reconhecer padrões, ou seja, é um processo de mineração de dados (BOULILA et al., 2011), e tem sido amplamente utilizado para realizar diversos mapeamentos (PAL, 2005; GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON., 2006; GUO et al., 2011; RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012; GRINAND et al., 2013). Seu uso tem apresentado melhores resultados quando comparados a outros algoritmos (PAL, 2005; GRINAND et al., 2013), além de apresentar vantagens operacionais, como a capacidade de lidar com grandes volumes de dados e por selecionar as variáveis mais importantes para o mapeamento (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2004; GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006; RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012).

De acordo com levantamento de solos realizados para a região do Alto Paranaíba, o município de Lagoa Formosa possui três classes de maior expressão para a área, sendo eles: Latossolo Vermelho, Cambissolo Háplico e Neossolo Litólico (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004), e a sua distribuição auxilia a compreensão da espacialização do uso e ocupação no município.

Mapeando o uso e ocupação do solo em Lagoa Formosa e conhecendo os solos da região, é possível melhor relacionar as causas dos processos erosivos com variáveis ambientais e atividade humana. Há dois tipos de processos erosivos mapeáveis no município, que são as voçorocas e o solo exposto.

Considerando o exposto acima e a erosão constatada durante os trabalhos de campo, o objetivo geral do trabalho foi averiguar a relação da dinâmica erosiva com os aspectos ambientais do município de Lagoa Formosa, com ênfase na geologia, já que essa variável parece ser condicionante importante não só para a erosão mas para a caracterização do ambiente como

um todo. Para atingir esse objetivo, pode-se listar como objetivos específicos: caracterizar os aspectos físicos, químicos e mineralógicos dos solos do município e avaliar a sua gênese em relação à geologia e à geomorfologia da região; selecionar covariáveis para classificação do uso e ocupação do solo através de técnicas de mineração de dados, além de discutir como as variáveis ambientais influenciam a espacialização desses usos no município; e selecionar covariáveis para a predição de áreas susceptíveis à erosão também pela mineração de dados, e discutir os fatores ambientais que estão controlando esses processos na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAPTISTA, M. C. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.
- BOULILA, W.; FARAH, I. R.; ETTABAA, K. S.; SOLAIMAN, B.; GHÉZALA, H. B. A data mining based approach to predict spatiotemporal changes in satellite images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, p. 386-395, 2011.
- GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forest classification of multisource remote sensing and geographic data. In: **Proceedings 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004)**, v. 2, p. 1049-1052, 2004.
- GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forests for land cover classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 4, p. 294-300, 2006.
- GRINAND, C.; RAKOTOMALALA, F.; GOND, V.; VAUDRY, R.; BERNOUX, M.; VIEILLEDENT, G. Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 68-80, 2013.
- GUO, L.; CHEHATA, N.; MALLET, C.; BOUKIR, S. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 56-66, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário – 2006**. Rio de Janeiro, IBGE: 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades**: Minas Gerais, Lagoa Formosa. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=313750>. Acesso em: 03 fev. 2017.
- MOTTA, P. E. F. da; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. dos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do alto Paranaíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 414 p.
- PAL, M. Random forest classifier for remote sensing classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 217-222, 2005.
- RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; CHICA-OLMO, M.; ABARCA-HERNANDEZ, F.; ATKINSON, P. M.; JEGANATHAN, C. Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. **Remote Sensing of the Environment**, v. 121, p. 93-107, 2012.
- UHLEIN, A.; FREITAS, A. de M.; CRUZ, A. B. da; SILVA, Q. F. da; CAXITO, F. de A.; MOREIRA, G. de C. Folha Carmo do Paranaíba SE.23-Y-B-IV. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011.

CAPÍTULO 1 - ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DOS SOLOS DO MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

RESUMO

Considerando a importância da agropecuária para o município de Lagoa Formosa, o capítulo tem como objetivo caracterizar os solos da região. Para isso, foram realizadas as seguintes análises: físicas, como granulometria, cor, argila dispersa em água, densidade aparente e de partículas e estabilidade de agregados via seca e via úmida; análises químicas de rotina em terra fina seca ao ar (TFSA) de macro e micronutrientes, além do carbono orgânico total; e análises mineralógicas na fração argila e na TFSA por ataque sulfúrico, difratometria de raios-X e fluorescência de raios-X. Com os resultados, foi possível identificar seis classes de solo para o município: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd), Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico (LVAd). Esses solos apresentam relação com seus materiais de origem, onde a textura das rochas é determinante para a textura dos solos, assim como para sua fertilidade natural. Os solos derivados das rochas vulcânicas são os mais ricos da região. Foram constatados altos valores de fósforo pela influência do magmatismo alcalino ocorrido na região. O relevo é um importante fator para a espacialização desses solos, pois afeta a pedogênese no sentido de facilitar ou não a ação da erosão e do intemperismo.

Palavras-chave: pedogênese, geologia, relevo.

PHYSICAL, CHEMICAL AND MINERALOGICAL ATTRIBUTES OF SOILS IN THE COUNTY OF LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

ABSTRACT

Considering the importance of farming activities in the Lagoa Formosa county, in western Minas Gerais state, this chapter aims to characterize the soils in this region. To achieve this goal, the methodology included physical analysis, such as soil texture, soil color, water dispersed clay, and aggregate stability under dry and wet conditions, soil testing analyses of the samples, which included macro and micronutrients and total organic carbon in the air dried samples (smaller than 2 mm), and also mineralogical analyses of the clay fraction and the air dried samples by sulfuric attack, x-ray diffractometry and X-ray fluorescence. The results made

possible to identify six classes of soils, which accordingly to the Brazilian soil classification were: Haplic Tb Distrofic Cambisol (CXbd), typical Litolic Distrofic Neosol (RLd), typical Litolic Chernozemic Neosol (RLm), typical Red Distrofic Latosol (LVd), typical Acriferic Red Latosol (LVwf) and plintosolic Distrofic Red Yellow Latosol (LVAd). The soils formed from volcanic rocks are the richest in nutrients in the area. High values for phosphorous were found because of the influence of the alkaline magmatic event that occurred in this region. The relief is an important factor to the spatial distribution of these soils because it affects its formation in the way of facilitate erosion and weathering processes.

Keywords: pedogenesis, geology, relief.

1. INTRODUÇÃO

A região do Alto Paranaíba apresenta diverso contexto geológico e geomorfológico, sendo responsável pela divisão das bacias do Alto Paranaíba e do São Francisco. O embasamento geológico é dado por rochas do Grupo Bambuí, do Pré-Cambriano. A estrutura do Arco do Alto Paranaíba responsável pela divisão das duas bacias foi soerguida no Cretáceo pela compensação isostática dos extravasamentos basálticos da bacia do Paraná (UHLEIN et al., 2011a).

No município de Lagoa Formosa, a geologia é dada por rochas metassedimentares neoproterozóicas do Grupo Bambuí, rochas sedimentares do Grupo Areado e rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda, além de coberturas cenozoicas areno-argilosas que estão parcialmente laterizadas (UHLEIN et al., 2011b). Essas condições geológicas possibilitaram um ambiente geomorfológico que favoreceu a gênese de diferentes solos, aliados a fatores ambientais como o clima.

Os solos da região são compostos por Latossolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos, de acordo com mapeamento realizado no Alto Paranaíba em escala de 1:250.000. Há uma relação intrínseca entre a formação desses solos e a geomorfologia, pois como o relevo é bastante movimentado, áreas planas são responsáveis pela gênese de solos mais profundos, e áreas mais declivosas estão associadas com solos menos espessos (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004).

Cada um desses solos apresenta características que irão favorecer determinados usos e ocupações no município. A geologia influencia diretamente nas suas propriedades, não só

quimicamente, mas também nos aspectos físicos dos solos. Os Cambissolos Háplicos desenvolvidos sobre as rochas pelíticas do Grupo Bambuí apresentam elevados teores de silte que interferem na ausência da sua organização estrutural, assim como no seu adensamento, na fraca percolação da água e formação de selamento superficial (PEREIRA et al., 2010). Os Neossolos Litólicos que ocorrem em Lagoa Formosa, assim como aqueles da topolitossequência da Serra do Salitre, apresentam A chernozêmico associado com o material de origem rico em nutrientes (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004; ROLIM NETO et al., 2009). Os Latossolos da região do Alto Paranaíba são bastante intemperizados, apresentando baixos índices Ki e Kr, o que indica a riqueza desses solos em óxidos de ferro (ROLIM NETO et al., 2009).

Lagoa Formosa tem sua economia voltada para a agropecuária, com destaque para a produção de milho, que corresponde a quase 50% da área plantada no município (IBGE, 2016), e para a pecuária, que, de acordo com o Censo Agropecuário de 2006, já apresentava mais de 50% da área do município dedicada a essa prática (IBGE, 2006). O uso e a ocupação no município estão fortemente associados com a distribuição dos solos na paisagem, que tem sua fertilidade natural variada de acordo com o material de origem. Nos Latossolos Vermelhos há o predomínio do uso agrícola, em sua maioria em relevos planos, e nos locais de maior declividade estão os Cambissolos e Neossolos ocupados pela pecuária.

Considerando a importância do solo para a atividade econômica do município, o estudo propõe-se a caracterizar seus aspectos físicos, químicos e mineralógicos e avaliar a relação da sua gênese com a geologia e a geomorfologia da região.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização e Aspectos Socioeconômicos

O município de Lagoa Formosa está localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no centro-oeste do estado de Minas Gerais, distante 377 km da capital, Belo Horizonte, e a 27 km de Patos de Minas (Figura 1). Possui área total de 840,92 km² e população estimada em 2016 de 18.107 habitantes (IBGE, 2016). As principais atividades econômicas são a agricultura, com destaque para o milho, e a pecuária, que juntos ocupam mais de 70% da área do município (IBGE, 2006; IBGE, 2016).

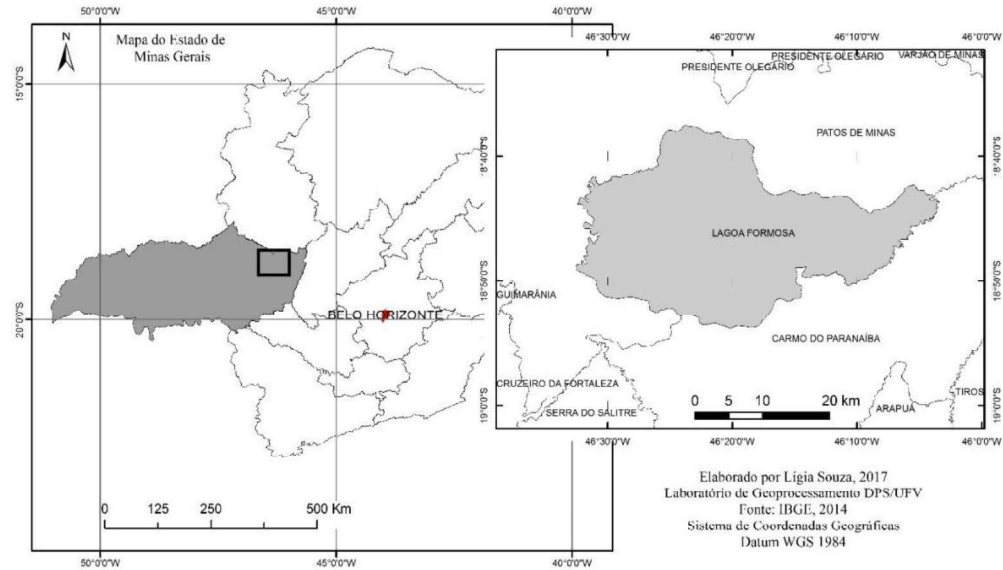


Figura 1 - Mapa de localização do município de Lagoa Formosa no estado de Minas Gerais.

2.2. Geologia

Lagoa Formosa está situada na bacia do São Francisco e possui quatro unidades geológicas, sendo elas o Grupo Bambuí, do Neoproterozóico, o Grupo Areado, do Mesozóico, o Grupo Mata da Corda, também do Mesozóico, e as Coberturas Terciárias, do Cenozóico (SEER et al., 1989; BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a), dispostas na Figura 2.

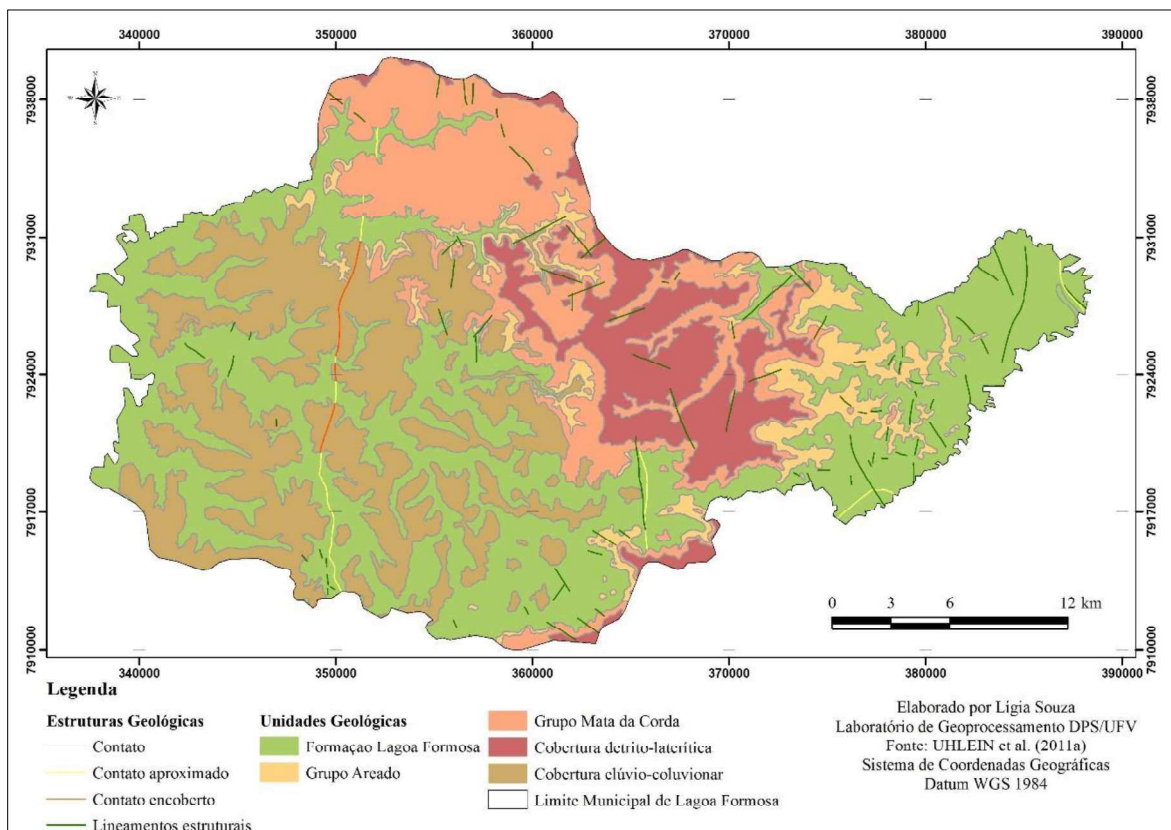


Figura 2 – Mapa geológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

O Grupo Bambuí recobre o embasamento cristalino do Cráton do São Francisco e é a principal unidade aflorante no município, com rochas deformadas com metamorfismo de grau baixo. As rochas pelíticas associadas apresentam geralmente mergulhos entre 20 e 40° pela deformação sofrida, além de clivagem ardosiana (UHLEIN et al., 2011b). No município de estudo, os diamictitos, siltitos, arenitos, argilitos e jaspilitos da área fazem parte da Formação Lagoa Formosa. Essas rochas estão divididas em dois domínios litológicos, sendo um de diamictitos com intercalações de siltitos, e outro com siltitos, arenitos, jaspilitos, e conglomerados que ocorrem localmente (UHLEIN et al., 2011a). Há um terceiro domínio de ocorrências lenticulares de rochas calcárias da Formação Lagoa Formosa, porém, de acordo com o mapeamento realizado por Uhlein et al. (2011a), não estão presentes na área de estudo do presente trabalho.

Os diamictitos são rochas com predominância da matriz argilo-siltosa sobre seixos, com clastos que variam de matacões a grânulos, e apresentam clivagem ardosiana bem desenvolvida. Os clastos são compostos principalmente por siltitos. A espessura dessa litologia é estimada em 500 e 800 metros, sendo de difícil determinação porque não se observa acamamento desses diamictitos. Seus afloramentos apresentam-se geralmente bastante alterados, de coloração rósea a marrom, sendo que a sua cor, quando são, é verde escura (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a). Segundo Uhlein et al. (2011b), há a formação de ravinas por causa da cobertura argilosa desses afloramentos.

Os siltitos são compostos de silte médio a fino, podendo ser maciços ou laminados, com acamamento bem marcado pelas diferenças na granulometria, composição e/ou coloração, já que apresentam níveis argilosos alternados, além de clivagem ardosiana bem definida. Quando alteradas, essas rochas possuem coloração amarelada ou rósea a avermelhada. Podem também compor acamamento rítmico com camadas de arenitos grosseiros a finos e com argilitos. Esses arenitos podem ocorrer em camadas de decímetros a metros que apresentam estratificação gradacional e mostram a diferença dos processos de deposição (UHLEIN et al., 2011a). Arenitos finos ainda podem apresentar xistosidade pela presença de matriz pelítica. Os jaspilitos são resultados de precipitação química, onde alternam hematita e jaspe. Ocorrem como camadas lenticulares intercaladas nos siltitos (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a).

Os conglomerados podem ter predomínio de clastos, formando ortoconglomerados, ou podem ter predomínio da matriz, formando paraconglomerados. Ambos ocorrem intercalados em siltitos e arenitos. No primeiro caso, são rochas de matriz arenosa e clastos angulosos a

subarredondados de variados tamanhos e podem ser constituídos por quartzitos, siltitos, calcários, quartzos, granitoides e jaspilitos, e ocorrem como corpos lenticulares entre 3 e 10 metros de espessura, com 100 até 500 metros de extensão (UHLEIN et al., 2011a; UHLEIN et al., 2011b). Os paraconglomerados ocorrem como camadas métricas a centimétricas, com clastos de siltitos esverdeados e matriz argilo-arenosa ou areno-siltosa (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011b).

O Grupo Areado é resultado de uma sedimentação iniciada no Cretáceo Inferior, composto por conglomerados, arenitos e pelitos, sendo que esses ainda podem apresentar intercalações de calcretes. São três as formações desse grupo, diferenciados pelo tipo de deposição, onde a Formação Abaeté é dada pela sedimentação por leques aluviais, a Formação Quiricó, pela sedimentação lacustre, e a Formação Três Barras, de maior extensão é resultada da sedimentação flúvio-deltaica, fluvial meandrante e eólica (SGARBI, 2011a). Essas associações são múltiplas e variadas e são difíceis de serem cartografadas em escalas pequenas. As rochas que compõem esse grupo são os conglomerados, arenitos e pelitos, sendo que esses podem apresentar intercalações de calcretes (UHLEIN et al, 2011a).

Os conglomerados ocorrem em área muito restrita, em camadas descontínuas e delgadas de até 2 metros. Eles estão na base do grupo e são, principalmente, paraconglomerados polimíticos, ou seja, rochas de matriz compostas por grãos de tamanho areia e clastos de quartzo, quartzito e silito em tamanho de grânulos até blocos, podendo ocorrer também ortoconglomerados polimíticos (UHLEIN et al, 2011a).

Os arenitos estão assentados em contato sub-horizontal discordante sobre o Grupo Bambuí, embasamento local, apresentando acamamento horizontal e com mergulhos suaves, exceto nas áreas próximas a antigos condutos vulcânicos. A granulometria dessas rochas é média, às vezes grossa, com estratificação plano-paralela ou cruzada de médio porte, ambas características da deposição eólica, de maior expressão na região (SGARBI, 2011a; UHLEIN et al, 2011a). As areias do embasamento são mal selecionadas, podendo ocorrer como conglomerados, e também podem apresentar intraclastos argilosos, sendo que esses arenitos são predominantes na porção basal do Grupo Areado. Em direção ao topo ocorrem arenitos finos a médios que apresentam estratificações também cruzadas tabulares e acanaladas de grande porte, além de laminação bimodal, e cores avermelhadas. (UHLEIN et al., 2011a).

Os pelitos são constituídos por ritmitos de cores variadas, compostos de camadas alternadas de argilitos e siltitos com laminação plano-paralela. Podem ocorrer calcretes entre

esses pelitos. Nos siltitos, as laminações são predominantemente planas, com algumas laminações cruzadas ocorrendo localmente. Essas rochas estão associadas à sedimentação lacustre (SGARBI, 2011a; UHLEIN et al., 2011a).

O Grupo Mata da Corda é um evento magmático do Cretáceo Superior, sendo composto pelas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas que estão dispostas sobre o Grupo Areado ou sobre o embasamento, expresso pelo Grupo Bambuí. O contato entre esses grupos é dado por uma discordância erosiva. O Grupo Mata da Corda apresenta duas formações, sendo elas a Formação Patos e a Formação Capacete. As rochas vulcânicas e subvulcânicas são macroscopicamente muito semelhantes, com coloração cinza-escuro quando frescas, e quando alteradas passam a apresentar coloração esverdeada e amarelada (SGARBI, 2011b).

Segundo Uhlein et al. (2011a), as rochas ígneas alcalinas compõem a base desse grupo, contendo rochas de derrames, condutos vulcânicos, diques e depósitos piroclásticos. São rochas afaníticas e/ou porfíricas que apresentam granulação fina, podendo ser ricas em amígdalas, de coloração verde-escuro, que quando alterada apresenta tons esbranquiçados e até mesmo violetas. Essas rochas vulcânicas são compostas de piroxênio em abundância, além de perovskita, leucita, olivina, flogopita, nefelina, apatita e fase vítrea, de acordo com Seer, Moraes e Fogaça (1989). São rochas classificadas como “kamafugitos”, que são rochas potássicas máficas a ultramáficas onde as fases félsicas são feldspatóides, além de serem subsaturadas em SiO₂ (SGARBI, 2011b; UHLEIN et al., 2011a).

Os depósitos de conduto, ou depósitos piroclásticos, são compostos por brechas e aglomerados vulcânicos, além de rochas mais finas como tufos cineríticos e lapilíticos, envoltos por matriz de base vulcânica fina. Os condutos vulcânicos aparecem ressaltados na topografia, como pequenos morrotes de diâmetro médio de dezenas de metros, e estão preenchidos com rochas vulcânicas hidrotermalizadas ou com brechas vulcânicas (UHLEIN et al., 2011a).

As rochas vulcanoclásticas são predominantemente representadas por conglomerados ou brechas e arenitos. Possuem baixa maturidade textural e mineralógica, geralmente sustentados pela matriz, que é composta por areias silicosas e/ou fragmentos líticos vulcânicos. Os clastos dessas rochas podem ter tamanho de grânulos a matações, com diferentes graus de arredondamento, o que pode indicar que esse material tem como fontes áreas diferentes (UHLEIN et al., 2011a).

Por cima das litologias expostas acima, encontram-se Coberturas Terciárias-Quaternárias compostas de Coberturas Detrito-Lateríticas e Coberturas Elúvio-Coluvionares. As lateritas são formadas por sedimentos argilo-arenosos que capeam os planaltos da região, ocorrendo de maneira descontínua, com presença de relictos de rochas vulcânicas e de colúvios e alúvios recentes. As Coberturas Elúvio-Coluvionares também são compostas por sedimentos arenosos, geralmente formadas por areias vermelhas ou esbranquiçadas, ocorrendo de forma descontínua e com espessuras pequenas (UHLEIN et al., 2011a).

O mapa com as litologias de Lagoa Formosa está ilustrado na Figura 3.

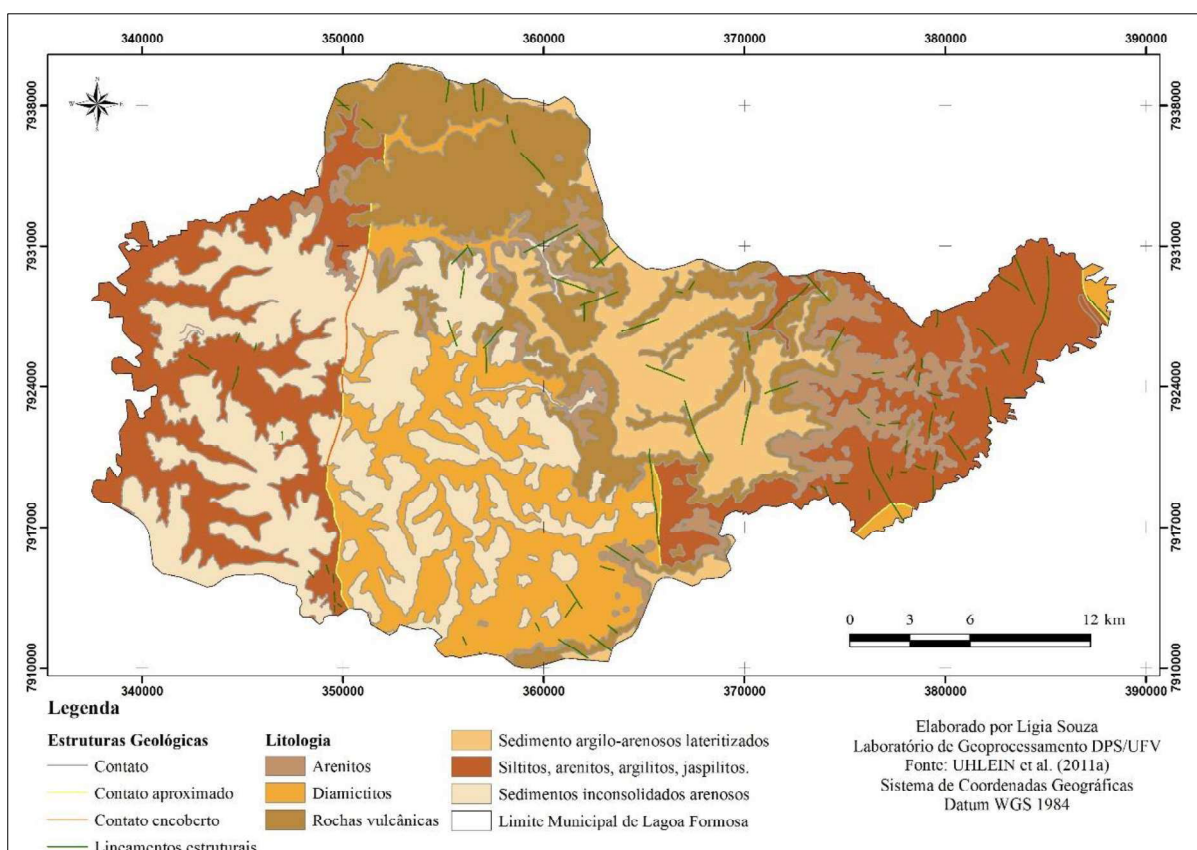


Figura 3 – Mapa litológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

2.3. Geomorfologia

A geomorfologia de Lagoa Formosa é fortemente condicionada pela geologia. De acordo com Baptista (2004) e Uhlein et al. (2011a), são três domínios geomorfológicos da região: um domínio expresso por colinas suaves, que ocorre entre 800 e 900 metros de altitude, e é a porção de maior área na região; um domínio entre as cotas de 900 e 1000 metros representado por vertentes dissecadas; e outro domínio de zona de planalto, entre 1000 e 1150 metros de altitude. Essas zonas geomorfológicas estão ilustradas na Figura 4.

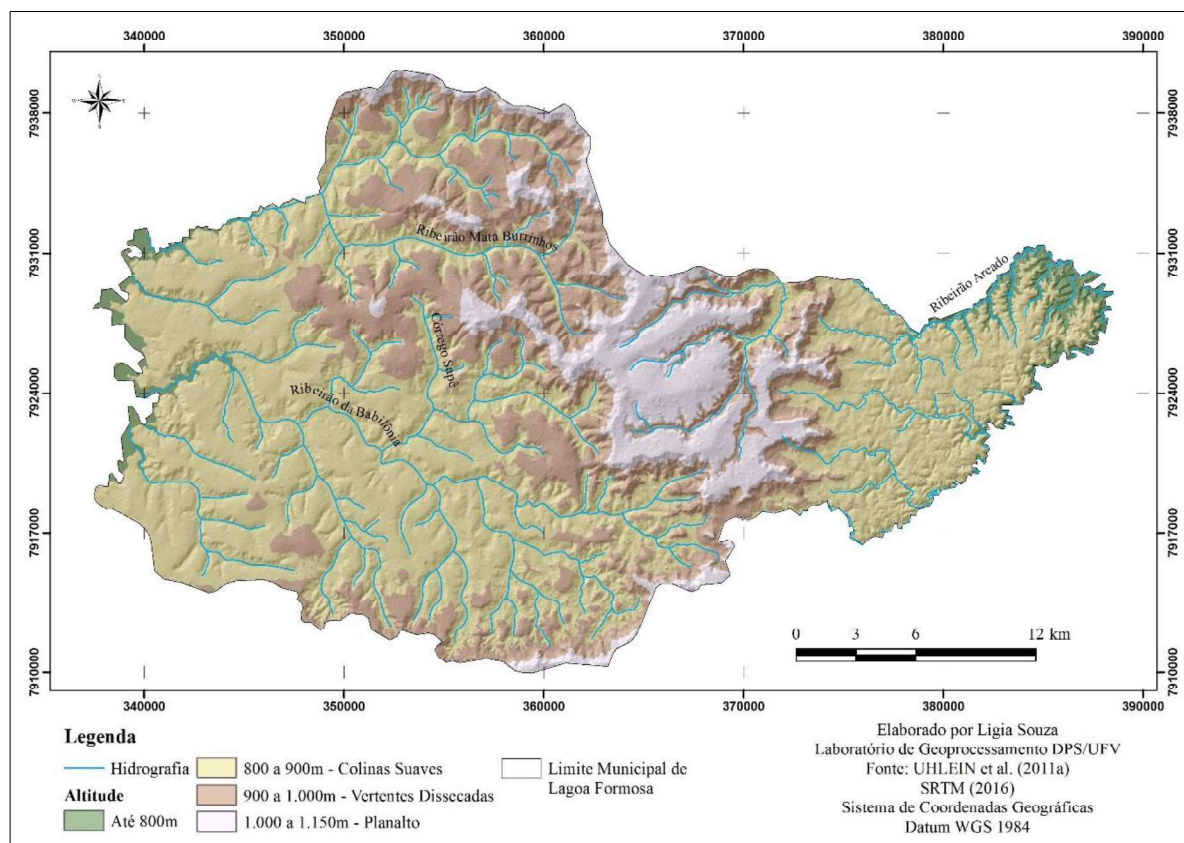


Figura 4 – Mapa geomorfológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Pensando na evolução geológica, o metamorfismo da Formação Lagoa Formosa ocorreu com o final da Orogênese Brasileira e possibilitou a formação de paleorrelevo pela ação erosiva entre esse evento e a sedimentação ocorrida somente no Cretáceo Inferior. Por esse motivo, há uma discordância erosiva e angular entre essa formação e o Grupo Areado, dada pela superfície de erosão no Grupo Bambuí e pelas diferenças dos mergulhos das rochas das duas unidades geológicas. Foi o extravasamento basáltico da Bacia do Paraná que possibilitou o soerguimento do Arco do Alto Paranaíba por compensação isostática e que permitiu a deposição dos sedimentos do Grupo Areado na então desenvolvida Depressão do Abaeté. Somente no Cretáceo Inferior acontece o vulcanismo alcalino do Grupo Mata da Corda, que deformou os sedimentos do Grupo Areado. Também esse contato entre as duas unidades geológicas se dá por discordância erosiva. No Terciário há a desagregação parcial das estruturas vulcânicas e a edificação das coberturas lateríticas e areno-argilosas, onde a ação da drenagem e da erosão moldou a geomorfologia da região (BAPTISTA, 2004; SGARBI, 2011a; SGARBI, 2011b; UHLEIN et al., 2011a; UHLEIN et al., 2001b).

Dessa forma, há uma relação entre as zonas geomorfológicas definidas acima e as unidades geológicas presentes no município. A Formação Lagoa Formosa ocorre em cotas entre

800 e 870 metros, ocupando o domínio de colinas suaves, principalmente onde não há o depósito de coberturas terciárias. Isso é dado pela dificuldade da ação erosiva nas rochas dessa formação, que irá variar com o ângulo de mergulho das suas rochas (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a; UHLEIN et al., 2011b).

As áreas de vertentes dissecadas, entre 900 e 1000 metros, engloba as Coberturas Elúvio-Coluvionares, o Grupo Areado, que está entre 850 e 960 metros de altitude, e ainda algumas poucas áreas do Grupo Mata da Corda. Os contatos entre as áreas terciárias com a Formação Lagoa Formosa são locais onde se desenvolvem processos erosivos pela ação da água em subsuperfície, facilitando a exposição do material friável, originado principalmente dos diamictitos e dos siltitos. Como aponta Uhlein et al. (2011a), há evidências dos entalhes erosivos no Grupo Mata da Corda pela atual rede de drenagem nessas vertentes. O Grupo Areado é pouco expressivo na área, porém está associado a essas vertentes pela textura e mineralogia do seu material. Além disso, há uma discordância erosiva entre os contatos desses grupos com a Formação Lagoa Formosa, o que pode facilitar a erosão desses materiais. Em alguns casos, como no contato da Formação Lagoa Formosa com o Grupo Areado, esse contato também se dá com discordância angular, outro fator importante para o desenvolvimento dos processos erosivos (UHLEIN et al., 2011a; SGARBI, 2011b).

As zonas de planalto estão intimamente relacionadas às Coberturas Detrito-Lateríticas, que são responsáveis por sustentar o relevo, impedindo sua erosão e formam o platô da Mata da Corda (UHLEIN et al., 2011a).

2.4. Pedologia

São três classes de solos presentes em Lagoa Formosa, de acordo com levantamento realizado por Motta, Baruqui e Santos (2004), na escala de 1:250.000: Cambissolos Háplicos, Neossolos Litólicos e Latossolos Vermelhos. Há também para o município uma pequena mancha de Latossolo Vermelho-Amarelo, de menos de 0,5% da sua área total, de acordo com esse mapeamento. A distribuição das classes pode ser observada na Figura 5.

Os Cambissolos Háplicos da área são predominantemente de argila de atividade baixa, distróficos típicos, de textura argilosa, com horizonte A moderado, mas também existem Cambissolos Háplicos de argila de atividade alta, também com horizonte A moderado, associados a Neossolos Litólicos com horizonte A moderado e chernozêmico, ambos eutróficos

típicos, de textura argilosa, em relevos ondulado e forte ondulado (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). Essas áreas de Cambissolo de argila de atividade baixa, dada as características físicas e químicas, estão relacionadas às vertentes da Formação Lagoa Formosa, já que a maioria desses solos apresenta textura argilosa. As áreas de associação de Cambissolos com Neossolos estão relacionados às vertentes do Grupo Mata da Corda, que apresentam materiais de origem ricos em nutrientes, conferindo aos solos alta saturação por bases.

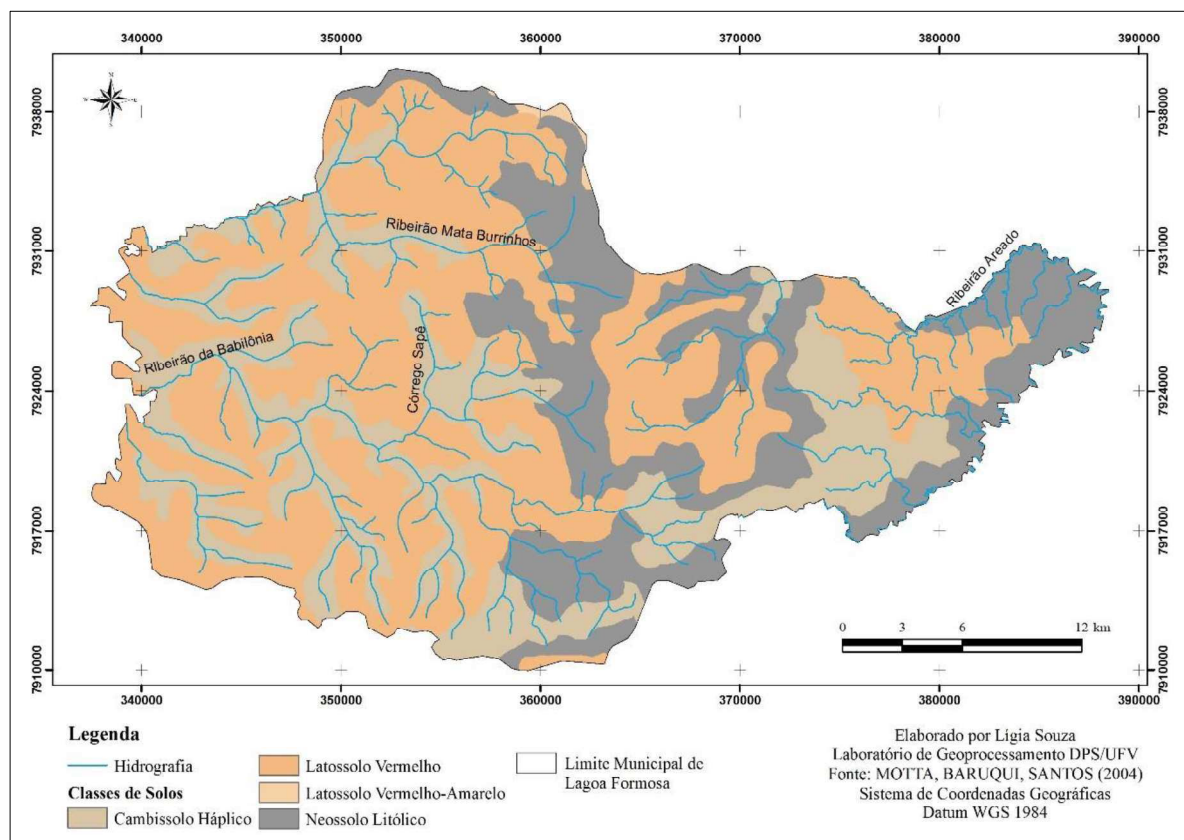


Figura 5 – Mapa pedológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Os Neossolos Litólicos, por sua vez, são eutróficos, chernossólicos, com argila de alta atividade, textura argilosa, em relevos ondulado e forte ondulado. Ocorrem também associados com Cambissolos Háplicos de argila de baixa atividade, distróficos típicos, com horizonte A moderado e álicos (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). Esses Neossolos, como apontado anteriormente, são ricos em nutrientes porque estão associados às rochas do Grupo Mata da Corda, e por estarem em relevos mais acidentados não conseguem formar horizonte B para caracterização de Cambissolo eutrófico.

Dos Latossolos Vermelhos, o de maior destaque são os áricos, que apresentam textura muito argilosa, com horizonte A moderado, distrófico. No entanto, também possuem destaque na região os Latossolos Vermelhos Distróficos, de textura argilosa a muito argilosa, com

horizonte A moderado, além dos Latossolos Vermelhos Perféricos em associação com Latossolos Vermelhos Distroféricos, outra classe importante para a área, ambos apresentam textura argilosa, horizonte A moderado. Todos os Latossolos do município estão em relevo plano a suave ondulado, associados principalmente com a floresta tropical subcaducifólia da área (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). O relevo é fator chave para entender sua distribuição no município, pois áreas planas favoreceram a gênese de solos profundos, mesmo com material de origem pobre em nutrientes. Dessa forma, os Latossolos de Lagoa Formosa estão associados aos depósitos terciários, pois nesses locais o relevo plano favoreceu o desenvolvimento desses solos. No caso das Coberturas Detrito-Lateríticas ainda há o fator do microclima, pois por estarem em cotas mais altas apresentam maior umidade e favorecerem a ação do intemperismo para a gênese dos Latossolos e também a instalação de atividades agrícolas.

O Latossolo Vermelho-Amarelo da área, segundo Motta, Baruqui e Santos (2004), apresenta textura muito argilosa, com horizonte A moderado ou proeminente, desenvolvido sobre sedimentos argilosos resultados do intemperismo das rochas básicas alcalinas do Grupo Mata da Corda. Apresenta fertilidade natural baixa e está também associadas a relevos planos e suave ondulados.

2.5. Clima e Vegetação

O clima do município é dado por verões quentes e úmidos, e invernos frios e secos, com precipitação entre 1500 e 2000 mm e temperatura média anual de 20°C (UHLEIN et al., 2011a).

A vegetação original predominante era de Cerrado e de Floresta Tropical Latifoliada. O Cerrado possui distribuição mais ampla na região, sendo representando por estratos herbáceos, arbustivos e arbóreos. A floresta foi em grande parte desmatada, mas era representada por árvores de grande porte (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a).

2.6. Uso e Ocupação do Solo

Considerando que as principais atividades econômicas de Lagoa Formosa são a agropecuária, essas representam quase 90% da área total do município. De acordo com o Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), quase 54% do município já eram dedicados à atividade

pecuária. Dados para lavouras permanentes e temporárias de 2015 apontam que essas ocupavam mais de 20% do município, com destaque para o plantio de milho.

O município ainda apresenta fragmentos de vegetação nativa, representados principalmente pelas matas de galeria. Há também uma área considerável de solo exposto, de quase 30 km², resultado do manejo inadequado dos solos, associados principalmente com Neossolos.

As atividades agrícolas estão associadas a áreas latossólicas de relevo plano a suave ondulado, e as pastagens encontram-se nas vertentes associadas aos Cambissolos e Neossolos, dado que, principalmente, as suas características químicas são responsáveis pelo desenvolvimento de vegetação nesses solos.



3. MATERIAL E MÉTODOS



3.1. Amostragem

Foram feitos dois trabalhos de campo ao município de Lagoa Formosa: um em outubro de 2015 e outro em maio de 2016. Nessas ocasiões houve a coleta de 11 perfis de solo, sendo escolhidos seis perfis representativos para a área de estudo. Os perfis foram amostrados e classificados de acordo com Santos et al. (2015) e Santos et al. (2013), e sua localização está disposta na Figura 6. Foram amostradas as seguintes classes: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico (LVAd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf), Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm) e Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd).

A Tabela 1 mostra imagens dos perfis coletados acompanhadas de algumas informações de campo. Os horizontes amostrados foram secos ao ar, destorroados e passados em peneira de 2 mm para a realização das análises físicas, químicas e mineralógicas.

Tabela 1 – Informações sobre os perfis de solos amostrados no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Classe de Solo	Perfil de Solo Amostrado	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Material de Origem
CXbd		X: 354153,37 Y: 7923179,44	847	Formação Lagoa Formosa (siltitos)
LVAd		X: 371120,11 Y: 7924530,14	1045	Cobertura Detrito- Laterítica (sedimentos argilosos lateritizados)

Classe de Solo	Perfil de Solo Amostrado	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Material de Origen
LVd		X: 383986,38 Y: 7926294,12	886	Coberturas Elúvio- Coluvionares (sedimentos argilo-arenosos inconsolidados)
LVwf		X: 353390,67 Y: 7926050,50	928	Grupo Mata da Corda

Classe de Solo	Perfil de Solo Amostrado	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Material de Origem
----------------	--------------------------	-------------------------	--------------	--------------------

RLm



X: 362621,72
Y: 7919872,49

924

Grupo Mata da Corda

RLd



X: 354153,37
Y: 7927405,63

853

Formação Lagoa Formosa (rochas pelíticas)

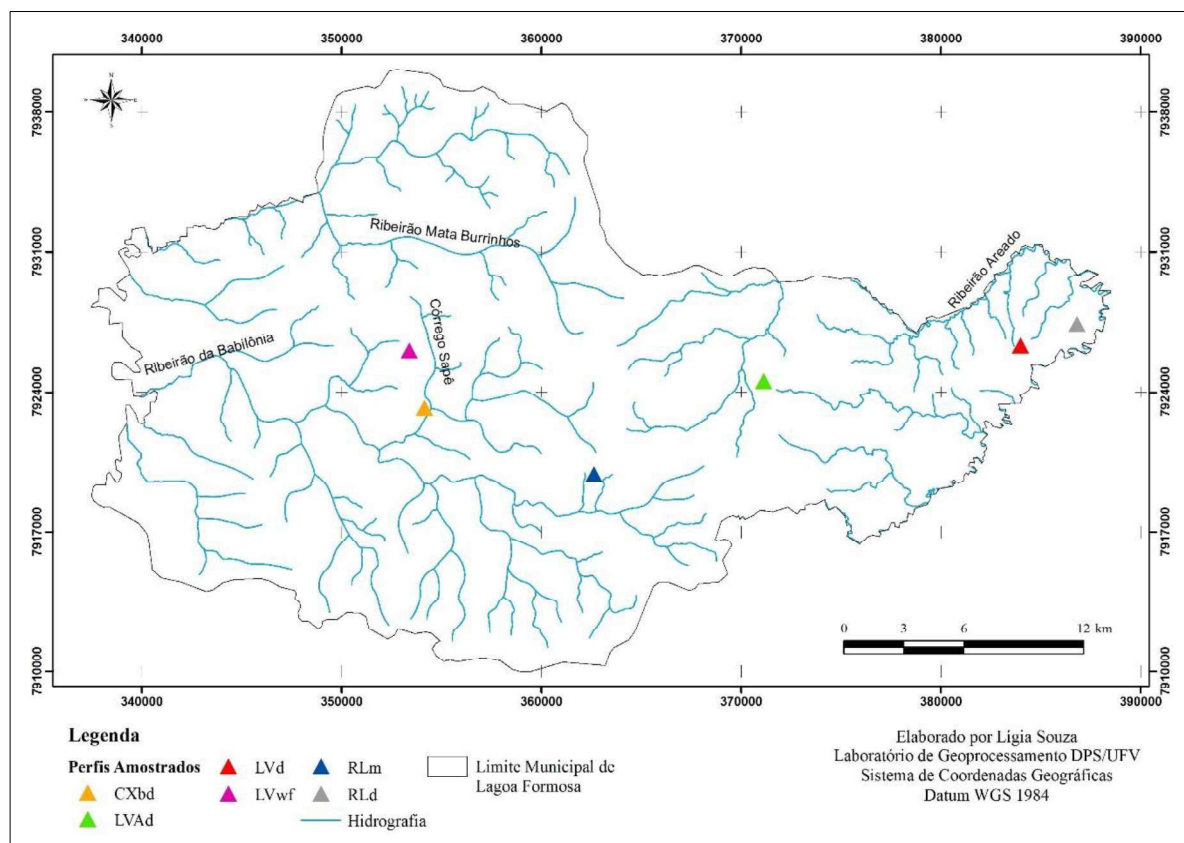


Figura 6 – Mapa de localização dos perfis de solo amostrados no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

3.2. Análises Físicas

A composição granulométrica foi determinada de acordo com Ruiz (2005), com a dispersão das amostras com hidróxido de sódio ($\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação mecânica por 16 horas a 50 rpm. Foram calculadas as proporções de areia grossa, areia fina, silte e argila, por meio de sedimentação e separação em peneiras, que foram secas em estufa.

A argila dispersa em água (ADA) foi determinada como na análise granulométrica, porém utilizando água deionizada como dispersante.

A densidade aparente foi determinada através de uma adaptação do método da proveta apresentado pela Embrapa (2011). As amostras de solo foram colocadas em provetas de 10 mL de peso conhecido, preenchidas até o seu volume total, e novamente pesadas antes de serem colocadas em agitador, para que fossem submetidas a vibrações controladas por um reostato durante 5 minutos. Após esse tempo, as amostras foram pesadas novamente, e esse peso final foi dividido pelo volume final ocupado pela amostra, obtendo-se a densidade aparente. A

densidade de partículas foi determinada de acordo com a Embrapa (2011) pelo método do balão volumétrico.

A cor dos solos foi obtida com auxílio da caderneta de Munsell (MUNSELL, 1975).

A estabilidade de agregados via úmida foi determinada através da adaptação do método apresentado por Jucksch (1987), onde foram colocados 30 g de amostra de solo em recipientes plásticos com 200 mL de água deionizada, que foram posteriormente agitados por 3 horas a 40 hertz em mesa agitadora. Como as amostras possuem partículas de até 2 mm, depois de agitadas, essas foram passadas em um conjunto de 5 peneiras para separação das frações com auxílio de água. O diâmetro da malha das peneiras foram 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm, 0,105 mm e 0,053 mm. Cada um desses intervalos constituiu um intervalo de classes de agregados.

A estabilidade de agregados via seca foi feita como a via úmida, porém sem o contato da água, e foram estabelecidas as mesmas classes de agregados. Também é um método adaptado, e foi mantido o mesmo procedimento para fins de análise dos resultados.

Com todos esses dados, foi possível obter a relação silte/argila e a porosidade total.

3.3. Análises Químicas

Foram determinadas as seguintes características químicas dos solos em amostras de terra fina seca ao ar (TFSA): pH em água; pH em KCl a 1 mol L^{-1} ; cálcio, magnésio e alumínio trocável também com solução de KCl a 1 mol L^{-1} , sendo que os dois primeiros elementos foram determinados por leitura em espectrofotômetro de absorção atômica, e o alumínio foi obtido por titulação com azul de bromotimol e solução de hidróxido de sódio (NaOH a $0,025 \text{ mol L}^{-1}$). Com a solução Mehlich-1 determinou-se o fósforo, com leitura em espectrofotômetro de absorção molecular com comprimento de onda 725 nm, assim como o potássio e sódio, com leitura em espectrofotômetro de emissão em chama. O fósforo remanescente foi determinado com uma solução de equilíbrio de CaCl_2 a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e 60 mg L^{-1} de fósforo com leitura em espectrofotômetro de absorção molecular no comprimento de onda 725 nm. A acidez potencial foi determinada com solução de acetato de cálcio a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ com pH 7,0. A leitura foi feita por titulação, utilizando fenolftaleína e solução de hidróxido de sódio (NaOH a $0,025 \text{ mol L}^{-1}$).

Os metais pesados cobre, manganês, ferro, zinco, cromo, níquel, cádmio e chumbo foram também determinados utilizando o Mehlich-1 como extrator, e sua leitura foi realizada em espectrofotômetro de absorção atômica.

O Carbono Orgânico Total foi determinado pelo método de Walkley-Black utilizando fonte de calor externo para maximizar a oxidação do carbono, de acordo com Yeomans e Bremner (1988).

Com os resultados das análises acima, foi possível calcular a soma de bases (SB), a CTC efetiva (t), a CTC total (T), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m), de acordo com a Embrapa (2011).

3.4. Análises Mineralógicas

As análises mineralógicas foram realizadas na fração argila e na terra fina seca ao ar (TFSA). Para obtenção da argila, foi feita a sua separação por sedimentação e sifonamento como proposto pela Embrapa (2011). Para horizontes ricos em matéria orgânica, sua remoção foi feita com hipoclorito de sódio (NaClO) a 10% e pH 9,5, deixando a solução em contato com a amostra por 15 minutos em temperaturas entre 75 e 80°C.

O ataque sulfúrico das amostras de argila e de TFSA foi feito com determinação de silício, ferro, manganês, alumínio e titânio através da leitura desses elementos em espectrofotômetro de absorção atômica. A leitura do fósforo foi realizada em espectrofotômetro de emissão óptica em plasma.

Foram feitas pastilhas com as amostras de argila e de TFSA para leitura em espectrômetro de fluorescência de raios-X, onde essas amostras foram trituradas e passadas por peneira de 0,053 mm e então submetidas a uma pressão de 3 toneladas em pastilhador.

Lâminas também foram preparadas pelo método do esfregão para leitura pela difratometria de raios-X por tubo de cobalto.

Com os resultados do ataque sulfúrico para a TFSA foi calculado o índice K_i e K_r , de acordo com o estabelecido em Santos et al. (2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Física

Dos solos coletados, foram identificados três Latossolos representativos para a área, muito relacionados aos materiais de origem, sendo eles: Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), e Latossolo Vermelho-Amarelo

Distrófico plintossólico (LVAd). Todos esses solos apresentaram textura argilosa. Foram identificados também dois Neossolos, com textura argilosa para o Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd) e muito argilosa para o Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm). Para o Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd) amostrado, a textura também é argilosa. Todos esses resultados são similares àqueles obtidos por Motta, Baruqui e Santos (2004) para o levantamento dos solos do Alto Paranaíba.

A classificação textural desses solos está de acordo com o material de origem, já que as frações granulométricas apresentam variações de acordo com as rochas da base. No caso do Cambissolo, como mostra a Tabela 2, ainda há valores consideráveis de silte dado justamente pela rocha de origem, que são predominantemente os siltitos da Formação Lagoa Formosa. As texturas argilosas dos Latossolos muito se relacionam com os sedimentos areno-argilosos do Terciário na região, e pelo intemperismo das rochas do Grupo Mata da Corda. O Neossolo Litólico Chernossólico também tem como material de origem as rochas básicas do Grupo Mata da Corda, cujo intemperismo forneceu elementos como cálcio e magnésio em quantidades suficientes para a caracterização desses solos com horizonte A chernozêmico (SANTOS et al, 2013).

Também é interessante observar como os valores de argila dispersa em água (ADA) mudam consideravelmente dos Cambissolos e Neossolos para os Latossolos, como visto na Tabela 2, o que afeta diretamente a estabilidade dos seus agregados e está intimamente ligado com a mineralogia desses solos. Solos mais oxídicos, como os Latossolos, especialmente aqueles com teores altos de gibbsita, contribuem para a estabilidade dos agregados por afetar o comportamento da ADA. Além disso, afetam também a densidade do solo, já que solos mais gibbsíticos tendem a apresentar menores valores de densidade pelo desenvolvimento de microestrutura do tipo granular, com pequenos grânulos soltos, e com maior proporção de poros grandes e maior permeabilidade (FERREIRA, FERNANDES, CURI, 1999).

As cores dos solos são essenciais para a identificação do horizonte A chernozêmico para o RLm do Grupo Mata da Corda, assim como para a caracterização dos Latossolos Vermelhos e do Latossolo Vermelho-Amarelo. A coloração avermelhada dos solos indica a presença da hematita, que é formada em ambientes onde a drenagem é favorecida, ao contrário da presença da goethita, associada com drenagens mais restritas. O Latossolo Vermelho-Amarelo está associado às Coberturas Detrito-Lateríticas do Terciário, que por estarem nas cotas mais elevadas do município, favorecem a formação da goethita pelo microclima local mais úmido.

Por essa razão é possível observar tonalidades mais amareladas presentes também nesses solos, justamente pela formação desse óxido.

Tabela 2 - Caracterização da granulometria e das cores dos perfis coletados em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia Grossa	Areia Fina	g kg ⁻¹			Cor Úmida	Cor Seca
				Silte	Argila	ADA		
CXbd - Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico								
A	0 - 5	58,00	19,00	359,00	564,00	294,00	10 YR 4/4	10 YR 7/6
Bi	5 - 30	30,03	14,01	431,43	524,52	30,00	10 YR 4/4	10 YR 7/6
C1	30 - 70	17,00	19,00	458,00	506,00	2,00	7,5 YR 3/4	7,5 YR 7/4
C2	70 - 115	11,99	16,98	521,48	449,55	4,00	7,5 YR 4/6	7,5 YR 6/4
RLd - Neossolo Litólico Chernossólico típico								
A	0 - 40	92,20	89,98	342,37	475,45	145,72	10 YR 2/2	10 YR 2/2
C1	40 - 65	53,67	62,80	268,55	614,98	245,39	10 YR 3/4	10 YR 2/2
C2	65 - 110 +	30,58	61,17	598,32	309,92	137,37	10 YR 3/6	10 YR 2/2
RLm - Neossolo Litólico Distrófico típico								
A	0 - 20	100,00	58,00	358,00	484,00	239,00	10 YR 5/6	10 YR 7/6
C1	20 - 60	78,00	33,00	382,00	507,00	233,00	7,5 YR 6/6	7,5 YR 8/4
C2	60 - 90	80,00	40,00	377,00	503,00	157,00	7,5 YR 4/6	7,5 YR 7/6
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférico típico								
A	0 - 20	91,00	68,00	272,00	569,00	67,00	2,5 YR 3/2	2,5 YR 3/4
A/B	20 - 52	80,00	94,00	266,00	560,00	2,00	2,5 YR 3/2	2,5 YR 3/4
Bw1	52 - 97	85,00	76,00	245,00	594,00	143,00	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/6
Bw2	97 - 130+	88,00	70,00	249,00	593,00	161,00	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/6
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico								
A	0 - 20	213,09	270,15	77,04	439,72	62,00	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/6
B/A	20 - 60	157,16	244,24	81,08	517,52	153,00	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/6
Bw	60+	146,85	229,77	103,90	519,48	71,00	2,5 YR 2,5/4	2,5 YR 3/6
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico								
A	0 - 30	152,59	116,10	354,05	377,27	51,29	10 YR 2/2	10 YR 2/2
Bw	30 - 140	158,34	94,78	190,01	556,87	234,90	5 YR 3/3	5 YR 4/4
C	140 - 160+	123,31	90,64	208,47	577,57	17,47	5 YR 4/6	7,5 YR 5/6

A porosidade total desses solos é bastante semelhante entre si. Em contrapartida, a densidade aparente e a densidade de partículas mostraram resultados variados para as diferentes classes de solos, como mostra a Tabela 3. Os baixos valores da relação silte/argila comprovam o alto grau de intemperismo dos Latossolos da região, com valores abaixo do limite estabelecido de 0,6 (SANTOS et al, 2013).

Ao submeter as amostras a uma certa intensidade de movimento por tanto tempo quanto foi estabelecido para as análises de estabilidade de agregados teve como objetivo avaliar o

quanto os solos da região resistiriam quando expostos em situações de estresse mecânico. Em campo, os solos não serão submetidos a estresse similar ao simulado em laboratório, porém, ao mostrarem resistência a essas condições, em contato com a água e por tanto tempo quanto foi estabelecido, é possível inferir sobre sua susceptibilidade à erosão.

Tabela 3 - Caracterização de propriedades físicas dos solos coletados em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Densidade Aparente	Densidade de Partículas	Porosidade Total	Relação Silte/Argila
		kg dm ⁻³		%	-
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico					
A	0 - 5	1,03	2,71	62,05	0,64
Bi	5 - 30	0,98	2,77	64,62	0,82
C1	30 - 70	0,97	2,63	63,14	0,91
C2	70 - 115	1,02	2,67	61,70	1,16
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico					
A	0 - 40	1,22	2,89	57,90	0,72
C1	40 - 65	1,06	2,83	62,69	0,44
C2	65 - 110 +	1,02	3,10	67,12	1,93
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico					
A	0 - 20	1,04	2,61	60,21	0,74
C1	20 - 60	1,09	2,72	60,05	0,75
C2	60 - 90	1,05	2,75	61,80	0,75
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico					
A	0 - 20	1,14	2,98	61,87	0,48
A/B	20 - 52	1,17	3,08	61,94	0,48
Bw1	52 - 97	1,17	3,11	62,39	0,41
Bw2	97 - 130+	1,12	3,09	63,84	0,42
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico					
A	0 - 20	1,24	2,56	51,42	0,18
B/A	20 - 60	1,15	2,70	57,58	0,16
Bw	60+	1,25	2,70	53,87	0,20
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico					
A	0 - 30	0,83	2,04	59,39	0,94
Bw	30 - 140	1,19	3,07	61,16	0,34
C	140 - 160+	1,23	2,86	56,99	0,36

A estabilidade dos agregados sob via úmida do CXbd e do RLd mostrou baixa resistência, com a maior parte dos agregados na classe menor que 0,053 mm de diâmetro, de acordo com os resultados na Tabela 4. Esses solos que podem se desfazer com maior facilidade nas suas menores partículas, sendo menos resistentes a eventos de erosão hídrica, sendo também reflexo da estrutura fraca desses solos. Os Latossolos, por sua vez, têm seus agregados divididos de forma mais igual entre as classes de estabilidade, com destaque para as classes entre 0,5 mm

e 0,125 mm. No caso do LVAd, nota-se que a estabilidade para os agregados menores que 0,053 mm é menor, pois é a classe com maior proporção para o horizonte C. Esse horizonte, de acordo com os resultados expostos na Tabela 2, é o que possui mais argila e menos areias desse Latossolo, não havendo sequer aumento substancial na fração silte. Os dados da estabilidade desses agregados via seca, com baixas proporções nessa mesma classe de agregados pode indicar que a estrutura desse horizonte é mais importante para explicar como se comportam os agregados diante de eventos erosivos.

Tabela 4 - Estabilidade de agregados determinada via úmida para as amostras de solo de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Estabilidade de Agregados Via Úmida (%)					
	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,125	0,125 - 0,053	< 0,053
mm						
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico						
A	15,77	10,83	6,60	5,50	3,17	58,13
Bi	5,43	8,37	6,93	7,53	5,27	66,47
C1	1,40	2,97	4,10	8,03	8,93	74,57
C2	0,47	1,57	2,47	3,70	4,23	87,57
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico						
A	10,96	16,24	17,07	11,37	10,24	34,12
C1	3,93	7,20	20,10	16,98	12,94	38,84
C2	3,61	13,28	14,07	9,34	10,94	48,76
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico						
A	7,23	7,40	5,63	7,30	3,90	68,53
C1	11,30	8,03	6,53	6,87	6,03	61,23
C2	8,80	9,13	7,17	7,57	4,50	62,83
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico						
A	10,93	18,60	31,57	14,00	5,90	19,00
A/B	5,40	11,97	28,40	26,90	10,33	17,00
Bw1	13,77	5,57	16,07	20,73	11,50	32,37
Bw2	4,33	8,53	29,03	21,60	12,10	24,40
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico						
A	5,23	10,63	21,38	30,48	11,38	20,88
B/A	4,03	11,87	19,23	29,03	9,90	25,93
Bw	2,33	5,63	16,33	33,27	19,80	22,63
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico						
A	12,34	10,53	21,39	16,37	12,28	27,09
Bw	9,29	6,19	27,53	21,63	12,58	22,77
C	4,38	8,06	11,50	13,33	9,63	53,11

Os valores da estabilidade de agregados via seca dos Latossolos mostram distribuição entre essas classes de forma homogênea assim como na estabilidade determinada pela via úmida, com destaque para os agregados da classe de 0,5 a 0,25 mm. Isto é um indicador de uma

forte estrutura do solo, que mesmo em condições extremas com ou sem a presença de água não se desfazem facilmente. Na Tabela 5 estão expostos os valores para a estabilidade de agregados via seca, onde é interessante notar as grandes proporções de agregados nas classes de 2 a 1 mm e de 1 a 0,5 mm de diâmetro do Cambissolo e dos Neossolos. É importante ressaltar o papel da matéria orgânica para a estabilização dos agregados (CASTRO FILHO, MUZILLI, PODANOSCHI, 1998), como observado principalmente no LVAd, que no horizonte A húmico tem suas proporções de agregados bem distribuídos pelas classes.

Tabela 5 - Estabilidade de agregados determinada via seca para as amostras de solo de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Estabilidade de Agregados Via Seca (%)					
	2 - 1	1 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,125	0,125 - 0,053	< 0,053
mm						
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico						
A	41,17	28,68	15,28	8,66	4,86	1,35
Bi	39,26	28,31	16,19	10,62	4,66	0,96
C1	25,16	29,71	21,31	14,90	7,47	1,44
C2	31,26	28,63	22,17	12,58	4,39	0,97
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico						
A	41,77	27,32	16,31	7,38	4,64	2,59
C1	60,67	25,19	8,89	2,63	1,24	1,38
C2	43,25	27,44	13,40	5,81	5,06	5,06
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico						
A	33,45	28,29	16,27	8,19	9,33	4,46
C1	27,67	29,02	19,08	11,51	9,74	2,99
C2	24,29	27,99	20,09	11,62	13,14	2,88
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico						
A	11,38	24,50	36,39	16,20	7,20	4,33
A/B	9,32	20,22	40,23	19,10	7,73	3,40
Bw1	8,45	11,78	32,95	23,71	15,41	7,70
Bw2	8,90	18,05	36,19	19,61	11,83	5,43
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico						
A	13,60	20,69	29,24	22,11	9,85	4,51
B/A	15,15	24,25	28,94	18,69	8,79	4,17
Bw	5,87	16,41	30,67	24,83	15,80	6,42
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico						
A	13,84	15,70	25,19	18,77	13,63	12,86
Bw	13,12	9,12	41,12	21,29	13,99	1,36
C	26,13	18,72	28,79	17,05	7,21	2,11

O predomínio das classes de maior diâmetro dos agregados para os Latossolos, tanto para a determinação via seca quanto pela via úmida, são então indicativo de maior resistência à erosão. A dispersão das argilas, como observado nos resultados da estabilidade pela via úmida

e exposto na Tabela 4, é um reflexo das composições mineralógicas e químicas, também importantes para a fração silte (VITORINO et al., 2003).

4.2. Caracterização Química

Os valores de pH em água e KCl encontrados para os solos da região apresentam valores similares, como mostra a Tabela 6. O RLd e o CXbd apresentaram os menores valores de pH em água para as classes do município, e se relacionam aos altos valores de alumínio trocável presentes nesses solos, sendo esses os maiores valores encontrados para todas as amostras. Considerando a condição do relevo geralmente ondulado aonde essas classes se desenvolvem, nota-se que o alto valor de alumínio trocável é devido ao material de origem da região, e estão de acordo com os valores encontrados para os mesmos solos do levantamento realizado por Motta, Baruqui e Santos (2004). Análises químicas de saprolito de rochas pelíticas retiradas durante o trabalho de campo na região também mostraram altos valores de alumínio trocável e de saturação por alumínio, podendo corresponder a mais de 90%.

Com os valores de pH foi possível conferir a um dos Latossolos o caráter ácido nos horizontes Bw, de acordo com Santos et al. (2013). Com os valores de ΔpH é possível observar que todos os solos são eletronegativos, com a exceção do horizonte Bw2 do LVwf (Tabela 6). Nesse caso, solos eletropositivos podem ser um indicador da predominância de mineralogia oxidica/gibbsítica (SCHAEFER, FABRIS, KER, 2008). A eletronegatividade dos horizontes mais superficiais pode ser associado com a ação da matéria orgânica do solo, notável principalmente no horizonte A húmico do LVAd, que apresentou o maior valor de pH em água para todas as amostras junto às amostras do RLm.

A soma de bases (SB) e a saturação por bases (V) do RLm é alta em todo o perfil, indicando a riqueza em nutrientes do material de origem e a baixa atuação dos processos de intemperismo. A alta saturação por bases no horizonte A do LVAd também é bom indicativo da atuação na matéria orgânica como fonte de nutrientes ao solo. Os Latossolos apresentam baixa saturação por bases em todos os perfis, mesmo quando desenvolvido sobre rochas básicas do Grupo Mata da Corda, indicando a intensa ação do intemperismo nesses solos.

Os altos teores de alumínio extraível associados a baixa atividade da argila no RLd, além da alta saturação por alumínio (m) e pela baixa saturação por bases, conferiram a esse solo o caráter aluminico, baseado nos resultados dos horizontes C, de acordo com Santos et al. (2013).

A CTC efetiva (t) dos Latossolos varia entre baixo e médio, de acordo com Alvarez et al. (1999), com exceção dos horizontes A do LVd e do LVAd. As diferenças desses horizontes para o restante dos solos estão relacionadas com a ação da matéria orgânica.

A CTC total (T) dos solos está classificada entre médio e bom, com exceção do RLM e do horizonte A do LVAd, classificados como muito bom (ALVAREZ et al., 1999). No caso do Neossolo, a riqueza em nutrientes derivados da rocha de origem explica seu alto valor para a CTC total, e no caso do LVAd, a explicação é dada pelo horizonte húmico, responsável pela disponibilização de nutrientes.

Na Tabela 7 é possível observar que os valores de carbono orgânico no RLM estão associados à riqueza de nutrientes do solo. O fósforo disponível nesse solo, extraído com o Mehlich-1, apresentou valores muito altos, ligados ao material de origem. De acordo com Melo (2012), os elevados teores de fosfato encontrados para a região de Patos de Minas e Presidente Olegário, áreas próximas a Lagoa Formosa, estão relacionados com as rochas da sequência vulcanoclástica do Grupo Mata da Corda, onde há a ocorrência de injeções clásticas e microveios ricos em P_2O_5 que são resultados de processos hidrotermais ou intempéricos. Seer, Moraes e Fogaça (1989) já abordavam a química dessas rochas vulcânicas, onde os valores de P_2O_5 são compatíveis com os das rochas ultrapotássicas. O estudo de Rolim Neto et al. (2009) também encontrou altos valores de fósforo disponível para solos do Alto Paranaíba, relacionados às apatitas das rochas ígneas e vulcânicas do Triângulo Mineiro.

Os altos valores de carbono orgânico também no horizonte A do LVAd possibilitaram a sua caracterização como horizonte A húmico. Sua formação provavelmente se associa ao relevo plano e ao clima ameno da região por estar localizado nas cotas mais altas do município. O clima mais frio permite o acúmulo da matéria orgânica, além de desacelerar o processo de decomposição, o que também explica os valores considerados muito bons para o fósforo disponível (ALVAREZ et al., 1999).

No CXbd e no RLd a porcentagem de carbono orgânico é baixa, resultado da sua baixa fertilidade natural e pela espessura desses solos, que por não serem muito profundos, não favorecem a instalação da vegetação.

Os valores de fósforo remanescente (P rem) para os solos de Lagoa Formosa mostram alta capacidade de adsorção desse elemento, de acordo com a Tabela 7. Os Latossolos, no geral,

apresentam baixo fósforo disponível e alta capacidade de adsorção desse elemento, de acordo com os resultados do P rem.

O ferro disponível extraído com Mehlich-1, de acordo com Alvarez et al. (1999), apresentou valores classificados como altos para CXbd, RLd, LVwf e LVd. No caso do Cambissolo, esses teores de ferro estão elevados em todos os horizontes, provavelmente relacionados às coberturas terciárias que estão no topo da paisagem de onde estão localizados esses solos. Como apontado por Sgarbi et al. (2001) e em Uhlein et al. (2011a), as coberturas terciárias são resultantes da regressão de formas de relevo tabular elevado. Essas coberturas podem ser tanto derivadas de arenitos quanto da ação intempérica das rochas vulcânicas e podem ter existido sobre a Formação Lagoa Formosa. O intemperismo desses sedimentos possibilitou a presença de ferro nessas rochas metassedimentares, sendo liberadas quando da gênese dos solos, assim como o chumbo. Dessa forma, a ação intempérica sobre esses materiais deve ter sido responsável pelo aumento dos valores de ferro para essas áreas. Além disso, na Formação Lagoa Formosa existem jaspilitos, que são formações ferríferas que podem ter sido formados pela precipitação de hematita e jaspe em condição de oceano ferruginoso ou também pela erosão do substrato máfico associado às atividades hidrotermais sofridas pelas rochas dessa formação (UHLEIN et al., 2011a; UHLEIN et al., 2011b).

Assim como no CXbd, o RLd também apresenta valores de ferro elevados, sendo a maior proporção obtida em relação às outras amostras, e também devem estar relacionadas aos jaspilitos da Formação Lagoa Formosa. Além disso, podem ser encontrados siltitos ferruginosos nessa formação, o que também explicariam os altos valores de ferro.

No caso do LVAd, os teores de ferro são considerados muito baixos. Esses valores estão relacionados aos sedimentos que possibilitaram a formação da camada laterítica que dá origem a esses solos, onde houve a concentração do ferro, e essa camada que impediu a lixiviação desse elemento. Comparando aos outros Latossolos, o ferro está em pequenas quantidades, justamente pela intensa lixiviação sofrida por esses solos, mesmo aquele desenvolvido sobre o Grupo Mata da Corda. Esse solo, que é o LVwf, apresentou os maiores valores de manganês das amostras analisadas, especialmente para o horizonte A. Sgarbi (2011b) aponta a presença de manganês nos kamafugitos do Grupo Mata da Corda, principalmente associado aos piroxênios e olivinas. Também nesse solo ocorrem os maiores valores de cobre observados para as amostras.

Tabela 6 - Resultados das análises químicas dos solos de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH		Δ pH	Ca	Mg	K	Na	H + Al	Al ³⁺	SB	T	t	V	m
		H ₂ O	KCl												
CXbd - Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico															
A	0 - 5	5,04	3,84	-1,20	0,17	0,01	0,23	0,01	6,44	3,40	0,41	6,85	3,81	6,03	89,17
Bi	5 - 30	5,11	3,94	-1,17	0,00	0,00	0,13	0,01	5,58	2,70	0,14	5,72	2,84	2,51	94,95
C1	30 - 70	5,15	3,97	-1,18	0,00	0,00	0,09	0,01	5,05	2,50	0,09	5,14	2,59	1,83	96,36
C2	70 - 115	5,25	3,92	-1,33	0,07	0,01	0,09	0,01	5,01	2,60	0,18	5,19	2,78	3,50	93,48
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico															
A	0 - 40	5,84	4,42	-1,42	20,49	5,63	0,82	0,10	10,67	0,30	27,05	37,72	27,35	71,72	1,11
C1	40 - 65	5,85	4,64	-1,21	19,99	6,75	0,30	0,10	9,14	0,30	27,14	36,29	27,45	74,80	1,11
C2	65 - 110 +	5,95	4,59	-1,36	25,77	15,55	0,31	0,10	7,47	0,15	41,73	49,19	41,88	84,82	0,36
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico															
A	0 - 20	4,86	3,62	-1,24	1,17	0,81	0,26	0,02	7,14	4,40	2,26	9,40	6,66	24,02	66,09
C1	20 - 60	4,96	3,64	-1,32	0,96	0,71	0,26	0,02	8,00	7,10	1,95	9,95	9,05	19,58	78,48
C2	60 - 90	4,86	3,74	-1,12	0,47	0,31	0,20	0,01	7,29	6,70	0,97	8,27	7,67	11,77	87,32
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico															
A	0 - 20	5,27	4,6	-0,67	0,99	0,70	0,15	0,00	6,59	0,40	1,85	8,44	2,25	21,91	17,79
A/B	20 - 52	5,39	4,71	-0,68	0,02	0,00	0,05	0,01	5,87	0,30	0,07	5,94	0,37	1,24	80,31
Bw1	52 - 97	5,78	5,56	-0,22	0,51	0,31	0,03	0,00	4,30	0,10	0,86	5,17	0,96	16,70	10,39
Bw2	97 - 130+	5,57	5,78	0,21	0,00	0,00	0,03	0,01	3,98	0,10	0,05	4,03	0,15	1,18	67,73
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico															
A	0 - 20	5,27	4,07	-1,20	2,29	1,01	0,36	0,01	6,22	1,30	3,66	9,88	4,96	37,07	26,20
B/A	20 - 60	5,12	3,99	-1,13	1,70	0,84	0,11	0,00	5,98	1,90	2,65	8,63	4,55	30,70	41,77
Bw	60+	5,06	4,03	-1,03	0,71	0,44	0,12	0,01	5,26	1,40	1,28	6,54	2,68	19,58	52,25
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico															
A	0 - 30	5,85	4,39	-1,46	6,81	0,85	1,63	0,14	16,00	0,30	9,43	25,44	9,74	37,09	3,13
Bw	30 - 140	5,08	4,24	-0,84	2,23	0,28	0,03	0,05	7,77	0,30	2,59	10,36	2,89	24,99	10,53
C	140 - 160+	4,90	4,17	-0,73	0,96	0,54	0,01	0,03	6,10	0,30	1,54	7,63	1,84	20,15	16,54

Tabela 7 - Resultados de análises de metais pesados, fósforo e carbono orgânico das amostras dos solos de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	P rem	P	Corg
		mg/dm ³										%
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico												
A	0 - 5	3,19	11,45	132,59	0,44	0,81	0,90	0,15	4,47	4,12	0,15	0,63
Bi	5 - 30	1,87	11,13	94,29	0,30	0,66	0,87	0,15	4,55	3,32	0,00	0,00
C1	30 - 70	1,53	20,77	118,67	0,16	0,62	0,78	0,15	4,90	3,63	0,00	0,00
C2	70 - 115	1,8	18,93	141,98	0,14	0,62	0,76	0,13	3,46	5,90	0,00	0,00
RLm- Neossolo Litólico Chernossólico típico												
A	0 - 40	3,1	1,22	21,14	1,96	0,45	14,21	0,44	3,04	4,25	402,35	3,43
C1	40 - 65	4,09	13,4	17,21	0,84	0,32	5,86	0,37	2,76	1,50	353,82	1,28
C2	65 - 110 +	2,98	5,32	23,14	1,68	0,40	7,35	0,42	2,83	1,18	338,54	0,24
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico												
A	0 - 20	3,33	12,7	831,36	1,08	0,56	0,84	0,07	2,47	4,06	0,44	0,30
C1	20 - 60	1,48	7,19	197,43	0,55	0,35	0,68	0,05	2,61	4,61	0,13	0,21
C2	60 - 90	0,93	2,87	91,72	0,31	0,37	0,62	0,05	3,33	4,52	0,19	0,00
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférico típico												
A	0 - 20	8,38	110,94	105,41	1,83	0,85	1,71	0,19	0,03	3,61	0,56	1,42
A/B	20 - 52	8,48	54,03	89,84	0,74	0,89	1,19	0,19	0,18	3,19	0,42	0,83
Bw1	52 - 97	6,44	24,72	69,71	0,37	0,93	0,98	0,18	0,05	1,90	0,03	0,00
Bw2	97 - 130+	6,31	20,5	73,97	0,39	0,92	0,85	0,17	0,02	1,97	0,00	0,00
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico												
A	0 - 20	2,96	29,63	107,12	0,64	0,50	0,68	0,04	1,00	4,19	0,05	1,30
B/A	20 - 60	3,29	6,99	109,79	0,32	0,53	0,64	0,10	0,97	3,50	0,00	0,71
Bw	60+	2,45	3,21	127,97	0,27	0,40	0,20	0,00	1,01	2,77	0,00	0,00
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico												
A	0 - 30	0,64	0,07	7,8	0,63	0,38	1,71	0,37	2,97	0,12	24,98	8,82
Bw	30 - 140	1,88	11,41	6,24	0,56	0,19	1,00	0,31	3,11	1,80	2,96	1,01
C	140 - 160+	2,23	4,11	7,49	0,35	0,27	0,93	0,28	2,49	3,96	1,04	0,24

Os valores de zinco variam de muito baixo a bom (ALVAREZ et al., 1999), com destaque para o horizonte A do LVwf, e para todo o RLm. Os valores de cromo e níquel estão provavelmente relacionados aos kamafugitos do Grupo Mata da Corda (SGARBI, 2011b). A presença desses elementos em solos não desenvolvidos dessas rochas básicas deve estar associada à ação intempérica que atuou sobre elas. Assim como esses elementos, o cádmio provavelmente está associado ao zinco e aos magmatismos do Cretáceo, apresentando geralmente valores baixos para as amostras analisadas, com exceção do LVAd e do RLm.

4.3. Caracterização Mineralógica

Os resultados para os óxidos de ferro, silício, manganês, alumínio e titânio para as amostras de argila dos solos determinadas pelo ataque sulfúrico e pela fluorescência de raios-X estão elencados na Tabela 8.

Com os resultados do ataque sulfúrico para os óxidos de ferro, foi possível classificar o Latossolo Vermelho desenvolvido sobre as rochas do Grupo Mata da Corda como o LVwf, pois apresentou teores de Fe_2O_3 entre 180 e 360 g kg^{-1} . Os resultados da Tabela 8 ainda mostram que esse solo é o que possui maior proporção desse óxido. As rochas ultrabásicas desse grupo possuem altos valores de ferro e óxido de titânio, de acordo com Sgarbi (2011b). Na Tabela 8 é possível observar o aumento desses óxidos junto ao ferro, ou seja, amostras mais ricas em ferro são também mais ricas em titânio. Esses elementos aparecem em maior proporção os solos derivados do Grupo Mata da Corda e das Coberturas Terciárias, que podem possuir parte dos sedimentos provenientes das rochas vulcânicas.

Os altos valores de titânio mostrados na Tabela 8 também estão associados com as rochas do Grupo Mata da Corda, principalmente com as perovskitas dos kamafugitos desse grupo, como nos solos RLM, LVwf e LVAd. O LVd apresenta menores teores de titânio quando em comparação às outras classes citadas porque o seu material de origem é a Cobertura Elúvio-Coluvionar do Terciário, que pode conter sedimentos com titânio, mas em menor escala. Os valores mais elevados desse elemento para o LVAd podem ser explicados pela proximidade com as rochas do Grupo Mata da Corda.

Os maiores valores de alumínio para os Latossolos podem estar associados a substituição isomórfica desse elemento nas camadas octaédricas dos minerais silicatados, o que é facilitado pelo material de origem, que é subsaturado em sílica e que pode apresentar valores altos a médios de alumínio das rochas (SGARBI, 2011b). Além disso, a Tabela 8 mostra os resultados do ataque sulfúrico e da fluorescência de raios-X para a fração argila (Tabela 9). Na fração argila há mais óxidos de alumínio do que na TFSA.

Os óxidos de manganês estão provavelmente associados às olivinas das rochas do Grupo Mata da Corda, e, em menor quantidade, associados aos piroxênios (SGARBI, 2011b), mas não é um elemento de grande destaque para esse grupo, o que refletiu na gênese dos solos.

Tabela 8 - Resultados do ataque sulfúrico e da fluorescência de raios-X para as amostras na fração argila dos solos de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Ataque Sulfúrico					Fluorescência de Raios-X				
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
		%									
Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico											
A	0 - 5	42,09	12,56	0,03	27,48	0,90	39,97	14,14	0,04	25,21	1,33
Bi	5 - 30	40,99	9,89	0,04	24,19	0,56	39,61	12,89	0,05	23,54	1,10
C1	30 - 70	37,15	8,27	0,05	22,69	0,36	41,42	12,47	0,07	21,94	0,99
C2	70 - 115	33,81	10,48	0,04	22,09	0,28	43,87	12,32	0,06	22,71	0,92
Neossolo Litólico Chernossólico típico											
A	0 - 40	38,41	19,55	0,18	11,00	3,16	39,90	21,68	0,32	10,99	6,62
C1	40 - 65	45,38	12,57	0,15	11,69	2,58	30,69	23,05	0,32	7,62	5,26
C2	65 - 110 +	40,67	14,29	0,14	11,14	1,83	43,83	18,86	0,24	11,45	3,27
Neossolo Litólico Distrófico típico											
A	0 - 20	37,88	9,08	0,02	21,08	0,40	45,06	11,88	0,03	23,70	0,86
C1	20 - 60	40,98	8,51	0,02	25,60	0,34	41,44	8,42	0,02	22,76	0,75
C2	60 - 90	41,82	7,04	0,02	20,00	0,16	40,93	8,99	0,02	22,54	0,74
Latossolo Vermelho Acriférico típico											
A	0 - 20	9,92	31,05	0,07	31,33	6,62	10,56	39,98	0,13	27,76	10,58
A/B	20 - 52	9,01	29,13	0,07	29,32	6,28	10,63	40,95	0,15	28,44	10,23
Bw1	52 - 97	9,24	29,98	0,07	29,46	6,45	10,83	40,86	0,14	27,42	10,22
Bw2	97 - 130+	9,57	29,39	0,06	28,95	6,04	9,16	41,30	0,12	27,05	10,35
Latossolo Vermelho Distrófico típico											
A	0 - 20	35,51	15,76	0,04	28,25	1,86	31,70	23,26	0,08	27,87	3,04
B/A	20 - 60	31,13	17,39	0,04	27,96	1,65	29,50	18,95	0,07	25,73	2,62
Bw	60+	23,95	14,19	0,04	22,39	1,28	29,20	24,30	0,07	24,89	3,00
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico											
A	0 - 30	17,68	12,61	0,07	21,22	3,37	21,32	17,04	0,14	19,33	5,89
Bw	30 - 140	30,17	18,07	0,03	28,72	4,66	23,48	25,61	0,04	21,89	8,61
C	140 - 160+	38,84	16,41	0,02	29,03	4,83	32,77	17,13	0,02	26,44	7,69

Os valores de óxidos de ferro para a TFSA, como mostra a Tabela 9, são menores do que os valores na fração argila, confirmando o que Ker (1997) aponta sobre o predomínio desses óxidos na fração argila, fato essencial para a caracterização de Latossolos.

Os resultados para amostras de TFSA de silício são maiores para a análise com fluorescência de raios-X em comparação ao ataque sulfúrico. Na fração argila, essa diferença não é tão grande quanto foi constatada na TFSA. Isso pode ser explicado pela presença de quartzo na TFSA, enquanto que na fração argila esse mineral é praticamente ausente. O ataque sulfúrico não ataca o quartzo, razão pela diferença nos valores para o silício. A diferença dos valores para esse elemento é observada principalmente nos solos mais jovens, que são o CXbd, RLm e o RLd.

Tabela 8 - Resultados do ataque sulfúrico e da fluorescência de raios-X para as amostras de TFSA dos solos de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Ataque Sulfúrico							Fluorescência de Raios-X				
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO %	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO %	Al ₂ O ₃	TiO ₂
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico													
A	0 - 5	23,85	10,80	0,02	20,49	0,77	1,98	1,48	46,33	10,53	0,03	20,35	1,71
Bi	5 - 30	27,37	6,59	0,03	16,84	0,34	2,76	2,21	47,83	8,91	0,04	19,03	1,38
C1	30 - 70	25,55	7,35	0,03	18,35	0,22	2,37	1,89	59,24	9,46	0,04	21,10	1,31
C2	70 - 115	28,63	6,71	0,02	16,04	0,15	3,03	2,40	52,54	8,04	0,03	18,16	1,03
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico													
A	0 - 40	20,97	17,55	0,27	5,80	2,74	6,14	2,10	33,23	21,96	0,50	9,08	9,05
C1	40 - 65	24,77	14,55	0,22	7,60	2,50	5,54	2,50	40,86	23,14	0,47	12,42	7,61
C2	65 - 110 +	21,43	19,94	0,24	7,19	3,12	5,07	1,83	35,98	30,33	0,47	9,38	8,44
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico													
A	0 - 20	29,79	9,07	0,02	18,81	0,33	2,69	2,06	47,23	8,16	0,01	16,76	0,99
C1	20 - 60	36,54	7,85	0,01	21,97	0,36	2,83	2,30	45,42	7,48	0,01	18,93	1,00
C2	60 - 90	33,49	7,86	0,01	21,85	0,34	2,61	2,12	51,63	8,77	0,01	21,54	1,09
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico													
A	0 - 20	7,30	30,03	0,11	23,92	5,02	0,52	0,29	9,75	38,98	0,21	23,03	13,74
A/B	20 - 52	7,20	28,46	0,12	24,32	5,31	0,50	0,29	8,94	36,58	0,20	21,03	13,12
Bw1	52 - 97	7,86	31,04	0,10	23,07	4,72	0,58	0,31	9,03	39,25	0,18	23,44	14,04
Bw2	97 - 130+	5,82	35,29	0,11	25,37	5,20	0,39	0,21	9,42	44,50	0,23	25,47	15,55
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico													
A	0 - 20	20,17	13,80	0,04	20,10	1,80	1,71	1,19	34,59	14,54	0,06	22,41	3,34
B/A	20 - 60	21,78	15,68	0,04	22,75	1,77	1,63	1,13	39,41	20,27	0,05	27,25	4,00
Bw	60+	20,26	15,08	0,04	22,58	2,01	1,53	1,07	37,91	18,34	0,05	25,30	3,85
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico													
A	0 - 30	14,84	16,56	0,10	15,44	2,55	1,63	0,97	18,21	20,08	0,20	16,24	7,47
Bw	30 - 140	18,67	28,02	0,04	19,81	4,24	1,60	0,84	27,36	36,26	0,08	22,12	10,26
C	140 - 160+	24,35	20,36	0,04	22,61	4,66	1,83	1,16	31,08	27,29	0,05	25,88	11,55

Os valores de manganês são similares para as duas análises e tanto para a fração argila quanto para a TFSA. Em geral, o titânio é mais presente na TFSA do que nas argilas, provavelmente por estarem relacionados à presença de minerais primários nas frações de areia.

Os baixos valores de K_i e K_r para o LVwf caracterizam esse solo como gibbsítico e oxidico. É o único dos Latossolos da área que apresentaram valores para que fossem assim caracterizados. Esses índices para o LVd diferem bastante quando obtidos pelo ataque sulfúrico e pela fluorescência de raios-X, principalmente para o índice K_i . Isso porque na análise da fluorescência de raios-X, o silício do quartzo também é quantificado, aumentando os valores identificados desse elemento, e conseqüentemente elevando o K_i . Considerando apenas os valores determinados pelo ataque sulfúrico, o LVd é considerado caulínico. Os índices K_i e K_r para o LVAd também o caracterizam como caulínico. De acordo com Motta, Baruqui e Santos (2004), solos oxidicos e gibbsíticos apresentam valores de K_i e K_r menores que 0,75, e solos caulínicos apresentam valores para esses índices acima de 0,75.

A Tabela 10 mostra a determinação de outros elementos pela fluorescência de raios-X que podem explicar resultados obtidos nas análises químicas realizadas anteriormente. O de maior destaque é P_2O_5 , com valores muito altos em todas as amostras de solo e para as frações argila e TFSA, exceto para o RLd nas argilas.

Na Tabela 6 é possível observar altos valores de bases trocáveis para o RLM, como discutido anteriormente, e na Tabela 10, os resultados obtidos para os óxidos das bases mostram que o material é fonte para a disponibilidade desses nutrientes para o solo. É importante salientar que as análises químicas são realizadas na TFSA, onde os valores dessas bases são maiores do que na fração argila obtidos pela fluorescência de raios-X.

Os valores obtidos na TFSA e na argila indicam que esses a maioria dos nutrientes podem estar sendo lixiviados ou ainda absorvidos pelas plantas e outros organismos vivos, sendo menos adsorvidos na fração mais fina do solo, e essa dinâmica é melhor observada nos solos mais jovens. Nos Latossolos, não há muitos dos nutrientes disponíveis nas frações estudadas, o que é mais um indicativo da forte lixiviação sofrida por esses solos. A Tabela 10 mostra que os minerais presentes no solo são fonte de nutrientes, ainda que sua disponibilidade no solo não seja alta. Elementos como o sódio são mais propensos à lixiviação, e por isso não são fixados no solo, podendo existir como minerais primários, mas pouco disponíveis às plantas.

Tabela 10 - Resultados da fluorescência de raios-X para a fração argila e para a TFSA de seis perfis de solos em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Fração Argila						TFSA					
		CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PbO	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PbO
		%		%		mg dm ⁻³		%		%		mg dm ⁻³	
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico													
A	0 - 5	0,33	4,59	1,99	0,00	591,00	387,57	0,25	3,17	1,25	1,09	ND	188,79
Bi	5 - 30	0,34	4,83	1,96	1,62	227,87	153,12	0,26	3,52	1,12	1,47	256,30	150,22
C1	30 - 70	0,38	5,43	2,06	2,11	226,11	236,23	0,33	4,28	1,44	2,18	397,41	289,31
C2	70 - 115	0,42	6,11	2,02	0,65	496,29	275,30	0,28	3,80	1,45	1,37	632,28	201,83
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico													
A	0 - 40	0,70	4,01	1,67	2,05	9705,37	616,01	2,78	3,81	1,65	0,09	13727,53	590,72
C1	40 - 65	0,58	4,51	1,70	4,75	3668,67	506,87	2,33	4,51	3,62	2,59	14032,69	453,81
C2	65 - 110 +	0,73	2,36	3,17	1,73	8017,50	623,84	5,58	2,04	4,01	0,00	23809,85	796,94
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico													
A	0 - 20	0,39	5,33	2,26	1,65	ND	236,24	0,28	3,43	1,38	0,75	ND	99,34
C1	20 - 60	0,38	5,42	2,10	2,05	ND	219,71	0,35	4,26	1,24	1,86	586,48	147,26
C2	60 - 90	0,38	5,29	1,77	1,27	ND	200,17	0,37	4,72	1,87	1,72	275,21	190,82
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico													
A	0 - 20	0,07	0,24	0,66	2,56	5823,51	1611,45	0,08	0,20	0,00	ND	5090,28	1579,48
A/B	20 - 52	0,07	0,20	0,13	2,31	6337,65	1925,48	0,04	0,14	0,54	2,22	4403,57	1356,21
Bw1	52 - 97	0,07	0,17	0,39	1,93	4229,72	1781,93	0,05	0,14	0,02	0,75	4681,20	1495,72
Bw2	97 - 130+	0,08	0,18	0,39	2,50	4449,68	1769,81	0,04	0,17	0,29	1,96	4936,96	1491,15
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico													
A	0 - 20	0,12	1,06	1,22	2,20	420,19	592,02	0,14	0,90	1,01	1,43	1168,69	347,10
B/A	20 - 60	0,14	0,92	1,22	2,22	739,33	619,10	0,12	1,00	1,12	2,16	1128,28	647,88
Bw	60+	0,12	0,98	1,20	2,86	677,41	647,20	0,09	0,92	1,43	0,88	ND	429,96
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico													
A	0 - 30	0,14	0,07	0,22	0,74	8511,34	437,42	0,31	0,18	0,07	0,05	9157,25	613,13
Bw	30 - 140	0,05	0,03	0,00	3,40	1916,26	784,90	0,11	0,06	0,64	1,04	5183,45	1232,16
C	140 - 160+	0,04	0,04	0,60	1,81	1981,19	351,63	0,03	0,05	0,38	1,70	5475,66	921,86

O chumbo apresenta altos valores, observados na Tabela 10, e seus maiores teores estão relacionados com os solos que se desenvolveram sobre as rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda. Esses valores explicam os altos teores de chumbo disponível determinado pelo Mehlich-1, como visto na Tabela 7.

É notável a variação dos valores do fósforo de acordo com os materiais de origem de cada solo. Seus valores são maiores nos solos derivados do Grupo Mata da Corda, ou seja, o RLM e o LVwf, e para o LVAd, cuja gênese se deu sobre as Coberturas Detrito-Lateríticas do Terciário, que, de acordo com Uhlein et al. (2011a), podem ser confundidos com produtos do intemperismo das rochas vulcânicas, e contendo relictos dessas em sua composição. O fósforo é geralmente pouco disponível nos solos amostrados, como é possível observar na Tabela 7. Os valores para fósforo no LVAd ainda é maior no horizonte A, que é húmico, sendo justificado pela ação da matéria orgânica.

A Tabela 11 mostra resultados de fósforo obtidos por diferentes análises para as amostras dos perfis. Os resultados obtidos pelo espectrofotômetro de emissão óptica com plasma e pela fluorescência de raios-X explicam a alta disponibilidade do fósforo no RLM. Na fração argila das amostras, o teor desse elemento é menor, indicando o mesmo apontado na Tabela 10, ou seja, que parte desse elemento não está sendo adsorvido na fração argila. Outro ponto importante a ser observado na Tabela 11 é que mesmo em solos com pouca disponibilidade de fósforo, esse elemento existe não disponibilizado nas amostras. A Tabela 10 mostra os valores elevados de P_2O_5 em todas as amostras.

Mesmo nos solos mais pobres em fósforo, como o CXbd, RLd e LVd, nota-se que esse elemento existe como fonte. Solos derivados das rochas vulcânicas, como o LVwf e o RLM apresentam altos teores de fósforo nas suas amostras. O LVd é derivado de produtos do intemperismo no Terciário, que na classificação estabelecida por Uhlein et al. (2011a) corresponde às Coberturas Elúvio-Coluvionares, o que explica seus baixos teores de fósforo, assim como o CXbd e o RLd, ambos com material de origem sendo as rochas da Formação Lagoa Formosa. As Coberturas Detrito-Lateríticas também do Terciário podem conter pequenos pedaços de rochas alteradas pelo intemperismo das rochas vulcânicas, ou mesmo conservar alguns relictos que podem ser a fonte de fósforo no solo, e os maiores valores no horizonte A estão relacionados ao seu caráter húmico.

Tabela 11 - Resultados de fósforo (P) das amostras obtidos por diferentes métodos de análise para os solos de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Horizonte	Profundidade (cm)	Mehlich-1	Fluorescência de Raios-X		ICP-OES	
		TFSA	Argila	TFSA	Argila	TFSA
mg dm ⁻³						
CXbd - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico						
A	0 - 5	0,15	130,02	ND*	29,84	35,42
Bi	5 - 30	0,00	50,13	56,39	20,58	19,33
C1	30 - 70	0,00	49,75	87,43	18,47	12,80
C2	70 - 115	0,00	109,18	139,10	27,27	24,96
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico						
A	0 - 40	402,35	2135,18	3020,06	1542,41	1978,04
C1	40 - 65	353,82	807,11	3087,19	1124,64	1629,68
C2	65 - 110 +	338,54	1763,85	5238,17	1355,05	1994,25
RLd - Neossolo Litólico Distrófico típico						
A	0 - 20	0,44	ND	ND	38,97	25,71
C1	20 - 60	0,13	ND	129,03	13,87	15,54
C2	60 - 90	0,19	ND	60,55	12,82	12,49
LVwf - Latossolo Vermelho Acriférico típico						
A	0 - 20	0,56	1281,17	1119,86	719,64	624,78
A/B	20 - 52	0,42	1394,28	968,78	705,13	609,96
Bw1	52 - 97	0,03	930,54	1029,86	577,23	547,19
Bw2	97 - 130+	0,00	978,93	1086,13	552,12	514,42
LVd - Latossolo Vermelho Distrófico típico						
A	0 - 20	0,05	92,44	257,11	117,02	120,58
B/A	20 - 60	0,00	162,65	248,22	85,21	98,71
Bw	60+	0,00	149,03	ND	78,46	94,62
LVAd - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico						
A	0 - 30	24,98	1872,50	2014,59	1382,43	1094,39
Bw	30 - 140	2,96	421,58	1140,36	570,19	593,08
C	140 - 160+	1,04	435,86	1204,64	498,06	539,23

*ND: Não detectado.

Os difratogramas dos solos mais jovens da região formados sobre rochas da Formação Lagoa Formosa, que são o CXbd e o RLd, apresentaram na fração argila a presença de ilita e caulinita, como mostram as Figuras 7 e 8. Esses resultados vão de encontro ao observado por Pereira et al. (2010), onde os Cambissolos Háplicos apresentaram grande proporção de ilita e caulinita na fração argila.

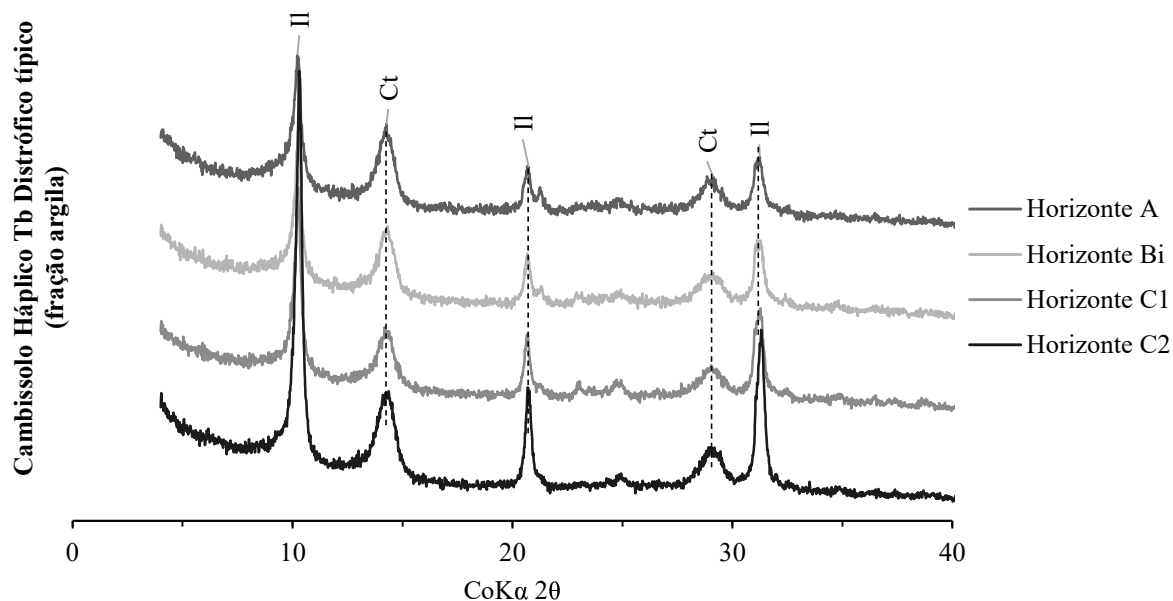


Figura 7 - Mineralogia da fração argila para CXbd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Il: ilita; Ct: caulinita).

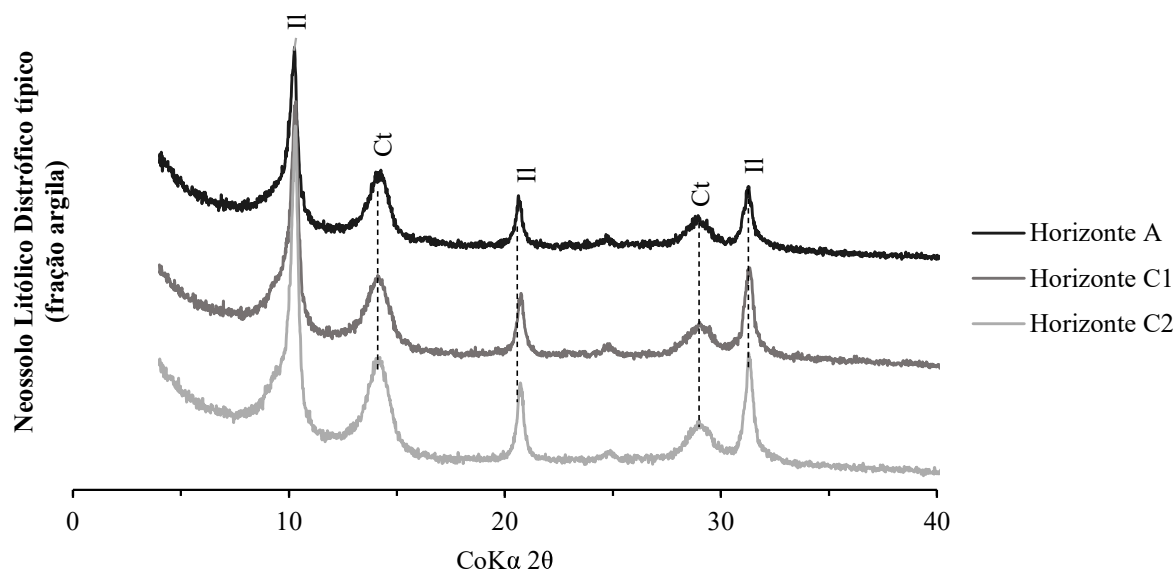


Figura 8 - Mineralogia da fração argila para RLd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Il: ilita; Ct: caulinita).

Na TFSA foram identificados picos de caulinita, quartzo e ilita para o RLd e para o CXbd. As Figuras 9 e 10 mostram os difratogramas da TFSA para o CXbd e para o RLd, respectivamente. Os valores de K_i obtidos para o CXbd de Lagoa Formosa aliados à mineralogia encontrada indicam seu pouco desenvolvimento pedológico. O quartzo encontrado

na TFSA para os dois solos desenvolvidos sobre a Formação Lagoa Formosa é justificado pela presença desse mineral em frações mais grosseiras que estão na amostra.

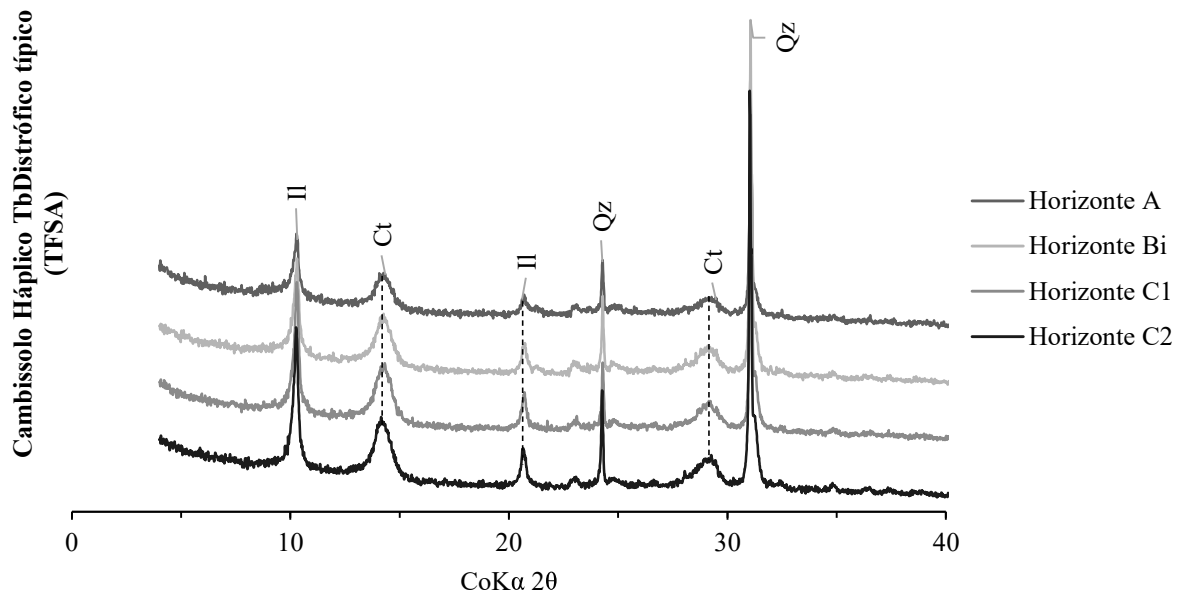


Figura 9 - Mineralogia da TFSA para CXbd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Il: ilita; Ct: caulinita; Qz: quartzo).

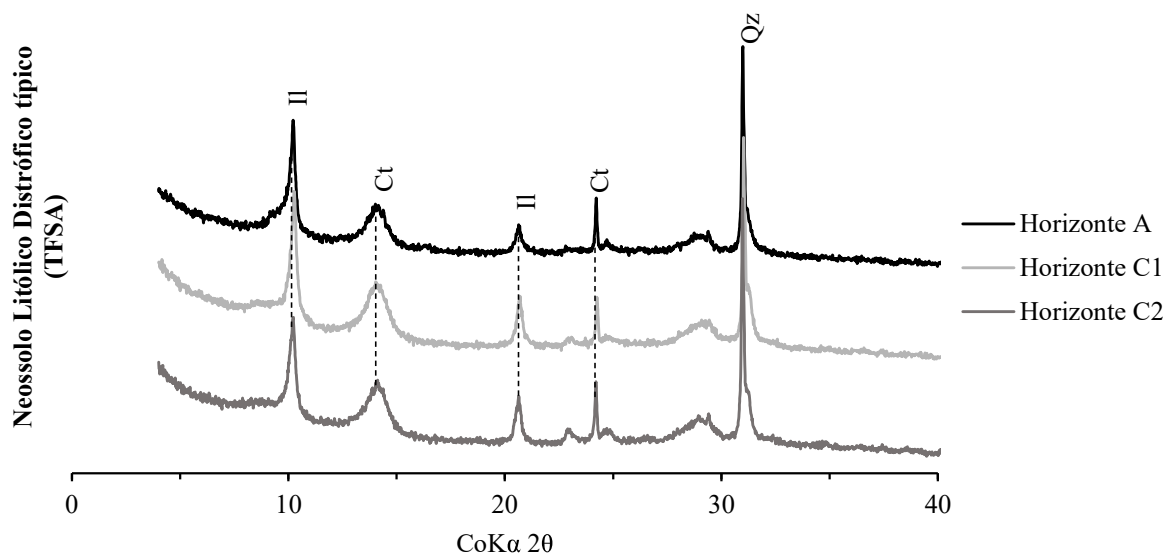


Figura 10 - Mineralogia da TFSA para RLd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Il: ilita; Ct: caulinita; Qz: quartzo).

Para os solos derivados de rochas vulcânicas, que são o LVwf e o RLM, foram encontrados anatásio na fração argila e na TFSA. Esses óxidos de titânio são minerais pesados resultados de rochas ígneas e metamórficas, e são resistentes ao intemperismo. De acordo com

Sgarbi (2011b), há titânio nas micas, proxenitos e kamaflutitos do Grupo Mata da Corda, além das perovskitas, que são compostas com altos teores de TiO_2 .

No caso do LVwf, a presença da caulinita e da gibbsita indicam o avançado estágio de intemperismo desses solos, anteriormente já discutido pela presença notável de óxidos de alumínio e silício de acordo com os resultados do ataque sulfúrico. A Figura 11 mostra o difratograma para a fração argila desses solos, e a Figura 12 mostra o difratograma da TFSA.

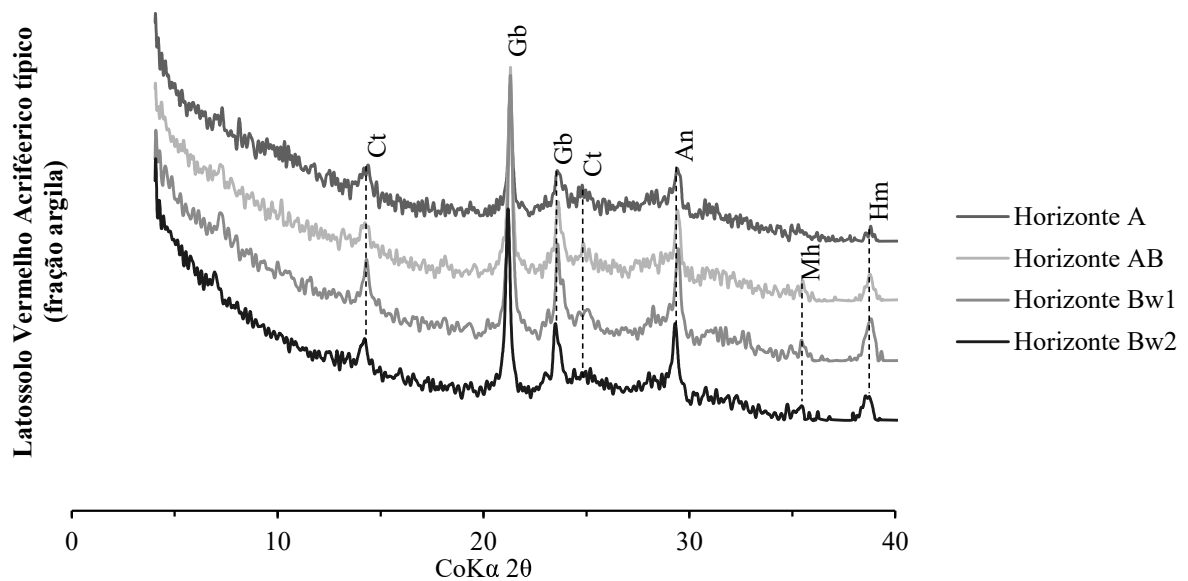


Figura 11 - Mineralogia da fração argila para LVwf em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Ct: caulinita; Gb: gibbsita; An: anatásio; Mh: maghemita; Hm: hematita).

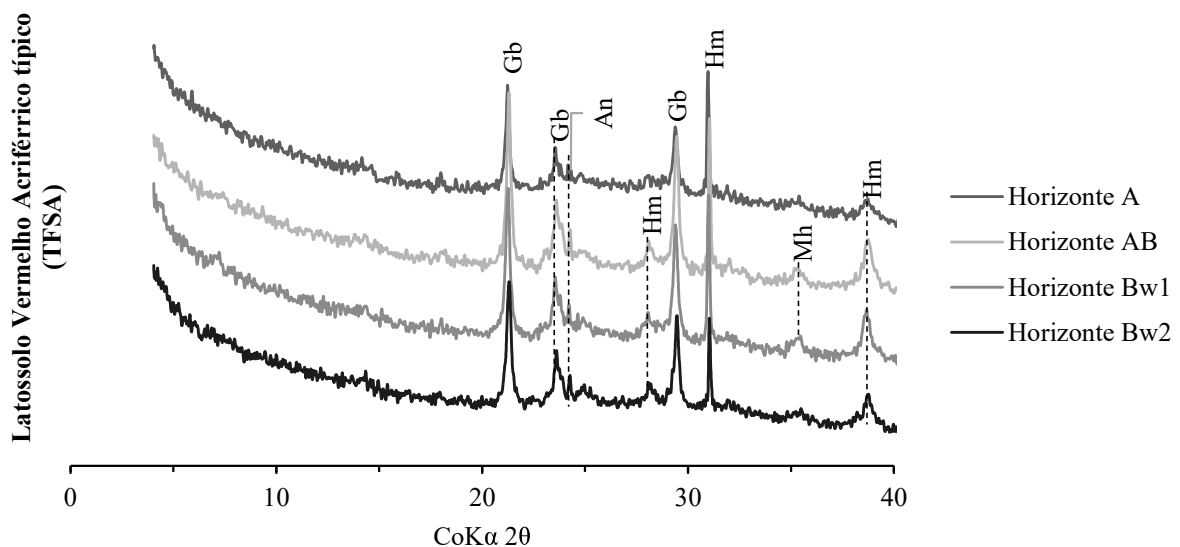


Figura 12 - Mineralogia da TFSA para LVwf em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Gb: gibbsita; An: anatásio; Hm: hematita; Mh: maghemita).

A presença da maghemita é indicador do alto magnetismo constatado em campo, além de ser mais um indicador da relação desses solos com o material de origem do Grupo Mata da Corda, já que é comum em solos desenvolvidos sobre rochas vulcânicas básicas. O estudo de Carmo (1977) sobre Latossolos da região do Alto Paranaíba também encontrou esse mineral dos perfis estudados na fração argila, assim como a predominância de gibbsita, também constatado nos difratogramas das Figuras 11 e 12. Na Figura 13, tem-se a imagem da alta atração magnética constatada em campo no LVwf. A coloração avermelhada desse solo é devida a presença da hematita, também constatada pela mineralogia e exposta no difratograma da fração argila (Figura 11) e da TFSA (Figura 12).



Figura 13 - Atração magnética constatada em campo do LVwf em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Como o RLM é um solo bastante jovem, observável até mesmo pelos valores de K_i apresentados na Tabela 9, foram encontrados mais minerais nesse perfil do que nos outros solos amostrados, tanto para a fração argila quanto para a TFSA. A fração argila apresenta ilita, anatásio, caulinita e quartzo, enquanto que na TFSA, além desses minerais, foi constatada a presença de esmectita, clorita, vermiculita, hornblenda, albita e magnetita. As rochas vulcânicas da região são ultrabásicas, com altos valores para CaO, ferro total, TiO_2 e valores altos a moderados para Al_2O_3 , Na_2O e K_2O e baixos valores de MgO, sendo que os minerais de titânio, sódio e potássio que refletem seu caráter alcalino (SGARBI, 2011b). Essa composição dos kamafugitos que explicam os minerais predominantes no RLM.

O estudo de Rolim Neto et al. (2009) apontou Cambissolos desenvolvidos na região do Alto Paranaíba que também apresentaram gibbsita e óxidos de ferro além de esmectitas e ilitas, sendo que a presença dos óxidos é explicada pelo material de origem pobre em sílica e pela rápida ação do intemperismo nesses substratos. O mesmo ocorre para o RLM de Lagoa Formosa para a existência das caulinitas em solo tão jovem. No entanto, a ausência de picos de gibbsita pode indicar que a ação do intemperismo não é tão rápida quanto a dos Cambissolos no estudo de Rolim Neto et al. (2009). O difratograma da fração argila do RLM está na Figura 14, onde se observa que os minerais como quartzo e muscovita apresentam-se no horizonte mais profundo do solo, e nos horizontes mais subsuperficiais há um predomínio apenas da ilita e do anatásio.

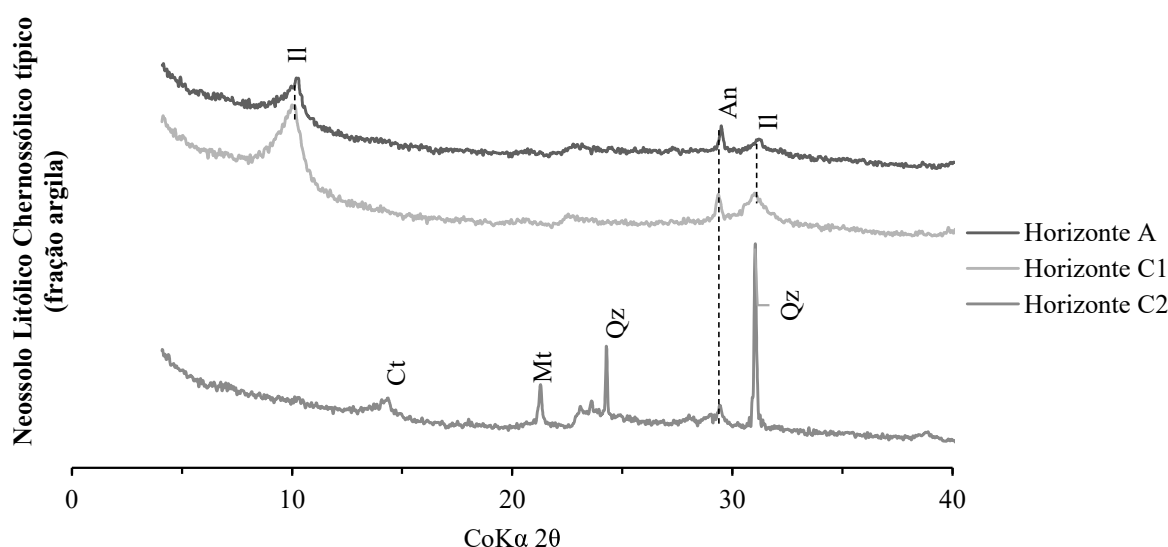


Figura 14 - Mineralogia da fração argila para RLM em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Il: ilita; An: anatásio; Ct: caulinita; Qz: quartzo)

As hornblendas identificadas no difratograma da Figura 15 para a TFSA estão provavelmente ligadas aos lamproítos das rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda, assim como as albitas estão relacionadas às kalsilitas das rochas kamafugíticas. Os lamproítos são rochas ultrapotássicas compostas por vários minerais de titânio, que também podem contribuir para os picos identificados para anatásio (SGARBI, 2011b). A kalsilita é um tipo de feldspatóide comum em rochas vulcânicas e subvulcânicas alcalino-potássicas, e é um mineral diagnóstico para as rochas kamafugíticas, de acordo com Sgarbi (2011b). Esses kamafugitos também são compostos por micas que podem ser a fonte para a formação das esmectitas, vermiculitas e cloritas presentes no RLM. As cloritas também podem estar relacionadas à hornblenda, já que são minerais primários que também são herdados da alteração desses

minerais ferromagnesianos (KAMPF, CURI, MARQUES, 2009). A presença da magnetita também confere a esse material a característica de atração magnética, assim como no LVwf, e também é derivada da alteração dos materiais dos Grupo Mata da Corda.

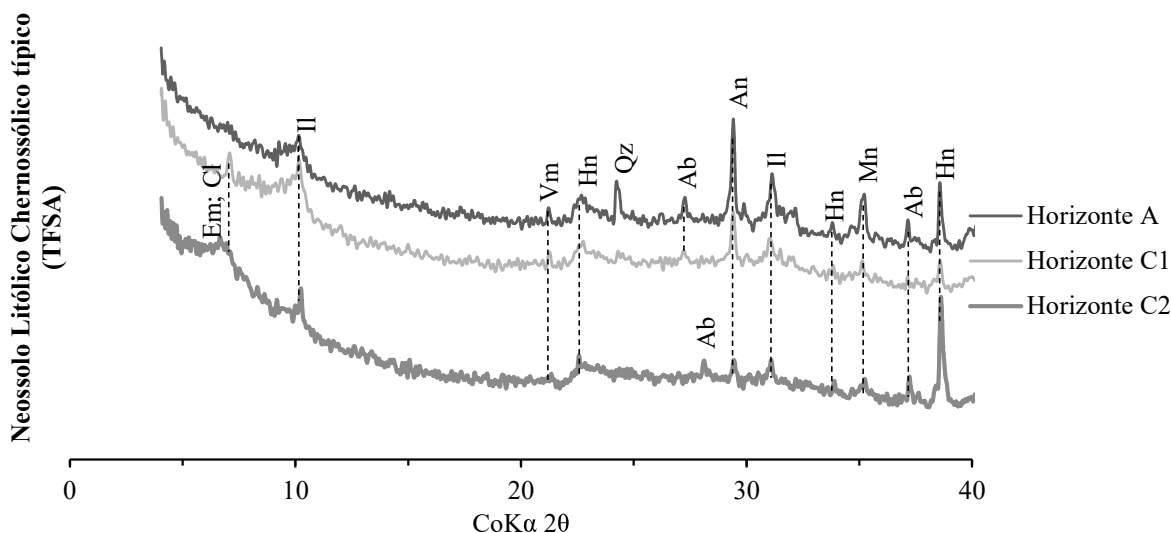


Figura 15 - Mineralogia da TFSA para RLM em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (II: ilita; Vm: vermiculita; Hn: hornblenda; Qz: quartzo; Ab: albita; An: anatásio; Mn:magnetita; Em: esmetita; Cl: clorita).

O LVd e o LVAd são derivados das coberturas terciárias da região. O LVd é derivado das Coberturas Elúvio-Coluvionares, e o LVAd é derivado das Coberturas Detrito-Lateríticas. Dessa forma, esses Latossolos apresentam poucas diferenças mineralógicas entre si e apresentam predomínio de caulinita.

No caso do LVAd, foi identificada a presença de anatásio em sua composição, o que é um indicativo da relação dessas coberturas com sedimentos das rochas vulcânicas. O difratograma da fração argila para esse solo está exposto na Figura 16. Esse solo também é composto de hematita e goethita, e a caulinita presente confirma os valores de Ki encontrados (Tabela 9). Tanto para a fração argila quanto para a TFSA foram encontrados os mesmos minerais. O difratograma da TFSA desse solo está exposto na Figura 17.

As coberturas coluvionares e eluvionares onde se desenvolveram o LVd são compostas de sedimentos resultados de retrabalhamento das unidades pré-cambrianas e fanerozóicas (SGARBI et al., 2001) e são mais pobres quimicamente do que as Coberturas Detrito-Lateríticas. A presença da gibbsita nesse solo indica que ele é mais intemperizado do que o LVAd. De acordo com o Ki encontrado para o LVd (Tabela 9), esse solo possui caráter caulínítico, o que é corroborado pelos picos desse mineral encontrado no difratograma da fração

argila, exposto na Figura 18, e na TFSA, que está na Figura 19. O óxido de ferro presente é a hematita, responsável pela coloração do solo. Na TFSA o difratograma apontou a presença de quartzo, provavelmente relacionado às areias presentes no material de origem desses solos, oriundos do intemperismo dos arenitos (UHLEIN et al., 2011a), e também apontou um único pico para ilita no horizonte A, podendo ser um resquício de mineral primário ainda não intemperizado, já que não ocorre nos outros horizontes e também não ocorre na fração argila.

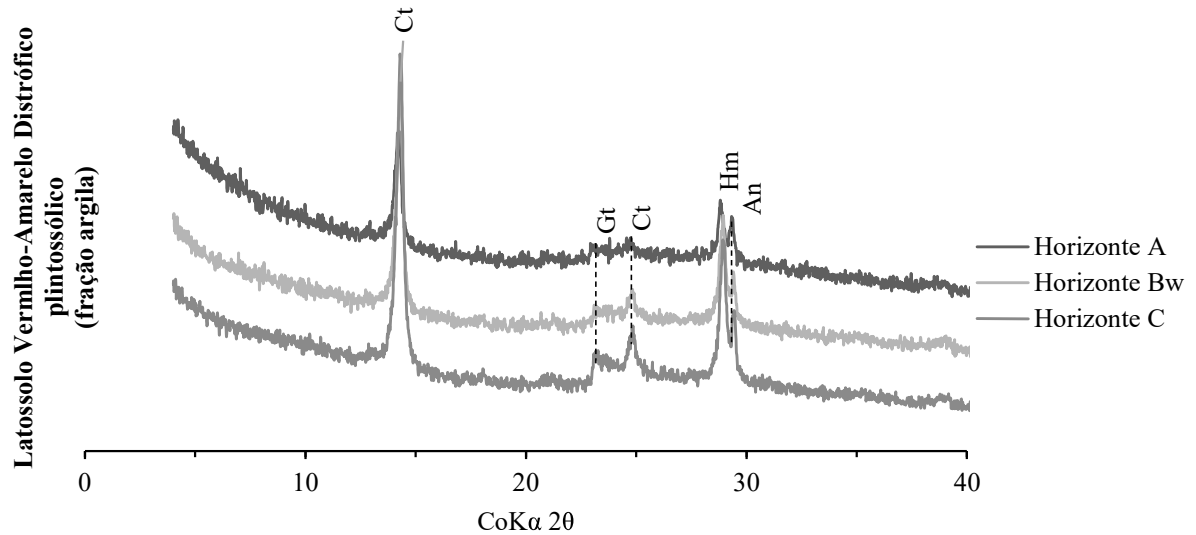


Figura 16 - Mineralogia da fração argila para LVAd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Ct: caulinita; Gt: goethita; Hm: hematita; An: anatásio).

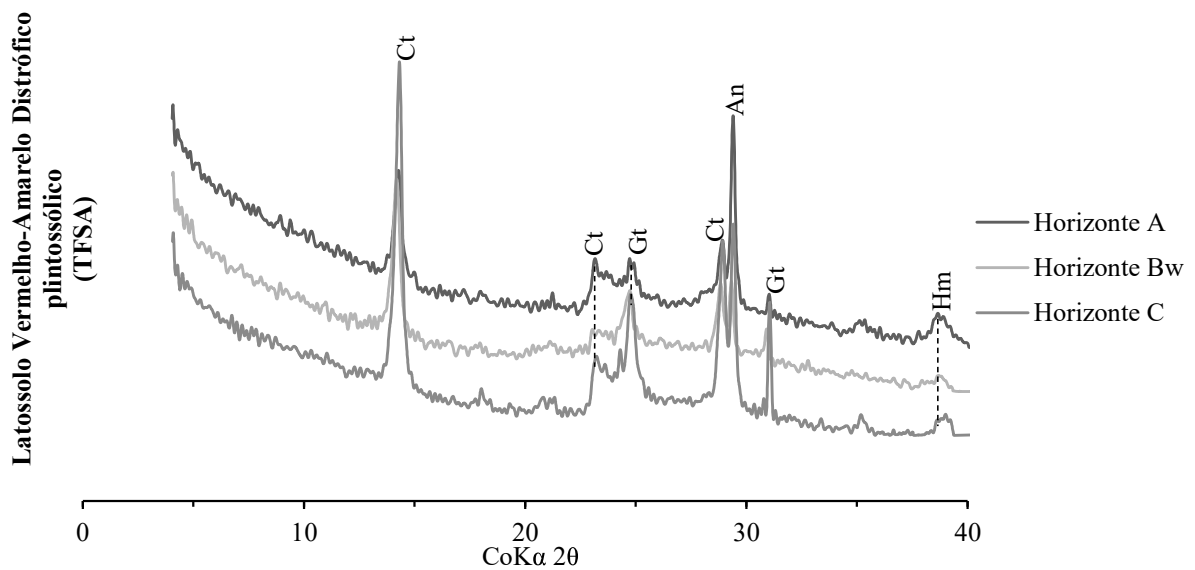


Figura 17 - Mineralogia da TFSA para LVAd em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Ct: caulinita; Gt: goethita; An: anatásio; Hm: hematita).

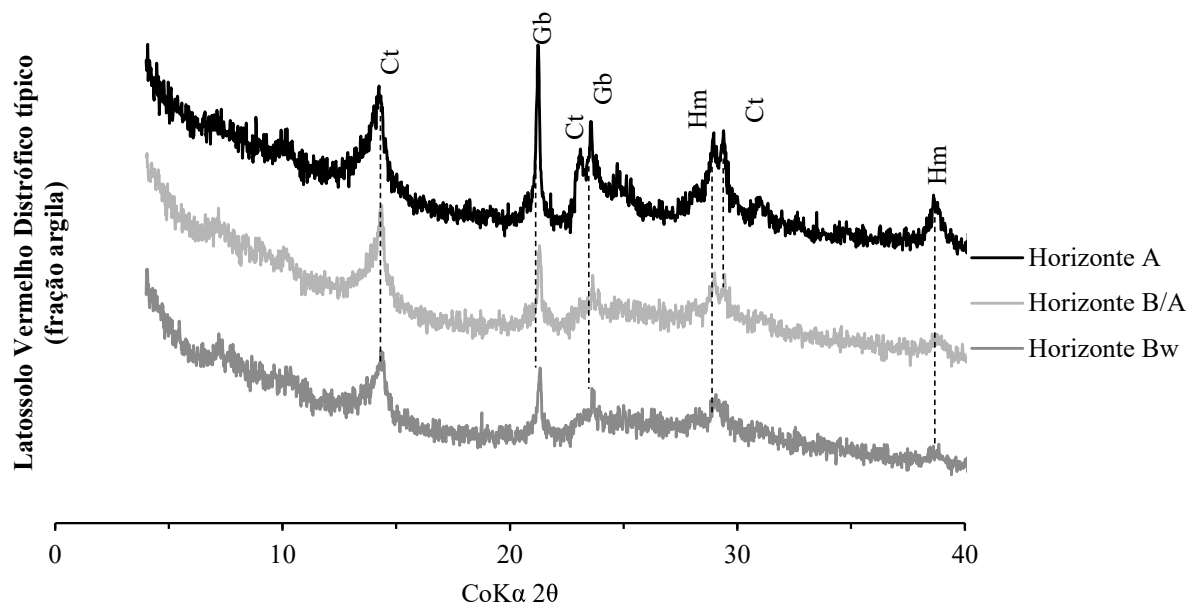


Figura 18 - Mineralogia da fração argila para LVD em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Hm: hematita).

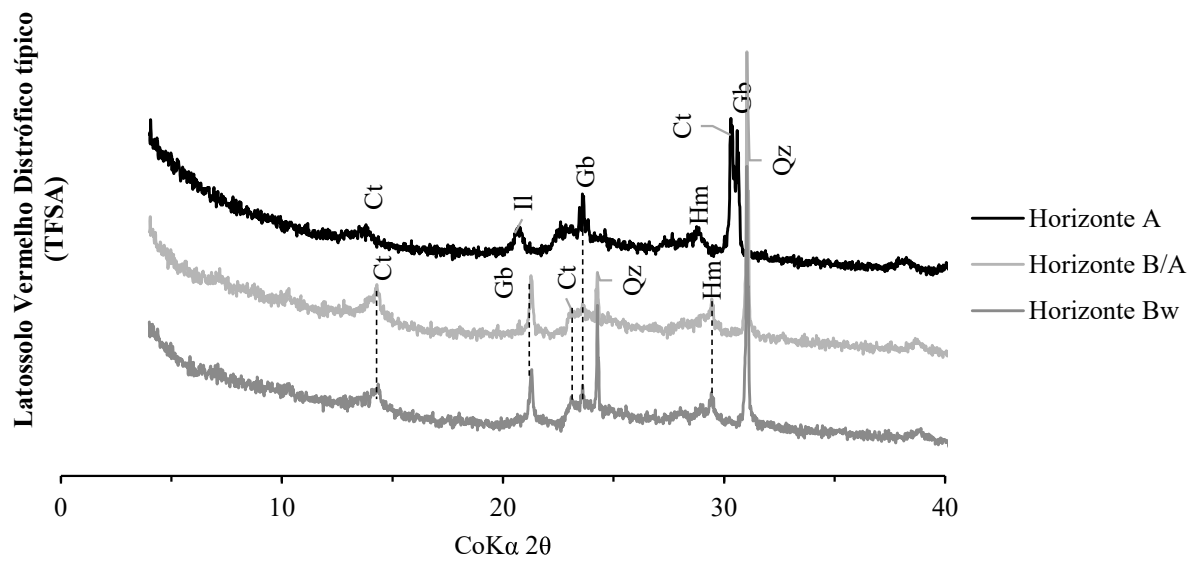


Figura 19 - Mineralogia da TFSA para LVD em Lagoa Formosa, Minas Gerais. (Ct: caulinita; Il: ilita; Gb: gibbsita; Hm: hematita; Qz: quartzo).

5. CONCLUSÕES

1. Os solos de Lagoa Formosa estão intimamente relacionados às unidades geológicas presentes no município, onde cada litologia influencia suas características físicas, químicas e mineralógicas.

2. As rochas da Formação Lagoa Formosa são compostas majoritariamente por siltitos e diamictitos no município, ambos com predomínio de argila e silte, que dão origem a solos argilosos com os altos teores de silte, até mesmo por serem menos pedogeneticamente desenvolvidos. São pobres quimicamente, já que o material de origem não apresenta muitos nutrientes. Estão associados às vertentes do município e por isso desenvolvem Cambissolos em declives mais suaves, e Neossolos nas áreas mais íngremes.

3. O Grupo Mata da Corda, composto por rochas vulcânicas e subvulcânicas ultrabásicas, possibilita a formação de solos mais férteis, sendo as condições de relevo o mais importante para sua gênese. Por serem rochas susceptíveis ao intemperismo, Latossolos sobre esse material de origem só se desenvolvem nas suas áreas mais planas, permitindo a ação do intemperismo. Mesmo com rochas ricas em nutrientes, não há alta fertilidade natural como consequência da ação intempérica. Em relevos mais íngremes, a formação de Neossolos é favorecida, e a alta fertilidade natural permite o desenvolvimento de horizonte A mais rico em bases, que é responsável pelo desenvolvimento de vegetação mesmo em maiores declividades.

4. As Coberturas Detrito-Lateríticas criaram um platô no município que permitiu a gênese de Latossolos, que, por estarem nas cotas mais elevadas do município, podem propiciar a formação de horizontes A mais espessos, favorecendo o acúmulo da matéria orgânica. Porém, pelo material de origem ser composto por sedimentos das rochas vulcânicas, não apresentam tantos nutrientes disponíveis quanto os Latossolos desenvolvidos sobre o Grupo Mata da Corda.

5. As Coberturas Elúvio-Coluvionares estão sobrepostas principalmente às rochas da Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí, e por serem resultado de retrabalhamento de rochas do Pré-Cambriano e do Fanerozóico e também dos arenitos do Grupo Areado, são os que mais apresentam areia na sua composição granulométrica. Os sedimentos não são ricos em nutrientes, e por isso originam solos pouco férteis. Como essas coberturas estão dispostas em relevos mais planos, favorecem a gênese de Latossolos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos Resultados das Análises de Solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

BAPTISTA, M. C. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

CARMO, D. N. **Caracterização, gênese e uso de Latossolos sob Cerrado no município de Rio Paranaíba – MG**. 1977. 96 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 1977.

CASTRO FILHO, C. de; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 507-514, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário – 2006**. Rio de Janeiro, IBGE: 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades**: Minas Gerais, Lagoa Formosa. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=313750>. Acesso em: 03 dez. 2016.

JUCKSCH, I. **Calagem e dispersão de argila em amostra de um latossolo vermelho-escuro**. 1987. 37 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1987.

KAMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e Ocorrência de Minerais no Ambiente do Solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. (eds). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 333-380.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

MELO, M. G. de. **A origem do fosfato nas rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do grupo mata da corda nas regiões de Patos de Minas e Presidente Olegário, MG**. 2012. 170 p. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2012.

MOTTA, P. E. F. da; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. dos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do alto Paranaíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

MUNSELL COLOR. **Munsell Soil Color Charts**. Baltimore, Maryland: Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, 1975. Não paginado.

PEREIRA, T. T. C.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. D.; NEVES, J. C. L.; ALMEIDA, C. C. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí—Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1283-1295, 2010.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G.; FERNANDES FILHO, E. I.; CORRÊA, M. M.; DA COSTA, L. M.; PARAHYBA, R. D. B. V.; GUERRA, S. M. S.; HECK, R. Topolitossequências de solos do Alto Paranaíba: atributos físicos, químicos e mineralógicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1795-1809, 2009.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+ argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 297-300, 2005.

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

SANTOS, R. D. dos; SANTOS, G. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. rev. ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 101 p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. de. FOGAÇA, A. C. C. **Roteiro Geológico para a Região de Lagoa Formosa – Chumbo – Carmo do Paranaíba-MG**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Minas Gerais, n. 9, 1989.

SGARBI, G. N. C. Sedimentação do Cretáceo Inferior na Bacia Sanfranciscana: O Grupo Areado. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011a.

SGARBI, G. N. C.; SGARBI, P. B. A.; CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A.; PENHA, U. C. Bacia Sanfranciscana: o Registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: PINTO, C. V.; MARTINS-NETO, M. A. (eds). **Bacia do São Francisco, Geologia e Recursos Naturais**. Belo Horizonte, MG: Sociedade Brasileira de Geologia, 2001. p. 93-138.

SGARBI, P. B. de A. Magmatismo do Cretáceo na Região Sudoeste da Bacia Sanfranciscana: O Grupo Mata da Corda. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL,

E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011b.

UHLEIN, A.; FREITAS, A. de M.; CRUZ, A. B. da; SILVA, Q. F. da; CAXITO, F. de A.; MOREIRA, G. de C. Folha Carmo do Paranaíba SE.23-Y-B-IV. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011a.

UHLEIN, A.; BAPTISTA, M. C.; SEER, H. J.; CAXITO, F. de A.; UHLEIN, G. J.; DARDENNE, M. A. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional de Leque Submarino em Bacia de Ante-País. **Revista Geonomos**, v. 19, n. 2, p. 163-172, 2011b.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M. D.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. D. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M.. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil 1. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

CAPÍTULO 2 - SELEÇÃO DE COVARIÁVEIS PELO ALGORITMO RANDOM FOREST PARA CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

RESUMO

O objetivo deste capítulo é mapear o uso e ocupação do solo no município de Lagoa Formosa através do algoritmo *Random Forest*, que é um classificador baseado em reconhecimento de padrões de dados. Foram inseridas 98 covariáveis ambientais para análise do algoritmo no ambiente R, entre covariáveis espectrais, topográficas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas, de vegetação e de distância euclidiana, onde foram selecionadas aquelas mais importantes para a classificação do uso e ocupação do solo. O processo de classificação se deu por análise de dissimilaridade para covariáveis categóricas, e por análise de correlação não-linear, através do Coeficiente de Dependência Aleatorizado, para as covariáveis contínuas. Ambas as análises tinham o intuito de eliminar as covariáveis mais similares entre si. Foram escolhidas 16 covariáveis para o mapeamento do uso e ocupação, sendo dez dessas espectrais, três topográficas, duas de distância euclidiana e uma pedológica. Com essas escolhas, foi possível observar a importância da umidade para a distribuição dos usos na área, que também é controlado por fatores como relevo e solos, que são condicionados pela geologia no município.

Palavras-chave: mapeamento, pedologia, geologia.

COVARIABLE SELECTION FROM RANDOM FOREST ALGORITHM FOR LAND COVER AND LAND USE CLASSIFICATION IN LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

ABSTRACT

This chapter aims to map the land cover and land use in Lagoa Formosa county, in the western part of Minas Gerais using the *Random Forest* algorithm, a classifier based on data mining techniques for knowledge discovery in databases. For this analysis, 98 co-variables were used in the R software, and among them there was spectral, topographic, geomorphological, geological, pedological, vegetation and euclidean distance co-variables, with the selection of the most important co-variables to the classification of land use and land cover. The classification process used dissimilarity analysis for categorical co-variables, and non-linear

correlation for the continuous co-variables using the Randomized Dependence Coefficient. Both analysis were used to eliminate similar co-variables. The algorithm selected 16 co-variables, with ten of them being spectral, three topographic, two of Euclidean distance and one of soils. These choices made possible to observe the importance of humidity to the distribution of the land use and land cover classes in the area, where relief and soils have an important role and are conditioned by geology.

Keywords: mapping, pedology, geology.

1. INTRODUÇÃO

O Geoprocessamento é a disciplina que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para tratar informações geográficas, que tem seu principal objetivo na abstração das informações obtidas no mundo real e a sua transferência aos sistemas computacionais de maneira organizada. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são as ferramentas necessárias para realizar análises e tratar os dados geográficos computacionalmente (ASSAD, SANO, 1998). O Sensoriamento Remoto é uma ciência que se baseia na captura de dados sem contato direto com o objeto em questão, onde sua condição principal é que o sensor esteja a uma distância remota do objeto (MENESES, 2012; SILVA, 2012). A utilização dessas ferramentas tem permitido o desenvolvimento de estudos que contribuem para melhor compreensão do espaço geográfico, com dados temáticos que permitem análises bastante detalhadas, oferecendo o suporte necessário para tomadas de decisões. Além disso, a diminuição dos custos para a confecção de mapas favoreceu o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de aquisição, armazenamento, processamento e apresentação de informações espaciais.

O processo de mineração de dados (*data mining*) envolve a descoberta de padrões de dados através do uso de técnicas e algoritmos que constroem um modelo de conhecimento, que podem ser representados em forma de árvores de decisão (ROGAN et al., 2008; VIEIRA et al., 2012). Dessa forma, o classificador *Random Forest* também é considerado como uma tecnologia de mineração de dados (NAIDOO et al., 2012).

O *Random Forest* é um classificador do tipo *ensemble* onde há uma combinação de árvores de regressão e classificação, e cada um possui o valor de um vetor aleatório amostrado independentemente, com a mesma distribuição para todas as árvores na floresta (BREIMAN,

2001). No treinamento, o algoritmo *Random Forest* cria múltiplas árvores parecidas com as árvores de regressão e classificação (conhecidas como CART, *Classification and Regression Tree*) (BREIMAN et al., 1984), cada uma treinada com a reamostragem dos dados originais (método *bootstrapping*), procurando em um subconjunto das variáveis de entrada selecionado aleatoriamente para fazer uma divisão para cada nó. O número de variáveis é definido pelo usuário e o algoritmo não é sensível a esse parâmetro. Isso permite que esse algoritmo consiga lidar com grande volume de informações, utilizando um número maior de árvores no conjunto do classificador (BREIMAN, 2001; GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006).

A reamostragem realizada pelo *Random Forest* baseia-se no método *bagging* (ou *bootstrapping aggregating*), que reduz a variância da classificação através do treinamento de vários classificadores pela reamostragem do conjunto de treinamento original, como se fosse uma versão aprimorada do método *bagging* tradicional (BREIMAN, 1996; GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006). Assim, o algoritmo *Random Forest* apresenta resultados comparáveis àqueles apresentados pelo método *boosting*, que utiliza repetições no re-treinamento e atribui um peso crescente às amostras que são classificadas incorretamente de acordo com o progresso das repetições. Isso porque o *Random Forest* apresenta as vantagens do *boosting*, como uma acurácia maior do que aquela obtida pelo método *bagging*, porém sem seus inconvenientes, como sua demanda computacional, que torna todo o processamento mais lento, além do sobreajuste das amostras (*overfitting*) e da sua sensibilidade aos ruídos (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006).

Segundo Breiman (2001), as vantagens desse algoritmo são o desempenho comparável da acurácia com o de processos como o *Adaboost*, por vezes podendo ser melhor que esse, além da sua robustez em relação aos *outliers* (valores discrepantes) e aos ruídos, seu processamento mais rápido do que métodos como *bagging* ou o *boosting*, fornecendo estimativas internas úteis como erro, correlação e importância de variáveis. Porém, os mecanismos de funcionamento desse algoritmo ainda são uma “caixa-preta”, pois não é possível individualizar as árvores de decisão, dificultando o conhecimento sobre sua assinatura estatística (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006; GRINAND et al., 2013). O *Adaboost* é um algoritmo *boosting* que apresenta bons resultados para classificação, porém de processamento lento (FREUND, SCHAPIRE, 1996). Estudos como o de Chan e Paelinckx (2008) mostraram que, ainda assim, as diferenças entre esses dois classificadores são pequenas, mesmo o *Random Forest* apresentando maior robustez e o *Adaboost* apresentando uma acurácia global maior.

Nesse estudo, os dois classificadores se mostraram adequados para lidar com informações hiperespectrais para mapeamento de ecótonos.

A importância das variáveis é obtida com as informações OOB, onde o *Random Forest* se baseia na medida de permutação da importância. A importância de uma variável pode ser estimada pela permutação aleatória de todos os valores dessas variáveis nas amostras OOB para cada árvore. A medida da importância é dada pela diferença entre a acurácia da predição antes e depois da permutação da variável, calculados sobre todas as árvores (BREIMAN, 2001; GUO et al., 2011).

Estudos já tem mostrado que o uso de *Random Forest* tem apresentado melhor desempenho do que outros algoritmos, como o de Máxima Verossimilhança e do *Support Vector Machines* (SVM) (PAL, 2005; GRINAND et al., 2013), além de ser recomendado pela rapidez no processamento e na capacidade de lidar com grandes volumes de dados (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2004; GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006), e pelo uso da seleção de variáveis e sua importância estimada pelo classificador (RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012).

Esse algoritmo tem sido amplamente utilizado em estudos de classificação de imagens (PAL, 2005) para mapear a cobertura do solo (WASKE, BRAUN, 2009), para estimar o desmatamento (GRINAND et al., 2013), e para mapear o uso e ocupação do solo (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEINSSON, 2006). Pensando na importância da agricultura para o município de Lagoa Formosa, que tem sua economia voltada às atividades agropecuárias, esse algoritmo pode ser aplicado para o estudo da espacialização dos usos no município.

Lagoa Formosa está localizada na área que divide as bacias do Rio Paraná e do Rio São Francisco, e possui geologia diversificada que afeta a formação dos solos e, conseqüentemente, os usos da terra no município (BAPTISTA, 2004). Estudos sobre uso e ocupação do solo podem subsidiar o planejamento das práticas agrícolas, auxiliando no processo de tomada de decisão para prevenir a manutenção de possíveis processos erosivos.

Considerando o exposto, esse trabalho tem como objetivos selecionar as variáveis mais importantes pelo algoritmo *Random Forest* para classificar o uso e a ocupação do solo no município de Lagoa Formosa, no estado de Minas Gerais, além de discutir como variáveis ambientais influenciam a espacialização desses usos na área de estudo.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Lagoa Formosa está localizado no centro-oeste do estado de Minas Gerais, a aproximadamente 378 km de distância de Belo Horizonte, e 27 km de Patos de Minas, como mostra a Figura 1. Segundo o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011), o município possui população de 17.161 habitantes e área de 840,92 km². Em 2016, a população estimada do município foi de 18.107 habitantes (IBGE, 2016). Sua economia é baseada na agropecuária, comércio e prestação de serviços (CÂMARA MUNICIPAL DE LAGOA FORMOSA, 2016).

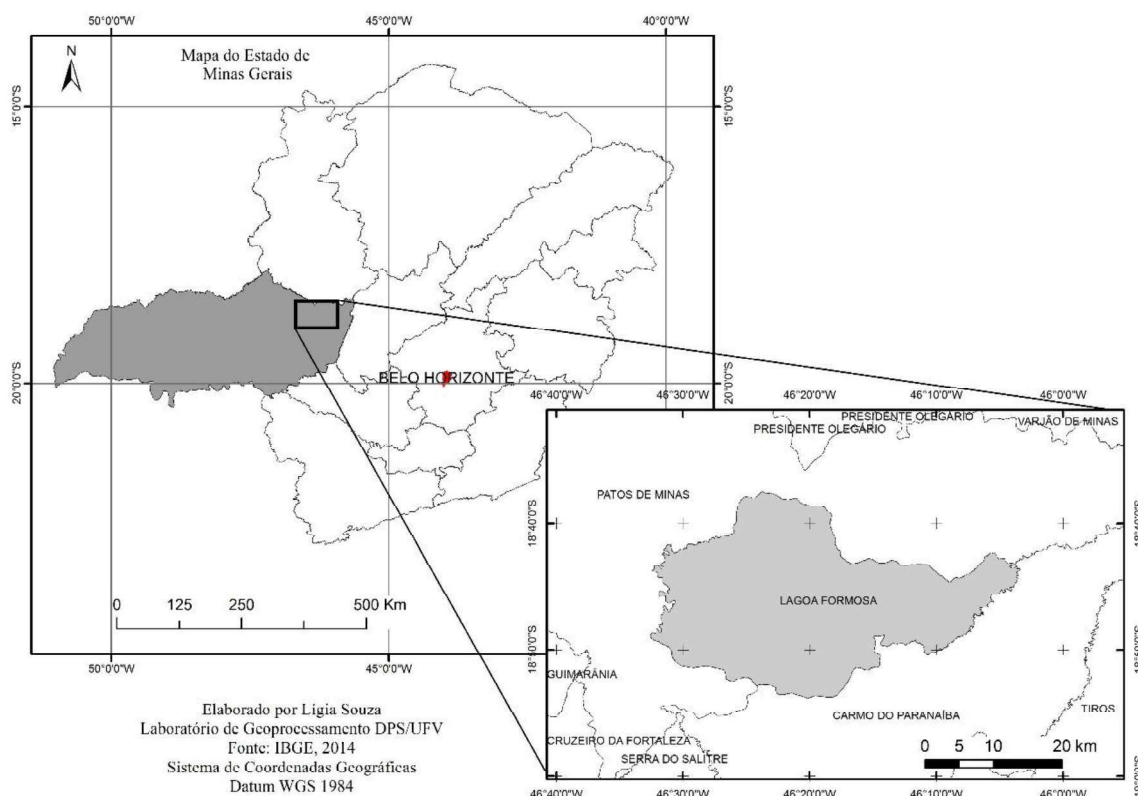


Figura 1 - Mapa de localização do município de Lagoa Formosa no estado de Minas Gerais.

A região é um divisor de águas entre as bacias dos rios Paranaíba e do São Francisco, e sua geomorfologia pode ser dividida em três domínios, de acordo com Baptista (2004) e Uhlein et al. (2011a): zonas de planalto, vertentes dissecadas e colinas suaves (Figura 2). Sua geologia é composta por quatro principais unidades litoestratigráficas que são: Grupo Bambuí (Neoproterozóico), Grupo Areado (Mesozóico), Grupo Mata da Corda (Mesozóico) e coberturas detrito-lateríticas e elúvio-coluvionares (Cenozóico) (SEER, MORAES, FOGAÇA, 1989; BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a), todas expostas no mapa da Figura 3. A pedologia da região é dividida em Cambissolos, Latossolos e Neossolos, de acordo com o mapeamento dos solos na região do Alto Paranaíba realizado por Motta, Baruqui e Santos (2004), como mostra a Figura 4.

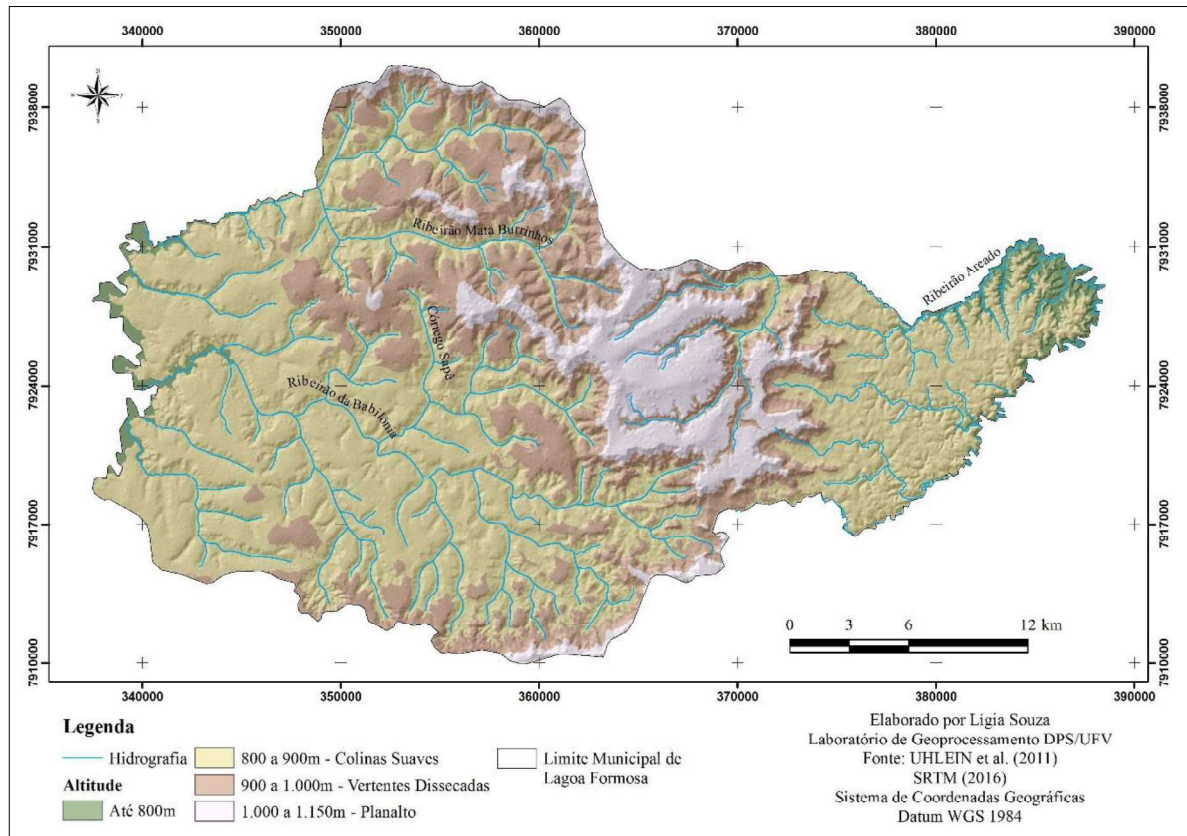


Figura 2 - Mapa geomorfológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

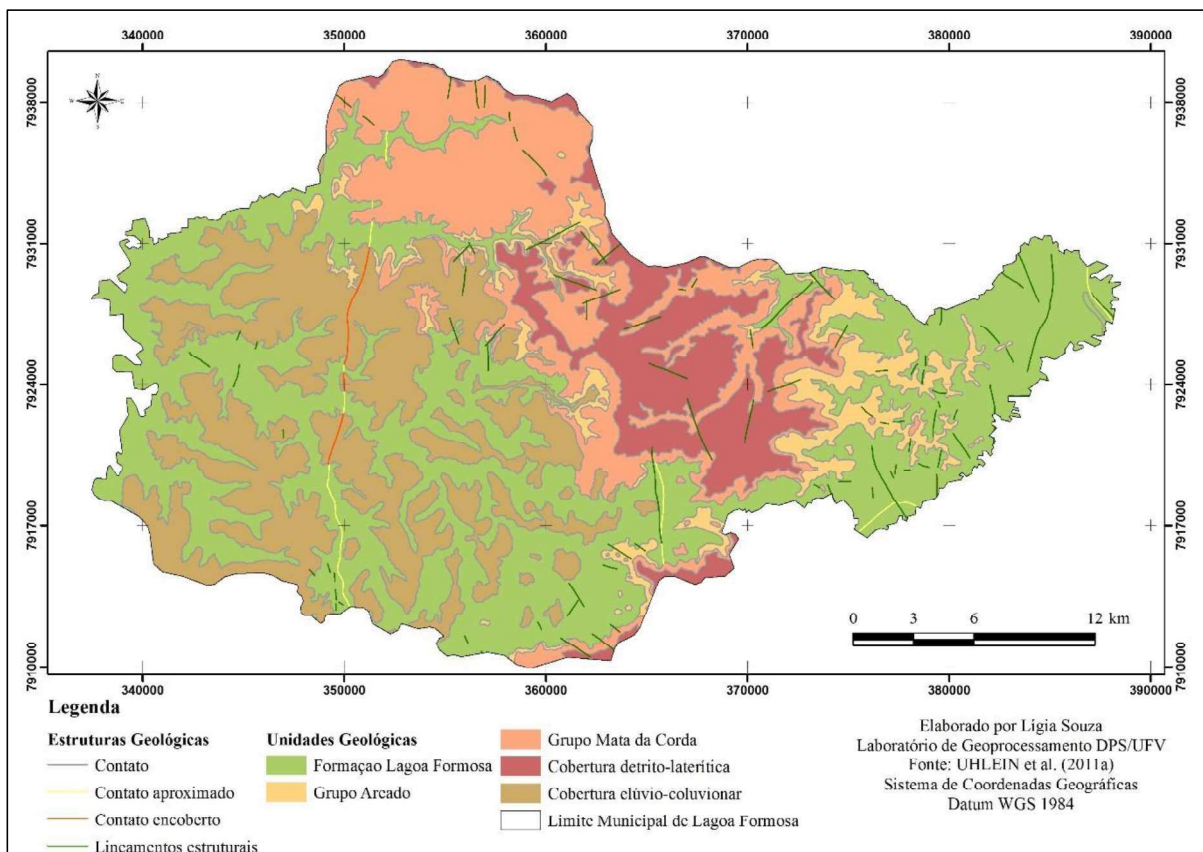


Figura 3 - Mapa geológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

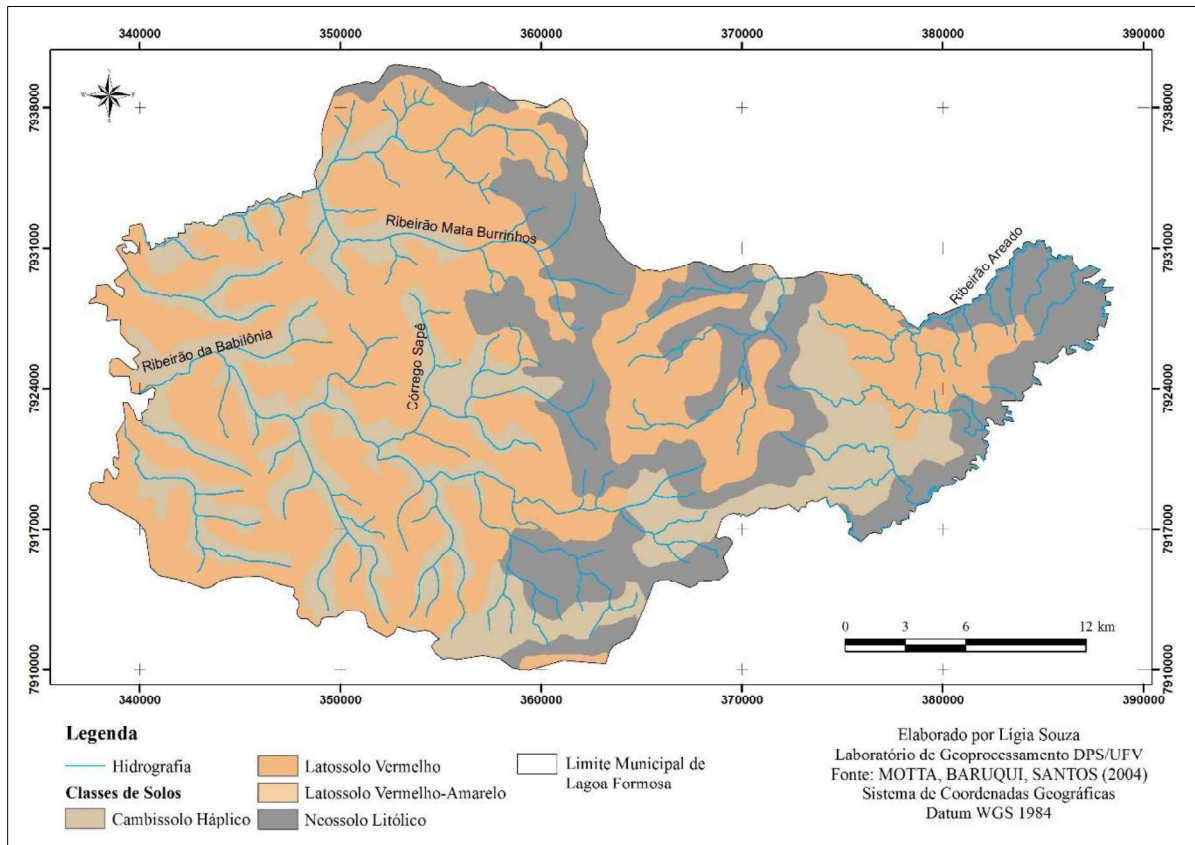


Figura 4 - Mapa pedológico de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

A vegetação original era de Cerrado, com extratos herbáceos, arbustivos e arbóreos, e florestas tropicais latifoliadas, com matas densas e árvores de grande porte, porém, pelo intenso desmatamento, essa vegetação ocorre em áreas restritas (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011a). O clima é caracterizado por verões quentes e úmidos, com a variação da precipitação anual entre 1500 a 2000 mm, com temperaturas médias de 20°C, com períodos secos e úmidos. A hidrografia é predominantemente meandrante, provavelmente sendo controlada pelo embasamento, pois apresenta-se frequentemente alongada e paralela, com alta sinuosidade (UHLEIN et al., 2011a).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Base de Dados

Para esse trabalho, a área de estudo engloba duas cenas conforme a grade de imagens do Landsat-8. As imagens foram escolhidas de acordo com a melhor visibilidade quanto a cobertura de nuvens diretamente no catálogo da USGS (*United States Geological Survey*), e estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Data de aquisição das imagens de acordo com a Órbita/Ponto.

Órbita/Ponto	Final da Época Chuvosa	Final da Época Seca
220/73	05/05/2014	16/10/2015
219/73	15/05/2014	09/10/2015

Essas imagens correspondem às transições entre as épocas seca e chuvosa, como mostra a Figura 5 com os dados das Normais Climatológicas de 1961 a 1990 da estação meteorológica de Patos de Minas (INMET, 2016), mais próxima do local de estudo. Dessa forma, as imagens foram selecionadas para o final da época chuvosa e seca a fim de obter o máximo de representatividade para cada época.

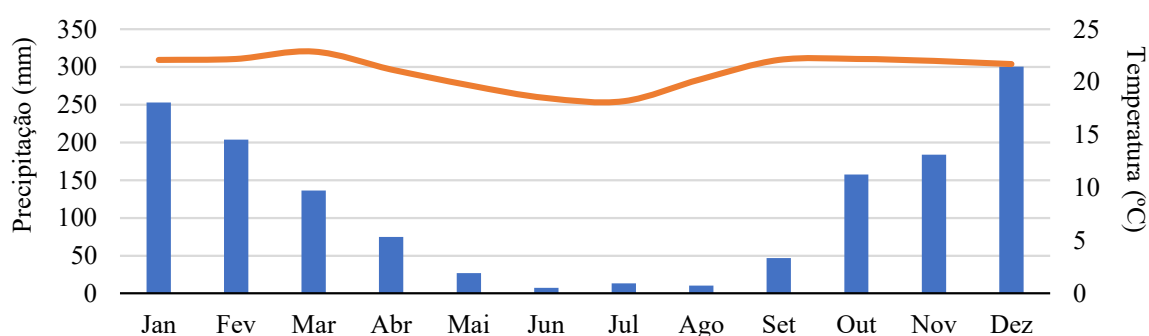


Figura 5 - Normais Climatológicas de 1961 a 1990 de temperatura média (°C) e precipitação total (mm) para a estação de Patos de Minas, Minas Gerais.

Fonte: INMET, 2016.

Dados cartográficos do município de Lagoa Formosa, em Minas Gerais, como limite municipal, estradas e localidades (igrejas, escolas e outros), na escala de 1:100.000, foram obtidos junto ao IBGE, assim como os dados de geomorfologia e vegetação, na escala de 1:250.000. Os dados de geologia foram obtidos pelo mapeamento realizado pelo Projeto Alto Paranaíba, realizado pela CODEMIG. A folha Carmo do Paranaíba foi utilizada, e está na escala de 1:100.000 (UHLEIN et al., 2011a). O mapeamento pedológico utilizado está na escala de 1:250.000 (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). Foram utilizadas imagens SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) da NASA, com 30 metros de resolução espacial, para retirar o modelo de elevação e gerar outras variáveis de terreno. O SRTM tem como finalidade produzir os mais completos modelos de elevação com melhor resolução digital da Terra, utilizando um radar com duas antenas para adquirir suas informações de interferometria que é processado para informações topográficas de trinta metros de resolução (FARR et al., 2007). A rede de drenagem utilizada foi obtida através do processamento dos dados SRTM, por ser mais completa que aquela disponibilizada pelo IBGE.

As diferenças na escala dessas informações são dadas pela escassez de dados para a região de estudo. No entanto, acredita-se que esses dados possam auxiliar na melhor compreensão do ambiente, ainda que as escalas não sejam iguais.

O processamento dos dados foi realizado no *software* ArcGIS 10.1[®], do ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Além desse, foi utilizado o R (v. 3.2.4), programa gratuito disponibilizado na internet baseado em linguagem computacional para manipulação de dados e análises estatísticas (R CORE TEAM, 2016), e também o SAGA, um software livre utilizado para a implementação de algoritmos espaciais de forma mais fácil e efetiva, que permite uma gama de métodos geocientíficos de análise (CONRAD et al., 2015).

3.2. Covariáveis Preditivas

Com as imagens de satélite e a base cartográfica reunida, foram geradas 98 covariáveis da região, divididas em: 26 espectrais; 45 topográficas; 5 geomorfológicas; 2 geológicas; 3 pedológicas; 3 de vegetação; e 14 de distância euclidiana de locais de interesse.

As covariáveis espectrais foram obtidas através das imagens Landsat-8. A Tabela 2 mostra as equações utilizadas para o cálculo dos índices espectrais com as bandas do sensor Landsat 8, geradas no ArcGIS 10.1[®].

Tabela 2 - Equações dos índices espectrais utilizados.

Índices Espectrais	
$NDVI^1 = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	$CLAY MINERALS = \frac{B6}{B7}$
$NDSI^2 = \frac{B7 - B3}{B7 + B3}$	$IRON OXIDES = \frac{B4}{B2}$
$SAVI^3 = \frac{(B5 - B4)(1 + L)}{B5 + B4 + L}$	

¹ NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*; ² NDSI – *Normalized Difference Soil Index*; ³ SAVI – *Soil Adjusted Vegetation Index*. O índice SAVI possui um fator de correção L que minimiza os efeitos da cor do solo nos resultados, onde o valor de L=1 é utilizado quando a densidade da vegetação é baixa; L=0,5 quando a densidade da vegetação é média; e L=0,25 quando a densidade da vegetação é alta (HUETE, 1988).

As covariáveis topográficas foram derivadas do modelo digital de elevação (MDE) obtido com a imagem SRTM através do pacote RSAGA. As covariáveis geológicas foram derivadas dos dados da CODEMIG, e com os dados obtidos no IBGE foram derivadas as covariáveis de geomorfologia e vegetação. As covariáveis pedológicas foram derivadas do mapeamento da Embrapa. Todas as covariáveis utilizadas estão dispostas na Tabela 3.

Todas as covariáveis foram padronizadas no mesmo datum de trabalho, o WGS 1984, transformadas em formato matricial com o mesmo número de linhas e colunas, com pixels de 30 metros de resolução. A fim de remover possíveis *outliers* das variáveis contínuas, ou seja, valores discrepantes de um número reduzido de células, seus valores foram substituídos pela própria média aritmética \pm três vezes o desvio-padrão.

Tabela 3 - Covariáveis utilizadas para análise de importância pelo algoritmo *Random Forest*.

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
Composite Bands (Bandas 2 a 7)	Combinação das bandas em um único arquivo raster		
Banda 2	Banda azul		
Banda 3	Banda verde		
Banda 4	Banda vermelha		
Banda 5	Infravermelho próximo (NIR)		
Banda 6	Infravermelho de ondas curtas 1 (SWIR 1)	Espectral ¹	30 metros
Banda 7	Infravermelho de ondas curtas 2 (SWIR 2)		
Clay Minerals	Ressalta a proporção de minerais argilosos		
Iron Oxides	Distingue áreas com presença de óxidos de ferro		
NDVI	Indicador da quantidade e da condição da vegetação		
NDSI	Identifica área onde o solo está em destaque		
SAVI ²	Índice de vegetação com menor efeito do solo		
Aspect	Orientação das vertentes		
Convergence Index	Índice de convergência		
Cross Sectional Curvature	Curvatura transversal		
Curvature Classification	Classificação da curvatura		
Difference	Diferença do gradiente hidrológico		
Diffuse Solar Radiation (January)	Radiação difusa de janeiro		
Diffuse Solar Radiation (June)	Radiação difusa de junho		
Digital Elevation Model	Modelo digital de elevação		
Direct Solar Radiation (January)	Radiação direta de janeiro		
Direct Solar Radiation (June)	Radiação direta de junho		
Diurnal Anisotropic Heating	Medida contínua da energia dependente de exposição	Topografia	30 metros
Flow Line Curvature	Curvatura da linha de fluxo		
General Curvature	Curvatura geral		
Gradient	Gradiente hidrológico		
Hill	Morros		
Hill Index	Índice dos morros		
Landforms	Formas do relevo		
Longitudinal Curvature	Curvatura longitudinal		
Mass Balance Index	Índice de balanço entre erosão e deposição		
Maximal Curvature	Curvatura máxima		
Mid-Slope Position	Posição do meio do declive		

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
Minimal Curvature	Curvatura mínima		
Morphometric Protection Index	Índice de proteção de um ponto em relação ao relevo do entorno		
Multiresolution Index of Ridge Top Flatness (MRRTF)	Índice que identifica áreas planas em altas altitudes do modelo digital de elevação		
Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)	Índice que identifica os fundos de vale do modelo digital de elevação		
Normalized Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive normalizada		
Planar Curvature	Curvatura no plano		
Profile Curvature	Curvatura no perfil		
Real Surface Area	Cálculo real da área da célula		
Slope	Declividade		
Slope Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive		
Slope Index	Índice de declividade		
Standardized Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive padronizada	Topografia	30 metros
Surface Specific Points	Pontos quantitativos da superfície do terreno		
Tangencial Curvature	Curvatura tangencial		
Terrain Ruggedness Index	Índice quantitativo da heterogeneidade da topografia		
Topographic Position Index	Diferença entre a elevação de um ponto com a elevação do entorno		
Total Curvature	Curvatura total		
Total Solar Radiation (January)	Radiação solar total de janeiro		
Total Solar Radiation (June)	Radiação solar total de junho		
Valley	Vale		
Valley Depth	Cálculo da distância vertical do nível de base da rede de drenagem		
Valley Index	Índice dos vales		
Vector Ruggedness Measure	Medida da variação da rugosidade do terreno da declividade		
Wetness Index	Índice do controle topográfico nos processos hidrológicos		
Classes do IBGE	Aspectos do relevo identificados na escala de 1:250.000		
Domínio morfoestrutural	Táxon na compartimentação do relevo que ocorrem em escala regional e organizam os fatos geomorfológicos de acordo com o arcabouço geológico		
Forma do modelado geomorfológico	Padrão de formas de relevos em função de gênese comum e de processos morfogenéticos atuantes	Geomorfologia	1:250.000
Região geomorfológica	Compartimentos geomorfológicos inseridos nos conjuntos litomorfoestruturais com características comuns		
Unidade geomorfológica	Arranjo de formas altimétrica e fisionomicamente semelhantes nos diferentes tipos de modelados		

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
Litologia	Tipos de rochas	Geologia	1:100.000
Unidades Geológicas	Tipos de estruturas geológicas		
Classificação dos solos no 1º nível categórico	Nível de ordens	Pedologia	1:250.000
Classificação dos solos até o 3º nível categórico	Nível de grandes grupos		
Classificação dos solos até o 4º nível categórico	Nível de subgrupos		
Classes do IBGE	Vegetações dominantes e subdominantes	Vegetação	1:250.000
Principal componente da vegetação	Vegetação ou área natural ou antropismo do principal componente da vegetação		
Regiões fitoecológicas	Tipo de cobertura vegetal	Distância Euclidiana	1:100.000
	Distância euclidiana da área urbana		
	Distância euclidiana do conjunto total de estradas		
	Distância euclidiana do conjunto dos tipos de contatos geológicos		
	Distância euclidiana dos contatos geológicos		
	Distância euclidiana dos contatos encobertos		
	Distância euclidiana dos contatos geológicos aproximados		
	Distância euclidiana dos divisores de água das bacias		
	Distância euclidiana das drenagens de primeira ordem		
	Distância euclidiana das estradas de terra		
	Distância euclidiana das estradas pavimentadas		
	Distância euclidiana da hidrografia		
	Distância euclidiana dos lineamentos		
	Distância euclidiana das localidades		
	Distância euclidiana dos contatos pedológicos	Distância Euclidiana	1:250.000

¹ As covariáveis espectrais foram obtidas tanto para a época seca quanto para a época chuvosa; ² O índice SAVI foi gerado com dois valores de correção (L = 0,5 e L = 1).

3.3. Amostragem

As classes das amostras de treinamento e validação foram definidas de acordo com a interpretação visual das imagens e com o conhecimento da área adquirido quando do trabalho de campo. Tanto para as imagens da época seca quanto para a época chuvosa, não houve alteração nas classes mapeadas. Devido a diferentes respostas espectrais de um mesmo uso, foi necessário criar uma amostragem para 12 classes.

Foram coletados de 20 a 30 polígonos por classe, cada um com 12 pixels, variação dada pelo tamanho da área. Um número menor de polígonos foi coletado para classes de pequena expressão na área, como corpos d'água e queimada. Os pixels foram transformados em pontos para a obtenção dos valores de cada uma das 98 covariáveis no ambiente R. através da interface com o *software* ArcGIS 10.1.

3.4. Classificação da Imagem

Para a classificação do uso e ocupação do município, foram obtidas a moda e mediana dos pontos de cada polígono das amostras coletadas. Segundo Costa Neto (1977), a moda é uma medida de posição, pois indica a região das máximas frequências, ou seja, de um dado conjunto de valores, a moda corresponde ao valor (ou valores) de máxima frequência. De acordo com o mesmo autor, a mediana, que também é uma medida de posição, é uma quantidade que busca caracterizar o centro da distribuição de frequências. Dessa forma, as amostras apresentam o valor mais significativo das covariáveis ao contrário de apresentar valores pontuais que podem não ser representativos para a área. A moda foi realizada para as covariáveis categorias, e a mediana foi obtida para as covariáveis contínuas.

Das 98 covariáveis inseridas para análise, foram eliminadas aquelas que apresentaram variação zero, além de separar as variáveis categóricas, como geologia, solos, vegetação e geomorfologia, das variáveis contínuas, compostas pelas variáveis espectrais, topográficas e das distâncias euclidianas. A inserção de todas essas variáveis para análises no programa R teve como objetivo deixar que o algoritmo selecionasse aquelas que fossem mais relevantes para a classificação.

As variáveis contínuas foram submetidas à análise de correlação não linear para eliminar variáveis estatisticamente similares, sendo esse método mais rigoroso do que a correlação linear, mais comumente utilizada. Essa correlação não linear foi feita de acordo com o

Coeficiente de Dependência Aleatorizados (RDC – *Randomized Dependence Correlation*) proposto por Lopez-Paz, Hennig e Scholkopf (2013). O RDC é uma medida não linear de dependência entre amostras aleatórias multivariadas, que se baseia em correlações canônicas de variáveis aleatórias e em cópulas estatísticas. Correlação canônica é um procedimento estatístico multivariado que funciona como uma extensão de uma regressão múltipla, onde uma variável é explicada por uma combinação linear de outras variáveis. Porém, nessa correlação não existe distinção entre variáveis dependentes e independentes, buscando-se somente a máxima correlação entre ambas (JAMES, MCCULLOCH, 1990; HAIR et al., 2009). As cópulas, por sua vez, permitem construir um modelo multivariado capaz de separar o comportamento marginal das variáveis aleatórias da estrutura de dependência que pode existir entre elas (LI, 2000; POZOS, GHAMRANI, SCHNEIDER, 2012).

Já as variáveis categóricas foram submetidas à análise de dissimilaridade, que é um método de análise de agrupamento, sendo que quanto maior for a sua medida, menor será a semelhança entre os indivíduos (HAIR et al., 2009; MINGOTI, 2013). A técnica utilizada para análise simultânea das variáveis contínuas e das variáveis categóricas foi aquela proposta por Gower (1971), onde dados qualitativos são submetidos a uma matriz de distância apresentando valores entre 0 e 1, com o valor 0 correspondendo à máxima diferença. Essa metodologia ainda não tem sido amplamente aplicada com a finalidade de gerar mapeamentos como o uso e ocupação, sendo mais utilizado na área de genética (RODRIGUEZ et al., 2005; VIEIRA et al., 2007; MOURA et al., 2010; ROCHA et al., 2010).

Os valores de corte para a análise de correlação não-linear e de dissimilaridade foram definidos em 0,95 e 0,5, respectivamente, sendo escolhidos após testes com outros valores onde esses apresentaram melhor desempenho da eliminação de covariáveis redundantes sem comprometer o modelo final. As variáveis restantes foram então submetidas à seleção de importância feita pelo algoritmo *Random Forest*, estabelecendo um limite máximo de 20 covariáveis para que o modelo escolhido seja suficientemente elucidativo e simples.

Das variáveis escolhidas, foi gerada uma lista com as variáveis dispostas pela sua importância na classificação, acompanhado com os respectivos índices Kappa. O índice Kappa é uma técnica estatística multivariada que avalia a acurácia da classificação através de uma matriz de erros, e essa matriz é avaliada de acordo com o teste estatístico z (CONGALTON, 1991; CONGALTON, GREEN, 2009). Para cada conjunto de variáveis há um índice Kappa associado, fator determinante para a escolha do modelo classificado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Seleção de Covariáveis

Das 98 variáveis inseridas, depois de retiradas aquelas de variância zero e as altamente correlacionadas, restaram 51 variáveis contínuas e 7 variáveis categóricas. Esse conjunto restante foi analisado pelo algoritmo *Random Forest*, posicionando as variáveis de acordo com a sua importância para a classificação.

A melhor classificação obtida foi o modelo com 16 variáveis que apresentou o maior índice *Kappa*, de 0,91, em comparação com os conjuntos de até 20 variáveis. Assim, foram elencadas pelo programa as 16 variáveis para a melhor classificação, segundo o algoritmo. De acordo com a sua importância, as variáveis escolhidas, em ordem, foram: (1) índice NDVI da época seca; (2) a banda 5 da imagem da época seca; (3) a banda 6 da época seca; (4) a banda 3 da época seca; (5) a banda 6 da época chuvosa; (6) a banda 7 para época seca; (7) o índice NDSI para a época seca; (8) o índice *Iron Oxides* para a época seca; (9) a distância euclidiana dos contatos encobertos; (10) o índice SAVI com o valor da constante para densidade média de vegetação ($L = 0,5$); (11) a classificação dos solos até o quarto nível categórico; (12) o índice de umidade (*wetness index*); (13) a distância euclidiana de pontos de interesse (como fazendas e distritos do município); (14) o modelo digital de elevação (MDE); (15) a banda 5 da época chuvosa; (16) e o índice multirresolução do plano do fundo do vale (MRVBF).

Das 16 variáveis totais do modelo escolhido, 10 são espectrais, e 4 dessas são índices espectrais derivados das bandas das imagens da época chuvosa e da época seca. Zhou, Zhang e Townley-Smith (2013) já demonstraram que quanto mais bandas e imagens temporais, melhor é a acurácia da classificação, o que pode justificar o domínio dessa classe de variáveis no modelo final.

O uso de imagens da época seca e da época chuvosa são necessárias pelas mudanças no comportamento espectral da vegetação, já que essa está relacionada à disponibilidade hídrica. Assim, não somente alterações fenológicas e morfológicas afetam seu comportamento espectral, mas também a sazonalidade climática (NOVO, 2010). Na época seca, a diferença entre a vegetação perene e a vegetação decídua é maior, facilitando sua identificação e estratificação. O índice NDVI, proposto por Rouse et al. (1974), é a razão entre a diferença das refletâncias das bandas no infravermelho próximo e no vermelho pela soma dessas bandas, que no Landsat-8 corresponde às bandas 5 e 4, facilitando a obtenção e modelagem de características das plantas, além de ser indicador do crescimento de culturas e indicador de

qualidades específicas do local (MULDER et al., 2011). Dessa forma, é possível explicar a escolha do índice NDVI da época seca como variável mais importante, pois pode indicar um melhor estratificador do ambiente do que as outras variáveis, que não se limita somente à vegetação.

Segundo a USGS (2013), a banda 5, do infravermelho próximo, enfatiza os limites da vegetação entre água e solo, e formas de relevo, o que explica a escolha do algoritmo por essa variável tanto da época seca quanto da época chuvosa, ainda que a primeira tenha sido mais importante para o modelo final. Na época seca, a escassez da água acentua as diferenças da vegetação, tornando sua estratificação mais fácil. Na época chuvosa, os limites da vegetação podem ser mais sutis dada a presença da água. A alta reflectância da vegetação nesse intervalo de ondas é explicado pela interferência da estrutura celular das folhas (IBGE, 1999).

A banda 3, verde, é responsável por enfatizar a vegetação mais vigorosa da área de estudo, já que nessa região do visível são os pigmentos das folhas os responsáveis pela reflectância ao sensor. Durante a época seca, com déficit de água, há menos clorofila e conseqüente redução na sua reflectância (USGS, 2013). Dessa forma, entende-se porque a banda 3 da época seca foi escolhida. Locais com presença de água tenderão a apresentar folhas mais verdes, ao contrário das folhas dependentes da umidade e da chuva, que deverão conter menos clorofila.

As bandas 6 e 7 são usadas para detectar vegetação com estresse hídrico e delimitar áreas afetadas por queimadas, sendo que a banda 6 é sensível à radiação termal (USGS, 2013). A região do infravermelho de ondas curtas é afetada pelo conteúdo de água da folha e pela maior reflectância de rochas e solo exposto (USGS, 2016). Dessa forma, essas bandas também podem auxiliar na estratificação desses ambientes pelo conteúdo de umidade dos mesmos, diferenciando áreas de solo exposto das áreas urbanas, por exemplo.

A faixa de absorção da banda 7 não contém os picos máximos de reflectância do conteúdo de água (IBGE, 1999). Isso pode explicar porque somente a banda 7 da época seca foi elencada como variável importante para a classificação, afinal, no período chuvoso, poderia não apresentar diferença significativa. Como a banda 6 apresenta um máximo de reflectância da absorção de água, suas imagens da época seca e chuvosa foram escolhidas como variáveis importantes para a classificação do uso e ocupação. Além disso, a escolha dessas bandas pode ser justificada pela delimitação de uma pequena mancha de queimada na área.

A presença de tantas bandas espectrais e índices de vegetação se explicam pelo fato de que o comportamento espectral dos alvos se modifica de acordo com diferentes características. A vegetação tem seu comportamento espectral alterado ao longo do seu ciclo. Há de se considerar que o tipo de cultura, o ângulo de visada, a arquitetura do dossel, e outras características afetam diretamente a reflectância desse alvo (NOVO, 2010). As propriedades espectrais das folhas estão condicionadas à sua composição química, sua morfologia e à sua estrutura interna. A constituição dos solos também altera seu comportamento espectral, pois a presença de material orgânico, a composição mineral, a granulometria, e também a umidade alteram sua reflectância (IBGE, 1999).

O índice NDSI foi primeiro proposto por Kearney et al. (2002) e visa identificar áreas onde o solo está em destaque. Deng et al. (2015) analisaram as repostas espectrais do solo e encontraram que a reflectância média dos valores das bandas 4, 5 e 7 são relativamente maiores do que os valores das bandas 1, 2 e 3, no caso do sensor Landsat TM5. Para esse sensor, então, encontraram que a banda 7, infravermelho médio, e a banda 2, verde, quando combinadas, apresentaram uma alternativa para realçar as informações do solo e suprimir os valores da vegetação e de áreas impermeáveis. Na adequação da fórmula para as bandas do Landsat 8, a banda 7, do infravermelho de ondas curtas (SWIR 2), e a banda 3, verde, são as correspondentes para o cálculo do índice. Essas bandas utilizadas no cálculo do NDSI separam as respostas mais brilhantes para o solo, já que essas são as bandas de maior reflectância para esse alvo (ROGERS, KEARNEY, 2004). Índices de solo são difíceis de serem desenvolvidos por causa da complexidade da sua resposta espectral, já que essa é dependente de características químicas e físicas, como textura, umidade e composição mineralógica, para citar alguns (DENG et al., 2015). Também por essas razões, é mais fácil compreender porque esses índices são ainda pouco aplicados. Ainda assim, o NDSI da época seca parece ter sido escolhido por diferenciar bem as áreas de solo exposto das áreas vegetadas.

A reflectância dos solos é caracterizada por três regiões espectrais, sendo que uma delas realça os óxidos de ferro (BEN-DOR et al., 2003). A proporção *Iron Oxides* tem como objetivo distinguir minerais que foram submetidos à oxidação, e para tanto se dá pela diferença entre as bandas vermelha e azul (SEGAL, 1982; DRURY, 1987). A presença de óxidos de ferro condiciona uma forte absorção na região do azul, e a proporção dada pela razão entre a banda azul e a banda vermelha produzem valores muito baixos para zonas de comportamento dos óxidos de ferro. Isso tem sido utilizado para mapear os óxidos de ferro e auxiliar na exploração de depósitos de sulfuretos hidrotermais (GUPTA, 2013). Esse índice é muito utilizado no

sensoriamento remoto aplicado à geologia, mas auxilia na diferenciação de solos com diferentes características físicas e mineralógicas (SABINS, 1987). A divisão da banda 4 pela banda 2 resulta em valores altos, dados pela baixa reflectância de goethita e hematita na primeira e pela alta reflectância na segunda. Os maiores valores do índice estão relacionados a solos que acumularam mais óxidos e hidróxidos de Fe acumulados no perfil, e geralmente são abundantes em solos altamente intemperizados, como os Latossolos. Assim, o índice *Iron Oxides* para a época seca foi escolhido por auxiliar na distinção de áreas principalmente voltadas à agricultura, por causa da exposição do solo durante seu preparo para o plantio, que evidencia seu acúmulo de óxidos de ferro. Além disso, esses Latossolos da área de estudo são ricos em ferro, com teores de Fe_2O_3 acima de 360 g kg^{-1} de solo (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004), o que explica valores altos do índice de óxidos de ferro para essas áreas expostas.

Contatos encobertos são um tipo de contato geológico que surge quando há a deposição de material, geralmente de pequena espessura, como depósitos aluvionares, sobre a área de limite entre duas unidades geológicas (IBGE, 1999). No caso de Lagoa Formosa, o contato encoberto está dividido em três pequenas faixas de ocorrência e apresentam distância total de 9,55 km, separando diferentes litologias da Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí, como pode ser observado no mapa geológico da Figura 3. Sobreposta a essas, estão os depósitos Terciários-Quaternários que formaram uma cobertura de detritos elúvio-coluvionares. No local de deposição houve a formação de platôs úteis à atividade agrícola, sendo que 90% da extensão desses contatos encobertos estão sob atividades agropecuárias.

As atividades agrícolas estão nos topos e bordas mais suaves, e a pecuária concentra-se nas encostas mais íngremes. O perfil topográfico dos contatos encobertos e contatos aproximados mostra a variação do terreno e explana tanto sobre a geologia da área quanto ao uso e ocupação (Figura 6). Os contatos aproximados são o limite entre duas unidades geológicas, no caso, limite entre duas fácies, sendo que a posição geográfica pode ser um pouco imprecisa por falta de dados de campo (IBGE, 1999). Os contatos encobertos são uma continuidade desses contatos aproximados, pois separam os mesmos litotipos, porém estão recobertos por depósitos de sedimentos. As áreas mais baixas da paisagem são constituídas pela Formação Lagoa Formosa, que geralmente ocorre entre cotas de 800 e 870 metros no município, e esses contatos estão separando dois litotipos da formação no local, que seriam a fácies de diamictitos e a fácies de siltitos, arenitos, argilitos e jaspilitos (UHLEIN et al., 2011a). As coberturas Terciárias-Quaternárias possuem espessura pequena e ocorrem de forma descontínua na Folha Carmo do Paranaíba, sendo que quanto mais afastada das áreas mais

movimentadas no relevo, maiores são os platôs formados por esses sedimentos. Esses platôs possibilitaram a formação de Latossolos, que por sua vez sustentam a atividade agrícola. As bordas íngremes são compostas por Cambissolos formados sobre os litotipos da Formação Lagoa Formosa, e são solos rasos, em sua maioria destinados às pastagens. Dessa forma, a distância euclidiana dos contatos encobertos pode estar relacionada com esses depósitos de sedimentos que favoreceram a formação de áreas relativamente mais planas com solos melhores para o desenvolvimento da agricultura.

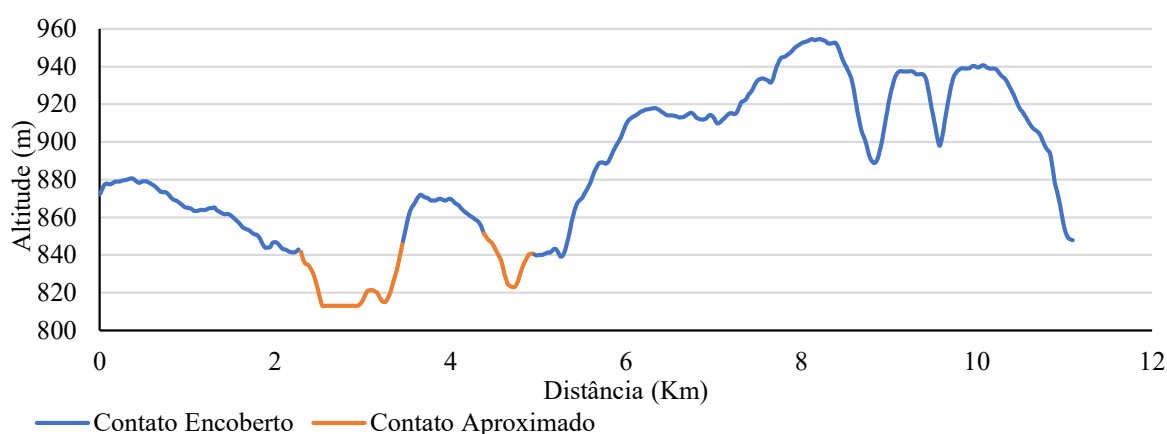


Figura 6 - Perfil topográfico dos contatos encobertos.

O índice SAVI consegue combinar o uso do NDVI e do NDSI, pois é um índice ajustado para solo, porém acompanha um fator de correção para a vegetação. De acordo com Xu (2007), esse índice possui uma dinamicidade na variação das suas informações, o que permite uma detecção melhor de áreas cobertas com plantas de menor porte, sendo uma das suas vantagens em relação ao índice NDVI (PATEL, MUKHERJEE, 2014). Os valores mais altos do índice SAVI gerado para a área de estudo na época chuvosa e com o fator de correção de 0,5 (para densidade média da vegetação) apontam solo exposto, e os valores mais baixos mostram locais onde a vegetação é mais vigorosa (HUETE, 1988). Esse contraste na época chuvosa é muito maior do que durante a época seca, e auxilia na separação dessas áreas vegetadas e das áreas de solo exposto. Além disso, esse índice também realçou a área urbana e até mesmo as estradas pavimentadas e as estradas rurais.

A classificação dos solos até o quarto nível categórico foi também escolhido para classificar o uso e ocupação no município de Lagoa Formosa. Essas classes são do mapeamento realizado pela Embrapa na região do Alto Paranaíba em 2004 na escala de 1:250.000 (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004) e correspondem à ordem dos Latossolos, Cambissolos e Neossolos, que ocupam respectivamente 48,70%, 27,30% e 24% do município. No quarto nível categórico, as classes de solos são discriminadas por um conjunto de atributos, alguns sendo

mais importantes que outros, ao contrário dos primeiros níveis categóricos, onde os solos são diferenciados por um ou poucos atributos diagnósticos (SANTOS ET AL., 2013).

Outra variável escolhida pelo algoritmo foi o *Topographic Wetness Index* (TWI). Esse índice foi desenvolvido por Beven e Kirkby (1979) com um modelo de escoamento superficial, e tem sido utilizado para estudar os efeitos da escala espacial nos processos hidrológicos e para identificar os caminhos preferenciais da drenagem para modelagem geoquímica e para caracterizar processos biológicos como padrões de vegetação (SORENSEN, ZINKO, SEIBERT, 2006). O TWI se relaciona com a medida do fluxo da água em direção a um ponto do declive, e tem sido muito utilizada para inferir informações sobre a distribuição das condições de umidade (GRABS et al., 2009). Considerando a água como fator essencial para desenvolvimento da vegetação, entende-se que essa variável deve ter sido escolhida pelo seu poder de predição da vegetação desenvolvida. Áreas com maiores teores de umidade sustentam mais a agricultura irrigada e a vegetação de maior porte, que na área de estudo está representada pelas matas ciliares – novamente a presença da água como determinante para a vegetação. É importante lembrar que esse índice é derivado da topografia, que é também um fator determinante no desenvolvimento da vegetação, já que áreas planas terão maior infiltração de água e, conseqüentemente, maior umidade. O estudo de Deng et al. (2007) já havia mostrado que existe uma alta correlação entre topografia e vegetação, justamente porque a primeira é uma variável consistente para explicar a variabilidade da umidade e da vegetação mais vigorosa.

As localidades do município de Lagoa Formosa são alguns pontos de interesse, entre eles escolas, cemitérios, igrejas, dois distritos e propriedades rurais. Todas essas localidades estão próximas de áreas de pastagem e de agricultura. Somente duas das seis escolas estão associadas à área urbana, as outras quatro escolas estão distribuídas pelo restante do município. Os cemitérios também estão mais afastados e associados aos mesmos usos do solo, assim como as fazendas e os distritos de Limeira e Monjolinho. A escolha da variável da distância euclidiana das localidades pode ser explicada por servir de auxílio à delimitação da área urbana e área de influência de atividade humana.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) também foi escolhido pelo algoritmo para classificar o uso e ocupação do solo em Lagoa Formosa. O estudo de Gislason, Benediktsson e Sveinsson (2006), analisando a classificação do uso do solo pelo *Random Forest*, demonstrou que o MDE é a variável mais importante para identificar as classes quando comparada à declividade e orientação das vertentes. A escolha dessa variável para Lagoa Formosa pode ser

explicada por discernir padrões pelos domínios geomorfológicos e pela altitude. Um bom exemplo seria a instalação de áreas agrícolas nos platôs terciários. Essas áreas são de altitude pouco variável, caracterizando um planalto de predomínio de Latossolos, e a quebra do relevo, nas vertentes dissecadas da área, caracterizam outro tipo de solo, e conseqüentemente outro tipo de uso. Além disso, é possível entender a distribuição da umidade, como já explanado anteriormente quando da escolha do índice TWI, a distribuição da radiação solar, que irá variar com a orientação das vertentes, entre outras características que podem ser melhor compreendidas com um modelo topográfico da área.

O índice *Multiresolution Valey Bottom Flatness* (MRVBF, índice de multirresolução de fundos de vale planos) visa identificar os fundos de vales como áreas que são planas e baixas em relação ao ambiente ao redor, discriminando regiões erosivas e regiões deposicionais, que corresponderiam ao fundo dos vales. Sua vantagem em relação aos mapas de declividade é que os fundos de vale são representados como regiões contíguas, mais conformes aos mapeamentos geomorfológicos. Também por isso, esse índice pode ser utilizado para melhor visualização de paisagens (GALLANT, DOWLING, 2003). Há uma intrínseca relação entre o uso e ocupação do solo e sua geomorfologia, e pode ser esse o motivo da escolha dessa variável pelo algoritmo *Random Forest*. O MRVBF auxilia na identificação de vales na imagem, que apresentam geologia e pedologia diferente das áreas mais elevadas. Esses vales se encontram em áreas mais susceptíveis aos processos erosivos, dada pelo material de origem de granulometria siltosa, e pelo solo jovem e raso que dificulta seu uso para práticas agrícolas, sendo geralmente voltados às atividades pecuárias. Também a esses vales estão geralmente associados a presença de canais de água, uma outra utilidade do MRVBF, já que através desse índice é possível estimar quantitativamente a capacidade de armazenamento de água. Ainda que os vales da região sejam estreitos, estão geralmente associados a vertentes íngremes onde o uso dominante é pastagem, ou são áreas de vegetação natural de vegetação nativa.

A importância que a umidade tem para a classificação é mais uma prova de como a água é um fator de restrição para o desenvolvimento de culturas e florestas. O armazenamento de água no solo é fator chave para compreensão da distribuição dos usos no município, exemplificado pela presença de variáveis como o TWI e MRVBF.

4.2. Classificação do Uso e Ocupação

A Figura 7 mostra algumas imagens da paisagem no município de Lagoa Formosa, e a Figura 8 mostra a classificação do uso e ocupação do solo com o modelo final de 16 variáveis selecionados pelo algoritmo *Random Forest*. A maior parte do município está dominada pelas atividades agropecuárias, com destaque para às pastagens que correspondem a pouco mais que 50% da área total. A agricultura corresponde a aproximadamente 34%. Os corpos d'água são principalmente os lagos e a vegetação nativa é representada principalmente pelas matas ciliares, podendo incluir fragmentos da vegetação original e algumas pequenas áreas de reflorestamento. A queimada corresponde a uma pequena mancha de 0,03% da área total. A área urbana identificada é o local da sede do município.



Figura 7 – Imagens da paisagem no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais. A: agropecuária nos solos derivados do Grupo Mata da Corda; B: agricultura nos platôs de solos derivados das Coberturas Elúvio-Coluvionares, pastagens nas encostas e material da Formação Lagoa Formosa exposto, ao fundo.

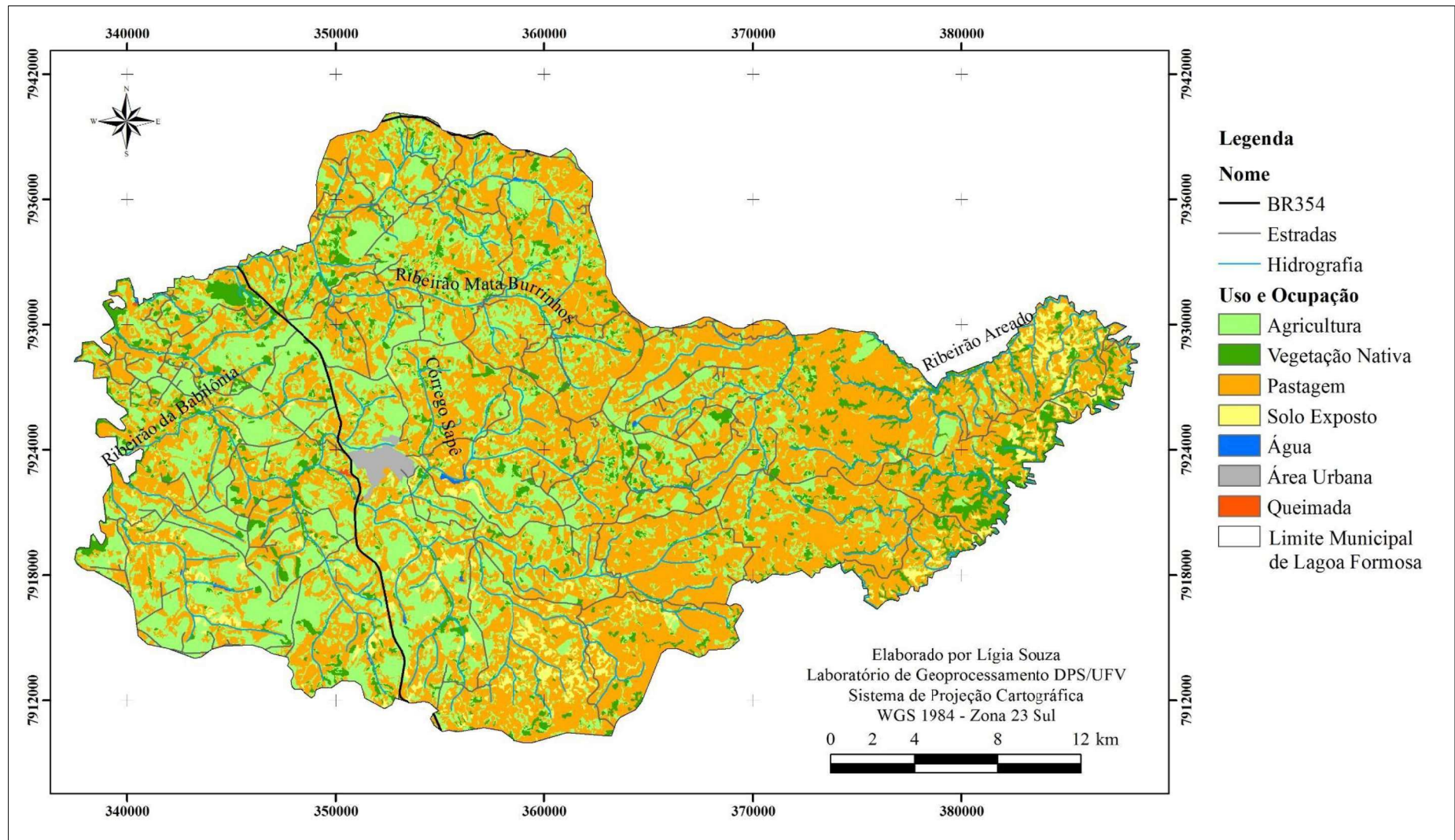


Figura 8 - Mapa de uso e ocupação do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais, elaborado pelo algoritmo Random Forest.

O uso e ocupação do solo depende de diversos fatores ambientais. No que diz respeito às fases do relevo, classificadas com a declividade de acordo com Santos et al. (2013), Lagoa Formosa tem quase a metade do seu município sobre relevo ondulado. A Figura 9 mostra a distribuição dos principais usos da área em relação às fases de relevo. Nota-se que no relevo Ondulado, de topografia pouco movimentada e constituído por declives moderados de 8 a 20%, há o predomínio da pastagem, ocupando quase o dobro da área total da fase em relação à agricultura. Isso é dado pela dificuldade de instauração de práticas agrícolas nesse relevo mais movimentado. Esse é um dos fatores que permite que a pastagem seja a atividade de maior expressão, pois está em consoante com a fase de relevo de maior destaque. A agricultura está localizada principalmente no relevo Suave Ondulado, que é uma topografia de declives mais amenos, entre 3 e 8%, e no relevo plano, de 0 a 3% de declividade. Nota-se também que proporção da vegetação nativa é maior nas fases de relevos mais íngremes, condicionados pela dificuldade da implantação de atividades agropecuárias. O solo exposto não ocorre na fase Plano, explicitando a importância da declividade para atuação de processos erosivos.

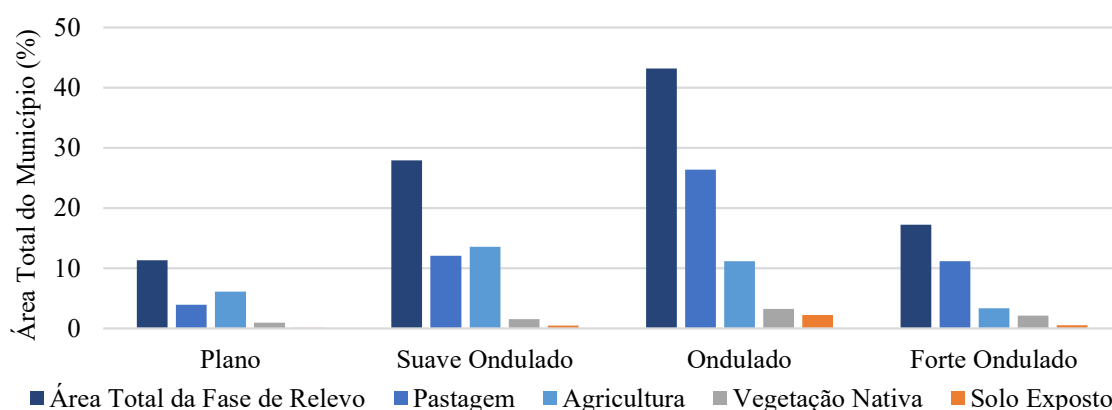


Figura 9 - Usos do solo por fase de relevo.

Na Figura 10, a comparação entre as fases de relevo e as classes de solo ajuda a entender a distribuição da ocupação, pois a agricultura, que está associada aos relevos plano e suave ondulado, está no mesmo relevo onde há predomínio da classe de Latossolos. A fase do relevo Ondulado tem as classes de solo melhor distribuídas, e o aumento da presença de Cambissolos é acompanhado pelo aumento da pastagem. A agricultura também é expressiva nessa fase e está relacionada com os Latossolos nela presentes. Ainda que esse relevo seja mais movimentado, dentro do intervalo de declividade atribuído a essa fase há declives mais suaves onde estão esses Latossolos. Do intervalo de 8 a 20% da declividade total, 50% da classe de Latossolos nessa fase do relevo está na declividade entre 8 a 12%. Na fase do relevo Forte Ondulado, de declividade entre 20 e 45%, há o predomínio de Neossolos, mas ainda há a presença da atividade

agropecuária, como visto na Figura 9. Isso pode ser explicado não somente pela existência de Latossolos e Cambissolos nessa fase, mas também porque esses Neossolos da região podem apresentar horizonte A chernozêmico, que são mais espessos e apresentam alta saturação por bases, permitindo o desenvolvimento da vegetação (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004; SANTOS et al., 2013). A formação desse horizonte em Lagoa Formosa está condicionada principalmente às rochas da Formação Mata da Corda, que fornecem mais nutrientes ao solo, porém sua susceptibilidade à erosão e a dificuldade de mecanização nessa fase da paisagem não propiciam a agricultura (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004; UHLEIN et al., 2011a).

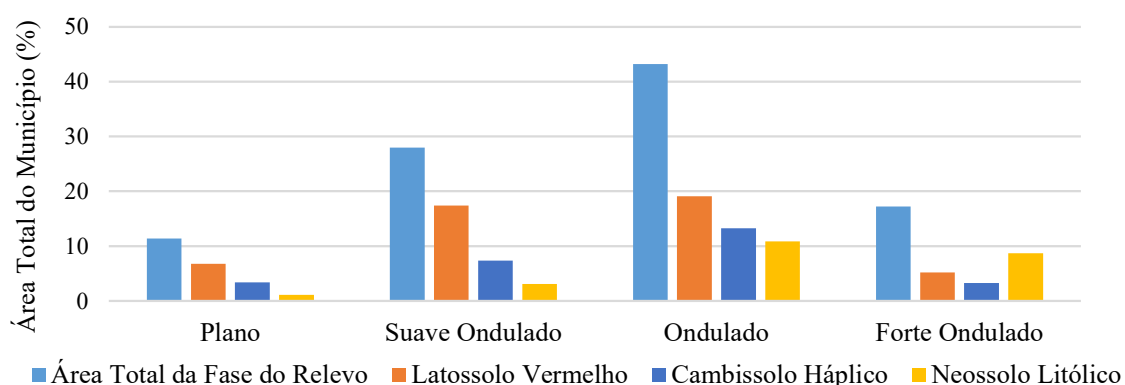


Figura 10 - Classes de solo por fase do relevo.

Os Latossolos são em sua maioria Latossolos Vermelhos que correspondem a aproximadamente 48,50% da área, porém há uma pequena mancha de Latossolo Vermelho-Amarelo, equivalente a menos de 1% do território. O Latossolo Vermelho Ácrico típico é o de maior expressão na região, como mostra a Figura 11, com quase 25% da área. As outras seis classes são responsáveis pelos 26% da área restante, com destaque para a associação de Latossolo Vermelho Perférico e Latossolo Vermelho Distroférico, ocupando quase 8% da área total, e para o Latossolo Vermelho Distrófico típico, com aproximadamente 6,5% da área.

Nas áreas latossólicas, há a predominância da agricultura e de pastagens, onde essas representam quase 90% da área de Latossolos Vermelhos e quase 45% da área do município. Na Figura 11, é possível ver a distribuição dos usos pelas classes de Latossolo Vermelho. A vegetação nativa corresponde a 6% do restante da área de Latossolo Vermelho, o equivalente a 3% da área do município sobre esse tipo de solo. O restante dos usos se divide entre solo exposto e área urbana. É interessante notar que quase não há solo exposto por erosão nos Latossolos. Isso pode ser explicado tanto pelo relevo predominante dessa paisagem latossólica, que tende a ser mais plano, fator importante para a formação desses solos, quanto pela profundidade do *solum*, que permite o desenvolvimento de vegetação de maior porte, que auxilia na prevenção

da erosão. Além disso, essas áreas onde se desenvolveram Latossolos estão majoritariamente sobre depósitos do Terciário, resultados do intemperismo do material do Grupo Mata da Corda e ao Grupo Areado. O material de origem desses solos em Lagoa Formosa são principalmente coberturas elúvio-coluvionares, com destaque para sedimentos eluvionares compostos por areias do intemperismo dos arenitos, que formaram grandes platôs favoráveis ao desenvolvimento da agricultura (UHLEIN et al., 2011a). O relevo plano formado por esses sedimentos possibilitou a formação de solos profundos, ainda que sejam mais pobres quimicamente. A capacidade de armazenamento de água desses solos também favorece o desenvolvimento de vegetação de maior porte e de atividades agrícolas. Todos esses fatores não favorecem a exposição do solo, que na classe dos Latossolos não corresponde sequer a 25% de toda a área de solo exposto do município. Silva et al. (2009) conduziram experimentos em Latossolos Vermelhos distroféricos na região de Lavras e mostraram como as características desses solos formam uma estrutura granular que gera baixos valores de erodibilidade e altos valores de tolerância de perda de solo (valores limite para manter o potencial produtivo sustentável ao longo dos anos).

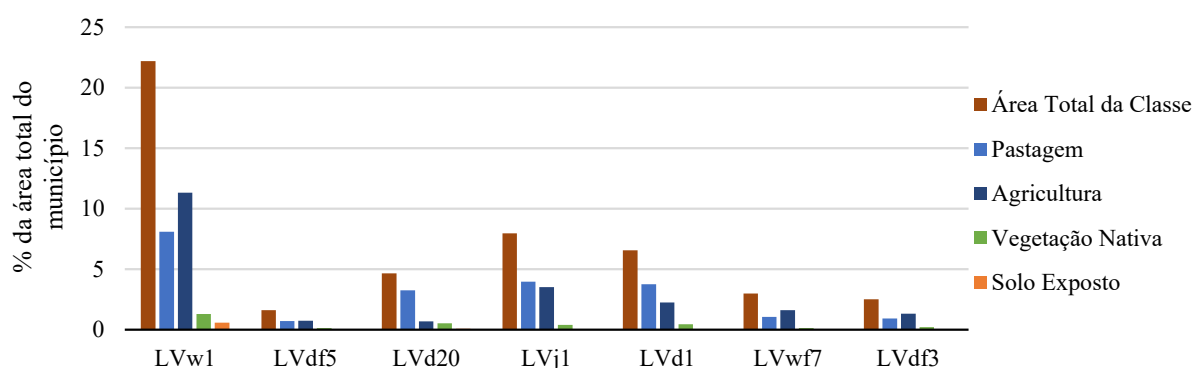


Figura 11 - Área ocupada pelas classes de Latossolo Vermelho no município de Lagoa Formosa e seus usos predominantes.

LVw1 - Latossolo Vermelho Ácrico típico, textura muito argilosa, A moderado, distrófico, epiálico ou não, fase cerrado tropical subcaducifólio relevo plano e suave ondulado; LVdf5 - Latossolo Vermelho Distroférico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subcaducifólia suave ondulado; LVd20 - Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia relevo suave ondulado; LVj1 - Associação de Latossolo Vermelho Perférico + Latossolo Vermelho Distroférico, ambos típicos, textura argilosa, A moderado, epiálicos ou não, fase floresta tropical; LVd1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura muito argilosa, A moderado, álico, fase floresta tropical subperenifólia relevo plano e suave ondulado; LVwf7 - Latossolo Vermelho Acriférico típico, textura argilosa, A moderado, distrófico, epiálico ou não, fase cerrado tropical subcaducifólio relevo plano e suave ondulado; LVdf3 - Latossolo Vermelho Distroférico típico, textura muito argilosa, A moderado, fase floresta tropical subcaducifólia relevo plano e suave ondulado.

Todos os Cambissolos da área de estudo são Cambissolos Háplicos, com destaque para a associação de Cambissolo de fase floresta com Cambissolo álico de fase campo cerrado, sendo ambos Háplicos, que corresponde a pouco mais de 20% da área do município. Com quase 7% da área do município, há uma classe que é a associação de Cambissolo Háplico e Neossolo

Litólico, e ela também se destaca por ser quase toda ocupada com pastagens (Figura 12), já que ambos os solos são eutróficos e podem oferecer bastante nutrientes para desenvolvimento da vegetação de menor porte ainda que em solo raso.

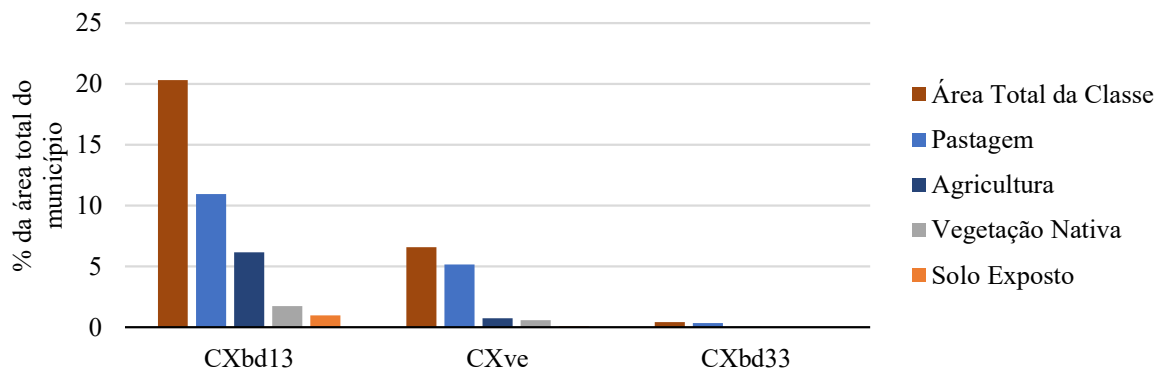


Figura 12 - Área ocupada pelas classes de Cambissolo Háptico no município de Lagoa Formosa e seus usos predominantes.

CXbd13 - Associação de Cambissolo fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado e ondulado + Cambissolo álico, fase campo cerrado tropical relevo ondulado e forte; CXve - Associação de Cambissolo Háptico Ta A moderado + Neossolo Litólico A moderado e chernozêmico, ambos Eutróficos típicos, textura argilosa, fase floresta tropical; CXbd33 - Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, textura média, A moderado, fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado.

A distribuição dos Cambissolos está dada na Figura 12, e é possível observar que a maioria das suas áreas está ocupada com pastagens, que correspondem a 60% dos Cambissolos, e a agricultura ocupa quase 26% das áreas dessa classe. Esse tipo de solo está nas áreas mais íngremes do relevo, onde é difícil o desenvolvimento de um horizonte B mais profundo. Dessa forma, não é possível desenvolver vegetação de grande porte, mas o pequeno *solum* desenvolvido favorece a atividade pecuária. A susceptibilidade à erosão irá variar com a profundidade do solo, que quanto menor for, mais susceptível será. A associação de Cambissolos que domina no município de Lagoa Formosa está entre relevo suave ondulado, ondulado e forte ondulado e apresentam horizonte A moderado, o que explica a fixação da vegetação e ainda os valores baixos de solo exposto. Com essas condições, provavelmente os Cambissolos que estão em relevo forte ondulado devem concentrar o solo exposto nessa classe, justamente por um horizonte B menos espesso. Além disso, o declive favorece a remoção de material do horizonte mais superficial, ainda que tenha uma profundidade considerável, como ocorre geralmente em horizontes A moderado. A vegetação nativa presente nesses Cambissolos pode ser explicada pelo encaixe dos vales na região, já que ocorre em cotas correspondentes a um domínio geomorfológico constituído por colinas com topos ondulados e de perfil côncavo-convexo com vales bem escavados (UHLEIN et al., 2011a). É justamente a erosão a responsável por esse relevo característico, já que as rochas do embasamento (no caso, da Formação Lagoa

Formosa) são mais susceptíveis ao intemperismo, que são os diamictitos e os siltitos, principalmente.

Dois tipos de Neossolos presentes na região são responsáveis por quase 94% da área total dessa classe no município, que apresenta um total de quatro classes de Neossolo segundo levantamento da Embrapa (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). A atividade dominante também é a pastagem nesse tipo de solo, com destaque para o solo exposto que está localizado em sua maioria numa associação de Neossolo Litólico com Cambissolo Háptico. A pastagem nos Neossolos está majoritariamente no Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico, que por ser um solo rico em nutrientes, favorece o desenvolvimento de vegetação utilizável para tal atividade, ainda que não tenha horizonte B desenvolvido, ficando a cargo do horizonte A de sustentar essa vegetação. O mesmo vale para a agricultura, que também está desenvolvida sobre esse tipo de solo no caso dos Neossolos. A Figura 13 mostra a distribuição das quatro classes de Neossolo na área do município, assim como seu uso e ocupação.

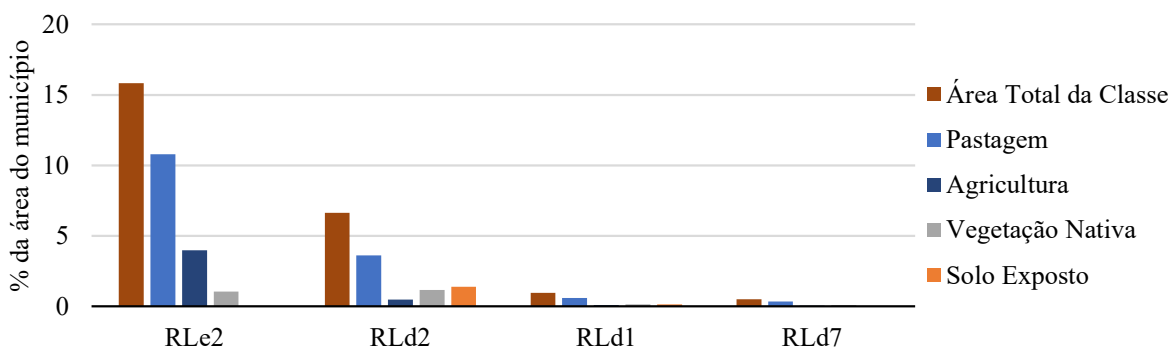


Figura 137 - Área ocupada pelas classes de Neossolo Litólico no município de Lagoa Formosa e seus usos predominantes.

RLe2 - Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico Ta, textura argilosa, fase floresta tropical caducifólia relevo ondulado e forte ondulado; RLd2 - Associação de Neossolo Litólico + Cambissolo Háptico Tb, ambos Distróficos típicos, textura argilosa, A moderado, álicos, fase campo cerrado tropical relevo ondulado e forte ondulado; RLd1 - Associação de Neossolo Litólico + Cambissolo Háptico Tb, álico, ambos Distróficos típicos, textura argilosa, A moderado, fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado e forte ondulado; RLd7 - Neossolo Litólico Distrófico típico, textura média, A moderado, fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado e forte ondulado.

Neves et al. (2011) também trabalharam com Neossolos Litólicos em relevos acidentados, e mostrou maiores perdas de solo nessa classe pelas mesmas razões, ou seja, menor volume de terra disponível para o suporte da vegetação e da umidade. Além disso, a sua profundidade efetiva é dependente também de aspectos da rocha de origem. No caso de Lagoa Formosa, o mergulho das rochas é variável em diversos locais dado pelo soerguimento da área no Cretáceo, no evento magmático da deposição do Grupo Mata da Corda. Nos locais de Neossolos Litólicos, muitas vezes as rochas base do Grupo Bambuí são pelíticas

horizontalizadas que reduzem a infiltração da água, e dificultam também o desenvolvimento do solo (UHLEIN et al., 2011b). Assim, a pequena profundidade efetiva desses solos, aliados ao relevo declivoso e à pouca ou nenhuma vegetação desenvolvida nessas condições, são responsáveis pela sua alta erodibilidade e consequente susceptibilidade de exposição.

Os Cambissolos na região, majoritariamente associados às vertentes, apresentam o predomínio de pastagens, como mostra a Figura 14. Esse gráfico mostra a proporção quase igual das áreas agrícolas e de pastagem nos Latossolos, o que se explica pela distribuição desses solos nas fases do relevo, como já apontado pela Figura 10. É notável que o solo exposto ocorre em áreas de Neossolos, explicado pela sua susceptibilidade à erosão, ainda mais quando em locais íngremes da paisagem.

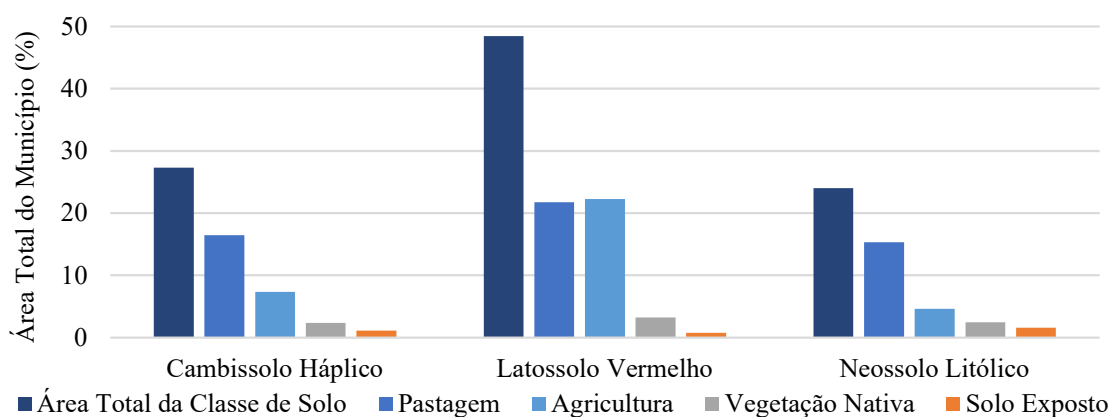


Figura 14 - Uso e ocupação em Lagoa Formosa em relação às classes de solo.

Outro fator importante para entender a distribuição do uso é a geologia. Na Figura 15 tem-se que a fase Plano tem predomínio da Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí, e das Coberturas Elúvio-Coluvionares do Terciário. A Formação Lagoa Formosa ocorre na área entre as cotas de 800 e 870 metros, e essas coberturas terciárias ocorrem de forma descontínua na paisagem e apresentam pequenas espessuras, segundo Uhlein et al. (2011a). Da área total de ocorrência da fase Plano, pouco mais de 80% dessa está em altitudes até 900 metros. Quase 10% dessa fase está em altitudes de 900 a 950 metros, que, como constatado em trabalho de campo, corresponde à faixa de ocorrência das coberturas terciárias. Tais coberturas encontram-se geralmente depositadas sobre os litotipos da Formação Lagoa Formosa, e por isso também estão em partes relativamente mais baixas do relevo local. Como foi possível observar na Figura 9, o maior uso dessa fase é destinado à agricultura, favorecido pela sua topografia plana. Porém, as rochas da Formação Lagoa Formosa são mais resistentes ao intemperismo e dificultam a

gênese de solos melhores, que poderiam ser usados para plantio, porém não seriam solos ricos em nutrientes. Dessa forma, a área acaba sendo destinada às pastagens.

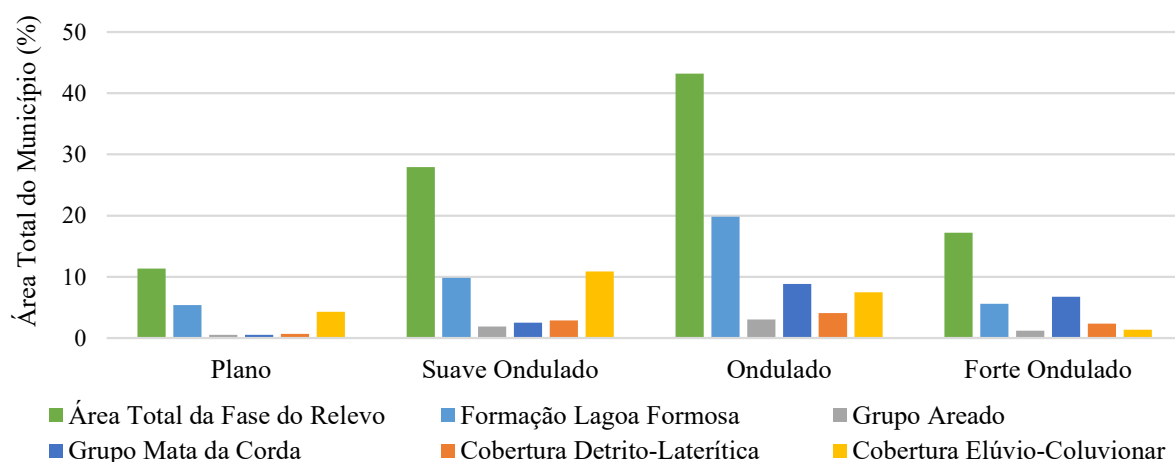


Figura 15 - Unidades geológicas de Lagoa Formosa por fases do relevo.

A Formação Lagoa Formosa domina em praticamente todas as fases do relevo por ser a unidade geológica de maior expressão do município, correspondendo a 40% da área total. As Coberturas Elúvio-Coluvionares correspondem a 24% do município, e por isso também possuem destaque na sua distribuição pelas fases do relevo. O Grupo Mata da Corda corresponde a quase 19% da área do município, e mais de 80% desse grupo está localizado sobre as fases Ondulado e Forte Ondulado. Essa unidade geológica é originada de um evento magmático alcalino durante o Cretáceo Superior pelo soerguimento do Arco do Alto Paranaíba, que alterou a paisagem tanto pela atividade tectônica em si quanto pela perturbação sofrida pelos sedimentos do Grupo Areado (SEER, MORAES, FOGAÇA, 1989; BAPTISTA, 2004; SGARBI, 2011). As rochas da Formação Patos, formação do Grupo Mata da Corda presente em Lagoa Formosa, estão associadas às lavas e depósitos de condutos que estão no topo da paisagem ainda hoje, e sua presença está relacionada com os declives mais íngremes (Figura 15), resultados do soerguimento do Arco do Alto do Paranaíba (SGARBI, 2011; UHLEIN et al., 2011a). O Grupo Areado está exposto somente em aproximadamente 7% do município, mas está presente principalmente sob as rochas do Grupo Mata da Corda (UHLEIN et al., 2011a). Esse grupo também está mais relacionado às áreas íngremes, pois está associado às vertentes.

A Figura 16 faz a relação entre as unidades geológicas e as classes de solo. A Formação Lagoa Formosa é composta por rochas metassedimentares, onde rochas pelíticas foram formadas pela consolidação de partículas muito pequenas, de silte e argila, que se depositaram em estratos horizontalizados e tiveram seu padrão alterado pelo metamorfismo (ALMEIDA, RESENDE, 1985; UHLEIN et al., 2011a). A formação e a inclinação depois do metamorfismo

afetam a gênese dos solos, principalmente a espessura. O estudo de Chagas et al. (1997) comprovou que a orientação das camadas das rochas afeta a formação dos Latossolos na zona de Campos das Vertentes, em Minas Gerais. Os Cambissolos desenvolvidos sobre rochas pelíticas apresentam baixa permeabilidade, baixa atividade pedológica e baixa fertilidade dada pela pobreza do material de origem, o que explica a baixa taxa de pedogênese desses solos na região (RESENDE, 1985). Dessa forma entende-se porque na Formação Lagoa Formosa há o predomínio de Cambissolos e também de Neossolos, dada a dificuldade da ação do processo de intemperismo e da declividade, como já discutido. A formação dos Latossolos nessa Formação está condicionada principalmente pela topografia.

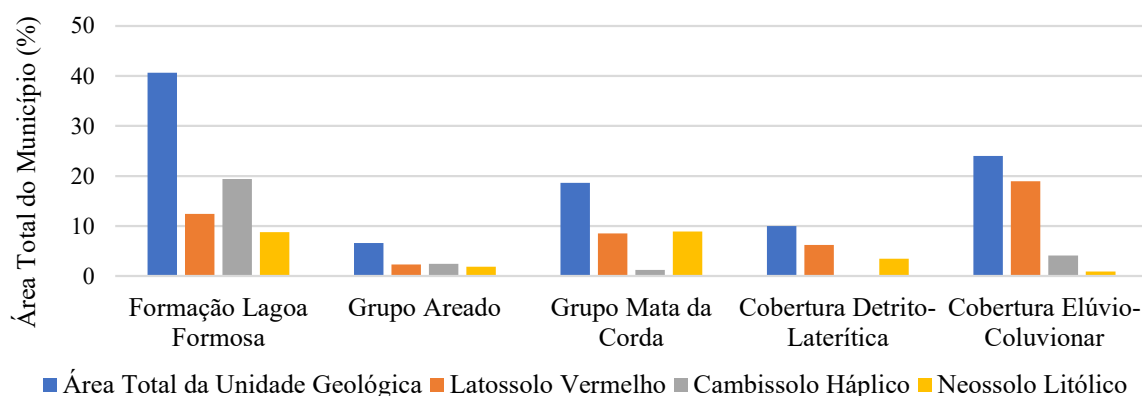


Figura 16 - Classes de solos em relação às unidades geológicas.

Na Figura 16 é possível perceber a predominância de Latossolos na Cobertura Elúvio-Coluvionar. Essas coberturas são compostas de sedimentos argilo-arenosos avermelhados ou esbranquiçados, resultantes tanto da regressão das formas de relevo tabular elevado quando do intemperismo dos arenitos e outras rochas (UHLEIN et al., 2011a). Locais onde há estratos horizontalizados das rochas da Formação Lagoa Formosa permitiram a deposição e o intemperismo dessas coberturas, o que permitiu a gênese de Latossolos, facilitado pelo material desses sedimentos. Nas Coberturas Detrito-Lateríticas e no Grupo Mata da Corda, a presença de Cambissolos é pequena, correspondendo a pouco mais de 1% dessa classe na região. As Coberturas Detrito-Lateríticas são compostas por sedimentos argilo-arenosos do Terciário que ocorrem em cotas superiores a 1000 metros, de forma descontínua e de pequena espessura (UHLEIN et al., 2011a), e são responsáveis pela manutenção do relevo. Áreas de retirada desse material para outros usos, como capeamento de estradas (Figura 17), tem desencadeado processos erosivos na região. As duas unidades geológicas estão na zona geomorfológica de planalto, favorecendo a formação de Latossolos. Porém, como apontado no Figura 15, essas unidades estão em relevo mais acidentado, não permitindo a formação de um horizonte B

incipiente para a caracterização de um Cambissolo. No entanto, a riqueza das rochas do Grupo Mata da Corda permite o desenvolvimento de um horizonte A que sustenta a vegetação nessas encostas, caracterizando os Neossolos Litólicos com horizonte A chernozêmico presentes na região (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004).



Figura 17 - Cobertura laterítica. (A) Retirada da cobertura laterítica. (B) Uso do material laterítico para capeamento de estradas.

5. CONCLUSÕES

1. De 98 variáveis analisadas pelo *Random Forest*, 16 dessas mostraram ser mais importantes para classificar o uso e ocupação do solo no município de Lagoa Formosa. O modelo de 16 variáveis foi escolhido por ter apresentado o maior valor do índice *Kappa*. O modelo final é composto de dez variáveis espectrais, três topográficas, duas de distância euclidiana e uma variável pedológica.

2. Das variáveis escolhidas, nota-se a importância da umidade para a distinção dos ambientes, não só pela diferença da vegetação, mas pela própria capacidade dos solos de armazenar água, o que irá variar de acordo com a sua classe. Foram escolhidas pelo algoritmo sete variáveis diretamente relacionadas com a umidade, sendo elas as bandas 3 e 7 para época seca, e as bandas 5 e 6 tanto para época seca quanto para a época chuvosa, além dos índices topográficos TWI e MRVBF.

3. A seleção da covariável de classificação pedológica até o quarto nível categórico para o modelo final indicou como mudanças dentro das ordens e subordens das classes de solos afetam a distribuição do uso e ocupação do solo.

4. Relevo e geologia condicionam a pedogênese, afetando a espessura do manto de intemperismo dos solos e sua fertilidade natural, influenciando na espacialização do uso e ocupação do solo no município.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J.; RESENDE, M. Considerações sobre o manejo de solos rasos desenvolvidos de rochas pelíticas no Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 128, p. 19-26, ago. 1985.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas**. Aplicações na agricultura. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa – SPI / Embrapa – CPAC, 1998. 434p.
- BAPTISTA, M. C. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.
- BEN-DOR, E.; GOLDSHLEGER, N.; BENYAMINI, Y.; AGASSI, M. R.; BLUMBERG, D. G. The spectral reflectance properties of soil structural crusts in the 1.2-to 2.5- μ m spectral region. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 1, p. 289-299, 2003.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/ Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.
- BREIMAN, L. Bagging predictors. **Machine learning**, v. 24, n. 2, p. 123-140, 1996.
- BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.
- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, J.; STONE, C. J.; OLSHEN, R. A. **Classification and regression trees**. Chapman and Hall/CRC, 1984. 386 p.
- CÂMARA MUNICIPAL DE LAGOA FORMOSA. **Lagoa Formosa**. Disponível em: <http://camaralagoa.mg.gov.br/cidade>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- CHAGAS, C. S.; CURI, N.; DUARTE, M. N.; MOTTA, P. E. F.; LIMA, J. M. Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de Latossolos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 539-548, 1997.
- CHAN, J. C. W.; PAELINCKX, D. Evaluation of Random Forest and Adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2999-3011, 2008.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 304p.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991-2007, 2015.
- COSTA NETO, P. L. de O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 266 p.

DENG, Y.; CHEN, X.; CHUVIECO, E.; WARNER, T.; WILSON, J. P. Multi-scale linkages between topographic attributes and vegetation indices in a mountainous landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 1, p. 122-134, 2007.

DENG, Y.; WU, C.; LI, M.; CHEN, R. RNDISI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p. 40-48, 2015.

DRURY, S. **Image Interpretation in Geology**. London: Allen and Unwin, 1987. 304 p.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; LANDISLAV, R.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Mapa de Solos de Minas Gerais: legenda expandida**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente/UFV/CETEC/UFLA/FEAM, 2010. 49 p.

FREUND, Y.; SCHAPIRE, R. E. Experiments with a new boosting algorithm. **Machine learning**. Proceedings of the Thirteenth International Conference, p. 148-156, 1996.

GALLANT, J. C.; DOWLING, T. I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, 2003.

GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forest classification of multisource remote sensing and geographic data. In: **Proceedings 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004)**, v. 2, p. 1049-1052, 2004.

GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forests for land cover classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 4, p. 294-300, 2006.

GRABS, T.; SEIBERT, J.; BISHOP, K.; LAUDON, H. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 1, p. 15-23, 2009.

GRINAND, C.; RAKOTOMALALA, F.; GOND, V.; VAUDRY, R.; BERNOUX, M.; VIEILLEDENT, G. Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 68-80, 2013.

GOWER, J. C. A general coefficient of similarity and some of its properties. **Biometrics**, v. 27, n. 4, p. 857-871, 1971.

GUO, L.; CHEHATA, N.; MALLET, C.; BOUKIR, S. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 56-66, 2011.

GUPTA, R. P. **Remote sensing geology**. Springer Science & Business Media, 2013. 656 p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico – 2010**. Rio de Janeiro, IBGE: 2011. 775 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades**: Minas Gerais, Lagoa Formosa. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=313750>. Acesso em: 03 dez. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Introdução ao processamento digital de imagens**. IBGE, Primeira Divisão de Geociências do Nordeste. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 92 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

JAMES, F. C.; MCCULLOCH, C. E. Multivariate analysis in ecology and systematics: panacea or Pandora's box?. **Annual Review of Ecology and Systematics**, p. 129-166, 1990.

KEARNEY, M. S.; ROGERS, A. S.; TOWNSHEND, J. R.; RIZZO, E.; STUTZER, D.; STEVENSON, J.; SUNDBORG, K. Landsat imagery shows decline of coastal marshes in Chesapeake and Delaware Bays. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v. 83, n. 16, p. 173-178, 2002.

LI, D. X. On default correlation: A copula function approach. **Journal of Fixed Income**, P. 43-54, 2000.

LOPEZ-PAZ, D.; HENNIG, P.; SCHÖLKOPF, B. The randomized dependence coefficient. In: **Advances in Neural Information Processing Systems**, p. 1-9, 2013.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. (Org). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013. 297 p.

MOTTA, P. E. F. da; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. dos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do alto Paranaíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 414 p.

MOURA, M. da C. C. L.; GONÇALVES, L. S. A.; SUDRÉ, C. P.; RODRIGUES, R.; AMARAL JUNIOR, A. T. do; PEREIRA, T. N. S. Algoritmo de Gower na estimativa da divergência genética em germoplasma de pimenta. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 2, p. 155-161, 2010.

MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping—A review. **Geoderma**, v. 162, n. 1, p. 1-19, 2011.

NAIDOO, L.; CHO, M. A.; MATHIEU, R.; ASNER, G. Classification of savanna tree species, in the Greater Kruger National Park region, by integrating hyperspectral and LiDAR data in a Random Forest data mining environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.69, p. 167-179, 2012.

NEVES, S.; MOTINHO, M. C.; NEVES, R. J.; SOARES, E. R. C. Estimativa da perda de solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Jauru/MT. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia. Ano, v. 23, p. 423-434, 2011.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blücher, 2010. 388 p.

PAL, M. Random forest classifier for remote sensing classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 217-222, 2005.

PATEL, N.; MUKHERJEE, R. Extraction of impervious features from spectral indices using artificial neural network. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 3729-3741, 2014.

POCZOS, B.; GHAHRAMANI, Z.; SCHNEIDER, J. Copula-based kernel dependency measures. **Proceedings of the 29 th International Conference on Machine Learning**, Edinburgh, Scotland, UK, 2012.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria, 2016. Disponível em: <<<https://www.r-project.org/>>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos a conservação de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 128, p. 3-18, ago. 1985.

ROCHA, M. C.; GONÇALVES, L. S. A.; RODRIGUES, R.; SILVA, P. D.; CARMO, M. D.; ABOUD, A. C. D. S. Uso do algoritmo de Gower na determinação da divergência genética entre acessos de tomateiro do grupo cereja. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 423-431, 2010.

RODRÍGUEZ, V. M.; CARTEA, M. E.; PADILLA, G.; VELASCO, P.; ORDÁS, A. The nabicol: A horticultural crop in northwestern Spain. **Euphytica**, v. 142, n. 3, p. 237-246, 2005.

RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; GHIMIRE, B.; ROGAN, J.; CHICA-OLMO, M.; RIGOL-SANCHEZ, J. P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 67, p. 93-104, 2012.

ROGAN, J.; FRANKLIN, J.; STOW, D.; MILLER, J.; WOODCOCK, C.; ROBERTS, D. Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2272-2283, 2008.

ROGERS, A. S.; KEARNEY, M. S. Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2317-2335, 2004.

ROUSE, J. W. JR.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA special publication**, v. 351, p. 309-317, 1974.

SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 2. ed. New York: W. H. Freeman, 1987. 512 p.

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

SEER, H. J.; MORAES, L. C. de. FOGAÇA, A. C. C. **Roteiro Geológico para a Região de Lagoa Formosa – Chumbo – Carmo do Paranaíba-MG**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Minas Gerais, n. 9, 1989.

SEGAL, D. B. Theoretical basis for differentiation of ferric-iron bearing minerals using Landsat MSS data. **Proceedings of International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology 1982**, p. 949-951, 1982.

SGARBI, G. N. C. Sedimentação do Cretáceo Inferior na Bacia Sanfranciscana: O Grupo Areado. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011.

SILVA, P. R. **Uso de redes neurais e objetos geográficos na classificação digital de imagens de sensoriamento remoto**. 2012. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

SÖRENSEN, R.; ZINKO, U.; SEIBERT, J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 1, p. 101-112, 2006.

UHLEIN, A.; FREITAS, A. de M.; CRUZ, A. B. da; SILVA, Q. F. da; CAXITO, F. de A.; MOREIRA, G. de C. Folha Carmo do Paranaíba SE.23-Y-B-IV. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011a.

UHLEIN, A.; BAPTISTA, M. C.; SEER, H. J.; CAXITO, F. de A.; UHLEIN, G. J.; DARDENNE, M. A. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional de Leque Submarino em Bacia de Ante-País. **Revista Geonomos**, v. 19, n. 2, p. 163-172, 2011b.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat – A Global Land-Imaging Mission**. 2013. Disponível em: << <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf>>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8 (L8) – Data Users Handbook**. 2016. Disponível em: << <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

VIEIRA, E. A.; CARVALHO, F. I. F.; BERTAN, I.; KOPP, M. M.; ZIMMER, P. D.; BENIN, G.; SILVA, J. A. G.; HARTWING, I.; MALONE, G.; OLIVEIRA, A. C. Association between genetic distances in wheat (*Triticum aestivum* L.) as estimated by AFLP and morphological markers. **Genetics and Molecular Biology**, v. 30, n. 2, p. 392-399, 2007.

VIEIRA, M. A.; FORMAGGIO, A. R.; RENNÓ, C. D.; ATZBERGER, C.; AGUIAR, D. A.; MELLO, M. P. Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 553-562, 2012.

WASKE, B.; BRAUN, M. Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 5, p. 450-457, 2009.

XU, H. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 12, p. 1381-1391, 2007.

ZHOU, F.; ZHANG, A.; TOWNLEY-SMITH, L. A data mining approach for evaluation of optimal time-series of MODIS data for land cover mapping at a regional level. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 84, p. 114-129, 2013.

CAPÍTULO 3 - PREDIÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS ATRAVÉS DA SELEÇÃO DE COVARIÁVEIS PELO ALGORITMO RANDOM FOREST PARA O MUNICÍPIO DE LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

RESUMO

Esse capítulo objetiva mapear e prever áreas mais susceptíveis a dois processos erosivos em Lagoa Formosa através de imagens de satélite e do uso do algoritmo *Random Forest* para reconhecimento de padrão dos dados por processo de mineração de dados. Para isso, foram inseridas 90 covariáveis ambientais das seguintes tipologias: espectrais, topográficas, geomorfológicas, geológicas, pedológicas, de distância euclidiana e de uso e ocupação. Para eliminar as covariáveis similares entre si, foi utilizada a análise de dissimilaridade para as covariáveis categóricas, e a análise de correlação não-linear baseada no coeficiente de dependência aleatória foi feita para as covariáveis contínuas. A predição para os processos erosivos foi feita separadamente para voçorocas e para solo exposto. A predição de susceptibilidade às voçorocas selecionou 20 covariáveis, entre elas oito de distância euclidiana, cinco espectrais, quatro topográficas, e as três restantes correspondem a geomorfologia, solos e uso e ocupação. Para o solo exposto, foram 13 covariáveis, com cinco espectrais, quatro de distância euclidiana, uma topográfica, e três correspondendo a geomorfologia, pedologia e uso e ocupação. Os contatos geológicos parecem favorecer o desenvolvimento de voçorocas pela diferença textural dos solos formados sobre suas litologias. O solo exposto também é influenciado pela geologia na medida que as rochas de difícil intemperismo estão horizontalizadas ou verticalizadas e dificultam a pedogênese, formando solos rasos, onde a retirada do horizonte A é facilitada durante eventos pluviais. Além disso, a umidade afeta a distribuição dos processos erosivos pela sua influência no desenvolvimento da vegetação e na distribuição dos usos e ocupação do solo no município.

Palavras-chave: predição espacial, uso e ocupação, geologia.

PREDICTION OF EROSION PROCESSES BY COVARIABLE SELECTION USING RANDOM FOREST IN LAGOA FORMOSA, MINAS GERAIS

ABSTRACT

This chapter aims to map and predict susceptible areas to two erosion processes in Lagoa Formosa using satellite images and the Random Forest algorithm to recognize data patterns by

data mining. It was used 90 co-variables of the following classes: spectral, topographic, geomorphological, geological, pedological, Euclidean distance and land use and land cover. The analyses aimed to eliminate similar co-variables, where the categorical data were submitted to a dissimilarity analysis, and the continuous data were submitted to the randomized dependence coefficient. The prediction of gullies selected 20 co-variables, where eight were of Euclidean distance, five were spectral, four were topographic and the remaining three were geomorphology, soils and land use and land cover. The prediction of exposed soil were selected 13 co-variables, where five were spectral, four were of Euclidean distance, one was topographic and the remaining three were also geomorphology, soils and land use and land cover. The geological contacts seemed to favor the development of gullies by the textural difference among the soils generated above this lithology. The exposed soil is also influenced by geology because the dip of the rocks influence the soil formation, favoring the genesis of shallow soils, where the removal of the A horizon is easier. Besides, the humidity affects the distribution of these erosion processes because it influences the development of the vegetation and the land cover and land use.

Keywords: spatial prediction, land use and land cover, geology.

1. INTRODUÇÃO

O uso de geotecnologias tem auxiliado na compreensão de processos erosivos, além de ser ferramenta importante para tomada de decisão. A classificação de imagens de satélite permite reconhecer características das classes de interesse para identificar seus padrões pelo treinamento e classificação de amostras. Com dados espacializados é possível realizar análises espaciais mais profundas para compreender sua distribuição.

A mineração de dados (*Data Mining*) é uma parte do processo de descoberta de conhecimento através de dados (*Knowledge Discovery in Databases – KDD*) que envolve o reconhecimento de padrões através de algoritmos específicos, auxiliando o pesquisador no processo de tomada de decisão pela previsão de tendências futuras (FAYAD, PIATETSKY-SHAPIRO, SMYTH, 1996). As árvores de decisão (*decision trees*) são um dos métodos de mineração de dados, que são desenvolvidas utilizando diferentes medidas que dividem o conjunto de dados em subconjuntos homogêneos que representam uma classe (VIEIRA et al., 2012). Dessa forma, o algoritmo *Random Forest* também é considerado como uma ferramenta de mineração de dados.

O *Random Forest* é um classificador *ensemble* que no treinamento cria múltiplas árvores de classificação e regressão para realizar a predição (BREIMAN, 2001). As árvores crescem de acordo com o método *bagging* (*bootstrap aggregating*) que se baseia na técnica de reamostragem aleatória do conjunto de dados original. Isso significa que algumas amostras podem ser escolhidas várias vezes enquanto outras podem nunca ser escolhidas (BREIMAN, 1996; BELGIU, DRAGUT, 2016). Para realizar a classificação, cada árvore do algoritmo é responsável por um voto para a classe mais popular, e a saída do classificador é dada pela maioria dos votos (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEISSON, 2006).

São duas variáveis do *Random Forest* definidas pelo usuário, que são o número de árvores a serem geradas e o número de variáveis a serem selecionadas e testadas para melhor separação quando do crescimento das árvores. O estudo de Deng et al. (2015) não mostrou diferenças na classificação alterando o número de árvores a serem criadas. Segundo Gislason, Benediktsson e Sveisson (2006), o classificador não é sensível ao número de variáveis, porém, ao limitar esse número, a complexidade do classificador é diminuída assim como a correlação entre as árvores.

Aproximadamente dois terços das amostras são utilizadas para o treinamento das árvores, e são chamadas de *in-bag samples*. O restante das amostras (*out-of-the bag samples*, OOB) é utilizado para validação cruzada interna do algoritmo, que irá estimar a performance do classificador (BREIMAN, 2001). Com essas amostras OOB, o *Random Forest* consegue elencar a importância das variáveis que é estimada pela permutação aleatória de todos os valores para cada árvore com esse tipo de amostra. Assim, é a medida da diferença entre a acurácia da predição antes e depois dessa permutação, sendo a média para todas as árvores (BREIMAN, 2001; GUO et al., 2011).

Classificadores *ensemble* são considerados como “caixas-preta” (*black box*), pois pouco se sabe sobre sua assinatura estatística. No entanto, as vantagens do *Random Forest* são sua eficiência na predição com mais de um tipo de dado, a medida da seleção de variáveis, sua resistência a ruídos, *outliers* e sobreajuste das amostras, além de ser computacionalmente mais rápido e mais simples do que classificadores *ensemble* baseados nos métodos *boosting* (BREIMAN, 2001; GHOSH, SHARMA, JOSHI, 2014).

O uso mais comum desse algoritmo *Random Forest* tem sido na classificação de imagens de satélite (GISLASON, BENEDIKTSSON, SVEISSON, 2006; RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012a; RODRIGUEZ-GALIANO et al., 2012b), mas estudos como o de

Märker, Pelacani e Schröder (2011) já têm empregado esse algoritmo para a modelagem de unidades de erosão.

A erosão é um problema ambiental em todo o mundo e é resultada pela energia contida na água e no vento, ainda que a água seja o agente mais importante da erosão dos solos. As taxas de erosão dependem de fatores como classe dos solos e suas propriedades, precipitação, cobertura da vegetação, declividade e práticas não conservacionistas da terra. Segundo Guerra et al. (2014), as maiores taxas de erosão do solo no Brasil ocorrem onde a vegetação foi retirada sem medidas de conservação do ambiente. As condições de superfície e subsuperfície do solo podem dificultar ou facilitar a ação da erosão hídrica, tanto pela sua cobertura e rugosidade quanto pelo seu espaço poroso e estabilidade de agregados (VOLK, COGO, STRECK, 2004).

A erosão hídrica é condicionada por fatores como topografia, chuva, solo, cobertura e manejo do solo, e pode-se entender a erosão laminar como um primeiro resultado da sua ação, onde há a remoção de camadas superficiais do solo através do processo de desagregação e transporte das partículas (ARAUJO, ALMEIDA, GUERRA, 2010). O resultado da erosão laminar está nas extensas áreas de solo exposto, como é observado no município de Lagoa Formosa, no centro-oeste do estado de Minas Gerais. A contínua ação das chuvas sobre esse solo exposto pode resultar em outros tipos de erosão. Seu poder erosivo irá depender da velocidade e da altura da lâmina de água, e fatores ambientais locais como vegetação, o salpicamento das gotas das chuvas, e os fluxos subsuperficiais rasos podem acarretar em fluxos acanalados (BACELLAR, 2000).

As voçorocas são definidas como processos erosivos onde o escoamento superficial se acumula em canais estreitos e, em curtos períodos de tempo, há remoção de solo desses canais em profundidades consideráveis (POESEN et al., 2003). Segundo Araújo, Almeida e Guerra (2010), voçorocas se formam em encostas de solos erodíveis geralmente associadas a pastagens. De qualquer forma, as voçorocas ocorrem quando limites topográficos, hidrológicos, pedológicos, pluviométricos e de uso e ocupação são atingidos, ou seja, estão associadas a paisagens instáveis, e são resultadas da ação tanto do fluxo superficial quanto do fluxo subsuperficial das águas. De acordo com Bacellar (2000), as voçorocas refletem mudanças ambientais, podendo ocorrer de forma natural ou podem ser geradas através de modificações antrópica.

O município de Lagoa Formosa, no estado de Minas Gerais, possui vocação agropecuária e enfrenta problemas de erosão como solo exposto e voçorocas em sua extensão.

Dados do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2009) mostraram que as lavouras permanentes e temporárias no município correspondiam a um total de 8.622 hectares, e, em 2015, novos dados do IBGE mostraram que essas lavouras passaram a corresponder a 16.723 hectares. Além disso, ainda com dados do Censo Agropecuário, o somatório das pastagens no município correspondia a 45.284 hectares, onde quase 70% dessas são pastagens naturais, e pouco mais de 2% encontram-se degradadas. Porém não há estudos no local sobre o manejo dos solos e sobre os fatores que estão atuando para o desenvolvimento desses processos erosivos. Considerando o exposto, o estudo se objetiva a prever áreas susceptíveis a erosão através do uso de mineração de dados, além de discutir os fatores ambientais que estão controlando tais processos na região para auxiliar o planejamento e manejo do solo no futuro.

2. ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo é o município de Lagoa Formosa, no centro oeste do estado de Minas Gerais, com população estimada em 18.807 habitantes e área territorial de 840,92 km² (IBGE, 2016a). A cidade está a 377 km de distância da capital, Belo Horizonte, e a 27 km de Patos de Minas, e faz parte da região do Alto Paranaíba. Sua principal atividade econômica é a agropecuária. A Figura 1 mostra a localização do município no estado.

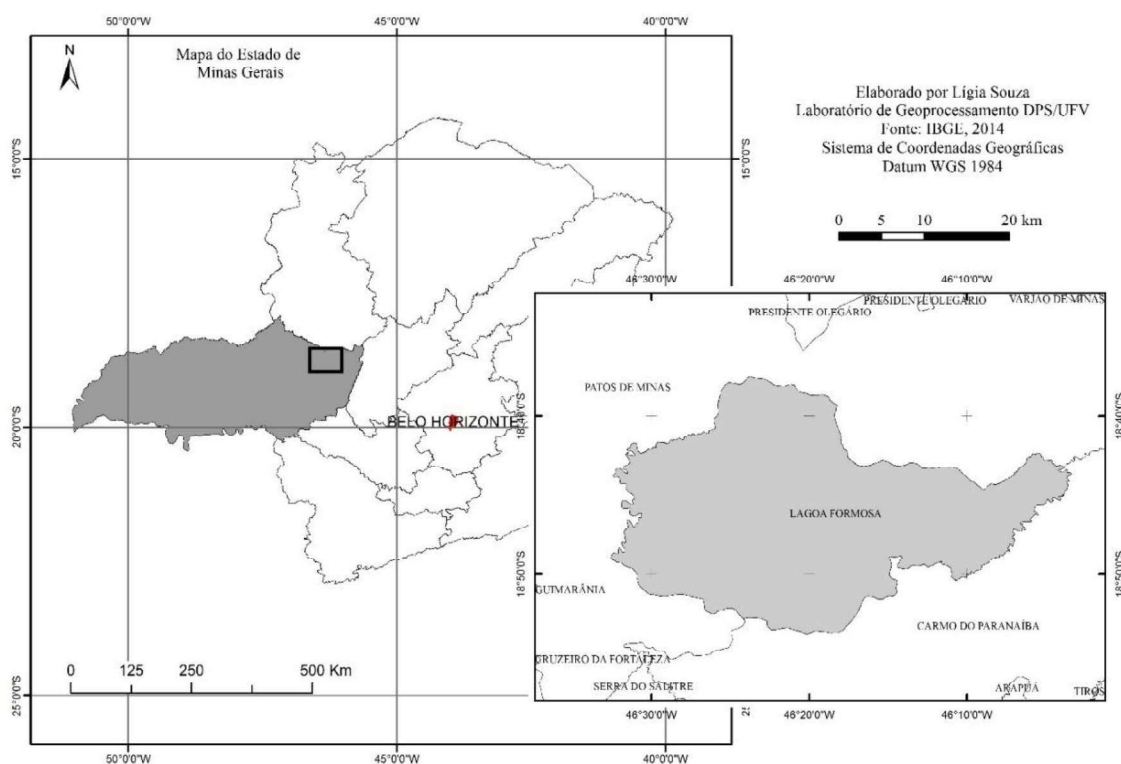


Figura 1 - Mapa de localização do município de Lagoa Formosa no estado de Minas Gerais.

A região de Lagoa Formosa está entre as bacias do Alto Paranaíba e do São Francisco. São três domínios geomorfológicos representados por uma zona de planalto, uma zona de vertentes dissecadas e uma zona de colinas suaves, de acordo com o proposto por Uhlein et al. (2011) (Figura 2). Apresenta também geologia bastante diversificada com quatro unidades geológicas expressas pela Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí (Neoproterozóico), Grupo Areado (Mesozóico), Grupo Mata da Corda (Mesozóico) e Coberturas Terciárias Detrito-Lateríticas e Elúvio-Coluvionares (Cenozóico) (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011), expostas na Figura 3.

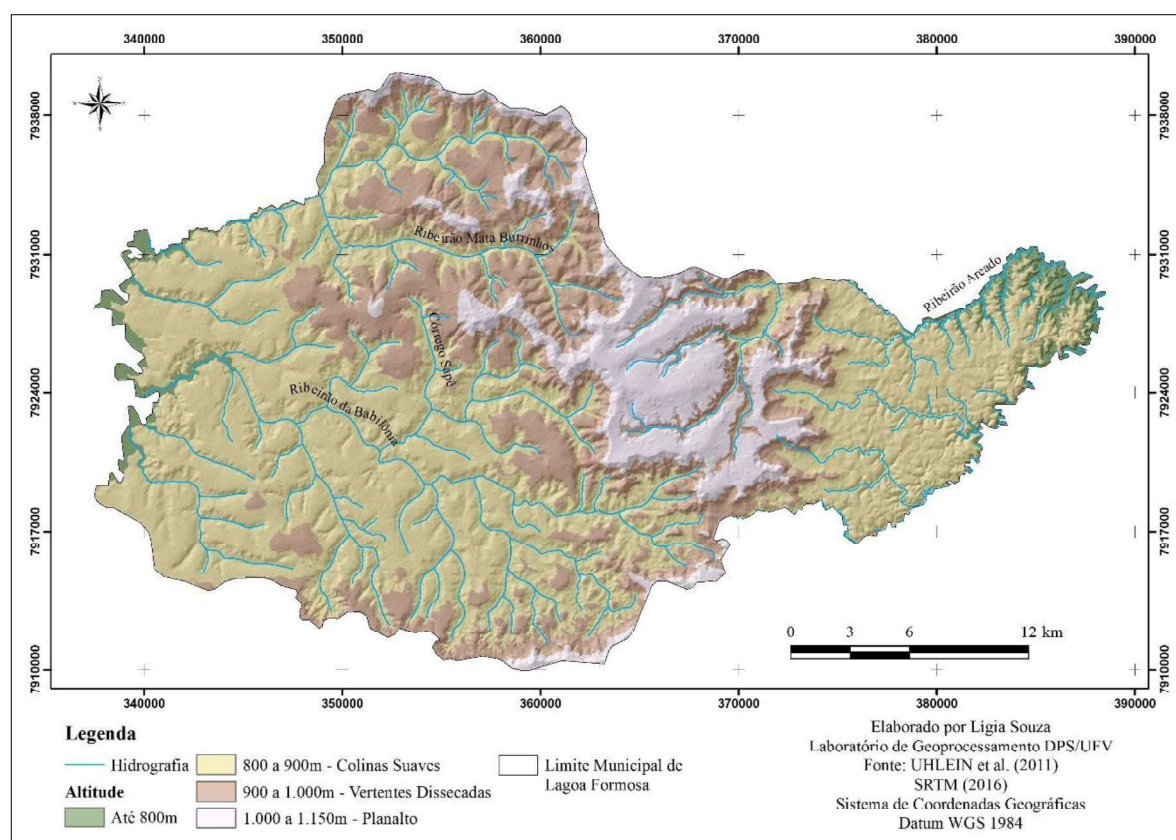


Figura 2 - Mapa geomorfológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

O município está inserido na área dos Cerrados de Minas e possui como vegetação original predominante o Cerrado e a Floresta Tropical Latifoliada. Suas condições climáticas são intertropicais, com verões quentes e úmidos, invernos frios e secos, e precipitação entre 1500 e 2000 mm (BAPTISTA, 2004; UHLEIN et al., 2011). As classes de solos da região, segundo Motta, Baruqui e Santos (2004) são os Latossolos Vermelhos, Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos, além de uma pequena mancha de Latossolo Vermelho-Amarelo que corresponde a menos de 1% da área, como mostrado na Figura 4. Sua hidrografia meandrante é paralela e alongada, provavelmente sendo controlada pelo embasamento da região (UHLEIN et al., 2011).

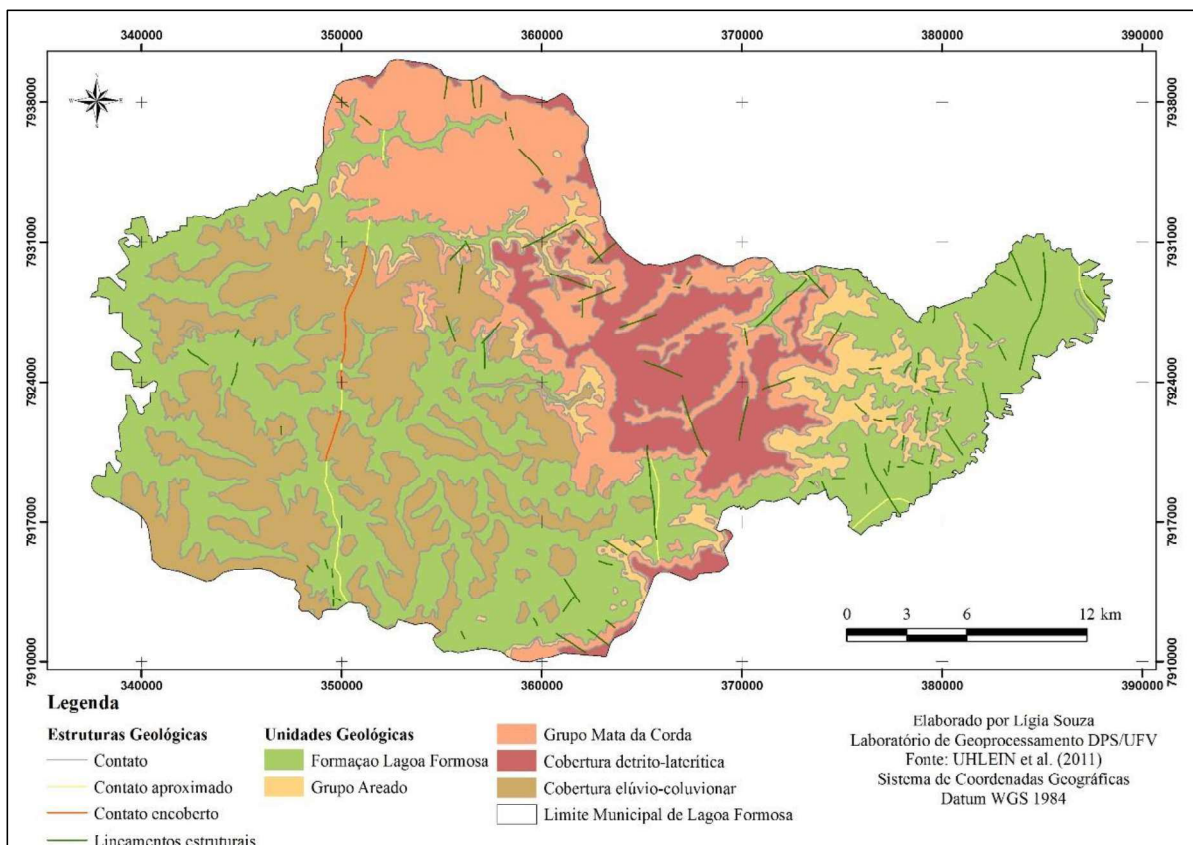


Figura 3 - Mapa geológico do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

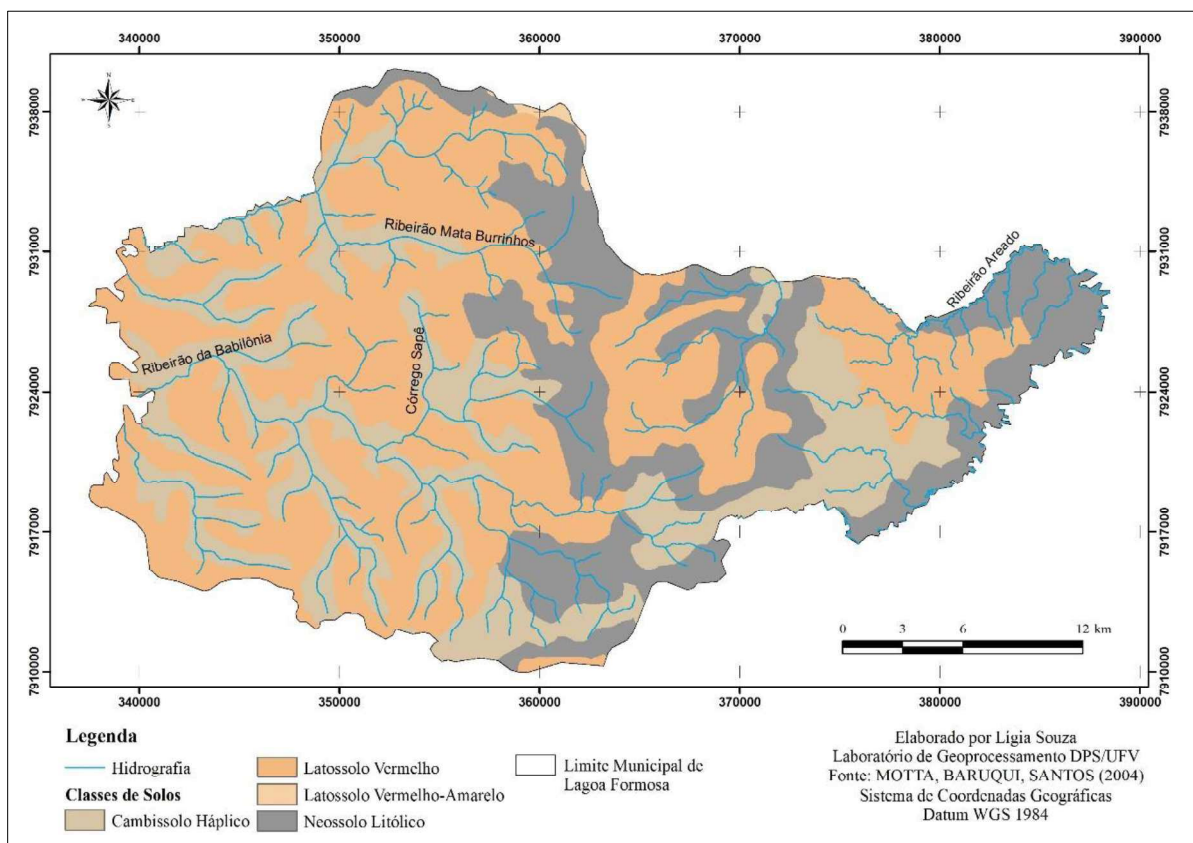


Figura 48 - Mapa pedológico de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Base de Dados

Foram utilizados dados cartográficos na escala de 1:100.000 do limite municipal, estradas, localidades (cemitérios, escolas, igrejas, distritos e propriedades rurais) e dados de geomorfologia na escala de 1:250.000, ambos do IBGE (IBGE, 2016b). Dados de geologia foram obtidos através do mapeamento da CODEMIG, folha Carmo do Paranaíba, na escala de 1:100.000 (UHLEIN et al., 2011). O levantamento pedológico utilizado está na escala de 1:250.000 e foi realizado por Motta, Baruqui e Santos (2004). Imagens do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), da NASA, com 30 metros de resolução, e foram utilizadas para obter o modelo digital de elevação (MDE) e gerar outras covariáveis topográficas. Foram utilizadas também as imagens do Landsat-8 selecionadas de acordo com a menor cobertura de nuvens possível, dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Data de aquisição das imagens Landsat-8 de acordo com a Órbita/Ponto.

Órbita/Ponto	Final da Época Chuvosa	Final da Época Seca
220/73	05/05/2014	16/10/2015
219/73	15/05/2014	09/10/2015

Além disso, essas imagens representam uma época de transição da época chuvosa para a seca e da seca para a chuvosa, como mostra a Figura 5 com as Normais Climatológicas de 1961 a 1990 para a estação meteorológica de Patos de Minas (INMET, 2016), já que a área de estudo não possui estação própria. Para obter o máximo de representatividade para cada época, foram selecionadas imagens do final da época chuvosa e do final da época seca.

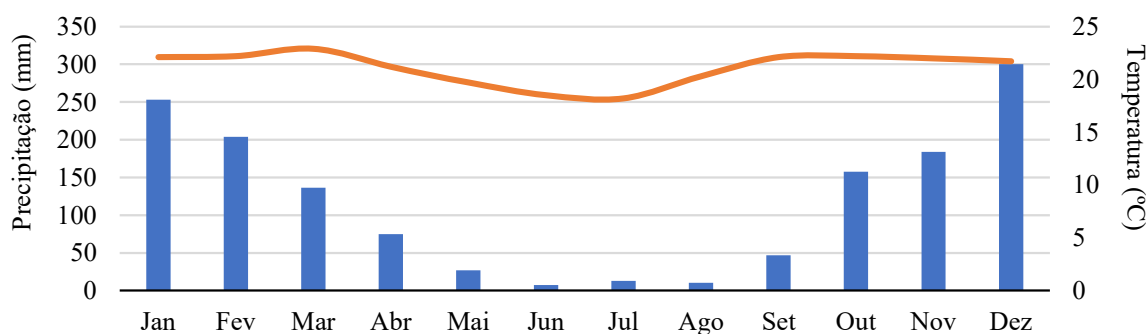


Figura 5 - Normais Climatológicas de 1961 a 1990 de temperatura média (°C) e precipitação total (mm) para a estação de Patos de Minas, Minas Gerais.

Fonte: INMET, 2016.

O uso de dados de escalas diferentes é dado pela escassez de informações para a região, porém podem ainda auxiliar no processo de compreensão do ambiente.

Os dados foram trabalhados nos *softwares* ArcGIS 10.1®, do ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), e R (v. 3.2.4) (R CORE TEAM, 2016), além do software livre SAGA (CONRAD et al., 2015).

3.2. Covariáveis Preditivas

Através dos dados obtidos, foram geradas covariáveis para serem analisadas estatisticamente pelo algoritmo *Random Forest* no ambiente R. Com as imagens Landsat-8 foram geradas 26 covariáveis espectrais para as épocas seca e chuvosa, onde 12 dessas correspondem a índices espectrais. A Tabela 2 mostra as equações utilizadas para o cálculo desses índices.

Tabela 2 - Equações dos índices espectrais calculados com as bandas Landsat-8.

Índices Espectrais		
$NDVI^1 = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	$SAVI^3 = \frac{(B5 - B4)(1 + L)}{B5 + B4 + L}$	
$NDSI^2 = \frac{B7 - B3}{B7 + B3}$	$CLAY MINERALS = \frac{B6}{B7}$	$IRON OXIDES = \frac{B4}{B2}$

¹ NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*; ² NDSI – *Normalized Difference Soil Index*; ³ SAVI – *Soil Adjusted Vegetation Index*. O índice SAVI possui um fator de correção L que minimiza os efeitos da cor do solo nos resultados, onde o valor de L=1 é utilizado quando a densidade da vegetação é baixa; L=0,5 quando a densidade da vegetação é média; e L=0,25 quando a densidade da vegetação é alta (HUETE, 1988).

Com o pacote RSAGA, foram geradas 39 covariáveis de topografia através do modelo digital de elevação (MDE) obtido pelo SRTM. Foram cinco covariáveis geomorfológicas com os dados do IBGE. Do levantamento pedológico realizado por Motta, Baruqui e Santos (2004) foram obtidas três covariáveis, e do levantamento geológico realizado pela CODEMIG (UHLEIN et al., 2011), duas covariáveis. Além dessas, foram geradas 14 covariáveis de distância euclidiana. A covariável uso e ocupação processada previamente no ambiente R também foi utilizada. A Tabela 3 elenca todas as 90 covariáveis utilizadas no processamento.

Todas as covariáveis foram projetadas para o datum WGS 1984 e transformadas para o formato matricial com pixels de 30 metros, a fim de obter o mesmo número de linhas e colunas para os dados. Para remover quaisquer *outliers* das covariáveis contínuas, os valores dessas foram substituídos pela sua média aritmética ± três vezes o seu desvio-padrão. Dessa forma, são evitados valores distantes de um número de células em relação ao restante.

Tabela 3 - Covariáveis utilizadas para análise do algoritmo Random Forest.

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
Composite Bands (Bandas 2 a 7)	Combinação das bandas em um único arquivo raster		
Banda 2	Banda azul		
Banda 3	Banda verde		
Banda 4	Banda vermelha		
Banda 5	Infravermelho próximo (NIR)		
Banda 6	Infravermelho de ondas curtas 1 (SWIR 1)	Espectral ¹	30 metros
Banda 7	Infravermelho de ondas curtas 2 (SWIR 2)		
Clay Minerals	Ressalta a proporção de minerais argilosos		
Iron Oxides	Distingue áreas com presença de óxidos de ferro		
NDVI	Indicador da quantidade e da condição da vegetação		
NDSI	Identifica área onde o solo está em destaque		
SAVI ²	Índice de vegetação com menor efeito do solo		
Aspect	Orientação das vertentes		
Convergence Index	Índice de convergência		
Cross Sectional Curvature	Curvatura transversal		
Curvature Classification	Classificação da curvatura		
Difference	Diferença do gradiente hidrológico		
Digital Elevation Model	Modelo digital de elevação		
Diurnal Anisotropic Heating	Medida contínua da energia dependente de exposição		
Flow Line Curvature	Curvatura da linha de fluxo		
General Curvature	Curvatura geral		
Gradient	Gradiente hidrológico	Topografia	30 metros
Hill	Morros		
Hill Index	Índice dos morros		
Landforms	Formas do relevo		
Longitudinal Curvature	Curvatura longitudinal		
Mass Balance Index	Índice de balanço entre erosão e deposição		
Maximal Curvature	Curvatura máxima		
Mid-Slope Position	Posição do meio do declive		
Minimal Curvature	Curvatura mínima		
Morphometric Protection Index	Índice de proteção de um ponto em relação ao relevo do entorno		
Multiresolution Index of Ridge Top Flatness (MRRTF)	Índice que identifica áreas planas em altas altitudes do modelo digital de elevação		

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)	Índice que identifica os fundos de vale do modelo digital de elevação		
Normalized Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive normalizada		
Planar Curvature	Curvatura no plano		
Profile Curvature	Curvatura no perfil		
Real Surface Area	Cálculo real da área da célula		
Slope	Declividade		
Slope Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive		
Slope Index	Índice de declividade		
Standardized Height	Distância vertical entre a base e o cume do declive padronizada		
Surface Specific Points	Pontos quantitativos da superfície do terreno	Topografia	30 metros
Tangencial Curvature	Curvatura tangencial		
Terrain Ruggedness Index	Índice quantitativo da heterogeneidade da topografia		
Topographic Position Index	Diferença entre a elevação de um ponto com a elevação do entorno		
Total Curvature	Curvatura total		
Valley	Vale		
Valley Depth	Cálculo da distância vertical do nível de base da rede de drenagem		
Valley Index	Índice dos vales		
Vector Ruggedness Measure	Medida da variação da rugosidade do terreno da declividade		
Wetness Index	Índice do controle topográfico nos processos hidrológicos		
Classes do IBGE	Aspectos do relevo identificados na escala de 1:250.000		
Domínio morfoestrutural	Táxon na compartimentação do relevo que ocorrem em escala regional e organizam os fatos geomorfológicos de acordo com o arcabouço geológico		
Forma do modelado geomorfológico	Padrão de formas de relevos em função de gênese comum e de processos morfogenéticos atuantes	Geomorfologia	1:250.000
Região geomorfológica	Compartimentos geomorfológicos inseridos nos conjuntos litomorfoestruturais com características comuns		
Unidade geomorfológica	Arranjo de formas altimétrica e fisionomicamente semelhantes nos diferentes tipos de modelados		
Litologia	Tipos de rochas	Geologia	1:100.000
Unidades Geológicas	Tipos de estruturas geológicas		
Classificação dos solos no 1º nível categórico	Nível de ordens		
Classificação dos solos até o 3º nível categórico	Nível de grandes grupos	Pedologia	1:250.000
Classificação dos solos até o 4º nível categórico	Nível de subgrupos		

Covariável	Descrição	Tipo	Resolução/Escala Original
	Distância euclidiana da área urbana		
	Distância euclidiana do conjunto total de estradas		
	Distância euclidiana do conjunto dos tipos de contatos geológicos		
	Distância euclidiana dos contatos geológicos		
	Distância euclidiana dos contatos encobertos		
	Distância euclidiana dos contatos geológicos aproximados		
	Distância euclidiana dos divisores de água das bacias	Distância Euclidiana	1:100.000
	Distância euclidiana das drenagens de primeira ordem		
	Distância euclidiana das estradas de terra		
	Distância euclidiana das estradas pavimentadas		
	Distância euclidiana da hidrografia		
	Distância euclidiana dos lineamentos		
	Distância euclidiana das localidades		
	Distância euclidiana dos contatos pedológicos	Distância Euclidiana	1:250.000
	Uso e Ocupação	30 metros	30 metros

¹ As covariáveis espectrais foram obtidas tanto para a época seca quanto para a época chuvosa; ² O índice SAVI foi gerado com dois valores de correção (L = 0,5 e L = 1).

3.3. Amostragem

O conhecimento adquirido em campo foi essencial para a delimitação dessas feições erosivas. Foram coletados polígonos de amostras no Google Earth para duas classes de processos erosivos definidos: voçorocas e solo exposto. O Google Earth foi utilizado para a amostragem por apresentar imagens Digital Globe de satélite de alta resolução para a região.

No ArcGIS 10.1 foram gerados pontos aleatórios dentro desses polígonos com distância mínima de 20 metros entre cada ponto. Para as voçorocas foram gerados 1034 pontos e para o solo exposto foram gerados 1080 pontos. Nas áreas restantes, sem erosão, foram gerados mais 1100 pontos, com 100 metros de distância mínima entre esses.

3.4. Classificação dos Processos Erosivos

No ambiente R foram inseridas as 90 covariáveis para extração das suas informações para cada ponto amostrado. Foram eliminadas as covariáveis que apresentaram variação zero, e as amostras foram separadas entre categóricas e numéricas. Com todos esses dados, o algoritmo pode elencar as covariáveis mais importantes tanto para as voçorocas quanto para o solo exposto. O processo de classificação e predição de áreas susceptíveis a voçorocamento foi realizado separadamente do processo para a predição de áreas de solo exposto, para evitar confusão entre as classes. Assim, foram analisados primeiros os pontos de voçorocas e pontos sem erosão para predição da susceptibilidade, e depois foram analisados os pontos de solo exposto com os pontos sem erosão. O restante do procedimento é o mesmo para os dois casos.

Para isso, as covariáveis contínuas foram submetidas à análise de correlação não-linear, por essa ser uma medida mais robusta que a correlação linear, sendo capaz de eliminar aquelas que são estatisticamente similares entre si. O coeficiente de dependência aleatória (*Randomize Dependence Coefficiente* – RDC) utilizado para a correlação não-linear mede a dependência entre amostras aleatórias como a maior correlação canônica entre projeções não-lineares escolhidas aleatoriamente das transformações das cópulas (LOPEZ-PAZ, HENNIG, SCHÖLKOPF, 2013). A correlação canônica gera a transformação linear de um par de variáveis aleatórias onde as suas projeções são correlacionadas ao máximo (LOPEZ-PAZ et al., 2014). As cópulas estatísticas unem funções de distribuição univariada para formar funções de distribuição multivariada, e são geralmente utilizadas para caracterizar a dependência para duas variáveis, além de mostrar como é medida essa dependência (NELSEN, 1995). O RDC possibilita o uso de grandes conjuntos de dados e é facilmente adaptado a possível problemas

propostos (LOPEZ-PAZ, HENNIG, SCHÖLKOPF, 2013). O valor de corte de 0,95 obtido para a correlação não-linear foi anteriormente testado e então estabelecido para as voçorocas e solo exposto.

Para a análise das covariáveis categóricas foi feita uma análise de dissimilaridade de acordo com aquela estabelecida por Gower (1971), na qual esse tipo de dado é submetido a uma matriz de distância com valores de 0 a 1, onde 0 é a máxima diferença. Esse tipo de análise baseia-se no agrupamento de indivíduos semelhantes e ainda não tem sido amplamente utilizado para mapeamentos de uso e ocupação e predição de processos erosivos, sendo focado em áreas da genética (RODRIGUEZ et al., 2005; HAIR et al., 2009; MOURA et al., 2010; ROCHA et al., 2010). Segundo Irigoen, Mestres e Arenas (2016), esse tipo de análise pode ser usado tanto para explicar diferenças entre um grupo de unidades conhecidas, o conjunto de treinamento, quanto para classificação como regra para designar uma classe a novas amostras desconhecidas do conjunto de treinamento. O valor de limite adotado para a dissimilaridade foi de 0,8 para seleção de covariáveis para voçorocas e solo exposto.

A correlação não-linear foi realizada com valor de corte de 0,95, e a análise de dissimilaridade foi feita com o valor de 0,8. Esses valores foram resultado de testes com diversos outros pontos de corte, sendo que esses apresentaram modelos menos redundantes e com valores de Kappa mais elevados. O valor limite de 20 covariáveis foi adotado para seleção de importância pelo algoritmo *Random Forest*, para que o modelo de predição fosse o melhor e mais simples possível para os dois processos erosivos. Para a escolha desse modelo, o algoritmo apresenta uma lista com o número de variáveis e o índice *Kappa* para cada. Para selecionar o melhor modelo, foi realizada uma análise visual das predições com melhores valores do *Kappa*. O índice Kappa é uma técnica estatística que se baseia em uma matriz de erro para avaliar a acurácia da classificação através do teste estatístico z (CONGALTON, 1991; CONGALTON, GREEN, 2009).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Seleção de Covariáveis

Do total de 90 covariáveis analisadas pelo algoritmo, foram eliminadas seis variáveis que apresentaram variação zero, além da eliminação pela correlação não-linear de 23 covariáveis contínuas, e a eliminação pela dissimilaridade de sete covariáveis categóricas. Como o processo de seleção de covariáveis foi o mesmo tanto para voçorocas quanto para solo

exposto. Das 54 covariáveis restantes, o modelo mais simples para a predição de áreas susceptíveis ao desenvolvimento de voçorocas foi aquele que apresentou 20 covariáveis e índice *Kappa* de 0,93 considerado excelente (CONGALTON, GREEN, 2009). Dessas 20 covariáveis, oito são de distância euclidiana, cinco são covariáveis espectrais, quatro são topográficas, e três são categóricas, onde uma é de geomorfologia, uma é de pedologia e a outra é o uso e ocupação gerado pelo *Random Forest*.

As 20 covariáveis selecionadas, em ordem de importância, são: (1) distância euclidiana da área urbana; (2) SAVI com L=1 para a época chuvosa; (3) classes do IBGE para geomorfologia; (4) índice *Iron Oxides* para a época chuvosa; (5) distância euclidiana dos lineamentos; (6) banda 5 da época chuvosa; (7) distância euclidiana dos contatos geológicos; (8) distância euclidiana das localidades; (9) índice *Iron Oxides* da época seca; (10) distância euclidiana das estradas pavimentadas; (11) *Morphometric Protection Index*; (12) modelo digital de elevação; (13) distância euclidiana de todas as estradas (pavimentadas e rurais); (14) índice de umidade (*wetness index*); (15) classificação dos solos até o 2º nível categórico; (16) declividade; (17) distância euclidiana dos contatos aproximados; (18) índice NDSI da época chuvosa; (19) uso e ocupação; e (20) distância euclidiana da drenagem de primeira ordem.

Para o solo exposto, o modelo mais simples selecionou 13 covariáveis, sendo quatro de distância euclidiana, cinco covariáveis espectrais, uma covariável topográfica e três covariáveis categóricas, onde uma é a classificação de geomorfologia do IBGE, outra é a classificação de solos até o 2º nível categórico, e a última é o uso e ocupação do solo gerado no R pelo *Random Forest*. O melhor índice *Kappa* obtido para a predição de solo exposto foi apresentado pelo modelo com 19 covariáveis. Porém, ao realizar análise visual dos resultados, o modelo com 13 covariáveis é mais simples, atende o objetivo da predição e apresenta índice *Kappa* ainda alto, de 0,95, considerado excelente por Congalton e Green (2009). A queda do índice *Kappa* da predição com 19 para o de 13 covariáveis foi de menos de 0,01.

As 13 covariáveis escolhidas para predição de solo exposto pelo *Random Forest*, em ordem de importância, foram: (1) classes de geomorfologia do IBGE; (2) distância euclidiana da área urbana; (3) índice SAVI com L=1 para a época chuvosa; (4) uso e ocupação do solo gerado no R; (5) índice *Clay Minerals* para a época seca; (6) distância euclidiana dos contatos geológicos; (7) classificação dos solos até o 2º nível categórico; (8) distância euclidiana das localidades; (9) índice SAVI com L=1 para a época seca; (10) distância euclidiana das estradas

pavimentadas; (11) *Diurnal Anisotropic Heating*; (12) *Iron Oxides* para a época chuvosa; e (13) a banda 3 da época seca.

Tanto para a predição de voçorocas quanto para o solo exposto há nove covariáveis em comuns: quatro covariáveis de distância euclidiana, sendo elas da área urbana, dos contatos geológicos, dos lineamentos e das estradas pavimentadas; duas covariáveis espectrais, sendo elas o SAVI com $L=1$ e o índice *Iron Oxides*, ambos para a época chuvosa; e as três covariáveis categóricas de classes de geomorfologia do IBGE, classificação dos solos até o 2º nível categórico e o uso e ocupação do solo gerado no R.

Das covariáveis espectrais, o índice *Iron Oxides* foi escolhido para a época chuvosa e para a época seca para a predição das voçorocas. Esse índice é uma proporção entre as bandas 4 e 2 do Landsat 8, que correspondem às bandas vermelho e azul do visível, respectivamente. Sua escolha pode ser explicada pela forte relação entre óxidos de ferro com os matizes do solo, propriedade de grande importância para identificação e classificação dos solos (SOUSA JUNIOR, DEMATTÊ, GENÚ, 2008). Madeira Netto e Baptista (2000) apontaram que as feições espectrais desses óxidos são diferenciadas principalmente no visível e no infravermelho, que se relacionam com a cor dos solos e conseqüentemente com sua composição mineralógica (SOUSA JUNIOR, DEMATTÊ, GENÚ, 2008).

Na área de estudo, tem-se Latossolos Vermelhos, Cambissolo Háplicos e Neossolos Litólicos, que são solos bastante diferentes entre si, especialmente no que diz respeito a cor. Segundo levantamento de Motta, Baruqui e Santos (2004), os Latossolos Vermelhos da região apresentam teores mínimos de óxidos de ferro de 120 g kg^{-1} , chegando até a aproximadamente 420 g kg^{-1} , e esses óxidos ajudam na distinção desses solos para os Cambissolos e dos Neossolos que apresentam baixos teores. Áreas que apresentam horizonte A chernozêmico, no entanto, apesar de apresentarem altos teores de óxidos de ferro, possuem coloração diferenciada. Os Latossolos da área apresentam A moderado com matiz entre 2,5YR a 10R, com valores de 3 e croma variando entre 3 e 4, enquanto que os Cambissolos e Neossolos com A chernozêmico apresentam matiz entre 5 YR a 10YR, com valores de 2 a 3 e croma de 2 a 1.

Há que se considerar o efeito da umidade nesses solos, o que explica a escolha desse índice para a época seca e para a época chuvosa. Madeira Netto e Baptista (2000) ainda afirmam que a umidade de solos com óxidos nas faixas espectrais entre 400 e 700 nm apresentam comportamento mais complexo. Altas taxas de umidade alteram o matiz do solo, e essa variação depende do teor de água presente e da sua estrutura

A relação do índice *Iron Oxides* com a probabilidade de voçorocamento é explicada pela exposição do solo causada pelo desencadeamento desse processo erosivo em áreas de contato entre solos desenvolvidos de material terciário e solos desenvolvidos do embasamento, como visto nos trabalhos de campo e descrito por Baptista (2004). O material terciário da região, apesar de não muito rico em nutrientes, favoreceu o desenvolvimento de solos profundos por causa da topografia quase plana do local depositado. Esses depósitos estão geralmente sobre o embasamento da região, composto principalmente por rochas pelíticas do Grupo Bambuí (UHLEIN et al., 2011). Os solos que se desenvolveram dessas rochas pelíticas, além de pobres em nutrientes, são também menos espessos e mais friáveis, ou seja, menos resistentes à ação erosiva. Dessa forma, a instalação de atividades humanas, ou mesmo condições ambientais que favorecem a retirada do material sobreposto a esses solos frágeis, condiciona o avanço da erosão nessas áreas. A Figura 6 mostra uma das voçorocas da região, com destaque para a área da cabeceira do processo, sendo possível observar a diferença na coloração do solo. A importância de solos de diferentes colorações para compreensão do voçorocamento explica a seleção do índice *Iron Oxides* para a época seca e para a época chuvosa.

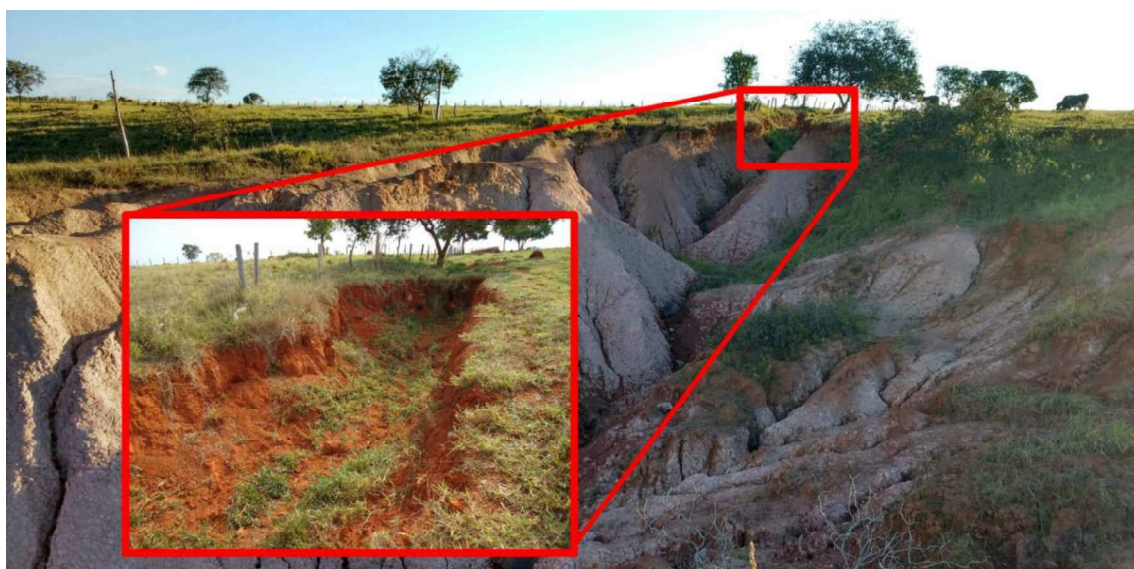


Figura 6 - Voçoroca no contato entre dois tipos de material em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Para a predição do solo exposto, no entanto, o índice *Iron Oxides* foi escolhido somente para a época chuvosa por destacar melhor as diferenças entre os solos. Ao contrário das voçorocas, o solo exposto está em sua maioria relacionado aos Cambissolos e Neossolos desenvolvidos sobre o material da Formação Lagoa Formosa, apresentando, geralmente, coloração rósea pela alteração das rochas de origem (UHLEIN et al., 2011), como mostra a Figura 7.

O índice SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) com ajuste de $L=1$ da época chuvosa também foi escolhido para a predição de voçorocas. Esse índice é uma calibração do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para interferências do solo, proposto por Huete (1988). A interferência do solo é um fator importante a ser considerado, pois controla o comportamento espectral da superfície, principalmente em áreas com vegetação densa (HUETE, 1988). Esse índice apresenta um fator de correção L que varia com a densidade da vegetação, onde o valor de 1 é dado para densidades baixas. Assim como em Patel e Mukherjee (2014), esse fator de correção deve ter sido de grande importância para a seleção da covariável SAVI ao invés do NDVI, já que essa é mais sensível na detecção da vegetação em locais menos vegetados. Dada a característica caducifólia do Cerrado da região, o período chuvoso apresenta vegetação mais vigorosa e, portanto, valores mais altos do índice, facilitando a estratificação do ambiente. O estudo de Boratto e Gomide (2013) mostrou que tanto para o SAVI quanto para o NDVI, a presença de água no perfil do solo proporciona o desenvolvimento de vegetação nativa e de vegetação nas áreas de pastagem do Cerrado do norte de Minas Gerais, apresentando maiores valores para esses índices. Além disso, o SAVI facilitou a distinção de solo exposto na área. Voçorocas são processos erosivos que também expõem o solo, dessa forma sendo necessária sua distinção no ambiente.



Figura 7 - Padrão do solo exposto no município de Lagoa Formosa, em Minas Gerais.

Para a predição do solo exposto, o índice SAVI com $L=1$ foi escolhido para a época seca assim como para a época chuvosa. No estudo de Boratto e Gomide (2013), esse índice acentuou a influência do solo exposto, principalmente no início da retomada da vegetação na área de estudo. A razão para a escolha do período chuvoso é a mesma para a predição das voçorocas, que é melhor para a estratificação de ambientes, e a escolha do período seco é dada pela maior influência do índice para a separação do solo exposto.

Para a predição das voçorocas, as covariáveis espectrais da banda 5 e o índice NDSI da época chuvosa também foram escolhidas. A banda 5 do Landsat 8 localiza na faixa do infravermelho próximo, e é importante para distinção de plantas saudáveis, pois a água nas suas

folhas afeta a dispersão da reflectância para o sensor, além de realçar os limites entre vegetação e solo (USGS, 2013). Novamente, a presença da água é fator importante para a distinção de ambientes vegetados e solo exposto, por causa da vegetação caducifolia do Cerrado, pois na época seca poderia haver confusão entre áreas expostas por processos erosivos e áreas expostas pela queda das folhas da vegetação. Na época chuvosa, o vigor da vegetação permite essa estratificação de forma mais fácil, aliado também a outras covariáveis que foram escolhidas para a predição das voçorocas.

O índice NDSI (*Normalized Difference Soil Index*) também foi escolhido para a época chuvosa. O NDSI proposto por Kearney et al. (2002) visa identificar áreas onde o solo é o plano de fundo dominante ou está em primeiro plano. Deng et al. (2015) mostraram que esse índice derivado da combinação das bandas verde e do infravermelho médio do Landsat TM5 é uma boa alternativa que enfatiza a informação dada pelo solo e pode suprimir os valores da vegetação. Novamente, voçorocas também apresentam solo exposto, sendo então necessária a melhoria da imagem para o realce dessas áreas. E na época das chuvas, o destaque de áreas expostas para áreas vegetadas é maior pela presença da água expressa no vigor das plantas.

Para o modelo de solo exposto, as covariáveis espectrais *Clay Minerals* (CM) e a banda 3 para a época seca foram escolhidas. O cálculo do índice CM utiliza as duas bandas do infravermelho de ondas curtas e ressalta a proporção de minerais de argila que rochas hidrotermicamente alteradas podem conter (SABINS, 1987; DRURY, 1987). A mineralogia das argilas tem grande influência nas respostas espectrais dos solos, afetando sua reflectância em bandas específicas, e podem ajudar na distinção de áreas com solo exposto, e a região do infravermelho de ondas curtas é marcada por respostas espectrais de hidróxidos e carbonatos, que são muito comuns da crosta terrestre (DEMATTÊ, GARCIA, 1999; GUPTA, 2013). Minerais argilosos podem possuir diversas composições e estruturas que irão afetar o comportamento dos solos através das suas reações químicas. A escolha dessa banda para a época seca é dada pela dificuldade de estimar propriedades do solo quando a cobertura vegetal é maior que 20%, ou seja, na época seca, pela vegetação natural e mesmo pela agricultura, a cobertura vegetal é menor, já que é mais sensível ao déficit hídrico, tornando mais fácil a diferenciação de solos pelos teores de minerais argilosos (BARTHOLOMEUS, EPEMA, SCHAEPMAN, 2007). O estudo de Shabou et al. (2015), para mapear o teor de minerais de argila em uma área central da Tunísia, utilizou imagens Landsat TM que tivessem pouca influência da umidade do solo, verificado com dados de estações meteorológicas, para facilitar a diferenciação de áreas de solo exposto e extrair as informações de interesse.

A banda 3 é responsável por enfatizar a vegetação através do vigor das plantas (USGS, 2013). A escolha dessa banda para a época seca pode ser entendida pela distinção da floresta tropical latifoliada, que está associada aos poucos remanescentes das matas densas da região do planalto da Mata da Corda e às matas ciliares. No primeiro caso, a principal razão do desenvolvimento de vegetação nessas áreas se relaciona ao material de origem rico do Grupo Mata da Corda e pela umidade que é mais conservada pela altitude desses locais, acima de 1000 metros. As matas ciliares estão em constante presença de água, essencial para as plantas desses extratos (UHLEIN et al., 2011). A separação das áreas de vegetação mesmo em épocas secas auxilia na compreensão da gênese do processo erosivo, no caso, do solo exposto. Sem manejo adequado para os solos, a exposição desses pelo déficit hídrico pode e irá dificultar a revegetação local no futuro, principalmente considerando fatores ambientais que favorecem o seu desenvolvimento, como declividade e mergulho da rocha de origem.

Nota-se que os índices espectrais, para diferenciar as áreas expostas pela erosão das áreas vegetadas, utilizaram informações correlacionadas à presença de água, que tanto modifica a coloração do solo como afeta a vegetação local. Diretamente relacionada a essa questão da umidade, está a covariável topográfica *Wetness Index*, que foi selecionada para o modelo de probabilidade ao voçorocamento.

O índice de umidade (*Wetness Index*) é uma covariável derivada do MDE que foi desenvolvida primeiro por Beven e Kirkby (1979). Esse índice estima as condições de topografia relacionadas às áreas de captação da água e a umidade do solo. Além de modelar a hidrologia, é também importante para a vegetação. Sua escolha para a predição de áreas de voçorocamento se dá pela importância da variabilidade exercida pela umidade do solo nos diferentes domínios geomorfológicos da paisagem. O estudo de Kheir, Wilson e Deng (2007), mapeando a susceptibilidade às voçorocas em uma área no Líbano, mostrou que a espacialização desse processo erosivo está relacionada principalmente a dois atributos topográficos, que são a capacidade de transporte de sedimentos e o índice de umidade. A caracterização da umidade do solo na paisagem auxilia na identificação de áreas com solos com maiores teores de água que favorecem a formação de voçorocas.

Outras duas covariáveis topográficas escolhidas para a predição das voçorocas foram o modelo digital de elevação e a declividade. O MDE pode ter sido escolhido pela sua clareza dos domínios geomorfológicos da região. Como apontado por Uhlein et al. (2011), e como foi possível ver em campo, há três zonas geomorfológicas diferentes em Lagoa Formosa: colinas

suaves; vertentes dissecadas; e zona de planalto. A geomorfologia é condicionada pela geologia da região, pois cada uma dessas zonas está relacionada a alguma unidade geológica predominante. As zonas de planalto estão intimamente relacionadas com as coberturas detrítico-lateríticas do Terciário e com o Grupo Mata da Corda; as zonas de vertentes dissecadas se relacionam com o Grupo Areado; e as zonas de colinas suaves se relacionam com a Formação Lagoa Formosa, do Grupo Bambuí, e com as coberturas elúvio-coluvionares do Terciário, que estão sobrepostas a esse embasamento local. Tanto durante os trabalhos de campo quanto durante a coleta de amostras para treinamento e validação da predição da susceptibilidade ao voçorocamento, percebeu-se que esse processo erosivo está bastante relacionado ao material das coberturas sedimentares do Terciário com a Formação Lagoa Formosa. Então, esses processos ocorrem em uma zona geomorfológica associadas às altitudes de contato desses materiais, nas bordas das colinas do depósito de sedimentos. Isso porque os Latossolos desenvolvidos nessas colinas, favorecidos pela topografia, conseguem captar e armazenar água que, ao encontrar o material friável da base, inicia todo o processo erosivo.

Nesse aspecto, a covariável declividade também é de grande importância para o desencadeamento desses processos. Estudos como o de Poesen et al. (2003) já atestaram também o claro papel exercido por essa covariável na probabilidade de desenvolvimento de voçorocas. A declividade afeta a área de drenagem, assim como o escoamento, e o gradiente de declividade é um fator importante que controla o local de início da voçoroca, e também o final, quando todo o material será depositado (POESEN et al., 2003). Há casos onde, mesmo com a declividade mais suave, não há o desencadeamento de voçorocas, afinal é um conjunto de variáveis ambientais que permite o desenvolvimento desses processos erosivos. Porém esse gradiente da declividade é importante para a compreensão da dinâmica de retirada e depósito dos materiais (POESEN, TORRI, VANWALLEGHEM, 2011).

O *Morphometric Protection Index* (MPI) é uma covariável topográfica derivada do modelo digital de elevação e expressa a proteção de um ponto em relação ao relevo circundante, e é equivalente ao índice *openness* proposto por Yokoyama, Shirasawa e Pike (2002). De acordo com Smith e Clark (2005), esse índice produz imagens que enfatizam as concavidades e as convexidades do terreno de maneira similar aos cálculos de curvatura, porém, segundo Sofia, Pirotti e Tarolli (2013), quando comparado à curvatura, o *openness* é escolhido porque a curvatura é uma covariável derivada diretamente do MDE e pode ampliar os erros nele existentes. Pode-se pensar na escolha dessa covariável para a predição do voçorocamento pela sua distinção das áreas côncavas e convexas, ou seja, na classificação das formas do relevo.

Prima et al. (2006) utilizaram esse parâmetro topográfico para classificar a paisagem, e com o MPI conseguiram distinguir áreas de deposição e erosão na paisagem, além de conseguir fazer uma relação com padrões geomorfológicos resultados de alterações vulcânicas. Os resultados do MPI para Lagoa Formosa também estão relacionados às áreas de depósitos de sedimentos, além da sua relação de áreas íngremes com as áreas de rochas vulcânicas da região. Como já discutido anteriormente, as voçorocas estão nas vertentes da paisagem, relacionadas ao contato de duas unidades geológicas diferentes, e esse índice MPI ressaltou essa área de ocorrência.

Segundo Zhang et al. (2016), mapeando diferentes espécies de plantas com o MDE e variáveis topográficas derivadas, há também uma relação desse índice MPI com a radiação e a umidade do solo. A radiação solar influencia diretamente no armazenamento da água e a vegetação da região. As voçorocas amostradas em Lagoa Formosa, em sua maioria, estão voltadas para Oeste, sendo quase 36% do total amostrado, e para Norte, com quase 21%. Wang et al. (2011) já mostraram que a dinâmica da água não é a mesma em declives com diferentes orientações geográficas. Para Lagoa Formosa, a maior incidência solar nas regiões Norte e Oeste se relaciona com a distribuição da radiação durante o dia, e essas são as vertentes expostas no período da tarde, quando a radiação é mais forte. Dessa forma, são vertentes que tendem a apresentar menor teor de umidade no solo, e por consequência podem possuir menor cobertura vegetal justamente por déficit hídrico. Esses são fatores que irão influenciar na exposição do solo, e consequentemente no desenvolvimento dos processos erosivos.

O índice *Diurnal Anisotropic Heating* é uma covariável topográfica e foi escolhida para a predição das áreas de solo exposto. É uma medida de energia dependente da exposição solar. As vertentes expostas em diferentes orientações geográficas sofrem mudanças diárias na radiação solar, o que resulta em diferenças na transferência de calor e umidade dos solos, controlando sua variação espacial (BÖHNER, ANTONIC, 2009). Essa covariável explica sobre a radiação solar e a topografia, já que as orientações das vertentes irão variar no espaço, e sua escolha explica como a topografia influencia no desenvolvimento desses processos erosivos no município. Quase 39% da área de solo exposto amostrada está voltada para Norte, e aproximadamente 33%, para Oeste. Considerando que a quantidade de radiação solar recebida é maior nessas áreas, a sua recuperação também será mais difícil, já que as altas temperaturas, do solo dificultam o processo de regeneração. Essas temperaturas podem variar mais 10°C em área de solo exposto no Cerrado (RODRIGUES, MALTONI, CASSIOLATO, 2007).

Quase metade das covariáveis escolhidas para a modelagem da predição do voçorocamento estão relacionadas à distância euclidiana. A covariável mais importante para a predição das voçorocas é a distância euclidiana da área urbana, expressa pela área da cidade. A distância euclidiana é uma medida matemática entre dois pontos e é também uma medida de dissimilaridade, onde quanto maior for a distância, menor é a semelhança entre ambos (HAIR et al., 2009). Considerando que outras distâncias euclidianas relacionadas a intervenções humanas também foram selecionadas, como a de estradas pavimentadas, estradas rurais e pavimentadas, e das localidades, pode-se perceber a importância da atividade antrópica para o desencadeamento dos processos erosivos.

O estudo de Valentin, Poesen e Li (2005) aponta como o desenvolvimento de voçorocas não pode estar ligado somente aos usos agropecuários, mas também a construção de estradas, prédios e áreas urbanas inteiras. Essas intervenções podem aumentar o volume do escoamento superficial pela impermeabilização do solo. Mudanças nos padrões da drenagem podem resultar em voçorocas, principalmente pensando no contexto de Lagoa Formosa, onde essas estão em encostas fragilizadas pela exposição do material frágil da base. Esse aumento no escoamento superficial torna maior seu poder erosivo de retirada dos horizontes superficiais do solo, e, portanto, expondo o material subsuperficial mais frágil. Há que se atentar para a diferença erosiva entre as estradas pavimentadas e as estradas rurais, afinal a impermeabilização do solo ocorre de forma diferente nos dois casos, porém são ainda pouco estudados. De acordo com a ordem de seleção das covariáveis nesse estudo, as estradas pavimentadas exercem maior controle no voçorocamento do que as estradas rurais, ainda que essas também sejam importantes. As localidades são principalmente pequenas construções urbanas que não se concentram na área da cidade, e, por terem sido selecionadas, nota-se a importância desses distúrbios para o desenvolvimento da erosão.

Para a predição do solo exposto, a distância euclidiana de áreas urbanas, de localidades e estradas pavimentadas também foram escolhidas. No entanto, como na proximidade dessas áreas se dá o voçorocamento, para o solo exposto essas covariáveis indicam o contrário, onde a proximidade dessas áreas pode não necessariamente se relacionar com o desenvolvimento de exposição do solo.

Das outras quatro covariáveis de distância euclidiana restantes para a predição das voçorocas, três delas estão relacionadas à geologia local, e são a distância euclidiana dos lineamentos, dos contatos e dos contatos aproximados. O contato geológico é aquele que separa

duas litologias diferentes, que em Lagoa Formosa existem dentro dos grupos geológicos existentes e também entre esses grupos. Ainda que a litologia ou as unidades geológicas não tenham sido escolhidas para predição das voçorocas, os contatos são de extrema importância para entender sua distribuição, pois comprova o que já foi apontado e discutido anteriormente que as voçorocas da área de estudo se desenvolvem entre o contato das litologias da Formação Lagoa Formosa com os depósitos terciários expressos nas Coberturas Elúvio-Coluvionares.

A distância euclidiana dos contatos geológicos para o solo exposto, da mesma forma que a distância euclidiana de intervenções antrópicas, indica uma relação contrária à daquela estabelecida para voçorocas. O solo exposto está relacionado às áreas mais homogêneas da geologia local que estão também relacionadas a declives mais amenos, favorecendo a retirada do horizonte A dos solos. Contudo, as voçorocas não se desenvolvem pela classe de solo predominante formada sobre o material de origem, que são em sua maioria Cambissolos delgados ou ainda Neossolos Litólicos, que não apresentam discordância textural significativa (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004).

Os contatos aproximados são aqueles que dividem as fácies de uma mesma unidade geológica, sendo que sua posição geográfica pode ser um pouco imprecisa, e assim refletida no mapeamento (IBGE, 1998). A escolha da distância euclidiana dos contatos aproximados é a mesma dos contatos geológicos, pois separam litotipos diferentes que irão afetar a formação dos solos. A composição desses materiais poderá apresentar diferenças significativas entre si, correspondendo a diferentes erodibilidades. De acordo com o mapeamento realizado por Uhlein et al. (2011), há dois litotipos predominantes em Lagoa Formosa: um domínio de diamictitos com intercalações de siltitos; e outro domínio de siltitos, arenitos, jaspilitos e conglomerados. Os diamictitos apresentam matriz síltica com clastos, e com a diminuição do tamanho desses clastos, ocorre a gradação para os siltitos. O acamamento das rochas do segundo domínio é bem marcado por diferenças de granulometria, composição e/ou coloração. A diferença textural desses materiais é de extrema importância para o voçorocamento na região.

Lineamentos são feições mapeáveis na superfície que podem refletir fenômenos de sub-superfície que podem estar associados ao movimento diferencial de blocos falhados (O'LEARY et al., 1976; ANDRADES FILHO, FONSECA, 2009). Observando a espacialização dos lineamentos no município, nota-se que a sua relação com as voçorocas é a sua distância, já que as áreas preditas para esse processo erosivo não estão perto dessas feições geológicas. Dessa forma, a proximidade entre a erosão e os lineamentos não é fator de desencadeamento do

voçorocamento, já que esses lineamentos estão associados, em sua maioria, aos grupos geológicos mais jovens da área e às áreas mais movimentadas do relevo local. Isso, no entanto, não elimina a presença, em menor escala, de lineamentos na Formação Lagoa Formosa, que é o embasamento geológico local.

A outra covariável de distância euclidiana selecionada é aquela da drenagem de primeira ordem, que mesmo tendo sido a última na escala de importância, é essencial para que se entenda os processos que desencadeiam o voçorocamento na região. Sabe-se que as voçorocas estão intimamente ligadas com a drenagem, principalmente com as cabeceiras dos rios. Isso porque essa erosão ocorre quando a água acumula no lençol freático, geralmente em canais estreitos, e durante algum tempo remove o solo em profundidades consideráveis (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008). Pensando em nascentes como locais onde a água subsuperficial encontra a superfície, ou seja, onde há a exposição do lençol freático, há uma relação entre o voçorocamento e a presença da água, pois ocorre em conjunto com outras covariáveis ambientais, é responsável pelo começo desse fenômeno.

Das covariáveis categóricas, a geomorfologia exerce um controle óbvio pela escolha de outras covariáveis como mencionado acima, principalmente no que diz respeito àquelas relacionadas com a topografia. É importante ressaltar a importância que essa covariável apresentou tanto para a predição de voçorocas quanto para a predição de solo exposto em Lagoa Formosa. As classes geomorfológicas definidas pelo IBGE são quatro, sendo: chapadas do Rio São Francisco; patamares das chapadas do Alto Rio São Francisco; planalto rebaixo no Paranaíba; e, Serra da Saudade. Apesar da diferença da escala do mapeamento do IBGE para o mapa geomorfológico elaborado com o modelo digital de elevação, há uma relação entre os dois, onde a geomorfologia Serra da Saudade e do planalto rebaixo do Paranaíba e as colinas suaves descritas por Uhlein et al. (2011) estão no mesmo domínio. No entanto, essas unidades geomorfológicas são resultado do trabalho na paisagem da Formação Lagoa Formosa, principalmente. As chapadas do Alto Rio São Francisco se relacionam com os planaltos de bordas abruptas, recobertos por uma capa laterizada de espessuras de até 10 metros, que são responsáveis por manter o relevo. Isso porque há a proteção da rocha subjacente que, quando exposta, é erodida, formando uma paisagem de morros residuais, testemunhos da antiga superfície de aplainamento. Os patamares das chapadas do Alto Rio São Francisco estão relacionados às vertentes bastante dissecadas, resultados dos processos erosivos do Grupo Areado e do Grupo Mata da Corda, já que ambos são pouco resistentes às ações erosivas (UHLEIN et al., 2011).

Dessa forma, nota-se que ainda que a litologia ou as unidades geológicas não tenham sido escolhidas pelo algoritmo, a escolha da covariável da distância euclidiana dos contatos comprova que a geologia exerce controle na formação dos solos e do relevo, e por consequência nos processos erosivos. A geomorfologia é chave para entender esses processos e também essencial para compreender o desenvolvimento de processos erosivos como as voçorocas e a exposição do solo.

A classificação dos solos até o 2º nível categórico é referente as subordens e ressaltam propriedades ou características de variações importantes que os diferem do 1º nível categórico (SANTOS et al., 2013). As classes de solos para Lagoa Formosa até o segundo nível categórico são os Latossolos Vermelhos, os Cambissolos Háplicos e os Neossolos Litólicos (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). Para a distinção dos processos erosivos, assim como para compreender o que promove o seu desenvolvimento, não há necessidade de informações mais detalhadas do que as fornecidas nesse nível categórico, pois propriedades como a textura e a estrutura informam sobre o comportamento dos solos, sendo possível inferir sobre sua dinâmica na paisagem. Os Latossolos Vermelhos da região, por exemplo, são bastante desenvolvidos e profundos, de texturas argilosa a muito argilosa, que favorecem o armazenamento da água e o desenvolvimento de vegetação de maior porte, ao contrário das outras classes da área. Os Cambissolos Háplicos são solos muito jovens, com horizonte B incipiente, geralmente relacionados a relevos muito íngremes, com textura média a argilosa, com teores de silte que devem ser considerados para estudos de erodibilidade. Os Neossolos Litólicos, por sua vez, não possuem horizonte B, e o horizonte A ocorre diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura, com textura média a argilosa, e por ocupar áreas mais acidentadas do relevo apresentam maior limitação a usos agrícolas do que os Cambissolos.

O uso e ocupação do solo que foi gerado no ambiente R, como descrito no capítulo 1, possui cinco classes, sendo elas agricultura, vegetação nativa, pastagem, água, área urbana e queimada. Para as voçorocas, aproximadamente 52% das que foram amostradas estão em áreas classificadas como solo exposto. Isso já era esperado, já que a erosão tem como uma das consequências a exposição do solo. Porém, os outros quase 50% das voçorocas amostradas relacionam com atividades agropecuárias, com mais de 28% relacionados às pastagens. Esse uso se relaciona com o voçorocamento principalmente pelo pisoteio do gado, que altera as propriedades físicas do solo, e, por consequência, alterando a dinâmica hidrológica, já que haverá provável aumento no escoamento superficial. O manejo inadequado do solo nas duas atividades pode fazê-lo ainda mais susceptível aos processos erosivos. Poesen et al. (2003)

afirmam que o desenvolvimento de voçorocas tem sido resultado da combinação de mudanças nos usos do solo e eventos pluviométricos intensos, documentado em todo o mundo. Para o solo exposto, o uso que apresentou quase 96% da área amostrada foi o de solo exposto. Os outros 4% estão relacionados às pastagens. O solo exposto está majoritariamente associado à Formação Lagoa Formosa, aonde se desenvolveram Cambissolos e Neossolos Litólicos onde a implementação da agricultura é dificultada pela profundidade dos solos e pela topografia.

4.2. Predição dos Processos Erosivos

Com as covariáveis escolhidas, foi possível gerar uma predição de áreas mais susceptíveis ao voçorocamento e à exposição do solo. Esses processos erosivos são resultados de um conjunto de fatores que atuam para seu desencadeamento e posterior desenvolvimento.

As erosões amostradas correspondem a 1,07 km² de área das voçorocas, e 2,65 km² para a área de solo exposto, que somadas equivalem a menos de 1% do município. A predição gerada no R atribuiu a susceptibilidade ao desenvolvimento de voçorocas em pouco mais de 4,5% da área do município, e para a exposição do solo a quase 2% total. São quase 55 km² de área onde as atuações de diversos fatores ambientais podem contribuir para o desencadeamento e desenvolvimento da erosão.

A geologia tem bastante destaque na espacialização dos processos erosivos por condicionar a formação dos solos e do relevo. Bacellar (2000), estudando a gênese e o desenvolvimento de voçorocas na bacia do Rio Maracujá em Ouro Preto, afirmou que pequenas variações na composição e na estrutura das litologias podem gerar diferenças importantes na espessura do manto pedológico. Tanto as características litológicas quanto as estruturais são importantes para o desenvolvimento erosivo, pois controlam sua resistência à erosão e também o direcionamento dos escoamentos superficiais. Ambas características afetam o voçorocamento e o solo exposto no município de Lagoa Formosa. No primeiro caso, os contatos da Formação Lagoa Formosa com as coberturas Terciárias areno-argilosas são fundamentais para o avanço dessas feições erosivas na paisagem, pois os locais de depósito dessas coberturas são favoráveis ao desenvolvimento de Latossolos, que, quando erodidos, expõem o saprolito das rochas do Grupo Bambuí, constituídos principalmente de silte, com texturas média a argilosa, sendo um material altamente susceptível à erosão. No caso do solo exposto, as rochas dessa formação podem estar horizontalizadas ou, até mesmo, verticalizadas, dificultando a ação do intemperismo e da gênese do solo, por isso é comum que esses processos se associem a essa

unidade geológica, assim como é comum que se associem a solos rasos, como os Cambissolos e os Neossolos, com destaque para a última classe. As rochas verticalizadas são resultado da deformação pelo soerguimento do Alto Paranaíba e pela reativação tectônica que coincidiu com o vulcanismo alcalino do Grupo Mata da Corda. A Figura 8 mostra imagens do trabalho de campo com rochas pelíticas com diferentes ângulos de mergulho.



Figura 8 - Exemplos dos diferentes mergulhos das rochas no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Ainda sobre a relação dos processos erosivos com a geologia, as áreas susceptíveis ao voçorocamento estão quase 98% relacionadas com as Coberturas Elúvio-Coluvionares do Terciário e com a Formação Lagoa Formosa, sendo que essa é responsável por quase 70% da área total predita. Isso porque ocorre maior desmanche do material da base, as rochas pelíticas do embasamento, que é também a unidade geológica mais exposta por essa erosão. O solo exposto está praticamente todo relacionado à Formação Lagoa Formosa, sendo 99% relacionado a essa unidade, o que confirma a hipótese de que a condição da litologia e estrutura

dessas rochas tem controlado a exposição do solo pela dificuldade da gênese de solos mais profundos, resultando na remoção do horizonte A pouco espesso dos solos nelas desenvolvidas, facilitados por outras condições ambientais.

A geomorfologia também condiciona os solos, estando bastante relacionados com a espessura do manto de intemperismo desenvolvido. No estudo de Bacellar (2000) ainda foi discutido que os solos em si não se mostraram erodíveis, porém a exposição dos saprolitos parece ser condição essencial para que as voçorocas se desenvolvam. No caso de Lagoa Formosa, como mostrado na Figura 6, as voçorocas se relacionam com os Latossolos Vermelhos desenvolvidos sobre as coberturas terciárias areno-argilosas e com o material erodível da base, que permite a remoção do solo. Quase 75% das áreas susceptíveis às voçorocas estão em relevo ondulado, ou seja, está nas bordas dos pequenos platôs das coberturas terciárias com declives entre 8 e 20%, onde fica evidente o contato entre esses diferentes materiais, evidenciado na Figura 9. Além disso, segundo Uhlein et al. (2011), as coberturas elúvio-coluvionares estão depositadas em discordância erosiva, o que afeta a continuidade da pedogênese.



Figura 9 - Contato entre material oriundo das Coberturas Elúvio-Coluvionares do Terciário e do material oriundo da Formação Lagoa Formosa em voçoroca no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

A Figura 10 mostra a paisagem dominante das voçorocas, que são locais de relevo suave, onde os topos apresentam vegetação de maior porte, por vezes sendo ocupados por atividades agrícolas, pois são pequenas áreas planas compostas por solos com maior capacidade de armazenamento de água e de mecanização mais fácil.

As áreas de solo exposto estão em sua maioria associadas aos Neossolos Litólicos Distróficos, com baixa saturação por bases, com horizonte A moderado de até 40 centímetros (MOTTA, BARUQUI, SANTOS, 2004). Esse horizonte A que é o responsável pela vegetação

do local, que não é de grande porte por não possuir nutrientes suficientes para seu desenvolvimento e nem grande capacidade de armazenamento de água. Como visto na Figura 8, a inclinação das rochas é um fator que dificulta a gênese de solos mais profundos. Foi possível constatar em campo que a litologia de origem desses Neossolos apresenta-se com acamamento horizontal, o que não favorece a infiltração da água, que escoar e é responsável pela retirada do horizonte A, conseqüentemente expondo o solo e o material saprolitizado. Além disso, a alteração no declive, principalmente nas bordas das colinas, auxilia no processo de retirada das camadas superficiais, como é possível observar na Figura 11.



Figura 10 - Voçorocas no município de Lagoa Formosa.

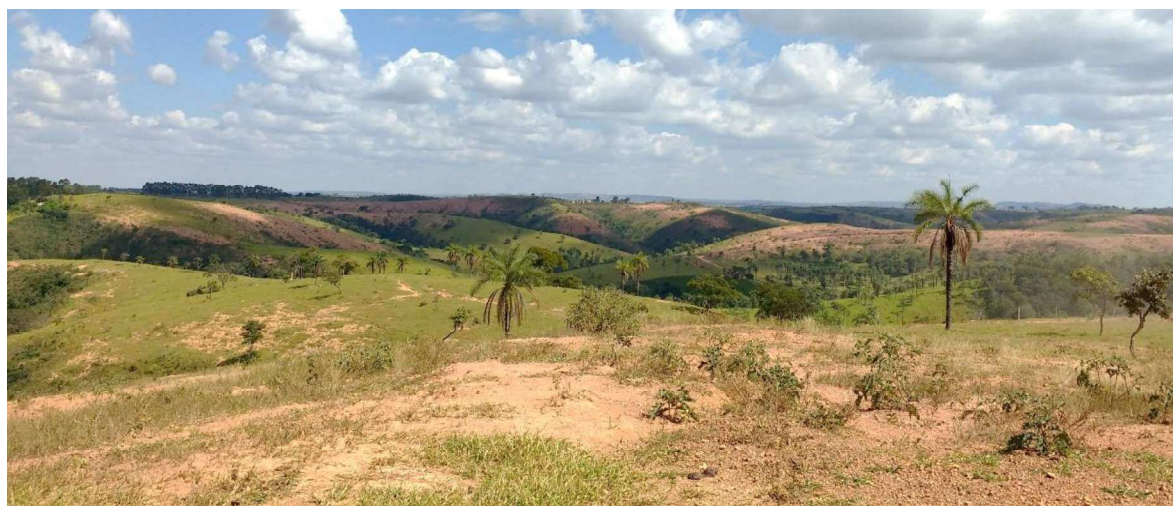


Figura 11 - Paisagem de Solo Exposto no município de Lagoa Formosa.

A escolha de uma covariável que relaciona topografia e a radiação solar é muito importante para entender como a face de exposição ao sol dessas vertentes afeta o processo de regeneração dessas áreas. Isso porque a umidade é fator chave para a gênese e desenvolvimento dos solos, e, conseqüentemente, para o seu uso e a fixação da vegetação. As áreas de vegetação nativa do município, ainda que estejam sobre as rochas da Formação Lagoa Formosa, estão diretamente ligadas aos rios e cursos d'água, novamente ressaltando a importância desse fator para a recuperação de áreas degradadas.

Quanto ao uso e ocupação do solo, tanto as áreas susceptíveis às voçorocas quanto ao solo exposto estão relacionadas às pastagens. As duas feições erosivas também estão

relacionadas com áreas de solo exposto, porém esse é um resultado esperado. Do total do solo exposto como classe de uso e ocupação do solo, ele ocupa 3,42% da área total do município, considerando também áreas expostas pelo voçorocamento. A área amostrada de solo exposto é de 2,65% e a predição coloca mais 1,79% de área susceptível a esse processo. A soma do solo exposto como processo erosivo amostrado e predito ultrapassa o total do solo exposto como classe de uso e ocupação do solo em aproximadamente 1%, corroborando a existência da susceptibilidade a esse processo.

As pastagens correspondem a mais de 50% da área susceptível ao voçoramento, além de pouco mais de 20% de áreas de agricultura. As pastagens são justificadas por serem o uso destinado às vertentes do município, onde estão localizadas as voçorocas. Em alguns locais, essas feições erosivas ocorrem na transição da agricultura no platô das coberturas terciárias para as pastagens nas vertentes e partes mais baixas do relevo da Formação Lagoa Formosa. Ainda que seja pouco, existe uma relação entre as voçorocas e as áreas urbanas, o que não deixa de ser um indicativo da influência antrópica no desenvolvimento desses processos. As áreas de solo exposto têm pequena relação com a agricultura, que ocorre de forma localizada, pois a atividade agrícola não é favorecida pelo solo raso e pobre em nutrientes da Formação Lagoa Formosa.

O mapa de susceptibilidade à erosão, considerando o voçorocamento e o solo exposto da área, está representado na Figura 12, junto às amostras coletadas que serviram como base para a predição de áreas susceptíveis a esses processos erosivos. Essas são as feições erosivas passíveis de mapeamento por imagens de satélite, não considerando outros possíveis processos erosivos que ocorrem ou podem ocorrer na área.

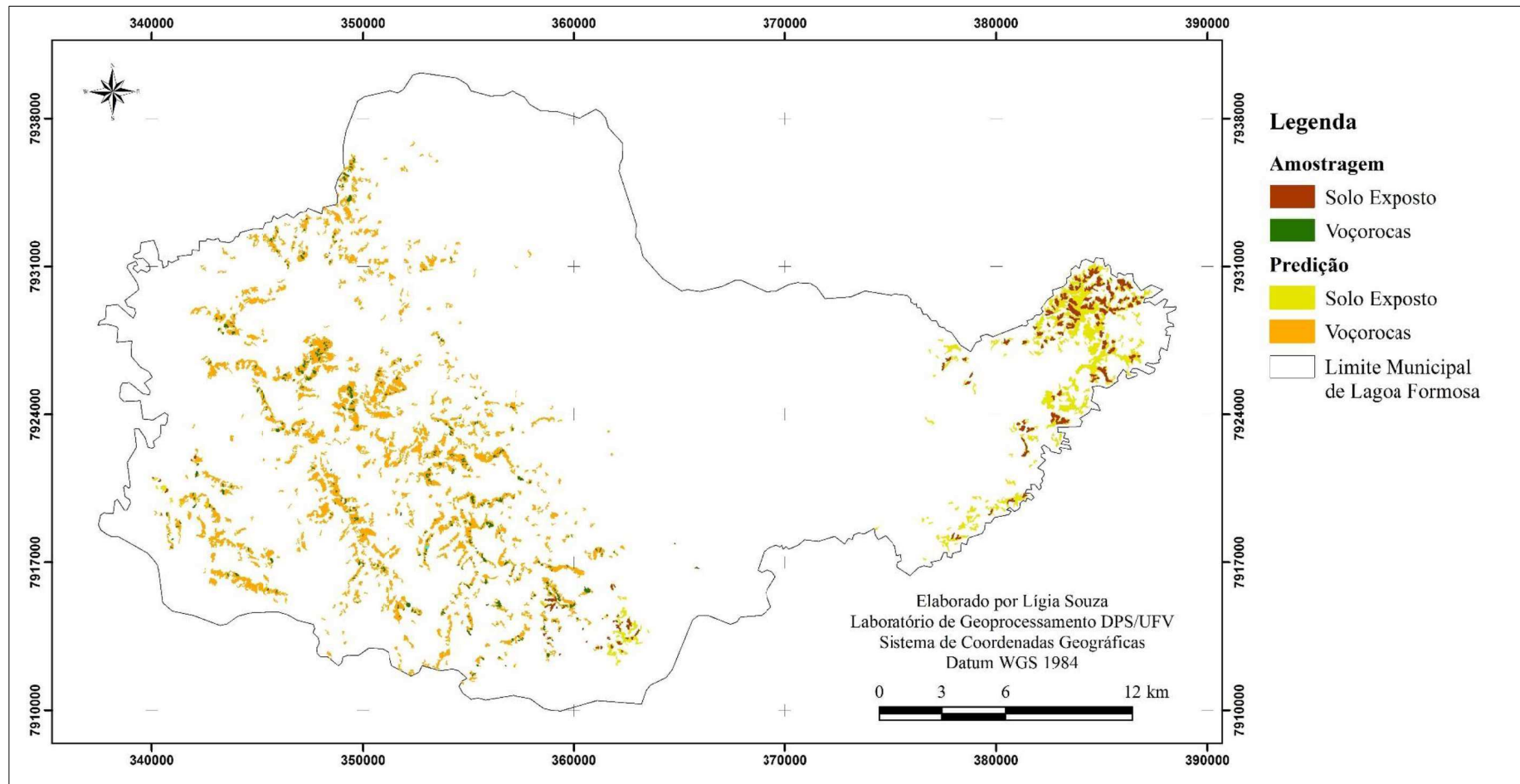


Figura 12 – Localização das amostras e mapeamento da predição de áreas susceptíveis a processos erosivos no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

5. CONCLUSÕES

1. De 90 covariáveis analisadas para a predição de voçorocas foram escolhidas 20 dessas, que apresentaram o melhor índice *Kappa* para o melhor modelo. Para a predição das áreas susceptíveis à exposição do solo, foram escolhidas 13 covariáveis para o melhor modelo, que resultou em *Kappa* classificado como excelente.

2. De acordo com as covariáveis selecionadas, nota-se a importância da umidade para a distribuição dos processos erosivos no município, já que esse fator influi diretamente no desenvolvimento da vegetação e na distribuição dos usos e da ocupação do solo.

3. O contato geológico entre a Formação Lagoa Formosa e as Coberturas Elúvio-Coluvionares do Terciário é fator importante para o voçorocamento na região. Além de apresentar discordância erosiva entre as duas unidades geológicas, elas condicionam a formação de solos mais profundos nas áreas dos platôs das coberturas que possuem grande capacidade de armazenamento de água. O lençol freático, ao encontrar ao material erodível da base, resultado da alteração das rochas pelíticas do Grupo Bambuí, facilita o desenvolvimento do processo erosivo.

4. O solo exposto também é diretamente influenciado pela geologia local, pois as rochas da Formação Lagoa Formosa encontram-se horizontalizadas ou ainda verticalizadas, dificultando a infiltração da água e favorecendo seu escoamento superficial. Isso aliado principalmente à declividade condiciona a retirada das camadas superficiais do solo.

5. Apesar da inegável importância da geologia para o desenvolvimento dos processos erosivos, o desencadeamento ocorre pela combinação de um conjunto de fatores ambientais, incluindo fatores climáticos, topográficos, hidrológicos, de vegetação e antrópicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADES FILHO, C. de O.; FONSECA, L. M. G. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal – RN. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal, RN: INPE, 2009. p. 3151-3158.

ARAÚJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 322 p.

BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes geológicas, geomorfológicas e geotécnicas dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá**. 2000. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BAPTISTA, M. C. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Região de Lagoa Formosa (MG)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

BARTHOLOMEUS, H.; EPEMA, G.; SCHAEPMAN, M. Determining iron content in Mediterranean soils in partly vegetated areas, using spectral reflectance and imaging spectroscopy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, n. 2, p. 194-203, 2007.

BELGIU, M.; DRĂGUT, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 24-31, 2016.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/ Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BÖHNER, J.; ANTONIC, O. Land-surface parameters specific to topoclimatology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds). **Geomorphology: concepts, software, applications**. Elsevier, 2009. p. 195-226.

BORATTO, I. M. P.; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu – PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu, PR: INPE, 2013. p. 7345-7352.

BREIMAN, L. Bagging predictors. **Machine learning**, v. 24, n. 2, p. 123-140, 1996.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 304p.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991-2007, 2015.

DEMATTE, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 2, p. 327-342, 1999.

DENG, Y.; WU, C.; LI, M.; CHEN, R. RNDISI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p. 40-48, 2015.

DRURY, S. **Image Interpretation in Geology**. London: Allen and Unwin, 1987. 304 p.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From data mining to knowledge discovery in databases. **AI magazine**, v. 17, n. 3, p. 37-54, 1996.

GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forests for land cover classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 4, p. 294-300, 2006.

GHOSH, A.; SHARMA, R.; JOSHI, P. K. Random forest classification of urban landscape using Landsat archive and ancillary data: Combining seasonal maps with decision level fusion. **Applied Geography**, v. 48, p. 31-41, 2014.

GOWER, J. C. A general coefficient of similarity and some of its properties. **Biometrics**, v. 27, n. 4, p. 857-871, 1971.

GUERRA, A.; FULLEN, M. A.; JORGE, M; do C. O.; ALEXANDRE, S. T.. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014.

GUO, L.; CHEHATA, N.; MALLET, C.; BOUKIR, S. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 1, p. 56-66, 2011.

GUPTA, R. P. **Remote sensing geology**. Springer Science & Business Media, 2013. 656 p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Geologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades**: Minas Gerais, Lagoa Formosa. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=313750>. Acesso em: 03 dez. 2016a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Bases e Referenciais**. Disponível em: << <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais.html> >>. Acesso em: 15 fev. 2016b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário – 2006**. Rio de Janeiro, IBGE: 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

IRIGOIEN, I.; MESTRES, F.; ARENAS, C. Weighted Distance Based Discriminant Analysis: The R Package WeDiBaDis. **The R Journal**. Disponível em: << <https://journal.r-project.org/archive/accepted/sola-irigoien-mestres-et-al.pdf>>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

KEARNEY, M. S.; ROGERS, A. S.; TOWNSHEND, J. R.; RIZZO, E.; STUTZER, D.; STEVENSON, J.; SUNDBORG, K. Landsat imagery shows decline of coastal marshes in Chesapeake and Delaware Bays. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v. 83, n. 16, p. 173-178, 2002.

KHEIR, R. B.; WILSON, J.; DENG, Y. Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, n. 12, p. 1770-1782, 2007.

LOPEZ-PAZ, D.; HENNIG, P.; SCHÖLKOPF, B. The randomized dependence coefficient. In: **Advances in Neural Information Processing Systems**, p. 1-9, 2013.

LOPEZ-PAZ, D.; SRA, S.; SMOLA, A. J.; GHARAMANI, Z.; SCHÖLKOPF, B. Randomized Nonlinear Component Analysis. **Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning**, Beijing, China, v. 32, p. 1359-1367, 2014.

MADEIRA NETTO, J. da S.; BAPTISTA, G. M. de M. Reflectância espectral de solos. Embrapa Cerrados, 2000. 55 p.

MÄRKER, M.; PELACANI, S.; SCHRÖDER, B. A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. **Geomorphology**, v. 125, n. 4, p. 530-540, 2011.

MOURA, M. da C. C. L.; GONÇALVES, L. S. A.; SUDRÉ, C. P.; RODRIGUES, R.; AMARAL JUNIOR, A. T. do; PEREIRA, T. N. S. Algoritmo de Gower na estimativa da divergência genética em germoplasma de pimenta. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 2, p. 155-161, 2010.

MOTTA, P. E. F. da; BARUQUI, A. M.; SANTOS, H. G. dos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do alto Paranaíba, Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 414 p.

NELSEN, R. B. Copulas, characterization, correlation, and counterexamples. **Mathematics Magazine**, v. 68, n. 3, p. 193-198, 1995.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**, v. 87, p. 1463-1469, 1976.

PATEL, N.; MUKHERJEE, R. Extraction of impervious features from spectral indices using artificial neural network. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 3729-3741, 2014.

POESEN, J. W. A.; TORRI, D. B.; VANWALLEGHEM, T. Gully Erosion: Procedures to Adopt When Modelling Soil Erosion in Landscapes Affected by Gullying. In: MORGAN, R. P. C.; NEARING, M. A. **Handbook of Erosion Modelling**. 1 ed. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2011. cap. 19, p. 360-386.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, n. 2, p. 91-133, 2003.

PRIMA, O. D. A.; ECHIGO, A.; YOKOYAMA, R.; YOSHIDA, T. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. **Geomorphology**, v. 78, n. 3, p. 373-386, 2006.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria, 2016. Disponível em: <<<https://www.r-project.org/>>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

ROCHA, M. C.; GONÇALVES, L. S. A.; RODRIGUES, R.; SILVA, P. D.; CARMO, M. D.; ABOUD, A. C. D. S. Uso do algoritmo de Gower na determinação da divergência genética entre acessos de tomateiro do grupo cereja. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 423-431, 2010.

RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 73-80, 2007.

RODRÍGUEZ, V. M.; CARTEA, M. E.; PADILLA, G.; VELASCO, P.; ORDÁS, A. The nabicol: A horticultural crop in northwestern Spain. **Euphytica**, v. 142, n. 3, p. 237-246, 2005.

RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; CHICA-OLMO, M.; ABARCA-HERNANDEZ, F.; ATKINSON, P. M.; JEGANATHAN, C. Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 93-107, 2012a.

RODRIGUEZ-GALIANO, V. F.; GHIMIRE, B.; ROGAN, J.; CHICA-OLMO, M.; RIGOL-SANCHEZ, J. P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 67, p. 93-104, 2012b.

SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 2. ed. New York: W. H. Freeman, 1987. 512 p.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA,

J. B. de. (eds) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. ver. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SHABOU, M.; MOUGENOT, B.; CHABAANE, Z. L.; WALTER, C.; BOULET, G.; AISSA, N. B.; ZRIBI, M. Soil clay content mapping using a time series of Landsat TM data in semi-arid lands. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 6059-6078, 2015.

SMITH, M. J.; CLARK, C. D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 7, p. 885-900, 2005.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of Soil Science Terms**. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2008. 92 p.

SOFIA, G.; PIROTTI, F.; TAROLLI, P. Variations in multiscale curvature distribution and signatures of LiDAR DTM errors. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 10, p. 1116-1134, 2013.

SOUSA JUNIOR, J. G. D. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 727-738, 2008.

UHLEIN, A.; FREITAS, A. de M.; CRUZ, A. B. da; SILVA, Q. F. da; CAXITO, F. de A.; MOREIRA, G. de C. Folha Carmo do Paranaíba SE.23-Y-B-IV. In: SOARES, A. C. P.; NOCE, C. M.; FRAGOSO, D. G. C.; VOLL, E.; REIS, H. L. S.; KUCHENBECKER, M. (eds). **Projeto Alto Paranaíba**. Belo Horizonte: CODEMIG, UFMG, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat – A Global Land-Imaging Mission**. 2013. Disponível em: << <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf>>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, n. 2, p. 132-153, 2005.

VIEIRA, M. A.; FORMAGGIO, A. R.; RENNÓ, C. D.; ATZBERGER, C.; AGUIAR, D. A.; MELLO, M. P. Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 553-562, 2012.

VOLK, L. B. da S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.

WANG, L.; WEI, S.; HORTON, R.; SHAO, M. A. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. **Catena**, v. 87, n. 1, p. 90-100, 2011.

YOKOYAMA, R.; SHIRASAWA, M.; PIKE, R. J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 68, n. 3, p. 257-266, 2002.

ZHANG, L.; LIU, S.; SUN, P.; WANG, T.; WANG, G.; WANG, L.; ZHANG, X. Using DEM to predict *Abies faxoniana* and *Quercus aquifolioides* distributions in the upstream catchment basin of the Min River in southwest China. **Ecological Indicators**, v. 69, p. 91-99, 2016.

CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os resultados obtidos e com os trabalhos de campo realizados em Lagoa Formosa, pode-se concluir que a dinâmica erosiva no município é bastante influenciada pela geologia.

A distribuição do uso e ocupação do solo no município é influenciado pela umidade retida nos diferentes ambientes, resultados de condições locais de clima e espessura de manto de alteração dos solos. Esses solos são resultados das condições de relevo e geologia que afetam a pedogênese e a fertilidade natural, e influenciam a espacialização das atividades em Lagoa Formosa.

De acordo com as condições do ambiente, quase 7% da área total do município está sujeita ao desenvolvimento de processos erosivos, sendo aproximadamente 5% susceptível a voçorocamento, e a susceptibilidade à exposição do solo está perto de 2% do território.

O contato da Formação Lagoa Formosa com as Coberturas Elúvio-Coluvionares favorece a formação de voçorocas por produzir solos na sua camada mais superficial que apresentam texturas diferentes dos saprolitos da base. Essas coberturas terciárias estão depositadas sobre áreas planas do Grupo Bambuí que facilitaram a gênese de Latossolos. Esses sedimentos, segundo a literatura, são também resultados da alteração de arenitos, e, como constatado no Capítulo 1, apresentam maiores valores de areia quando comparado a outros solos amostrados. Dessa forma, os Latossolos se desenvolvem nessas coberturas. O saprolito da base é composto principalmente de silte e argila. Essa diferença textural é de extrema importância para entender o desenvolvimento de voçorocas pelo acúmulo da água em subsuperfície, favorecendo esse tipo de processo erosivo.

As voçorocas ocorrem de acordo com uma série de fatores ambientais, e a geologia é um condicionante e não o gatilho dessas erosões. Assim, entender a distribuição do uso e ocupação do solo ajuda a compreender a dinâmica desses processos erosivos. Em Lagoa Formosa, a agropecuária ocupa aproximadamente 85% da área do município, de acordo com o Capítulo 2, e sua prática com manejo inadequado pode auxiliar no desenvolvimento da erosão. As voçorocas estão relacionadas principalmente às pastagens, visto no Capítulo 3, que estão em áreas de declives mais acentuados, outro fator importante para seu desenvolvimento. Além disso, nessas vertentes estão os contatos das geologias supracitadas, que quando expostos

facilitam ainda mais o avanço da erosão, pois o material da base não resiste e cede à ação da água.

O solo exposto também está relacionado a pastagens, como apontado no Capítulo 3, principalmente porque os solos dessa área são rasos, não favorecendo a instalação de atividades agrícolas. A geologia também é importante para o desenvolvimento desse processo erosivos, pois as áreas de solo exposto ocorrem principalmente sobre Neossolos desenvolvidos sobre a Formação Lagoa Formosa. O mergulho das rochas da Formação Lagoa Formosa, geralmente horizontalizadas ou verticalizadas pelo evento magmático do Cretáceo, dificultam a pedogênese. Quando horizontalizadas, dificultam a infiltração da água; quando verticalizadas, favorecem sua rápida infiltração. O horizonte A fica responsável por manter a vegetação local, que em eventos pluviométricos intensos e/ou contínuos, aliados à declividade, ainda que em relevo suave ondulado, favorece a remoção desse horizonte, expondo o horizonte C saprolitizado ou ainda a rocha sã. Outra razão para a fácil remoção do horizonte A desses solos é a sua baixa fertilidade natural, condicionada pelo material de origem.

A dinâmica erosiva local é fortemente condicionada pela geologia, já que ela afeta a geomorfologia e a pedologia da região, que podem facilitar ou não o desenvolvimento da erosão. No entanto, não é um gatilho para os processos erosivos, que só ocorrem quando limiares topográficos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, antrópicos e de uso e ocupação são atingidos.