

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Dayane Caroline Freitas Carvalho

**ALTERAÇÕES DO USO E COBERTURA DA TERRA E AVALIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA À EROSÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUALAXO DO
NORTE – MG**

Belo Horizonte

2019

Dayane Caroline Freitas Carvalho

**ALTERAÇÕES DO USO E COBERTURA DA TERRA E AVALIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA À EROSÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUALAXO DO
NORTE – MG**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador(a): Adriana Monteiro da Costa

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG

2019

C331a 2019 Carvalho, Dayane Caroline Freitas.
Alterações do uso e cobertura da terra e avaliação da resistência à erosão da bacia hidrográfica do Rio Gualaxo do Norte - MG [manuscrito] / Dayane Caroline Freitas Carvalho. – 2019.
73 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Adriana Monteiro da Costa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2019.

Inclui bibliografia.

Inclui anexos.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Erosão – Minas Gerais – Teses. 3. Solo – Uso – Minas Gerais – Teses. 4. Mapeamento da cobertura do solo – Teses. I. Costa, Adriana Monteiro da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS
AMBIENTAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA DA TERRA E AVALIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA A EROÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUALAXO DO
NORTE – MG

DAYANE CAROLINE FREITAS CARVALHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 12 de abril de 2019, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Adriana Monteiro da Costa - Orientador
UFMG

Prof. João Herbert Moreira Viana
Embrapa

Prof. Rodrigo Afonso de Albuquerque Nóbrega
UFMG

Belo Horizonte, 12 de abril de 2019.

“A culpa, meu caro Brutus, não está nas estrelas,
mas em nós mesmos...”

Willian Shakespeare

À minha Mãe, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

À minha Mãe, pelo apoio e motivação em todos os momentos.

À minha família, principalmente minha avó pelas orações e cuidado.

Ao Guilherme pelo incentivo, força, paciência e carinho.

Às minhas primas, Ana Paula e Mariana pela amizade.

À professora Adriana Monteiro pela orientação, confiança, oportunidades e ensinamentos, da iniciação científica na Graduação ao Mestrado.

Ao pesquisador João Herbert pelas instruções e disposição.

Aos meus amigos da vida que sempre me colocaram pra cima e acreditaram em mim.

À toda equipe do Laboratório de Solos e Meio Ambiente (IGC/UFMG), pela convivência diária, discussões, cafés, companhia e apoio. Em especial, a Antônio e Maíse por fazerem meus dias mais felizes no último ano. Agradeço também ao Marcelo, pelo bom humor de sempre e ajuda com o Inglês.

Ao programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela experiência que me foi proporcionada.

A todos os professores que de maneira direta ou indireta contribuíram para a minha formação.

À Capes, pelo apoio financeiro que permitiu a realização do trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.....	20
Figura 2 - Morros e colinas na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.....	21
Figura 3 - Exemplos de diferentes ambientes na bacia	25
Figura 4 - Espacialização dos pontos de controle coletados em campo	26
Figura 5 - Imagem 1: Segmentação por multiresolução; Imagem 2: Segmentação por diferença espectral.....	28
Figura 6 - Mapeamento do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte nos anos de 2008, 2015 e 2018.....	31
Figura 7 - Pastagem no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.....	34
Figura 8 - Localização da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	42
Figura 9 - Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	43
Figura 10 - Mapa litológico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	44
Figura 11 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG	44
Figura 12 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	45
Figura 13 - Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG	46
Figura 14 - Esquema representativo de uma rampa	48
Figura 15 - Espacialização dos pontos de controle.....	52
Figura 16 - Resistência à erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	54
Figura 17 - Regiões de Muito Baixa resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte	56
Figura 18 - Regiões de Baixa resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte	57
Figura 19 - Regiões de Média resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte	58
Figura 20 - Regiões de Alta resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.....	59
Figura 21 - Regiões de Muito Alta resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.....	60
Figura 22 - Trecho do baixo curso do rio Gualaxo do Norte	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Landsat-5 e suas principais características.....	23
Tabela 2 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Landsat-8 e suas principais características.....	23
Tabela 3 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Sentinel-2 e suas principais características.....	23
Tabela 4 - Classes de uso e cobertura da terra.....	24
Tabela 5 - Valores dos atributos do algoritmo Multiresolution Segmentation.....	27
Tabela 6 - Intervalos do Índice Kappa.....	28
Tabela 7 - Abrangência espacial e percentual do mapeamento de uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, 2008 a 2018	32
Tabela 8 - Ponderação das classes de declividade da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	47
Tabela 9 - Ponderação dos intervalos de comprimento de rampa da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.....	48
Tabela 10 - Ponderação das classes de solo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte...	49
Tabela 11 - Notas atribuídas à textura para a resistência à erosão	49
Tabela 12 - Pesos atribuídos à textura para a resistência à erosão por local de amostragem...	50
Tabela 13 - Ponderação dos litotipos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	50
Tabela 14 - Classes da Avaliação da Resistência à Erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte	52
Tabela 15 - Classes de resistência à erosão com cálculo de área e percentual	55
Tabela 16 - Percentual da Resistência à Erosão e Uso e Cobertura da Terra na bacia do rio Gualaxo do Norte.....	62
Tabela 17 - Percentual da classe de Resistência à Erosão em relação ao Uso e Cobertura da Terra.....	62

RESUMO GERAL

A transformação da paisagem causada pela relação homem/natureza, na maioria das vezes favorece a degradação do meio ambiente. Essas alterações podem ter origem natural proveniente exclusivamente da dinâmica da natureza, antrópica, ou uma combinação de processos naturais e antrópicos. Conhecer os processos de mudança, no decorrer do tempo, é fundamental para as tomadas de decisão e interpretação dos ambientes. O objetivo deste estudo foi identificar as alterações no uso e cobertura da terra e analisar a resistência à erosão da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG. A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte está localizada no estado de Minas Gerais, na bacia hidrográfica do rio Doce, e parte de sua área pertence ao Quadrilátero Ferrífero. No ano de 2015, a bacia foi atingida pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão no município de Mariana, que gerou sérios impactos do âmbito ambiental ao social. Diante deste contexto, este trabalho foi desenvolvido em dois capítulos, o primeiro identificando as alterações ocorridas no uso e cobertura da bacia, nos últimos dez anos (2008 a 2018), e o segundo com a avaliação da resistência a processos erosivos da bacia. Para o mapeamento do uso e cobertura, foram utilizadas imagens Landsat -5, Landsat-8 e Sentinel-2. O método aplicado foi de classificação orientada a objetos assim, além da assinatura espectral característica, como tamanho e compacidade também foram considerados. O algoritmo usado para as classificações foi o do Nearest Neighbor (vizinho mais próximo). As classificações foram validadas por uma matriz de controle criada pela análise de imagens do Google Earth Pro e, pontos de controle coletados em visitas de campo. A avaliação de resistência à erosão foi realizada a partir da ponderação de variáveis, e atributos de variáveis que influenciam a erosão na bacia, foram consideradas variáveis referentes aos solos, geologia e relevo. Observou-se que a bacia apresenta oito classes de uso e cobertura principais que, no intervalo de dez anos, sofreram pequenas e grandes mudanças, como o aumento expressivo das áreas de solo exposto. Também se constatou que a bacia retrata três grandes ambientes, o primeiro marcado pela atividade minerária, localizado no alto curso, o segundo pela silvicultura e formações florestais, no médio curso, e o terceiro pelas áreas campestres, incluindo diversas áreas de pastagem no baixo curso. Quanto à avaliação da resistência, foram identificadas as áreas mais frágeis e resistentes à erosão na bacia, assim como as pressões antrópicas sofridas pela mesma. Diferente dos modelos de erosão convencionais, as áreas de planícies e terraços que normalmente são áreas de acumulação de material, devido a presença do rejeito e suas características físicas, tornaram-se áreas instáveis e frágeis aos processos erosivos. O diagnóstico e análise realizados podem atuar como subsídio nas tomadas de decisão na área de estudo, servindo de auxílio nas discussões de medidas de intervenção, de recuperação de áreas degradadas, de conservação, e na identificação de áreas prioritárias para ações emergenciais.

Palavras-chave: análise ambiental, barragem de Fundão, paisagem.

ABSTRACT GENERAL

Landscape transformation brought on by men/nature relationship, often favors the degradation of the environment. These changes can be the result of natural processes - coming exclusively from nature's dynamic-, anthropic actions or a combination of both. To understand the processes of change through time is essential for decision making and interpretation of the environment. The aim of this study is to identify changes in land use and land cover as well as to analyze erosion resistance in the Gualaxo do Norte river basin in Minas Gerais. The Gualaxo do Norte basin integrates the Rio Doce basin and a portion of it is part of Quadrilátero Ferrífero. In 2015 the basin was hit by the Fundão mining dam rupture in the municipality of Mariana, which caused serious impacts both environmentally and socially. Considering this setting this paper was structured in two sections, first identifying changes in land use and land cover in the basin in the past decade (2008-2018) and then assessing the erosion resistance in the basin. To map land use and cover satellite images from Landsat -5, Landsat-8 and Sentinel-2 were used. We applied object-oriented classification method also considering the specific spectral signature, like shape and compacity. We used the Nearest Neighbor algorithm for the classifications, and they were validated by a control matrix created through image analysis with Google Earth Pro and control points determined in field campaigns. The assessment of erosion resistance was done through weighting of variables and attributes of variables that play a part in erosive processes in the basin. The considered variables were related to soils, geology and relief. The basin presents eight main land use and cover classes that in the 10 years analyzed have gone through major or minor changes, such as the considerable increase in exposed soil area. We have also found that the river basin displays three great environments, the first predominantly represented by mining activities, in the upper course; the second represented by silviculture and forest formation in the middle course and the third typically made of fields in many areas of pasture in the lower course. In terms of erosion resistance, we have found areas more fragile as well as more resistant in the basin along with the anthropic pressures upon it. Unlike conventional erosion models - the floodplain and fluvial terraces are usually areas of aggradation - due to the presence of mining tailings the physical features of floodplains and terraces have become unstable and fragile to erosive processes. This diagnosis and analysis can be useful to support decision making in the study area, subsidizing discussion and intervention measures in order to recover degraded areas, to preserve and to identify areas to be prioritized for urgent actions.

Keywords: environmental analysis, Fundão dam, Landscape.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
CAPÍTULO 1 - ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUALAXO DO NORTE - MG: 2008 A 2018	16
CHAPTER 1 - CHANGES OF USE AND COVERAGE OF THE SOIL IN RIVER BASIN GUALAXO DO NORTE - MG: 2008 TO 2018	17
1 INTRODUÇÃO	18
2 MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1 Localização e caracterização da área.....	20
2.2 Materiais e bases de dados	21
2.3 Aquisição e características das imagens de satélite	22
2.4 Definição das classes de uso e cobertura do solo.....	24
2.5 Visitas de campo e coletas de dados	25
2.6 Processamento das imagens	26
2.7 Classificação orientada a objetos	28
2.8 Validação	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUALAXO DO NORTE: IMPLICAÇÕES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – MG	39
CHAPTER 2 - EROSION RESISTANCE EVALUATION IN GUALAXO DO NORTE – MG RIVER BASIN	40
1 INTRODUÇÃO	41
2 MATERIAIS E MÉTODOS	42
2.1 Localização e caracterização da área.....	42
2.2 Materiais e bases de dados	46
2.3 Ponderações das variáveis.....	47
2.4 Análise multicritério e álgebra de mapas	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS.....	64

CONCLUSÃO GERAL	67
REFERÊNCIAS.....	68
ANEXOS.....	69
ANEXO A - ÍNDICE <i>KAPPA</i> DA CLASSIFICAÇÃO DE 2008.....	69
ANEXO B – ÍNDICE <i>KAPPA</i> DA CLASSIFICAÇÃO DE 2015	70
ANEXO C – ÍNDICE <i>KAPPA</i> DA CLASSIFICAÇÃO DE 2018	71
ANEXO D – ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM A PARTIR DA METODOLOGIA DO POLÍGONO DE THIESSEN	72

INTRODUÇÃO GERAL

A relação sociedade e natureza transformou esta e criou diferentes paisagens no decorrer do tempo. Essas transformações, muitas vezes, favorecem a degradação do meio ambiente e comprometem a qualidade e quantidade de recursos primordiais para a vida.

Essas alterações podem ter origem natural proveniente exclusivamente da dinâmica da natureza antrópica ou uma combinação de processos naturais e antrópicos. A erosão é um exemplo típico de processo que causa transformações na paisagem e é produto da dinâmica natural do ambiente e da ação antrópica associadas. A interferência antrópica, na maioria das vezes, intensifica e acelera a ação erosiva.

A erosão é um processo natural que ocorre em toda a superfície terrestre e atualmente é um problema de ordem mundial, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil (BARBIER, 1997). Dentre os principais danos estão as perdas de solo, perda de nutrientes por lixiviação, a redução na capacidade de infiltração e de retenção de umidade do solo, a sedimentação e a deposição do material erodido nas zonas baixas de solo fértil, reduzindo a sua fertilidade, desgaste do solo, assoreamento de cursos d'água, entre outros (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985).

Por estar associado com a geração de inúmeros danos, é um assunto que desperta atenção do agricultor ao técnico ou governante, e se dissociado das implicações de sua ocorrência, ganha destaque especialmente pelas perdas econômicas muito mais que ambientais. Assim, a erosão tornou-se um problema científico com diversos envolvidos na busca em reconhecer, considerar, conceituar e parametrizar inúmeras condições, fatores e interações que a afetam (D'AGOSTINI, 1999).

Com o intuito de analisar os diferentes elementos da paisagem, de maneira integrada, optou-se pelo recorte de bacia hidrográfica que tem se mostrado um tipo de unidade adequada para estudos ambientais (OLIVEIRA, 2016). Diante deste cenário, a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte foi escolhida como área de estudo. A bacia localiza-se em grande parte na microrregião de Ouro Preto e parte na microrregião de Ponte Nova, do estado de Minas Gerais. Apresenta grande relevância no contexto regional em que está inserida, no quesito mineração, por parte da sua área pertencer ao Quadrilátero Ferrífero, e em relação aos recursos hídricos, como importante tributário do rio Carmo, e este, por sua vez, afluente no rio Doce.

Além disso, em novembro de 2015 a bacia foi atingida pelo rompimento da barragem de Fundão, um dos maiores desastres ambientais do mundo. Sabe-se da existência e importância de minerações e garimpo de elementos químicos, como o ferro e ouro. É inegável que essas

explorações vêm contribuindo significativamente, há algumas décadas, para o desenvolvimento econômico dos municípios que fazem parte da bacia do rio Gualaxo do Norte, do estado de Minas Gerais e até mesmo para o desenvolvimento do Brasil. Contudo, há a preocupação de que esse desenvolvimento econômico, cuja importância também é inegável, esteja sendo alcançado à custa de atividades antropogênicas contrárias à preservação das condições naturais, dos recursos fluviais da região (RODRIGUES, 2012).

Outra atividade relevante é a pastagem presente predominantemente no baixo curso da bacia. A pastagem, quando implantada de forma indiscriminada e sem a análise das características fisiográficas, pode ser um catalisador dos processos erosivos.

Assim, emergem-se questões de caráter geoambiental que necessitam ser investigadas, tanto pela necessidade de se mensurar os impactos advindos das atividades de exploração, quanto pela cobrança da sociedade por práticas de exploração sustentável.

A dinâmica e as relações entre os elementos da paisagem são fundamentais para a realização de uma análise integrada, além de servir de subsídio à gestão dos recursos naturais existentes, de forma a orientar e direcionar políticas públicas e ações de manejo e conservação na área.

Na literatura, são encontrados diversos estudos testando inúmeros métodos e modelos de análise a erosão (ZINGG, 1940; MEYER e MONKE, 1965; WISCHMEIER e SMITH, 1978; KINNELL, 1981; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; FOSTER, 1985). Com o aumento do desenvolvimento e uso das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), bem como dos processos de mapeamento e modelagem, as análises de dados foram otimizadas, gerando o aumento da qualidade dos produtos originados.

Nesse sentido, optou-se pela aplicação da análise multicritério, atrelado às variáveis mais estáveis do meio físico. A utilização de variáveis mais estáveis do meio físico justifica-se pela tentativa de uma avaliação da resistência a processos erosivos em geral, de modo que os resultados, posteriormente, poderão ser relacionados com os demais dados e mapas temáticos.

Assim, surgem as questões norteadoras deste estudo. No caso específico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, houve mudanças bruscas no uso e cobertura da bacia nos últimos dez anos? É possível separar a bacia em macroambientes? Quais são as áreas de menor resistência aos processos erosivos? As áreas naturalmente mais frágeis são as que sofrem maior pressão antrópica?

O objetivo geral deste trabalho consistiu em estudar as alterações de uso e cobertura da terra, nos últimos dez anos, e avaliar a resistência a processos erosivos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG.

Os objetivos específicos foram: (i) realizar o mapeamento de uso e cobertura da terra em três datas distintas, nos últimos dez anos; (ii) avaliar a resistência a processos erosivos da bacia; e (iii) analisar as áreas frágeis aos processos erosivos e à pressão antrópica sofrida pelas mesmas.

Para alcançar os objetivos propostos, dividiu-se este estudo em dois capítulos, em formato de artigo. O primeiro compreende as análises de alteração de uso e cobertura da terra; e o segundo refere-se à avaliação da resistência da bacia aos processos erosivos.

CAPÍTULO 1 - ALTERAÇÕES DE USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUALAXO DO NORTE - MG: 2008 A 2018

RESUMO

O mapeamento das alterações das classes de uso e cobertura da terra é um instrumento primordial para a análise do território, compreensão dos padrões de organização do espaço, e tomadas de decisão. Este estudo analisou as alterações de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG, com o propósito de identificar e analisar as principais classes de uso e cobertura, nos últimos dez anos (2008 a 2018), destacando as alterações causadas pelo rompimento da barragem de Fundão e os padrões de organização de uso e cobertura da terra, existentes na bacia. Foram realizadas as classificações de imagens de satélites referentes aos anos de 2008, 2015 e 2018 pelo método de classificação supervisionada e orientada ao objeto com o algoritmo do Nearest Neighbor (vizinho mais próximo), considerando parâmetros como forma, tamanho e compacidade. Assim, foi verificado que há oito classes de uso e cobertura do solo principais, que no intervalo dez anos sofreram pequenas e grandes mudanças. Também se constatou que a bacia retrata três grandes ambientes, o primeiro marcado pela atividade minerária, localizado no alto curso, o segundo pela silvicultura e formação florestal, no médio curso, e o terceiro pelas áreas campestres, incluindo diversas áreas de pastagem no baixo curso.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, barragem de Fundão; classificação orientada a objeto.

CHAPTER 1 - CHANGES OF USE AND COVERAGE OF THE SOIL IN RIVER BASIN GUALAXO DO NORTE - MG: 2008 TO 2018

ABSTRACT

Mapping change of land use and land cover is an essential tool for territory analysis, comprehension of space organization patterns and decision making. This paper has analyzed the changes in land use and land cover in the Gualaxo do Norte river basin in Minas Gerais, aiming to identify and analyze the main land use and land cover classes in the past decade (2008-2018) and highlighting the changes brought on by the Fundão mining dam rupture as well as the use and cover organization patterns in the basin. Satellite image classification was performed for the years 2008, 2015 and 2018 through object-oriented supervised classification using the Nearest Neighbor algorithm, using parameters such as shape, size and compacity. Thereby eight main land use and cover classes were found in the 10 years analyzed, classes that have gone through major or minor changes. We have also found that the river basin displays three great environments, the first predominantly represented by mining activities, in the upper course; the second represented by silviculture and forest formation in the middle course and the third typically made of fields in many areas of pasture in the lower course.

Keywords: Remote sensing, Fundão dam; object-oriented classification.

1 INTRODUÇÃO

As transformações antrópicas na paisagem podem comprometer a qualidade e disponibilidade de recursos essenciais à vida, como o solo, a cobertura vegetal e os corpos d'água (CARMO, 2009). Deste modo, entender as dinâmicas e alterações do uso e cobertura da terra contribui para o entendimento de questões dos mais diversos interesses, que podem ser de caráter histórico, ambiental, econômico, estrutural e/ou político de decisão. Além disso, avaliar quais mudanças e aspectos atuaram e atuam sobre as paisagens é de fundamental importância no subsídio às tomadas de decisões na gestão dos territórios.

O mapeamento e análise das alterações das classes de uso e cobertura da terra é um instrumento primordial para a compreensão dos padrões de organização do espaço, uma vez que suas tendências possam ser analisadas. Este monitoramento consiste em buscar conhecimento de toda a sua utilização por parte do homem ou, quando não utilizado pelo homem, a caracterização de tipos de categorias de vegetação natural que reveste o solo, como também suas respectivas localizações. De forma sintética, a expressão “uso da terra ou uso do solo” pode ser entendida como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem (ROSA, 2007).

A partir da década de 1970, foram registrados grandes avanços nas técnicas e análises de classificação de uso e cobertura da terra. Atualmente, existem diversos métodos e algoritmos de classificação, com inúmeras especificidades e desempenhos (PHIRI e MORGENROTH, 2017). Dentre estes pode-se citar o método de classificação orientada a objetos (OBIA), que utiliza objetos geográficos como unidades básicas para classificação da cobertura da terra (PEÑA et al., 2014; DORREN et al., 2003). Essa abordagem reduz a variação dentro da classe e geralmente remove os efeitos que resultam de pixels isolados, principalmente devido à classificação errônea. A OBIA tem uma vantagem, incorpora diversas fontes de informação como textura, forma e posição, como base para a classificação (LI et al., 2014; HUSSAIN et al., 2013; MOSKAL et al., 2011).

Geralmente, a OBIA é aplicada em imagens de alta resolução, entretanto, existem estudos com a aplicação do método em imagens de média resolução, como as imagens Landsat (SAMAL e GEDAM, 2015).

Em estudos realizados para comparar o desempenho da classificação orientada a objetos com a classificação pixel a pixel de imagens Landsat, verificou-se que a OBIA produziu precisões de classificação mais altas em vários tipos de cobertura da terra (GILBERTSON et al., 2017; CAI e LIU, 2013; FLANDERS et al., 2003).

Os impactos gerados pelas interferências antrópicas, nas paisagens, têm sido cada vez mais frequentes. Dentre estes se pode destacar os das construções das barragens de rejeitos da mineração, que interferem substancialmente nos processos fluviais, na erosão, no transporte e na deposição de sedimentos ao longo do canal principal e junto à desembocadura. Tais alterações podem, a médio e longo prazo, desencadear ou intensificar efeitos adversos, como o aumento dos processos erosivos nas margens e assoreamento dos canais fluviais, alterações na flora e na ictiofauna, além de comprometer hábitos de comunidades dependentes do rio, como, por exemplo, ribeirinhos e pescadores (COELHO, 2007).

Nos últimos três anos, o rompimento destas estruturas tornou-se popular no estado de Minas Gerais, e registrou dois grandes desastres provocados pelo rompimento de barragens de rejeitos (Barragem de Fundão em Mariana, em 2015 e, Barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho, em 2019). O processo alterou toda a paisagem natural e social das áreas diretamente afetadas, resultando em grandes volumes de rejeitos descarregados nos canais fluviais, o que está comprometendo a dinâmica de inúmeras bacias hidrográficas das regiões.

O rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana em Minas Gerais, foi considerado o mais grave episódio dessa natureza no mundo (LACAZ, et al., 2017). Com um volume total de 50 milhões de m³ de rejeito de mineração, foram liberados da barragem 34 milhões de m³, que galgaram a uma segunda barragem a jusante, a de Santarém e, o rejeito foi lançado na bacia hidrográfica do rio Doce. A avalanche de lama deixou um rastro de destruição, marcado por perdas de vidas humanas, severa alteração biofísica, e incalculável perda patrimonial no sentido amplo. Uma corrente fluvial com altíssima turbidez percorreu o restante do fundo do vale por, aproximadamente, 115 km até alcançar a represa da UHE Candonga / Risoleta Neves, “empurrando” uma onda de cheia, que removeu e/ou destruiu tudo o que encontrava no canal e sobre os baixos terraços e encostas, que constituem as margens dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo (SAADI e CAMPOS, 2015).

Os impactos gerados pelo rompimento refletiram diretamente, não só na qualidade dos recursos hídricos, como também provocou a sedimentação do material sobre as margens dos rios, soterrando o leito menor e, em alguns locais, até além dele, em alguns lugares houve intensificação dos processos erosivos, com remoção de vegetação ciliar (VIANA e COSTA, 2016).

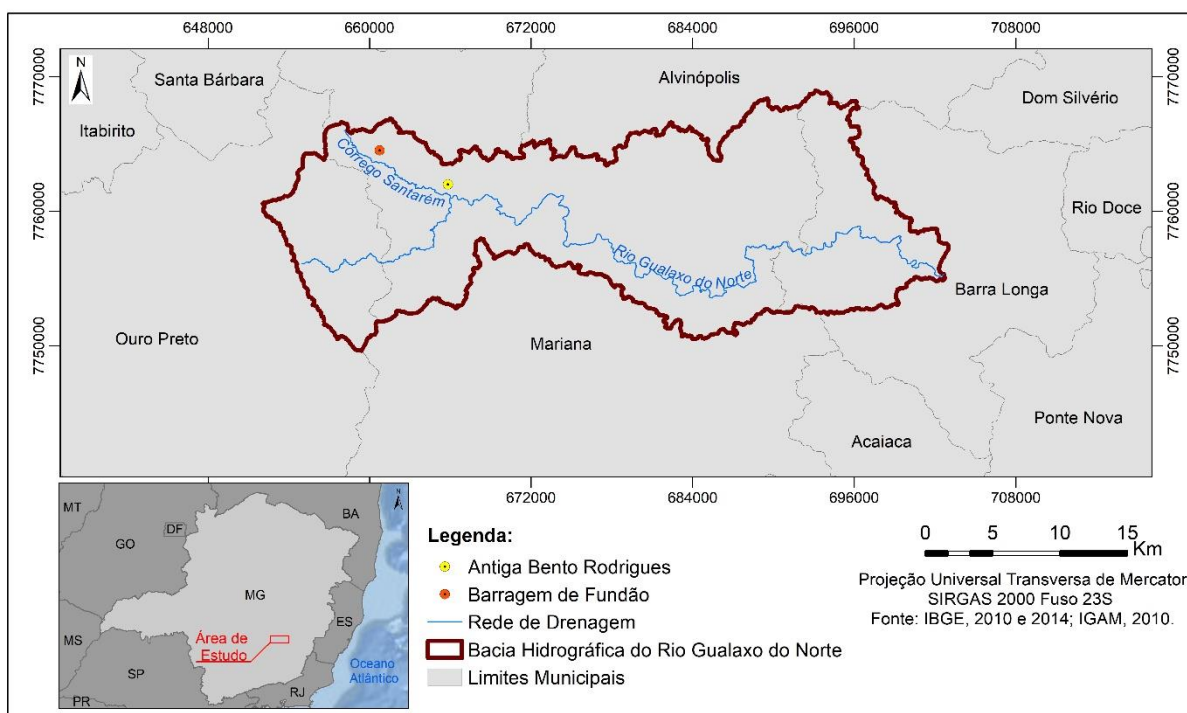
Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi identificar e analisar as mudanças no uso e cobertura da terra, dos últimos dez anos (2008 - 2018), na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG, destacando os padrões de organização de uso e cobertura da terra, existentes na bacia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área

A Bacia Hidrográfica do rio Gualaxo do Norte está localizada na região central do estado de Minas Gerais. Em sua extensão, a bacia engloba parte dos municípios de Ouro Preto (78 km²), Mariana (375 km²) e Barra Longa (107 km²), somando uma área de aproximadamente 560 km² (IBGE, 2006) (Figura 1). O rio Gualaxo do Norte tem aproximadamente 87 km de extensão, deságua no rio do Carmo, afluente do rio Doce, pertencendo à Unidade Planejamento de Recursos Hídricos DO1 - Rio Piranga (IGAM, 2010).

Figura 1 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte



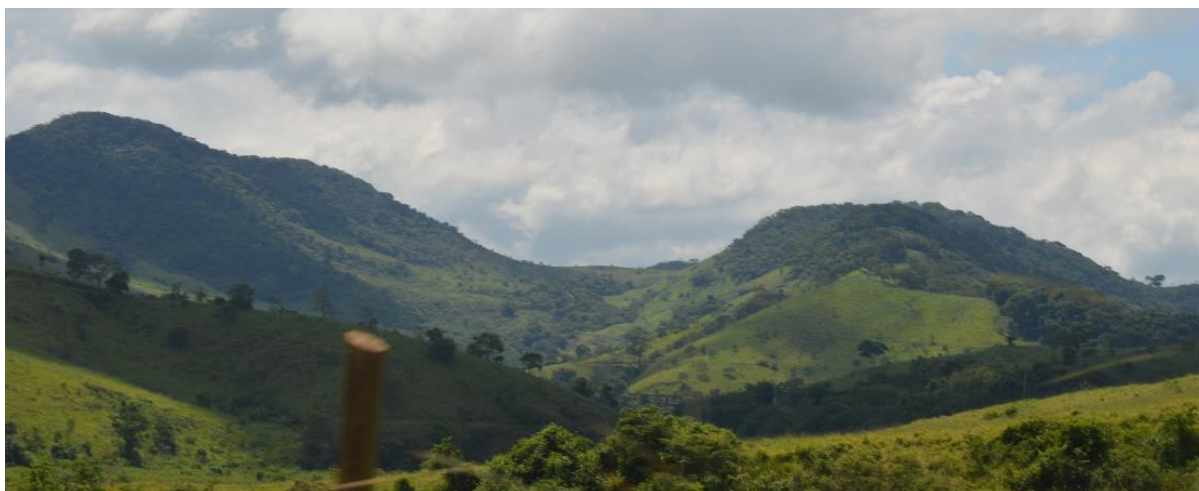
Em relação aos solos, a classe mais representativa e dispersa da bacia são os Latossolos Vermelho-Amarelo Distrófico. No alto curso da bacia predominam os afloramentos rochosos e as classes de solos Cambissolos Háplicos Tb Distrófico e Distroférico, e o baixo curso é composto pelos Argissolos Vermelhos Eutróficos (Embrapa, 1979).

A Litologia da bacia é composta por itabiritos, dolomitos e filitos em seu alto curso, área com diversas minas de minério de ferro e suas respectivas barragens de rejeitos. A barragem de Fundão se insere neste contexto, estando localizada mais precisamente no córrego Santarém, afluente do rio Gualaxo do Norte (Santos, et al. 2017). No médio curso aparecem

rochas do Supergrupo rio das Velhas, como quartzitos e xistos e do Complexo Santa Bárbara, como gnaisses migmatíticos e granitos. O baixo curso é composto por rochas do Complexo Acaiaca como, gnaisses, quartzitos e migmatitos e do Complexo Mantiqueira, com gnaisses e pegmatitos (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

A geomorfologia da bacia conta com quatro unidades morfopedológicas, segundo Saadi e Campos (2015), sendo elas: as escarpas do caraça, apresentando escarpas rochosas elevadas e subverticais; os morros de Mariana, com morros e colinas com altura inferior a 200 metros (Figura 2); as colinas do alto Piracicaba, com colinas convexas e com altura inferior a 200 metros, cristas esparsas e vales encaixados; e o baixo rio do Carmo, com morros convexos e com altura superior a 200 metros e vales muito encaixados.

Figura 2 - Morros e colinas na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte



Fonte: Adriana Monteiro

2.2 Materiais e bases de dados

Os materiais utilizados, nesse estudo, consistiram em:

- a) Software ArcGIS versão 10. 3 (ESRI, 2014);
- b) Software Quantum GIS – QGIS – versão 2.18.13 (QGIS Development Team, 2016);
- c) Software Google Earth Pro ® 7.1.8.3036 (32-bit), 2017;
- d) Software Ecognition Developer 8.0. (TRIMBLE 1995-2011);
- e) Imagens do Satélite Sentinel-2, obtidas gratuitamente no site do *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>);
- f) Imagens do Satélite Landsat-5, obtidas gratuitamente no site do *GloVis – Global Visualization Viewer* (<https://glovis.usgs.gov/>);

- g) Imagens do Satélite Landsat-8, obtidas gratuitamente no site do *GloVis – Global Visualization Viewer* (<https://glovis.usgs.gov/>);
- h) Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros (JAXA/METI, 2010);
- i) GPS Garmin Map 64s; e
- j) Câmera Fotográfica.

Os materiais primários utilizados foram imagens de satélite com resolução espacial de 30 (Landsat-5 e Landsat-8) e 10 (Sentinel-2) metros da área de estudo, numa perspectiva temporal de 10 anos, referentes aos anos de 2008, 2015 e 2018.

Os materiais utilizados referem-se às imagens gratuitas e disponíveis na plataforma Earth Explorer e Glovis, geridas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Os equipamentos e softwares utilizados foram disponibilizados pelo Laboratório de Solos e Meio Ambiente (IGC – UFMG).

Após a aquisição dos materiais, foi realizado o processamento dos dados, visitas de reconhecimento e checagem em campo e geração de resultados e discussão.

2.3 Aquisição e características das imagens de satélite

Foi realizada a obtenção de imagens digitais orbitais dos satélites Landsat-5, Landsat-8 e Sentinel-2, referentes à área de estudo. Foram utilizadas imagens de satélites diferentes devido ao intervalo de tempo estudado (2008 a 2018), a escolha da data das cenas foi realizada a partir de três critérios: os acontecimentos chave, a existência de imagens nos demais anos, com datas próximas, e a presença de pouca ou nenhuma nuvem. Os acontecimentos chave são: a existência de área rural consolidada, definida no artigo 3º, inciso III, Lei nº 12.651/12 (Código Florestal) (BRASIL, 2012), como área de imóvel rural com ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008, o rompimento da barragem de Fundão, em 05 de novembro de 2015, e o cenário atual, no ano de 2018.

A imagem do satélite Landsat-5 foi utilizada para o mapeamento referente ao ano de 2008, com data de aquisição da imagem de 20 de agosto de 2008. Foi utilizada uma imagem do mês de agosto devido à qualidade baixa das imagens de julho, mês em que a lei de uso consolidado entrou em vigor. Foram utilizadas as bandas 1, 2, 3 e 4, bandas do RGB (vermelho, verde e azul) e NIR (infravermelho próximo). A Tabela 1 apresenta as principais características das bandas utilizadas.

Tabela 1 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Landsat-5 e suas principais características

Banda	Intervalo Espectral (μm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m)
1	0,45 – 0,52	Azul	30
2	0,52 – 0,60	Verde	30
3	0,63 – 0,69	Vermelho	30
4	0,76 – 0,90	NIR	30

Fonte: Adaptado do Departamento de Geração de Imagens (INPE).

A imagem do satélite Landsat-8 foi utilizada para o mapeamento referente ao ano de 2015, com data de aquisição da imagem de 25 de setembro de 2015. Foram utilizadas as bandas 2, 3, 4 e 5, bandas do RGB (vermelho, verde e azul) e NIR (infravermelho próximo). A Tabela apresenta as principais características das bandas utilizadas.

Tabela 2 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Landsat-8 e suas principais características.

Banda	Intervalo Espectral (μm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m)
2	0,45 – 0,51	Azul	30
3	0,52 – 0,59	Verde	30
4	0,64 – 0,67	Vermelho	30
5	0,85 – 0,88	NIR	30

Fonte: USGS (2018).

A imagem do satélite Sentinel-2 foi utilizada para o mapeamento referente ao ano de 2018, com data de aquisição da imagem de 01 de setembro de 2018. Foram utilizadas as bandas 2, 3, 4 e 8, bandas do RGB (vermelho, verde e azul) e NIR (infravermelho próximo). A Tabela 3 apresenta as principais características das bandas utilizadas.

Tabela 3 - Bandas utilizadas na classificação da imagem Sentinel-2 e suas principais características

Banda	Comprimento de onda central (nm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m)
2	490	Azul	10
3	560	Verde	10
4	665	Vermelho	10
8	842	NIR	10





Fonte: ESA (2018).

2.4 Definição das classes de uso e cobertura do solo

As classes de uso e cobertura do solo foram definidas a partir da análise visual das imagens Landsat-5, Landsat-8 e Sentinel-2, Google Earth Pro e visitas de campo, onde aconteceu o reconhecimento da área de estudo e identificação dos alvos presentes na cena.

As classes definidas foram: afloramento rochoso, área urbana, corpos d'água, formação florestal, formação campestre, mineração, solo exposto (Tabela 4).

Tabela 4 - Classes de uso e cobertura da terra

Classe	Exemplo	Descrição
Afloramento		Exposição rochosa na superfície.
Área urbana		Área caracterizada por pavimentação e edificações contínuas e demais construções.
Corpos d'água		Caracterizados por lagos, lagoas, rios e reservatórios artificiais.
Formação florestal		Vegetação composta por matas secundárias em estágio inicial e médio de regeneração.

Formação
campestre



Vegetação herbáceo-arbustiva, compostas por árvores espaçadas e predomínio do estrato herbáceo, incluindo as pastagens.

Mineração



Processos e atividades referentes à mineração, predominando as cavas de minas.

Solo exposto



Solo desnudo e/ou sem cobertura.

2.5 Visitas de campo e coletas de dados

Foram realizadas visitas a campo em março e novembro de 2018, onde foram caracterizados os alvos de interesse e coletados pontos de controle, através de GPS e registro fotográfico (Figura 3).

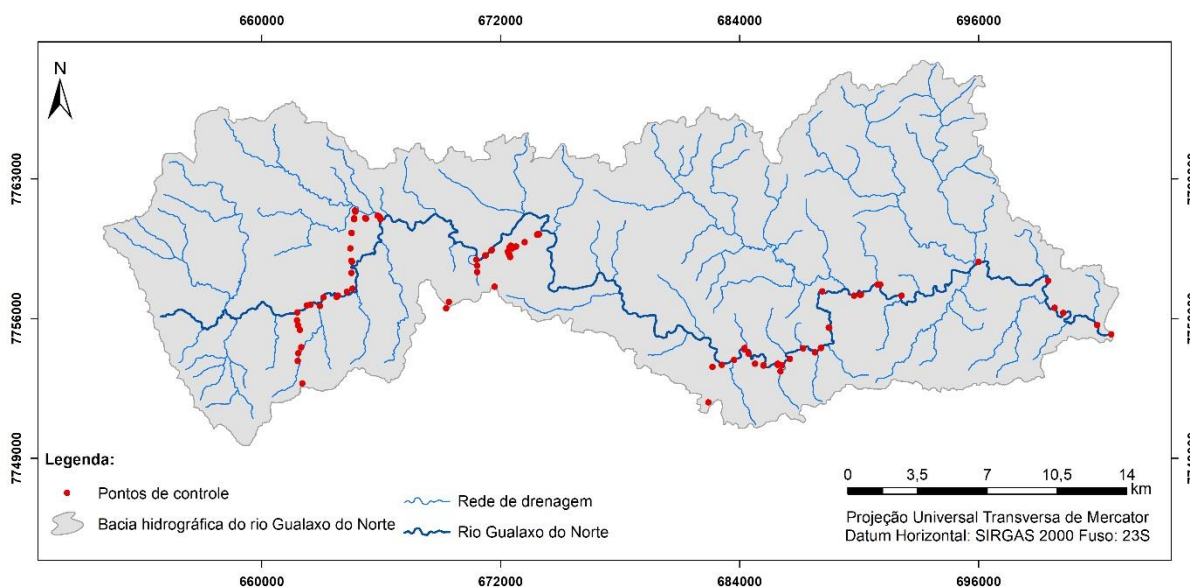
Figura 3 - Exemplos de diferentes ambientes na bacia



Fonte: Adriana Monteiro

A área foi percorrida buscando-se a representação dos diferentes ambientes da bacia, sendo que a dificuldade de acesso e/ou restrição não permitiu a amostragem aleatória (Figura 4).

Figura 4 - Espacialização dos pontos de controle coletados em campo



2.6 Processamento das imagens

Para o processamento das imagens foram utilizados os seguintes softwares: ArcGIS, Ecognition, QGIS e Google Earth Pro. Inicialmente, as imagens foram reprojetadas para SIRGAS 2000 23S. Em seguida, o DN (digital number), indicador de nível de cinza, que varia do preto ao branco de cada imagem, foi transformado em refletância. Esse processo contribui para que o efeito da variação de brilho das cenas, em alvos de natureza similar, seja minimizado, e seu emprego tende a propiciar maior qualidade no processo de classificação da imagem.

Com as imagens transformadas em refletância, iniciou-se o processo de segmentação da imagem. O processo de segmentação é um passo crucial na OBIA, seu principal objetivo é dividir uma imagem em partes significativas, que tem uma forte correlação com objetos ou áreas do mundo real, contidas na imagem (SONKA et al., 2008; BLASCHAKE et al., 2004).

Deste modo, foi criada uma árvore de processo e aplicação do algoritmo de segmentação multiresolução (Multiresolution Segmentation). Este algoritmo utiliza a técnica de fusão de regiões emparelhadas (pairwise), no qual pares ou regiões de pixels são fundidos em unidades maiores, através de interações por meio do algoritmo Fractal Net Evolution Approach (FNEA),

desde que o limiar superior de homogeneidade não seja excedido (DEFINIENS, 2009; BAATZ e SCHAPE, 2000).

A segmentação multiresolução foi estabelecida a partir da combinação de três parâmetros: forma, compacidade e escala dos objetos. No campo foram definidos valores entre 0 e 1 (mínimo e máximo disponível) que modificam a relação entre os critérios de homogeneidade espacial (1) e informação espectral (0), o mesmo intervalo foi utilizado para o parâmetro compacidade, que modifica critérios de contorno (variação entre suave (0) e brusco (1)) (PIAZZA e VIBRANZ, 2014), o parâmetro escala define o tamanho médio dos objetos, gerados pela fusão dos pixels.

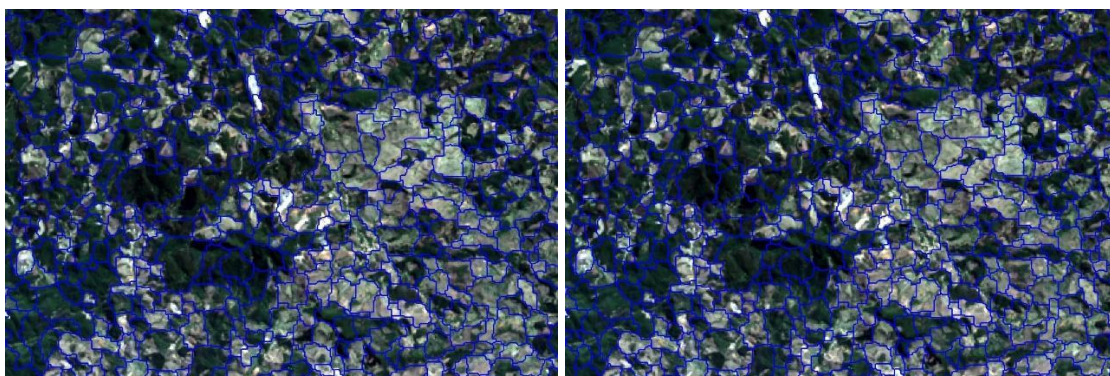
A alteração dos valores de cada parâmetro, assim como a sinergia entre eles, gerou diferentes cenários de segmentação, entretanto, como o objetivo era evidenciar os diferentes alvos, independente da classe, optou-se por adotar valores baixos para forma e compacidade, fornecendo assim prioridade à suavidade de contornos e à cor (informação espectral) dos objetos. Os parâmetros foram obtidos a partir de pesquisa bibliográfica e uma sequência de inúmeros testes. Os valores adotados estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos atributos do algoritmo Multiresolution Segmentation

Forma	Compacidade	Escala
0,3	0,5	30

Em seguida, aplicou-se o segundo algoritmo de segmentação, denominado diferença espectral (*Spectral Difference*), este algoritmo funde objetos vizinhos, criados na etapa anterior, de acordo com uma média espectral abaixo do limite dado (diferença espectral máxima). A diferença espectral utilizada neste trabalho foi de 0,02. A Figura 5 apresenta em detalhe a aplicação do algoritmo de diferença espectral.

Figura 5 - Imagem 1: Segmentação por multiresolução; Imagem 2: Segmentação por diferença espectral.



2.7 Classificação orientada a objetos

Após a segmentação das imagens, iniciou-se a etapa de coleta de amostras de teste e treinamento. As amostras foram coletadas para cada classe, servindo de padrão para o algoritmo de classificação, que foi aplicado posteriormente. Para realizar a classificação supervisionada, foi utilizado o algoritmo Nearest Neighbor - NN (vizinho mais próximo). O classificador se baseou nas amostras coletadas anteriormente.

2.8 Validação

Para avaliar a acurácia dos mapas temáticos, foi utilizada uma máscara de área de teste e treinamento (TTA mask), diferente da utilizada na etapa anterior. Esta TTA mask contou com a classificação de pontos visitados em campo e outras amostras classificadas com o auxílio do Google Earth Pro. Em sequência, foi construída a matriz de erros por meio das estatísticas de estabilidade da classificação. Na matriz, foram avaliados os erros de omissão (amostras que não foram classificadas de acordo com as classes de referência), os erros de comissão (amostras de referência classificadas erroneamente, como pertencentes a outras classes), exatidão global e índice Kappa.

Além disso, para se tornar uma classificação válida, ela deve apresentar um valor de índice Kappa maior que 0,60 (Tabela 6).

Tabela 6 - Intervalos do Índice Kappa

Intervalo Kappa	Interpretação
< 0,00	Ausência de concordância
0,00 – 0,20	Concordância pobre

0,21 – 0,40	Concordância leve
0,41 – 0,60	Concordância moderada
0,61 – 0,80	Concordância substantiva
0,81 – 1,00	Concordância quase perfeita

Fonte: Lads e Koch, 1977.

Dessa forma, as classificações válidas foram revisadas com o auxílio do Google Earth Pro. Os objetos identificados como erros de omissão foram corrigidos manualmente no software ArcGIS. Por fim, foram elaborados os layouts, os cálculos de áreas e discussão dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG, permitiu classificar a área em 8 (oito) classes distintas, sendo elas: afloramento rochoso, área urbana, corpos d'água, formação campestre, formação florestal, mineração, silvicultura e solo exposto.

Os dados classificados, referentes ao ano de 2008, apresentaram valores de 94% para a precisão geral e 0,89 para o índice *Kappa*, demonstrando alto grau de acerto entre a classificação realizada e a máscara de teste, que foi composta pelos pontos de verdade de campo e amostragem aleatórias de conferência, no Google Earth (LADS e KOCH, 1977).

A matriz de confusão (Anexo A) demonstra que na classificação não houve erros de omissão, ou seja, todas as amostras foram classificadas de acordo com as classes de referência. Os maiores erros de comissão aconteceram nas classes dos corpos d'água e solo exposto. A classe de corpos d'água não conseguiu ser identificada pelo classificador, deste modo, posteriormente foi vetorizada e incluída de forma manual na classificação final. A classe de solo exposto foi bastante confundida com a classe mineração, isoladamente a classe obteve um índice *Kappa* de 0,53, considerada uma concordância moderada. A confusão entre as classes pode ser explicada pela refletância correlata.

A classificação da imagem de setembro de 2015 apresentou valores de precisão geral de 99% e índice *Kappa* de 0,99. A matriz de confusão (Anexo B) mostrou que um segmento não foi classificado de acordo com as classes de referência, configurando um erro de omissão. As classes que geraram maior confusão foram as classes mineração e solo exposto. A classe mineração foi confundida com formação campestre e afloramento, enquanto a classe solo exposto foi confundida com formação campestre e/ou não foi classificada. A confusão entre solo exposto e formação campestre é explicada pela proximidade espacial e espectral, ainda assim, ambas as classes tiveram um índice *kappa* satisfatório, 0,98 e 0,96 respectivamente.

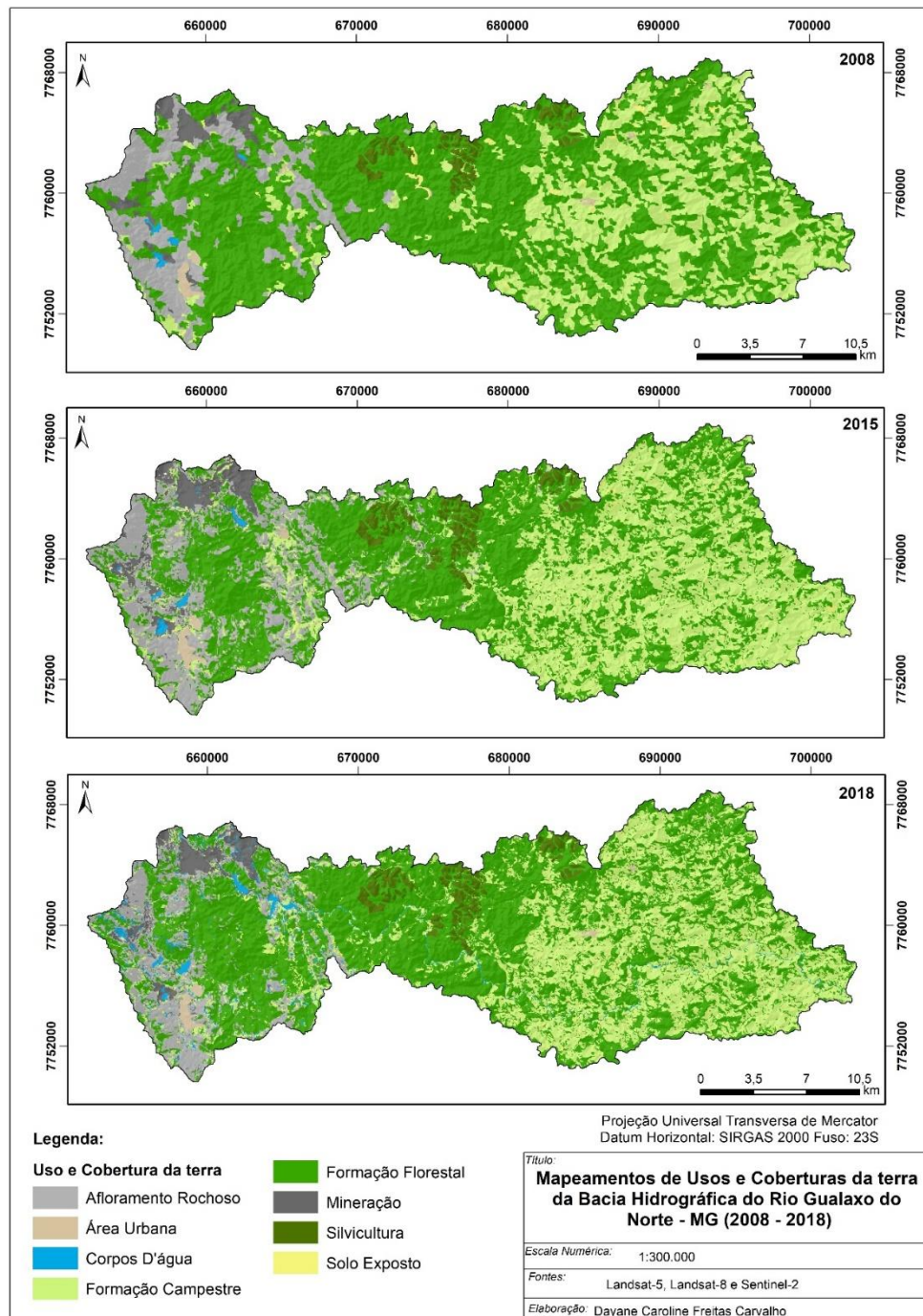
Para o ano de 2018, os valores da classificação foram de 92% para a precisão geral e 0,90 para o índice *Kappa*, o que demonstra um acordo quase perfeito entre a classificação realizada e a máscara de teste (LADS e KOCH, 1977) (Anexo C).

Dentro desse contexto, a matriz de confusão mostra que oito objetos não foram classificados de acordo com as classes de referência. As classes que apresentaram maior confusão foram solo exposto e mineração. A classe mineração foi confundida principalmente com afloramento rochoso e a classe solo exposto foi confundida sobretudo com a classe

formação campestre. Apesar dos erros de comissão, advindas dessas classes, ambas apresentaram classificação substantiva no índice *kappa*.

O mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, dos anos de 2008, 2015 e 2018, estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Mapeamento do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, nos anos de 2008, 2015 e 2018.



Na análise da dinâmica do uso e cobertura da terra da área de estudo (Figura 6 e Tabela 7), no intervalo de 10 anos (2008 a 2018), observam-se duas classes dominantes: a formação florestal e a formação campestre. A formação florestal é composta majoritariamente por matas secundárias em estágio inicial e médio de regeneração e concentra-se no médio curso da bacia. A classe em 10 anos passou de 59,28%, em 2008, para 51,98%, em 2018, da área total. O desmatamento é um problema antigo da bacia do rio doce e, conseqüentemente, da bacia do rio Gualaxo do Norte. Segundo Hora (2012), o desmatamento foi a base do estabelecimento de atividades agropecuárias que contribuíram, ao longo do tempo, para a degradação da bacia. A supressão da vegetação não foi, a princípio, especificamente motivada pela agropecuária, e sim para atender a demanda madeireira emergente, durante a primeira metade do século XX. Com o declínio da extração madeireira, por volta de 1950, a floresta tropical característica foi praticamente substituída por extensas áreas de pastagens, que permanecem até a atualidade.

Nesse sentido, é necessário destacar que as florestas exercem papel fundamental para o equilíbrio e adequado funcionamento dos ecossistemas e para a manutenção da diversidade biológica (BACELLAR, 2005). A supressão das mesmas promove alterações no meio físico, no clima hidrológico da bacia (LINHARES et al., 2005; BACELLAR, 2005). Assim, se faz necessária a valorização das formações florestais remanescentes.

Tabela 7 - Abrangência espacial e percentual do mapeamento de uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, 2008 a 2018.

Classe de uso e cobertura da terra	2008		2015		2018	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Afloramento Rochoso	57,18	10,18	56,73	10,11	52,41	9,33
Área Urbana	3,16	0,56	3,85	0,68	3,03	0,54
Corpos D'água	1,31	0,23	1,79	0,32	9,92	1,77
Formação Campestre	138,59	24,68	185,73	33,07	161,23	28,70
Formação Florestal	332,96	59,28	278,08	49,50	291,97	51,98
Mineração	12,10	2,16	16,75	2,98	14,52	2,59
Silvicultura	11,81	2,10	13,91	2,48	14,4	2,56
Solo Exposto	4,57	0,81	4,84	0,86	14,2	2,53
Total	561,68	100	561,68	100	561,68	100

As áreas de afloramento rochoso e as consequentes áreas de mineração e barragens de rejeito concentram-se no alto curso da bacia. O decréscimo da classe afloramento rochoso é explicada pelo avanço da mineração nas cabeceiras da bacia. Silva (2007) considera a mineração como uma das atividades econômicas mais impactantes sobre o ambiente. No caso da bacia do rio Gualaxo do Norte, a ausência de um planejamento sustentável com uso adequado nos recursos naturais por parte das mineradoras, poder público e sociedade civil, resultou o rompimento da barragem de Fundão, comprometendo toda a bacia hidrográfica do rio Doce, gerando inúmeros impactos negativos significativos, tais como degradação visual da paisagem, do ar, do solo e da água.

É irrefutável o papel da atividade minerária da bacia do Gualaxo do Norte e em todo estado de Minas Gerais. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (2016), aproximadamente 4,5% do PIB mineiro e 80% do município de Mariana, que compreende grande parte da bacia do rio Gualaxo do Norte, são derivados da indústria extrativa mineral, sem considerar petróleo e gás (IBGE, 2010). Entretanto, a mineração apenas pode ser considerada sustentável se minimizar os seus impactos ambientais e mantiver certos níveis de proteção ecológica e de padrões de qualidade ambientais, além de garantir o bem-estar socioeconômico no presente (ENRÍQUEZ, et al. 2011).

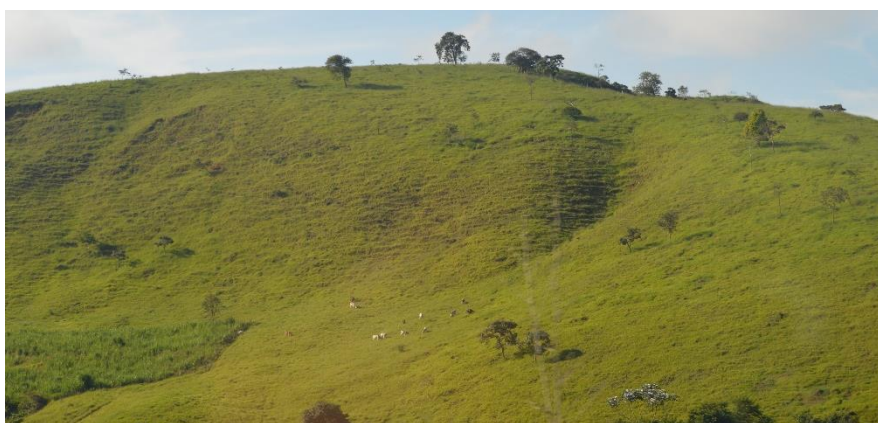
É perceptível que alguns corpos d'água estão dentro de áreas de mineração, esse tipo de evento é comum, pois no interior de várias minas formam uma espécie de lago, onde a água fica retida. Comparando as áreas de 2008 e 2015, houve um pequeno acréscimo devido ao aumento da atividade minerária local, aumentando também a quantidade de água nas cavas. No ano de 2018, existiu grande aumento na área da mesma classe, o qual é explicado pela base utilizada para o mapeamento. No mapeamento de 2018, foi utilizada uma imagem Sentinel-2 que conta com uma resolução espacial de 10 metros. Assim, a calha do rio Gualaxo do Norte foi identificada, diferente dos outros anos que tiveram imagens de 30 metros (Landsat 5 e 8) e assumiram as classes referentes à borda do canal.

A silvicultura, no intervalo temporal estudado, sofreu um aumento gradual, saindo de 2,10%, em 2008, para 2,56%, em 2018. Contudo, é um importante produto da economia regional. Em contrapartida, as áreas de solo exposto, no intervalo estudado, sofreram aumento de mais de 300%. A classe que representava 4,57 hectares, em 2008, chegou a 14,2 hectares, em 2018. Tais áreas são mais suscetíveis a pressões antrópicas necessitando de monitoramento e da adoção de práticas adequadas de manejo e conservação de solos. Assim, é possível evitar o carreamento de sedimentos para os cursos d'água e a formação de sulcos erosivos.

As áreas de solo exposto estão espacialmente localizadas nas proximidades das regiões de formação campestre, que são áreas com forte presença de pastagem, a qual aumenta a pressão sobre o solo. A formação campestre ocupa grande parte do baixo curso da bacia e é uma classe importante no quesito processos erosivos, por se tratar de uma classe que compreende as vegetações arbustivas e herbáceas, incluindo as pastagens (Figura 7).

As áreas de pastagem são regiões que sofrem com o pisoteio do gado e, quando estão posicionadas em relevo mais movimentado, atuam como aceleradores dos processos erosivos.

Figura 7 - Pastagem no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte



Fonte: Adriana Monteiro

A classe de área urbana sofreu um pequeno aumento do ano de 2008 para 2015. Em 2018, ocorreu um decréscimo de aproximadamente 20% da área da classe. A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte não é historicamente marcada pela presença de grandes áreas urbanas, mas por pequenos distritos influenciados pela mineração, silvicultura ou a pecuária. O decréscimo dessas áreas é explicado pelo rompimento da barragem de rejeitos minerais de Fundão, que liberou um volume estimado de 34 milhões de m³ de rejeitos de mineração, água e materiais utilizados em sua construção, na bacia do rio Doce. Bento Rodrigues, subdistrito do distrito de Santa Rita Durão, município de Mariana, situado a pouco mais de 5 km da barragem de Fundão e 35 km da sede de Mariana, foi praticamente todo soterrado pela avalanche de água, lama e detritos produzidos com o rompimento da barragem. No subdistrito viviam cerca de 600 habitantes. O IBAMA estima que 207 dos 251 imóveis tenham sido destruídos naquela localidade (ANA, 2016).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da OBIA em imagens de satélite com resolução espacial média, permitiu obter resultados satisfatórios. Entretanto, é importante destacar que algumas classes apresentaram muita confusão na classificação e forçaram a vetorização das feições.

A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG apresenta padrões de organização de uso e cobertura da terra. A bacia, mesmo passando por episódios catastróficos, como o rompimento da barragem de fundão, ainda conserva uma tendência de uso, ora demarcada pela característica ambiental, como nos casos das cabeceiras de drenagem, com a presença dos afloramentos rochosos que vão favorecer a atividade minerária, ora demarcada por característica histórica de ocupação, como as pastagens do baixo curso.

Portanto, o diagnóstico apresentado nesse trabalho pode atuar como subsídio nas tomadas de decisão na bacia. Tais resultados podem contribuir nas discussões de medidas de intervenção, de recuperação de áreas degradadas, de conservação e na identificação de áreas prioritárias para ações.

REFERÊNCIAS

- ANA – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Encarte especial sobre a bacia do rio Doce rompimento da barragem em mariana mg.** Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. 2016. 50p.
- BACELLAR, Luiz de A. P. **O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas.** Geo.br. Ouro Preto, n.º.1, pp. 1-39. 2005.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** 2012a. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: Acesso em: 25/01/2020.
- CAI, S.; LIU, D. A comparison of object-based and contextual pixel-based classifications using high and medium spatial resolution images. **Remote Sensing.** Lett. 2013, 4, 998–1007.
- CARMO. V. **A contribuição da Etnopedologia para o planejamento das terras: estudo de caso de uma comunidade de agricultores do entorno do Parque Nacional do Caparaó.** 2009. 197p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- COELHO. A. L. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-baixo Rio Doce / ES.** 2007. 227p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.
- DORREN, L.K.A.; MAIER, B.; SEIJMONSBERGEN, A.C. Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. **Forest Ecology Management.** 2003, 183, 31–46.
- ECOGNITION DEVELOPER TRIAL 8.0. TRIMBLE 1995-2011. **Software.** Disponível em: <<http://www.ecognition.com/>>.
- EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço nacional de levantamento e conservação de solos.** Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos/Embrapa-SNLCS. Micelânea, 1, 1979. 83 p.
- ENRÍQUEZ, M. A. R.; FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. C. J. A mineração das grandes minas e as dimensões da sustentabilidade. IN: FERNANDES, F. R. C.; ENRÍQUEZ, M. A. R.; ALAMINO, R. C. J. (orgs). **Recursos naturais e sustentabilidade natural.** Grande Minas. v.1. Rio de Janeiro. 2011.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). (2014). **ArcGIS Release 10.3.** Redlands, CA.

FLANDERS, D.; HALL-BEYER, M.; PEREVERZOFF, J. Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Can. J. Remote Sensing*. 2003, 29, 441–452.

GILBERTSON, J.K.; KEMP, J.; VAN NIEKERK, A. Effect of pan-sharpening multi-temporal Landsat 8 imagery for crop type differentiation using different classification techniques. *Computers Electronics in Agriculture*. 2017, 134, 151–159.

GOOGLE EARTH PRO, 2017. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 20 Jan 2018.

HORA, A. M. Da exploração econômica da bacia hidrográfica do rio doce ao processo de degradação de seus recursos naturais. *Território, mobilidade populacional e ambiente*. 2012. 201-234.

HUSSAIN, M.; CHEN, D.; CHENG, A.; WEI, H.; STANLEY, D. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*. 2013, 80, 91–106.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bases Cartográficas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html> Acesso em 03/03/2018.

IBGE. Minas Gerais - **Mariana**. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística: Brasília, 2010. Disponível em: Acesso em 28 de janeiro de 2019.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Panorama da Mineração em Minas Gerais**. Instituto Brasileiro de Mineração, Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro de Metais – Brasília: IBRAM, 2015. 280 f.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos Minas Gerais**. 2010. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/mapoteca/upgrhs-minas-gerais.pdf> Acesso em: 03/03/2018.

JAXA/METI. **ALOS PALSAR WBI**, 2010. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu>>. Acesso em 20 jun 2018.

LACAZ, F. A. C. PORTO, M. F. S. PINHEIRO, T. M. M. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeito de Fundão/Samarco. *Revista Brasileira de Saude Ocupacional*. 2017; 42:e9.

LI, M.; ZANG, S.Y.; ZHANG, B.; LI, S.S.; WU, C.S. A review of remote sensing image classification techniques: The role of spatio-contextual information. *European Journal Remote Sensing*. 2014, 47, 389–411.

LINHARES, Cláudia de Albuquerque; SOARES, João Viane; BATISTA, Getúlio Teixeira. **Influência do Desmatamento na dinâmica da resposta hidrológica da bacia do Ji-Paraná.** Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia (GO). Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, INPE, p.3097-3105.

MOSKAL, L.M.; STYERS, D.M.; HALABISKY, M. Monitoring urban tree cover using object-based image analysis and public domain remotely sensed data. **Remote Sensing**. 2011, 3, 2243–2262.

PEÑA, J.M.; GUTIÉRREZ, P.A.; HERVÁS-MARTÍNEZ, C.; SIX, J.; PLANT, R.E.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Object-based image classification of summer crops with machine learning methods. **Remote Sensing**. 2014, 6, 5019–5041.

PHIRI, D. MORGENROTH, J. Developments in Landsat land cover classification methods: a review. **Remote Sensing**. 2017, 9, 967.

QGIS Development Team. **QGIS User Guide**, Release 2.18: QGIS Project, 2016.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia. Ed. UFU, 200. 248p.

SILVA, João Paulo Souza. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**. [online]. 2007, vol.1, n.8. ISSN 1981-318X.

SAADI, A.; CAMPOS, J. C. F. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015-Mariana-MG). **Revista Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, p. 63-103, 2015.

SAMAL, D. R.; GEDAM, S.S. Monitoring land use changes associated with urbanization: An object based image analysis approach. **European Journal Remote Sensing**. 2015, 48, 85–99.

SANTOS, J, P. et al. Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte – MG. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, MG. v.18 n.63. set. 2017.

VIANA, J. H. M. COSTA, A. M. Desastre de Mariana e dos solos da Bacia do Rio Doce. **Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** - vol.42, n. 1 (jan./abr. 2016). Viçosa: SBCS. 2016.

CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO GUALAXO DO NORTE: IMPLICAÇÕES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – MG

RESUMO

A aceleração da geração de processos erosivos e os danos causados pelos mesmos nas últimas décadas transformou a erosão num problema ambiental e social. A bacia hidrográfica do rio Doce é um importante exemplo de região que sofre com os impactos causados pela erosão. Este trabalho apresentou como recorte espacial a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, sub-bacia do rio Doce caracterizada historicamente por atividades minerárias, agropecuárias e que sofreu sério impactos com o rompimento da barragem Fundão-MG em novembro 2015. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência à erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte após o rompimento da barragem de Fundão. Para tal, foram utilizadas as variáveis: solos, textura do rejeito da barragem de Fundão, litologia, estruturas geológicas, declividade e comprimento de rampa. As variáveis foram ponderadas de acordo com suas características físicas e em seguida inseridas à álgebra de mapas. Foram identificadas cinco classes de resistência à erosão na bacia do rio Gualaxo do Norte que variaram de muito baixa a muito alta. A classe de maior abrangência na bacia foi a classe média correspondendo a aproximadamente 55% da área total, seguida pela classe alta que representou aproximadamente 34% da bacia. As classes muito baixa (1,27%) e baixa (8,39%) aparecem no alto curso da bacia e a classe muito alta está localizada em áreas pontuais da bacia, como nas proximidades das linhas de interflúvio. A textura do rejeito resultante do rompimento da barragem de fundão alterou a resistência à erosão em áreas de planícies de inundação e terraços fluviais deixando-as mais susceptíveis os processos erosivos. O uso de técnicas e práticas que visam conservar e recuperar as áreas frágeis tornam-se primordiais para a recuperação da bacia e o desenvolvimento local. Assim, os resultados deste trabalho podem auxiliar na identificação de áreas prioritárias para recuperação e tomadas de decisão de cunho ambiental.

Palavras-chave: álgebra de mapas, variáveis ambientais, barragem de Fundão.

CHAPTER 2 - ASSESSMENT OF EROSION RESISTANCE IN THE RIVER BASIN OF GUALAXO DO NORTE: IMPLICATIONS OF THE FUNDÃO MINING DAM RUPTURE

ABSTRACT

The acceleration in generation of erosive processes and damages caused by them in the past decades has transformed erosion into an environmental and social problem. The Rio Doce basin is an important example in the region that deals with impacts coming from erosion. This paper focuses on the Gualaxo do Norte river basin, sub basin of Rio Doce, characterized historically by its mining and farming activities and that has suffered pronounced impacts with the Fundão mining Dam rupture in November 2015. The aim of this paper is to assess erosion resistance in the Gualaxo do Norte river basin after the dam rupture. With this objective the selected variables were: soils, Fundão mining tailings texture, lithology, geological structures, declivity and ramp length. The variables were weighted according to their physical characteristics and considered in map algebra. Five classes of erosion resistance were identified in the Gualaxo do Norte river basin that range from very low to very high. The largest reaching class in the basin is the medium resistance class that represents approximately 55% in total area, followed by the high resistance class amounting roughly to 34% of the basin. The very low resistance (1,27%) and low resistance (8,39%) classes occur in the upper course of the basin and the very high resistance class occurs in isolated points in the basin, for example near the interfluves. The Fundão mining tailings texture has altered the erosion resistance in floodplain and fluvial terrace areas, making them more susceptible to erosive processes. The use of techniques and practices that aim to maintain and preserve fragile areas are essential to allow the recovery of the basin and local development. In this sense, this paper's results can assist in identifying key priority areas for recovery and environmental decision making.

Keywords: map algebra, environmental variables, Fundão dam

1 INTRODUÇÃO

A erosão é constituída por um grupo de processos naturais de desagregação, decomposição e remoção de solos ou rochas, que leva à suavização da superfície terrestre (SILVA, 1995). Entretanto, nas últimas décadas a aceleração dos processos erosivos e os danos causados pelos mesmos transformaram a erosão num problema ambiental e social.

Essa desagregação, quando induzida pelo homem, é muito mais rápida que a natural, removendo em pouco tempo grandes quantidades de solo, que naturalmente levariam centenas de anos para serem removidas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). Almeida Filho e Ridente Júnior (2001) apontam que as erosões são um grave problema no país, tanto em áreas agricultáveis como em áreas urbanizadas.

A bacia hidrográfica do rio Doce é um importante exemplo de região que sofre com os impactos gerados pela erosão. Tais impactos são produtos da erosão natural e erosão antrópica, aceleradas pelo processo histórico de ocupação local.

Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos científicos de investigação que permitam o acúmulo de conhecimento, acerca dos processos que ocorrem na natureza e, em que grau e escala, as ações humanas podem exercer influência sobre os processos naturais, são de suma importância e utilidade na promoção de ações que visem diminuir os danos causados ao meio ambiente, auxiliando na busca por formas de exploração sustentáveis dos recursos naturais (D'AGOSTINI, 1999).

Este trabalho tem como recorte espacial a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, por sua importância ambiental e econômica. É uma região caracterizada historicamente por atividades minerárias e agropecuárias, que são atividades geradoras de impactos cumulativos e sinérgicos de grande amplitude como: desmatamentos; processos erosivos acelerados (voçorocas e ravinas); contaminação de corpos d'água; degradação do solo, da fauna e flora; geração de rejeitos, dentre outros (Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH Doce, 2010). Além disso, é a bacia hidrográfica, onde estava localizada a barragem de rejeitos de mineração de Fundão, que se rompeu em novembro de 2015, resultando no espalhamento de milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, no meio ambiente, configurando uma das maiores tragédias ambientais do mundo.

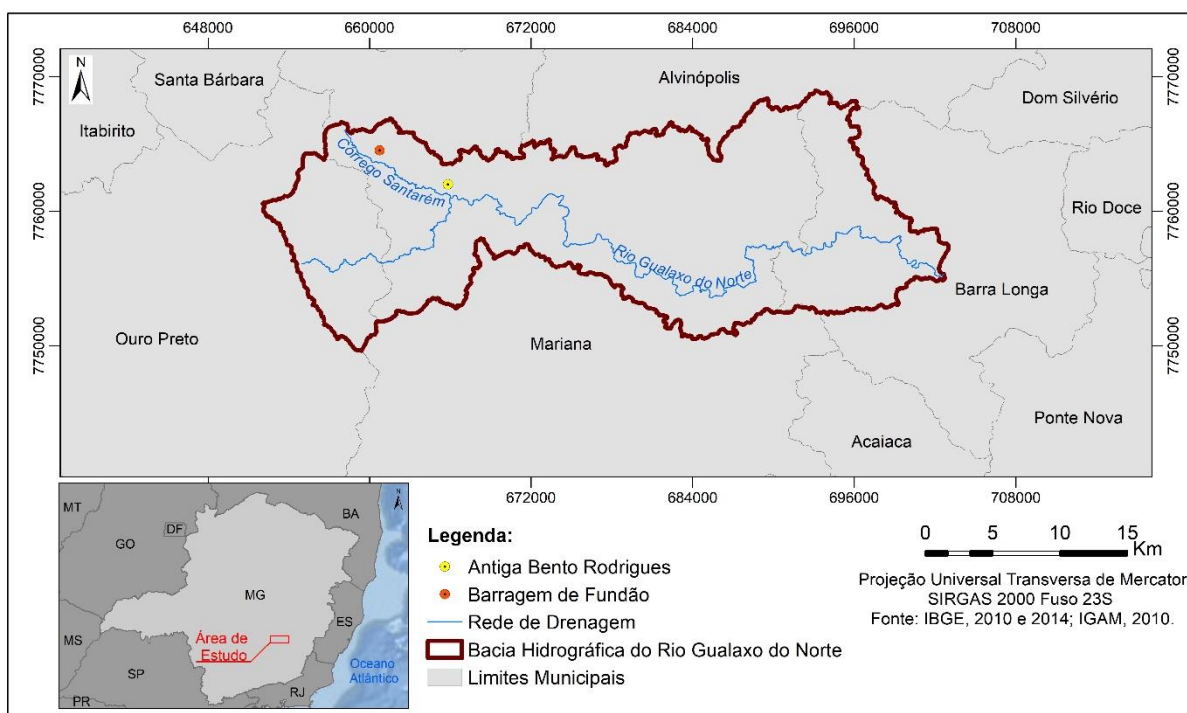
Assim, o objetivo deste trabalho foi identificar e analisar classes de resistência à erosão, na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área

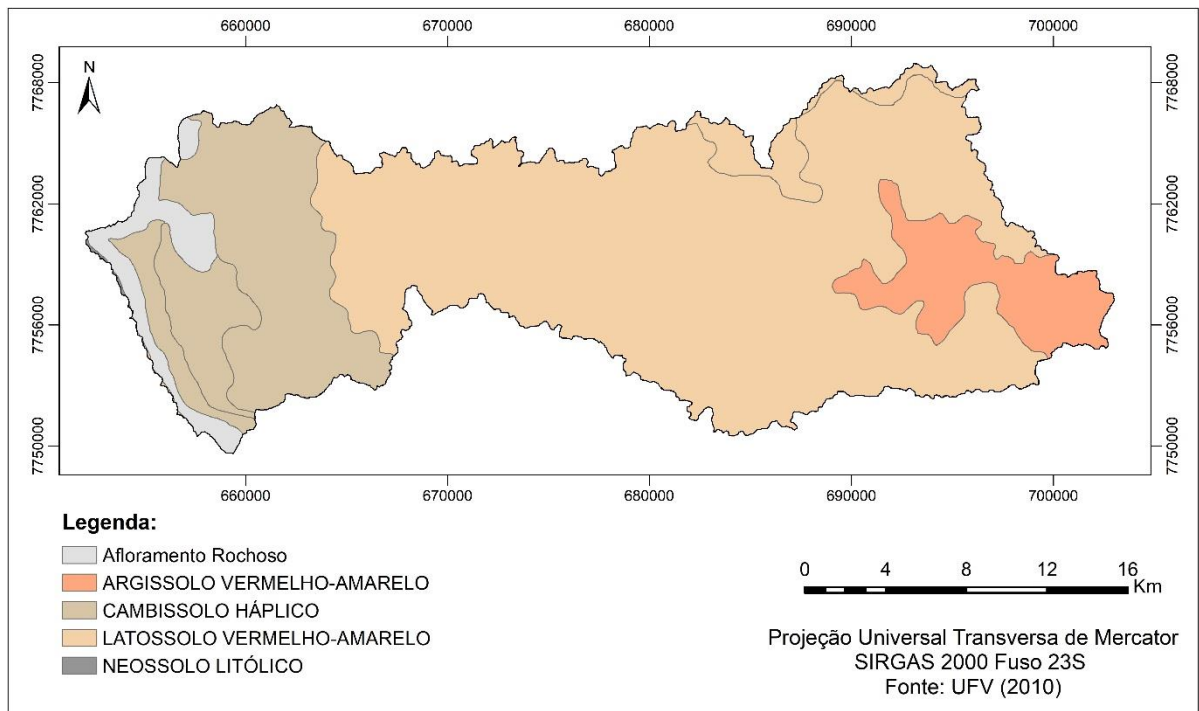
A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte está localizada na região central do estado de Minas Gerais. Em sua extensão, a bacia engloba parte dos municípios de Ouro Preto (78 km²), Mariana (375 km²) e Barra Longa (107 km²), somando uma área de aproximadamente 560 km² (IBGE, 2006) (Figura 8). O rio Gualaxo do Norte tem aproximadamente 87 km de extensão, deságua no rio do Carmo, afluente do rio Doce, pertencendo à Unidade de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos DO1 - Rio Piranga (IGAM, 2010).

Figura 8 - Localização da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.



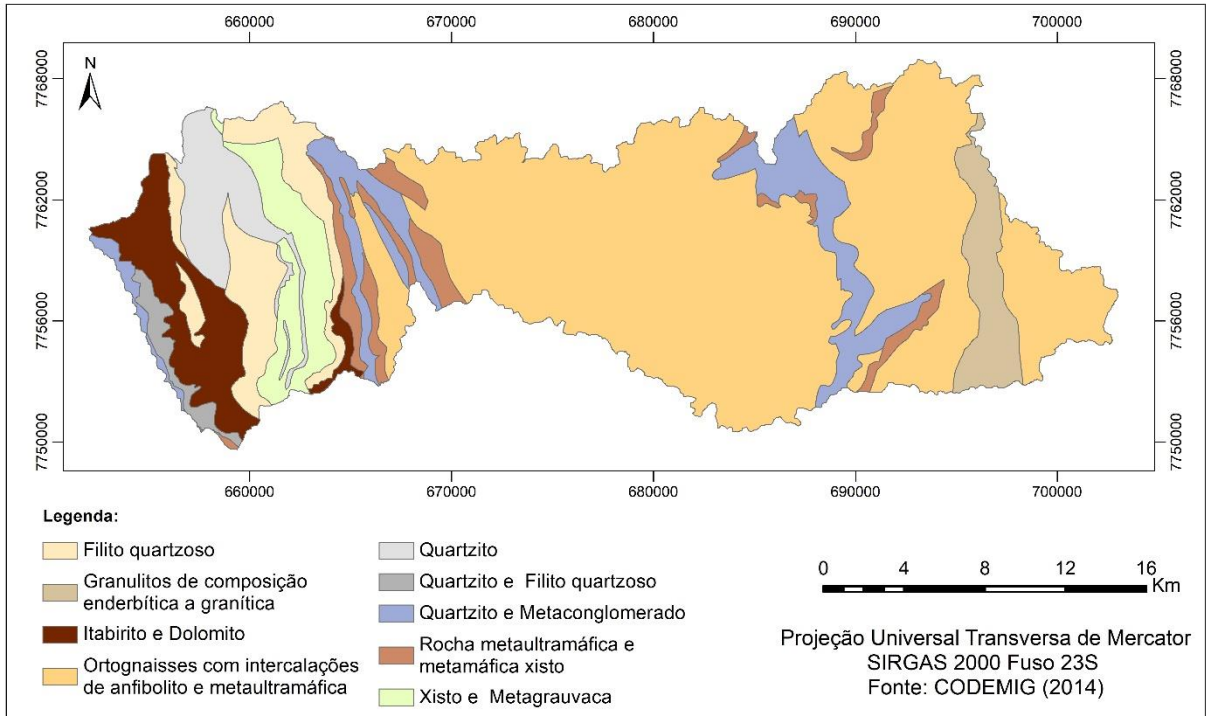
A montante, a microbacia é caracterizada pela presença de Cambissolos Háplicos Tb Distróficos e Distroférricos, que apresentam argila de baixa atividade, sendo o segundo com alto teor de ferro. A classe dos Argissolos Vermelhos Eutróficos é identificada no baixo curso da bacia, áreas com relevo ondulado a suave ondulado. Essa classe apresenta um horizonte B textural sob um horizonte A ou E, o que afeta a infiltração de água. A terceira classe de solos é a mais representativa da bacia. São os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, que são solos bem drenados, profundos e de baixa fertilidade natural. Há ainda a ocorrência de afloramentos rochosos à montante da bacia (EMBRAPA, 1979) (Figura 9).

Figura 9 - Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.



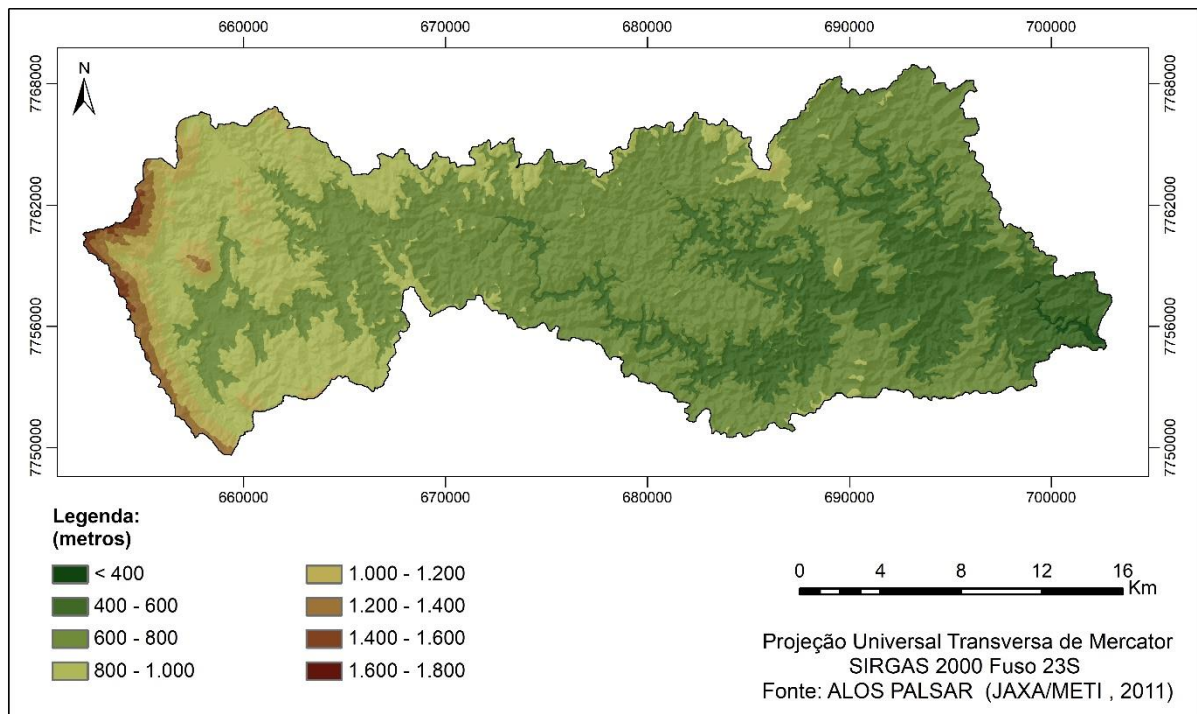
Quanto à litologia, a bacia abrange rochas do Supergrupo Minas (itabiritos, dolomitos e filitos) em seu alto curso, além de rochas do Supergrupo rio das Velhas (quartzitos e xistos) e do Complexo Santa Bárbara (gnaisses migmatíticos e granitos) no médio curso e rochas do Complexo Acaiaca (gnaisses, quartzitos e migmatitos) e do Complexo Mantiqueira (gnaisses e pegmatitos) em seu baixo curso (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010) (Figura 10). São nas áreas pertencentes às rochas do Supergrupo Minas que se encontram diversas minas de minério de ferro e suas respectivas barragens de rejeitos. A barragem de Fundão se insere neste contexto, estando localizada mais precisamente no córrego Santarém, afluente do rio Gualaxo do Norte (SANTOS et al., 2017).

Figura 10 - Mapa litológico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.



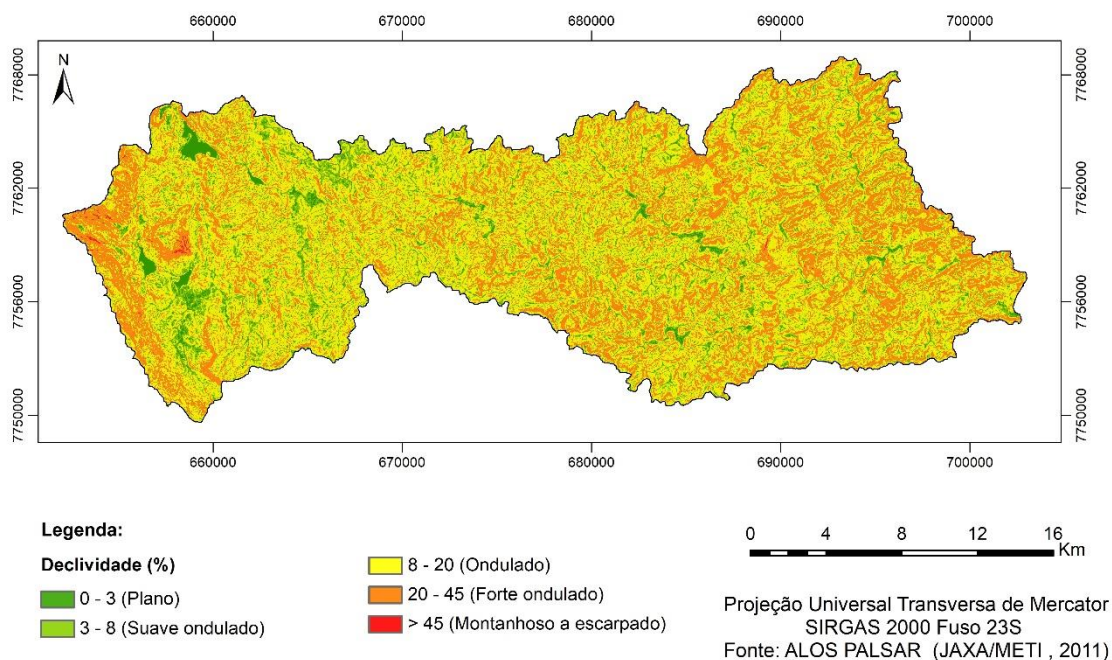
A hipsometria na bacia varia de 369 a 1.626 metros, uma variação altimétrica significativa. Entretanto, grande parte da bacia está concentrada entre 600 e 1.000 metros (Figura 11).

Figura 11 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG



Quanto à declividade, aproximadamente 55% da área pertence à classe de relevo ondulado e 29 % à classe forte ondulado. As áreas mais planas da bacia estão localizadas próximas aos cursos d'água, lagos e lagoas e, as regiões mais declivosas ocupam predominantemente as cabeceiras de drenagem (Figura 12).

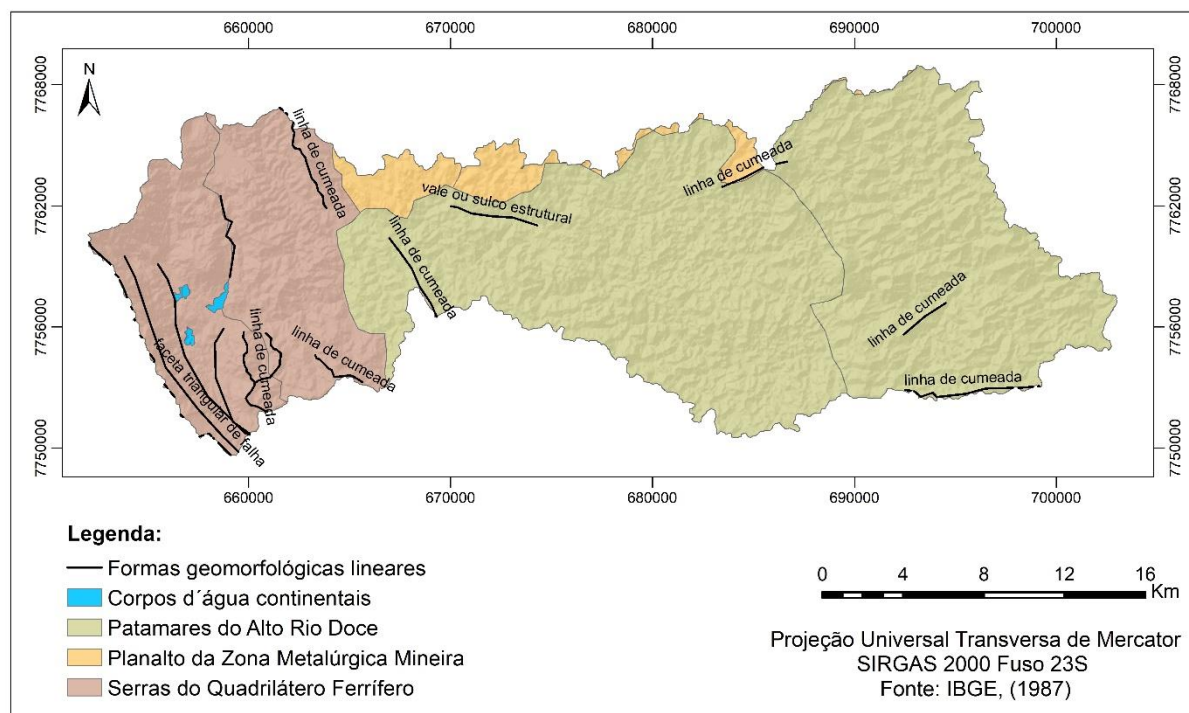
Figura 12 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.



A geomorfologia da bacia conta com quatro unidades morfopedológicas, segundo Saadi e Campos (2015), sendo elas: as escarpas do Caraça, apresentando escarpas rochosas elevadas e subverticais; os morros de Mariana, com morros e colinas com altura inferior a 200 metros, cristas esparsas e vales encaixados; as colinas do alto Piracicaba, com colinas convexas e com altura inferior a 200 metros, cristas esparsas e vales encaixados; e o baixo rio do Carmo, com morros convexas e com altura superior a 200 metros e vales muito encaixados.

A Figura 13 apresenta a classificação geomorfológica segundo o IBGE (1987). Esta classificação divide a bacia do rio Gualaxo do Norte em três grupos principais: as serras do Quadrilátero Ferrífero, o planalto da Zona Metalúrgica Mineira e os Patamares do Alto Rio Doce. Na unidade classificada como Serras do Quadrilátero Ferrífero estão localizados diversos empreendimentos de mineração de minério de ferro e suas respectivas barragens de rejeito. As facetas triangulares de falha, apresentadas linearmente, fazem referência às áreas com formas de relevo triangulares de forte declive, resultantes do processo de erosão de uma escarpa de falha.

Figura 13 - Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG.



2.2 Materiais e bases de dados

Os materiais utilizados na realização do trabalho foram:

- Mapa de solos do estado de Minas Gerais, com escala de 1:650.000 (UFV et al., 2010);
- Contorno da área diretamente afetada pela lama, no rompimento da barragem de Fundão – MG (Embrapa, 2016);
- Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos Palsar, com resolução de 12,5 metros (Jaxa / Meti, 2010);
- Mapa Geológico do estado de Minas Gerais, com escala de 1:1.000.000 (Codemig, 2014);
- Mapa Estruturas Geológicas do estado de Minas Gerais, com escala de 1:1.000.000 (CODEMIG, 2014);
- Mapa de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, do ano de 2018 (Carvalho, 2019);
- Software QGIS – versão 2.18.13 (QGIS Development Team, 2017);
- Software Google Earth Pro ® 7.1.8.3036 (32-bit), 2017;
- Software ArcGIS – versão 10.13;
- GPS (Garmin 60 CSx).

2.3 Ponderações das variáveis

Inicialmente, por pesquisa bibliográfica, foram selecionadas variáveis que se relacionavam com resistência de processos erosivos. Posteriormente, as variáveis identificadas foram agrupadas de acordo com a suas características.

Seis variáveis foram selecionadas, sendo elas: declividade, comprimento de rampa, solos, o rejeito da mineração de minério de ferro na área diretamente afetada pelo rompimento da barragem de Fundão, litologia e estruturas geológicas.

A declividade e o comprimento de rampa foram agrupados para descrever a influência do relevo; as classes de solo e o rejeito fizeram referência aos solos e, a litologia e as estruturas geológicas foram utilizadas para caracterizar a influência da geologia. Em seguida, cada variável foi analisada e reclassificada para avaliar a resistência à erosão da bacia.

Para o cálculo da declividade, foi utilizado o MDE com resolução espacial de 12,5 metros. A declividade foi gerada em porcentagem e classificada em intervalos, de acordo com a classificação da Embrapa (1979), e ponderada de acordo com Costa et al. (2017). Logo, os intervalos mais resistentes aos processos erosivos receberam maiores pesos (Tabela 08).

Tabela 8 - Ponderação das classes de declividade da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Classe de declividade (%)	Peso
0 – 3	5
3 – 8	4
8 – 20	3
20 – 45	2
>45	1

Para o cálculo do comprimento de rampa também foi utilizado o MDE com resolução espacial de 12,5 metros. Para tal, a partir da variação de altitude, foi transformada em orientação da vertente, que é definida como o ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente, variando de 0° a 360, nas seguintes orientações: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste. Utilizou-se a ferramenta *aspect* do *ArcMap*.

O mapa de orientação de vertentes foi dividido em oito classes de 45°, em seguida, foi reclassificado em valores inteiros, variando de 1 a 8, e transformados em arquivo vetor. A ferramenta: *estatísticas por zonas* do software *QGIS* possibilitou o cruzamento de informações

dos dados de altimetria e declividade, com os polígonos gerados a partir dos dados de orientação de vertentes. Para o cálculo da distância horizontal (dH) foi utilizada a seguinte fórmula:

$$D = (dh/dH) * 100$$

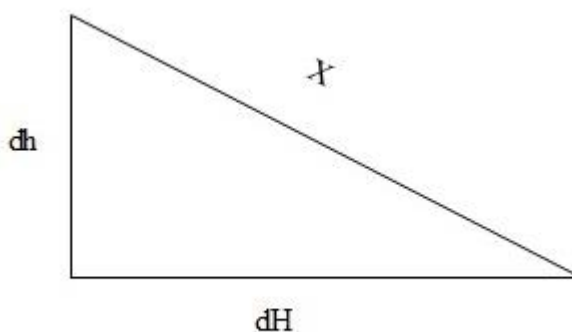
Onde: D é a Declividade (%),

dh é a variação de altura (metros),

dH é a distância horizontal (metros).

Para o cálculo do comprimento de rampa (X) seguiu-se a lógica da Figura 14 e a seguinte fórmula:

Figura 14 - Esquema representativo de uma rampa



$$X^2 = dh^2 + dH^2$$

Onde: X é o comprimento da rampa (metros),

dh é a variação de altura (metros),

dH é a distância horizontal (metros).

Posteriormente, os intervalos com tamanho das rampas e seus respectivos pesos foram atribuídos. Rampas maiores contribuem para maior aceleração dos processos erosivos, assim, receberam pesos menores (Tabela 9). Ressalta-se que os intervalos foram criados de acordo com os dados da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, para aplicação em outras bacias os intervalos precisaram ser ajustados.

Tabela 9 - Ponderação dos intervalos de comprimento de rampa da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Intervalo de comprimento de rampa (m)	Peso
0 - 200	5
200 - 400	4
400 - 600	3

600 – 800	2
>1000	1

A variável Solos foi avaliada utilizando-se o mapa de solos do estado de Minas Gerais. A ponderação foi realizada pela análise do primeiro nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018), em relação à resistência aos processos erosivos, conforme Costa et al. (2017) (Tabela 10).

Tabela 10 - Ponderação das classes de solo da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Classes de solo	Peso
Afloramento Rochoso	5
Argissolos	4
Cambissolo	2,5
Neossolo	1,5
Latossolo	4

Fonte: Costa et al. (2017)

A ponderação da área, diretamente afetada pelo rejeito, foi realizada pelo exame dos resultados de análise granulométrica de pontos coletados em campo. Os pontos de análise foram obtidos através de relatório do Programa de Caracterização Geoquímica de Rejeitos, Solos e Sedimentos (RENOVA, 2017). Foram utilizados dados de 92 amostras, sendo que as mesmas foram separadas por local de coleta. As amostras foram separadas em: barragem de Santarém, calha, barragem de Fundão, planície de inundação, Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Encosta.

Em seguida, foram feitos gráficos de representação de cada local, onde a granulometria de cada amostra foi separada em argila, silte e areia. As classes granulométricas foram analisadas e classificadas de acordo com o triângulo textural simplificado, utilizado pela Embrapa (2006), para a classificação de textura no solo. Posteriormente, foram atribuídos os pesos de resistência à erosão com base na textura, conforme Costa et al. (2017) (Tabela 11).

Tabela 11 - Notas atribuídas à textura para a resistência à erosão.

Textura	Nota
Arenosa	1
Siltosa	2
Muito argilosa com argila 2:1	2
Argilosa com argila 2:1	2
Média com argila 2:1	2
Média com argila 1:1	4
Muito argilosa com argila 1:1	4

Argilosa com argila 1:1

5

Fonte: Costa et. al. (2017)

Como os dados de granulometria são coletados pontualmente, foi delimitada a área de influência de cada ponto de amostragem, com a aplicação do método do polígono de Thiessen (THIESSEN, 1911) (Anexo D).

Desse modo, os polígonos gerados foram agrupados pelo local de amostragem e receberam os pesos indicados na Tabela 12. Por fim, a área diretamente afetada pelo rejeito foi incorporada à variável solos.

Tabela 12 - Pesos atribuídos à textura para a resistência à erosão por local de amostragem.

Local de amostragem	Peso
Barragem de Fundão	1
Barragem de Santarém	4
Bento Rodrigues	4
Calha	1
Encosta	4
Gesteira	4
Paracatu de Baixo	4
Planície de Inundação	1

Para a variável Geologia, foi utilizado o mapa geológico de Minas Gerais e, analisados os litotipos locais para a ponderação dos pesos, conforme Costa et al. (2017). Assim, litotipos mais resistentes aos processos erosivos receberam pesos maiores (Tabela 13).

Tabela 13 - Ponderação dos litotipos da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.

Litotipo	Peso
Filito Quartzoso	2,4
Granulitos de composição enberbítica a granítica	2,9
Itabirito e Dolomito	1,3
Ortognaisses com intercalações de anfibolitos e metaultramáfica	2,6
Quartzito	5
Quartzito e Filito quartzoso	3,7
Rocha metaultramáfica e metamáfica xisto	2,2
Xisto e Metagrauvaca	3,15

Adaptado de Costa et al. (2017)

Por último, para a variável “lineamentos geológicos” utilizou-se o mapa de estruturas geológicas de Minas Gerais. As zonas de falha e cisalhamento são áreas preferenciais do intemperismo das rochas e solo. Em geral, quanto menor a distância da estrutura tectônica,

maior a probabilidade da geração de material desagregado (POURGHASEMI et al., 2012; FOUMELIS et al., 2004). Neste estudo, apenas os lineamentos mais proeminentes foram considerados, devido à escala dos dados disponíveis.

Com isso, foi criado um mapa de densidade de estruturas geológicas e, a partir dele, os intervalos de densidade e os seus respectivos pesos. A densidade foi dividida em cinco classes de intervalos iguais.

2.4 Análise multicritério e álgebra de mapas

A etapa seguinte foi realizada em três passos principais: i) Obtenção de valores de ponderação para as os grupos de variáveis: relevo, solo e geologia; ii) Cálculo da álgebra de mapas; e iii) divisão das classes de resistência à erosão.

As variáveis foram divididas em três grupos principais: Solos (classes de solo e análise das áreas afetadas pelo rejeito), Geologia (litologia e distância de lineamento) e Relevo (declividade e comprimento de rampa). O polígono da área diretamente afetada pelo rejeito e seus respectivos pesos foram incorporados à base de dados de solos. Para o grupo de variáveis geologia e relevo, cada variável representou cinquenta por cento do peso do grupo, na expressão final.

Dentro desse contexto, para identificar qual dos três grupos de variáveis é mais significativo para avaliar a resistência à erosão, foi aplicada a Análise Hierárquica de Processos - AHP (SAATY, 1991). Os grupos de variáveis foram comparados par a par, em uma matriz, para determinação da sua relevância na avaliação da resistência a processos erosivos. Além disso, calculou-se o índice de consistência para os pesos atribuídos. De acordo com Saaty (1991), para obter-se a consistência de uma matriz positiva recíproca, seu autovalor máximo deveria ser igual a n (dimensão da matriz). No caso de uma matriz consistente, precisamos de $n-1$ comparações paritárias já que, a partir dessas, as outras podem ser deduzidas logicamente. Nesse sentido, os valores de ponderação obtidos foram 0,52 para o relevo; 0,33 para solos; e 0,14 para geologia. O índice de consistência de 0,04 (menor que 0,2) indica que não há necessidade de revisão dos julgamentos dos valores atribuídos na matriz (SAATY, 2005).

Já a álgebra de mapas foi realizada com a combinação ponderada dos mapas de cada variável, em relação à resistência dos critérios da erosão. A integração das variáveis foi realizada com base na seguinte expressão:

$$\text{Resistência à Erosão: } (\text{Relevo} \times 0,52) + (\text{Solos} \times 0,33) + (\text{Litologia} \times 0,14)$$

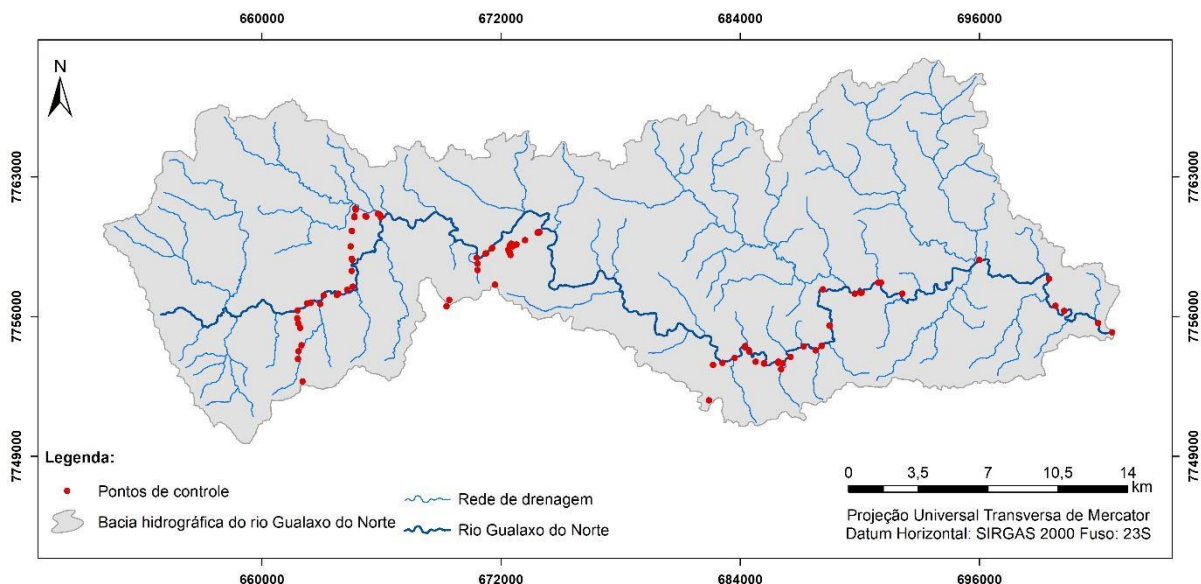
Após a aplicação da expressão, observou-se que o intervalo de abrangência da avaliação de resistência à erosão variou de 1,5 a 4,88 (adimensional). Deste modo, para a divisão das classes de resistência à erosão, o intervalo entre o valor mínimo (1,5) e o máximo (4,88) foi dividido em cinco classes de intervalos iguais (Tabela 14).

Tabela 14 - Classes da Avaliação da Resistência à Erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte

Intervalos	Resistência à erosão
1,5 – 2,18	Muito baixa
2,18 – 2,85	Baixa
2,85 – 3,53	Média
3,53 – 4,21	Alta
4,21 – 4,88	Muito alta

Com o mapa de resistência à erosão gerado, foram utilizados 108 pontos de controle coletados em campo, como validação (Figura 14). Por último, foi realizado o cruzamento entre o mapa de uso e a cobertura da terra 2018 e o de resistência à erosão, a fim de analisar os impactos e pressões sofridas por cada classe de resistência à erosão.

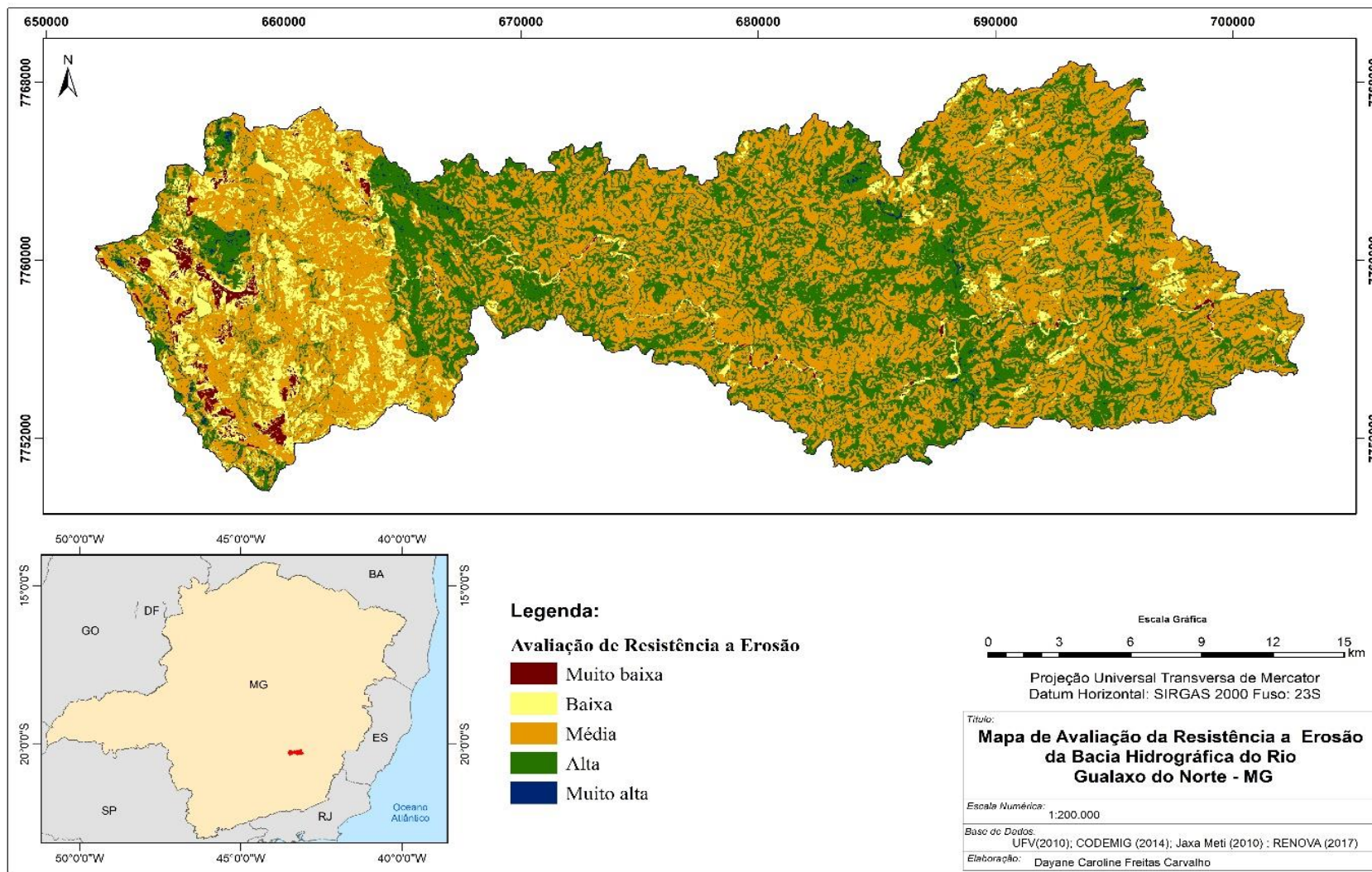
Figura 14 - Espacialização dos pontos de controle.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado da álgebra de mapas foi a representação espacial da resistência à erosão, da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte. A bacia apresentou cinco classes de resistência, variando em Muito Alta, Alta, Média, Baixa e Muito Baixa (Figura 15).

Figura 15 - Resistência à erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte.



A classe de maior abrangência na bacia é a classe Média, correspondendo a aproximadamente 55% da área total (Tabela 15), seguida pela classe Alta, que representa aproximadamente 34%. Ambas se encontram distribuídas por toda a bacia sem uma uniformidade aparente. A classe Muito Baixa representa 1,27% da área e está majoritariamente no alto curso da bacia. A classe Baixa (8,39%) ocupa o alto curso da bacia e, a classe Muito Alta está localizada em áreas pontuais na bacia, como nas proximidades das linhas de interflúvio e é a de menor representação na bacia.

Tabela 15 - Classes de resistência à erosão com cálculo de área e percentual.

Classe	Área (km ²)	Área (%)
Muito Baixa	7,12	1,27
Baixa	47,14	8,39
Média	311,37	55,43
Alta	192,70	34,31
Muito Alta	3,35	0,60
Total	561,68	100

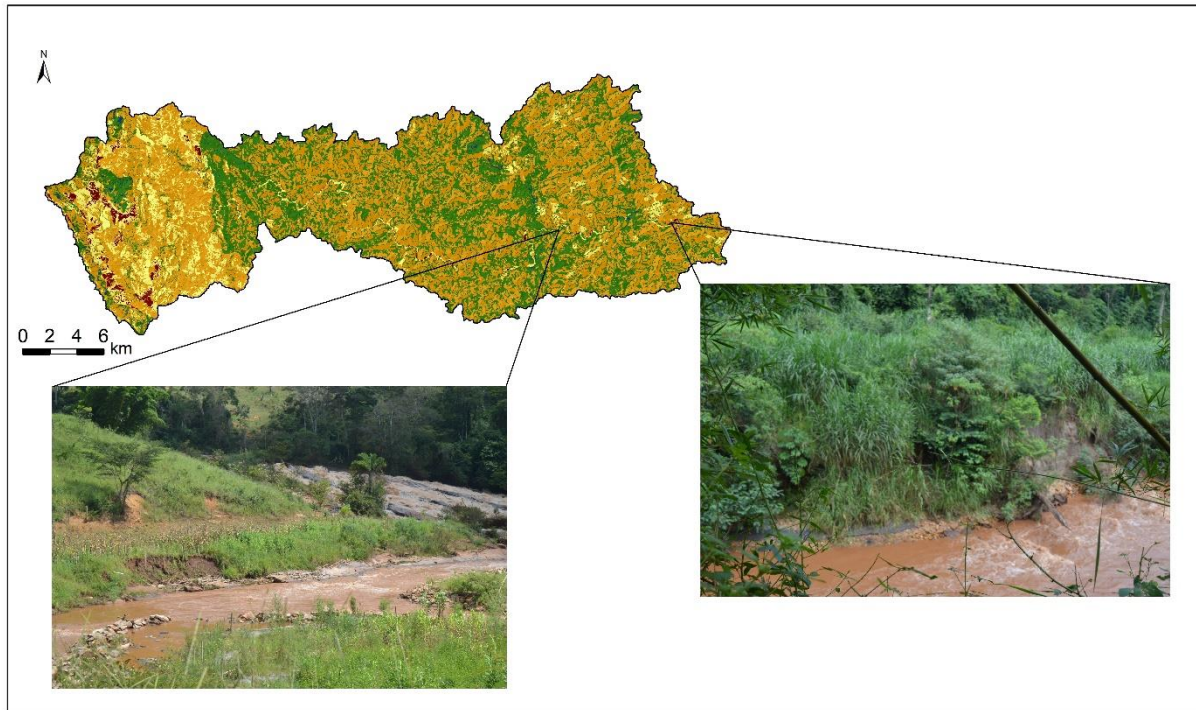
As áreas de Muito Baixa (Figura 16) resistência são influenciadas por declives acentuados, acima de 20% classificados como forte ondulado, montanhoso ou escarpado, e extensos comprimentos de rampa que podem ultrapassar 1.000 metros. Outra característica é a presença de solos pouco desenvolvidos, como os Cambissolos Háplicos, que são muito frágeis, rasos e altamente susceptíveis aos processos erosivos.

Além do mais, o rejeito resultante do rompimento da barragem de Fundão também aparece nessas áreas, principalmente nas proximidades da calha do rio. A litologia dessas áreas é composta por intercalações de Itabiritos e Dolomitos. Os Itabiritos são formações ferríferas metamórficas e fortemente oxidadas, apresentando descontinuamente corpos de minério de alto teor (> 64% Fe) (ESCHWEGE, 1833), enquanto os Dolomitos são rochas carbonáticas, com grande variação de composição e, por conseguinte, também é variada a sua resposta ao intemperismo e à erosão (CPRM, 2019). Quanto às estruturas geológicas, nas proximidades das quais são encontradas zonas de falha e cisalhamento, estas favorecem a concentração do escoamento, o intemperismo e a erosão.

Assim, o impacto da água do rio favorece a retirada de material das margens. Como o material apresenta uma textura arenosa, o mesmo é desagregado com facilidade. Nas margens do canal do rio Gualaxo do Norte, existem linhas de pedra para diminuir o impacto da força da água e diminuir a retirada de material, entretanto, em alguns trechos as contenções foram

carreadas rio abaixo. Nos trechos onde não existem as estruturas de contenção, pequenos movimentos de massa podem ser identificados.

Figura 16 - Regiões de Muito Baixa resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.



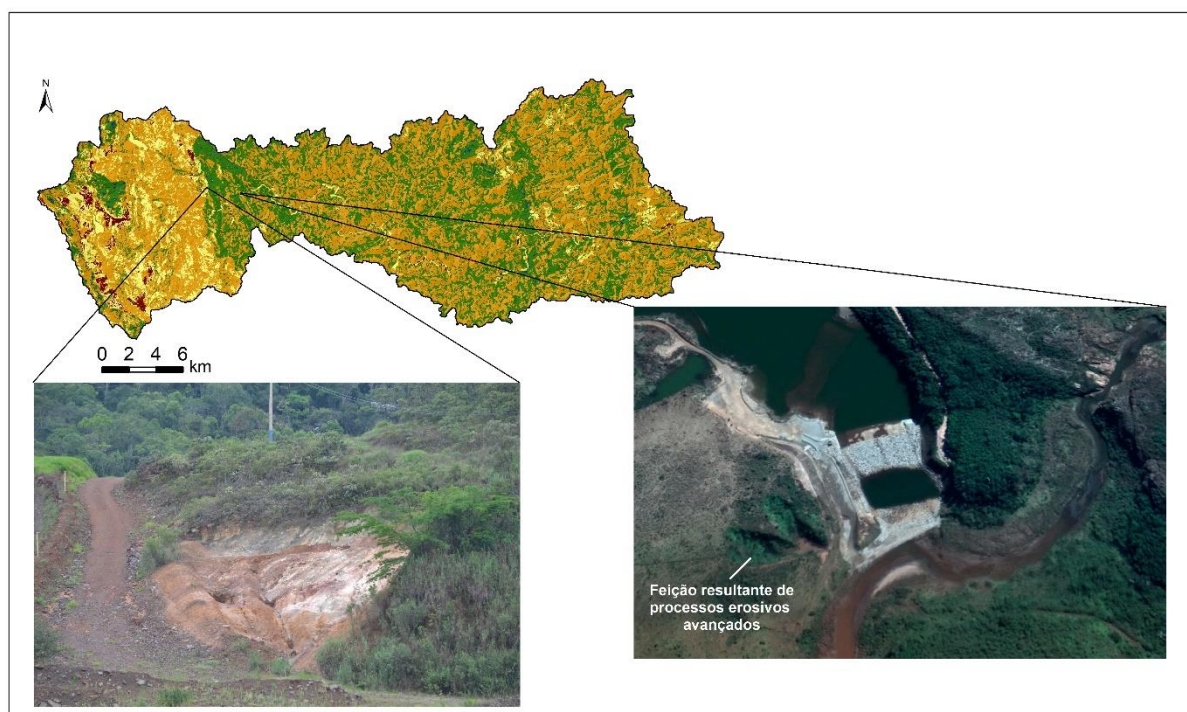
As áreas de Baixa resistência à erosão estão localizadas, majoritariamente, no alto curso da bacia e nas proximidades do canal do rio Gualaxo do Norte. Também são influenciadas por declives acentuados, mas com menores comprimentos de rampa. Os solos variam entre Cambissolos Háplicos e Latossolos Vermelho-Amarelos. A litologia é composta pelos Filitos quartzosos, rocha de granulometria fina, bastante susceptível a processos erosivos, e os Ortognaisses com intercalações de anfibolitos e metaultramáficas.

Já a Figura 17 ilustra regiões de Baixa resistência à erosão, com estágios avançados de erosão. A presença de ravinas e voçorocas exemplificam as condições futuras de algumas regiões da bacia, se a instalação de práticas de controle e conservação não forem aplicadas. As características naturais dessas áreas favorecem a produção e transporte de material. Deste modo, se o uso antrópico exercido sobre a área não acontecer de forma adequada, os processos serão intensificados.

Ainda na Figura 17, observa-se a presença de uma estrada ao lado da área ravina da. A água do escoamento superficial, a qual escoar pela vertente, é um agente que intensifica a desagregação e transporte do material. O impacto desse processo pode ser mitigado com a

adoção de práticas de manejo e conservação adequadas, como: o desvio do escoamento superficial, análise da capacidade de tráfego e monitoramento contínuo e revegetação da área desnuda, para proteger dos impactos do efeito *splash*, da gota da chuva.

Figura 17 - Regiões de Baixa resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte

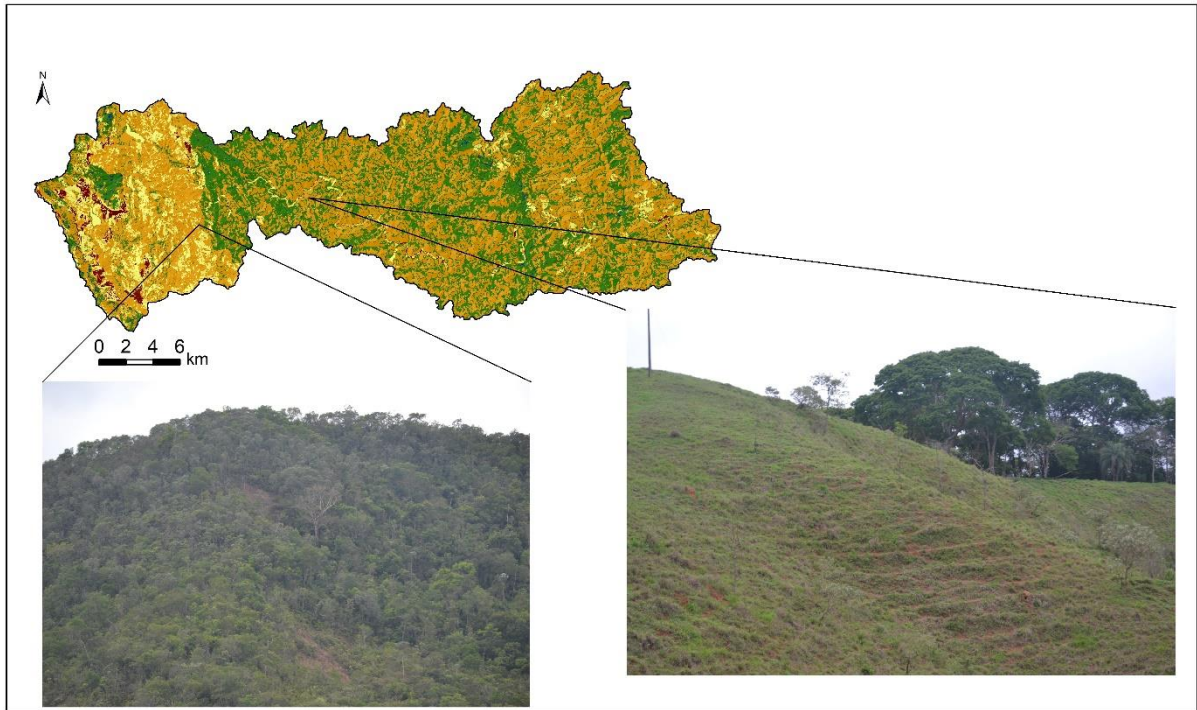


Nas áreas de média resistência, o relevo é caracterizado por declividade média de 8 a 20% e rampas de comprimento médio entre 400 e 800 metros. Como a classe está dispersa por toda bacia, pode-se encontrar Argissolos, Cambissolos e Latossolos. A Litologia é composta por Filitos quartzosos, Ortognaisses com intercalações de anfibolitos e Metaultramáficas e Xistos e Metagrauvaca. O Xisto é um nome genérico para rochas metamórficas com estruturas foliares (planos paralelos), e para uma avaliação mais detalhada do comportamento da mesma, na atuação dos processos erosivos, são necessárias informações de composição mineralógica.

Em relação às áreas de média resistência à erosão, elas podem ser produto de diversas combinações de características físicas e ambientais. Observa-se na Figura 18 que as áreas apresentam declividade e comprimento de rampas parecidos. Neste caso, o uso e cobertura do solo apresentam-se como fator determinante na identificação da resistência da vertente, aos processos erosivos. Enquanto a primeira figura é composta por formação florestal, com árvores em estágio sucessional avançado, que atuam como escudo protetor dos agentes erosivos,

principalmente, o agente pluvial, a vertente da segunda imagem é coberta por pastagem com marcas de erosão laminar, reflexo do uso de práticas inadequadas de conservação.

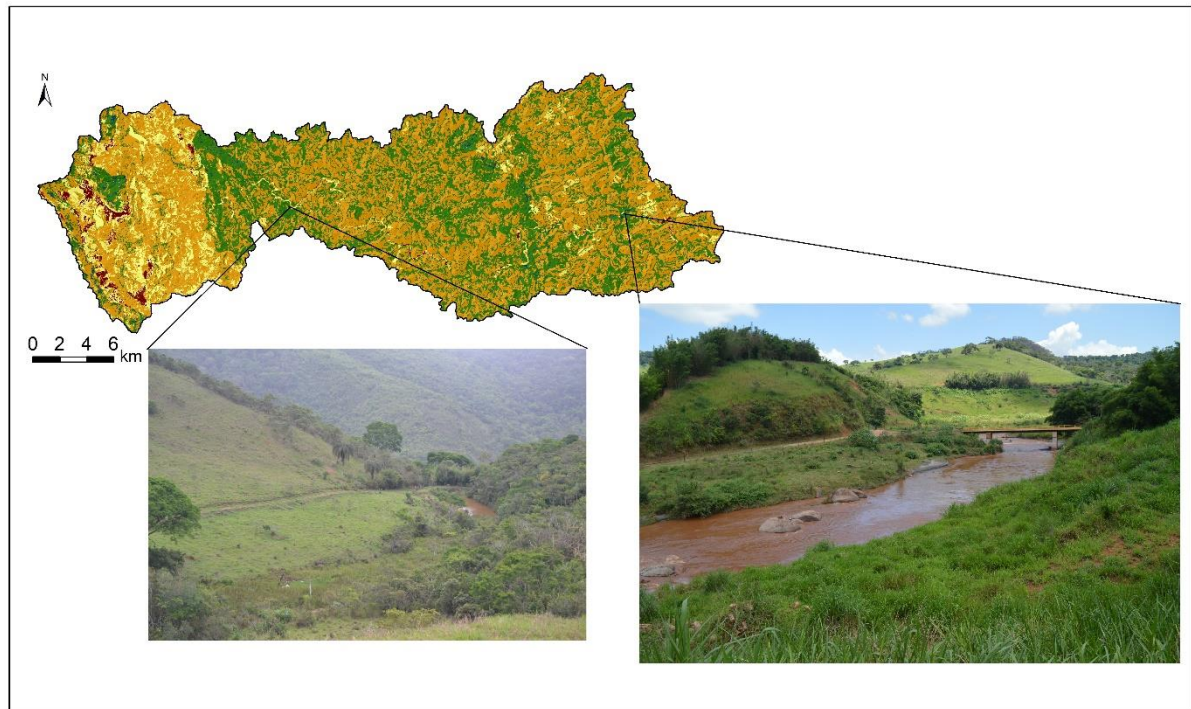
Figura 18 - Regiões de Média resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.



As áreas de Alta resistência representam 34,31% da área total da bacia e estão concentradas no médio e baixo curso da bacia. O relevo dessas regiões é caracterizado, de modo geral, como suave ondulado, com variação de declividade entre 8 e 20%. Os solos predominantes são os Latossolos e Argissolos, no médio e baixo curso da bacia, respectivamente. A geologia predominante são os Quartzitos e Filito quartzoso, Quartzitos e Metaconglomerado, e Ortognaisses com intercalações de Anfibolitos e Metaultramáficas. A presença do Quartzito na composição litológica aumenta a resistência da estrutura. Algumas áreas dessa classe só não foram consideradas áreas de muita resistência devido à proximidade a áreas de falha e cisalhamento.

As áreas ilustradas na Figura 19 indicam características de regiões de Alta resistência à erosão. Essas regiões apresentam características que favorecem a recarga dos aquíferos, por diminuir a velocidade do escoamento superficial e permitir a infiltração da água em solos bem desenvolvidos e drenados, como os Latossolos. Estes solos também oferecem maior estabilidade quando submetidos ao impacto da precipitação.

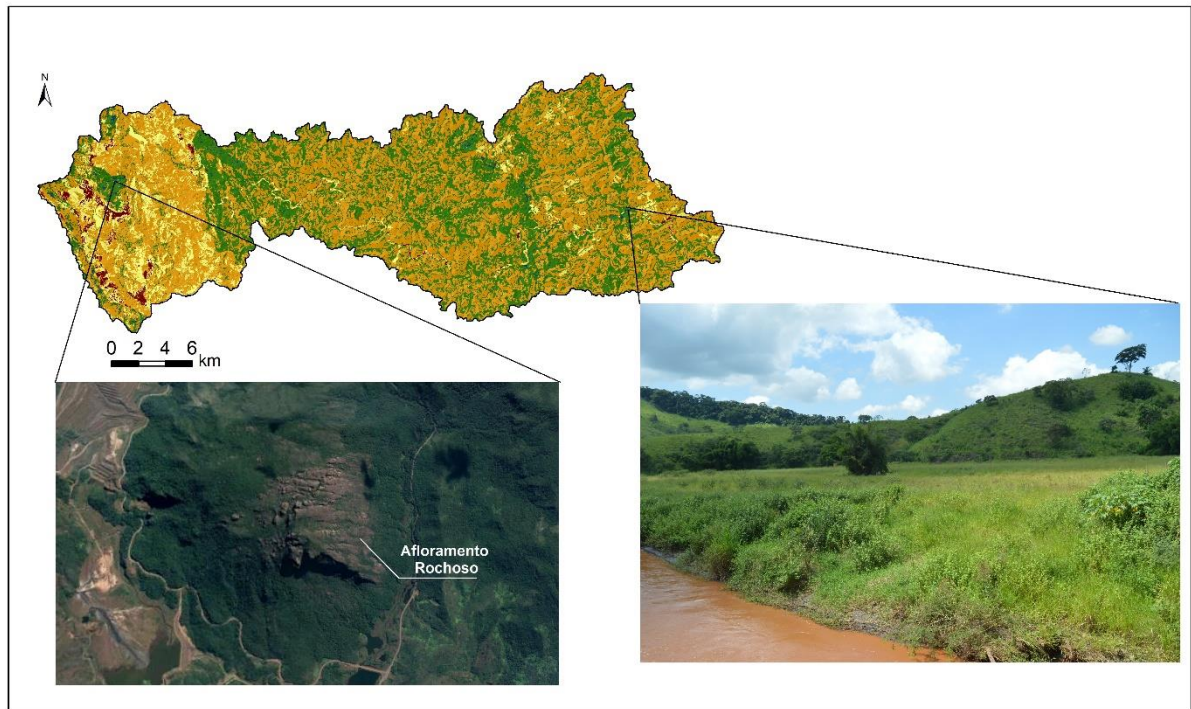
Figura 19 - Regiões de Alta resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.



As áreas de muito alta resistência estão espalhadas pontualmente, aparecendo desde a cabeceira até próximo dos cursos d'água. Estas áreas apresentam relevo praticamente plano, variando de 0 a 3% de declividade e comprimentos de rampa curtos. Os solos dessa porção são predominantemente compostos por Latossolos, com intercalações de afloramentos rochosos. A litologia dominante são os Quartzitos, principalmente nas áreas de cabeceiras da bacia. Essa classe foi pouco influenciada pelo rejeito do rompimento da barragem de Fundão.

De fato, a Figura 20 ilustra duas possíveis situações para as áreas de Muito Alta resistência à erosão. A primeira situação são as áreas de afloramentos de quartzito, localizadas principalmente no alto curso da bacia, próximas às linhas de interflúvio. A segunda situação são as áreas próximas aos cursos d'água, geralmente planícies de inundação e terraços que não foram fortemente atingidos pela lama e apresentam baixas declividades.

Figura 20 - Regiões de Muito Alta resistência à erosão do rio Gualaxo do Norte.



De maneira geral, as áreas mais vulneráveis aos processos erosivos, atualmente, na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, são as margens do rio. Estas áreas receberam uma grande carga de sedimentos provenientes do rompimento da barragem de Fundão, em 2015. O material que foi depositado apresenta uma baixa estabilidade, e com a energia do escoamento superficial do rio e as precipitações, ele vai sendo deslocado e direcionado para a jusante, os canais dos rios Carmo e Doce.

Nesse sentido, a Figura 21 ilustra um pequeno trecho no baixo curso da bacia do rio Gualaxo do Norte, comum por todo o trecho diretamente atingido pela lama. Observam-se deslocamentos dos blocos de contenção nas margens do canal principal, processo este que vai perpetuando-se em virtude da dinâmica natural da geomorfologia fluvial local. Naturalmente, os rios apresentam áreas de escavação e de deposição, porém, como a deposição de rejeitos provenientes da barragem de Fundão aconteceu de forma não natural e abrupta, algumas áreas que naturalmente eram geradoras de material foram aterradas. Nos últimos anos, o rio, na busca do equilíbrio e dinâmica natural, voltou a escavar algumas dessas áreas soterradas, o que resultou na remoção de inúmeros gabiões, os quais foram inseridos para a contenção do material depositado. O deslocamento destes gabiões pode desencadear o reinício da erosão nas margens do canal, favorecendo a ocorrência de movimentos de massa e alteração da turbidez do rio, causando danos à fauna e à flora.

Figura 21 - Trecho do baixo curso do rio Gualaxo do Norte.



Fonte: Adriana Monteiro

Santos et al. (2017) realizaram o mapeamento da susceptibilidade à erosão na bacia hidrográfica do Gualaxo do Norte. No estudo os resultados diferem dos apresentados neste trabalho, no que se refere às classes extremas (Muito alto e Muito baixo) principalmente nas proximidades do canal principal do rio Gualaxo do Norte, a divergência é explicada pela adoção de variáveis distintas nos estudos. Uma das variáveis, aqui disposta, foi a textura do rejeito da barragem de Fundão que, pela granulometria arenosa apresentada, diminuiu a resistência das áreas onde ocorreu a sedimentação do mesmo

A fim de identificar e analisar as pressões antrópicas, sofridas atualmente pela bacia do rio Gualaxo do Norte, foi realizado o cruzamento do mapa de resistência à erosão e o mapa de uso e cobertura do solo da bacia. A mensuração das pressões antrópicas sobre as classes de resistência à erosão está apresentada na Tabela 16. As combinações que mais se repetem na bacia são as áreas de resistência à erosão média, com a formação florestal e formação campestre, representando aproximadamente 30% e 15% da área total. Outra situação bastante comum são as áreas de Alta resistência à erosão, ocupadas por formações florestais e formação campestre, com 17,31% e 11,96%.

Tabela 16 - Percentual da Resistência à Erosão e Uso e Cobertura da Terra, na bacia do rio Gualaxo do Norte.

Uso e cobertura da terra	Resistência à erosão				
	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Afloramento Rochoso	0,55	2,13	4,58	1,94	0,11
Corpos d'água	0,08	0,30	0,82	0,54	0,02
Área Urbana	0,00	0,09	0,26	0,19	0,00
Formação Campestre	0,14	1,16	15,23	11,96	0,16
Formação Florestal	0,41	3,89	30,22	17,31	0,25
Mineração	0,08	0,65	1,45	0,37	0,02
Silvicultura	0,00	0,00	1,55	0,99	0,01
Solo Exposto	0,03	0,18	1,31	1,01	0,02

Na Tabela 17 está o percentual de cada classe de resistência à erosão, em relação ao uso e cobertura da terra. Nas classes Muito Alta e Alta, mais de 40% da área da classe é ocupada por afloramentos rochosos, essas áreas estão localizadas majoritariamente no alto curso da bacia e são consideradas regiões estáveis. As classes Muito Baixa e Baixa, juntas, tem aproximadamente 50% de suas áreas cobertas por formação campestre, ou seja, as características físicas do ambiente já favorecem a desagregação e remoção dos sedimentos e é potencializado pelo uso e cobertura atual. Em contrapartida, a formação florestal representa 50% da classe de Baixa resistência, contribuindo para a manutenção e conservação local.

Tabela 17 - Percentual da classe de Resistência à Erosão, em relação ao Uso e Cobertura da Terra.

Uso e cobertura da terra	Resistência à erosão				
	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Afloramento Rochoso	5,66	25,41	8,26	42,94	42,94
Corpos d'água	1,58	3,61	1,48	6,07	6,07
Área Urbana	0,56	1,02	0,47	0,00	0,00
Formação Campestre	34,86	13,77	27,48	10,61	10,61
Formação Florestal	50,41	46,29	54,54	31,77	31,77
Mineração	1,08	7,79	2,61	6,52	6,52
Silvicultura	2,90	0,02	2,80	0,03	0,03
Solo Exposto	2,95	2,09	2,36	2,06	2,06

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte apresentou uma resistência à erosão variável em toda sua extensão, sendo que valores da classe Média foram predominantes. Entretanto, foram identificadas diversas áreas com marcas de processos erosivos avançados. As feições resultantes da erosão avançada precisam ser avaliadas detalhadamente, para que medidas de recuperação sejam adequadas à realidade local.

Com isso, as medidas de controle e recuperação de áreas afetadas e degradadas, por processos erosivos, precisam ser pensadas por uma equipe multidisciplinar, visto que se trata de um problema que tem período contínuo e que envolve diversas esferas da sociedade civil.

Portanto, os resultados deste trabalho podem auxiliar na identificação de áreas prioritárias e tomadas de decisão de cunho ambiental. A metodologia proposta revelou-se capaz de identificar os padrões de resistência à erosão, na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, tendo em vista suas peculiaridades. A inserção dos dados granulométricos das amostras de rejeito aumentou a acurácia do modelo e gerou resultados satisfatórios. Para reaplicação da metodologia em outros contextos, é necessário revisar as variáveis, assim como seu grau de influência e ponderações, para melhor atender a região estudada.

Não obstante, para trabalhos futuros recomenda-se que seja realizado o cruzamento da avaliação da resistência à erosão com outras variáveis de cunho socioeconômico, a fim de gerar novos insights, análises e pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, Gerson S. de; RIDENTE JÚNIOR, José L. Erosão: Diagnóstico, Prognóstico e Formas de Controle. **Goiânia: Minicurso, VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE, Goiânia, 2001.**
- BERTONI. J.; LOMBARDI, NETO, F. **Conservação do Solo.** São Paulo: Editora Ícone, 1990.
- CODEMIG/CPRM Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais / Companhia de pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico do Estado de Minas Gerais.** Escala 1: 1.000.000. Belo Horizonte. v. 1. 2014.
- CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. PARH - **Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão DO1.** 2010. 124 p.
- COSTA, A. M. et al. Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. **Revista Geografias.** Vol.14, n 1, 2017.
- CPRM. 2019. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/estrada_real/geologia_topofisiografia.html> Acesso em: 11 de fevereiro de 2019.
- D'AGOSTINI, L. R. **Erosão: o problema mais que o processo.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 1999. 131p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **Reunião Técnica de Levantamento de Solos.** Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA - SNLCS. Micelânea, 1).
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FOUMELIS, M.; LEKKAS, E.; PARCHARIDIS, I. Landslide susceptibility mapping by GIS-based qualitative weighting procedure in Corinth area. **Bulletin of the Geological Society of Greece.** v. 36, p. 904-912, 2004.
- GOOGLE EARTH PRO, 2017. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 20 Jan 2018.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Bases Cartográficas. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>> Acesso em 03/03/2018.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Folha SE. 23 Rio Doce: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1987. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=219971>>
Acesso em 03/03/2018.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos Minas Gerais. 2010. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/mapoteca/upgrhs-minas-gerais.pdf>> Acesso em: 03/03/2018.

JAXA/METI. **ALOS PALSAR WBI**, 2010. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu>>. Acesso em 20 jun 2018.

POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**. v. 63, n. 2, p. 965-996, 2012.

QUANTUM GIS Development Team, 2017. **QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: <www.qgis.org>. Acesso em: 10 jan. 2018.

RENOVA. **Programa de caracterização geoquímica de rejeitos, solos e sedimentos**. 2017. 4199p. Disponível em: <<https://www.fundacaorenova.org/arquivos-e-relatorios/?search=programa+de+caracteriza%C3%A7%C3%A3o+geoquimica>>. Acesso em: 23 jun 2018.

SAAD, A.; CAMPOS, J. C. F. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura In: **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**. Belo Horizonte: UFMG, Museu de História Natural. Vol. 24, n. 1, 2015. 249p.

SANTOS, J, P. et al. Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte – MG. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, MG. v.18 n.63. set. 2017.

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; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book: il. color. E-book, no formato ePub, convertido do livro impresso.<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>

SILVA, M. S. L. **Estudos da Erosão**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Petrolina. 1995. 22p.

THIESSEN, A. H. **Precipitation averages for large areas**. **Monthly Weather Review**. v. 39, n.7, p. 1082-1089, 1911.

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. 1: 600.000. Projeção Policônica, 2010.

VON ESCHWEGE, Wilhelm Ludwig. **Pluto Brasiliensis, eine Reihe von Abhandlungen über Brasiliens Gold-, Diamanten-und anderen mineralischen Reichthum.** 1833.

CONCLUSÃO GERAL

As análises de uso e cobertura da terra são alternativas muito úteis em análises da dinâmica de ambientes e paisagens. A técnica de classificação orientada a objeto permite que, além da assinatura espectral, outras características como tamanho e forma sejam consideradas na classificação, contribuindo para uma maior aproximação com a realidade. A aplicação em imagens de média resolução mostrou-se satisfatória, apesar da grande maioria dos estudos com aplicação do OBIA serem em imagens de alta resolução.

Além disso, a resolução espacial das imagens restringiu a qualidade dos resultados. As imagens de média resolução, em alguns pontos, forçavam a generalização da classe de uso e cobertura da terra. Caso a escala de análise fosse mais detalhada, como a nível de propriedade, a resolução espacial comprometeria os resultados. Para esses casos, indica-se imagens de satélite de alta resolução espacial.

Quanto à análise de resistência à erosão, os resultados gerados se comportaram de forma adequada, atendendo o objetivo proposto e com coerência, quando cruzados com os pontos de controle visitados em campo. Foi possível identificar as áreas mais frágeis e mais resistentes aos processos erosivos na bacia.

De qualquer forma, as grandes vantagens da análise proposta foram a espacialização em termos de bacia hidrográfica e a baixo custo. Com o resultado em mãos, um gestor consegue direcionar planos e ações para a bacia, sem grandes dificuldades.

Em síntese, os estudos de análise de erosão por técnicas de geoprocessamento, de modo geral, ainda tem muito a se desenvolver quando comparados com o método tradicional de medição de campo, porém, a partir deste e de diversos outros trabalhos existe um potencial das novas abordagens e metodologias.

REFERÊNCIAS

- BERTONI, J. LOMBARDI NETO. F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985. 386p.
- D'AGOSTINI, L. R. **Erosão: o problema mais que o processo**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1999. 131p.
- FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; ROMKENS, M. J. M.; ONSTAD, C. A. Process of soil erosion by water. In: FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. **Soil erosion and crop productivity**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, cap. 9, 1985.
- KINNELL, P. I. A. Rainfall intensity-kinect energy relationships for soil loss prediction. **Soil Science Society America Journal**. Madison, V45, p. 153 – 155, 1981.
- MEYER, L. D. MONKE, E. J. **Mechanics of soil erosion by rainfall and Overland flow**. Purdue Jornal n. 2408. ASAE, p. 572-580, 1965.
- OLIVEIRA, A. R. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 74p. 2016.
- RODRIGUES, A. S.; ESTRELA, D. C. **Caracterização da bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: Avaliação Geoquímica Ambiental**. Multi-Sciense Journal. P. 133 – 89, 2015.
- WISCHMEIER, W. SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses. – a guide to conservation planning**. U.S. Departament of Agriculture, Agriculture Handbook n. 537, 1978. 58p.
- ZINGG, A. W. **Degree and legth of land slope as it affects soil loss and runoff**. Agricultural Engineering. St. Joseph, v.21, p.59-64, 1940.

ANEXOS

ANEXO A - ÍNDICE *KAPPA* DA CLASSIFICAÇÃO DE 2008

User \ Referenc...	agua	formacao_florestal	formacao_camp...	nuvens	afloramento	mineracao	solo_exposto	Sum
Confusion Matrix								
agua	0	0	0	0	0	0	0	0
formacao_florestal	351	262671	2941	0	3239	0	0	269202
formacao_campes...	0	0	73891	0	1256	303	0	75450
nuvens	0	0	0	3913	0	0	0	3913
afloramento	0	2502	9273	0	36746	0	0	48521
mineracao	857	0	0	192	392	8313	246	10000
solo_exposto	0	0	280	67	0	0	286	633
unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	1208	265173	86385	4172	41633	8616	532	
Accuracy								
Producer	0	0.9905647	0.8553684	0.938	0.8826172	0.9648329	0.5375940	
User	undefined	0.9757394	0.9793373	1	0.7573216	0.8313000	0.4518167	
Hellden	0	0.983	0.9131646	0.968	0.8151829	0.8931027	0.491	
Short	0	0.9667543	0.8402051	0.938	0.688	0.8068524	0.3253697	
KIA Per Class	0	0.9722274	0.8225262	0.9373179	0.8667609	0.964	0.5368750	
Totals								
Overall Accuracy	0.9462890							
KIA	0.8964304							

ANEXO B – ÍNDICE *KAPPA* DA CLASSIFICAÇÃO DE 2015

User \ Referenc...	formacao_florestal	formacao_camp...	afforamento	mineracao	solo_exposto	agua	Sum
Confusion Matrix							
formacao_florestal	17094	0	0	0	0	0	17094
formacao_campes...	0	1025	25	18	2	0	1070
afforamento	0	0	9827	10	0	0	9837
mineracao	0	0	0	2528	0	0	2528
solo_exposto	0	0	0	0	88	0	88
agua	0	0	0	0	0	1223	1223
unclassified	0	0	0	0	1	0	1
Sum	17094	1025	9852	2556	91	1223	
Accuracy							
Producer	1	1	0.9974624	0.989	0.967	1	
User	1	0.958	0.999	1	1	1	
Hellden	1	0.9785203	0.9982224	0.9944925	0.9832402	1	
Short	1	0.958	0.9964510	0.989	0.967	1	
KIA Per Class	1	1	0.9963280	0.9881006	0.967	1	
Totals							
Overall Accuracy	0.9982413						
KIA	0.9971038						

ANEXO C – ÍNDICE *KAPPA* DA CLASSIFICAÇÃO DE 2018

User \ Referenc...	formacao_florestal	formacao_camp...	aflorento	mineracao	solo_exposto	agua	Sum
Confusion Matrix							
formacao_florestal	17094	0	0	0	0	0	17094
formacao_campes...	0	1025	25	18	2	0	1070
aflorento	0	0	9827	10	0	0	9837
mineracao	0	0	0	2528	0	0	2528
solo_exposto	0	0	0	0	88	0	88
agua	0	0	0	0	0	1223	1223
unclassified	0	0	0	0	1	0	1
Sum	17094	1025	9852	2556	91	1223	
Accuracy							
Producer	1	1	0.9974624	0.989	0.967	1	
User	1	0.958	0.999	1	1	1	
Hellden	1	0.9785203	0.9982224	0.9944925	0.9832402	1	
Short	1	0.958	0.9964510	0.989	0.967	1	
KIA Per Class	1	1	0.9963280	0.9881006	0.967	1	
Totals							
Overall Accuracy	0.9982413						
KIA	0.9971038						

ANEXO D – ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM A PARTIR DA METODOLOGIA DO POLÍGONO DE THIESSEN

Ponto de amostragem	Área de influência (ha)	Ponto de amostragem	Área de influência (ha)
T155	10,191	T157	24,294
T59	7,752	T61	9,133
T78	1,757	T76	3,256
T144	6,888	T74	1,112
T21	14,342	T161	18,146
T167	70,322	T160	21,150
S54	3,487	T27	4,242
T01	11,791	T26	23,943
T165	43,517	T25	2,248
T41	6,873	T162	2,632
T58	3,057	S32	33,220
T163	53,927	T80	4,296
T39	9,956	T166	5,710
T46	1,887	S17	3,430
T44	8,460	T65	0,333
T42	3,401	T63B	2,256
T40	27,056	T24	10,285
T153	13,527	S15	0,152
T152	5,948	T168	12,288
S11	2,716	T38	15,490
T57	1,446	T151	13,830
T55	1,098	S24	39,320
T19	5,076	T37	1,136
T16	11,409	T35	31,980
T15	20,545	T68	2,263
T14	2,954	T06	14,226
T12	5,974	S20	4,003
T11	8,866	T66	3,343
T10	5,005	T53	22,996
T09	14,397	T08	9,779
T52	4,793	T07	30,007
T50	5,226	T05	7,230
T56	10,689	T04	6,643
T54	5,134	T03	10,034
T156	0,242	T31	66,460
T154	22,148	T02	29,988
S28	7,085	T51	15,627
S16	1,935	T49	14,035
S18	12,079	T47	17,057
T72	17,889	T45	47,318
T70	6,730	T148	6,218
T60	3,534	T147	3,716
T64	5,956	T146	15,449
T62	3,349	T145	8,981

T159	2,929	T143	5,302
T158	20,193	T43	36,855
