

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ÁDRIA KANOME MORI SOARES

**Análise temporal dos processos erosivos e modelagem da perda de solo na
bacia do Córrego do Palmital - Minas Gerais**

São Carlos
2022

ÁDRIA KANOME MORI SOARES

**Análise temporal dos processos erosivos e modelagem da perda de solo na
bacia do Córrego do Palmital - Minas Gerais**

Versão Corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Valéria Guimarães
Silvestre Rodrigues
Coorientador: Dr. Silvio Crestana

São Carlos
2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S676a Soares, Ádria Kanome Mori
Análise temporal dos processos erosivos e modelagem da perda de solo na bacia do Córrego do Palmital - Minas Gerais / Ádria Kanome Mori Soares; orientadora Profa. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues; coorientador Dr. Silvio Crestana. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Voçorocas. 2. Sistema de Informação Geográfica. 3. Anaglifos. 4. Exportação de sedimentos. 5. InVEST. 6. Retenção de sedimentos. 7. Deposição de sedimentos. 8. Serviços ecossistêmicos . I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **ÁDRIA KANOME MORI SOARES**.

Título da dissertação: "Análise temporal dos processos erosivos e modelagem da perda de solo na bacia do Córrego do Palmital - Minas Gerais".

Data da defesa: 08/08/2022.

Comissão Julgadora	Resultado
Profa. Associada Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	<u>Aprovado</u>
Prof. Dr. Eduardo Anselmo Ferreira da Silva (Universidade de Aveiro - Portugal)	<u>Aprovado</u>
Dra. Carmem Lucas Vieira (Orgânica's Produtos e Serviços Ambientais)	<u>Aprovado</u>

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Aos meus pais, pelo carinho e incentivo a ser sempre melhor que antes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, a Prof.^a Dr.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, pela confiança no potencial deste trabalho apesar de todos os obstáculos ao longo de seu desenvolvimento. Sou grata pelo acolhimento, incentivo, apoio, paciência e amizade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (Processo 88887.482750/2020-00). A bolsa de mestrado foi vital para a realização desta pesquisa.

Ao Dr. Silvio Crestana, meu coorientador, pelas essenciais observações durante este trabalho e por despertar o ânimo pela continuidade da pesquisa no doutorado.

Ao Dr. Rogério Resende Martins Ferreira, por compartilhar um pouco do vasto conhecimento de estatística e modelagem da perda de solo, bem como por contribuir na banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Osni José Pejon, pelos questionamentos e sugestões de melhoria nesta pesquisa, na banca de qualificação.

Aos meus pais, Joana e Claudio, por todo o amor. À minha irmã, Hanae, pelo companheirismo. Aos meus avós – Damiana, Manoel Benedito (Noé), Kanome e Tadashi – por me ensinarem a buscar melhores condições de vida por meio da educação. À minha família, em especial minhas tias Kikako, Clara e Tereza e minha prima Shimene, que sempre acreditaram em mim.

Ao Victor, por ser meu porto seguro e incentivar que eu lute por meus objetivos e sonhos. À família Coutinho Gonçalves Silva, pelo carinho.

Aos meus amigos de Belém: Larissa, Maria, Argel, Murilo, Marcela e Jhoseph. Aos amigos da AFB, ABBA e do Aquário, principalmente Paulo, Solaine, Mayumi, Bia Omuro, Rebeca Kim, Thainá, Lavínia, Olívia e Thaís.

Aos meus colegas e professores de pós-graduação do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, especialmente a turma de mestrado de 2020 (André, Caio e Vitor) e o Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette.

E a todos que contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.

“Como cientista, eu sou de fato apenas uma formiga, insuficiente e anônima, mas sou mais forte do que aparento e faço parte de algo que é muito maior do que eu.”

Hope Jahren (2017)

RESUMO

SOARES, A. K. M. S. **Análise temporal dos processos erosivos e modelagem da perda de solo na bacia do Córrego do Palmital - Minas Gerais.** 2022. 175 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

As voçorocas consistem na forma mais complexa de erosão linear, contribuindo para a degradação do solo em várias regiões do Brasil. Em especial, na região de Minas Gerais, diversas cidades são afetadas por estes processos erosivos. Na bacia hidrográfica do Córrego do Palmital (envolvendo os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas), foram delimitadas 78 voçorocas com área total de 287,18 ha, no ano de 2016. Neste contexto, um dos objetivos da presente pesquisa foi avaliar se a aplicação de anaglifos (imagem em 3D) traria maior detalhamento para a delimitação destas voçorocas. Para isso, utilizou-se a mesma imagem de satélite (Google Earth PRO) empregada em 2016, bem como imagem de 2019 – visando a análise espaço-temporal. Além disso, essa pesquisa também teve por finalidade o modelamento da perda de solo no software InVEST. A aplicação de anaglifos mostrou aumento de 38,6% da área erodida em 2016, comparando com levantamento anterior para o mesmo ano, e aumento de 1,6% de área erodida entre 2016 e 2019, indicando continuidade dos processos erosivos. O levantamento de uso do solo em 2019 identificou 39% de pastagens, 20,5% de lavoura temporária, 4,6% de cafezais e 35,4% de outros usos na bacia. As pastagens continuam sendo predominantes na bacia de estudo, mas parte de suas áreas foi transformada em cultura de milho e soja entre 2016 e 2019. Quanto ao modelamento da erosão, foi possível identificar erosão média total de 2,75 t/ha.ano, exportação de sedimentos de 1.449,54 t/ano, retenção de sedimentos de 9.042,13 t/ano e deposição de sedimentos de 14.677,29 t/ano no cenário atual (2019) da bacia do Córrego do Palmital. Também foram modelados três cenários hipotéticos, considerando aplicação de técnicas conservacionistas e substituição da pastagem por lavoura temporária (Cenário 1), reflorestamento no lugar da pastagem (Cenário 2) e preservação na mata ciliar (Cenário 3). A erosão média total, exportação, retenção e deposição de sedimentos foram respectivamente de 2,23 t/ha.ano, 1.300,59 t/ano, 9.191,08 t/ano e 11.755,76 t/ano para o Cenário 1, 1,92 t/ha.ano, 1.046,69 t/ano, 9.444,98 t/ano e 10.229,77 t/ano para o Cenário 2 e 2,36 t/ha.ano, 616,65 t/ano, 9.862,06 t/ano e 13.206,47 t/ano para o Cenário 3. A utilização de anaglifos no mapeamento de voçorocas em imagem de satélite demonstrou maior precisão na delimitação de forma e tamanho das feições. A modelagem permitiu estimar os valores de perda de solo, sendo importante recurso na gestão de áreas degradadas por processos erosivos. Ressalta-se que o reflorestamento e a preservação da mata ciliar contribuem para a diminuição da perda de solo, bem como o emprego de técnicas conservacionistas, principalmente devido ao solo ser de elevada erodibilidade.

Palavras-chave: Voçorocas. SIG. Anaglifos. Exportação de sedimentos. InVEST.

ABSTRACT

SOARES, A. K. M. S. **Temporal analysis of erosion processes and soil loss modelling in the Córrego do Palmital watershed - Minas Gerais**. 2022. 175 p. Thesis (Masters in Science) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Gullies are the most complex form of linear erosion, which contribute to soil degradation in various regions in Brazil. Especially in Minas Gerais, there are many cities affected by erosion processes. In 2016, 78 gullies (287.18 ha) were delimited in the Córrego do Palmital watershed, in Nazareno and Conceição da Barra de Minas municipalities. In this sense, one of the objectives of this research was to evaluate if the application of anaglyphs (3D images) would give greater detailing to gullies' delimitation. The same satellite image (Google Earth PRO) used in 2016 and the image from 2019 were applied, to perform a spatial-temporal analysis. Furthermore, this work also aims to model the soil loss in the software InVEST. The anaglyph's use showed 38.6% more eroded areas in 2016, in comparison to previous surveys of the same year, and an increase of 1.6% of eroded areas from 2016 to 2019, which indicates the continuity of the erosion processes. The 2019 land use survey showed 39% of pasture, 20.5% of temporary crops, 4.6% of coffee, and 35.4% of other uses in the watershed. Pasture is still the predominant use, but its areas were partially converted into corn and soy crops between 2016 and 2019. As regards the erosion modeling, it was possible to find mean annual soil loss of 2.75 t/ha.year, sediments' exportation of 1,449.54 t/year, retention of 9,042.13 t/year, and depositions of 1,449.54 t/year considering the present scenario (2019). Three hypothetical scenarios were also performed, for applying soil conservation practices and replacing pasture for temporary crops (Scenario 1), reforesting pasture areas (Scenario 2) and preserving ciliary forest (Scenario 3). The mean annual soil loss, exportation, retention, and deposition of sediments were respectively 2.23 t/ha.year, 1,300.59 t/year, 9,191.08 t/year and 11,755.76 t/year to Scenario 1; 1.92 t/ha.year, 1,046.69 t/year, 9,444.98 t/year and 10,229.77 t/year to Scenario 2; and 2.36 t/ha.year, 616.65 t/year, 9,862.06 t/year and 13,206.47 t/year to Scenario 3. The application of anaglyphs to gullies' mapping using satellite images demonstrated greater precision in delimiting the form and size of the features. The model estimated soil loss values, an important resource to manage degraded areas by erosion processes. Reforesting and preserving ciliary forests diminished soil loss, similarly to conservationist techniques, mainly due to the high erodibility of the soil.

Keywords: Gullies. GIS. Anaglyphs. Exportation of sediments. InVEST.

Lista de Figuras

Figura 1 – Desenho esquemático da formação de voçorocas em áreas vegetadas.	30
Figura 2 – Voçoroca próxima à nascente da bacia do Córrego do Palmital, em Nazareno (MG), com destaque à estrada de terra (seta vermelha) e presença de gado em pastagem (seta branca).	31
Figura 3 – Voçoroca estabilizada devido à vegetação em seu interior.	31
Figura 4 – Voçorocas conectadas a outras voçorocas (indicadas por setas vermelhas) por meio de cursos d'água (setas azuis) na bacia do Córrego do Palmital.	32
Figura 5 – Fotointerpretação de anaglifo utilizando estereoscopia digital.	43
Figura 6 – Tecnologia da Planar StereoMirror™ para obtenção de imagem em 3D.	44
Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo, bacia do Córrego do Palmital.	55
Figura 8 – Setores do Cráton do São Francisco.	56
Figura 9 – Cambissolo típico da área de estudo.	72
Figura 10 – Exemplo de latossolo encontrado na área de estudo.	73
Figura 11 – Relevo da área de estudo.	76
Figura 12 – Valores médios para precipitação total em Lavras (MG).	78
Figura 13 – Valores médios para precipitação total em São João del Rei (MG).	78
Figura 14 – Valores médios para temperatura média em Lavras (MG).	79
Figura 15 – Valores médios para temperatura média em São João del Rei (MG).	79
Figura 16 – Fluxograma da metodologia de estudo.	86
Figura 17 – Quadrículas para obtenção das imagens de satélite da bacia do Córrego do Palmital.	88
Figura 18 – Mapa do Modelo Digital de Elevação da bacia do Córrego do Palmital.	97
Figura 19 – Mapa da delimitação da bacia do Córrego do Palmital.	98
Figura 20 – Mapa de interpolação da precipitação média anual da chuva na bacia do Córrego do Palmital.	99
Figura 21 – Mapa de erodibilidade dos solos na bacia do Córrego do Palmital.	101
Figura 22 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital.	102
Figura 23 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital, com <i>buffer</i> de 30 m da hidrografia.	103
Figura 24 – Calibração do modelo InVEST na bacia do Córrego do Palmital, comparando limite de acumulação do fluxo de 75 e 750.	107

Figura 25 – Calibração do modelo InVEST na bacia do Córrego do Palmital, comparando limite de acumulação do fluxo de 1000 e 1250.	108
Figura 26 – Anaglifo da quadrícula 19 da bacia do Córrego do Palmital, em 2016.	109
Figura 27 – Anaglifo da quadrícula 19 da bacia do Córrego do Palmital, em 2019.	110
Figura 28 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2016 – levantamentos anteriores (CASSARO, 2018; REAL, 2019).....	111
Figura 29 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2016, com a aplicação de anaglifos.....	114
Figura 30 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2019, com a aplicação de anaglifos.....	115
Figura 31 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos diários.....	125
Figura 32 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos mensais.....	125
Figura 33 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos anuais.	126
Figura 34 – Gráficos bi-plot com os 10 indivíduos de maior contribuição para os dados diários.	127
Figura 35 – Gráficos bi-plot com os 10 indivíduos de maior contribuição para os dados mensais.	128
Figura 36 – Gráficos simples dos indivíduos em PCA para os dados anuais.....	129
Figura 37 – Gráficos das contribuições de precipitação total e temperatura média dos indivíduos para as dimensões 1 e 2, para os dados anuais.	130
Figura 38 – Gráficos bi-plot dos dados climáticos anuais.....	131
Figura 39 – Matrizes das distâncias euclidianas dos dados.....	133
Figura 40 – Matrizes de distância dos dados anuais de precipitação total e temperatura média.	134
Figura 41 – Gráficos de clusters.....	137
Figura 42 – Erosão média nos cenários atual e hipotéticos 1, 2 e 3 da bacia do Córrego do Palmital.....	147
Figura 43 – Exportação, retenção e deposição de sedimentos nos cenários atual e hipotéticos 1, 2 e 3 da bacia do Córrego do Palmital.....	147

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de fator C encontrados na literatura para as classes de uso e cobertura do solo da bacia do Córrego do Palmital.	35
Tabela 2 – Valores do fator P, referente às práticas conservacionistas.	37
Tabela 3 – Valores máximos, mínimos e médias de precipitação total e temperatura média em Lavras e São João del Rei, com base em dados diários.	77
Tabela 4 – Valores máximos, mínimos e médias de precipitação total e temperatura média em Lavras e São João del Rei, com base em dados anuais.	78
Tabela 5 – Levantamentos de voçorocas realizados na região de Nazareno e Conceição da Barra de Minas.	82
Tabela 6 – Porcentagens de recebimento de dados necessárias para geração de valor numérico no sistema BDMEP/INMET.	92
Tabela 7 – Dados das estações meteorológicas de Lavras e São João del Rei para elaboração do <i>raster</i> de erosividade da chuva.	96
Tabela 8 – Valores de erodibilidade dos solos da bacia do Córrego do Palmital.	100
Tabela 9 – Tabela biofísica das classes de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital.	104
Tabela 10 – Mudanças das voçorocas da bacia do Córrego do Palmital em 2016 e 2019, com o uso de anaglifos.	112
Tabela 11 – Áreas das voçorocas da bacia do Córrego do Palmital em 2016 e 2019.	116
Tabela 12 – Uniões de voçorocas delimitadas por levantamentos anteriores e atual, para o ano de 2016.	118
Tabela 13 – Uniões de voçorocas delimitadas em 2016, para o ano de 2019.	119
Tabela 14 – Indivíduos e respectivos anos de análise estatística de dados meteorológicos em Lavras e São João del Rei.	122
Tabela 15 – Valores de variância dos dados diários.	126
Tabela 16 – Valores de variância dos dados mensais.	126
Tabela 17 – Valores de variância dos dados anuais.	127
Tabela 18 – Valores de precipitação total e temperatura média dos indivíduos destacados nos gráficos bi-plot de dados meteorológicos anuais de Lavras.	132
Tabela 19 – Valores de precipitação total e temperatura média dos indivíduos destacados nos gráficos bi-plot de dados meteorológicos anuais de São João del Rei.	132
Tabela 20 – Médias de cada variável por cluster com os valores originais.	136

Tabela 21 – Clusters e respectivos indivíduos.....	138
Tabela 22 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário Atual – Bacia do Córrego do Palmital.....	140
Tabela 23 – Comparativos de valores de perda de solo e exportação de sedimentos de outros estudos.	141
Tabela 24 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 1 na bacia do Córrego do Palmital.....	142
Tabela 25 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 2 na bacia do Córrego do Palmital.....	144
Tabela 26 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 3 na bacia do Córrego do Palmital.....	145

Lista de Abreviaturas e Siglas

3D	Tridimensional ou três dimensões
ACP	Análise da Componente Principal
AL	Alagoas
ALOS	<i>Advanced Land Observation</i> (Observação Avançada do Solo)
ASTER	<i>Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> (Radiômetro Avançado de Emissão e Reflexão Térmica Espacial)
BA	Bahia
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos
BR	Brasil
CI	<i>Convergence Index</i> (Índice de Convergência)
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
COT	Carbono Orgânico Total
CPRM	Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)
CSV	<i>Comma Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
CXbd	Cambissolo Háplico Tb distrófico típico
DD	<i>Drainage Density</i> (Densidade da Drenagem)
DtS	<i>Distance to Stream</i> (Distância para o Canal)
E	Leste
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ENE	Leste-nordeste
ES	Espírito Santo
ESAL	Escola Superior de Agricultura de Lavras
ESALQ	Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> (Mapeador Temático Melhorado Plus)
ETR	Elementos Terras Raras
FAMD	<i>Factor Analysis of Mixed Data</i> (Análise Fatorial de Dados Mistos)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informações Geográficas)
GO	Goiás
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HCPC	<i>Hierarchical Clustering on Principal Components</i> (Análise de Agrupamento de Componentes Principais)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP	<i>Inductively Coupled Plasma</i> (Plasma Acoplado Indutivamente)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
InVEST	<i>Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs</i> (Valoração Integrada de Serviços Ecossistêmicos e Cenários Alternativos)
LA	<i>Laser Ablation</i> (Ablação a Laser)
LANDSAT	<i>Land Remote-Sensing Satellite</i> (Satélite de Sensoriamento Remoto Terrestre)
LPS	<i>Leica Photogrammetry Suite</i> (Pacote de Fotogrametria Leica)
LULC	<i>Land Use Land Cover</i> (Cobertura do Uso do Solo)
LVAd	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico
LVd	Latossolo Vermelho distrófico
LVdf	Latossolo Vermelho distroférico típico
MA	Maranhão
MCA	<i>Multiple Correspondence Analysis</i> (Análise de Correspondência Múltipla)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MEA	<i>Millennium Ecosystem Assessment</i> (Avaliação do Ecossistema do Milênio)
MFA	<i>Multiple Factor Analysis</i> (Análise de Múltiplos Fatores)

MG	Minas Gerais
MO	Matéria Orgânica
MRVBF	<i>Multi-resolution Index of Valley Bottom Flatness</i> (Índice Multi-resolução do Nivelamento do Fundo de Vale)
MS	<i>Mass Spectrometer</i> (Espectrômetro de Massa)
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i> (Equação Universal de Perda de Solo Modificada)
N	Norte
NA	<i>Not Available</i> (Não Disponível)
NE	Nordeste
NW	Noroeste
PC	<i>Plan Curvature</i> (Curvatura do Plano)
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise da Principal Componente)
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PrC	<i>Profile Curvature</i> (Curvatura do Perfil)
PSAF	<i>PCA-SCA-ANOVA Framework</i> (Estrutura PCA-SCA-ANOVA)
RJ	Rio de Janeiro
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> (Equação Universal de Perda de Solo Revisada)
S	Sul
SCA	<i>Stepwise-Cluster Analysis</i> (Análise de Agrupamentos Graduais)
SDR	<i>Sediment Delivery Ratio Model</i> (Modelo de Razão de Exportação de Sedimentos)
SE	Sergipe
SE	Sudeste
SHRIMP	<i>Sensitive High-Resolution Ion Microprobe</i> (Microsonda Iônica de Alta Resolução e de Alta Sensibilidade)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SP	São Paulo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Missão Topográfica de Radar Embarcado)
SW	Sudoeste
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i> (Ferramenta de Avaliação de Solo e Água)
TIF	<i>Tagged Image File Format</i> (Formato de Arquivo de Imagem com Tags)
TIMS	<i>Thermal Ionization Mass Spectrometry</i> (Espectrometria de Massa por Ionização Térmica)
TNC	<i>The Nature Conservancy</i> (Conservação da Natureza)
TO	Tocantins
TPI	<i>Topography Position Index</i> (Índice de Posicionamento Topográfico)
TST	<i>Terrain Surface Texture</i> (Textura da Superfície do Terreno)
TWI	<i>Topography Wetness Index</i> (Índice Topográfico de Umidade)
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i> (Equação Universal de Perda de Solo)
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator
W	Oeste
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i> (Projeto de Predição de Erosão Hídrica)
WGS	<i>World Geodetic System</i> (Sistema Geodésico Mundial)
WSW	Oeste-sudoeste
WWF	<i>World Wildlife Fund</i> (Fundo Mundial para a Natureza)
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

Lista de Símbolos

Al	Alumínio
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
Da	<i>Drainage Density</i> (Densidade de Drenagem)
Fe	Ferro
g	Gramas
Ga	Bilhões de anos (giga)
ha	Hectare
kg	Quilograma
Ki	Proporção de sílica por alumínio
km	Quilômetros
km²	Quilômetros quadrados
Kr	Proporção de sílica por alumínio e ferro
l_{max}	Valor Máximo de L no cálculo do fator de gradiente de declividade – LS
m	Metros
Ma	Milhões de anos (mega)
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
O	Oxigênio
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
Rb	Rubídio
R_b	<i>Bifurcation Ratio</i> (Razão de Bifurcação)
R_c	<i>Circularity Ratio</i> (Razão de Circularidade)
R_e	<i>Elongation Ratio</i> (Razão de Alongamento)
SDR_{max}	Máximo de Sedimento Exportado
Si	Silício
Sn	Estanho
Sr	Estrôncio
Ta	Tântalo
Tb	Atividade baixa
T_{DM}	Idade Modelo
U	Urânio
V	Valor de saturação por bases

Sumário

1	Introdução.....	19
2	Justificativa.....	21
3	Objetivos.....	23
4	Revisão Bibliográfica	24
4.1	Degradação do Solo e Erosão	24
4.1.1	Processos Erosivos	26
4.1.2	Erosão Hídrica	27
4.1.3	Voçorocas	28
4.1.4	Perda de solo.....	33
4.2	Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	38
4.2.1	Anaglifos	41
4.3	Serviços Ecosistêmicos	45
4.4	Modelagem	46
4.4.1	InVEST.....	47
4.5	Estatística.....	51
4.5.1	Análise da Componente Principal	51
4.5.2	Análise de Agrupamentos.....	53
5	Caracterização da Área.....	55
5.1	Localização e Acesso.....	55
5.2	Geologia.....	56
5.2.1	Geologia Regional	56
5.2.2	Geologia Local	59
5.2.3	Considerações.....	70
5.3	Pedologia	70
5.4	Geomorfologia.....	75
5.5	Clima.....	77

5.6	Vegetação.....	80
5.7	Uso e Ocupação	81
5.8	Processos Erosivos na Área de Estudo	82
6	Materiais e Métodos	86
6.1	Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento em SIG	86
6.1.1	Mapeamento das Voçorocas	87
6.1.2	Uso do Solo	90
6.2	Levantamento de Dados.....	90
6.3	Análise Estatística.....	90
6.3.1	Obtenção dos dados	91
6.3.2	Preparação dos dados.....	92
6.3.3	Análise da Componente Principal	92
6.3.4	Análise de Agrupamentos.....	93
6.4	Modelagem da Erosão	94
6.4.1	Submodelo de Exportação de Sedimentos.....	95
6.4.2	Dados de entrada	95
6.4.3	Calibração.....	106
7	Resultados e Discussão.....	109
7.1	Análise dos Dados Obtidos no SIG	109
7.1.1	Levantamento de Voçorocas	109
7.1.2	Levantamento do Uso do Solo.....	119
7.1.3	Considerações.....	120
7.2	Análise Estatística de Dados Meteorológicos.....	120
7.2.1	Dados Diários	120
7.2.2	Dados Mensais.....	121
7.2.3	Dados Anuais.....	121
7.2.4	Considerações sobre os dados meteorológicos.....	123

7.2.5	Análise da Componente Principal	124
7.2.6	Análise de Agrupamentos.....	133
7.2.7	Considerações sobre os tratamentos estatísticos	139
7.3	Modelagem dos Processos Erosivos - InVEST	140
7.3.1	Cenário Atual.....	140
7.3.2	Cenário Hipotético 1.....	142
7.3.3	Cenário Hipotético 2.....	143
7.3.4	Cenário Hipotético 3.....	145
7.3.5	Considerações sobre o modelamento no InVEST	146
8	Conclusões.....	150
	Referências	153
	Anexos	176

1 INTRODUÇÃO

A erosão consiste na desagregação e consequente transporte de partículas de solo ou rocha, o que culmina em sua deposição. Sua ocorrência é natural, sendo importante fator de modelamento da paisagem durante a escala de tempo geológico. Entretanto, também pode ocorrer em intervalos temporais de menor duração, devido a condições ambientais específicas de menor frequência e, sobretudo, em decorrência de ações antrópicas (MORGAN, 2005; BLANCO; LAL, 2008).

As pressões sobre o solo, em virtude da crescente necessidade de recursos associada ao uso inadequado e/ou excessivo da terra, culminam em aumento do desequilíbrio das interações entre o meio físico e, principalmente, o meio socioeconômico. Assim, são gerados diversos problemas ambientais devido à ocorrência de processos erosivos. Destacam-se a perda de solo, a diminuição da profundidade cultivável e fertilidade do solo, e o assoreamento de corpos hídricos (MORGAN, 2005; ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

Processos erosivos podem ser desencadeados por diversos agentes, sendo principalmente por ação da água e do vento. A erosão hídrica pode ocorrer devido ao impacto das gotas de chuva, ao escoamento superficial e ao escoamento subsuperficial, além da erosão costeira e de margens de rio. Um dos tipos de erosão hídrica relacionada ao escoamento superficial é a erosão linear, que, em sua fase mais evoluída e complexa, resulta na formação de voçorocas (BLANCO; LAL, 2008), as quais mobilizam grandes volumes de sedimento (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

A cobertura vegetal atua como barreira física ao interceptar as gotas de água da chuva, de modo que a energia cinética de impacto e salpicamento é reduzida (BLANCO; LAL, 2008). O desmatamento implica em menor proteção do material geológico e menor aporte de matéria orgânica. Além disso, em cenário rural, a retirada da vegetação pode ser relacionada a cultivo intensivo ou superpastoreio, que levam à mineralização da matéria orgânica e compactação do solo. Estes fatores resultam na degradação da estrutura do solo e menor infiltração, favorecendo o escoamento superficial e, portanto, a erosão (MAFRA, 2007). A degradação do solo por erosão e mau uso do solo em áreas rurais culmina na perda de áreas produtivas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010) e pode ser associada ao aumento da insegurança alimentar (BLANCO; LAL, 2008).

Devido à complexidade dos processos erosivos de grande porte, é necessário um estudo integrado visando avaliar os principais condicionantes e os agentes deflagradores que atuam em tais processos.

Programas como o InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*, ou Valoração Integrada de Serviços Ecossistêmicos e Cenários Alternativos) possibilitam modelar a perda de solo de acordo com as características da topografia, de erodibilidade, de erosividade e do padrão de uso do solo, o que é essencial para compreensão das consequências dos processos erosivos na bacia hidrográfica.

O emprego de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento utilizando Sistema de Informação Geográfica (SIG), com observação de imagens tridimensionais (anaglifos), permite a delimitação das formas erosivas e a avaliação de sua evolução espaço-temporal.

Somada à modelagem e ao SIG, é fundamental a caracterização geológica e geotécnica da degradação por erosão. Na caracterização, é possível definir os principais condicionantes e os deflagradores associados aos processos erosivos. Cabe ainda a caracterização do agente erosivo, a água, a partir de análises de dados meteorológicos.

Os processos erosivos de grande porte constituem uma problemática constante na bacia do Córrego do Palmital e adjacências, devido às suas características naturais – que controlam a erosividade e erodibilidade – atreladas ao uso do solo e práticas inadequadas de manejo.

Nesse contexto, esta pesquisa avaliou se o emprego de anaglifos na metodologia de levantamento de feições erosivas implica em maior precisão na delimitação das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital. Para isso, comparou-se as delimitações realizadas sem e com o uso dos anaglifos. Também foi realizada análise estatística de 30 anos de dados climáticos, de forma a melhor compreender o principal agente erosivo na região, a chuva. Além disso, a partir da aplicação do InVEST, foram avaliadas as perdas de solo na bacia conforme os diferentes usos do solo.

2 JUSTIFICATIVA

A problemática associada aos processos erosivos de alta complexidade e evolução (voçorocas) em sub-bacias da bacia do Alto do Rio Grande, na qual a bacia do Córrego do Palmital está inserida, é identificada em trabalhos como de Bono et al. (1996), Ferreira (2005), Araújo (2006), Silva (2006), Ferreira et al. (2008), Silva et al. (2008), Gomide (2009), Ferreira et al. (2011), Coelho et al. (2012), Ferreira et al. (2012), Mello et al. (2012), Pereira et al. (2012), Sampaio et al. (2013), Pereira et al. (2014), Sampaio (2014), Ferreira e Ferreira (2015), Cassaro (2015), Oliveira (2015), Sampaio et al. (2016), Sampaio et al. (2017), Araújo et al. (2018), Cassaro (2018), Real (2019), Real et al. (2020a) e Real et al. (2020b).

Foi realizado um levantamento de voçorocas no município de Nazareno (MG) por Ferreira (2005), que identificou 57 voçorocas. Ferreira et al. (2011) encontraram 96 voçorocas na mesma área, com amostragem e cadastro de 18 feições. Também houve levantamentos para a bacia do Alto Rio Grande, sendo diagnosticadas 1150 voçorocas em 2000 (FERREIRA et al., 2008) e 798 em 2009 (FERREIRA; FERREIRA, 2015).

A bacia do Córrego do Cafundão, sub-bacia da bacia do Alto Rio Grande, foi estudada por Sampaio et al. (2013), que delimitaram 8 voçorocas. Outra sub-bacia, a bacia do Córrego do Forro, foi analisada por Cassaro (2018), que identificou 13 voçorocas na área. A bacia do Córrego do Cravo, também sub-bacia da bacia do Alto Rio Grande, foi abordada por Sampaio (2014), Oliveira (2015), Sampaio et al. (2016) e Sampaio et al. (2017), que apresentaram caracterização da bacia, avaliação dos condicionantes geológicos e geotécnicos da área e simulações hidrológicas e hidráulicas que podem subsidiar projetos de macrodrenagem para recuperação de áreas afetadas por voçorocas.

A bacia do Córrego do Palmital foi objeto de estudo de Real (2019), que utilizou SIG, sensoriamento remoto, caracterizações físicas e químicas de amostras de diferentes tipos de solo coletados em uma única voçoroca (porção noroeste da bacia), bem como análise fractal, multifractal e de lacunaridade. Real et al. (2020b) propuseram uma nova classificação, “complexo de voçorocas”, com a análise multifractal e de lacunaridade, onde uma voçoroca está conectada na outra. Real et al. (2020a) avaliaram o desenvolvimento temporal de 60 voçorocas localizadas na bacia do Córrego do Palmital, nos anos de 2002, 2007, 2014 e 2016.

Assim, essa pesquisa se justifica, pois na bacia do Córrego do Palmital ainda falta realizar estudos abordando a perda de solos nos diferentes usos da bacia, o que auxiliará na compreensão dos processos erosivos e suas consequências nessa área. Além disso, o

aprimoramento da metodologia de levantamento de voçorocas na área (com anaglifo) permite melhor dimensionar o avanço da erosão.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi a avaliação temporal dos processos erosivos e do uso e ocupação do solo, bem como a modelagem da perda de solo na bacia do Córrego do Palmital.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Avaliar a efetividade da aplicação de anaglifos no mapeamento da evolução e mudança de forma das voçorocas na área de estudo em imagens de satélite de anos distintos;
- b) Atualizar os levantamentos de voçorocas e uso do solo na área de estudo, com o uso de imagens de satélite de 2019;
- c) Analisar dados climatológicos de precipitação total e temperatura média dos últimos 30 anos das estações meteorológicas mais próximas da área de estudo;
- d) Avaliar a perda de solo, exportação, retenção e deposição dos sedimentos na bacia do Córrego do Palmital;
- e) Comparar os resultados da modelagem no InVEST para três simulações de cenários de mudanças no uso e ocupação na área de estudo (Cenário 1: aplicação de técnicas conservacionistas e substituição da pastagem por lavoura temporária; Cenário 2: substituição da pastagem por reflorestamento; e Cenário 3: preservação da mata ciliar).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Degradação do Solo e Erosão

O solo consiste na interface entre atmosfera e hidrosfera com a litosfera, que sustenta o crescimento de organismos que compõem a biosfera (WHITE, 2006). Sua composição inclui minerais, materiais orgânicos em diversos estágios de decomposição, organismos vivos, bem como água, gelo e gases em poros de tamanhos variados (SHAETZL; ANDERSON, 2005).

Além de ser um meio essencial para o crescimento de plantas, importantes na cadeia alimentar de diversos organismos, o solo também possui outras funcionalidades, como: purificação dos reservatórios de água, repositório da flora e fauna, proteção do ambiente contra agentes poluidores e base para a infraestrutura desenvolvida pelo ser humano (WILSON, 2019). Dessa forma, o solo é importante no controle da qualidade ambiental, segurança alimentar, segurança energética, água, estabilidade climática, biodiversidade e urbanização (BLANCO; LAL, 2008; MCBRATNEY et al., 2014).

A degradação ambiental ocorre devido ao desequilíbrio de processos físicos, químicos e/ou biológicos de componentes naturais do meio ambiente, provocado por processos antropogênicos (usos industriais, urbanos ou agrícolas) ou naturais induzidos (erosão, movimentos de massa gravitacionais e subsidências), de forma que as perdas de qualidade e funções ambientais são superiores à capacidade de resiliência (ZUQUETTE et al., 2013; ZUQUETTE, 2015). No Brasil, as maiores extensões de áreas degradadas estão relacionadas com o desmatamento e as atividades agropecuárias, além da atividade industrial, mineração e obras de engenharia (TAVARES, 2008).

As consequências da degradação do solo são observadas nos âmbitos agrônomo, ecológico, ambiental e econômico de forma direta ou indireta (BLANCO; LAL, 2008; LAL, 2001; MORGAN, 2005). O solo degradado, em especial por ação dos processos erosivos e mau uso do solo, resulta na perda de áreas produtivas em regiões rurais (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Rodrigues et al. (2015) destacaram alguns tipos de degradação gerados principalmente por atividades de mineração e ocorrência de processos erosivos, sendo: perda de solo e retirada dos horizontes superficiais orgânicos; assoreamento de reservatórios, lagos e canais; retirada parcial ou total da cobertura vegetal; deposição de materiais erodidos e escavados nas encostas; retirada de sedimentos pela erosão; alteração da geometria da encosta; alteração das frequências dos canais; alteração do escoamento das águas superficiais; alteração do nível d'água; alteração

do fluxo d'água superficial; alteração das propriedades do material inconsolidado; e exposição de materiais rochosos.

A erosão causa efeitos diretos – remoção da fração fina e redução da profundidade do *topsoil* – e indiretos – produtividade primária líquida reduzida, alteração das propriedades do solo e desertificação – que implicam na redução do solo e do estoque de carbono orgânico no ecossistema. O carbono orgânico presente no solo é transportado no processo erosivo e redistribuído ao longo da topografia, podendo ser depositado em canais fluviais ou ser transportado até os oceanos, o que impacta na qualidade e funcionalidade do solo. Além disso, ocorre emissão gases como CO₂, CH₄ e N₂O na atmosfera devido às perturbações na estrutura do solo, o que colabora com o efeito estufa (LAL, 2020; LAL, 2022).

De acordo com Guerra e Jorge (2021), a erosão por voçorocas e movimentos de massa correspondem aos principais processos geomorfológicos associados à degradação de solos no Brasil, sendo controlados pelas características de clima, relevo, pedologia e uso e manejo do solo.

A conservação do solo objetiva proteger e realçar as funções do solo e os serviços ecossistêmicos possibilitados pelo solo (ALBALADEJO et al. 2021). Assim, pode-se aplicar técnicas conservacionistas para minimizar os fatores causadores da degradação do solo, sempre considerando as viabilidades técnica e econômica (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Para Lal (2019), os princípios básicos para o manejo sustentável dos solos em agroecossistemas são:

- a) Manter o solo coberto e protegido sempre;
- b) Eliminar ou minimizar perturbações mecânicas;
- c) Repor o que é colhido ou removido, como nutrientes e carbono orgânico do solo;
- d) Aumentar a atividade e diversidade de espécies da biota do solo;
- e) Integrar plantações com gado e árvores no sistema agrossilvipastoril;
- f) Reciclar todos os subprodutos de modo que retornem ao solo.

Tendo em vista que o solo corresponde a um recurso não renovável, considerando a escala de tempo humana (BLANCO; LAL, 2008), é de fundamental importância que sejam aplicadas medidas adequadas para sua gestão e conservação. Assim, deve-se compreender os condicionantes naturais e antrópicos e os agentes degradadores do solo, para possibilitar o dimensionamento correto das implicações de sua perda.

4.1.1 Processos Erosivos

A erosão consiste no conjunto de três processos: a desagregação de partículas de solo ou rocha, o transporte por agentes erosivos e a deposição dos sedimentos carreados (LAL, 2001; MORGAN, 2005). Os processos erosivos podem ocorrer de forma natural, sendo importantes para o modelamento do relevo ao longo do tempo geológico, porém podem ser acelerados por condições ambientais específicas ou pela ação humana, o que potencialmente ocasiona a degradação (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

De acordo com Lal (2001), a energia para a ocorrência de processos erosivos é fornecida pelos agentes erosivos. Então, a fonte de energia determina qual o tipo de processo erosivo. O autor destaca que existem quatro principais fontes: física (água e vento), gravidade, reações químicas e perturbações antropogênicas. O quão severo é o desenvolvimento do processo erosivo depende da magnitude e taxa de dissipação da energia das fontes envolvidas.

O início do processo erosivo ocorre quando o agente erosivo provoca a ruptura de agregados, destacando as partículas (GUERRA et al., 2007). O destacamento das partículas é geralmente provocado pelo impacto das gotas de chuva, processos intempéricos, força de cisalhamento ou arraste por água e vento, por atividades relacionadas à lavoura, ou pela abrasão e remoção de blocos com o deslizamento de geleiras sobre a superfície do material geológico. Assim, é possível o transporte das partículas pela combinação da gravidade com a água e vento, bem como o gelo e organismos. Quando a energia que possibilita o transporte é reduzida, devido ao atrito e presença de cobertura vegetal ou outras obstruções, ocorre a deposição (LAL, 2001; MORGAN, 2005; ROTTA; ZUQUETTE, 2015; FORNASARI FILHO; FARIA, 2018).

Os agentes erosivos consistem nos elementos responsáveis pelo destacamento e transporte das partículas, sendo principalmente a água, o vento e o gelo. A erosão decorrente da ação da água é denominada erosão hídrica, e pode ter relação com a água da chuva, escoamento superficial e subsuperficial, oceanos e obras. O vento atua como agente erosivo em ambientes costeiros (praias e dunas) e no continente. Os processos erosivos pela ação do gelo podem ocorrer relacionados às geleiras e/ou água de degelo (ROTTA; ZUQUETTE, 2015). A erosão hídrica é dominante em regiões úmidas e subúmidas, onde a pluviometria é mais elevada. A erosão pela ação do vento é associada a áreas de clima árido e semiárido (GUERRA et al., 2007; BLANCO; LAL, 2008).

A erosão hídrica é predominante no Brasil, tendo em vista as características climáticas do país, que engloba regiões de clima equatorial, tropical e subtropical.

4.1.2 Erosão Hídrica

A erosão decorrente da ação da água pode gerar consequências significantes. Suas formas de ocorrência correspondem ao impacto das gotas de chuva, ao escoamento superficial – gerador de erosões em canal ou vertentes, que incluem intersulcos e erosão linear – e subsuperficial, bem como à erosão costeira e de margens de rio (BLANCO; LAL, 2008; ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

A precipitação, a cobertura vegetal, a topografia e as propriedades do solo determinam a seriedade da erosão do solo a partir da erosão hídrica. A quantidade, intensidade e frequência da precipitação, bem como a velocidade, tamanho e distribuição dos tamanhos das gotas de chuva, influenciam na capacidade erosiva da chuva. A cobertura vegetal, por sua vez, pode reduzir a erosão por interceptação, absorção e redução da energia das gotas de chuva pelas folhas e pelo aumento da resistência mecânica do solo pelas raízes. Entretanto, essas condições dependem da altura e continuidade das copas das árvores, bem como da densidade da cobertura, visto que as gotas de chuvas interceptadas podem se unir e alcançar o solo com maior diâmetro e potencial erosivo. A topografia determina a velocidade do escoamento da água, sendo maior quando a declividade é mais elevada. Destaca-se, ainda, que o formato convexo da encosta é mais facilmente erodido. Quanto às propriedades do solo, tem-se que a textura, estabilidade dos agregados, resistência ao cisalhamento, capacidade de infiltração e conteúdo orgânico e químico são significativos na erodibilidade do material (BLANCO; LAL, 2008).

De acordo com estudo de Dube et al. (2020), que analisaram dados de 769 feições erosivas lineares no mundo, foi observado que as características climáticas – especialmente precipitação média anual e temperatura –, textura e uso do solo controlam a morfologia das erosões. As feições mais largas foram associadas com condições de clima intertropical, ao passo que feições estreitas e longas ocorreram em áreas de solo denso e argiloso. Áreas cujo solo era arenoso apresentaram feições profundas e extensas. Além disso, o uso do solo para plantações e urbanização foi relacionado ao aumento do tamanho das feições erosivas em relação a áreas florestadas ou de pastagens.

O impacto das gotas de chuva é o principal processo responsável pela desagregação das partículas do solo, uma vez que causa a ruptura dos agregados e reduz suas dimensões – o que diminui a energia necessária para seu transporte. Também ocorre o *splash*, ou salpicamento, correspondente ao lançamento das partículas mais finas para fora da área impactada pela gota de chuva. Ao longo do tempo da chuva, essas partículas preenchem os poros da superfície do solo, formando crostas que selam a área afetada, contribuindo com o aumento da taxa de

escoamento superficial e transporte principalmente das partículas mais finas, como ocorre com frequência com a fração silte (GUERRA et al., 2007; ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

A erosão intersulcos ocorre nas áreas entre os canais de uma vertente ou talude escavado, geralmente em microcanais com fluxo difuso. A erosão linear ocorre devido à concentração do escoamento superficial em canais na superfície, de modo que a velocidade, a profundidade e a tensão de cisalhamento são maiores em relação ao escoamento em intersulcos. A sua ocorrência pode ser na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, em ordem crescente de dimensões e complexidade (ROTTA; ZUQUETTE, 2015).

Além do escoamento superficial, o escoamento subsuperficial colabora com o desenvolvimento da erosão linear, resultando no *piping*. O *piping* consiste no processo de abertura de canais em subsuperfície, com dimensões centimétricas a métricas, que removem e transportam material subsuperficial, podendo culminar no colapso do solo sotoposto (GUERRA, 2017). Sua origem está relacionada com o retardamento abrupto da infiltração por uma camada de solo menos permeável, o que facilita o fluxo lateral subsuperficial (DUBE et al., 2020).

4.1.3 Voçorocas

A formação de voçorocas consiste na forma mais complexa e evoluída de erosão linear, na qual ocorre concentração de fluxo de água por escoamento em canais que, ao longo do tempo, aumentam tanto em profundidade quanto em largura. No caso das voçorocas, sua evolução é relacionada com as águas superficiais e tem contribuição de águas subsuperficiais (POESEN et al., 2003; BLANCO; LAL, 2008; ROTTA; ZUQUETTE, 2015). O seu desenvolvimento ocorre quando a tensão de cisalhamento do escoamento da água é superior à tensão de cisalhamento crítica do solo – influenciada pela textura do solo, densidade, conteúdo de argila, razão de dispersão, além de características da topografia, uso e cobertura do solo (BLANCO; LAL, 2008).

As propriedades do solo que afetam a sua erodibilidade incluem principalmente a textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica e argila, propriedades hidráulicas e saturação do solo. A textura do solo é relacionada com as proporções de diferentes tamanhos de sedimentos, que controlam o tamanho e a conectividade dos poros, também influenciados pelo conteúdo de argila, matéria orgânica e cimentação. A porosidade e permeabilidade do solo, relacionadas com a estrutura do solo – isto é, o arranjo das partículas –, definem se há favorecimento à infiltração ou escoamento. Quando o solo favorece o escoamento, propicia-se o processo erosivo. Além disso, a erodibilidade também depende das características dos

agregados – estabilidade, resistência, densidade, capacidade de infiltração e absorção de água. Quanto maior a coesão do material, mais dificilmente ocorre o destacamento de suas partículas (BLANCO; LAL, 2008).

A topografia é um fator importante no desenvolvimento das voçorocas, uma vez que a velocidade do escoamento superficial é maior quando o relevo é mais montanhoso, com declividades mais acentuadas e maior comprimento de rampa. A presença de áreas impermeabilizadas por processos como o encrostamento do solo, por impedirem a infiltração, também contribuem para o aumento do escoamento superficial. A existência de padrões estruturais no material geológico, como fraturas e falhas, pode levar à maior facilidade de desagregação do solo e rocha, visto que esses elementos têm menor resistência contra os processos de intemperismo. Além disso, também é favorecido o desenvolvimento de concavidades que concentram o fluxo de água, acelerando o destacamento e transporte das partículas (LAL, 2001; POESEN et al., 2003; VALENTIN et al., 2005; BLANCO; LAL, 2008; FORNASARI FILHO; FARIA, 2018).

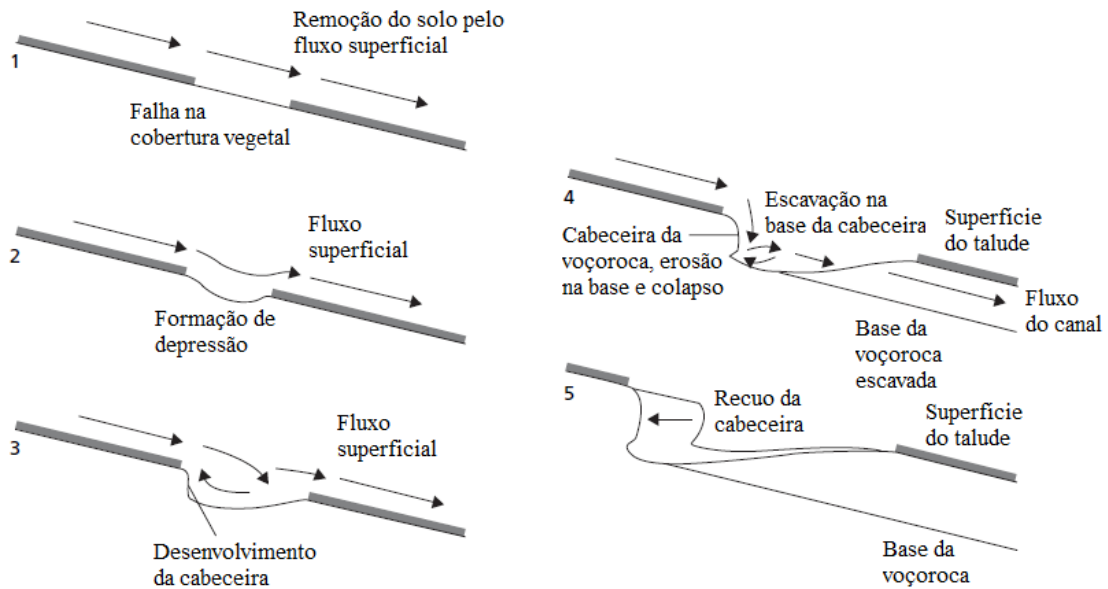
As mudanças no padrão de uso e cobertura do solo também aceleram os processos naturais de erosão, principalmente quando há mau uso do solo, desmatamento, construção de estradas de terra sem sistema de drenagem, produção excessiva e práticas inadequadas na agricultura e pecuária. Essas atividades modificam as características do meio e favorecem o encrostamento, produção de fluxo superficial e intensificação da erosão linear – chegando ao estágio de voçoroca (POESEN et al., 2003; VALENTIN et al., 2005; REAL, 2019).

A cobertura vegetal atua como uma barreira física, interceptando as gotas de água da chuva, diminuindo a energia cinética do impacto e salpicamento (BLANCO; REAL, 2008). As maiores reduções de velocidade ocorrem quando a cobertura vegetal é densa e espacialmente uniforme (MORGAN, 2005). Quando o solo é exposto, ele fica mais vulnerável à ação dos agentes erosivos. Assim, a erosão é favorecida, desde o destacamento das partículas, até o transporte e deposição, pois a energia do sistema é maior.

De acordo com Morgan (2005), o processo de desenvolvimento das voçorocas em áreas vegetadas é iniciado pela formação de pequenas depressões na vertente, devido a falhas na cobertura vegetal, que expõem a superfície do solo à erosão hídrica. O processo é ilustrado pela

Figura 1.

Figura 1 – Desenho esquemático da formação de voçorocas em áreas vegetadas.



Fonte: Modificado de Morgan (2005).

Assim, o solo é exposto à ação da água da chuva na forma de gotas de chuva e escoamento superficial. A água se concentra nessas depressões e as alarga, de modo que várias depressões são unidas e é formado um canal incipiente. Então, a erosão se concentra nas cabeceiras, onde são desenvolvidas escarpas. Há retirada de sedimento principalmente da base da cabeceira, resultando no aprofundamento do canal e desestabilização da escarpa (*undermining*), levando ao colapso. O fluxo subsuperficial, representado por *piping* ou túneis, que ocorre quando a erosão corta o nível potenciométrico, também tem papel fundamental no desenvolvimento de voçorocas (MORGAN, 2005).

A bacia do Córrego do Palmital é fortemente afetada pela presença de voçorocas, sobretudo pela exposição de cambissolos a partir da perda de áreas cobertas por latossolos (de erodibilidade baixa) devido às más práticas de uso do solo. Uma das voçorocas da área é apresentada na Figura 2, na qual se destaca a dimensão da feição erosiva, que se desenvolve ao lado de estrada de terra e pastagem (REAL, 2019).

O Cambissolo apresenta silte e areia fina, matéria orgânica e pH baixo, que são relacionados a menor coesão e erodibilidade alta (REAL, 2019). Com a sua exposição à ação da chuva, são facilmente erodidos e contribuem com a rápida evolução de voçorocas, tanto em forma quanto em tamanho.

Figura 2 – Voçoroca próxima à nascente da bacia do Córrego do Palmital, em Nazareno (MG), com destaque à estrada de terra (seta vermelha) e presença de gado em pastagem (seta branca).



Fonte: Modificado de Real (2019).

De acordo com Real et al. (2020a), a vegetação nas cabeceiras de algumas voçorocas foi efetiva ao restringir seu crescimento. Além disso, a vegetação no interior de voçorocas (Figura 3) pode colaborar com o controle de flutuações no nível d'água e funcionar como obstáculo na movimentação de partículas de solo. As práticas mecânicas de sistemas de drenagem e bioengenharia também podem aumentar a estabilidade das feições erosivas.

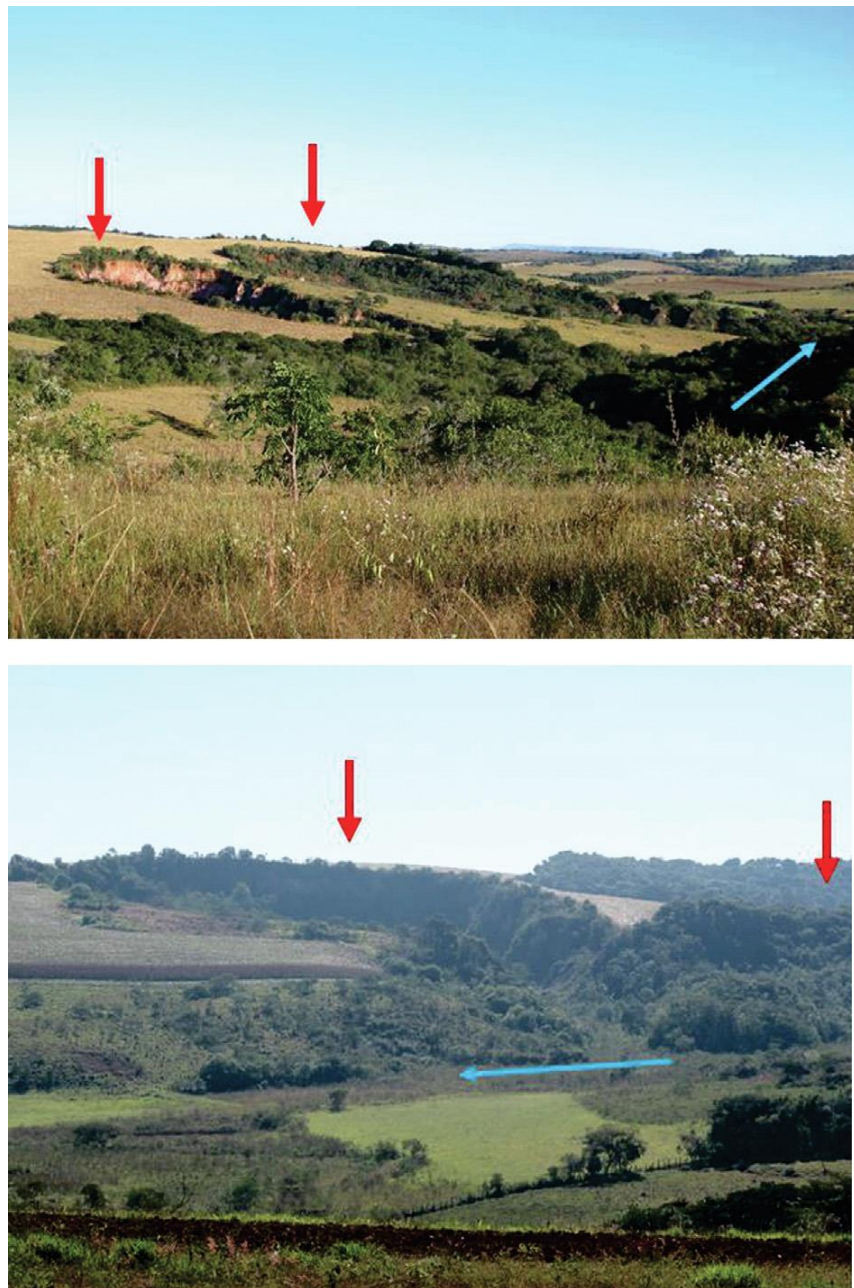
Figura 3 – Voçoroca estabilizada devido à vegetação em seu interior.



Fonte: Real (2019).

Real et al. (2020b) observaram que há conexão entre as voçorocas, provavelmente devido ao fluxo subterrâneo durante seu desenvolvimento ou conexões entre os cursos d'água na bacia hidrográfica, conforme a Figura 4. Portanto, propuseram o conceito de complexo de voçorocas, ao invés de lidar com as voçorocas individualmente quando da elaboração de projetos de recuperação destas áreas, de modo a obter melhores resultados na estabilização das feições erosivas.

Figura 4 – Voçorocas conectadas a outras voçorocas (indicadas por setas vermelhas) por meio de cursos d'água (setas azuis) na bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Real et al. (2020b).

4.1.4 Perda de solo

A perda de solo ocorre quando há o uso do solo além da capacidade do meio, que pode resultar na retirada da camada superficial do solo por erosão intersulcos, ou laminar (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010), ou mecanicamente pelo uso antrópico (agricultura, pecuária, mineração e urbanização, por exemplo). Além disso, feições erosivas lineares também contribuem para a perda de camadas subsuperficiais do solo, visto que há escavação do solo devido à ação da água. Nesse contexto, voçorocas são responsáveis pela perda de grandes volumes de solo (IWASA; PRANDINI, 1980).

A modelagem da perda de solo é essencial para realizar inventários da erosão dos solos, entender os mecanismos dos processos erosivos, prever onde e quando a erosão ocorrerá, bem como as taxas de escoamento e erosão, de modo a colaborar com a identificação e escolha de medidas adequadas para o controle da erosão, como as práticas conservacionistas (BLANCO; LAL, 2008; SILVA, 2008).

De acordo com Wischmeier e Smith (1965), um dos modelos de erosão do solo é a Equação Universal de Perda de Solo (em inglês, *Universal Soil Loss Equation – USLE*), que é representada pela Equação 1.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \text{ (Eq. 1)}$$

Onde, A = erosão do solo por unidade de área e unidade de tempo; R = fator de erosividade da chuva; K = fator de erodibilidade do solo; LS = fator do terreno (comprimento e gradiente da declividade); C = fator da cobertura vegetal; P = fator das medidas de controle.

Esta equação foi posteriormente revisada, culminando na Equação Universal de Perda de Solo Revisada (em inglês, *Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*), na qual os fatores L e S se tornaram o fator LS, assim como os fatores C e P se tornaram o fator CP na nova equação. Assim, a equação pôde ser aplicada em áreas maiores, como as bacias hidrográficas (SILVA, 2008).

A erosão é calculada como a perda de solo anual média (A), geralmente representada por t/ha.ano. Depende, portanto, da erosividade, erodibilidade, topografia e dos fatores de uso e cobertura do solo e técnicas conservacionistas aplicadas.

A erosividade (R) consiste na capacidade do agente erosivo, considerando o nível da energia total, destacar e transportar partículas (ROTTA; ZUQUETTE, 2015). Considera-se a erosividade da chuva, que é quantificada em termos de energia devido ao impacto das gotas de chuva e a taxa de arraste do solo resultante do escoamento superficial. Este fator é expresso em

MJ.mm/ha.h.ano (SILVA, 2008). As médias de precipitação podem ser obtidas a partir de dados históricos de pluviometria, disponível em bancos de dados como o BDMEP/INMET.

A erodibilidade corresponde à facilidade da desagregação de determinado material geológico frente à ação erosiva (ROTTA; ZUQUETTE, 2015). A erodibilidade pode variar de acordo com a textura do solo, a estabilidade dos agregados, a força de cisalhamento, a capacidade de infiltração e o conteúdo orgânico e químico do material. O índice de erodibilidade (K) é definido pela perda de solo anual média por unidade de área, considerando solo exposto e sem práticas conservacionistas (MORGAN, 2005).

Silva¹ (1997 apud Beskow et al. 2009) indicou que a erodibilidade do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) é de 0,010 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, valor adotado no estudo de predição da erosão do solo na bacia do rio Grande realizado por Beskow et al. (2009). Silva et al. (2009) estudaram a erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo em Lavras (MG). Os autores concluíram que os valores de erodibilidade do Cambissolo háplico Tb distrófico (CXbd) é de 0,0355 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, e do Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf) é de 0,0032 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹. Uma vez que a bacia do Córrego do Palmital é uma das sub-bacias da bacia do Alto Rio Grande, e estes solos (Latosolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos) também são encontrados na região, podem ser considerados estes valores de erodibilidade dos solos.

Os fatores do terreno consistem no comprimento da vertente (L) e declividade (S) e são combinados em um único índice, da razão de perda do solo em determinada declividade e comprimento de vertente, considerando como padrão uma parcela unitária de 25 m de comprimento e 9% de declive. Este cálculo pressupõe que a forma da vertente é retilínea, o que resulta na subestimação da perda de solo em declives convexos e superestimação quando o declive é côncavo. Porém, é possível englobar as formas côncava ou convexa da vertente modificando o valor da declividade utilizado. Isto é, quando a forma é côncava, emprega-se o grau de declividade da parte superior a partir do ponto onde se inicia a deposição – que, neste caso, ocorre na parte inferior (MORGAN, 2005; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Os fatores R, K e LS da equação são concernentes a áreas que se mantêm permanentemente expostas e, portanto, totalmente vulneráveis à ação dos agentes erosivos. Entretanto, quando a área possui cobertura vegetal, a dinâmica para a perda de solo é alterada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010). Por isso, nestes casos, é necessário considerar os

¹ SILVA, M.L.N. **Erosividade da chuva e proposição de modelos para estimar a erodibilidade de Latossolos brasileiros**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 1997.

fatores C (uso e manejo do solo) e P (práticas conservacionistas), que acrescentam as mudanças do uso e cobertura do solo nos atributos do modelo.

O fator C é correspondente à relação do uso e manejo do solo e considera a relação de perda de solo entre uma área descoberta e uma área com cultivo. É medido o efeito combinado do preparo do solo, plantio e cultivo de culturas (continuamente ou em rotação com outras) e da remoção ou incorporação dos resíduos das culturas sobre o solo. Também é avaliada a relação com as chuvas na área (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

As classes de uso e cobertura do solo encontradas na bacia do Córrego do Palmital foram: área urbana e estrada pavimentada, estrada de terra, voçoroca, solo exposto, pastagem nativa (campo), cafezal, agricultura temporária (cultura de milho e soja), pastagem, floresta, reflorestamento e água. Além disso, a classe de mata ciliar foi considerada em uma das simulações de cenários da modelagem. Portanto, foi necessário realizar busca na literatura a respeito dos valores de fator C atribuídos a estas classes, conforme se observa na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de fator C encontrados na literatura para as classes de uso e cobertura do solo da bacia do Córrego do Palmital.

Classe de uso e ocupação do solo	Fator C	Adotado por
Área urbana e estrada pavimentada	0,85	Marques et al. (2003)
Estrada de terra	0,15	Azevedo (2017)
	0,25	Azevedo (2017)
Solo exposto	1,00	Tavares (2001), Farinasso et al. (2006), Oliveira et al. (2014), Rodrigues et al. (2017), Duarte (2018) e Mota e Silva et al. (2021)
	0,013	Azevedo (2017)
Pastagem nativa (Campo)	0,001	Santos et al. ² (1999 apud Beskow et al. 2009) e Oliveira et al. (2014)
	0,008	Menck (1993)
	0,00004	Cavalieri (1998) e Tavares (2001)
	0,00010	Weil (1999)
	0,00040	Cerri (1999) e Fujihara (2002)
Floresta	0,00100	Silva (2008)
	0,01000	Ruhoff et al. (2006), Beskow et al. (2009), Oliveira et al. (2014), Rodrigues et al. (2017) e Mota e Silva et al. (2021)
	0,05020	Ito (1998)
Reflorestamento	0,0010	Weill (1999)
	0,0030	Tomazoni e Guimarães (2005)
	0,0491	Cavalieri (1998) e Tavares (2001)

Continua

² SANTOS, I.; KRÜGER, C.M.; LEVIS, M.; GARCIA, K.S. Avaliação de perdas de solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Ivaí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999. *Anais* [...], Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. p. 1-20.

Classe de uso e ocupação do solo	Fator C	Adotado por
	0,0001	Weill (1999)
Mata ciliar	0,0008	Tavares (2001)
	0,0120	Farinasso et al. (2006)
Água	0	Bertoni e Lombardi Neto ³ (1990 apud CERRI, 1999), Farinasso et al. (2006), Silva et al. (2008), Oliveira et al. (2014), Rodrigues et al. (2017), Duarte (2018) e Mota e Silva et al. (2021)
	0,021	Silva (2008)
Cafezal	0,04	Fujihara (2002)
	0,0887	Cavalieri (1998)
	0,1350	Cerri (1999)
	0,0827	Cerri (1999)
	0,1063*	Ito (1998)
	0,10654	Silva (2008)
Agricultura temporária (cultura de milho e soja)	0,1345	Tavares (2001)
	0,1957**	Ito (1998)
	0,2013***	Cavalieri (1998)
	0,29	Ruhoff et al. (2006), Beskow et al. (2009), Oliveira et al. (2014), Rodrigues et al. (2017) e Mota e Silva et al. (2021)
	0,001	Menck (1993) e Cavalieri (1998)
	0,0075	Tavares (2001), Oliveira et al. (2007) e Beskow et al. (2009)
	0,008	Weill (1999)
Pastagem	0,01	Ito (1998), Cerri (1999) e Tomazoni e Guimarães (2005)
	0,016	Silva (2008)
	0,055	Tomazoni e Guimarães (2005)
	0,09	Ozsoy et al. (2012), Oliveira et al. (2014), Rodrigues et al. (2017) e Mota e Silva et al. (2021)
	0,2	Marques et al. (2003)

*Apenas milho, **Apenas soja, ***50% milho, 30% soja, 10% algodão.

Os valores de fator C foram adotados dependendo da coerência na área de estudo e das relações entre si. Isto é, os valores mais próximos de 1,00 indicam uso e ocupação do solo que mais o expõe à ação dos agentes erosivos. Assim, o solo exposto e voçorocas têm valor 1,00. Por outro lado, quanto mais próximos de 0,00, menos se considera a contribuição da classe para a dinâmica da erosão na modelagem. Por isso, corpos d'água têm valor 0,00 e florestas têm valor próximo de zero.

³ BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Icone, 1990. 335 p.

O fator P depende das práticas conservacionistas aplicadas, que podem ser de plantio morro abaixo, plantio em contorno, alternância de campinas + plantio em contorno e cordões de vegetação permanente (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010). Os valores de P são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores do fator P, referente às práticas conservacionistas.

Práticas conservacionistas	Valor do fator P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno (curvas de nível)	0,5
Alternância de campinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (2010).

As mudanças no uso e manejo do solo e aplicação de práticas conservacionistas de forma adequada podem contribuir com a diminuição da perda de solo em áreas produtivas. Dessa forma, é importante que seja compreendido o contexto atual da área de estudo e, ao comparar com os valores de tolerância de perda do solo, identificar as medidas a serem aplicadas para a melhoria das condições da área frente aos processos de degradação do solo.

Beskow et al. (2009) realizaram a modelagem da erosão do solo na bacia do Rio Grande, aplicando a USLE com GIS PCRaster. Concluiu-se que aproximadamente 53% da bacia tem perda de solo anual de menos de 5 t/ha.ano e que 48,95% da bacia apresentou perda de solo maior que o tolerável presumido para cada tipo de solo na bacia. A maior parte dos solos tem vulnerabilidade para erosão, declividade e fator de erosividade altos. A cobertura do solo e as práticas conservacionistas podem reduzir os processos erosivos; portanto, áreas desmatadas apresentaram valores de perda de solo mais críticos.

Batista et al. (2017) modelaram as perdas de solo e produção de sedimento na bacia do Alto Rio Grande por meio da aplicação da RUSLE. A área, de cerca de 15.705 km², apresentou perda de solo média de 22,35 t/ha.ano e produção de sedimentos de 1,93 t/ha.ano, sendo as maiores razões de erosão relacionadas com solo exposto, eucalipto e agricultura. Com a calibração do modelo, obteve-se erro de 0,6%, o que possibilitou aos autores a indicação da abordagem para a análise de transporte de sedimento em bacias hidrográficas brasileiras, que possuem poucas informações disponíveis.

4.2 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Segundo a Enciclopédia Britânica Acadêmica (2020), SIG é acrônimo para Sistema de Informação Geográfica, sendo um sistema computacional que realiza análises geográficas. O SIG é composto por quatro componentes que interagem entre si, os quais realizam: a) Digitalização, isto é, conversão para a forma digital de mapas e outros dados espaciais; b) Armazenamento e recuperação de dados; c) Análise; e d) Produção de mapas, tabelas e demais documentos cartográficos, bem como consultas a informações geográficas.

Em ambiente SIG, os dados espaciais digitais podem ser apresentados de duas formas principais: vetorial (dados discretos) e matricial (dados contínuos). Os dados vetoriais representam os elementos por listas ordenadas de coordenadas x e y; ao passo que, para os dados matriciais (*raster*), cada elemento da malha (grid) possui um valor, sendo seu conjunto codificado na forma de matriz (AUGUSTO FILHO, 2015).

Os SIGs são importantes ferramentas para o gerenciamento e análise de informações diversas, dependentes do espaço no qual estão inseridas, sendo essenciais em trabalhos geotécnicos, sejam eles de natureza preventiva ou corretiva (AUGUSTO FILHO, 2015). Diversos trabalhos utilizam os SIGs em variadas etapas de suas execuções, como a obtenção de dados ambientais preliminares da área de estudo, edição e avaliação de dados existentes e geração de novas informações espaciais. Um exemplo disso são os trabalhos de Costa (2001), Araujo (2011), Arruda (2012), Sampaio et al. (2013), Castillo et al. (2014), Sampaio (2014), Boardman (2016), Albuquerque e Tavares (2018), Golosov et al. (2018), Liu et al. (2018), Soares (2018), Garosi et al. (2019), Real (2019), Pascoto (2020), Arabameri et al. (2021), Soleimanpour et al. (2021) e Yan et al. (2021).

Costa (2001) e Soares (2018) utilizaram SIG na elaboração de mapas e cartas da Região Metropolitana de Belém, aplicando cartografia geotécnica. Costa (2001) gerou mapas de documentação, declividade, geologia, materiais inconsolidados, faixas de proteção permanente dos corpos d'água, áreas institucionais e unidades de conservação, áreas de várzea e terra firme e uso do solo; e cartas de áreas preferenciais à exploração de materiais naturais de construção e à instalação de aterro sanitário. Soares (2018) gerou mapas de área urbana e expansão urbana, terra firme e várzea, áreas institucionais e de proteção ambiental, equipotenciométrico do aquífero livre, bacias e microbacias hidrográficas e direção do vento, bem como cartas de áreas preferenciais à instalação de aterros sanitários e cemitérios.

Araujo (2011) aplicou SIG no inventário de feições erosivas e elaboração de mapas de modelo digital do terreno, declividade e direção de fluxo no estudo de erosões lineares em São

Pedro (SP). Arruda (2012) utilizou *softwares* de geoprocessamento para fins de mapeamento geomorfológico da Folha Ouricuri – Pernambuco, destacando-se a representação de variáveis de altimetria e declividade, retiradas de imagem de radar SRTM, em ambiente SIG; além da fotointerpretação de fotografias aéreas por estereoscópio de espelho e por anaglifos elaborados no *software* AnaMaker 3D – Anaglyph Maker. Albuquerque e Tavares (2018) utilizaram anaglifos e SIGs para avaliar impactos ambientais de cava de mineração de calcário em Piracicaba (SP). Yan et al. (2021) aplicaram o *Google Earth Engine* no monitoramento de desastres ambientais na qualidade ecológica de áreas altamente susceptíveis em Danba, na província de Sichuan (China), de 1995 a 2019.

Boardman (2016) ressaltou a importância do *software* Google Earth™ no mapeamento de erosões, em estudo de caso no sul da Inglaterra. As vantagens da aplicação do programa incluem a facilidade e gratuidade de acesso e operação. Ao comparar mapeamentos utilizando as imagens do Google Earth com levantamentos baseados em fotografias aéreas, tem-se resultados adequados. Destaca-se também a possibilidade de encontrar locais que não foram identificados em investigações de campo. Dessa forma, principalmente feições erosivas persistentes podem ser mapeadas com este tipo de imagem. Entretanto, a periodicidade das imagens disponíveis não possui intervalo temporal padrão, o que pode dificultar a análise temporal da área.

Castillo et al. (2014) propuseram um método automatizado para mapeamento de voçorocas, denominado método topográfico normalizado, o qual se baseou no processamento de dados do modelo digital de elevação em ambiente SIG. Liu et al. (2018) aplicaram imagens do Google Earth combinadas com informações de terreno extraídas do ASTER GDEM para investigar a viabilidade de fontes de dados abertos no mapeamento de voçorocas de grande escala. Foram consideradas informações espectrais, de textura e geometria para a delimitação de voçorocas. A classificação automática teve acurácia de 78,80%, indicando que a metodologia foi efetiva e é viável para este tipo de levantamento.

O estudo de Golosov et al. (2018) utilizou fotografias aéreas e imagens de satélite de alta resolução no mapeamento (em SIG) e avaliação espaço-temporal da densidade de voçorocas na região de Volga, na Rússia. Garosi et al. (2019) elaboraram quatro modelos de aprendizado de máquina para criar mapas de suscetibilidade a erosão por voçorocas no leste do Irã, considerando os atributos topográficos, uso e ocupação do solo, propriedades do solo, geologia e distância de rios e estradas em ambiente SIG. Pascoto (2020) utilizou SIG na

especialização das feições erosivas e na elaboração de mapas dos fatores de influência dos processos erosivos em São Manuel (SP).

Arabameri et al. (2021) utilizaram modelos digitais de elevação na avaliação de variáveis topográficas na modelagem de colapsos por piping e ravinamento. Foram aplicados MDE dos satélites *Advanced Land Observation* (ALOS), ALOS World 3D-30m e *Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) em diferentes resoluções. Os condicionantes para o desenvolvimento de erosões do tipo voçoroca foram: elevação, declividade, aspecto, índice de convergência (CI), índice multi-resolução do nivelamento do fundo de vale (MRVBF), distância do canal (DtS), curvatura do plano (PC), curvatura do perfil (PrC), textura da superfície do terreno (TST), índice de posicionamento topográfico (TPI), índice topográfico de umidade (TWI), densidade da drenagem (DD), cobertura do uso do solo (LULC), precipitação e litologia.

Foi realizada uma avaliação comparativa da modelagem preditiva de erosões utilizando modelos estatísticos e de aprendizado de máquina na bacia hidrográfica de Chaheynee, na província Fars, sul do Irã. Neste estudo, utilizou-se imagens do Google Earth e dados de campo de 177 voçorocas para inventário de voçorocas e elaboração de mapas temáticos dos condicionantes. A modelagem da susceptibilidade de ocorrência de voçorocas considerou variáveis como a elevação, declividade, aspecto, curvatura em plano e perfil, geologia, densidade da drenagem, índice topográfico de umidade, precipitação, uso do solo e distâncias de falhas, rios e estradas (SOLEIMANPOUR et al., 2021).

A bacia do Córrego do Cafundão, em Nazareno (MG) foi estudada por Sampaio et al. (2013), que utilizaram SIG e índices morfométricos na elaboração de carta topográfica e mapas de hipsometria, declividade e geologia da área, de modo a avaliar a problemática dos processos erosivos na bacia. Sampaio (2014) elaborou mapas em SIG para o levantamento e análise da bacia do Córrego do Cravo, no município de Nazareno (MG), bem como realizou ensaio em laboratório e propôs técnica de macrodrenagem na bacia de contribuição da voçoroca do Córrego do Cravo.

Real (2019), Real et al. (2020a) e Real et al. (2020b) aplicaram SIG no estudo da evolução espaço-temporal de voçorocas na bacia do Córrego do Palmital, em Nazareno e Conceição da Barra de Minas (MG). Observou-se alargamento das voçorocas, mas as mudanças de forma e tamanho das feições não foram facilmente identificadas nas imagens de satélite, principalmente devido à presença de cobertura vegetal, sendo necessária a confirmação em campo. Além disso, foram realizadas análises fractal, multifractal e de lacunaridade em escalas

diferentes. Ao identificar a interconexão das voçorocas, foi proposta classificação como “complexo de voçoroca” na análise dos processos erosivos na bacia.

Diversas técnicas foram aplicadas em SIG para o levantamento de feições erosivas, como as voçorocas, em fotografias aéreas e imagens de satélite. Entretanto, persiste a limitação da dificuldade de delimitação das bordas das voçorocas a depender da presença de vegetação ou outras coberturas. A observação das imagens em 3D, utilizando anaglifos, pode ser uma solução para aprimorar o levantamento em SIG, uma vez que adiciona profundidade na análise das imagens, facilitando a identificação de erosões de grande porte.

4.2.1 Anaglifos

A estereoscopia é amplamente utilizada em atividades de geologia e geomorfologia, de forma a caracterizar áreas por meio de padrões texturais em imagens capturadas da área de interesse. Usualmente, são utilizados pares de fotografias capturadas por aerolevantamentos, sendo as imagens capturadas com certa diferença de deslocamento, de forma a permitir sua sobreposição com auxílio de um aparelho estereoscópio. Assim, é possível visualizar tridimensionalmente a área de estudo, permitindo outras análises além das que são possíveis por meio da visualização em duas dimensões.

A busca de alternativas à metodologia de estereoscopia com duas fotografias posicionadas lado a lado e aparelho estereoscópico ocorre há mais de um século, a exemplo da proposta de Watch (1895) da utilização de anaglifo como um novo método de produção do efeito estereoscópico.

O anaglifo, patenteado em 1891 por Louis Ducos du Hauron (ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA, 2019), é baseado nos princípios de que um objeto, se observado através de meio transparente de cor primária, será visto quase transparente; e, se observado através de meio transparente de cor complementar, será visto quase preto. Para que o anaglifo opere, assim como na estereoscopia clássica, deve-se ter visão binocular, para que as imagens recebidas em cada retina sejam processadas pelo sistema visual, de forma a perceber a imagem com efeito estereoscópico.

O anaglifo é gerado ao imprimir uma composição por sobreposição de imagens de determinado objeto nas cores vermelho e azul, por exemplo, e utilização de aparelho com uma lente vermelha e uma azul. Assim, por meio da lente azul, a imagem impressa em vermelho será praticamente preta, ao passo que a imagem impressa em azul será praticamente

transparente. Em contraponto, através da lente vermelha, pode-se visualizar em preto a imagem impressa em azul e, praticamente transparente, a imagem em vermelho (WATCH, 1895).

Centeno e Silva Junior (2015) propuseram metodologia alternativa para elaboração de anaglifos de áreas de interesse para mapeamento, utilizando os *softwares* Google Earth Pro e Zoner Photo Studio. Este método consiste na obtenção de pelo menos duas imagens da área de estudo no *software* Google Earth, as quais são reunidas no *software* Zoner Photo Studio como imagem em 3D, sendo possível visualizar tridimensionalmente com auxílio de um par de óculos bicolores (vermelho e azul). Assim, tem-se melhor visualização de imagens de satélite, adicionando-se a noção de profundidade, de modo a facilitar a delimitação de unidades ou elementos nas imagens.

A técnica de geração de anaglifos é simples, podendo ser realizada em minutos, e possibilita a realização de análise estereoscópica de áreas variadas – inclusive de difícil acesso –, sem haver necessidade de obtenção de fotografias aéreas. Assim, por utilizar *softwares* gratuitos ou de licenças com menor custo (mantendo a qualidade sem comprometer os resultados), há diminuição considerável nos gastos relativos a esta etapa do trabalho (CENTENO; SILVA JUNIOR, 2015). Outras vantagens do uso de anaglifos incluem a possibilidade de observar detalhes em maior escala ao aumentar o zoom da imagem, e de mais de uma pessoa analisar a imagem ao mesmo tempo. Também é possível ajustar a imagem para compreender as coordenadas da área de estudo (EBERT, 2015).

Silva et al. (2017) aplicaram a estereoscopia digital no ensino de mapeamento geológico. Os anaglifos foram elaborados a partir de imagens do Google Earth PRO no *software* Zone Photo Studio v.18. Para a visualização das áreas de estudo em três dimensões no *software* ArcGIS, foi necessário compor os anaglifos em azul e vermelho, georreferenciá-los e utilizar óculos bicoloridos. O levantamento é ilustrado na Figura 5.

Os anaglifos possuem diversas aplicabilidades no contexto de investigações ambientais que necessitam da noção de profundidade para melhores resultados, como o mapeamento de processos erosivos e movimentos de terra. Por exemplo, Chen e Chen (2012) utilizaram imagens de alta resolução processadas para se tornar anaglifos, que colaboraram com a percepção de profundidade e determinação de direções de deslizamentos. Também foi observada melhora na compreensão de mecanismos de falha que provocam deslizamentos em encostas. É ainda sugerido que o método pode ser usado em realidade virtual para estudos sobre a evolução de terrenos naturais e desenvolvimento de processos erosivos a partir de visão tridimensional da área de estudo.

Figura 5 – Fotointerpretação de anaglifo utilizando estereoscopia digital.



Fonte: Silva et al. (2017).

O uso de estereoscopia a partir de imagens de satélite no levantamento de feições erosivas é possível desde que se satisfaçam as condições de iluminação e limites de largura e profundidade (FIORUCCI et al., 2015). Imwangana et al. (2015) indicaram que voçorocas com pelo menos 5 m de largura podem ser facilmente identificadas em anaglifos. Dimensões menores podem possibilitar a subestimação do número e dimensões das feições erosivas.

Sattar et al. (2010) usaram imagens do Cartosat-1 de 2008, mapas topográficos na escala de 1:20.000, MDE de SRTM nível 2, fotografias aéreas estereoscópicas de 1948 na escala de 1:30.000 e pontos de controle plotados em Sistema de Posicionamento Global (GPS). Foram produzidas imagens orientadas no *software* Image Analysis, e foi gerado o modelo digital de superfície. Com o *software* ArcGIS, na ferramenta *Stereo Analyst*, visualizou-se as imagens de 2008 tridimensionalmente. Além disso, as imagens de 1948 foram ortorretificadas e geradas as visualizações tridimensionais. Dessa forma, a partir de análise baseada em SIG, foram medidas as diferenças volumétricas das voçorocas de 1948 e 2008 na bacia do rio Daly, no norte da Austrália.

Kandrika e Dwivedi (2013) aplicaram imagens estereoscópicas (anaglifos) na delimitação de ravinas em imagens Cartosat-1 no norte da Índia, sendo possível classificá-las em ravinas rasas (menos de 3 m de profundidade e mais de 18 m de comprimento), médias (profundidades entre 3 e 9 metros e comprimento maior que 18 m) e profundas (acima de 9 m de profundidade). Os autores destacaram que as ravinas com menos de 3 metros de profundidade não foram satisfatoriamente delimitadas devido à resolução das imagens e pouco contraste nas planícies aluviais.

Fiorucci et al. (2015), por sua vez, utilizaram dois pares de imagens de satélite estereoscópicas e pancromáticas, de 08/03/2010 do satélite WorldView-1® e de 27/05/2020 do satélite GeoEye-1®, além de 26 pontos de controle. Os pares orientadores foram elaborados no *software* ERDAS IMAGINE e *Leica Photogrammetry Suite* (LPS). As imagens em 3D foram geradas pelo módulo *Stereo Analyst*, e visualizadas com o Planar StereoMirror™, que consiste em dois monitores com display de cristal líquido, orientados em distância angular de 110°. Foi utilizado um espelho na bissetriz do ângulo entre os dois monitores, sendo um lado com revestimento refletivo e o outro com revestimento antirreflexivo, de modo a possibilitar a visualização dos dois monitores ao mesmo tempo com o uso de óculos polarizadores. Um desenho esquemático e uma fotografia da aplicação desta metodologia são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Tecnologia da Planar StereoMirror™ para obtenção de imagem em 3D.



Modificado de Fiorucci et al. (2015).

A aplicação da tecnologia da Planar StereoMirror™ foi eficiente e de custo-benefício adequado na quantificação de voçorocas. Ela também é mais rápida do que campanhas de campo e possibilita mapear as feições erosivas em áreas maiores. Além disso, a utilização desse tipo de imagens permite mapear mais localidades, visto que há maior disponibilidade em relação a fotografias aéreas (SATTAR et al., 2010; FIORUCCI et al., 2015).

Anaglifos de imagens SPOT de 2006 e 2007 em Kinshasa, na República Democrática do Congo, foram utilizados para mapeamento de voçorocas de grandes dimensões por Imwangana et al. (2015). Os autores identificaram 308 voçorocas que somaram comprimento de 94,7 km e apresentaram largura e profundidade médias de 17 e 6 metros, respectivamente.

Kornejady et al. (2022) utilizaram anaglifos elaborados a partir de imagens aéreas da região de Dashtiari, no sudeste do Irã, para mapear voçorocas. Foram utilizados óculos para anaglifos 3DStereo para a delimitação de cerca de 85 ha de voçorocas em área de estudo com 597,7 ha de extensão. A atividade foi realizada em 6 meses, aproximadamente. As feições obtidas foram comparadas com os resultados da aplicação de índices morfométricos e aprendizado de máquina para automatização da extração das formas das voçorocas, que mostraram excelente performance, principalmente considerando o tempo de processamento.

4.3 Serviços Ecosistêmicos

De acordo com MEA (2005), um ecossistema corresponde a um complexo dinâmico de plantas, animais e comunidades de microrganismos e o ambiente não-vivo, que interagem como uma unidade funcional.

Os serviços ecosistêmicos consistem nos fluxos de materiais, energia e informações do capital natural, combinados com os serviços de capital humano e manufaturados. Isto é, são os benefícios obtidos de ecossistemas (CONSTANZA et al., 1997; MEA, 2005).

MEA (2005) classificou os serviços ecosistêmicos em diferentes tipos:

- a) Serviços de provisão, os quais fornecem produtos que incluem comida, água, madeira, fibras, combustível;
- b) Serviços de regulação, aqueles que regulam processos naturais, como o clima, inundações, doenças, resíduos e água;
- c) Serviços culturais, que incluem benefícios de teores recreativo, educacional, estético e de espiritualidade;
- d) Serviços de suporte, que permitem a ocorrência de processos tais como a formação do solo, a fotossíntese e os ciclos de nutrientes.

A agricultura atua tanto como fornecedora quanto demanda serviços ecosistêmicos, sendo incluídos os serviços de provisão, regulação e culturais. Como demandas, tem-se a regulação do clima e do ar, provisão de água e solo, polinização, regulação de pestes e diversidade genética. Como serviços fornecidos, pode-se citar estética, recreação, alimento e fibras, sequestro de carbono e conservação de biodiversidade. Entretanto, a depender das práticas de manejo, podem ser geradas doenças e pestes, poluição da água, emissão de gases do efeito estufa, assoreamento de cursos d'água, perda de nutrientes, odores, riscos à saúde e perda de biodiversidade (SWINTON et al., 2007; POWER, 2010).

A compactação e a contaminação do solo, a redução da fertilidade do solo, da biodiversidade, e do estoque de carbono, bem como a fragmentação da vegetação e os processos erosivos consistem nas principais pressões que afetam os serviços ecossistêmicos do solo (PRADO et al. 2016). Com as pressões sobre o capital natural e os serviços ecossistêmicos, eles podem se tornar mais escassos, e seus valores econômicos podem aumentar substancialmente (CONSTANZA et al., 1997).

O sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta para avaliação dos serviços ecossistêmicos e para estudos de valoração, em especial quando combinado com dados socioeconômicos, de forma a estabelecer o raciocínio a respeito dos serviços ecossistêmicos em determinada região e melhorar a compreensão sobre as mudanças no meio (BARBOSA et al. 2015).

A valoração dos serviços ecossistêmicos geralmente é realizada a partir da determinação da provisão e determinação do valor monetário, de forma a fundamentar o desenvolvimento de políticas públicas como ferramentas para a gestão dos serviços ecossistêmicos (POLASKY, 2008). Deve-se considerar as práticas biofísicas (aplicadas em áreas cultivadas e demais usos) e trocas econômicas (interações entre produção e demanda) (SWINTON et al., 2007). As mudanças nos serviços ecossistêmicos, em pequena ou larga escala, podem afetar a sua viabilidade, em questão de custos, e seus benefícios, visto que os serviços ecossistêmicos provêm uma porção essencial na contribuição total para o bem-estar da humanidade (CONSTANZA et al., 1997).

4.4 Modelagem

A modelagem consiste na simplificação da realidade, que permite a previsão do comportamento de determinado sistema considerando uma série de condições específicas relacionadas a seu funcionamento (MORGAN, 2005). Os modelos podem ser aplicados em estudos da erosão, simulando a resiliência do solo, escoamento ou razões de perda de solo, por exemplo. Eles possibilitam compreender os processos erosivos; avaliar os impactos na produtividade do solo e qualidade da água e ar em larga escala; identificar as estratégias para controle da erosão; e avaliar a performance das práticas de conservação do solo na redução dos processos erosivos (BLANCO; LAL, 2008; MORGAN, NEARING; 2011).

A aplicação das ferramentas de sensoriamento remoto e SIG contribuiu para o avanço dos modelos de erosão do solo, tornando-os mais efetivos em suas previsões. Os dados de

entrada e os resultados, espacializados em ambiente SIG, também possibilitaram aplicar os modelos em áreas maiores (BLANCO; LAL, 2008).

A modelagem da erosão do solo consiste em um tópico importante na comunidade científica. No entanto, os países situados em regiões tropicais e subtropicais possuem menos estudos sobre a erosão, apesar de serem mais suscetíveis aos processos erosivos. Além disso, as aplicações de modelos globais podem não ser representativas dos condicionantes e causas específicas dos locais de estudo, e os dados de monitoramento podem ser escassos, não permitindo sua utilização para a validação de modelos (BEZAK et al., 2021; BORRELLI et al., 2021).

Como modelos empíricos, podem ser citados a Equação Universal de Perda do Solo (USLE), Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MUSLE) e Equação Universal de Perda do Solo Revisada (RUSLE). Como modelos baseados em processos, tem-se por exemplos: Valoração Integrada de Serviços Ecosistêmicos e Cenários Alternativos (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* – InVEST), Projeto de Predição de Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project* – WEPP), Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (*Soil and Water Assessment Tool* – SWAT) (BLANCO; LAL, 2008; NATURAL CAPITAL PROJECT, 2021a).

CONG et al. (2020) compararam o desempenho dos modelos InVEST e SWAT na determinação dos padrões espaciais, prioridades e *trade-offs* no serviço ecossistêmico hidrológico da bacia do Lago Nansihu, na China. Os autores concluíram que os dois modelos geraram referências similares para a gestão e elaboração de políticas públicas, apesar dos diferentes resultados. O InVEST teve operação mais fácil, visto que requer menor volume de dados de entrada. O SWAT, por ser baseado em processos hidrológicos detalhados, utilizou dados de entrada mais complicados, o que levou à necessidade de mais habilidade e tempo de operação.

4.4.1 InVEST

Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), em tradução livre, “Valoração Integrada de Serviços Ecosistêmicos e Cenários Alternativos”, foi desenvolvido pelo Natural Capital Project (Projeto Capital Natural). O projeto é uma parceria da Universidade de Stanford, Universidade de Minnesota, Academia Chinesa de Ciências, Centro de Resiliência de Estocolmo, The Nature Conservancy (TNC), World Wildlife Fund (WWF), entre outras instituições. O InVEST consiste em um programa aberto e gratuito, que permite avaliar

as relações entre a oferta, o serviço e o benefício oferecidos no que tange aos serviços ecossistêmicos (AZEVEDO, 2017; NATURAL CAPITAL PROJECT, 2021a, 2021b).

Nesse contexto, o InVEST fornece modelos baseados nas funções de produção, considerando que diferentes estruturas e funções do ecossistema implicam em alterações dos fluxos e valores dos serviços ecossistêmicos (HIPÓLITO et al., 2017). Sua aplicação é vantajosa para computar métricas biofísicas e socioeconômicas tanto em contextos de grande ou pouca quantidade de dados (HAMEL et al., 2021).

O InVEST possui módulos com requisitos e aplicabilidades distintas, sendo: carbono, carbono azul costeiro, vulnerabilidade costeira, produção de safra, polinização, pescaria, aquicultura de peixes marinhos, qualidade de habitat, avaliação de risco de habitat, recreação, qualidade cênica, energia eólica *offshore*, energia das ondas, produção de reservatórios de hidrelétricas (produção de água), produção sazonal de água, purificação da água, retenção de sedimentos, resfriamento urbano e mitigação de risco de inundações urbanas (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2021a).

O modelo foi empregado para estudos da avaliação e predição de sequestro de carbono (BABBAR et al., 2021), armazenamento de carbono (HE et al., 2016; ZHAO et al., 2019), provisão de água (SÁNCHEZ-CANALES et al., 2012; LI et al., 2018; YANG et al., 2019), demanda e oferta de água (BOITHIAS et al., 2014), conservação de habitats (MOREIRA et al., 2018), qualidade de habitats (TERRADO et al., 2016; SUN et al., 2019), retenção de nutrientes (REDHEAD et al., 2018), retenção de sedimentos (HAMEL et al., 2015), perda de solo (ZHOU et al., 2019; ANESEYEE et al., 2020; DERAKHSHAN-BABAEI et al., 2021; GASHAW et al., 2021; MARQUES et al., 2021), delimitação de áreas vulneráveis à erosão hídrica (OUGOUGDAL et al., 2020) e avaliação dos impactos das mudanças no uso do solo sobre múltiplos serviços ecossistêmicos (LEH et al., 2013; ARUNYAWAT; SHRESTHA, 2016; SUN et al., 2018; YANG et al., 2018; ABERA et al., 2021; MA et al., 2021).

No Brasil, tem-se alguns exemplos de aplicações do InVEST na avaliação e valoração de liberação de carbono após mudanças no uso do solo e clima na região costeira de São Paulo (PAVANI et al., 2018), serviços de recreação, pescaria e serviços culturais relacionados à pescaria em Fernando de Noronha (OUTEIRO et al., 2019), estoque de carbono em Sergipe entre 1992 e 2030 (FERNANDES et al., 2020), estoque de carbono e mudanças no uso e cobertura do solo na bacia do rio São Francisco (FERNANDES et al., 2021), serviços ecossistêmicos relacionados à água (provisão de água, produção de nutrientes e sedimentos) na bacia do rio Jacaré-Guaçu, em São Paulo (ANJINHO et al., 2022) e impactos das mudanças no

uso e cobertura do solo nas razões de perda do solo e exportação de sedimentos em várias regiões do país (THOMPSON; FIDALGO, 2013; CONCEIÇÃO, 2014; AZEVEDO, 2017; GUGLIELMELI, 2017; RODRIGUES et al., 2021; SAAD et al., 2021; CUNHA et al., 2022).

Para fins de avaliação dos processos erosivos em dada área de estudo, destaca-se o modelo de retenção de sedimentos. Segundo Sharp et al. (2020), o modelo de retenção de sedimentos, ou modelo de exportação de sedimentos (SDR – *Sediment Delivery Ratio Model*), mapeia a geração de sedimentos e o transporte para corpos d'água. Os dados necessários são: modelo digital de elevação (MDE), erosividade da chuva, erodibilidade do solo, uso e ocupação do solo, delimitação da bacia hidrográfica, fator C (fator de uso e manejo do solo) e fator P (fator de práticas conservacionistas). Além disso, deve-se fornecer as constantes: limite de acumulação do fluxo (para estimar o início da acumulação do fluxo e a densidade da rede de drenagem), k_b e IC_0 (parâmetros de calibração), SDR_{max} (máximo de sedimento exportado), l_{max} (valor máximo de L no cálculo do fator de gradiente de declividade – LS). O modelo considera a Equação Universal de Perda do Solo Revisada (RUSLE).

O pacote SDR do InVEST tem como resultados os valores de perda do solo, exportação, retenção e deposição de sedimentos referentes à bacia ou microbacia hidrográfica em processamento no modelo. Algumas aplicações do modelo no Brasil são descritas a seguir.

Thompson e Fidalgo (2013) estimaram a perda de solos na bacia do rio Guapi-Macacu (RJ). Os autores destacaram que o InVEST possibilitou integrar os dados em um único ambiente, de modo que foram reduzidas as possibilidades de erros na conversão de dados. Além disso, foram espacializadas as classes de perdas de solos e a vulnerabilidade à erosão. Porém, houve limitações devido à dificuldade de encontrar valores em escala adequada para os fatores C, P e K.

Conceição (2014) modelou a perda de solo, exportação e retenção de sedimentos na bacia do rio Passaúna, no Paraná, cujos resultados foram apresentados para cada sub-bacia. A sub-bacia que apresentou maiores valores de exportação de sedimentos, de 8.407,16 t/ano pôde ser identificada, o que a tornou prioritária para ações de controle de erosão hídrica, reforçando a importância do modelo para o planejamento das intervenções sobre a gestão das terras.

Azevedo (2017) aplicou o InVEST para estimar os benefícios aos serviços ecossistêmicos relacionados ao aporte de sedimentos e provisão de água na bacia do ribeirão Pipiripau, na divisa do Distrito Federal com Goiás. A autora simulou as condições atuais da bacia, em 2017, bem como dois cenários de ações de passivo ambiental (preservação da APP de 30 m de cursos d'água e adoção de boas práticas agrícolas em 50 e 100% das áreas de

pastagem e agricultura) e três cenários climáticos (considerando os anos mais seco, médio e úmido entre 1998 e 2009). Para o cenário atual, obteve-se aporte de sedimento médio de 1.555 t/ano e vazão líquida de 2,49 m³/s. Os cenários futuros indicaram redução de até 44% do aporte de sedimentos e 69 mm na produção superficial de água, além de aumento de até 46 mm na produção de escoamento de base.

Guglielmeli (2017) estimou as perdas de solo, exportação e retenção de sedimentos nas microbacias do rio Uberaba para o cenário atual (ano de 2016) e cenário hipotético (preservação das APPs de 30 m dos cursos d'água). A APA Municipal do rio Uberaba tem 520 km² e apresentou total de exportação de sedimentos de 2.620.062 t/ano no cenário atual e de 1.258.989 t/ano para o cenário futuro, implicando em uma redução de 48%. A análise dos resultados permitiu identificar áreas críticas para a realização de ações de recuperação e conservação do solo.

Com o modelo, Rodrigues et al. (2021) estimaram a exportação de sedimentos da bacia do rio Iquiri (Ituxi) em Acrelândia (AC). A bacia tem área total de 24.612 ha e mostrou perda de sedimentos de 11.648,15 Mg/ano e 4.976 Mg/ano em áreas de 172,69 (lavoura perene) e 88,62 ha (lavoura temporária), respectivamente. Os autores associam a maior exportação de sedimentos com o Argissolo Vermelho-Amarelo, predominante na região.

O InVEST também foi utilizado por Saad et al. (2021) na quantificação dos benefícios dos serviços ecossistêmicos na bacia de Posses, no município de Extrema (MG). Os autores concluíram que um aumento de 3% de áreas de floresta, somado à aplicação de práticas conservacionistas, culminou na redução de 0,9 a 2,5% na perda de solo e de 4,0 a 13,3% na exportação de sedimentos.

Cunha et al. (2022) avaliaram os impactos da perda de solo e razão de exportação de sedimentos em 30 anos (de 1986 a 2016), de modo a possibilitar a simulação para cenários em 2050 e 2100. Os autores observaram redução da perda de solo de 10,20 milhões de toneladas em 1986 para 4 milhões de toneladas em 2016, sendo a exportação de sedimentos 69,85% menor, como resultado da transição dos maiores valores de exportação de sedimentos para áreas de relevo plano e solos de baixa erodibilidade, além da boa cobertura vegetal de pastos e a aplicação de terraços áreas de pastagem e agricultura. As projeções futuras indicaram aumento de 13,84% nas áreas cuja perda de solo é superior a 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, o que intensifica os eventos de produção de sedimentos e aumenta a turbidez das águas na área de estudo.

A aplicação do modelo InVEST permite compreender as dinâmicas existentes no contexto atual da área de estudo, geralmente em nível de bacia ou microbacia hidrográfica, sob

diferentes pontos de vista, a depender dos serviços ecossistêmicos modelados. Além disso, também é possível simular cenários alternativos, aplicando mudanças nos parâmetros que são mais suscetíveis a mudanças ao longo do tempo, como os usos e coberturas do solo e práticas conservacionistas aplicadas no contexto da agricultura, ou padrões climáticos, por exemplo. Dessa forma, o InVEST é uma ferramenta importante no planejamento de políticas públicas e gestão das áreas, de forma a fortalecer os serviços ecossistêmicos fornecidos à população, bem como tornar a área mais sustentável.

4.5 Estatística

Os métodos estatísticos de Análise da Componente Principal (ACP) e Análise de Agrupamentos (*Cluster*) são importantes ferramentas para a análise de grandes volumes de dados. Assim, é possível encontrar padrões e realçar dados de maior significância nos conjuntos de dados. Neste trabalho, utiliza-se destes métodos para análise de dados de pluviometria e temperatura média de 1991 a 2021, nos municípios de Lavras (MG) e São João del Rei (MG).

4.5.1 Análise da Componente Principal

A análise da componente principal (ACP), em inglês, *Principal Component Analysis* (PCA), faz parte das técnicas multivariadas de modelagem da estrutura de covariância (HONGYU et al., 2015). Com a aplicação desta técnica, as informações mais importantes que compõem um conjunto de dados multivariados são resumidas em componentes principais e podem ser visualizadas com mais facilidade. Isto é, as informações contidas num conjunto de dados multivariado e contínuo, com variáveis originais, têm sua dimensionalidade diminuída sem a perda de informações importantes, com a criação de novas variáveis, independentes entre si – denominadas componentes principais (VARELLA, 2008; KASSAMBARA, 2017a).

A utilização de PCA é efetiva principalmente quando as variáveis dos conjuntos de dados são altamente correlacionadas. Em outros termos, quando há redundância dos dados. O PCA também é capaz de identificar padrões encobertos no conjunto de dados e variáveis correlacionáveis (KASSAMBARA, 2017a). A técnica agrupa indivíduos de acordo com a variação de suas características, sendo uma de suas aplicações a geração de índices e agrupamento de indivíduos (VARELLA, 2008).

Deng et al. (2015) caracterizaram a morfologia de 456 seções de 152 voçorocas a partir de PCA, considerando 26 parâmetros morfológicos. Foram distinguidas quatro componentes principais, sendo: dimensões da seção de voçoroca – considerando os parâmetros de largura,

profundidade e área da seção –, grau de assimetria da voçoroca – em termos da razão de assimetria da largura –, grau de erosão – considerando erosividade e forma – e diferença no padrão erosivo.

A técnica de PCA também foi utilizada para categorizar e correlacionar parâmetros morfométricos para priorização de bacias hidrográficas em Bangladesh, de modo a implementar medidas de conservação do solo e da água. Foram selecionados 16 parâmetros de área, lineares e de relevo para 20 bacias hidrográficas. Observou-se alta correlação entre densidade da drenagem (*Drainage Density*, D_d), razão de circularidade (*Circularity Ratio*, R_c), razão de alongamento (*Elongation Ratio*, R_e) e razão de bifurcação (*Bifurcation Ratio*, R_b), e foi possível estabelecer um ranking de prioridades das bacias hidrográficas estudadas (AREFIN et al., 2020).

Ao examinar os efeitos de *inputs* de quantis nas séries de precipitação de 30 estações meteorológicas no nordeste da Argélia, no período de 1935 a 2004 (69 anos), concluiu-se que PCA regularizado e o algoritmo de maximização de expectativas em PCA são os melhores métodos para preencher lacunas (BENAHMED; HOUICHI, 2018).

Machiwal et al. (2019) delineararam padrões espaciais de dados mensais, sazonais e anuais de chuva a partir do agrupamento de 62 estações na Índia no período de 1957 a 2011 (55 anos). Então, foi avaliada a influência de fatores geográficos (longitude, latitude e altitude) e parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, coeficiente de variação e precipitações máxima e mínima) por meio de PCA.

Pascoto (2020) propôs metodologia para geração de índices de erosão a partir de PCA e análise fatorial. Foram considerados os fatores de textura do solo, declividade, permeabilidade, uso e ocupação, pluviosidade e erodibilidade do solo, que foram comparados com nove feições erosivas. Com o PCA, obteve-se o Método A, que culminou em três índices (textura do solo, declividade e pluviosidade). Com a análise fatorial, teve-se o Método B, com apenas um índice (porcentagem de argila, uso e ocupação e declividade, combinados).

Su et al. (2021) aplicaram uma estrutura integrada PCA-SCA-ANOVA (PSAF), isto é, análise da componente principal (*principal component analysis*, PCA), análise de agrupamentos graduais (*stepwise-cluster analysis*, SCA) e análise de variância (ANOVA). O PSAF analisou os impactos de fatores múltiplos na variação do fluxo de água. Quantificou-se a sensibilidade do fluxo de água a fatores individuais e interativos, e se simulou a efetividade do fluxo de água simulado em diferentes cenários, de modo a colaborar com a administração de recursos hídricos e na restauração do ambiente ecológico do Mar Aral. A pesquisa concluiu que as maiores contribuições no fluxo de água são o escoamento a montante (de efeito positivo

no fluxo), o uso de água na agricultura e o armazenamento de água em reservatórios (de efeito negativo no fluxo). Foram sugeridas estratégias de redução da água utilizada na agricultura e armazenada em reservatórios para a manutenção de fluxo de água suficiente para o Mar Aral.

4.5.2 Análise de Agrupamentos

A análise de agrupamentos, também conhecida como *cluster* ou *clustering*, consiste em um método de identificação de informações em dados multidimensionais, de forma que são identificados padrões e são constituídos grupos de objetos similares em conjuntos de dados de interesse. Uma vez que a técnica não é guiada por determinações de que amostras ou variáveis pertencem a grupos específicos, ela pode ser classificada como um método de aprendizado de máquina não supervisionado (KASSAMBARA, 2017b).

A técnica denominada k-means corresponde à definição de clusters, sendo minimizada a variação total dentro do agrupamento (KASSAMBARA, 2017b).

Bueno et al. (2010) realizaram análise multivariada, especificamente técnicas de análise de agrupamentos, para a determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. Considerou-se os fatores de erodibilidade, fator topográfico, fator uso e manejo do solo e práticas conservacionistas. Foram identificados dois grupos de perdas de solo, sendo as maiores expectativas de perda de solo correlacionadas com a classe e manejo do solo, bem como o relevo. Miqueloni e Bueno (2011) também aplicaram análise de agrupamento no estudo da erodibilidade, em argissolo vermelho-amarelo da microbacia do Córrego do Tijuco (Monte Alto/SP). O agrupamento k-means indicou cinco grupos de acordo com as diferenças de granulometria e relevo.

Um estudo realizado por Ribeiro Filho et al. (2017) identificou três grupos diferentes de eventos similares estatisticamente a partir de análise de agrupamentos, considerando dados de precipitação (em mm), precipitação acumulada nos últimos 5 dias (em mm), índice de erosividade (I30, em mm h^{-1}) e erosividade (em $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$). Foi possível concluir que a produção de sedimentos aumentou na área desflorestada em relação à área regenerada por 35 anos.

Terassi et al. (2020) reuniram dados de precipitação diária de 14 estações pluviométricas no Paraná, para o período de 1976 a 2012, para realização de análise multivariada com base na análise de agrupamentos. A identificação de grupos homogêneos foi realizada com a aplicação da distância euclidiana, ao passo que a classificação das chuvas diárias utilizou a técnica de quantis. Foram identificados três grupos pluviométricos, considerando os parâmetros de

latitude, proximidade entre as estações, características topográficas e distribuição média da chuva.

Os registros de chuvas intensas de Barcelona foram selecionados ao longo de 15 anos, sendo detectados 499 registros e 67 episódios. Foram obtidos 10 clusters com diferentes tempos de evolução da chuva. Essas análises são importantes para o planejamento de sistemas de saneamento e drenagem nas áreas urbanas da cidade, onde episódios de inundações ocorrem geralmente após chuvas intensas (LANA et al., 2020).

Dados de precipitação acumulada de 131 estações pluviométricas na bacia do rio São Francisco, de 1989 a 2018, foram reunidos e analisados por estatística multivariada não paramétrica, especificamente análise de agrupamentos. Considerando distância euclidiana de 2.800 no dendrograma, foram identificados quatro grupos. Ao passo que, com distância euclidiana de 1.900, identificaram-se sete grupos. Os resultados encontrados indicam sazonalidade no regime de chuvas, sendo o período chuvoso predominante entre outubro e março (FERREIRA et al., 2021).

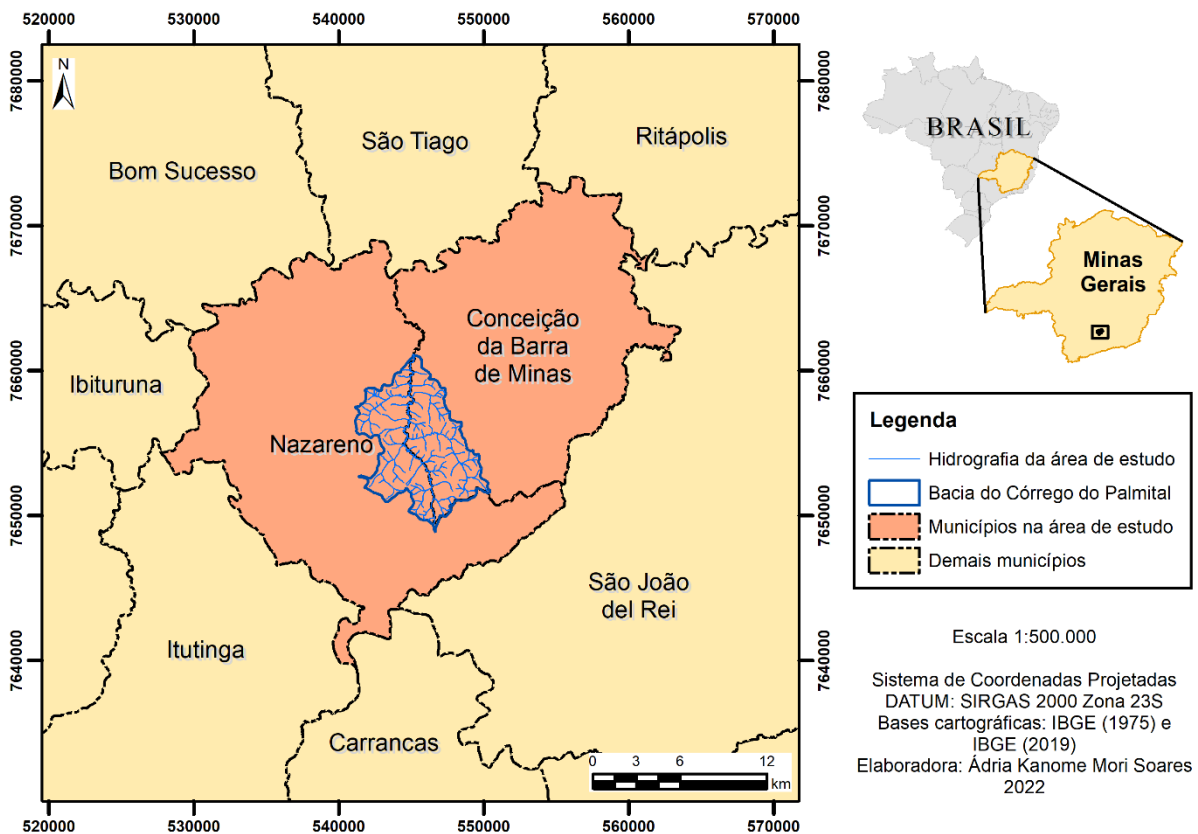
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

5.1 Localização e Acesso

A área de estudo corresponde à bacia do Córrego do Palmital, cuja área é de 58,66 km², sendo composta pelas sub-bacias dos córregos Beta de Baixo, Beta de Cima, Charuteiro, Fundo, Pitanga, Sapecado, Teixeira, Forro e Sítio.

Essa bacia está inserida nos municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, na porção sul do estado de Minas Gerais. Nazareno e Conceição da Barra de Minas são limitados pelos municípios de São Tiago, Ritápolis, São João Del Rei, Carrancas, Itutinga, Ibituruna e Bom Sucesso, conforme Figura 7.

Figura 7 – Mapa de localização da área de estudo, bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Adaptado de IBGE (1975a, 1975b) e IBGE (2019).

O acesso pode ser realizado, partindo-se de Três Corações (MG), pela Rodovia Fernão Dias (BR-381). A partir de Lavras (MG), no sentido de São João Del Rei, segue-se pela BR-265. Após a represa de Itutinga, no trevo, dobra-se à esquerda, na MG-332, em direção à Nazareno.

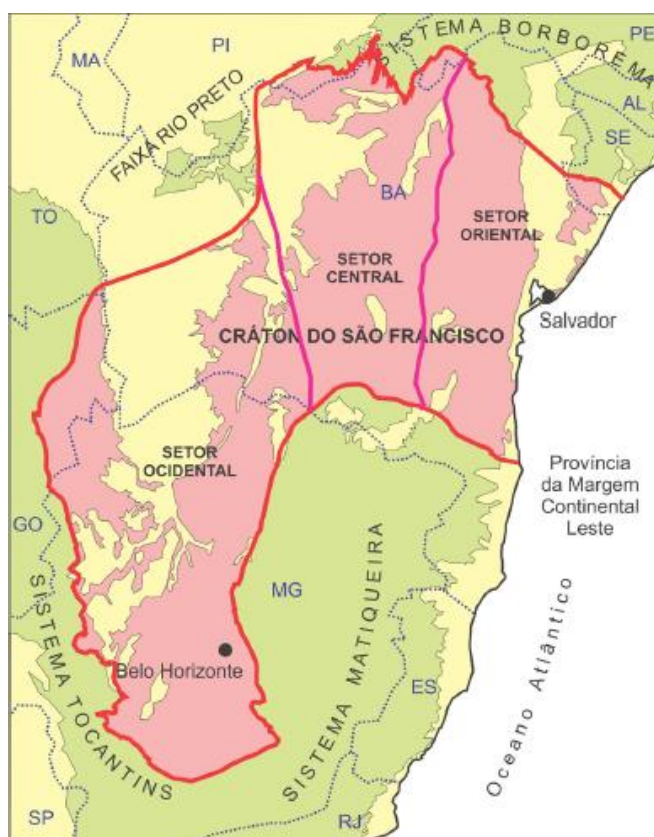
5.2 Geologia

5.2.1 Geologia Regional

A área de estudo está inserida no contexto do Cráton do São Francisco, o qual corresponde à Província São Francisco, limitada pelas províncias Borborema, Tocantins e Mantiqueira ao norte, oeste e leste, respectivamente. O Cráton do São Francisco pode ser compartimentado em três setores: oriental, central e ocidental (Figura 8). Os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas estão localizados no sul do Setor Ocidental, que engloba o oeste de Minas Gerais, o sudoeste da Bahia e parte do nordeste de Goiás.

O Setor Ocidental do Cráton do São Francisco é constituído por unidades litológicas e litoestratigráficas de variadas idades e naturezas, sendo representadas por unidades gnáissicas, *greenstone belts*, metassedimentares, granitoides, metamáficas, máfico-ultramáficas, metavulcanossedimentares e sedimentares (TOLEDO, 2002; HASUI, 2012).

Figura 8 – Setores do Cráton do São Francisco.



Fonte: Hasui (2012).

A evolução do Setor Ocidental ocorreu em duas principais etapas. A primeira correspondeu à formação do embasamento, representado por terrenos granito-greenstone e

unidades metavulcanossedimentares. Esta etapa é dividida em duas fases, sendo a primeira do Paleoarqueano ao Mesoarqueano e a segunda (Ciclo Jequié), do final do Mesoarqueano ao Neoarqueano. A segunda etapa correspondeu à estabilização do substrato e deposição das coberturas proterozoicas. Destacam-se o Cinturão Mineiro e as rochas do Supergrupo Minas (GUIMARÃES, 2010; HASUI, 2012).

O Cinturão Mineiro é limitado pelos lineamentos Jeceaba-Bom Sucesso e Congonhas e pelas rochas do Complexo Mantiqueira. Consiste em um domínio tectônico paleoproterozoico que apresenta corpos vulcânicos, subvulcânicos e plutônicos associados com rochas metavulcanossedimentares – como as sequências Nazareno, Rio das Mortes e Dores de Campos – e recobertas por unidades mesoproterozoicas e neoproterozoicas – sequências São João del Rei e Carandaí, e sequência Andrelândia, respectivamente (CAMPOS; CARNEIRO, 2008; HEILBRON et al., 2010; ÁVILA et al., 2010, 2014; TEIXEIRA et al., 2015; VASCONCELOS et al., 2017).

Pinheiro et al. (2020), com base em informações dos estudos de Ávila et al. (2006, 2010, 2012 e 2014), Seixas et al. (2013), Teixeira et al. (2015, 2017), Barbosa et al. (2015, 2019) e Cardoso et al. (2019), destacaram cinco pulsos magmáticos paleoproterozoicos no Cinturão Mineiro, a saber:

- a) 2,47 – 2,41 Ga: Ortognaisse Cassiterita e corpos coevos;
- b) 2,36 – 2,33 Ga: suítes Resende Costa e Lagoa Dourada;
- c) 2,25 – 2,20 Ga: suítes Serrinha e Tiradentes;
- d) 2,19 – 2,15 Ga: ortognaisses;
- e) 2,14 – 2,10 Ga: metadioritos e metagranitoides.

Foram identificados três eventos metamórficos-deformacionais, de acordo com Ávila et al. (2008), sendo:

- a) Evento Proterozoico I, entre 2250 e 2170 Ma, de fácies metamórfica anfíbolito médio. Este evento envolveu rochas das formações Nazareno e Rio das Mortes – anfíbolitos, metakomatiítos, xistos, filitos, gonditos e quartzitos –, bem como piroxenitos e dunitos, e ortognaisses pertencentes ao Cinturão Mineiro. A paragênese é composta por Mg-Fe hornblenda + oligoclásio-andesina ± clorita ± epídoto ± biotita ± titanita ± ilmenita (CHERMAN, 1999; TOLEDO, 2002);
- b) Evento Paleoproterozoico II, entre 2131 e 2101 Ma (ÁVILA, 2000), de fácies xisto verde e/ou anfíbolito inferior. Afetou rochas das formações Nazareno e Rio das Mortes,

piroxenitos e dunitos, bem como rochas do Cinturão Mineiro, como ortognaisses, trondhjemitos, granodioritos, granitos e dioritos. A paragênese é constituída por actinolita \pm albita \pm epidoto \pm biotita \pm titanita (ÁVILA, 1992; SILVA, 1996);

- c) Evento Neoproterozoico, entre 604 e 567 Ma (SOLLNER & TROUW⁴, 1997 apud ÁVILA et al., 2008; TROUW & PANKHURST⁵, 1993 apud ÁVILA et al., 2008), de fácies xisto verde de pressão alta a anfíbolito. As rochas afetadas foram os quartzitos, xistos e filitos das megassequências São João del Rei e Carandaí. Além disso, foram desenvolvidas falhas e zonas de cisalhamento nas rochas do embasamento.

Considerando as associações entre as zonas de cisalhamento e falhas com os veios de quartzo, as anomalias magnéticas, as intensidades do método de Euler e o conteúdo radioelementar nos mapas gamaespectrométricos, Araújo et al. (2019) identificaram terrenos geotectônicos e subdomínios magnéticos. Quatro terrenos foram diferenciados: (a) Crosta São Tiago, (b) Ortognaisse Cassiterita, (c) Ortognaisse Resende Costa/Lagoa Dourada e (d) arcos Serrinha e Ritópolis (ARAÚJO; BONGIOLO; ÁVILA, 2019).

Baseados em dados aerogeofísicos e geológicos, Araújo et al. (2019) identificaram cinco lineamentos magnetométricos na porção mais a sul do Cráton São Francisco, sendo:

- a) Lineamentos A, de trend N10-20°W, são representados por linhas retilíneas e segmentadas. Observa-se sua presença em rochas arqueanas, paleoproterozoicas e mesoproterozoicas, com intersecção com os lineamentos B e D;
- b) Lineamentos B, com trend N50-60°W a E-W, ocorrem como linhas segmentadas e sinuosas. Sua ocorrência é observada em áreas arqueanas e paleoproterozoicas, havendo intersecção com os lineamentos A e D;
- c) Lineamento C, consiste em uma única linha retilínea, de trend N0-15°E, segmentada e deslocada por lineamentos D. Ocorre em rochas paleoproterozoicas e meso-neoproterozoicas;
- d) Lineamentos D, com trend principal de N50-70°E, ocorrem a sudeste do Lineamento Jeceaba-Bom Sucesso-Ibituruna. São agrupados em lineamentos de primeira e segunda ordem. Os de primeira ordem são contínuos e representados pelos lineamentos Jeceaba-

⁴ SÖLLNER, F.; TROUW, R.A.J. The Andrelândia Depositional Cycle (Minas Gerais/Brazil), a Post-Transamazonian Sequence South of the São Francisco Craton: Evidence from U-Pb dating on zircons of a Metasediment. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, p. 21-28, 1997.

⁵ TROUW, R.A.J.; PANKHURST, R.J. Idades radiométricas ao sul do Cráton do São Francisco: região da folha Barbacena, Minas Gerais. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993, Salvador. **Anais** [...] Salvador, BA: SBG, 1993, v. 1, p. 260-262.

Bom Sucesso-Ibituruna, Resende Costa, Lagoa Dourada, Cassiterita, Lenheiro e Nazareno. Os de segunda ordem, por sua vez, são sinuosos e segmentados;

- e) Lineamento E, correspondente a uma linha sinuosa e contínua denominada Lineamento São Tiago, que circunda o ortognaisse São Tiago e é limitada por lineamentos D de primeira e segunda ordem.

5.2.2 Geologia Local

Segundo Ávila et al. (2019a, 2019b, 2019c), as unidades que ocorrem na área da bacia do Córrego do Palmital são paleoproterozoicas, sendo: Ortognaisse Cassiterita, Formação Nazareno e Metadiorito Represa dos Camargos. Além destas, nos municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, também ocorrem as seguintes unidades de idades paleoproterozoicas a neoproterozoicas: Formação Rio das Mortes, Ortognaisse Itutinga, Suíte Serrinha, Ortognaisse Morro do Resende, Metadiorito Rio Grande, Metagranito Macuco de Minas, Metagranitoide Ritápolis, Complexo Mantiqueira, Formação Serra do Ouro Grosso, diques máficos e Grupo Andrelândia – Formação Santo Antônio. As unidades são apresentadas no mapa do Anexo 1 e detalhadas a seguir.

5.2.2.1 Unidades litoestratigráficas

5.2.2.1.1 Ortognaisse Cassiterita

O Ortognaisse Cassiterita consiste em um corpo de cerca de 300 km² e direção ENE-WSW, limitado pela zona de cisalhamento do Lenheiro a sul. Assim, faz contato a sul com a Formação Nazareno e a norte com as rochas da Formação Rio das Mortes (PINHEIRO et al., 2020). O corpo é cortado por rochas associadas ao Metagranitoide Ritápolis, representadas por diques graníticos e corpos pegmatíticos (ÁVILA et al., 2003).

Ocorrem principalmente ortognaisses leucocráticos de composição granodiorítica a tonalítica, com granulação predominantemente média e estrutura gnáissica anastomosada. Sua mineralogia é composta essencialmente por plagioclásio, quartzo, feldspato perítico e biotita. Subordinadamente, tem-se hornblenda. Como minerais acessórios e secundários, tem-se zircão, apatita, allanita, magnetita, ilmenita, molibdenita, pirita, rutilo, epídoto, titanita, muscovita, carbonato e clorita (ÁVILA et al., 2003; BARBOSA et al., 2019; PINHEIRO et al., 2020).

A idade de cristalização por U-Pb é de 2472 ± 11 Ma a 2414 ± 29 Ma, sendo do Sideriano. É, portanto, o plúton mais antigo encontrado no Cinturão Mineiro. A colocação do corpo é coincidente com a tectônica extensional que atingiu a margem continental neoarqueana

e a deposição dos sedimentos químicos do Supergrupo Minas. As rochas que compõem esta unidade mostram metamorfismo de fácies anfíbolito, que é sobreposto por metamorfismo de fácies xisto verde, indicando retrogressão (BARBOSA et al., 2019).

5.2.2.1.2 Formação Nazareno

A Formação Nazareno ocorre como um corpo alongado, de aproximadamente 30 km, orientado segundo a direção NE-SW. É limitada a norte pela Zona de Cisalhamento do Lenheiro, a sul por corpos plutônicos máficos e félsicos, a oeste por rochas metaultramáficas e a nordeste por filitos e quartzitos. Há áreas cobertas pelas rochas da Formação Serra do Ouro Grosso e dos grupos São João del Rei, Carandaí e Andrelândia. A formação engloba quatro unidades: Corpo Forro, Membro Metaultramáfico Vulcânico, Membro Metamáfico e Membro Metassedimentar (TOLEDO, 2002; PINHEIRO et al., 2020).

O Corpo Forro ocorre em meio aos anfíbolitos do Membro Metamáfico, é intrudido por rochas da Suíte Serrinha e truncado pelo Metagabro São Sebastião da Vitória. Corresponde a metaperidotitos, metapiroxenitos, xistos magnesianos e serpentinitos (PINHEIRO et al., 2020). A granulação varia de média a grossa e se observa acamamento ígneo de direção entre N20°W e N30°E que pode ser por acamamento mineral ou acamamento dimensional. Existem pelo menos 6 ciclos macrorítmicos compostos por, da base para o topo, metaperidotitos, olivina-metapiroxenito e metapiroxenito (TOLEDO, 2002).

O Membro Metaultramáfico Vulcânico é orientado segundo ENE-WSW, a partir do controle pela Zona de Cisalhamento do Lenheiro, das intrusões dos protólitos do Ortognaisse Itutinga e do Metagranodiorito Represa dos Camargos. Esta unidade é associada ao Membro Metamáfico. As rochas que a compõem correspondem a xistos magnesianos constituídos por clorita e anfíbólio, rochas talcificadas e serpentinitos subordinados, bem como metakomatiitos com textura *spinifex*. Ainda ocorre um corpo quartzítico milonitizado e silicificado no contexto dessa unidade, com aproximadamente 10 km de extensão (PINHEIRO et al., 2020).

O Membro Metamáfico consiste em anfíbolitos, anfíbólio-xistos e metagabros. Os anfíbolitos mostram textura nematoblástica a milonítica e têm como minerais essenciais a hornblenda e o plagioclásio. Minerais acessórios são quartzo, titanita, minerais opacos e granada. Os metagabros mostram porfiroblastos de anfíbólio pseudomórfico, os quais são orientados preferencialmente por foliação discreta. A constituição mineralógica é essencialmente anfíbólio e plagioclásio. Como minerais acessórios, tem-se carbonato, quartzo, titanita e minerais opacos (PINHEIRO et al., 2020).

O Membro Metassedimentar apresenta quartzitos, metassiltitos, metagrauvas e metapelitos. Pode haver intercalações de formação ferrífera, gonditos, biotita xistos, rochas calciossilicáticas e turmalinitos (RIBEIRO et al.⁶, 2003 apud PINHEIRO et al., 2020, p. 44).

5.2.2.1.3 Formação Rio das Mortes

A Formação Rio das Mortes ocorre orientada segundo a direção NE-SW. Limita-se a norte pelo Metatonalito Tabuões, a sul pelo Ortognaisse Cassiterita, a leste pelo Metagranitoide Ritápolis e a oeste pelo Metadiorito Rio Grande e pelo Metagranitoide Macuco de Minas. A unidade ocorre como *roof pendants* no Metagranitoide Ritápolis e como xenólitos em diversos corpos plutônicos. A formação é constituída por quatro unidades: Corpo Manuel Inácio, Membro Metaultramáfico, Membro Metamáfico e Membro Metassedimentar (PINHEIRO et al., 2020).

O Corpo Manuel Inácio é encontrado em duas ocorrências lenticulares localizadas, as quais são encaixadas nos anfibolitos do Membro Metamáfico da Formação Rio das Mortes. Esse corpo litológico é cortado por diques de metadiabásio-metagabro, pegmatitos e apófise do corpo de biotita granodiorito/tonalito foliado. Apresenta metapiroxenitos, metagabros, serpentinitos, xistos e anfibolitos. A mineralogia dos metapiroxenitos inclui anfibólio cálcico, clorita, talco, antofilita e olivina, com textura poiquilítica ortocumulática a mesocumulática. É observada foliação anastomosada de direção N40-70°E e mergulhos de cerca de 60° para SE ou NW, a qual oblitera o acamamento ígneo primário quase totalmente (TOLEDO, 2002; PINHEIRO et al., 2020).

O Membro Metamáfico se apresenta orientado segundo a direção NE-SW, sendo truncado pelo Metadiorito Rio Grande, pelo Metagranitoide Macuco de Minas e pelo Metagranitoide Ritápolis. Ocorre como xenólito no Ortognaisse Fé, no Metaquartzozodiorito Glória, no Metadiorito Brumado e no Metagranitoide Ritápolis. Ocorrem anfibolitos, metabasaltos e xistos máficos que podem mostrar intercalações com rochas metassedimentares e metaultramafitos. Os metabasaltos apresentam texturas primárias preservadas localmente e texturas de resfriamento rápido. Sua mineralogia inclui hornblenda, plagioclásio, granada, quartzo, epídoto, clorita, titanita e minerais opacos (ÁVILA, 2000; TOLEDO, 2002).

⁶ RIBEIRO, A.; ÁVILA, C. A.; VALENÇA, J. G.; PACIULLO, F. V. P.; TROUW, R. A. J. Geologia da Folha São João del Rei (1:100.000). In: PREDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M. (ed.). **Geologia e recursos minerais do Sudeste Brasileiro**. Belo Horizonte: COMIG, 2003. v. 3, p. 521-622.

O Membro Metaultramáfico, de acordo com Ávila (1992) e Ávila (2000), pode ocorrer orientado segundo NNE-SWW, NEE-SWW ou NNE-SSW. Os corpos orientados segundo NNE-SWW são compostos por serpentinitos e metapiroxenitos de granulação média e textura cumulática pseudomórfica. A mineralogia é constituída por serpentina, tremolita, clorita, magnetita, hematita, cromita, calcopirita e pirita. O Metadiorito Brumado apresenta xenólito destas rochas. Os corpos orientados segundo NEE-SWW são menores e apresentam granulação média a grossa e textura cumulática. Sua mineralogia é composta por anfibólio cálcico – em substituição de pseudomorfos de clinopiroxênio –, plagioclásio, biotita, apatita, pirita, magnetita, ilmenita, epídoto, clorita, titanita, sericita e carbonato. Biotita e epídoto também ocorrem como minerais secundários, ao alterar anfibólio e plagioclásio, respectivamente. Isto ocorre principalmente nas regiões de contato com intrusões graníticas tardias. Os corpos orientados segundo NNE-SSW são compostos por serpentina-talco xistos e clorita xistos.

O Membro Metassedimentar é orientado segundo a direção NEE-SWW e ocorre associado ao Membro Metamáfico (PINHEIRO et al., 2020). As litologias que ocorrem nesta unidade englobam gonditos, filitos cinza ou brancos, filitos máficos laminados de coloração ocre e branca, quartzitos, quartzo-xistos e quartzitos conglomeráticos. Ocorre gradação lateral e vertical, com diferentes escalas. Os gonditos, que representam aproximadamente 70% das rochas dessa unidade, mostram camadas milimétricas a centimétricas de quartzo e minerais opacos que se alternam com camadas que contém granada manganésifera. A mineralização de manganês foi motivação para instalação de minas e garimpos na região (TOLEDO, 2002).

5.2.2.1.4 Ortognaisse Itutinga

O Ortognaisse Itutinga se apresenta alongado segundo a direção ENE-WSW. É limitado a norte-nordeste pela Formação Nazareno (contato inferido). As porções sul e sudeste são encobertas pela Formação Serra do Ouro Grosso, ao passo que o leste-sudeste é encoberto pelo Grupo Andrelândia. É intrudido pelo Metagranodiorito Represa de Camargos e pegmatitos na porção centro-norte e mostra xenólitos de rochas atribuídas à Formação Nazareno, além de enclaves microgranulares máficos (BONGIOLO et al., 2013; PINHEIRO et al. 2020).

As rochas dessa unidade variam de monzonitos a monzogranitos, sendo hololeucocráticas a leucocráticas. Sua granulação é variável de fina a média, e há foliação anastomosada protomilonítica a milonítica, localmente transposta em alguns pontos. Sua mineralogia é constituída essencialmente por quartzo, plagioclásio, microclínio e biotita. Como

acessórios, tem-se titanita, zircão, allanita, epídoto, apatita e minerais opacos. Os minerais secundários são representados por sericita e epídoto (PINHEIRO et al. 2020).

Foram obtidas idades de cristalização por U-Pb LA-ICP-MS em zircão, sendo de 2229 ± 12 Ma (BONGIOLO et al., 2013) e por U-Pb SHRIMP em zircão, de 2261 ± 21 Ma (BARBOSA, 2015). A idade obtida em domínios sobrecrecidos dos grãos de zircão de 2152 ± 50 Ma foi interpretada como metamórfica (BONGIOLO et al., 2013).

5.2.2.1.5 Suíte Serrinha

A Suíte Serrinha corresponde a um corpo ígneo alongado aproximadamente nas direções NE-SW e ENE-WSW. A unidade compreende três corpos plutônicos, sendo: quartzo diorito Brito; granodioritos Lajedo, Brumado de Cima e Brumado de Baixo; e corpos granofíricos e félsicos subvulcânicos e vulcânicos (ÁVILA et al., 2010; PINHEIRO et al., 2020).

A mineralogia primária da Suíte Serrinha era composta por plagioclásio cálcico, biotita, allanita e ilmenita. O metamorfismo relacionado ao segundo episódio metamórfico-deformacional no Cinturão Mineiro, de fácies xisto verde a anfibolito inferior (ÁVILA, 2000), culminou na substituição dos minerais primários por albita, clinozoisita, zoisita, sericita, carbonato, muscovita, clorita, epídoto e titanita.

O quartzo diorito Brito é representado por rochas equigranulares de granulação fina a média. Sua mineralogia é composta essencialmente por plagioclásio, quartzo e biotita. Como minerais acessórios, são identificados anfíbólio, zircão, apatita, allanita, minerais opacos e álcali-feldspato (ÁVILA et al., 2010). O corpo rochoso apresenta altos conteúdos de CaO, MgO e Fe₂O₃ (ÁVILA et al. 2010). Ávila (2000) encontrou idades de 2221 ± 2 Ma e 2198 ± 6 Ma, por meio de datação por evaporação de Pb em zircão. Além disso, o quartzo diorito Brito é intrusivo nos anfibolitos da Formação Nazareno (ÁVILA, 2000) e no gabro São Sebastião da Vitória (DUTRA, 2001), com idade de 2220 ± 3 Ma obtida por datação U-Pb TIMS (VALENÇA et al.⁷, 2000 apud ÁVILA et al. 2010, p. 470).

Os granodioritos Lajedo, Brumado de Cima e Brumado de Baixo são representados por rochas equigranulares, de granulação fina a média, hololeucocráticas a leucocráticas, de composição metaluminosa a peraluminosa. Sua composição mineralógica é, essencialmente, quartzo, microclínio e biotita (PINHEIRO et al., 2020). De acordo com Ávila et al. (2010), as características petrográficas dos granodioritos permitem inferir que ocorreu cristalização

⁷ VALENÇA, J. G.; SILVA, M. A.; SCHIMDT, R. S.; TROUW, R. A. J.; NOCE, C. M. Transamazonian gabronoritic intrusive rocks from the southernmost São Francisco Craton, Brazil. *In: THE INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS*, 31, 2000, Rio de Janeiro, RJ. **Abstracts volume** [...]. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.

contínua de magma cálcio-alcálico em crosta rasa. O granodiorito Lajedo indicou, por meio de datação U-Pb TIMS em grãos de zircão, idades de 2208 ± 26 Ma (TEIXEIRA et al., 2008). O granodiorito Brumado de Cima intrude o quartzo diorito Brito e o metagabro São Sebastião da Vitória (DUTRA, 2001), e mostra enclaves de anfibolitos e filitos da Formação Nazareno. Datações de ^{207}Pb - ^{206}Pb por evaporação de monocristais de zircão indicaram idades de 2219 ± 2 Ma e 2187 ± 4 Ma (ÁVILA, 2000) para este corpo, ao passo que por U-Pb SHRIMP em zircão, obteve-se idade de 2227 ± 22 Ma (ÁVILA et al. 2010). O granodiorito Brumado de Baixo foi datado por U-Pb SHRIMP, onde obteve-se idade de 2218 ± 4 Ma (ÁVILA, 2000).

As rochas subvulcânicas e vulcânicas, representadas por andesitos, dacitos e riolitos, variam de afaníticas a faneríticas. Sua mineralogia principal é composta por plagioclásio, álcali-feldspato e quartzo, sendo os minerais acessórios correspondentes a biotita, minerais opacos, zircão, allanita, epídoto e titanita. Podem ocorrer fenocristais de plagioclásio e quartzo, além de amígdalas preenchidas por quartzo, epídoto e clorita. Pode-se encontrar sanidina na matriz das rochas. Seus contatos com os granófiros são gradacionais, devido à variação no percentual de fenocristais de plagioclásio e intercrescimento granofírico (ÁVILA et al. 2010).

As análises petrográfica e textural das rochas que compõem a unidade são compatíveis com hipótese de cristalização de magma altamente variável, seguido por perda rápida de voláteis e cristalização em nível crustal raso. O resfriamento do magma com perda rápida de voláteis e baixo conteúdo de água teve por consequência a geração de rochas ígneas félsicas com texturas variadas que coexistem no mesmo nível crustal (ÁVILA et al., 2010).

5.2.2.1.6 Metadiorito Represa de Camargos

O Metadiorito Represa de Camargos ocorre como um batólito localizado na porção sul da Zona de Cisalhamento do Lenheiro. Possui relação intrusiva com a Formação Nazareno e é parcialmente recoberto pelas rochas da Formação Santo Antônio. É intrudido por aplitos graníticos e pegmatitos (PINHEIRO et al., 2020).

Segundo Pinheiro et al. (2020), ocorrem rochas de composição granítica a granodiorítica, cálcio-alcálicas, de metaluminosas a peraluminosas, granulação média a grossa e cuja textura varia de equigranular a porfirítica. A mineralogia é constituída essencialmente por quartzo, plagioclásio, microclínio e biotita. Os minerais acessórios são zircão, epídoto, allanita, titanita, ilmenita e apatita. Como minerais secundários, tem-se sericita e minerais do grupo do epídoto.

Datações U-Pb SHRIMP e LA-ICP-MS indicaram idades entre 2,17 e 2,15 Ga (BARBOSA et al., 2015).

5.2.2.1.7 Ortognaisse Morro do Resende

O Ortognaisse Morro do Resende é encontrado ao longo do Morro do Resende, localizado entre o Rio das Mortes e a cidade de Nazareno, como um corpo alongado segundo a direção ENE-WSW (VASCONCELOS et al., 2015). São observados xenólitos de rochas metamáficas associadas à Formação Rio das Mortes, bem como enclaves félsicos (VASCONCELOS et al., 2017; PINHEIRO et al., 2020).

Suas rochas apresentam variação de granulação (fina a média), textura (granoblástica a granolepidoblástica), composição (granodiorítica a monzogranítica) e entre hololeucocrática a leucocrática. Sua mineralogia é constituída essencialmente por quartzo, microclínio e albita, sendo os minerais acessórios correspondentes a biotita, magnetita, allanita, zircão, titanita e apatita. Como minerais secundários, tem-se sericita, epídoto, zoisita, clinozoisita, carbonato e clorita (VASCONCELOS et al., 2017). Ocorrem também minerais hidrotermais, representados por maghemita, barita, fluorita, monazita, xenotímio, granada e fluoretos de Elementos Terras Raras (ETR). Estes podem ser identificados como preenchimentos de fraturas, intercrescidos ou como substituição de minerais primários e metamórficos (PINHEIRO et al., 2020).

Observam-se bandamento gnáissico, dobras suaves cuja foliação mergulha para NW ou SE e zonas de cisalhamento subverticais milimétricas a métricas de orientação variante de NE-SW a ENE-WSW. Além disso, também são identificadas estruturas do tipo S/C e “boca de peixe”, indicativos de movimentação que se alterna entre dextral e sinistral (VASCONCELOS et al., 2017).

A idade de cristalização da unidade, obtida a partir de datação U-Pb SHRIMP em zircão, é de 2174 ± 4 Ma (BARBOSA et al., 2015; VASCONCELOS et al., 2017). Esta unidade foi afetada pelo evento metamórfico-deformacional paleoproterozoico II do Cinturão Mineiro, de 2131 a 2100 Ma (ÁVILA et al., 2008), que culminou na deformação de suas rochas – além de rochas anfibolíticas e diques correlatos ao seu protólito –, substituição mineral e orientação dos minerais (VASCONCELOS et al., 2015).

5.2.2.1.8 Metadiorito Rio Grande

O Metadiorito Rio Grande se apresenta como um corpo alongado segundo a direção NNE-SSW. Limita-se a sul-sudeste pelo Metagranitoide Macuco de Minas e a leste com a Formação Rio das Mortes e o Metatonalito Tabuões. Tem caráter intrusivo em relação às rochas da Formação Rio das Mortes, evidenciado pela presença de xenólitos de clinopiroxenitos, anfibolitos e anfibólio gnaiesses, além de autólitos de hornblendito (PINHEIRO et al., 2020).

Além disso, as rochas dioríticas e tonalíticas são cortadas por diques de composição granítica e pegmatitos, sendo as fraturas preenchidas por veios de epídoto (CARDOSO et al., 2019).

De acordo com Cardoso et al. (2019), as rochas que compõem o Metadiorito Rio Grande são dioritos, quartzo dioritos e tonalitos. Na região norte do plúton, ocorrem tonalitos hololeucocráticos com maior conteúdo de quartzo, ao passo que são encontrados dioritos mesocráticos e tonalitos na região sul. A mineralogia é composta essencialmente por hornblenda, plagioclásio e quartzo. A granulação varia de fina a grossa, apresentando textura equigranular e, localmente, porfirítica. Observa-se, ainda, foliação fraca. As rochas dessa unidade mostram evidências de metamorfismo de fácies anfíbolito e retrogressão para fácies xisto-verde.

Datação por U-Pb SHRIMP em zircão indicou idade de 2145 ± 7 Ma para amostra de metadiorito mesocrático (BARBOSA et al., 2015). Amostras de metatonalitos leuco- hololeucocráticos indicaram idades U-Pb LA-ICP-MS de 2102 ± 33 Ma, 2126 ± 29 Ma e 2128 ± 24 Ma (CARDOSO et al., 2019).

5.2.2.1.9 Metagranito Macuco de Minas

O Metagranito Macuco de Minas ocorre como grandes lajedos e, subordinadamente, como blocos isolados ou aglomerados de blocos (RĪTIŅŠ, 2017; NEVES, 2019). É delimitado a norte pela Formação Rio das Mortes e pelo Metadiorito Rio Grande, a sul pela Zona de Cisalhamento do Lenheiro, Metagranito Represa de Camargos e Formação Nazareno, e a leste pelo Ortognaisse Cassiterita (PINHEIRO et al., 2020). Apresenta xenólitos de rochas metamáficas e metaultramáficas da Formação Rio das Mortes e de rochas metatonalíticas com hornblenda do Metadiorito Rio Grande. Além disso, o corpo é cortado por injeções de composição granítica e pegmatíticos (NEVES, 2019).

As rochas dessa unidade são monzogranitos a sienogranitos, leucocráticos, de granulação média a grossa. Sua mineralogia é composta essencialmente por quartzo, feldspato, biotita, allanita e titanita. Como minerais secundários, tem-se epídoto, zoisita/clinozoisita, sericita, biotita e carbonatos (RĪTIŅŠ, 2017). São identificadas duas fácies: porfirítica e equigranular. A fácies porfirítica apresenta fenocristais de feldspato, que correspondem de 3 a 40% da rocha, se apresentando tabulares retangulares, euédricos, anastomosados ou *augen*, distribuídos caoticamente ou orientados concordantes à foliação. A fácies equigranular, por sua vez, mostra cristais anédricos a subédricos. A foliação é incipiente e é identificada pela orientação da biotita (NEVES, 2019).

Idades U-Pb SHRIMP em zircão identificadas por Barbosa et al. (2015) indicaram 2125 ± 21 Ma para metagranodiorito porfirítico e 2114 ± 6 Ma para metatonalito.

5.2.2.1.10 Metagranitoide Ritápolis

O Metagranitoide Ritápolis ocorre como um batólito ovalado com mais de 400 km². De acordo com Vasques (2007), a unidade foi denominada anteriormente como Granito Santa Rita, Granito Ritápolis, unidade granodiorítica-granítica e Granitoide Ritápolis. Possui relação intrusiva com a Formação Rio das Mortes, o Metadiorito Brumado, o Metaquartzo-monozodiorito Glória e o Ortognaisse Cassiterita. Ele é intrudido por pegmatitos mineralizados em Sn-Nb-Ta, bem como diques de metadiabásio-metagabro e diabásio (ÁVILA, 2000; SOUZA, 2009).

As rochas dessa unidade variam de tonalito a sienogranito, de composição peraluminosa a cálcio-alcálica. Sua mineralogia é constituída essencialmente por quartzo, plagioclásio, microclínio, feldspato peráltico e biotita. Como acessórios, tem-se titanita, xenotímio, monazita, muscovita, zircão, allanita, apatita, granada e minerais opacos – representados por magnetita, ilmenita, pirita, molibdenita, galena e columbita. Os minerais secundários são sericita, clorita, zoisita, clinzoisita, epídoto e carbonatos. Identificou-se variação textural-granulométrica, o que proporcionou a definição das fácies equigranulares fina, média, grossa-pegmatítica e porfirítica – com fenocristais tabulares de feldspato de até 3 cm de diâmetro (ÁVILA, 2000; SOUZA, 2009).

Foram obtidas idades mínimas de cristalização $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ por evaporação de monocristais de zircão de 2121 ± 7 Ma e 2122 ± 6 Ma (ÁVILA, 2000). Idade isócrona Rb-Sr de 1863 ± 44 Ma e razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7584$ também foram encontradas (NOCE et al., 2000). Além disso, obteve-se idade U-Pb LA-ICP-MS de 2123 ± 33 Ma para amostra de apófise granítica (TEIXEIRA et al., 2014) e de 2149 ± 10 Ma para metagranito (BARBOSA et al., 2015). Considerando a relação intrusiva deste corpo com o Metadiorito Brumado, datado de 2124 ± 6 Ma (CARDOSO et al., 2019), Pinheiro et al. (2020) inferiram que as idades mais corretas para o Metagranitoide Ritápolis são de 2121 ± 7 Ma e 2123 ± 33 Ma.

5.2.2.1.11 Complexo Mantiqueira

O Complexo Mantiqueira apresenta o biotita-anfibólio ortognaisse bandado de composição tonalítica a granítica como seu principal litotipo. Ainda há lentes, *boudins* e camadas concordantes de anfibolitos, bem como remanescentes de rochas supracrustais

metassedimentares geralmente como xenólitos. São observadas estruturas migmatíticas tipo *schlieren*, dobrada e surreítica (NOCE et al., 2007; PINHEIRO et al., 2020).

Datações U-Pb SHRIMP para cristalização magmática dos gnaisses dessa unidade indicam idades que variam entre 2180 e 2041 Ma (SILVA et al., 2002; NOCE et al., 2007).

Há associações da unidade com rochas metavulcanossedimentares, denominadas Unidade Metavulcanossedimentar em Ávila et al. (2019). Segundo Pinheiro et al. (2020), consistem em corpos e associações lenticulares compostas por xistos magnesianos, anfíbolitos, metagabros e rochas metassedimentares.

5.2.2.1.12 Formação Serra do Ouro Grosso

A Formação Serra do Ouro Grosso se apresenta como uma faixa estreita orientada segundo NW-SE, com aproximadamente 200 m de espessura e discordante com as rochas adjacentes – granitos, migmatitos e metakomatiítos. Sua litologia é composta por quartzitos e quartzo xistos intercalados com filitos com mica verde (TOLEDO, 2002; PINHEIRO et al., 2020).

Datação U-Pb LA-ICP-MS em grãos de zircão de quartzito com mica verde indicou que o material seria relacionado a erosão de uma crosta neoarqueana de idade entre 2,8 e 2,5 Ga. A idade máxima de sedimentação foi obtida a partir de um grão de 2,24 Ma, o que situa a bacia no Riacciano (VALLADARES et al., 2004).

5.2.2.1.13 Diques máficos

Os diques máficos ocorrem orientados preferencialmente segundo a direção NE-SW. São geralmente metadiabásios e metagabros com idades variando do Paleoproterozoico até o Cretáceo (PINHEIRO et al., 2020).

De acordo com Quéméneur et al.⁸ (2003 apud PINHEIRO et al., 2020, p. 38), são encontrados quatro grupos de diques que se diferenciam pela idade, espessura, mineralogia e composição química. Estes são paleoproterozoicos, meso-neoproterozoicos, proterozoicos e cretáceos.

Os diques paleoproterozoicos têm sentido preferencial de N25-30E, com espessuras de 5 a 30 metros. Sua mineralogia é composta essencialmente por labradorita/andesita, hornblenda

⁸ QUÉMÉNEUR, J. J. G.; RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; HEILBRON, M. Geologia da Folha de Lavras. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M. **Projeto sul de Minas – etapa I: geologia e recursos minerais do sudeste mineiro**. Belo Horizonte: CODEMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, 2003. v. XX, cap. 7, p. 259-319.

ou actinolita. Como acessórios, tem-se biotita, titanita e minerais opacos. Os diques meso-neoproterozoicos mostram-se orientados segundo N45-50W, sendo mais espessos em relação aos paleoproterozoicos. A mineralogia é constituída por augita, plagioclásio, titanita, quartzo e feldspato potássico. Podem conter ortopiroxênio e olivina. Os diques proterozoicos são orientados segundo N55-60W. Sua mineralogia é constituída por plagioclásio, augita, ortopiroxênio, minerais opacos e biotita. Subordinadamente, pode ocorrer olivina. Os diques cretáceos mostram-se orientados segundo N30 a N55E. Sua mineralogia é similar aos diques paleoproterozoicos (PINESE, 1997; QUÉMÉNEUR et al.⁹, 2003 apud PINHEIRO et al., 2020, p. 38).

5.2.2.1.14 Grupo Andrelândia

O Grupo Andrelândia corresponde a uma sucessão de sequências metassedimentares e rochas metaígneas distribuídas em uma série de *nappes* (KUSTER et al., 2020) que registrou um ciclo deposicional neoproterozoico na margem passiva sul do paleocontinente do São Francisco (RIBEIRO et al., 1995). Paciullo et al. (2000) reconheceram seis associações de litofácies, sendo:

- a) A1 – associação basal composta por paragnaisse, que pode conter quartzo, feldspato e fragmentos quartzo-feldspáticos que são interpretados como arenitos feldspáticos;
- b) A2 – composta por paragnaisse, quartzito e xisto, também pode apresentar camadas finas de Mn-granada quartzito e corpos de mármore;
- c) A3 – constituída por quartzito, mostra estruturas de estratificação cruzada e *hummocky* preservadas localmente;
- d) A4 – apresenta filito/xisto cinza e, subordinadamente, intercalações com quartzitos;
- e) A5 – mostra biotita xisto/gnaisse;
- f) A6 – associação mais superficial, composta por paragnaisse, *metachert* e rochas calciossilicáticas. Mostra localmente seixos dispersos, *dropstones* com blocos e diamictitos, bem como veios de quartzo, granitoides e fragmentos calciossilicáticos.

Segundo Ávila et al. (2019a), a Formação Santo Antônio está contida no Grupo Andrelândia e ocorre como uma faixa orientada segundo a direção NW-SE. A unidade mostra

⁹ QUÉMÉNEUR, J. J. G.; RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; HEILBRON, M. Geologia da Folha de Lavras. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M. **Projeto sul de Minas – etapa I: geologia e recursos minerais do sudeste mineiro**. Belo Horizonte: CODEMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, 2003. v. XX, cap. 7, p. 259-319.

plagioclásio-muscovita-biotita xistos de granulação fina, que podem gradar para gnaisses. Além dos minerais cujos nomes estão contidos no nome da litologia, as rochas também apresentam granada, rutilo e zircão como minerais acessórios (PINHEIRO et al., 2020). A idade máxima de deposição é de 640 Ma (KUSTER et al., 2020), e a área fonte principal é correspondente a rochas neoproterozoicas, de 660 a 960 Ma, de caráter juvenil e T_{DM} entre 1,2 e 1,4 Ga (SANTOS¹⁰, 2011 apud PINHEIRO et al., 2020, p. 56; FRUGIS et al., 2018).

5.2.3 Considerações

Quando as litologias da região são diferentes entre si (em termos de mineralogia, textura e estrutura, por exemplo), espera-se grande variação em suas respostas frente aos agentes intempéricos e erosivos. Mousazadeh e Salleh (2014) e Zakerinejad et al. (2018) conduziram estudos relacionando erosão por voçorocas e a litologia, indicando que o tipo de rocha tem influência sobre o processo erosivo. Arabameri et al. (2019) consideraram a litologia e a distância de falhas como alguns dos fatores condicionantes da formação de voçorocas. Os autores concluíram que a litologia é um dos fatores de maior significância. Segundo Rouhani et al. (2021), a distância de falha é um dos fatores mais importantes para erosão por voçorocas.

A variedade de rochas na área de estudo condiciona os processos erosivos, conforme já comentado por Real et al. (2020a). Além disso, as voçorocas estão relacionadas a falhas e zonas de cisalhamento, que consistem em zonas mais frágeis na bacia, onde o fluxo de escoamento ocorre preferencialmente (REAL, 2019; REAL et al., 2020a).

5.3 Pedologia

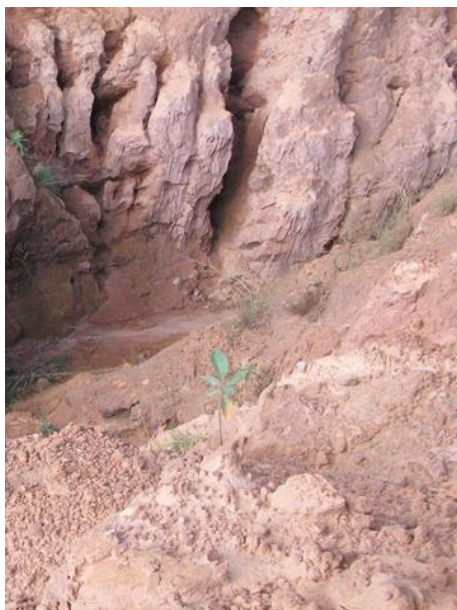
Segundo Horta et al. (2005), Ferreira (2005), Horta (2006), Horta et al. (2009), Universidade Federal de Viçosa et al. (2010), Sampaio (2014), Cassaro (2018) e Real (2019), as classes de solos predominantes em Nazareno e Conceição da Barra de Minas (MG) são Cambissolos, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho. Entretanto, ainda ocorrem pequenas incidências de Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos. De acordo com perfis de solo elaborados por Sampaio (2014), os latossolos ocorrem sobre os cambissolos. O mapa de solos, em escala 1:50.000, pode ser observado no Anexo 2. A base cartográfica adotada foi o mapa elaborado por Universidade Federal de Viçosa et al. (2010).

¹⁰ SANTOS, P. S. **Geocronologia, área-fonte e ambiente tectônico da unidade Santo Antônio – Megassequência Andrelândia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. 77 p.

Os Cambissolos são solos com menor desenvolvimento, no qual o horizonte B é incipiente (Bi), isto é, o horizonte subsuperficial subjacente ao horizonte A (horizonte mineral superficial), Ap ou AB, cujo grau de alteração físico-químico não é muito avançado, mas há cor ou unidades estruturais e mais da metade do volume dos sub-horizontes não correspondem a estrutura original da rocha. A estrutura do solo é desenvolvida, uma vez que quase não se observa estrutura da rocha ou estratificação dos sedimentos, o que indica pedogênese pouco avançada. Apresentam croma mais alto, matizes mais avermelhados ou conteúdo de argila mais elevado em relação aos horizontes subjacentes. Geralmente têm sequência de horizontes A ou hístico, Bi e C. Podem ou não apresentar o horizonte R (rocha) após o horizonte C, que corresponde ao material parental do solo, com pouca alteração por processos superficiais (SCHAETZL; ANDERSON, 2005; EMBRAPA, 2018).

Horta (2006) classificou os cambissolos encontrados em Nazareno (MG) como do tipo Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, argiloso, horizonte A moderado álico. Estes solos possuem argila de baixa atividade (Tb), bem como valores de saturação por bases (V) abaixo de 50%, indicativos de solo distrófico. A proporção de sílica por alumínio (Ki) foi inferior a 2,2 e a proporção de sílica por alumínio e ferro (Kr) foi superior a 0,75. Assim, tendo em vista que foram identificados baixos valores de SiO_2 e altos de Al_2O_3 , os solos são alíticos. O horizonte A apresentou textura média e os horizontes Bi e C, argilosa. O horizonte A mostra baixo V, elevado índice de saturação por Al e pequena espessura, caracterizando-o como moderado e álico. Na Figura 9, pode-se observar um Cambissolo típico da área de estudo, que é comumente encontrado no interior das voçorocas.

Figura 9 – Cambissolo típico da área de estudo.



Fonte: Grupo de pesquisa coordenado pela prof.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (2018).

De acordo com Horta et al. (2009), os Cambissolos são mais frequentes principalmente na porção sul do município de Nazareno. Associam-se a esta classe de solo a contribuição de rochas pelíticas e quartzito sobre o granito-gnaiss e vegetação mais rasteira, com características campestres. Sua ocorrência é em relevo predominantemente mais movimentado, ondulado a forte-ondulado. São solos mais pobres, rasos e de maior potencial erosivo. Além disso, apresentam encrostamento superficial e baixa permeabilidade. Segundo Ferreira (2005), devido às características de relevo e declividade, drenagem mais lenta, pedregosidade e menores índices de cobertura vegetal, os Cambissolos são mais susceptíveis aos processos erosivos do que os Latossolos.

Os Latossolos (Figura 10) correspondem a um grupamento de solos de evolução muito avançada, sendo observada intensa latolização/ferralitização. Isto é, ocorreu intemperismo intenso dos minerais primários e minerais secundários menos resistentes à alteração, o que resultou em concentração relativa de argilominerais resistentes, além de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Geralmente são muito profundos, com espessuras de *solum* normalmente superiores a 1 m. Apresentam sequências de horizontes A, B e C, na qual as transições são graduais, tendo pouca diferenciação de sub-horizontes. Mostram horizonte B latossólico abaixo do horizonte B em até 200 cm de profundidade – ou 300 cm, se o horizonte A tiver espessura superior a 150 cm. Associam-se geralmente a regiões equatoriais e tropicais, além de

subtropicais, sendo relacionados a antigas superfícies de erosão, pedimentos ou terraços fluviais (EMBRAPA, 2018).

Figura 10 – Exemplo de latossolo encontrado na área de estudo.



Fonte: Grupo de pesquisa coordenado pela prof.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (2018).

Horta (2006) classificou os Latossolos Vermelhos em LVdf e LVd. A classe LVdf é rica em Fe_2O_3 , o que fornece características distroféricas. Tendo em vista que os valores de V estão abaixo de 50%, o solo é distrófico. Foram encontrados valores baixos de Ki e Kr, indicativos de solo ferralítico, visto que há pouco SiO_2 e muito Al_2O_4 e Fe_2O_3 , sendo o solo muito intemperizado. Este solo é muito argiloso. A classe LVd também apresentou valores de V abaixo de 50%, sendo, portanto, composta por solos distróficos. Sua textura varia de argilosa a muito argilosa, com valores entre 550 g kg^{-1} e 730 g kg^{-1} . De acordo com Ferreira (2005), os Latossolos Vermelhos apresentam acidez média, capacidade de troca de cátions em pH 7,0 baixa e baixa saturação por alumínio. Além disso, o horizonte A é moderado e com teor de carbono orgânico total (COT) predominantemente médio.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são distróficos, pois apresentam valores de V menores que 50%. Possuem acidez média, capacidade de troca de cátions em pH 7,0 baixa e média saturação por alumínio. São solos argilosos a muito argilosos. Apresentam baixos teores de SiO_2 e são ricos em Al_2O_3 , indicados por Kr superior a 0,75 e Ki inferior a 2,2, sendo muito intemperizados. O horizonte A é moderado e possui baixos a médios teores de matéria orgânica (FERREIRA, 2005; HORTA, 2006).

Os Latossolos Vermelhos ocorrem em relevo predominantemente suave-ondulado a ondulado, com pendentes mais longas, ao passo que os Latossolos Vermelho-Amarelos têm distribuição mais uniforme na área do município (HORTA et al., 2009). Os Latossolos Vermelhos se mostram mais profundos que os Vermelho-Amarelos (CARVALHO et al.¹¹, 1994 apud HORTA, 2006, p. 39). Além disso, as características dos Latossolos Vermelho-Amarelos são ainda mais limitantes que as dos Latossolos Vermelhos no que diz respeito às limitações para o estabelecimento natural da vegetação em áreas erodidas (FERREIRA, 2005).

De acordo com EMBRAPA (2018), os Neossolos são solos ainda em formação, o que é evidenciado pela atuação reduzida dos processos pedogenéticos ou por predominância de características herdadas do material originário. Além disso, não apresentam horizonte B diagnóstico definido. O baixo desenvolvimento dos processos pedogenéticos pode estar relacionado às características desfavoráveis ao intemperismo do material de origem e/ou aos fatores climáticos, de relevo e ao tempo.

Os Neossolos Litólicos são caracterizados pela presença de contato lítico ou lítico fragmentário em até 50 cm de profundidade. Além disso, mostra horizonte A ou hístico imediatamente sobre a rocha, horizonte C/Cr, ou material com 90% de constituição por cascalhos, calhaus e matacões (EMBRAPA, 2018). O valor de saturação por bases está abaixo de 50%, o que indica um solo distrófico, devido à pobreza do material de origem (HORTA, 2006).

Os Neossolos Flúvicos, por sua vez, apresentam horizonte A sobre o horizonte C. Têm caráter flúvico em até 150 cm de profundidade e ausência de gleização expressiva em até 50 cm de profundidade. São originados a partir de sedimentos aluviais (EMBRAPA, 2018). São distróficos, tendo em vista que o valor de V está abaixo de 50%. Além disso, geralmente apresentam argilas de baixa atividade (HORTA, 2006).

Os Gleissolos apresentam expressiva gleização, bem como horizonte glei em até 50 cm de profundidade ou entre 50 e 150 cm se imediatamente abaixo dos horizontes A ou E. A gleização é expressa por colorações acinzentadas, azuladas ou esverdeadas no solo. Isto ocorre pois há a redução e solubilização do ferro, de modo que é possível observar as cores neutras dos minerais de argila, ou precipitação de compostos ferrosos. Portanto, ambientes redutores permanente ou periodicamente saturados por água são favoráveis para seu desenvolvimento

¹¹ CARVALHO, M. M.; EVANGELISTA, A. R.; CURI, N. **Desenvolvimento de pastagens na zona fisiográfica Campo das Vertentes, MG.** Lavras: ESAL; Coronel Pacheco: EMBRAPA – CNPGL, 1994. 127 p.

(EMBRAPA, 2018). Na área de estudo, tem-se a argila de baixa atividade e baixo valor de saturação por bases, sendo distróficos (HORTA, 2006).

5.4 Geomorfologia

De acordo com Brasil (1983), o município de Nazareno está localizado na Unidade Planalto de Campos das Vertentes. Esta unidade geomorfológica consiste em um elevado compartimento planáltico intensamente dissecado, cujas altimetrias variam de 400 a 1.300 m, sendo um importante divisor das bacias hidrográficas dos rios Doce, São Francisco, Paraná e Paraíba do Sul. Predominam colinas e morros de vertentes convexo-côncavas, as quais são esculpidas em rochas arqueano-proterozoicas. O Planalto de Campos das Vertentes pode ser compartimentado em três subunidades – porções ocidental e oriental e Planalto de Andrelândia –, devido à diversidade das feições do relevo (BRASIL, 1983; BARUQUI, 2006; SAMPAIO, 2014).

A porção ocidental abrange a microrregião Formiga e parte da microrregião Campos da Mantiqueira. Apresenta relevo mais suavizado, no qual dominam modelados de dissecção homogênea com colinas convexo-côncavas delimitadas por talvegues rasos, além de relevo de dissecção diferencial, com agrupamentos de cristas de 75 a 116 m de profundidade. A presença de rochas mais resistentes é evidenciada pelo surgimento de feições mais aguçadas em topos nivelados. Ocorrem também linhas de pedra de quartzo, as quais podem preencher depressões ou serem depositadas em níveis planos, o que evidencia processos anteriores de pediplanação (BRASIL, 1983; BARUQUI, 2006).

A porção oriental abrange a microrregião Campos da Mantiqueira. Apresenta relevo forte ondulado e montanhoso. Dominam modelados de dissecção homogênea, compostos de grandes colinas e morros de topos convexo-côncavos, que comumente apresentam linhas de cumeadas e cristas de topos aguçados. Observam-se incisões de drenagem geralmente profundas, que configuram vales em “V” encaixados (BRASIL, 1983; BARUQUI, 2006).

Ocorre, ainda, a unidade Planalto de Andrelândia, subdivisão dos Planaltos do Alto Rio Grande, no domínio morfoestrutural Remanescentes de Cadeias Dobradas. A unidade engloba os municípios de São João del Rei, Tiradentes, Barroso e Barbacena, que constituem a microrregião Campos da Mantiqueira. O relevo apresenta colinas com topos convexos a tabulares e encostas suavizadas, intercaladas por cristas alongadas, geralmente assimétricas. Ocorre um padrão de dissecção homogênea, com predomínio de densidades de drenagem

média a baixa. Voçorocas com extensões de dezenas de metros e larguras consideráveis são frequentes nessa unidade (BRASIL, 1983; BARUQUI, 2006).

Nazareno faz parte da microrregião Campos da Mantiqueira. De acordo com Horta (2006) e Horta et al. (2009), o relevo predominante do município é ondulado. Também ocorrem, em extensões menores, os relevos suave-ondulado, plano e forte ondulado. A altitude varia entre 839 e 1140 m, sendo as maiores elevações relacionadas à Serra Negra (a nordeste) e as menores, às áreas de várzea do Rio Grande (a oeste). O relevo montanhoso tem ocorrência e distribuição reduzidas, sendo presente apenas a nordeste, associado às maiores altitudes. Tendo em vista que as áreas planas englobam as várzeas e os topos de morros, elas são mais bem distribuídas na área de estudo. A Figura 11 ilustra o relevo da área de estudo.

Figura 11 – Relevo da área de estudo.



Fonte: Grupo de pesquisa coordenado pela prof.^a Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues (2018).

5.5 Clima

De acordo com Baruqui et al. (2006), o clima do município de São João del Rei – município situado a leste de Nazareno e Conceição da Barra de Minas – é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen. Isto é, com inverno seco e verão chuvoso. O mês mais frio apresenta temperaturas inferiores a 18°C e o mês mais quente, temperaturas superiores a 22°C. A precipitação média, entre a primavera e o verão, é de 1244 mm e, nas estações de outono e inverno, é de 192 mm.

A oeste de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, no município de Lavras, Baruqui et al. (2006) classificaram o clima como Cwb, de acordo com a classificação de Köppen. Assim, o clima é temperado chuvoso (mesotérmico) ou subtropical de altitude. A altitude de Lavras é de 925 m. Os verões são brandos e ocorre estiagem nos invernos. A precipitação média anual é de 1529 mm e a temperatura média mensal é de 19,5°C.

As características climáticas de Nazareno são semelhantes ao que se observa em São João del Rei e em Lavras (SAMPAIO, 2014), o que pode ser extrapolado para Conceição da Barra de Minas. A precipitação total anual é de cerca de 1200 a 1400 mm.

De acordo com o banco de dados meteorológicos disponibilizado pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, no período de 1991 a 2021, para as estações de Lavras e São João del Rei (INMET, 2022), tem-se como valores máximos, médios e mínimos para precipitação total e temperatura média, os valores apresentados na Tabela 3. As médias de precipitação total foram calculadas excluindo os dias que não tiveram chuva ou não tiveram registro no banco de dados por razões técnicas.

Destaca-se que, em São João del Rei, havia uma estação meteorológica convencional até 2006 e, após este ano, foi instalada uma estação meteorológica automática. Em Lavras, a estação meteorológica é do tipo convencional.

Tabela 3 – Valores máximos, mínimos e médias de precipitação total e temperatura média em Lavras e São João del Rei, com base em dados diários.

Lavras (1991-2021)	Máxima	Média	Mínima
Precipitação total (mm)	155,80	12,11	0,00
Temperatura média (°C)	28,26	20,59	9,24
São João del Rei (1991-2021)	Máxima	Média	Mínima
Precipitação total (mm)	179,00	10,89	0,00
Temperatura média (°C)	26,68	19,65	8,08

Fonte: INMET (2022).

Considerando dados anuais, tem-se os valores apresentados na Tabela 4.

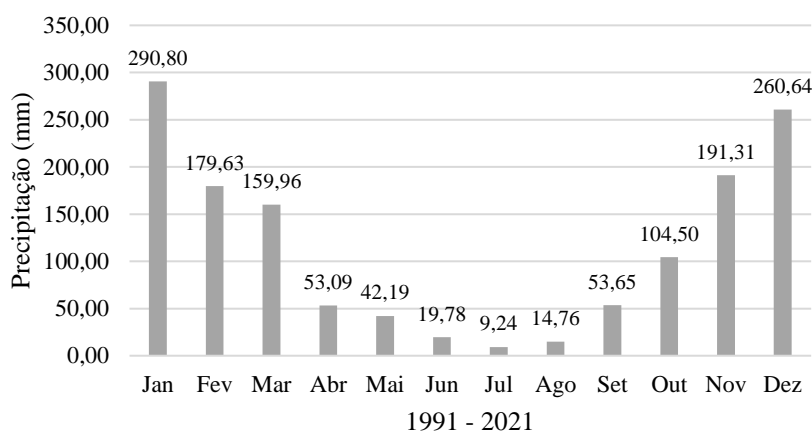
Tabela 4 – Valores máximos, mínimos e médias de precipitação total e temperatura média em Lavras e São João del Rei, com base em dados anuais.

Lavras (1991-2021)	Máxima	Média	Mínima
Precipitação total (mm)	1824,90	1337,20	388,30
Temperatura média (°C)	21,37	20,59	20,05
São João del Rei (1991-2021)	Máxima	Média	Mínima
Precipitação total (mm)	1876,80	1370,81	524,10
Temperatura média (°C)	21,83	19,79	18,17

Fonte: INMET (2022).

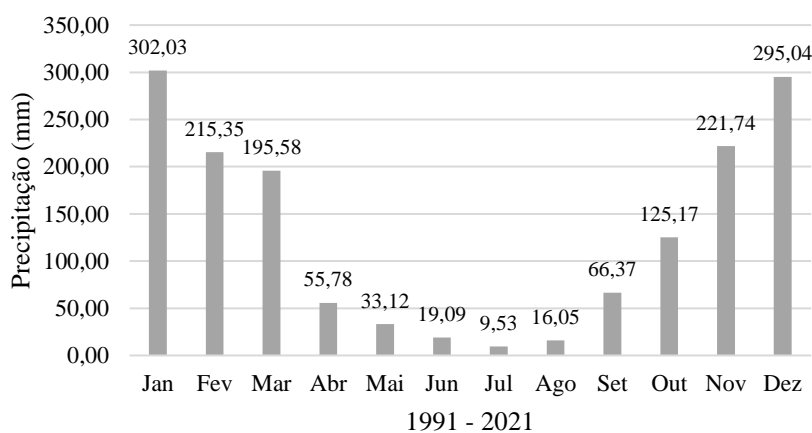
Os valores médios de cada mês para a precipitação total e temperatura média de Lavras e São João del Rei são apresentados na Figura 12 à Figura 15.

Figura 12 – Valores médios para precipitação total em Lavras (MG).



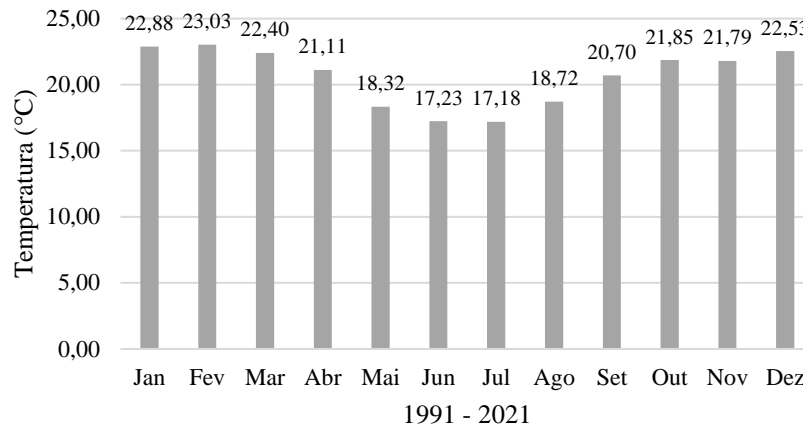
Fonte: INMET (2022). Elaboração da autora.

Figura 13 – Valores médios para precipitação total em São João del Rei (MG).



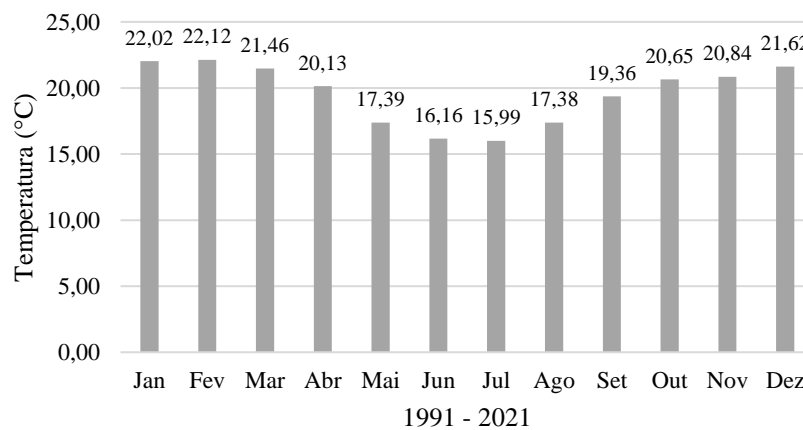
Fonte: INMET (2022). Elaboração da autora.

Figura 14 – Valores médios para temperatura média em Lavras (MG).



Fonte: INMET (2022). Elaboração da autora.

Figura 15 – Valores médios para temperatura média em São João del Rei (MG).



Fonte: INMET (2022). Elaboração da autora.

Avaliando o período de 1991 a 2021, verifica-se que os meses mais chuvosos são entre outubro e março, sendo os meses de novembro a janeiro os mais chuvosos. Os meses mais chuvosos coincidem com as maiores temperaturas, ao passo que os meses com menor pluviosidade apresentam menores temperaturas.

De acordo com a nota técnica 004/17 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2017), é comum ocorrer períodos consecutivos sem chuva entre janeiro e fevereiro, denominados “veranicos”. Entretanto, uma irregularidade na distribuição das chuvas está ocorrendo na região desde a estação chuvosa de 2013/2014, na qual se observou diminuição no volume de chuva nos dois primeiros meses do ano, implicando na ocorrência do “veranico”

antes da época usual. Assim, ocorrem ondas de calor que causam evaporação da água absorvida pelo solo, resultando em piores condições hídricas do solo.

Em janeiro de 2020, devido à formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a partir da persistência dos ventos e favorecimento de área de convergência de umidade, foram registrados acumulados de chuva significativos nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Em Minas Gerais, 51 municípios foram atingidos por chuvas intensas, com acumulados de chuva pelo menos duas vezes maiores que as médias para janeiro nas estações de Belo Horizonte, Ibitiré, Florestal, Diamantina e Caparaó (INMET, 2020).

Em dezembro de 2021, foram registrados três episódios de ZCAS que atingiram os Estados de Tocantins, Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo. As chuvas persistentes também foram potencializadas pela diminuição da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico pelo fenômeno La Niña e aumento da temperatura da superfície no Oceano Atlântico de cerca de 0,5°C acima da média. Nas estações de Pedra Azul e Salinas, em Minas Gerais, foram observados totais de precipitação que variam de duas a três vezes mais que a média para o mês (INMET, 2021).

5.6 Vegetação

De acordo com Naime et al. (2006), o município de Nazareno é composto por floresta tropical subcaducifólia, cerrado tropical subcaducifólio e campo cerrado tropical. Conceição da Barra de Minas apresenta floresta tropical subperenifólia, floresta tropical subcaducifólia, floresta tropical perenifólia de várzea, cerrado tropical subcaducifólio, campo cerrado tropical e campo tropical higrófilo.

Baruqui et al. (2006) descrevem as formações vegetais identificadas nestes municípios, sendo:

- a) Floresta Tropical Subperenifólia – formação densa, alta e rica em espécimes. Apresenta estrato de até 20 a 30 m de altura, em parte decídua;
- b) Floresta Tropical Subcaducifólia – formação mesófila que apresenta perda significativa de folhas de componentes do estrato arbóreo na época seca. Apresenta estrato mais alto de até 20 m. Observam-se árvores de troncos retos e esgalhamento alto, com muitas copas em parasol no primeiro estrato e folhas pequenas. O tapete herbáceo é ralo;
- c) Floresta Tropical Perenifólia de Várzea – composta por matas de grande porte, densas e com substrato arbustivo, normalmente presentes em faixas remanescentes ao longo de cursos d'água;

- d) Cerrado – apresenta, geralmente, árvores tortuosas de cascas grossas e gretadas. Mostra estrato arbustivo, subarbustivo denso e graminoso-herbáceo, além de composição florística variável;
- e) Campo Cerrado – domina o estrato arbustivo-subarbustivo sobre o arbóreo. É observado em áreas de maior inclinação e solos rasos;
- f) Formações Hidrófilas – apresentam tapete graminoso-herbáceo quase ininterrupto na porção central e subarbustos e arbustos nas bordas de seu domínio. São características de áreas onde ocorrem Gleissolos.

5.7 Uso e Ocupação

A bacia do Córrego do Palmital, bem como a região que abrange os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, tem como atividades econômicas predominantes, a agricultura e a pecuária. Historicamente, o uso do solo é principalmente para pastos, especialmente para produção leiteira; sendo subordinadamente para plantações de arroz, milho, soja, eucalipto, cana-de-açúcar, café e maracujá. Também ocorre atividade extrativa, com a mineração de cassiterita e óxido de manganês (FERREIRA, 2005; REAL et al., 2020b).

Na época colonial, Nazareno e municípios adjacentes mineraram ouro. Também ocorreu exploração de manganês, estanho e tântalo (PEREIRA; ÁVILA; NEUMANN, 2004; FERREIRA, 2005).

Algumas práticas agrícolas colaboraram com o desenvolvimento de processos erosivos e com a redução da fertilidade do solo ao longo do tempo, como o fogo descontrolado, a monocultura, a exploração exacerbada, o desmatamento para implantação de pastos e pasto excessivo em áreas inclinadas (REAL, 2019). A cultura temporária (sazonal ou anual) expõe o solo por mais tempo em comparação com a cultura permanente e, portanto, áreas de cultura temporária são mais suscetíveis aos processos erosivos.

Estradas de terra na região foram utilizadas por atividades de mineração no século XVII, além de receberem tráfego de veículos com tração animal nas décadas de 1950 e 1960, e ainda são utilizadas na atualidade. Sua construção impermeabiliza a faixa trafegável e proporciona o acúmulo de água nas margens, e o tráfego pode criar sulcos profundos nas estradas. Além disso, teve-se a abertura de valas como uma prática antiga de limitação de propriedades rurais (FERREIRA et al., 2011; SAMPAIO, 2014).

Combinadas com a remoção de cobertura vegetal, estas ações aumentam o escoamento da água e culminam na instalação e contribuição ao desenvolvimento de processos erosivos na região.

5.8 Processos Erosivos na Área de Estudo

Os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas são fortemente afetados por processos erosivos, evidenciados pela presença de grande quantidade de voçorocas de diferentes tamanhos e formatos. Entretanto, de acordo com Pereira et al. (2014), a população local possui baixa percepção sobre a influência das erosões no dia a dia.

Vários estudos foram realizados sobre os processos erosivos nessa região, tendo por área de estudo o município de Nazareno (FERREIRA, 2005; FERREIRA et al., 2011, PEREIRA et al., 2014), a bacia do Alto Rio Grande e/ou sub-bacias (BONO et al., 1996; SILVA, 2006; SILVA et al., 2008; COELHO et al., 2012; MELLO et al., 2012; FERREIRA E FERREIRA, 2015), a bacia do Córrego do Palmital (REAL, 2019; REAL et al., 2020a; REAL et al., 2020b), a bacia do Córrego do Forro (CASSARO, 2018), a bacia do Córrego do Cafundão (SAMPAIO et al., 2013) e a voçoroca do Córrego do Cravo (SAMPAIO, 2014; CASSARO, 2015; OLIVEIRA, 2015).

Foram realizados levantamentos de voçorocas na região de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, conforme é observado na

Tabela 5.

Tabela 5 – Levantamentos de voçorocas realizados na região de Nazareno e Conceição da Barra de Minas.

Trabalho	Área de estudo	Número de voçorocas	Área (km²)	Área (ha)
Ferreira (2005)	Nazareno	57	3,446	344,6
Ferreira et al. (2008)	Bacia do Alto Rio Grande	1150	20,175	2017,5
Ferreira et al. (2011)	Nazareno	96	-	-
Sampaio et al. (2013)	Bacia do Córrego do Cafundão	8	-	-
Ferreira e Ferreira (2015)	Bacia do Alto Rio Grande	798	30,29	3.029
Cassaro (2018)	Bacia do Córrego do Forro	13	13,42	1342
Real (2019)	Bacia do Córrego do Palmital	60	-	-

- Não determinado. Fonte: Da autora.

Ferreira (2005) realizou levantamento fisiográfico de Nazareno com base em cartas planialtimétricas, mapas temáticos, fotografias aéreas e imagens de satélite, que culminou na elaboração de mapas no *software* SPRING 4.0. A identificação de voçorocas ocorreu primeiramente por meio da fotointerpretação de ortofotocartas de 1986, em escala de 1:10.000. A localização das feições foi confirmada com visitas a campo, nas quais foi possível

georreferenciar com auxílio do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Foram analisadas as variáveis: área comprometida, área interna efetiva, perímetro, comprimento do eixo maior, comprimento do eixo menor, grau de arredondamento, alongamento, diâmetro de Feret e compactidade. As bacias de contribuição das voçorocas foram caracterizadas de acordo com a posição da voçoroca na encosta, relevo, classe de drenagem do solo, classe de pedregosidade, classe de erosão laminar, classe de erosão em sulcos, uso agrícola, nível tecnológico dos agricultores e nível de estabilização natural.

De outubro de 2003 a agosto de 2004, 57 voçorocas foram georreferenciadas, mapeadas e diagnosticadas em Nazareno. Dentre as quais foram amostradas e cadastradas 25 voçorocas para estudo mais detalhado, levando em consideração a representatividade do grupamento de voçorocas e impacto nas respectivas regiões de ocorrência. Foram descritos 26 perfis de solo e foram coletadas 54 amostras de diferentes horizontes e sub-horizontes para as análises físico-químicas em laboratório. 88% das voçorocas estudadas corresponderam a erosões ativas ou parcialmente ativas com nível muito baixo a baixo de estabilização (FERREIRA, 2005). Para o mesmo período, foram encontradas 96 voçorocas, sendo 18 destas amostradas e cadastradas por Ferreira et al. (2011).

Ferreira et al. (2008) diagnosticaram 1150 voçorocas na Bacia do Alto Rio Grande, que somaram uma área de 2017,5 ha para o ano de 2000. Ferreira e Ferreira (2015) levantaram 798 voçorocas, com área total de 3029 ha, no ano de 2009. Ambos os trabalhos utilizaram ortofotocartas dos municípios da bacia do Alto Rio Grande (Nazareno, São Tiago, São João del Rei, Santo Antônio do Amparo, Bom Sucesso e Ibituruna), em escala de 1:10.000, de 1985, além de imagem digital do satélite LANDSAT 7 – ETM+, de resolução espacial 30 x 30 m.

Sampaio et al. (2013) delimitaram 8 voçorocas a partir de imagens de 31/03/2007, obtidas pelo *software* Google Earth PRO. As feições erosivas são localizadas próximas às cabeceiras dos cursos d'água, estradas e trilhas na bacia do Córrego do Cafundão. Não foi possível correlacionar as voçorocas às altitudes, somente a declividades elevadas. Levantou-se a possibilidade de que a ocorrência de voçorocas pode estar relacionada às estruturas, como clivagens, xistosidades e bandamentos gnáissicos das litologias presentes na área.

A voçoroca do Córrego do Cravo foi objeto do estudo de Sampaio (2014), que consistiu na caracterização geológico-geotécnica, tratamento de dados pluviométricos, e estudo do comportamento e vazão das chuvas, de modo a propor macrodrenagem na bacia. Cassaro (2015) também estudou essa mesma voçoroca, a fim de determinar os fatores para o retorno da erosão após a recuperação da área, bem como avaliar os métodos empregados na recuperação. Oliveira

(2015) caracterizou a voçoroca do Córrego do Cravo, analisou o projeto de recuperação realizado e propôs técnicas de bioengenharia de solos, com o objetivo de estabilizar os taludes. Sampaio et al. (2016) avaliaram a reativação da voçoroca do Córrego do Cravo ao comparar um solo bem desenvolvido e um saprólito de granito-gnaiss. Concluiu-se que as estruturas microscópicas refletem comportamentos ambientais macroscópicos que, somados com o uso do solo, aceleraram os processos erosivos. Sampaio et al. (2017) também propuseram a macrodrenagem como conceito inicial para um projeto de baixo custo, combinando os resultados da aplicação de SIG, bem como modelos hidrológico e hidráulico nos *softwares* ABC 6 e Canal.

Cassaro (2018) analisou os condicionantes geológico-geotécnicos que influenciam os processos erosivos na bacia do Córrego do Forro, parte da bacia do Córrego do Palmital. Foram encontradas 13 voçorocas, com área total 13,42 km², por meio de mapeamento com imagens do Google Earth de 2002, 2007 e 2016 e campanha de campo.

Real (2019) e Real et al. (2020b) utilizaram fractal, multifractal e lacunaridade para analisar as voçorocas da bacia do Córrego do Palmital, num contexto de evolução espaço-temporal, avaliando os anos de 2002, 2007, 2014 e 2016. Foram delimitadas 60 voçorocas, utilizadas na análise das dimensões fractais. Real (2019) e Real et al. (2020a) propuseram a denominação de “complexo de voçoroca”, uma vez identificado que as feições erosivas possuem interconexões. Assim, considerar as voçorocas isoladamente para a estabilização e recuperação não seria efetivo. De acordo com Manoel e Rocha (2014 apud Real et al., 2020b), a localização das voçorocas é predominantemente relacionada com bacias hidrográficas de primeira ordem, cujas origens se associam com ambientes dissecados com falhas, fraturas ou dobras. A bacia do Córrego do Palmital é de quarta ordem (Real et al., 2020b), que indica que as estruturas geológicas regionais mais antigas ocorrem nas partes mais altas da bacia. Também foi verificado que os canais de primeira ordem, quando associados à falta de cobertura vegetal, contribuem para a expansão de voçorocas na área de estudo.

Mais da metade das voçorocas identificadas em Nazareno ocorrem sobre Cambissolos, sendo esses os solos mais suscetíveis à erosão. O restante se apresenta sobre os Latossolos Vermelhos-Amarelo e os Latossolos Vermelhos (FERREIRA, 2005; SAMPAIO, 2014; CASSARO, 2018). Além disso, de acordo com Cassaro (2018), a erosão dos cambissolos gera trincas nos solos, desestabilizando os latossolos e alargando as áreas erodidas. Os horizontes C de solos de alteração de gnaiss granítico são altamente erodíveis. Consistem, portanto, nos principais materiais de origem dos solos nos quais ocorrem voçorocas (FERREIRA, 2005). Ao

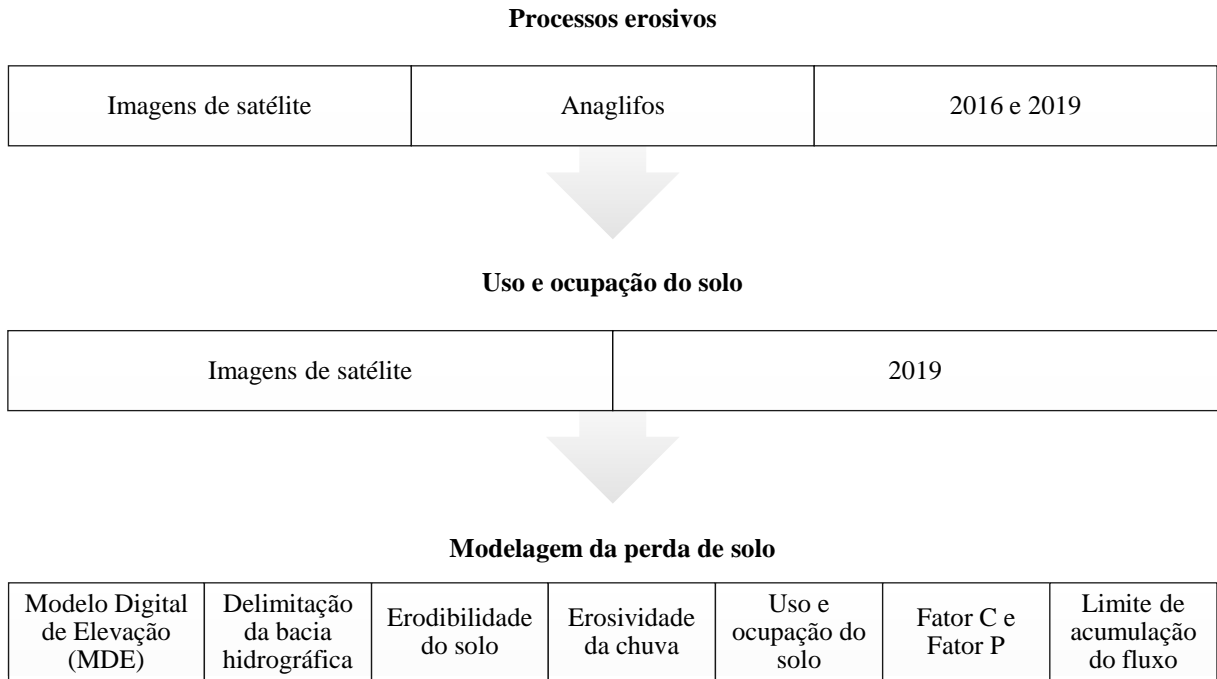
comparar áreas originadas de granito-gnaiss leucocrático e micaxisto, a primeira se mostrou mais suscetível à erosão (FERREIRA, 2008). A declividade é um fator importante que favorece a ocorrência de processos erosivos, visto que as voçorocas predominam em áreas de relevo ondulado a muito ondulado (SAMPAIO et al., 2013; CASSARO, 2018).

O desenvolvimento das voçorocas também é relacionado com as condições de uso e ocupação da área de estudo, sendo possível destacar as estradas rurais antigas, os impactos da mineração do ouro no século XVIII, os valos que eram utilizados para limitar as propriedades, a falta de manutenção do pasto, a não aplicação de práticas conservacionistas e o desmatamento (FERREIRA, 2005; FERREIRA et al., 2011; SAMPAIO et al., 2016; CASSARO, 2018). Estes fatores são associados com a concentração do fluxo superficial de água, a qual predomina em comparação com a acumulação (SAMPAIO et al., 2013). A exposição do nível d'água subterrâneo em voçorocas também é um fator que colabora com a evolução de processos erosivos (SAMPAIO, 2014).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa é resumida na Figura 16 e descrita nos tópicos a seguir.

Figura 16 – Fluxograma da metodologia de estudo.



Fonte: Da autora.

6.1 Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento em SIG

As bases topográficas utilizadas nessa pesquisa foram as folhas de Nazareno (SF-23-X-C-I-2) e Itutinga (SF-23-X-C-I-4), ambos em escala de 1:50.000, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 1975 (IBGE, 1975a; IBGE, 1975b). Os elementos físicos, políticos e de infraestrutura foram obtidos nas bases de dados do IBGE (IBGE, 2019) e do Sistema Estadual de Meio Ambiente (Sisema) de Minas Gerais (SISEMA, 2019), com escalas de 1:5.000.000 e 1:100.000, respectivamente.

As unidades geológicas que compõem a área de estudo e os municípios nos quais ela está inserida estão de acordo com o Mapa Geológico e de Recursos Minerais, que integra as Folhas Nazareno (SF-23X-C-I-2), São João del Rei (SF-23-X-C-II-1), Itutinga (SF-23-X-C-I-4) e Madre de Deus de Minas (SF-23-X-C-II-3), na escala de 1:100.000, do Projeto ARIM Reavaliação das Sequências Metavulcanossedimentares a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (ÁVILA et al., 2019a). As unidades pedológicas foram descritas de acordo com o Mapa de

Solos do Estado de Minas Gerais, escala 1:650.000, elaborado pela Universidade Federal de Viçosa et al. (2010).

Foram obtidas imagens de satélite da *Maxar Technologies*, de 12/09/2002, 31/03/2007, 12/06/2008, 08/02/2014, 29/04/2014, 13/07/2016, 29/03/2017 e 07/01/2019, por meio do *software Google Earth PRO*, versão 7.3. Para elaboração dos anaglifos e mapas dos levantamentos de voçorocas e de uso e ocupação, apenas as imagens de 2016, 2017 e 2019 foram utilizadas.

O georreferenciamento dos dados topográficos foi realizado utilizando a Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum Horizontal Córrego Alegre (MG) e Zona 23 S. A elaboração dos mapas, por sua vez, utilizou o Datum Horizontal SIRGAS 2000, Zona 23 S. O *software ArcMAP™*, pertencente ao pacote *ArcGIS®*, versão 10.4, foi utilizado para georreferenciamento e elaboração dos mapas de localização, bacia hidrográfica, pedologia, geologia, modelo digital de elevação, erosividade, erodibilidade, calibração e levantamentos de voçorocas e uso e ocupação do solo.

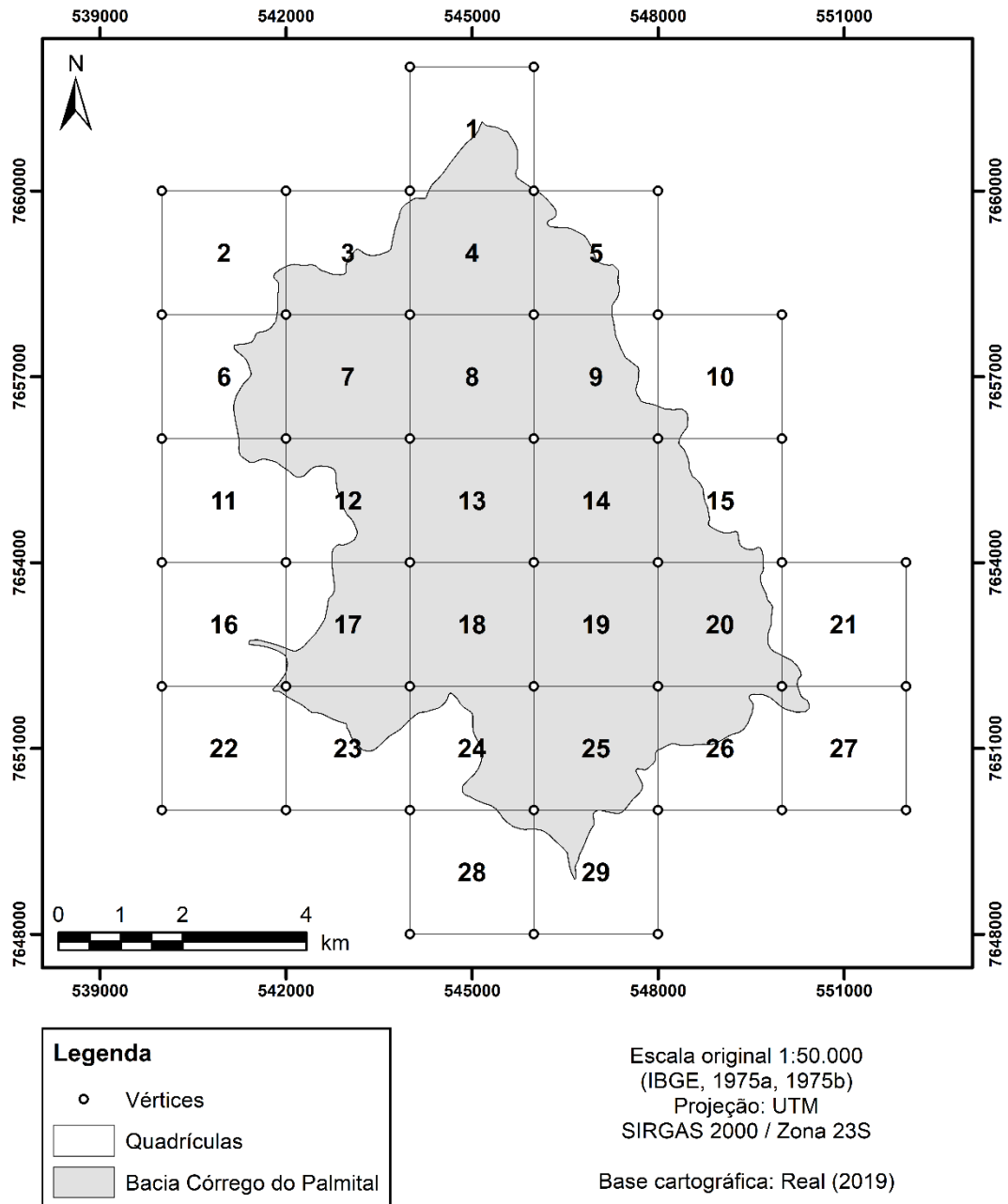
Os procedimentos relacionados à delimitação das formas das voçorocas e ao uso do solo são descritos a seguir.

6.1.1 Mapeamento das Voçorocas

6.1.1.1 Obtenção das imagens de satélite

Tendo em vista a forma da bacia hidrográfica do Córrego do Palmital e a escala adequada para a análise dos dados em sensoriamento remoto, foi elaborada malha de pontos que marcam os vértices de quadrículas de 2000 m de altura e 2000 m de largura. As quadrículas abrangem todo o polígono da área de estudo, conforme se observa na Figura 17.

Figura 17 – Quadrículas para obtenção das imagens de satélite da bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Para cada quadrícula, foram salvas duas imagens de satélite *Maxar Technologies* no software *Google Earth PRO*, com altitude do ponto de visão de 3,85 km e resolução máxima (4800 x 2312 pixels), para os anos de 2002, 2007, 2008, 2014, 2016, 2017 e 2019. Uma imagem centralizou a quadrícula e a outra foi deslocada 1000 m para leste, sendo denominadas “esquerda” e “direita”, respectivamente. O deslocamento proporciona o funcionamento da elaboração do anaglifo.

Foram obtidas imagens dos anos de 2002 (12/09/2002), 2007 (31/03/2007), 2008 (12/06/2008), 2014 (08/02/2014 e 29/04/2014), 2016 (13/07/2016), 2017 (29/03/2017) e 2019 (07/01/2019). As imagens de 2002, 2007, 2008 e 2014 foram salvas para controle, ao passo que as imagens de 2016, 2017 e 2019 foram utilizadas para a confecção de anaglifos.

Priorizaram-se imagens de boa visibilidade, com ausência de nuvens. Não foram utilizadas imagens mais recentes, uma vez que as imagens de 23/06/2020 estão esbranquiçadas – o que prejudica a qualidade do processamento – e não são disponibilizadas imagens de 2021 ou 2022 na escala das quadrículas.

6.1.1.2 Elaboração dos anaglifos

O *software* utilizado para a elaboração dos anaglifos foi o *Anaglyph Maker*, versão 1.08, de distribuição gratuita. Carregou-se as imagens esquerda e direita de cada quadrícula e ano para gerar o anaglifo do tipo “*Anaglyph Color (Red-Cyan)*”. Sua escolha considerou que a imagem em ciano é visível com os óculos bicoloridos (vermelho e azul). Além disso, o anaglifo “*Anaglyph Color (Red-Cyan)*” apresentou melhores resultados e é menos agressivo aos olhos em comparação com o anaglifo do tipo “*Anaglyph Red-Blue*”.

Foram gerados 29 anaglifos para os anos de 2016 e 2019, sendo um para cada quadrícula, para a realização dos levantamentos de voçorocas referentes a 2016 e 2017. Os oito anaglifos de 2017 foram elaborados somente para as quadrículas de 22 a 29, pois as imagens de 2016 mostraram baixa visibilidade nessas quadrículas devido à presença de nuvens. Assim, as imagens de 2017 serviram para confirmar feições levantadas em 2016.

6.1.1.3 Delimitação das voçorocas

Os *shapefiles* das voçorocas levantadas por Cassaro (2018) e Real (2019) para o ano de 2016 guiaram a localização das feições erosivas existentes na bacia do Córrego do Palmital. Uma vez localizadas, as voçorocas foram traçadas sobre os anaglifos com a ferramenta *Create Features* no *ArcMAP*, versão 10.4, com o emprego de óculos bicoloridos.

Os critérios para identificação das voçorocas consideraram a forma, textura, cor e profundidade, que se diferenciam dos padrões observados de acordo com o uso da área afetada. Destaca-se que a visualização tridimensional das imagens melhorou a observação da profundidade das feições, a partir do emprego dos anaglifos.

Após a delimitação das voçorocas já identificadas nos levantamentos anteriores, foi realizada uma varredura em todas as quadrículas, de modo a detectar e delimitar novas

voçorocas, bem como avaliar mudanças de tamanho e forma destas feições. No geral, foram detectados aumentos de área nas voçorocas identificadas. Contudo, algumas voçorocas identificadas em 2016 foram separadas em 2019, uma vez que a distinção de seus limites foi dificultada pela presença de vegetação no interior das feições.

6.1.2 Uso do Solo

Para o levantamento do uso do solo, foram utilizadas as imagens de satélite de 07/01/2019, centralizadas nas quadrículas. Não foi necessário o uso de anaglifos, visto que a informação de profundidade do terreno não acrescentava muitas alterações na detecção do tipo de uso do solo. Os principais critérios foram relacionados à cor e textura observáveis nas imagens. Foi criado *shapefile* do tipo polígono com a ferramenta *Create Features* do *ArcMAP*.

Seguiu-se a metodologia de Real (2019), que considerou escalas de 1:10.000 a 1:1.500 nas imagens de satélite, de modo a não perder elementos identificáveis. Assim, deu-se continuidade ao mapeamento feito até 2016. As classes consideradas foram: cafezal, cultura (milho e soja), lavoura temporária (milho e soja em áreas anteriormente classificadas como pastagem) e pastagem. Parte da região norte da bacia não foi classificada, pois a imagem estava encoberta por uma nuvem.

6.2 Levantamento de Dados

Foi realizado um levantamento de dados sobre os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas, bacia do Alto Rio Grande e bacia do Córrego do Palmital, de forma a obter informações relevantes ao desenvolvimento desta pesquisa, no que tange às características do meio físico, agente deflagrador, estado da arte e problemas relacionados aos processos erosivos na região.

6.3 Análise Estatística

Realizou-se análise estatística de dados meteorológicos de pluviosidade (precipitação total, em mm) e temperatura (temperatura média, em °C), devido ao papel que representam no regime de chuvas e, portanto, na erosividade. Assim, fornecendo subsídios para interpretações quanto às influências destes agentes físicos sobre os materiais geológicos e processos erosivos na área de estudo.

6.3.1 Obtenção dos dados

Os dados foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP/INMET), uma plataforma gratuita que disponibiliza dados meteorológicos de estações convencionais e automáticas de todo o território brasileiro. Os dados podem ser obtidos por hora, dia ou mês em formato CSV.

Os municípios de Nazareno e Conceição da Barra de Minas não possuem estações meteorológicas em seus territórios. As estações mais próximas estão situadas nos municípios de Lavras e São João del Rei, também no Estado de Minas Gerais, que são localizadas a oeste e a leste da área de estudo, respectivamente. Considera-se que as condições climáticas da bacia do Córrego do Palmital são similares ao que se observa nas estações meteorológicas destas localidades.

A estação meteorológica de Lavras é do tipo convencional (código 83687), cujo funcionamento foi iniciado em 1911 e segue até a atualidade. Em São João del Rei, a estação foi do tipo convencional (código 83688) de 1914 a 2006. A partir deste ano, a estação é do tipo automática (código A514).

Foram baixados os dados diários e mensais de cada estação, referentes aos últimos 30 anos (1991 a 2021). As variáveis escolhidas são denominadas “precipitação total (mm)” e “temperatura média compensada (°C)” em estações convencionais e “precipitação total (mm)” e “temperatura média (°C)” em estações automáticas.

Os dados anuais não são fornecidos diretamente na plataforma BDMEP/INMET. Dessa forma, foi necessário calcular os valores anuais com base nos valores mensais, obtidos na plataforma. Para a precipitação total, somou-se os valores dos doze meses que compõem o ano. Para a temperatura média, foi realizado o cálculo da média simples considerando os dados disponíveis para cada ano.

As tabelas obtidas na plataforma BDMEP/INMET podem apresentar campos nulos, isto é, sem valor atribuído para as variáveis de interesse. Estes campos ocorrem pois o sistema não gera valores diários e mensais quando não são alcançadas determinadas porcentagens de recebimento de dados, as quais são detalhadas na Tabela 6. As falhas de recebimento de dados horários se devem a questões técnicas e operacionais.

Tabela 6 – Porcentagens de recebimento de dados necessárias para geração de valor numérico no sistema BDMEP/INMET.

Periodicidade	Variável	Porcentagem de Recebimento de Dados
Diária	Precipitação total	75% dos dados horários
	Temperatura média	70% dos dados horários
Mensal	Precipitação total	90% dos dados diários
	Temperatura média	70% dos dados diários

Fonte: BDMEP/INMET (2022).

6.3.2 Preparação dos dados

O tratamento inicial dos dados foi realizado no *software* Excel, componente do pacote Microsoft Office, tendo em vista que os dados foram obtidos em formato CSV. Os dados compuseram dois conjuntos, sendo: Lavras – 1991 a 2021 (estação convencional); São João del Rei – 1991 a 2006 (estação convencional) e 2006 a 2021 (estação automática). Estes foram denominados nas tabelas e *scripts* como “LAVRAS”, “SJDR”, respectivamente.

Além dos valores das variáveis selecionadas e respectivas datas de medição, a tabela disponibilizada no BDMEP/INMET apresenta informações sobre a estação, sendo: nome, código, latitude, longitude, altitude, situação, data inicial e data final dos dados baixados e periodicidade da medição. Foram geradas tabelas em formato XLSX apenas com os valores das medições de precipitação total e temperatura média, nas quais os valores representados por “null” (valores nulos, sem informação numérica) foram apagados, deixando os campos vazios. Os conjuntos foram adicionados no ambiente R com auxílio do *software* RStudio, por meio do pacote *readxl* e o comando *read_xlsx (file.choose ())*. Os valores nulos (campos vazios) em cada variável nos dois conjuntos de dados foram omitidos com o comando *na.omit (vetor)*, onde o termo “vetor” foi substituído pelo nome do vetor a ser alterado.

6.3.3 Análise da Componente Principal

De modo a possibilitar a análise e visualização dos métodos da análise da componente principal (*Principal Component Analysis – PCA*), foram instalados e carregados os pacotes *FactoMineR* e *factoextra* no RStudio, com os comandos *install.packages (pacote)* e *library (pacote)*, respectivamente. O termo “pacote” foi substituído por *FactoMineR* ou *factoextra*.

O pacote *FactoMineR* fornece as coordenadas, a qualidade de representação e a contribuição de indivíduos e variáveis. Além disso, ele também prevê os resultados para indivíduos e variáveis suplementares. Assim, permite a realização de PCA (*Principal Component Analysis*, ou Análise da Componente Principal), MCA (*Multiple Correspondence*

Analysis, ou Análise de Correspondência Múltipla), FAMD (*Factor Analysis of Mixed Data*, ou Análise Fatorial de Dados Mistos), MFA (*Multiple Factor Analysis*, ou Análise de Múltiplos Fatores), HCPC (*Hierarchical Clustering on Principal Components*, ou Análise de Agrupamento de Componentes Principais), entre outros (KASSAMBARA, 2017a).

O pacote *factoextra* é baseado no pacote *ggplot2* e produz visualização de dados, o que facilita a interpretação com a criação de resultados legíveis, além de simplificar a visualização e análise de agrupamentos (KASSAMBARA, 2017a).

Os valores de variância e proporções das variâncias foram gerados com o comando `eig.val.conjunto <- get_eigenvalue(res.pca.conjunto)`. Os gráficos de variáveis PCA foram criados com o comando `res.pca.conjunto <- PCA(conjunto, scale.unit = TRUE, ncp = 5, graph = TRUE)`. Para a elaboração dos gráficos para os indivíduos dos conjuntos de dados, utilizou-se o comando `fviz_pca_ind(res.pca.conjunto, geom.ind = c("point"))` para gráfico simples com apenas pontos e sem os nomes dos indivíduos. A contribuição dos indivíduos para as dimensões 1 e 2 foi obtida com o comando `fviz_contrib(res.pca.conjunto, choice = "ind", axes = 1:2)`. Os gráficos bi-plot foram obtidos considerando indivíduos com contribuição determinada para os 10 indivíduos com maior contribuição, por meio do comando `fviz_pca_biplot(res.pca.conjunto, select.ind = list(contrib = 10), ggtheme = theme_minimal(), repel = TRUE)`. O termo “conjunto” corresponde ao nome do vetor do conjunto considerado.

6.3.4 Análise de Agrupamentos

Para a realização da análise de agrupamentos (*cluster*), foram instalados e carregados os pacotes *cluster* e *stats*, além do pacote *factoextra*. Foram considerados apenas os dados anuais das duas estações meteorológicas, devido ao grande volume de dados a serem analisados e representados.

Os dados foram normalizados com a criação de um novo vetor `conjunto_cl <- scale(conjunto)`, no qual o termo “conjunto” diz respeito aos dados anuais de precipitação e temperatura das duas estações meteorológicas, após exclusão dos campos nulos (sem informação numérica) e da primeira coluna (data das medições) das tabelas de dados. O final “cl” identifica que o novo vetor foi normalizado para a execução da análise de agrupamentos.

As medidas de distância de cluster, ou não similaridades entre os pares de observações, são analisadas por meio da matriz de distância (KASSAMBARA, 2017b). Optou-se por utilizar a distância euclidiana. Assim, esta foi computada com o comando `dist.eucl.conjunto <- dist(conjunto_cl, method = "euclidian")`. A matriz foi reformatada para mostrar as três primeiras

linhas e colunas e arredondar os valores com o comando `round (as.matrix(dist.eucl.conjunto) [1:Y,1:Y],1)`, onde Y corresponde ao número de linhas do conjunto.

A técnica de k-means consiste na definição de clusters, de modo que a variação total dentro do cluster é minimizada (KASSAMBARA, 2017b). Após a normalização dos dados, realizou-se a estimativa do número ótimo de clusters com o comando `fviz_nbclust (vetor, kmeans, method = "wss") + geom_vline (xintercept = 7, linetype = 2)`. O clustering k-means foi computado com $k = 7$ para Lavras e $k = 5$ para São João del Rei, com os comandos `set.seed (123)` e `km.res.conjunto <- kmeans (vetor, 7, nstart = 25)`. Os resultados foram obtidos a partir do comando `print (km.res.conjunto)`. O comando `aggregate (vetor, by = list (cluster = km.res.conjunto$cluster), mean)` mostrou a média de cada variável por cluster. O comando `head (km.res.conjunto$cluster, 7)`, por sua vez, apresentou o número de clusters para cada observação. O tamanho e as médias dos clusters foram obtidos com os comandos `km.res.conjunto$size` e `km.res.conjunto$centers`, respectivamente. Por fim, o cluster foi plotado com o comando `fviz_cluster (km.res.conjunto, data = vetor, star.plot = TRUE, repel = TRUE, ggtheme = theme_minimal ())`.

6.4 Modelagem da Erosão

Dentre as diversas metodologias de modelagem aplicadas no estudo de áreas afetadas por processos erosivos, destacaram-se: *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) e *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST). Optou-se pela aplicação do InVEST, pois os requisitos e processamento de dados são de baixa a média complexidade, e a operação do *software* é integrada ao ambiente SIG (CONG et al., 2020). A depender da capacidade de processamento do computador, o tempo necessário para rodar o modelo após a inserção dos dados de entrada no *software* é de cerca de 5 minutos.

O InVEST possibilita realizar modelagens de diversos serviços ecossistêmicos, com destaque aos serviços relacionados ao solo, a partir do submodelo de exportação de sedimentos. Este módulo permite realizar análises no que diz respeito à perda de solo e à dinâmica dos sedimentos na bacia ou sub-bacia hidrográfica de interesse, o que é uma importante ferramenta no planejamento de políticas públicas e intervenções de recuperação em áreas degradadas por processos erosivos.

6.4.1 Submodelo de Exportação de Sedimentos

Foi utilizado o submodelo de exportação de sedimentos (*Sediment Delivery Model – SDR*) do InVEST, que tem por objetivo mapear a geração de sedimentos e o aporte para o curso d'água. A compreensão destes processos permite que sejam elaboradas estratégias mais adequadas para reduzir a produção de sedimentos (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2021c).

De acordo com Natural Capital Project (2021c), são consideradas fontes de sedimentos: erosão intersulcos – partículas de solo destacadas e transportadas pela chuva e escoamento superficial não concentrado; erosão linear (especialmente voçorocas) – canais que concentram o fluxo do escoamento superficial; erosão fluvial; e movimentos de massa. Os sedimentos carregados são depositados em declives, planícies de inundação, cursos d'água e retidos em reservatórios. Como produtos, o SDR gera *rasters* e *shapefile* com os valores espacializados para perda de solo, exportação, retenção e deposição de sedimentos.

Assim, no caso da bacia do Córrego do Palmital, buscou-se compreender a perda de solo e dinâmica dos sedimentos a partir da modelagem com o InVEST considerando os usos atuais e cenários alternativos com práticas conservacionistas e mudanças de uso, simulando as alterações nos valores de erosão média, exportação, retenção e deposição de sedimentos.

6.4.2 Dados de entrada

Os dados de entrada para o modelo SDR no InVEST 3.9.0 correspondem a parâmetros representados por camadas que foram processadas no ArcGIS 10.4. Foram adotados os valores padrão estabelecidos no *software* para o limite de acumulação do fluxo (1000), o parâmetro *k* de Borselli (2), o parâmetro *IC0* de Borselli (0.5) e o valor máximo de SDR (0.8).

O modelo digital de elevação (MDE) (Figura 18) foi obtido primeiramente em formato *raster* com as ferramentas *Raster Interpolation* e *Hydrology – Fill* do ArcMAP. Este modelo foi convertido para o formato TIF com a ferramenta *Export Data*.

A delimitação da bacia hidrográfica (Figura 19) seguiu o *shapefile* do tipo polígono, correspondente à bacia do Córrego do Palmital, de acordo com as folhas de Nazareno (SF-23-X-C-I-2) e Itutinga (SF-23-X-C-I-4) do IBGE (1975a, 1975b), em escala de 1:50.000.

O *raster* de erosividade da chuva (Figura 20) foi gerado a partir da interpolação das médias de precipitação das estações meteorológicas de Lavras e São João del Rei, no período de 1991 a 2021. Foi criado *shapefile* do tipo ponto para as estações, contendo informações de nome, latitude, longitude, precipitação média e período dos dados considerados no cálculo da média de precipitação, conforme a Tabela 7. As coordenadas, obtidas nas planilhas baixadas no

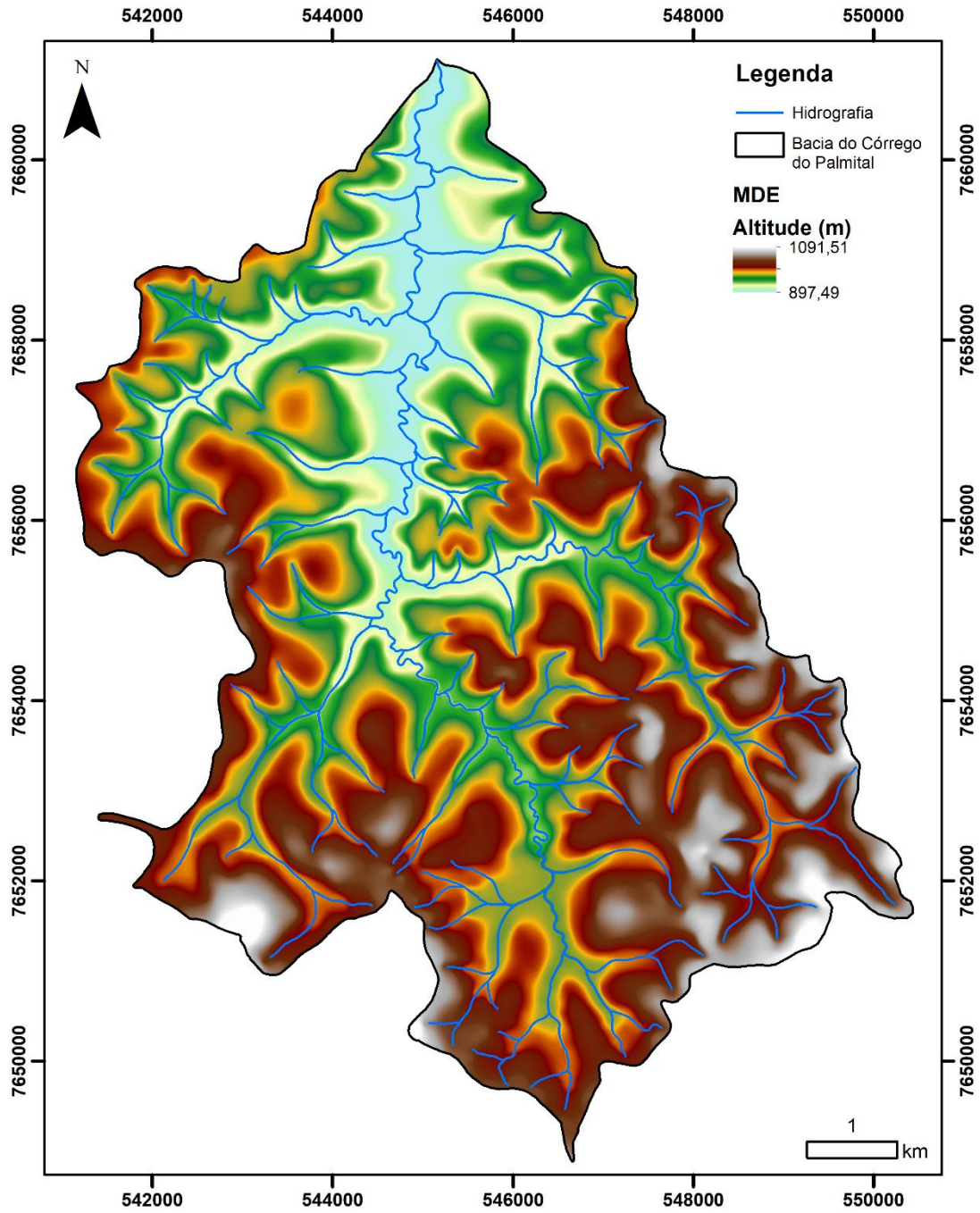
BDMEP/INMET, foram convertidas de sistema geográfico (WGS 1984) para UTM (SIRGAS 2000 Zona 23S).

Tabela 7 – Dados das estações meteorológicas de Lavras e São João del Rei para elaboração do *raster* de erosividade da chuva.

Estação	Latitude	Longitude	Precipitação Média (mm)	Período
Lavras	7652827,559	502104,2565	113,15	1991 – 2021
São João del Rei	7644474,731	575716,9187	135,48	1991 – 2006
	7665882,283	577796,4585	129,96	2006 – 2021

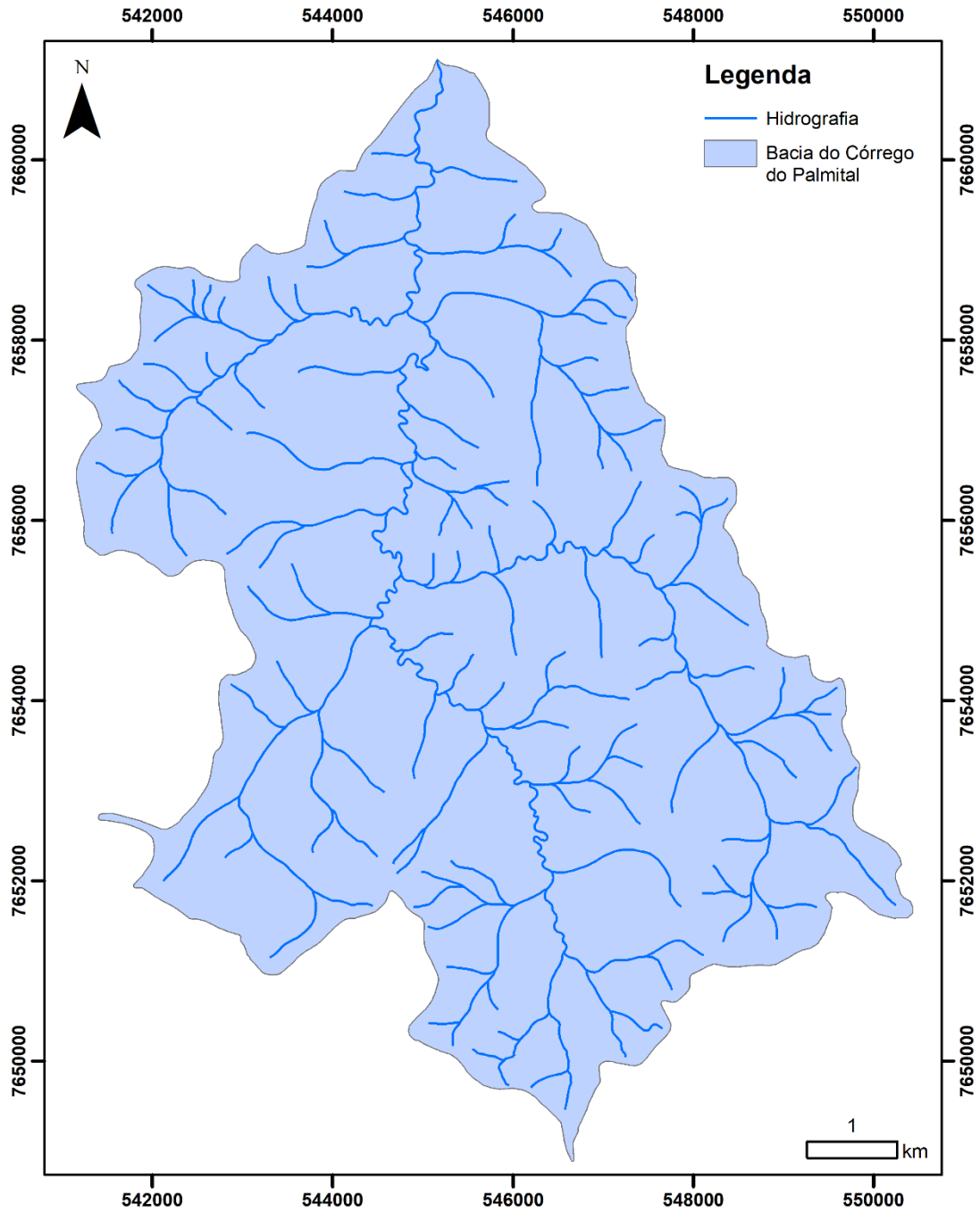
Fonte: BDMEP/INMET (2022).

Figura 18 – Mapa do Modelo Digital de Elevação da bacia do Córrego do Palmital.



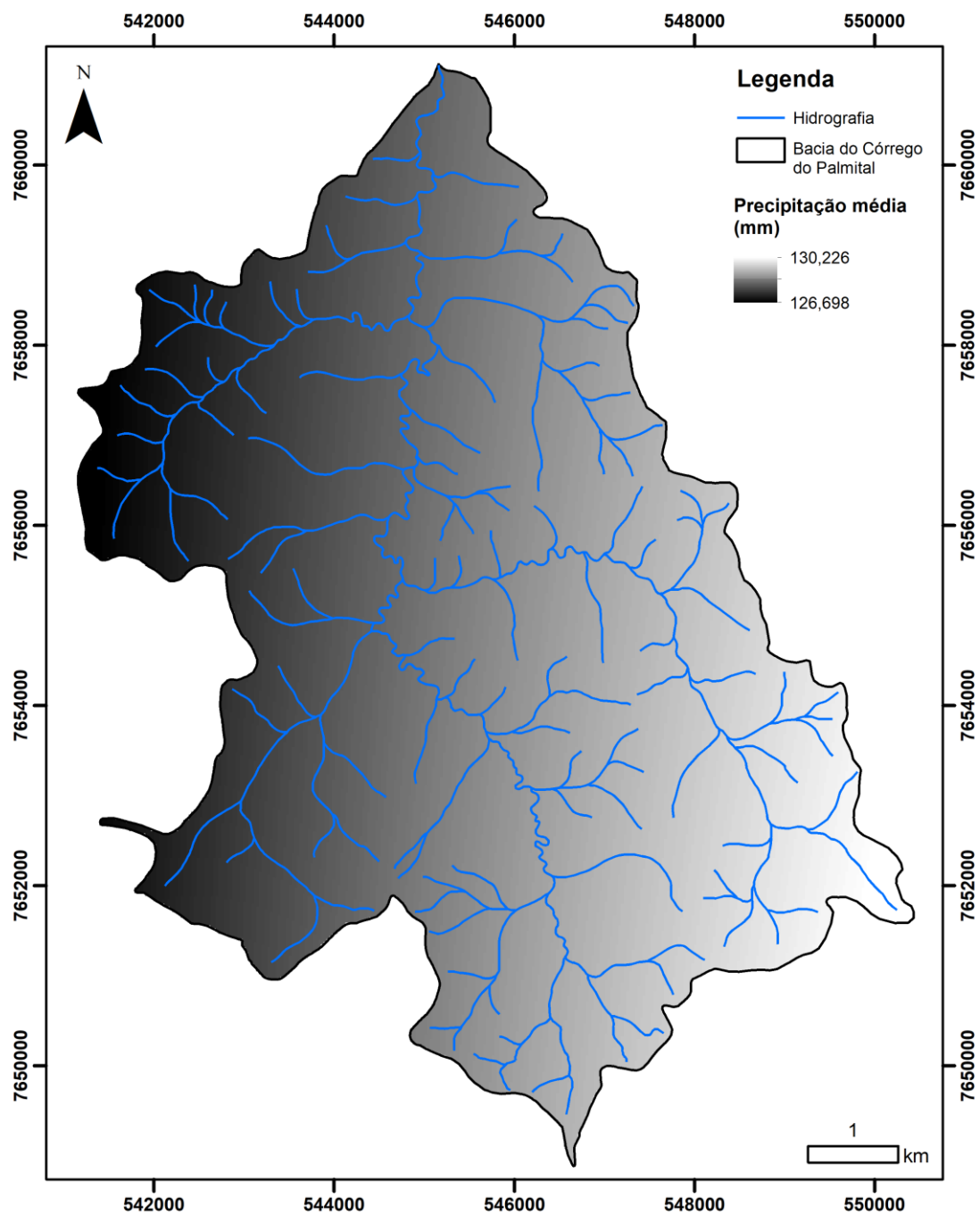
Fonte: Da autora.

Figura 19 – Mapa da delimitação da bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Figura 20 – Mapa de interpolação da precipitação média anual da chuva na bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Os principais municípios nas proximidades da área de estudo foram selecionados para compor a área de processamento no ArcMAP. Foram incluídos Nazareno, Conceição da Barra de Minas, Lavras, São João del Rei, Bom Sucesso, Carrancas, Ibituruna, Ijaci, Itumirim, Itutinga, Ritópolis e São Tiago. Os polígonos de suas áreas foram selecionados e exportados para um novo *shapefile*, que teve os polígonos mesclados com a ferramenta *Merge*, resultando em um único polígono abrangendo os 12 municípios. Então, seguiu-se o caminho

Geoprocessing > *Environment Settings* > *Raster Analysis* > *Mask* e se selecionou o shape com a área dos municípios. A interpolação foi realizada com a ferramenta *Spatial Analysis* > *IDW*. O *raster* gerado foi recortado com a ferramenta *Clip* considerando os limites da bacia do Córrego do Palmital. Por fim, o *raster* foi convertido para o formato TIF com a ferramenta *Export Data*.

O *raster* de erodibilidade dos solos (Figura 21) teve como base o *shapefile* de solos do levantamento realizado pela Universidade Federal de Viçosa et al. (2010), que foi recortado para os limites da bacia do Córrego do Palmital com a ferramenta *Clip*. As unidades consideradas foram: AR (Afloramento Rochoso), LVAd (Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico), LVd (Latosolo Vermelho distrófico) e CXbd (Cambissolo háplico Tb distrófico). Foram aplicados os valores médios de erodibilidade apresentados na Tabela 8. O *shapefile* foi convertido para *raster* com a ferramenta *Polygon to Raster* e depois para o formato TIF utilizando *Export Data*.

Tabela 8 – Valores de erodibilidade dos solos da bacia do Córrego do Palmital.

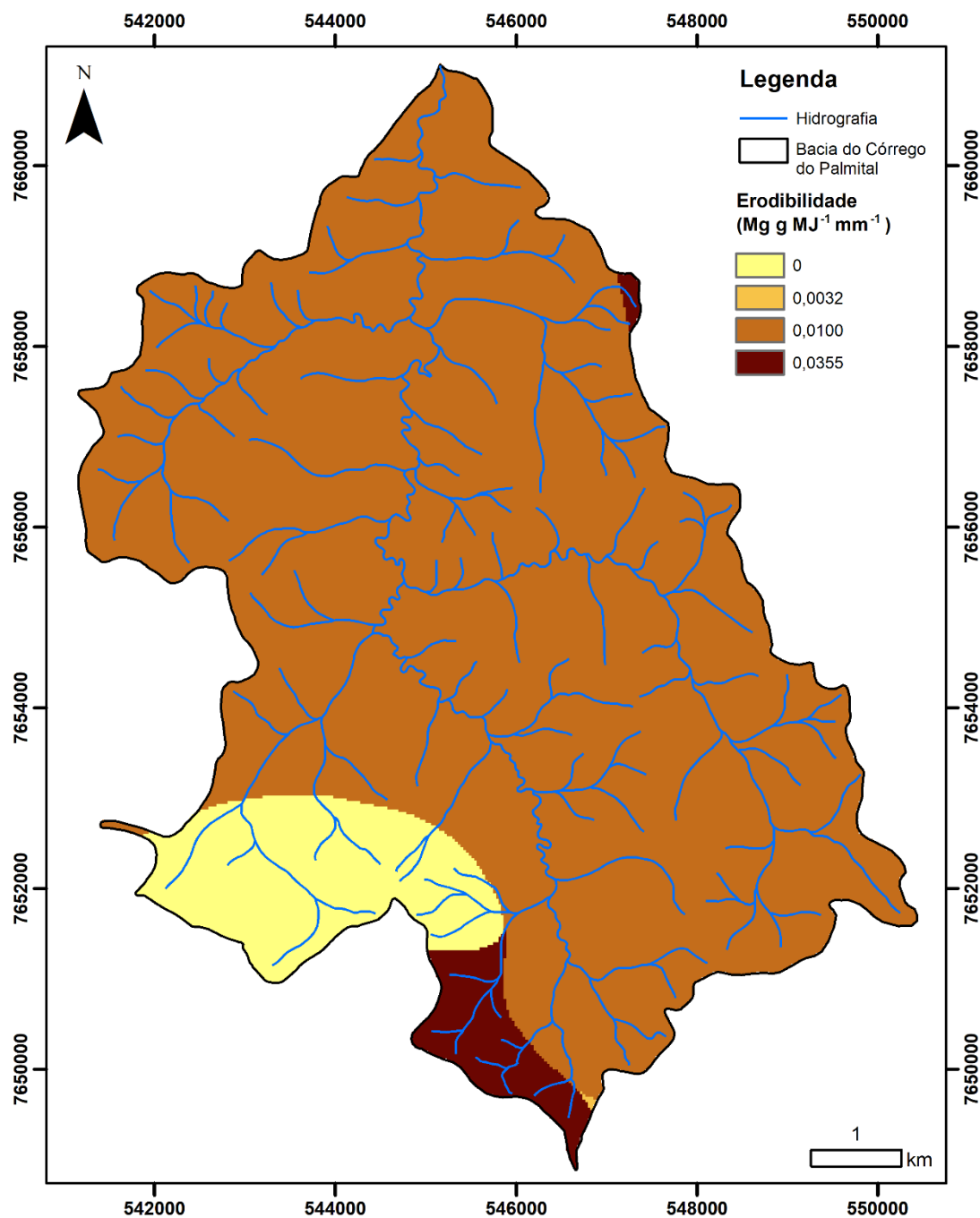
Sigla	Solo	Erodibilidade (Mg g MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Fontes
LVAd	Latosolo Vermelho-Amarelo distrófico	0,0100	Silva ¹² (1997 apud BESKOW et al., 2009, p. 52)
LVd	Latosolo Vermelho distrófico	0,0032	Silva et al. (2009)
CXbd	Cambissolo háplico Tb distrófico	0,0355	Silva et al. (2009)

O *shapefile* do levantamento de uso e cobertura do solo, bem como as imagens de satélite de 2019, foram base para a elaboração do *raster* para a modelagem dos cenários atual, 1 e 2 (Figura 22). Além das classes já existentes (pastagem, cultura, lavoura temporária e cafezal), foram adicionadas: área urbana/edificação/via pavimentada, estrada de terra, voçoroca, solo exposto, pastagem nativa, floresta, floresta plantada (eucalipto) e água. Após o refinamento do *shapefile* de tipo polígono, foi realizado recorte com os limites da bacia hidrográfica (ferramenta *Clip*), de forma a incluir apenas os elementos dentro da área da bacia. Então, o *shapefile* foi convertido para *raster* com a ferramenta *Polygon to Raster* e para TIF com *Export Data*.

¹² SILVA, M.L.N. **Erosividade da chuva e proposição de modelos para estimar a erodibilidade de Latossolos brasileiros**. 1997. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 1997.

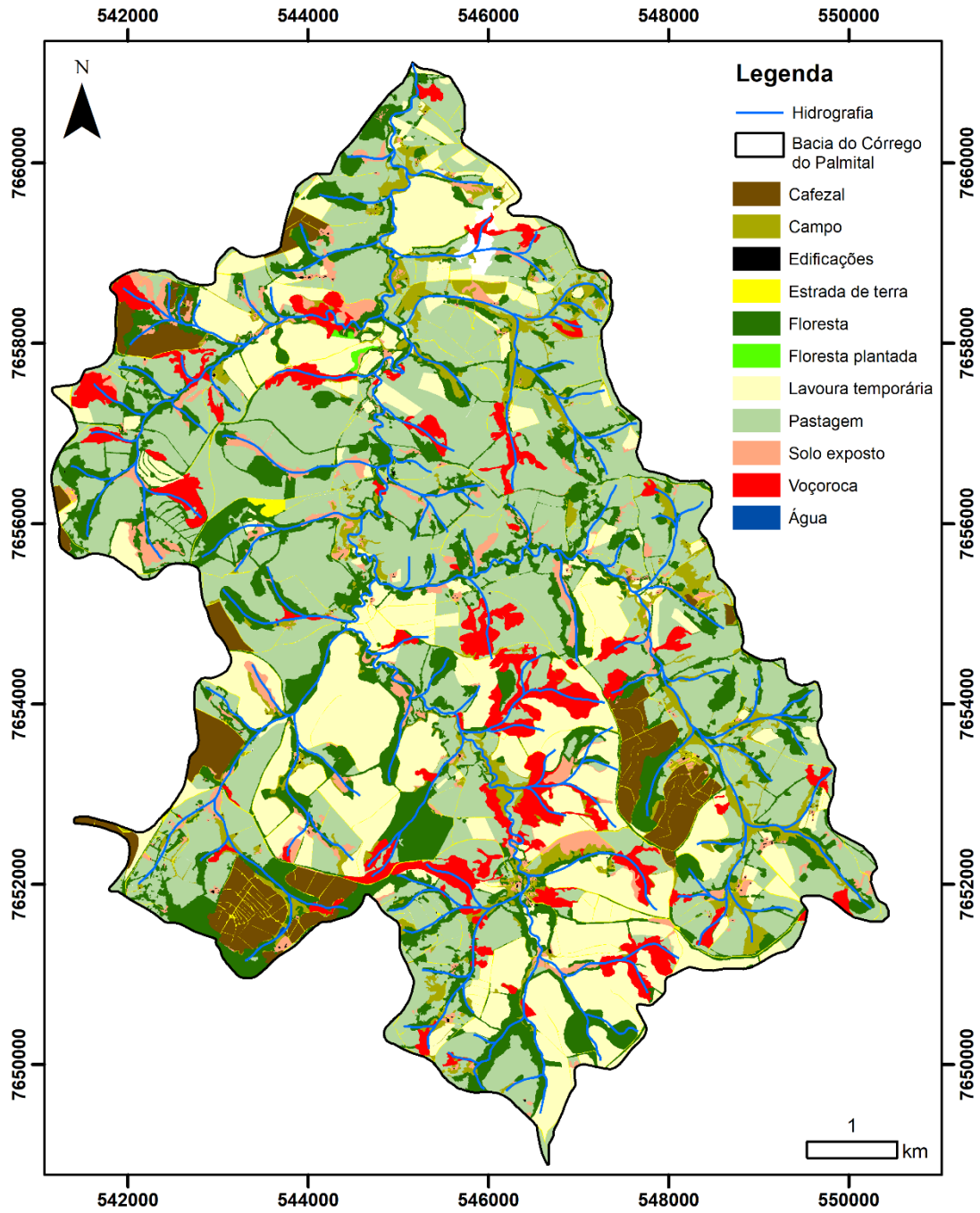
O mesmo procedimento foi adotado para o *shapefile* de uso e cobertura do solo do Cenário 3 (Figura 23), o qual contou com área classificada *buffer* de 30 metros a partir da hidrografia da bacia, que consiste na Área de Preservação Permanente conforme a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012).

Figura 21 – Mapa de erodibilidade dos solos na bacia do Córrego do Palmital.



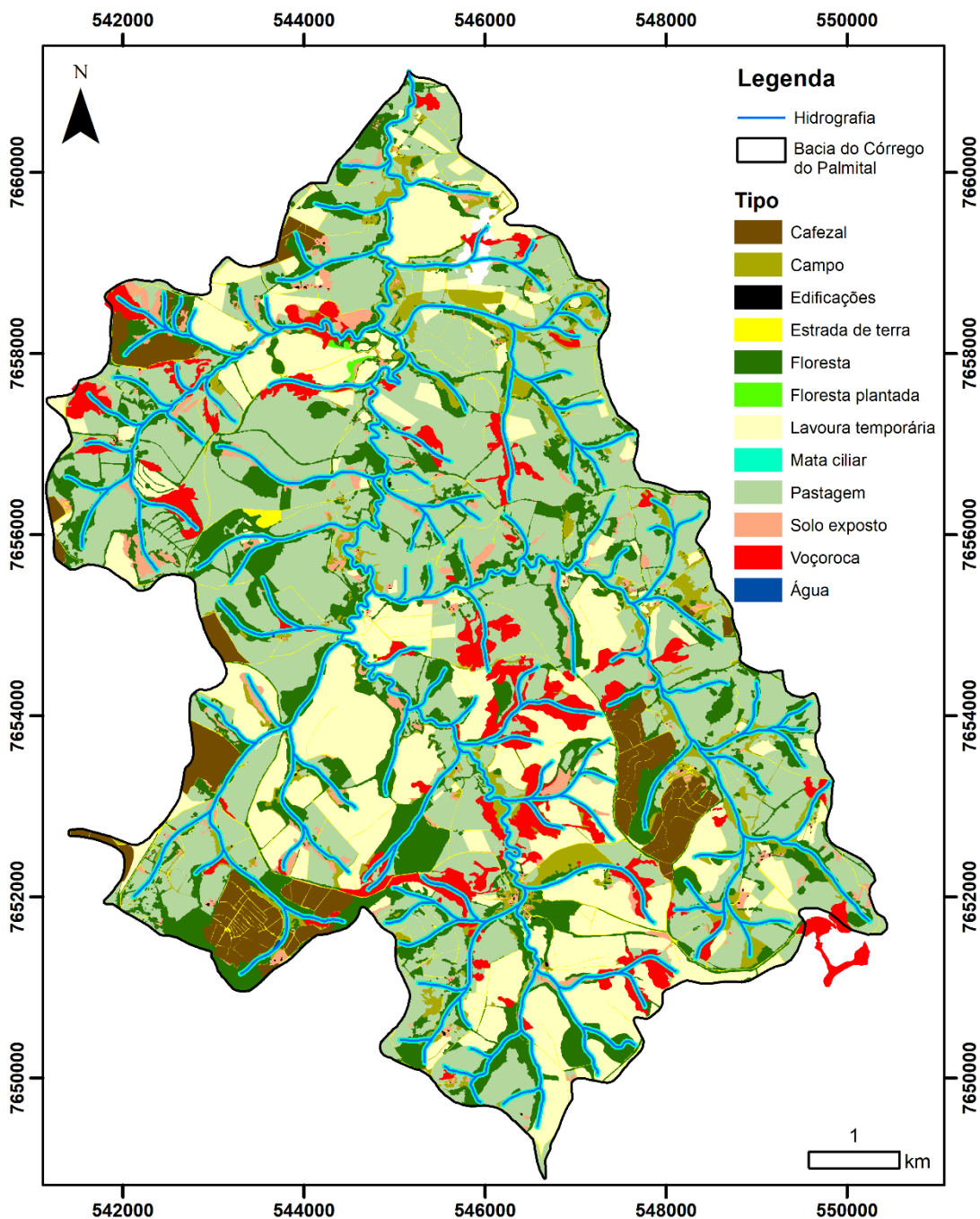
Fonte: Da autora.

Figura 22 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Figura 23 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital, com *buffer* de 30 m da hidrografia.



Fonte: Da autora.

A tabela biofísica, que fornece informações quanto aos fatores de cobertura e práticas conservacionistas das classes de uso e cobertura do solo, foi elaborada em formato CSV e os valores aplicados para os cenários são apresentados na Tabela 9. Os campos obrigatórios para funcionamento adequado no *software* são: código de uso do solo (*lucode*), fator C (*usle_c*, ou fator de uso e manejo do solo) e fator P (*usle_p*, ou fator de práticas conservacionistas). Além

destes, foram inseridos outros campos para facilitar a identificação das classes: descrição, vegetação (*lulc_veg*, sendo 0 correspondente a área não vegetada e 1 a área vegetada) e fonte (dos valores de fator C e P).

Tabela 9 – Tabela biofísica das classes de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Palmital.

Descrição (description)	Código (lucode)	Fator C (usle_c)	Fator P (usle_p)	Vegetação (lulc_veg)	Fontes
Área urbana, edificação, via pavimentada	1	0,8500	1	0	Marques et al. (2003)
Estrada de terra	2	0,1500	1	0	Azevedo (2017)
Voçoroca	3	1,0000	1	0	Mota e Silva et al. (2021)
Solo exposto	4	1,0000	1	0	Mota e Silva et al. (2021)
Campo	5	0,0130	1	1	Azevedo (2017)
Cafezal	6	0,1350	1 ou 0,5*	1	Cerri (1999)
Floresta plantada	7	0,0080	1	1	Silva et al. (2011)
Agricultura temporária	8	0,2900	1 ou 0,5*	1	Beskow et al. (2009)
Pastagem	9	0,2000	1	1	Marques et al. (2003)
Floresta	10	0,0004	1	1	Bertoni e Lombardi Neto ¹³ (1990 apud CERRI, 1999)
Água	11	0,0000	1	0	Bertoni e Lombardi Neto ¹⁴ (1990 apud CERRI, 1999)
Mata ciliar	12	0,0008	1	1	Tavares (2001)

*Fator P = 1 nos cenários atual, 2 e 3 e fator P = 0,5 no Cenário 1.

Os dados de entrada foram inseridos de acordo com as especificações do cenário a ser processado. Também foram realizadas simulações de cenários no InVEST, a partir de alterações no *raster* de uso do solo e na tabela biofísica, de modo a ajustar as áreas e propriedades de classes de uso determinada nas simulações.

No Cenário Atual (em 2019), considerou-se o uso e cobertura do solo de 2019, bem como os fatores C e P em conformidade com as classes levantadas. A tabela biofísica incluiu as classes de área urbana, edificação e via pavimentada, estrada de terra, voçoroca, solo exposto, campo, cafezal, floresta plantada, agricultura temporária, pastagem, floresta e água, (os fatores C estão representados na Tabela 9, já o fator P foi considerado como 1,0).

Os cenários hipotéticos simulados tiveram como objetivo fornecer comparativos quanto à perda de solo, exportação, retenção e deposição de sedimentos na bacia quando o uso, cobertura e manejo do solo na bacia hidrográfica são menos favoráveis ao desenvolvimento da

¹³ BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Icone, 1990. 335 p.

¹⁴ Ibid.

erosão. Assim, podem ser selecionadas alternativas efetivas para minimizar as formas de degradação por processos erosivos na área de estudo.

No Cenário 1, simula-se a aplicação de práticas conservacionistas e substituição da pastagem por agricultura temporária, visto que a pastagem corresponde a um dos usos mais relacionados com a deflagração dos processos erosivos – principalmente devido à compactação da superfície do solo pelo pisoteamento do gado, a falta de manejo adequado e a associação da pastagem com o cambissolo. Além disso, observou-se que, entre 2016 e 2019, parte das áreas anteriormente ocupadas por pastagem foram substituídas por agricultura temporária, tendo em vista a alta do preço dos grãos. Assim, ao simular a substituição completa da pastagem por agricultura temporária, também se segue o padrão de mudança de uso atual. Com as práticas conservacionistas, a perda de solo tende a diminuir, então é interessante simular sua aplicação e verificar o impacto positivo sobre as áreas de agricultura.

A tabela biofísica do Cenário 1 incluiu todas as classes do cenário atual, com exceção da pastagem. O valor do fator C referente à pastagem foi substituído pelo valor da agricultura temporária (fator C de 0,2900). Além disso, os fatores P do cafezal e da agricultura temporária foram trocados de 1 (plantio morro abaixo, ou sem práticas) para 0,5 (plantio em contorno, ou curvas de nível).

No Cenário 2, simula-se a substituição da pastagem por reflorestamento, sendo um cenário mais conservador, que altera o uso de forma que uma das classes mais associadas com a erosão é substituída pela terceira classe de menor potencial erosivo (depois das florestas nativas e mata ciliar). Dessa forma, a tabela biofísica também incluiu todas as classes do cenário atual, com exceção da pastagem. Os valores referentes à pastagem foram substituídos pelos valores de reflorestamento (fator C = 0,0080 e fator P = 1).

No Cenário 3, simula-se a preservação das áreas de 30 metros de distância dos cursos d'água, conforme a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012), pois se referem a Áreas de Preservação Permanente (APP). Assim, foi inserido outro arquivo *raster* de uso do solo, que inclui a classe “Mata Ciliar” e foram inclusas todas as classes na tabela biofísica, adicionando a mata ciliar à tabela.

Para obter os resultados individuais de cada categoria de uso e ocupação do solo, foram geradas tabelas biofísicas de cada classe e cenário. Por exemplo, a tabela referente à pastagem no cenário atual teve os valores de fator C e P zerados para todas as classes de uso, com exceção da pastagem. Dessa forma, o pacote SDR do InVEST pôde gerar valores individualizados. O procedimento foi realizado para 10 classes (todas, menos a água, que tem fatores C e P iguais

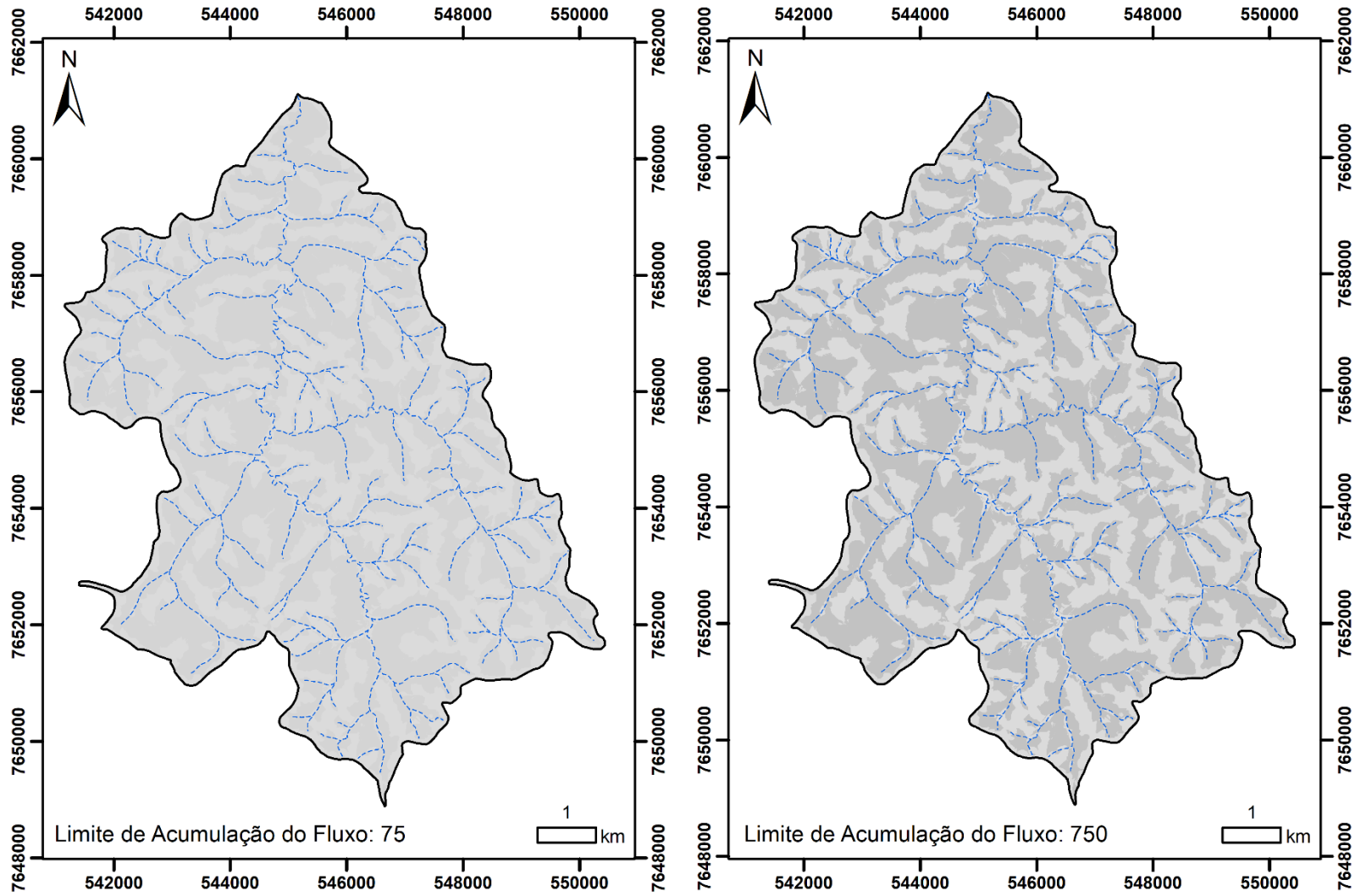
a zero) no cenário atual, Cenário 1 e Cenário 2, e para 11 classes no Cenário 3 – que também englobou a mata ciliar.

6.4.3 Calibração

A calibração do modelo foi realizada comparando os resultados ao alterar o valor do limite de acumulação do fluxo e ajustar o *raster Stream* gerado ao *shapefile* de hidrologia da bacia do Córrego do Palmital. Quanto melhor o ajuste, espera-se melhor calibração do modelo.

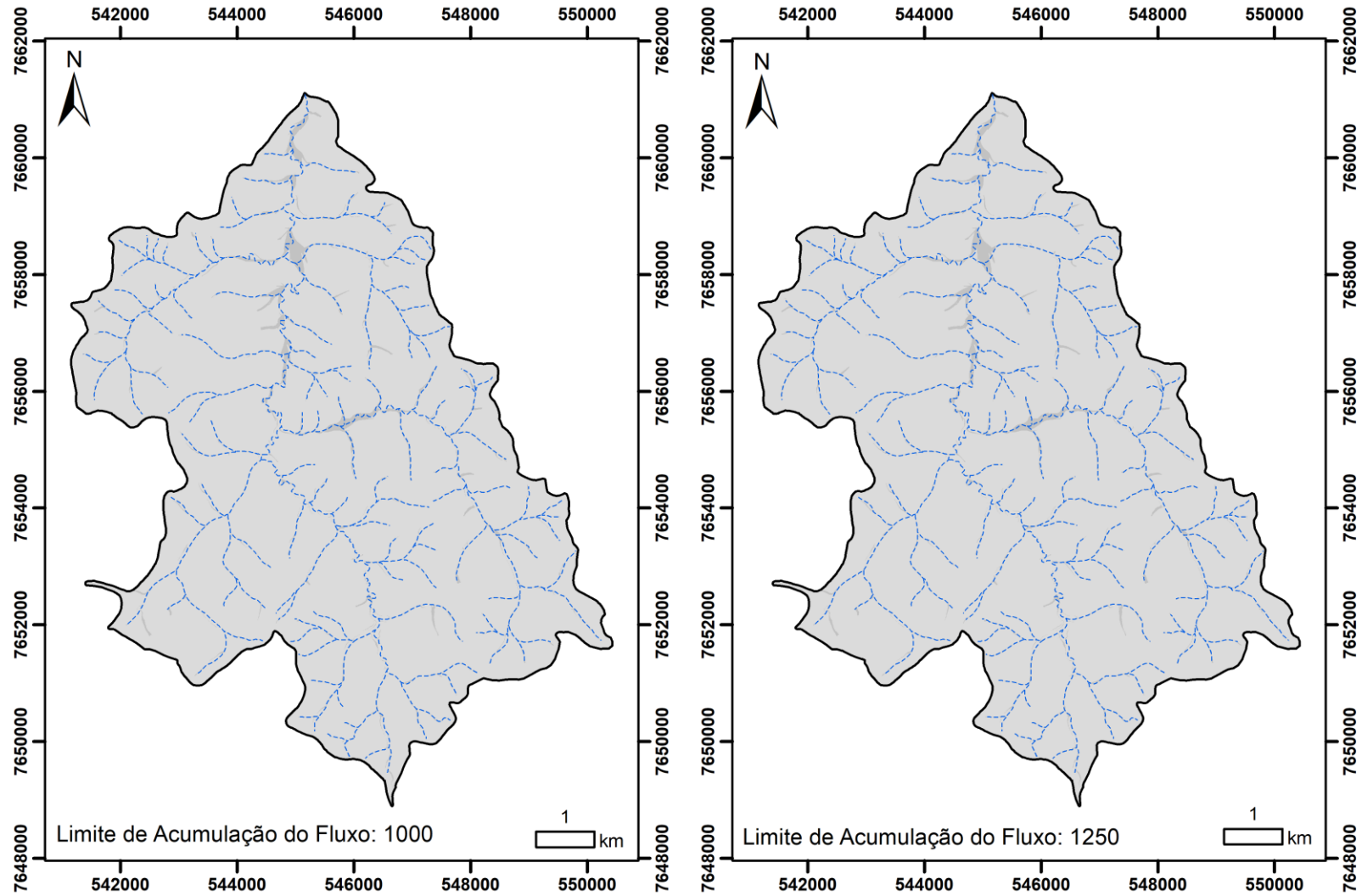
Foram testados os valores de 75, 750, 1000 e 1250, conforme representado na Figura 24 e na Figura 25. O melhor resultado se deu para o valor de 1000, que foi aplicado para a modelagem no pacote SDR, para os quatro cenários (atual e três simulações).

Figura 24 – Calibração do modelo InVEST na bacia do Córrego do Palmital, comparando limite de acumulação do fluxo de 75 e 750.



Fonte: Da autora.

Figura 25 – Calibração do modelo InVEST na bacia do Córrego do Palmital, comparando limite de acumulação do fluxo de 1000 e 1250.



Fonte: Da autora.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Análise dos Dados Obtidos no SIG

7.1.1 Levantamento de Voçorocas

Realizou-se o levantamento das voçorocas presentes na bacia do Córrego do Palmital nos anos de 2016 e 2019. Os anaglifos, elaborados para cada uma das 29 quadrículas, colaboraram para a identificação dos limites das feições, uma vez que possibilitaram visualização tridimensional da área.

Exemplos dos anaglifos são apresentados na Figura 26 e na Figura 27, que mostram a quadrícula 19 nos anos de 2016 e 2019, respectivamente.

Figura 26 – Anaglifo da quadrícula 19 da bacia do Córrego do Palmital, em 2016.



Fonte: Da autora.

Figura 27 – Anaglifo da quadrícula 19 da bacia do Córrego do Palmital, em 2019.

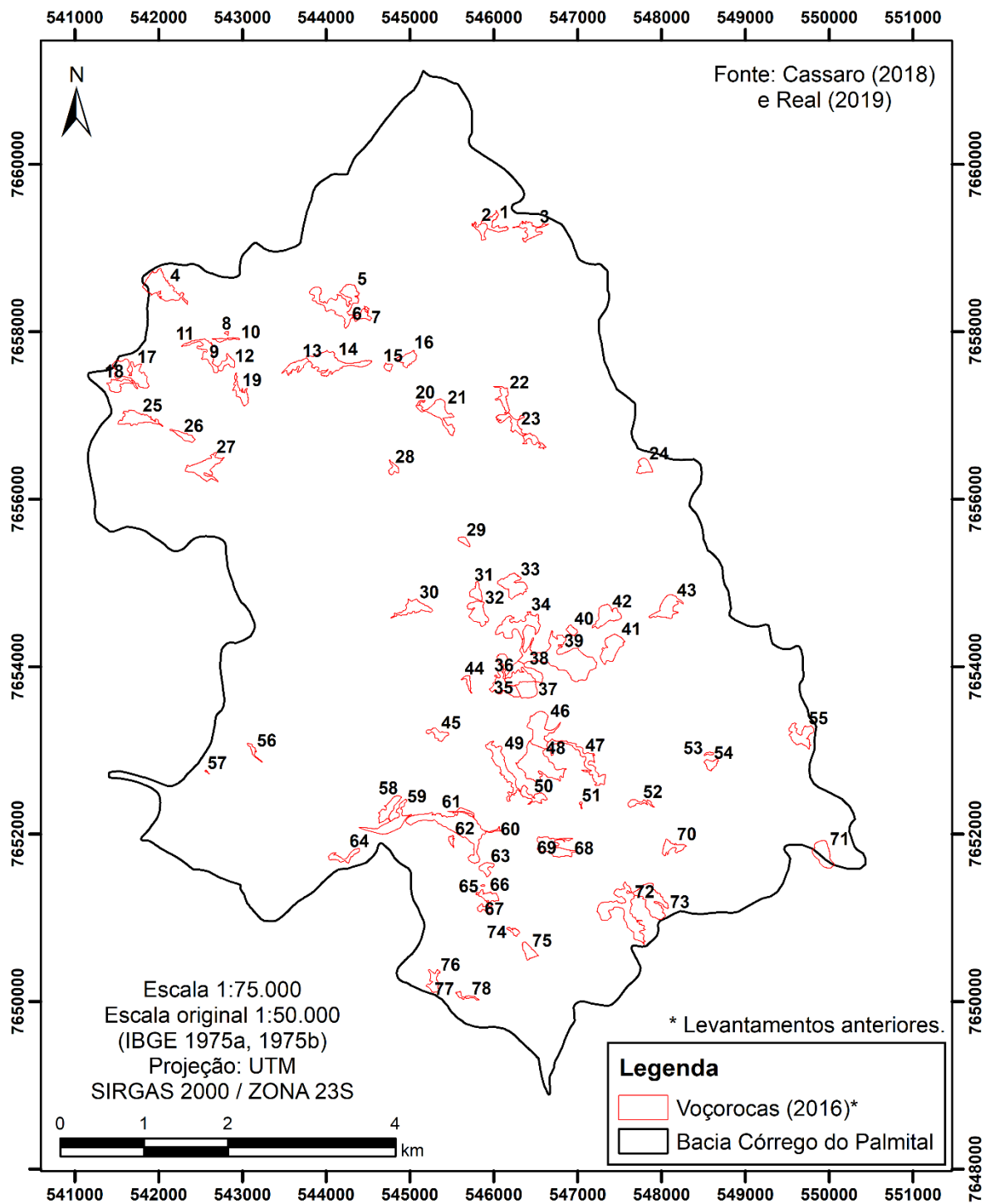


Fonte: Da autora.

Cassaro (2018) e Real (2019) já haviam realizado levantamento destas feições erosivas no ano de 2016 (Figura 28), encontrando 78 voçorocas, cuja área total foi de 2,87 km² (287,18 ha). As feições foram enumeradas (Tabela 10), de modo a facilitar a comparação individual das voçorocas em relação aos levantamentos de 2016 (Figura 29) e 2019 (Figura 30), com o uso de anaglifos. Assim, foi possível comparar os resultados e verificar a efetividade desta metodologia.

As áreas das voçorocas são apresentadas na Tabela 11. Cabe ressaltar que o levantamento de 2016 (realizado no presente trabalho) identificou 63 feições, que somam 3,98 km² (397,93 ha). Ao passo que, em 2019, foram identificadas 65 voçorocas, com área total de 4,04 km² (404,48 ha). Houve, portanto, aumento da área erodida e do número de feições erosivas identificadas.

Figura 28 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2016 – levantamentos anteriores (CASSARO, 2018; REAL, 2019).



Fonte: Cassaro (2018) e Real (2019).

Tabela 10 – Mudanças das voçorocas da bacia do Córrego do Palmital em 2016 e 2019, com o uso de anaglifos.

Voçoroca	2016 (sem anaglifo)	2016 (com anaglifo)	2019 (com anaglifo)
1	Identificada		Aumentou área
2	Identificada	União das voçorocas 1, 2 e 3,	-
3	Identificada	renomeada para 1	-
4	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
5	Identificada		Aumentou área
6	Identificada	União das voçorocas 5, 6 e 7,	-
7	Identificada	renomeada para 5	-
8	Identificada	Aumentou área	Não identificada
9	Identificada	União das voçorocas 9 e 10	Aumentou área
10	Identificada	Renomeada para 9	-
11	Identificada	União das voçorocas 11 e 12,	Uniu com a voçoroca 81 e aumentou área
12	Identificada	renomeada para 11	-
13	Identificada	União das voçorocas 13 e 14,	-
14	Identificada	renomeada para 14	Diminuiu área
15	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
16	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
17	Identificada	União das voçorocas 17 e 18,	Aumentou área
18	Identificada	renomeada para 17	-
19	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
20	Identificada	União das voçorocas 20 e 21,	-
21	Identificada	renomeada para 21	Aumentou área
22	Identificada	Aumentou área	Uniu com a voçoroca 23
23	Identificada	Aumentou área	Uniu com a voçoroca 22 e aumentou área
24	Identificada	Diminuiu área	Aumentou área
25	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
26	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
27	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
28	Identificada	Diminuiu área	Aumentou área
29	Identificada	Diminuiu área	Diminuiu área
30	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
31	Identificada		Aumentou área
32	Identificada	União das voçorocas 31, 32 e 33,	-
33	Identificada	renomeada para 31	-
34	Identificada		Diminuiu área
35	Identificada		-
36	Identificada	União das voçorocas 34, 35, 36,	-
37	Identificada	37, 38 e 39,	-
38	Identificada	renomeada para 34	-
39	Identificada		-
40	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
41	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
42	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
43	Identificada	Diminuiu área	Aumentou área
44	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área

Continua

Continuação

Voçoroca	2016 (sem anaglifo)	2016 (com anaglifo)	2019 (com anaglifo)
45	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
46	Identificada		-
47	Identificada	União das voçorocas 46, 47 e 48, renomeada para 48	-
48	Identificada		Diminuiu área
49	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
50	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
51	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
52	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
53	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
54	Identificada	Diminuiu área	Aumentou área
55	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
56	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
57	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
58	Identificada	União das voçorocas 58 e 59, renomeada para 58	Aumentou área
59	Identificada		-
60	Identificada	União das voçorocas 60 e 61, renomeada para 60	Aumentou área
61	Identificada		-
62	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
63	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
64	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
65	Identificada	Não detectada	Aumentou área
66	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
67	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
68	Identificada	União das voçorocas 68 e 69, renomeada para 68	Aumentou área
69	Identificada		-
70	Identificada	Aumentou área	Diminuiu área
71	Identificada	Diminuiu área	Aumentou área
72	Identificada	União das voçorocas 72 e 73, renomeada para 72	Diminuiu área
73	Identificada		-
74	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
75	Identificada	Diminuiu área	Diminuiu área
76	Identificada	Aumentou área	Aumentou área
77	Identificada	União das voçorocas 77 e 78, renomeada para 78	Renomeada para 77, aumentou área
78	Identificada		Renomeada para 78, aumentou área
79	-	Identificada	Diminuiu área
80	-	Identificada	Aumentou área
81	-	Identificada	Uniu com a voçoroca 11
82	-	Identificada	Aumentou área
83	-	Identificada	Diminuiu área
84	-	Identificada	Aumentou área
85	-	Identificada	Aumentou área
86	-	Identificada	Diminuiu área
87	-	Identificada	Aumentou área
88	-	-	Identificada
89	-	-	Identificada

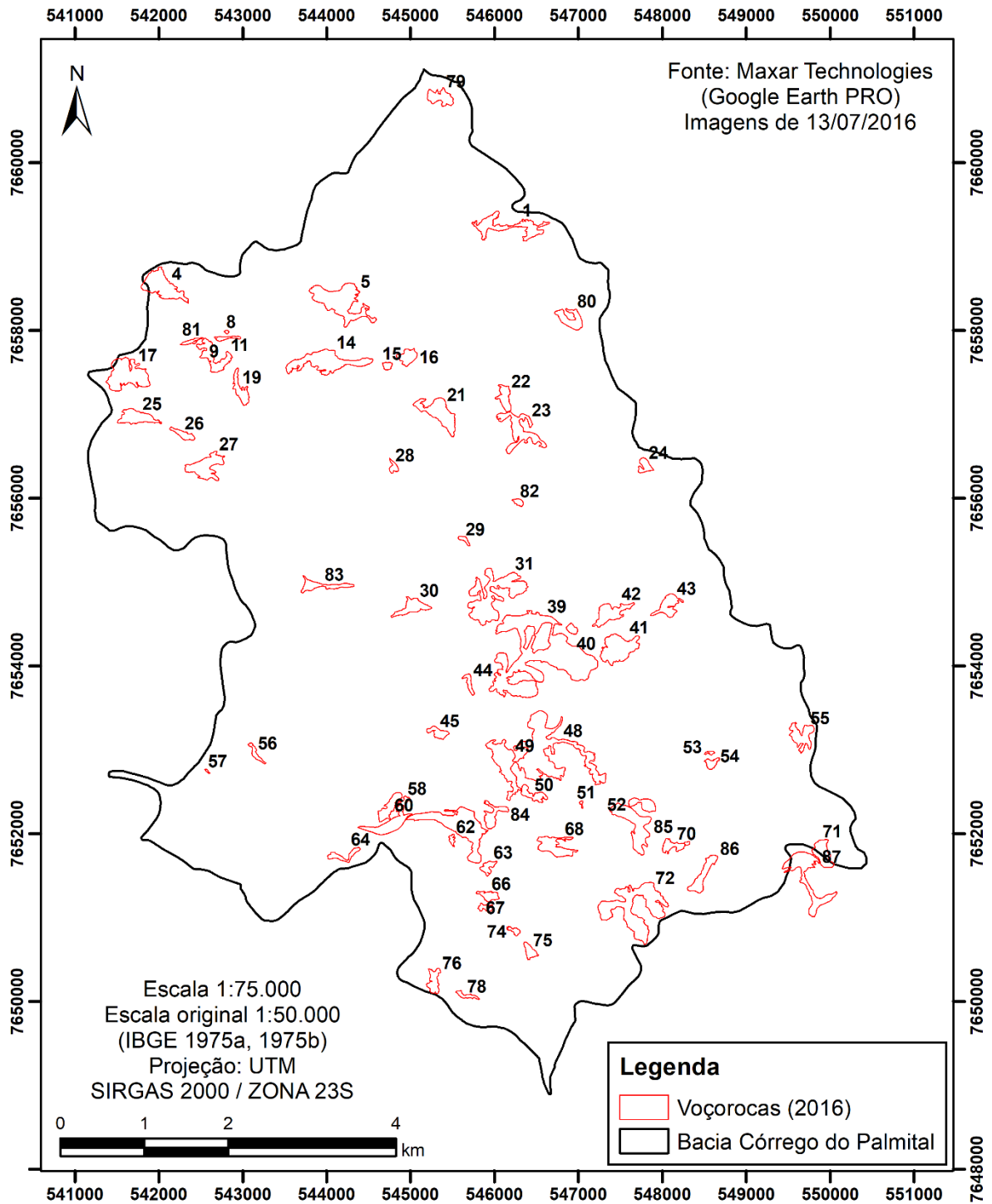
Continua

Voçoroca	2016 (sem anaglifo)	2016 (com anaglifo)	2019 (com anaglifo)
	90	-	-
			Identificada

- Voçoroca não identificada.

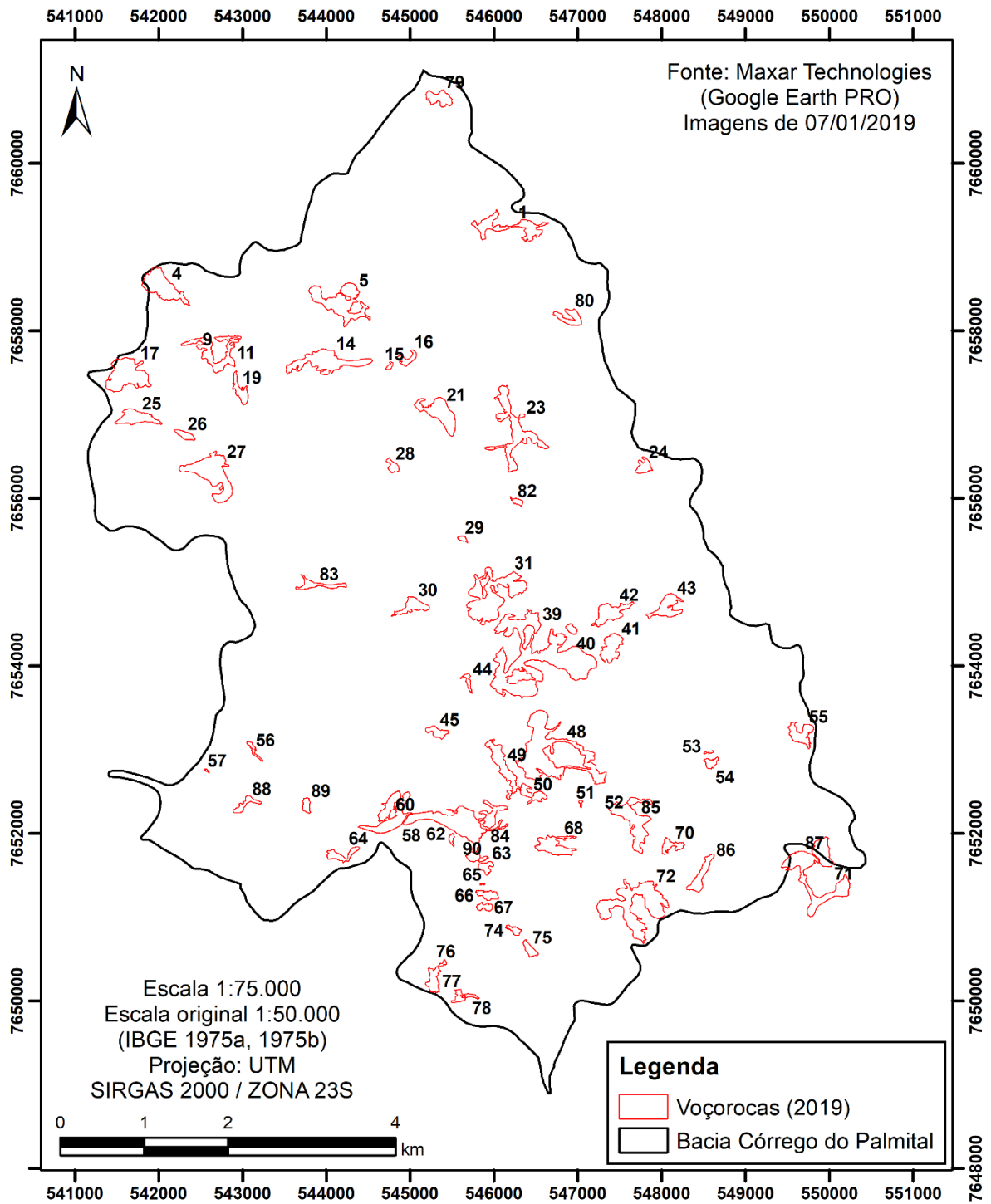
Fonte: Da autora e levantamentos anteriores de Cassaro (2018) e Real (2019).

Figura 29 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2016, com a aplicação de anaglifos.



Fonte: Da autora.

Figura 30 – Mapas das voçorocas na bacia do Córrego do Palmital em 2019, com a aplicação de anaglifos.



Fonte: Da autora.

Tabela 11 – Áreas das voçorocas da bacia do Córrego do Palmital em 2016 e 2019.

2016 (sem anaglifo)	Área (ha)	2016 (com anaglifo)	Área (ha)	2019 (com anaglifo)	Área (ha)
1	2,48	1	9,03	1	9,20
2	1,65	2	-	2	-
3	3,01	3	-	3	-
4	9,13	4	10,14	4	10,86
5	10,94	5	16,27	5	14,41
6	0,17	6	-	6	-
7	1,46	7	-	7	-
8	0,14	8	0,16	8	-
9	0,41	9	0,92	9	1,07
10	0,20	10	-	10	-
11	3,98	11	5,79	11	8,11
12	1,73	12	-	12	-
13	2,40	13	-	13	-
14	8,86	14	13,42	14	12,99
15	0,65	15	0,81	15	0,42
16	2,40	16	3,00	16	1,76
17	7,30	17	12,77	17	13,54
18	2,51	18	-	18	-
19	2,42	19	3,37	19	2,93
20	0,22	20	-	20	-
21	5,52	21	8,95	21	9,21
22	2,23	22	3,26	22	-
23	4,56	23	8,90	23	14,58
24	2,29	24	1,86	24	2,22
25	4,74	25	5,27	25	5,59
26	1,62	26	1,82	26	1,58
27	6,02	27	7,66	27	15,39
28	1,04	28	0,99	28	1,44
29	0,82	29	0,64	29	0,53
30	3,82	30	4,27	30	3,85
31	1,88	31	19,63	31	21,73
32	4,52	32	-	32	-
33	5,68	33	-	33	-
34	7,92	34	-	34	-
35	1,58	35	-	35	-
36	4,66	36	-	36	-
37	4,05	37	-	37	-
38	3,95	38	-	38	-
39	20,99	39	54,37	39	49,48
40	0,99	40	1,14	40	1,04
41	5,66	41	10,56	41	5,88
42	4,96	42	5,97	42	6,01
43	5,00	43	4,49	43	5,58
44	0,78	44	1,25	44	1,01

Continua

Continuação					
2016 (sem anaglifo)	Área (ha)	2016 (com anaglifo)	Área (ha)	2019 (com anaglifo)	Área (ha)
45	1,82	45	1,99	45	2,11
46	7,94	46	-	46	-
47	6,25	47	-	47	-
48	13,56	48	30,44	48	29,74
49	6,50	49	10,40	49	7,44
50	2,58	50	2,70	50	3,06
51	0,12	51	0,19	51	0,21
52	1,23	52	3,07	52	1,55
53	0,25	53	0,29	53	0,23
54	1,35	54	1,30	54	1,36
55	4,59	55	5,24	55	4,62
56	0,67	56	1,20	56	0,92
57	0,06	57	0,10	57	0,09
58	3,24	58	11,15	58	11,40
59	5,53	59	-	59	-
60	16,58	60	18,65	60	20,01
61	0,74	61	-	61	-
62	0,52	62	0,62	62	0,57
63	1,55	63	1,70	63	1,62
64	1,99	64	1,99	64	2,64
65	0,06	65	-	65	0,08
66	2,04	66	1,96	66	2,05
67	1,11	67	1,11	67	1,28
68	5,63	68	6,17	68	6,30
69	0,26	69	-	69	-
70	2,35	70	2,60	70	2,37
71	5,08	71	4,85	71	5,34
72	12,25	72	22,84	72	22,93
73	8,24	73	-	73	-
74	0,73	74	0,80	74	1,07
75	1,99	75	1,76	75	1,65
76	2,31	76	3,00	76	3,61
77	0,40	77	-	77	1,30
78	0,33	78	1,05	78	0,54
TOTAL	287,18	79	3,95	79	3,88
		80	4,33	80	3,38
		81	0,84	81	-
		82	0,74	82	0,77
		83	3,67	83	2,88
		84	3,59	84	3,78
		85	10,88	85	10,52
		86	4,75	86	4,31
		87	11,31	87	14,71
		TOTAL	397,93	88	2,01
				89	1,31

Continua

					Conclusão	
2016 (sem anaglifo)	Área (ha)	2016 (com anaglifo)	Área (ha)	2019 (com anaglifo)	Área (ha)	
				90	0,42	
				TOTAL	404,48	

- Voçoroca não detectada.

Fontes: Da autora e levantamentos anteriores de Cassaro (2018) e Real (2019).

Comparando os resultados dos levantamentos de 2016 de Cassaro (2018) e Real (2019), sem anaglifos, e o levantamento de 2016 com o uso de anaglifos, destaca-se:

- Sete novas voçorocas com o uso de anaglifos, sendo as de números 79, 80, 82, 83, 85, 86 e 87;
- A voçoroca 11 teve a parte norte separada, criando a voçoroca 81, e se uniu com a voçoroca 12 na parte sul;
- A voçoroca 65 não foi encontrada com o uso de anaglifos em 2016;
- Houve 15 uniões de voçorocas, sendo suas numerações reunidas na Tabela 12.

Tabela 12 – Uniões de voçorocas delimitadas por levantamentos anteriores e atual, para o ano de 2016.

Voçorocas dos levantamentos anteriores	Voçorocas do levantamento atual
1, 2 e 3	1
5, 6 e 7	5
9 e 10	9
11 e 12	11
13 e 14	14
17 e 18	17
20 e 21	21
31, 32 e 33	31
34, 35, 36, 37, 38 e 39	34
46, 47 e 48	48
58 e 59	58
60 e 61	60
68 e 69	68
72 e 73	72
77 e 78	78

Fonte: Da autora.

A comparação entre as feições de 2016 e 2019, ambas com a aplicação de anaglifos, permitiu as seguintes observações:

- Três novas voçorocas, de números 88, 89 e 90;
- A voçoroca 77, que havia sido unida com a 78 em 2016 (com anaglifos), foi separada em 2019;
- A voçoroca 8 não foi detectada na imagem de 2019;

- d) A voçoroca 65, que não havia sido identificada com o anaglifo de 2016, foi detectada em 2019;
- e) Duas uniões de voçorocas, cujas numerações são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Uniões de voçorocas delimitadas em 2016, para o ano de 2019.

Voçorocas de 2016	Voçorocas de 2019
11 e 81	11
22 e 23	23

Fonte: Da autora.

É notável a ocorrência de uniões de voçorocas identificadas como feições separadas nos levantamentos anteriores, bem como duas ocorrências de separação de voçorocas anteriormente unidas. O comportamento das voçorocas é interligado, como um complexo de voçorocas (Real et al., 2020b), o que justifica as uniões das feições detectadas em imagens de satélite. Além disso, fatores inerentes desse tipo de levantamento em sensoriamento remoto, implicam na não detecção de algumas feições – como no caso da voçoroca 65 – ou na dificuldade de delimitação das formas das voçorocas. Esses fatores incluem a qualidade da imagem de satélite, no que tange a resolução espacial, a presença de nuvens e de vegetação na superfície da feição erosiva. Assim, é importante que haja confirmação em campo de que os dados levantados coincidem com a realidade.

7.1.2 Levantamento do Uso do Solo

O uso do solo foi mapeado para o ano de 2019, de modo a complementar os dados de Real (2019), que mapeou os anos de 2002, 2007, 2014 e 2016.

De acordo com Real (2019), o uso de maior expressividade na bacia do Córrego do Palmital foi a pastagem, que representou 51% do uso em 2002, 38% em 2007, 42% em 2014 e 46% em 2016. As culturas encontradas por essa autora englobaram milho, feijão, soja e eucalipto, com aumento de área em 2002 e 2007 e posterior diminuição. As plantações de café e outros usos do solo não variaram durante o período estudado (2002 a 2016). O estudo também destacou que a maioria das voçorocas estava próxima às áreas de pastagem.

Com a atualização do levantamento do uso e ocupação da bacia do Córrego do Palmital em 2019, foi identificado que 39% da área corresponde a pastagens, mostrando uma diminuição em relação ao resultado encontrado em 2016. A classe “cultura” foi renomeada para “lavoura temporária”, que somou 20,5% da área de estudo. Nos levantamentos anteriores, havia produção de feijão, algodão e eucalipto, englobados na classe de uso “cultura”.

Entretanto, houve uma mudança de padrão ao longo dos anos, principalmente devido ao aumento do preço dos grãos. Assim, as áreas de agricultura consistem em plantações de milho e soja, que são enquadrados como lavoura temporária – pois têm ciclo anual. Observou-se substituição de áreas anteriormente utilizadas como pastagem por agricultura, devido às mudanças no mercado de grãos. Assim, os proprietários teriam maiores lucros com a lavoura do que com a criação de gado. Porém, em áreas cobertas por cambissolos, a tentativa de conversão da pastagem para lavoura não foi bem-sucedida, devido às limitações destes solos para a produção vegetal.

As áreas correspondentes às plantações de café se mantiveram relativamente estáveis, comparando-os com os anos anteriores, sendo 4,6% da área em 2019. Outros usos da bacia somaram 35,4% da área, compreendendo áreas de várzea, áreas vegetadas, solo exposto, infraestrutura, água e áreas não utilizadas comercialmente. Cerca de 0,4% da área da bacia não pôde ser mapeada, visto que foi encoberta por uma nuvem na imagem de satélite.

7.1.3 Considerações

As observações de Real et al. (2020b) indicaram que a maior concentração de voçorocas é relacionada com elevações entre 900 e 980 m, declividades entre 8 e 45%, formas de encosta convexa-côncava e próximas a pastagens. Análises estatísticas de Real et al. (2020b) apontaram que os fatores de maior influência sobre a forma das feições erosivas na área são a vegetação, geologia (tonalito e trondhjemito), plantações de café, canais de primeira e segunda ordem e curvatura das encostas. Essas observações são corroboradas pelos resultados dos levantamentos de voçorocas e de uso e ocupação do solo com base nas imagens de satélite de 2019.

7.2 **Análise Estatística de Dados Meteorológicos**

7.2.1 Dados Diários

Os dados brutos diários de precipitação total e temperatura média indicaram 11.323 entradas para Lavras, de 1991 a 2021. São João del Rei apresentou 11.316 entradas no mesmo período. Desconsiderando os dias que não tiveram medições de precipitação total ou temperatura média, tem-se 11.050 entradas para Lavras e 9.562 para São João del Rei. As entradas correspondem às linhas das tabelas analisadas (medições dos dados climatológicos), ao passo que as colunas correspondem às variáveis (precipitação total e temperatura média).

O maior valor de precipitação ocorreu no conjunto de dados de São João del Rei, com máxima de 179,00 mm em 13/02/2020. Também se destacam os valores de 137,6 mm (24/01/1992), 108,1 mm (14/01/1992), 105,8 mm (03/01/1997) e 99,4 mm (28/02/2011). Em

Lavras, a precipitação total máxima foi de 155,8 mm em 09/01/2012. Também se destacam os seguintes dados pluviométricos: 134,8 mm (24/01/1992), 116,8 mm (13/02/2020), 110,6 mm (13/01/1991) e 95 mm (27/02/1994). A média, excluindo valores iguais a zero (dias sem chuva ou sem medição), foi de 12,06 mm para Lavras e 10,89 mm para São João del Rei.

Quanto à temperatura, o maior valor registrado foi no conjunto de Lavras, com máxima de 28,26°C em 17/10/2015. Em São João del Rei, a máxima foi de 26,68°C em 25/01/2006. O menor valor de temperatura foi de 8,08°C (09/06/1997) em São João del Rei, sendo 9,04°C (10/07/1994) a mínima em Lavras. As médias são de 19,65°C em São João del Rei e 20,58°C em Lavras.

7.2.2 Dados Mensais

As tabelas de dados mensais reuniram 372 meses dentro do período de 1991 a 2021. Após a exclusão dos meses que não tiveram medições diárias suficientes (menos de 90% da precipitação total e menos de 70% da temperatura média), restaram 349 meses de análise em Lavras e 294 em São João del Rei.

Em Lavras, 8,9% dos meses não tiveram registro de temperatura média. Em São João del Rei, no período de 1991 a 2006 (estação convencional), não houve registro de 21,3% dos meses quanto à precipitação total e 23,9% quanto à temperatura média. Com a mudança da estação para automática a partir de 2006, a porcentagem de medições não registradas de precipitação total e temperatura média diminuiu para 5,2 e 6,9%, respectivamente.

A máxima de precipitação total foi de 695,5 mm em São João del Rei, para o mês de janeiro de 1992. Também destaques de máximas para essa estação, tem-se: 595,6 mm (02/2020), 593,9 mm (01/2003), 579,1 mm (01/1991) e 553,8 mm (01/1997). Em Lavras, os maiores valores foram de 554,7 mm (01/2007), 547,4 mm (01/1991), 529,2 mm (01/2012), 514,3 mm (01/1992) e 499,7 mm (01/2013).

Quanto à temperatura média mensal, Lavras teve máxima de 24,81°C em janeiro de 2015 e mínima de 15,76°C em julho de 2004. São João del Rei teve máxima de 23,5°C em fevereiro de 2003 e mínima de 14,6°C em junho de 1997. As médias foram de 20,61°C para Lavras e 19,70°C para São João del Rei.

7.2.3 Dados Anuais

Uma vez que os dados anuais foram calculados com base nos dados mensais, utilizou-se as mesmas regras de porcentagens de medições diárias válidas para compor os valores

mensais. Isto é, deve-se ter pelo menos 90% das medições diárias de precipitação total e 70% de temperatura média para que o valor seja computado.

Em Lavras, não foram obtidos valores mensais para médias de temperatura no ano de 1992. Portanto, esse ano não foi incluído na análise anual dos dados meteorológicos de Lavras, que passou a contar com 30 anos. Em São João del Rei, o ano de 2004 não apresentou valores de precipitação total e temperatura média anuais. E o ano de 2007 não teve valor de precipitação total. Dessa forma, foram analisados 29 anos, excluindo 2004 e 2007. Os indivíduos e respectivos anos são detalhados na Tabela 14.

Tabela 14 – Indivíduos e respectivos anos de análise estatística de dados meteorológicos em Lavras e São João del Rei.

Lavras		São João del Rei	
Indivíduo	Ano	Indivíduo	Ano
1	1991	1	1991
2	1993	2	1992
3	1994	3	1993
4	1995	4	1994
5	1996	5	1995
6	1997	6	1996
7	1998	7	1997
8	1999	8	1998
9	2000	9	1999
10	2001	10	2000
11	2002	11	2001
12	2003	12	2002
13	2004	13	2003
14	2005	14	2005
15	2006	15	2006
16	2007	16	2008
17	2008	17	2009
18	2009	18	2010
19	2010	19	2011
20	2011	20	2012
21	2012	21	2013
22	2013	22	2014
23	2014	23	2015
24	2015	24	2016
25	2016	25	2017
26	2017	26	2018
27	2018	27	2019
28	2019	28	2020
29	2020	29	2021
30	2021	-	-

- Sem informação. Fonte: Da autora.

O maior valor de precipitação total foi de 1.876,8 mm, correspondente ao ano de 1991 em São João del Rei. Na mesma estação, destacaram-se ainda os anos de 2015 (1.821,4 mm), 2018 (1.801 mm), 2011 (1.784,8 mm), 1996 (1.730,3 mm) e 1997 (1.709,4 mm). Em Lavras, a

máxima de precipitação total foi de 1.824,9 mm em 1992, mas este ano não foi incluso na análise estatística no R. Em seguida, tem-se 1.759,6 mm (1994), 1.696,5 mm (1996), 1.663,4 mm (1991), 1.646 mm (2008) e 1.635,6 mm (2011). As médias de precipitação total foram de 1.337,2 mm em Lavras e 1.370,81 mm em São João del Rei.

Quanto à temperatura média anual, a máxima foi de 21,82°C em 2002, registrada na estação em São João del Rei. A mínima desta estação foi de 18,17°C em 1999. Em Lavras, a máxima foi de 21,37°C em 2019, ao passo que a mínima foi de 20,05°C em 1996. As temperaturas médias anuais foram de 20,59°C em Lavras e 19,79°C em São João del Rei.

7.2.4 Considerações sobre os dados meteorológicos

A erosão é relacionada com dois tipos de eventos de chuva: tempestade intensa e rápida, que excede a capacidade de infiltração do solo; e a tempestade longa, com baixa intensidade, mas que satura o solo. A iminência da saturação do solo depende tanto das suas características (de estrutura, textura e profundidade, por exemplo) quanto da quantidade de chuva que precipitou nos dias anteriores. Ou seja, quanto mais saturado é o solo, menos poros estão disponíveis para absorver a água das próximas chuvas, em especial se forem de maior intensidade. Assim, maior será o escoamento superficial e a erosão do solo. As consequências de um evento extremo podem ser duradouras e favoráveis ao aumento das taxas de perda do solo (MORGAN, 2005; BLANCO; LAL, 2008).

Portanto, deve-se compreender o comportamento da chuva na área de estudo, de modo a facilitar a interpretação dos resultados concernentes à erosão, visto que a intensidade e duração das chuvas têm papel fundamental no seu desenvolvimento.

Os meses mais chuvosos e de maior temperatura são entre outubro e março, sendo as máximas geralmente de novembro a janeiro. Segundo o INMET (2017), os “veranicos” ocorriam comumente entre janeiro e fevereiro, sendo correspondentes a períodos consecutivos sem chuva. Porém, tem se observado irregularidade na distribuição das chuvas de janeiro e fevereiro desde 2013/2014, o que antecipa a ocorrência do “veranico” e causa ondas de calor relacionadas com piores condições hídricas do solo.

Além disso, também tem ocorrido grandes acumulados de chuva entre dezembro e janeiro em Minas Gerais, com destaque a janeiro de 2020 e dezembro de 2021, relacionadas à formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Foram registradas chuvas persistentes e intensas, com volumes pelo menos duas vezes maiores que as médias esperadas (INMET, 2020; INMET, 2021). Os eventos de chuva são geralmente associados com deslizamentos de terra na região, que implicam em perdas financeiras e de vidas.

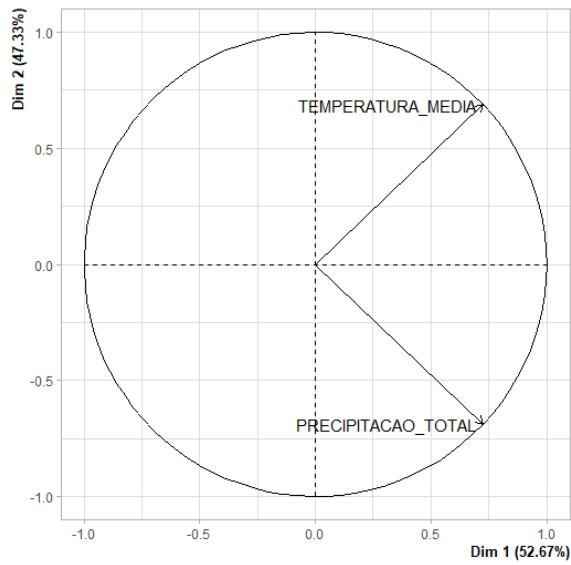
Em Lavras, os acumulados mensais de chuva foram de 266,2 mm e 544,1 mm em janeiro e fevereiro de 2020, respectivamente. Em dezembro de 2021, o total de precipitação foi de 284,6 mm. As médias esperadas para janeiro, fevereiro e dezembro são de 290,80 mm, 179,63 mm e 260,64 mm, respectivamente. Janeiro de 2020 não teve registro de oito dias devido a problemas técnicos, o que pode ter colaborado para subestimar o total de precipitação para este mês. Fevereiro de 2020 mostrou acumulado de chuva três vezes superior à média para a estação meteorológica. A precipitação total de dezembro de 2021 ultrapassou 9% da média para o mês. Destacam-se os dias 06/12/2021 e 17/12/2021, com totais de precipitação de 55,3 mm e 53,9 mm, quando a média diária para dezembro é de 13,60 mm.

Em São João del Rei, a precipitação total foi de 233,40 mm, 595,60 mm e 383,40 mm para janeiro/2020, fevereiro/2020 e dezembro/2021, respectivamente. As médias esperadas para esses meses são de 302,03 mm (janeiro), 215,35 mm (fevereiro) e 295,04 mm (dezembro). Similar ao observado em Lavras, o acumulado de janeiro foi inferior à média esperada. Fevereiro de 2020 teve total de precipitação quase três vezes superior à média para o mês. O acumulado de chuva do mês de dezembro de 2021 foi cerca de 30% superior à média para dezembro. Ressalta-se a sequência dos dias 13 a 17/12/2021, que tiveram precipitação total diária de 42,60 mm, 0 mm (sem chuva), 43,40 mm, 40,40 mm e 66,40 mm, respectivamente. A média diária para o mês é de 14,95 mm, e os registros foram de três a quatro vezes maiores. Acrescenta-se, ainda, que a ocorrência de vários eventos de chuva em dias seguidos contribui para a saturação do solo e favorecimento do escoamento superficial.

7.2.5 Análise da Componente Principal

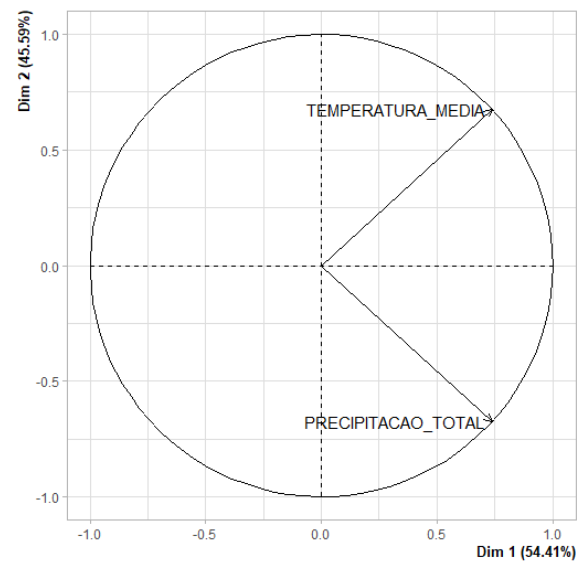
Foram gerados os gráficos de variáveis PCA para os conjuntos de dados diários (Figura 31), mensais (Figura 32) e anuais (Figura 33) de Lavras e São João del Rei. Tendo em vista que os ângulos das retas que representam precipitação total e temperatura média estão distantes, os gráficos indicam não semelhança entre as variáveis.

Figura 31 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos diários.



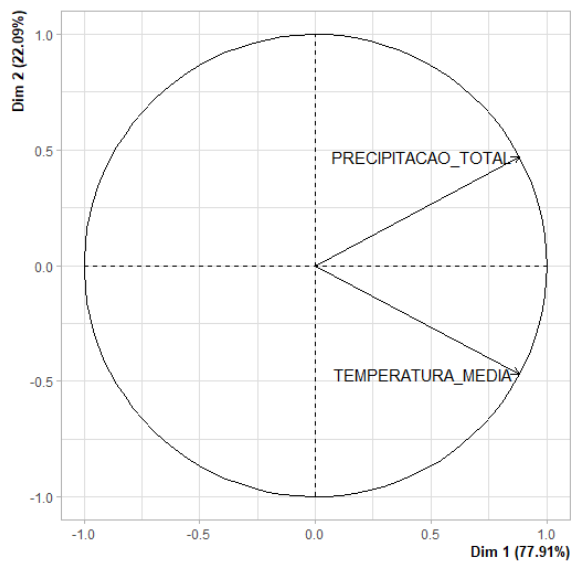
(a)

(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.



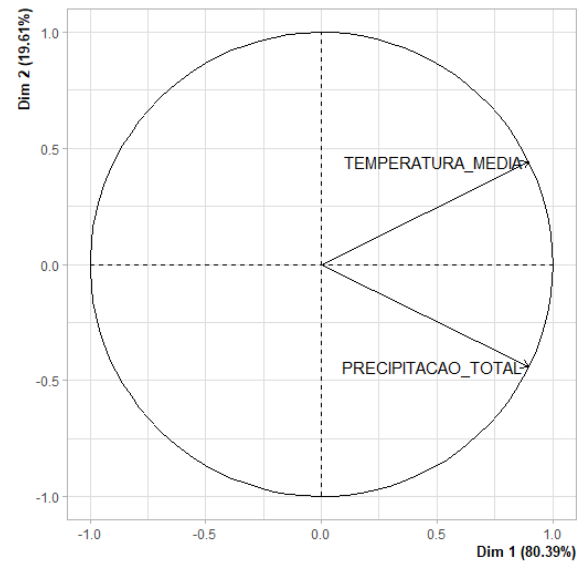
(b)

Figura 32 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos mensais.



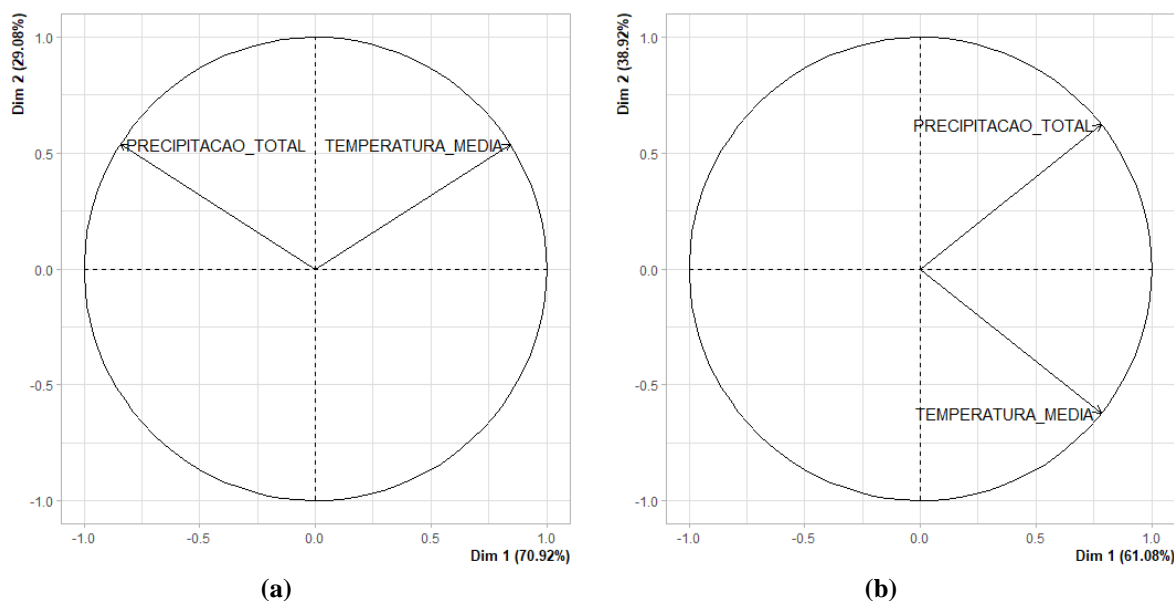
(a)

(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.



(b)

Figura 33 – Gráficos de variáveis PCA de dados climáticos anuais.



Os valores de variância dos dados diários, mensais e anuais são apresentados na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17, respectivamente. A soma esperada dos *eigenvalues* é de aproximadamente 2, o que é atendido. A soma da percentagem de variância, que deve ser de 100%, também é atendida pelos dois conjuntos nos períodos analisados.

Tabela 15 – Valores de variância dos dados diários.

	Lavras (1991-2021)		São João del Rei (1991-2021)	
	Dim. 1	Dim.2	Dim. 1	Dim.2
Eigenvalue	1,0534566	0,9465434	1,0881046	0,9118954
Percentagem de variância	52,67283	47,32717	54,40523	45,59477
Percentagem de variância acumulada	52,67283	100,0000	54,40523	100,00000

Fonte: Da autora.

Tabela 16 – Valores de variância dos dados mensais.

	Lavras (1991-2021)		São João del Rei (1991-2021)	
	Dim. 1	Dim.2	Dim. 1	Dim.2
Eigenvalue	1,5581207	0,4418793	1,6077988	0,3922012
Percentagem de variância	77,90603	22,09397	80,38994	19,61006
Percentagem de variância acumulada	77,90603	100,0000	80,38994	100,0000

Fonte: Da autora.

Tabela 17 – Valores de variância dos dados anuais.

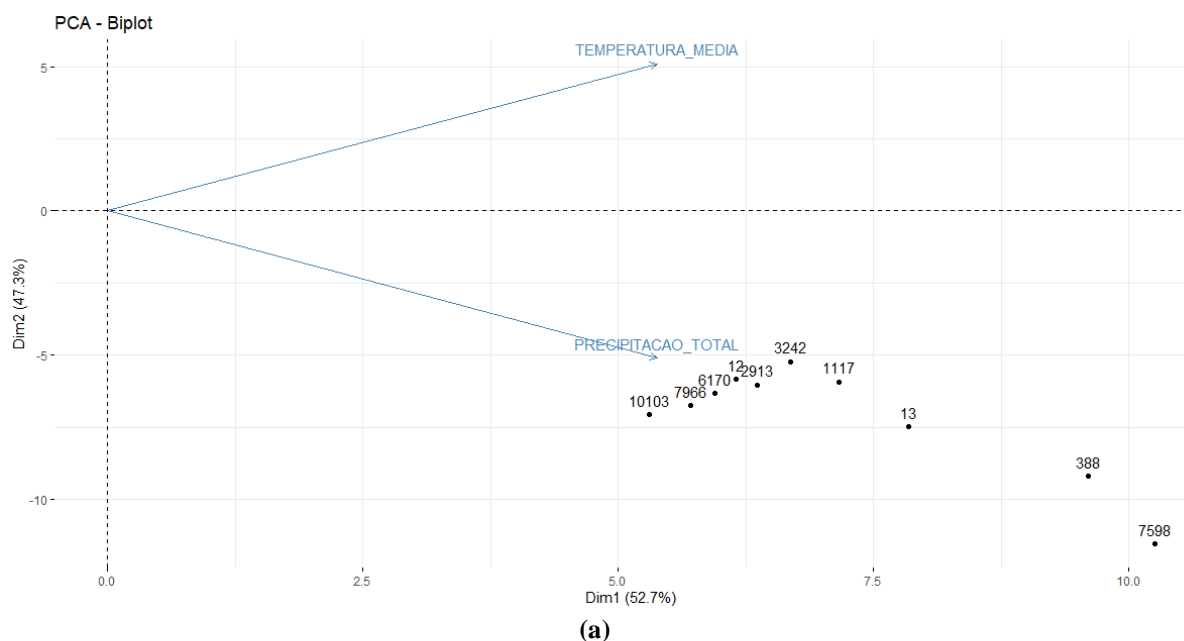
	Lavras (1991-2021)		São João del Rei (1991-2021)	
	Dim. 1	Dim.2	Dim. 1	Dim.2
Eigenvalue	1,4183904	0,5816096	1,2216466	0,7783534
Porcentagem de variância	70,91952	29,08048	61,08233	38,91767
Porcentagem de variância acumulada	70,91952	100,0000	61,08233	100,0000

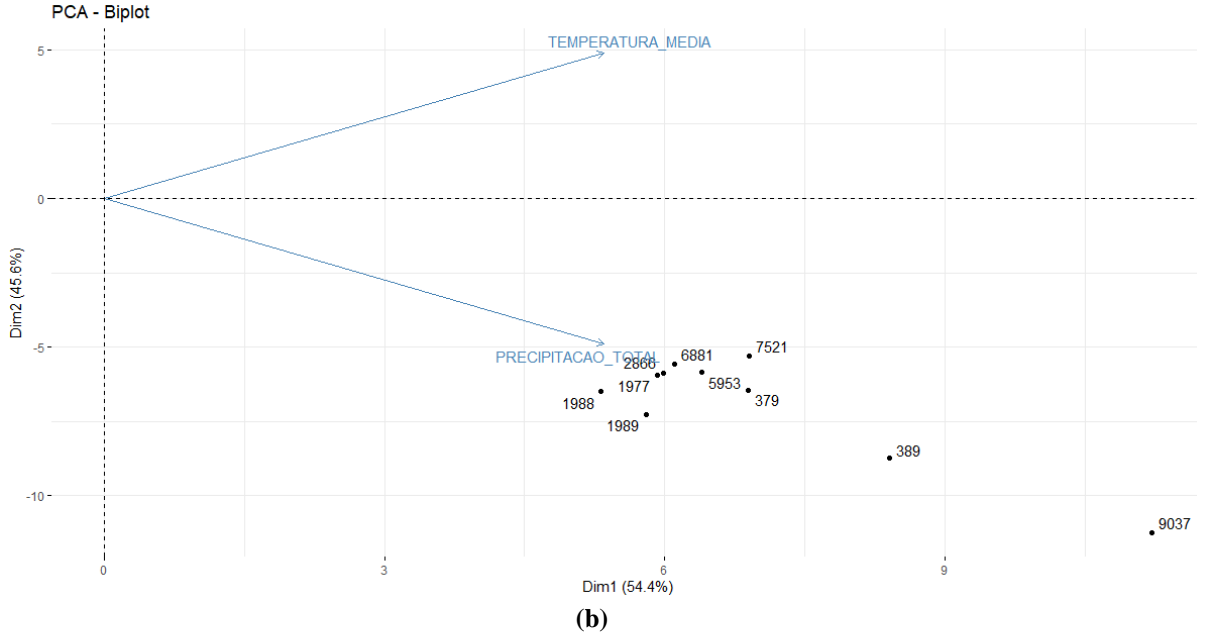
Fonte: Da autora.

Os gráficos simples de indivíduos em PCA e de contribuição dos indivíduos para as dimensões 1 e 2 em PCA dos dados diários e mensais são de difícil interpretação, visto que havia sobreposição dos símbolos que representam os indivíduos, devido ao grande volume de dados.

A geração de gráficos bi-plot considerando os 10 indivíduos de maior contribuição solucionou este problema, ao diminuir o número de valores representados no gráfico. Dessa forma, é possível observar na Figura 34 e na Figura 35 que os indivíduos de maior contribuição tendem a se concentrar próximos ao eixo de precipitação total.

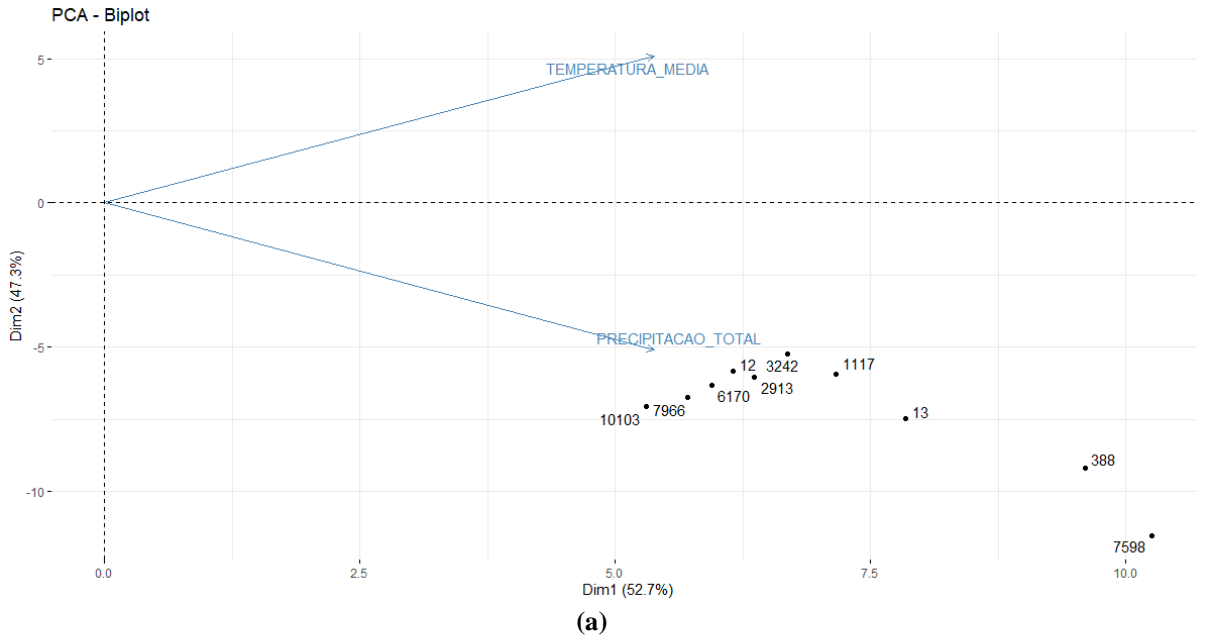
Figura 34 – Gráficos bi-plot com os 10 indivíduos de maior contribuição para os dados diários.

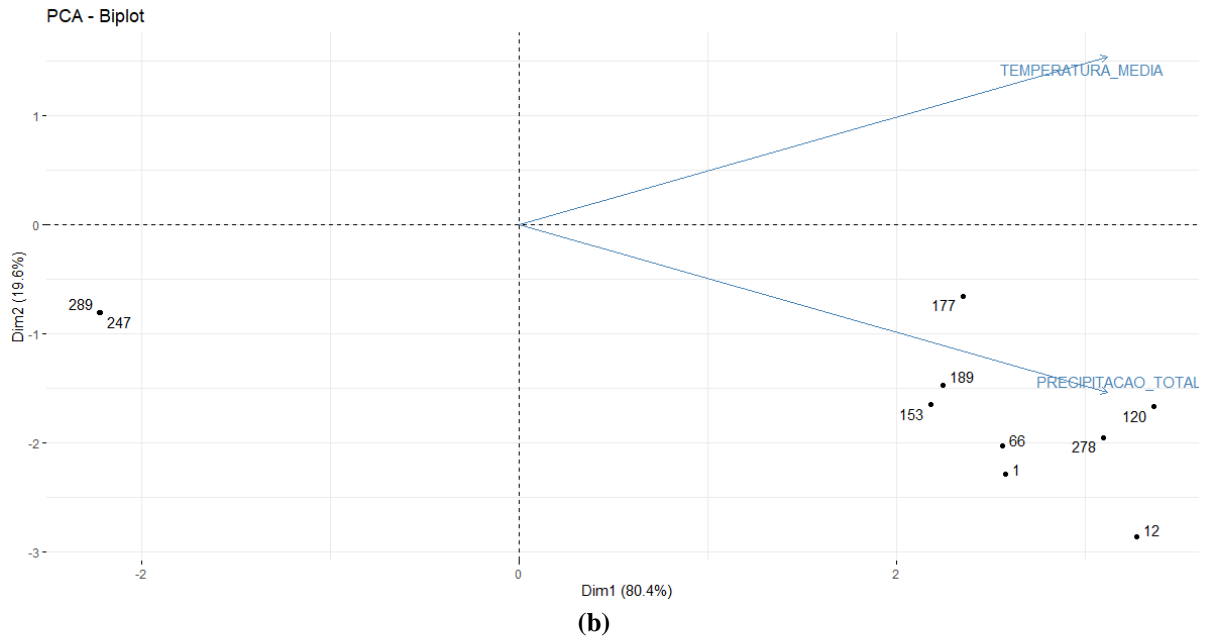




(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Figura 35 – Gráficos bi-plot com os 10 indivíduos de maior contribuição para os dados mensais.

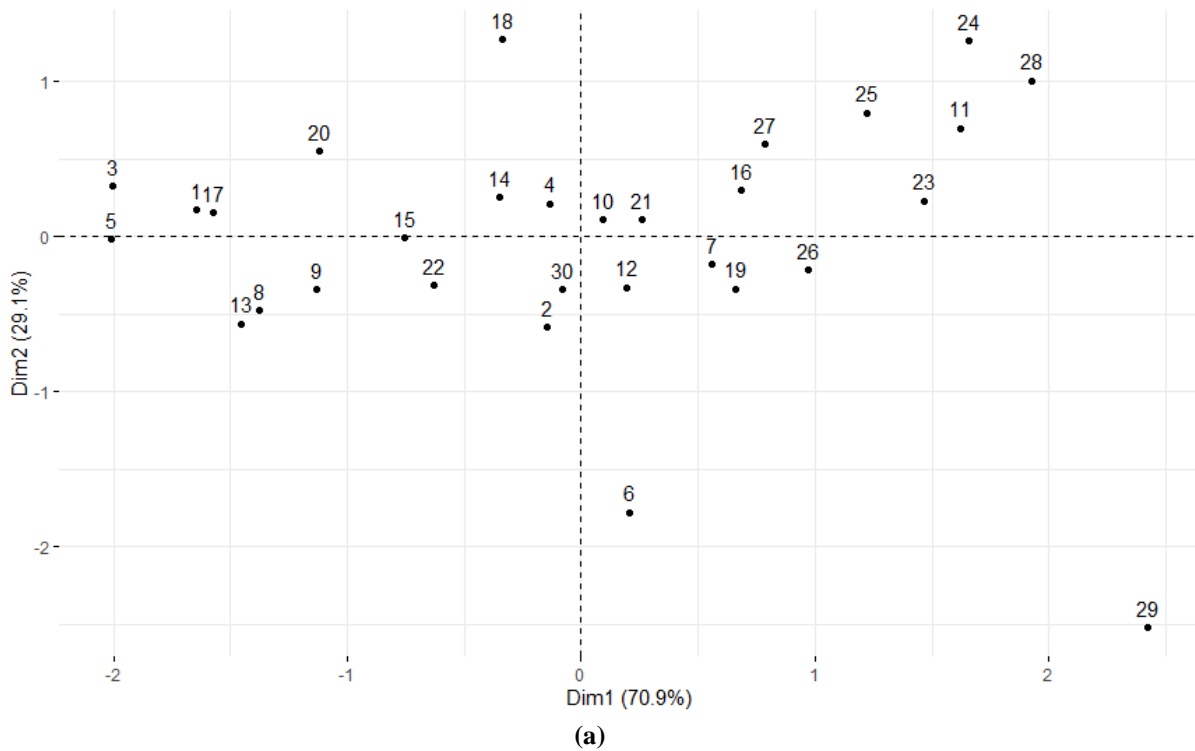


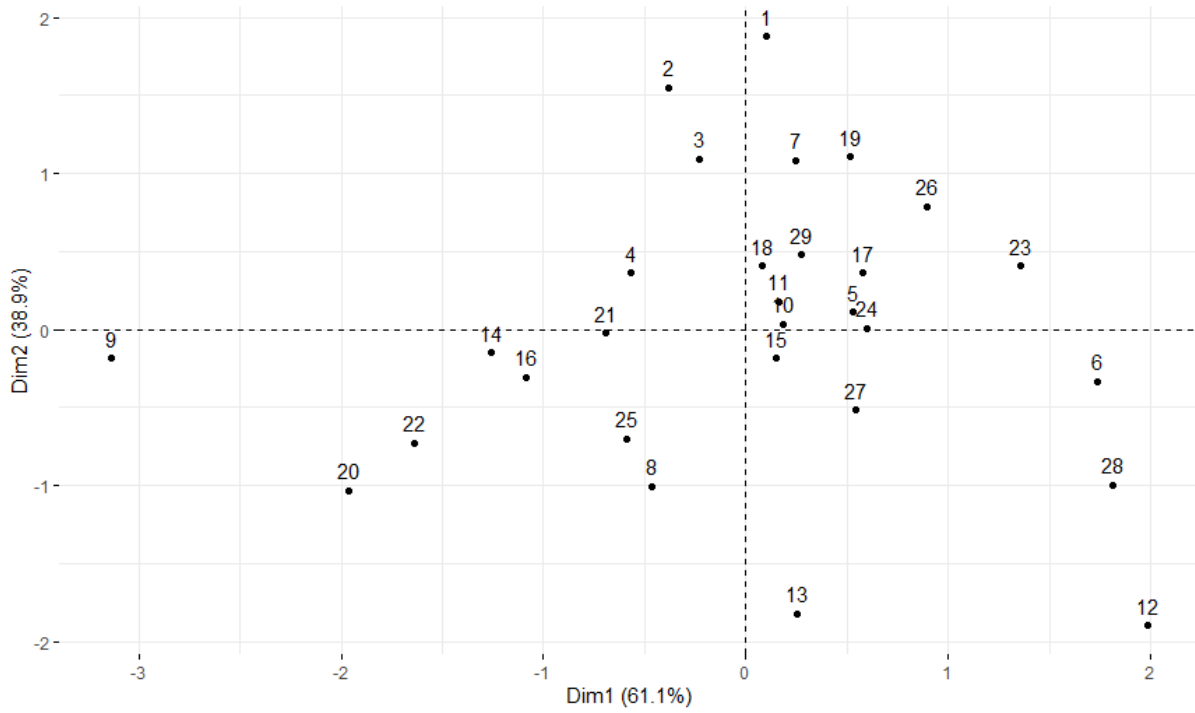


(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Para os dados anuais, foi possível elaborar os gráficos simples dos indivíduos, apresentados na Figura 36. Os gráficos das contribuições de precipitação total e temperatura média dos indivíduos para as Dimensões 1 e 2, são apresentados na Figura 37.

Figura 36 – Gráficos simples dos indivíduos em PCA para os dados anuais.

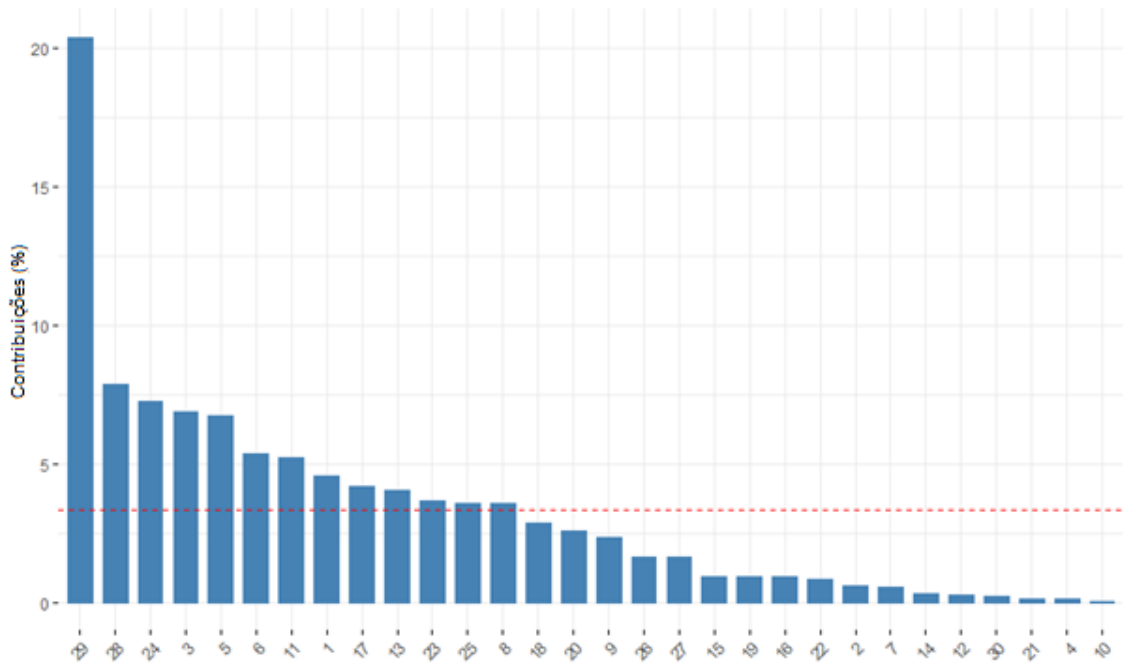




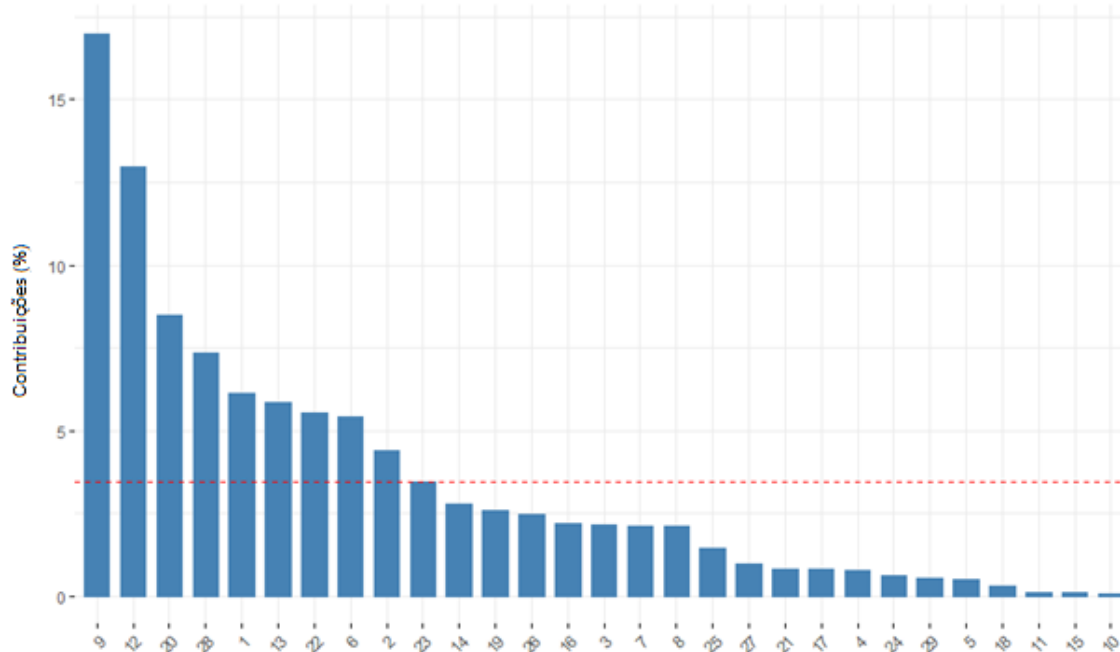
(b)

(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Figura 37 – Gráficos das contribuições de precipitação total e temperatura média dos indivíduos para as dimensões 1 e 2, para os dados anuais.



(a)



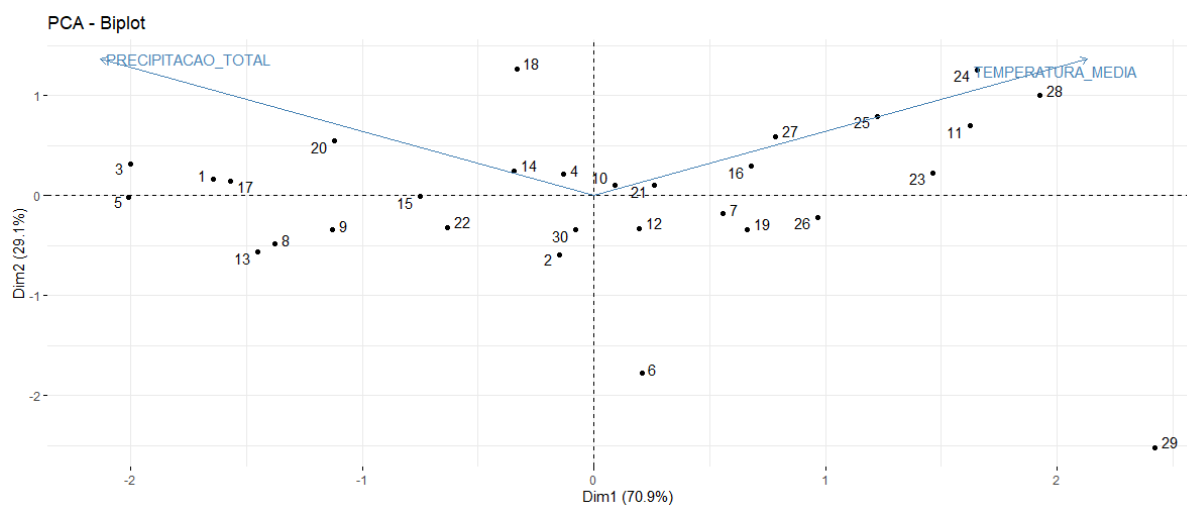
(b)

(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

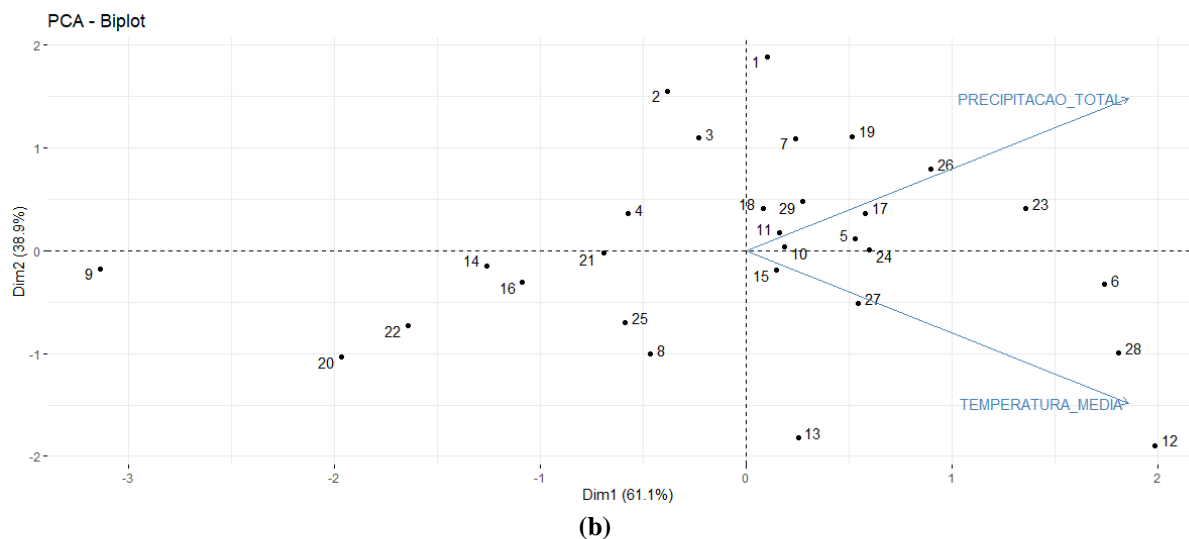
Em Lavras, a maior contribuição foi de mais de 20%, do indivíduo 29, correspondente ao ano de 2020. Em São João del Rei, os dois indivíduos de maior contribuição somam cerca de 30% de contribuição, sendo os indivíduos 9 (1999) e 12 (2002).

Também foram elaborados os gráficos bi-plot com os dados anuais, considerando as variáveis de precipitação total e temperatura média, conforme a Figura 38.

Figura 38 – Gráficos bi-plot dos dados climáticos anuais.



(a)



(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Em Lavras, os indivíduos 6 (1997) e 29 (2020) se afastam dos eixos plotados. Em São João del Rei, isto ocorre com os indivíduos 9 (1999), 20 (2012), 22 (2014), 14 (2005) e 16 (2008). Os valores de precipitação total e temperatura média destes anos são apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19.

Tabela 18 – Valores de precipitação total e temperatura média dos indivíduos destacados nos gráficos bi-plot de dados meteorológicos anuais de Lavras.

Indivíduo	Precipitação Total	Temperatura Média
6 (1997)	946,2 mm	20,17°C
29 (2020)	388,3 mm	20,48°C

Fonte: Da autora.

Tabela 19 – Valores de precipitação total e temperatura média dos indivíduos destacados nos gráficos bi-plot de dados meteorológicos anuais de São João del Rei.

Indivíduo	Precipitação Total	Temperatura Média
9 (1999)	524,1 mm	18,17°C
20 (2012)	606,6 mm	19,25°C
22 (2014)	767 mm	19,26°C
14 (2005)	1.012,9 mm	19,15°C
16 (2008)	1.015,6 mm	19,33°C

Fonte: Da autora.

Os anos de 2020 e 1997 mostraram o primeiro e o segundo menores valores de precipitação total do conjunto de dados de Lavras. Quanto à temperatura, 1997 apresentou a quinta menor temperatura média, ao passo que a temperatura média de 2020 está muito próxima da mediana do conjunto.

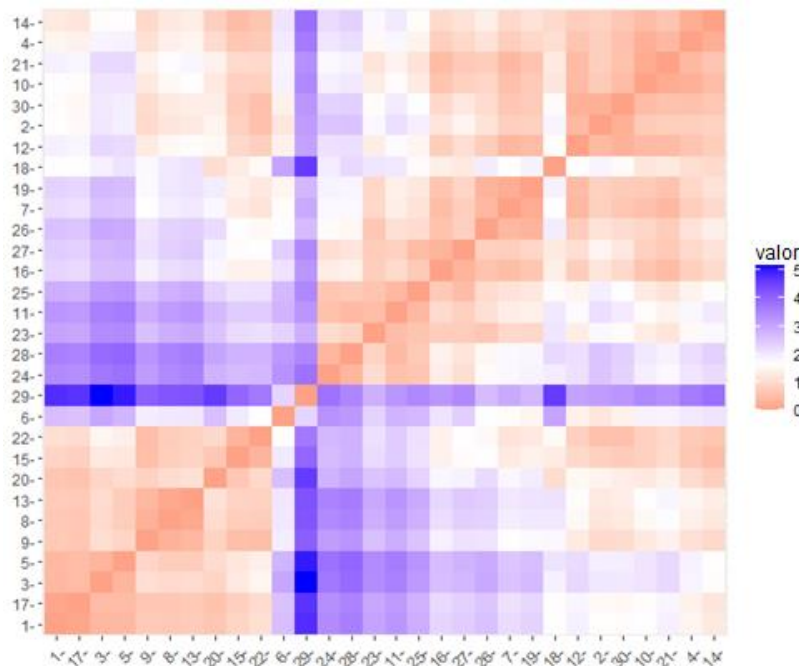
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1	0.0	0.6	0.8	1.6	1.8	2.7	0.8	2.9	3.8	1.8	1.7	4.1	3.6	2.4	2.0	2.4	1.6	1.4	0.9	3.5	2.0	3.1	1.9	1.9	2.6	1.3	2.4	3.3	1.4	
2	0.6	0.0	0.5	1.2	1.7	2.8	0.8	2.5	3.2	1.6	1.5	4.1	3.4	1.9	1.8	2.0	1.5	1.2	1.0	3.0	1.6	2.6	2.0	1.8	2.2	1.5	2.2	3.3	1.2	
3	0.8	0.5	0.0	0.8	1.2	2.4	0.5	2.1	3.1	1.1	1.0	3.7	2.9	1.6	1.3	1.6	1.1	0.7	0.7	2.7	1.2	2.3	1.7	1.3	1.8	1.1	1.8	2.9	0.8	
4	1.6	1.2	0.8	0.0	1.1	2.4	1.1	1.4	2.6	0.8	0.7	3.4	2.3	0.8	0.9	0.8	1.1	0.6	1.3	1.9	0.4	1.5	1.9	1.2	1.0	1.5	1.4	2.7	0.8	
5	1.8	1.7	1.2	1.1	0.0	1.3	1.0	1.5	3.6	0.3	0.4	2.4	1.9	1.8	0.5	1.6	0.2	0.5	1.0	2.7	1.2	2.3	0.9	0.1	1.4	0.8	0.6	1.7	0.4	
6	2.7	2.8	2.4	2.4	1.3	0.0	2.0	2.3	4.8	1.6	1.6	1.6	2.1	2.9	1.6	2.8	1.3	1.8	1.9	3.7	2.4	3.3	0.8	1.2	2.3	1.4	1.2	0.7	1.6	
7	0.8	0.8	0.5	1.1	1.0	2.0	0.0	2.2	3.5	1.0	0.9	3.4	2.9	1.9	1.3	1.9	0.8	0.7	0.3	3.0	1.4	2.6	1.3	1.1	1.9	0.7	1.6	2.6	0.6	
8	2.9	2.5	2.1	1.4	1.5	2.3	2.2	0.0	2.7	1.2	1.3	2.6	1.1	1.1	1.0	0.9	1.7	1.5	2.3	1.5	1.0	1.2	2.3	1.4	0.3	2.2	1.1	2.2	1.6	
9	3.8	3.2	3.1	2.6	3.6	4.8	3.5	2.7	0.0	3.3	3.3	5.3	3.7	1.8	3.2	2.0	3.7	3.2	3.8	1.4	2.4	1.6	4.5	3.7	2.6	4.1	3.6	4.9	3.4	
10	1.8	1.6	1.1	0.8	0.3	1.6	1.0	1.2	3.3	0.0	0.1	2.6	1.8	1.4	0.2	1.3	0.5	0.4	1.1	2.4	0.9	1.9	1.2	0.4	1.0	1.0	0.6	1.9	0.4	
11	1.7	1.5	1.0	0.7	0.4	1.6	0.9	1.3	3.3	0.1	0.0	2.7	2.0	1.4	0.4	1.3	0.4	0.2	1.0	2.4	0.9	2.0	1.2	0.5	1.1	0.9	0.8	2.0	0.3	
12	4.1	4.1	3.7	3.4	2.4	1.6	3.4	2.6	5.3	2.6	2.7	0.0	1.7	3.6	2.5	3.4	2.6	2.9	3.3	4.0	3.2	3.7	2.3	2.3	2.8	2.8	2.0	0.9	2.9	
13	3.6	3.4	2.9	2.3	1.9	2.1	2.9	1.1	3.7	1.8	2.0	1.7	0.0	2.2	1.6	2.0	2.2	2.2	2.9	2.3	2.0	2.2	2.4	1.8	1.4	2.6	1.3	1.7	2.3	
14	2.4	1.9	1.6	0.8	1.8	2.9	1.9	1.1	1.8	1.4	1.4	3.6	2.2	0.0	1.4	0.2	1.9	1.4	2.1	1.1	0.6	0.7	2.6	1.8	0.9	2.3	1.8	3.1	1.6	
15	2.0	1.8	1.3	0.9	0.5	1.6	1.3	1.0	3.2	0.2	0.4	2.5	1.6	1.4	0.0	1.2	0.7	0.6	1.3	2.2	0.8	1.8	1.3	0.5	0.9	1.2	0.5	1.8	0.7	
16	2.4	2.0	1.6	0.8	1.6	2.8	1.9	0.9	2.0	1.3	1.3	3.4	2.0	0.2	1.2	0.0	1.8	1.3	2.1	1.1	0.5	0.7	2.5	1.7	0.6	2.2	1.6	2.9	1.5	
17	1.6	1.5	1.1	1.1	0.2	1.3	0.8	1.7	3.7	0.5	0.4	2.6	2.2	1.9	0.7	1.8	0.0	0.5	0.7	2.8	1.3	2.4	0.8	0.3	1.5	0.5	0.9	1.8	0.3	
18	1.4	1.2	0.7	0.6	0.5	1.8	0.7	1.5	3.2	0.4	0.2	2.9	2.2	1.4	0.6	1.3	0.5	0.0	0.8	2.5	0.9	2.0	1.3	0.6	1.3	0.9	1.0	2.2	0.2	
19	0.9	1.0	0.7	1.3	1.0	1.9	0.3	2.3	3.8	1.1	1.0	3.3	2.9	2.1	1.3	2.1	0.7	0.8	0.0	3.2	1.6	2.8	1.1	1.1	2.1	0.5	1.6	2.4	0.7	
20	3.5	3.0	2.7	1.9	2.7	3.7	3.0	1.5	1.4	2.4	2.4	4.0	2.3	1.1	2.2	1.1	2.8	2.5	3.2	0.0	1.6	0.4	3.6	2.7	1.4	3.3	2.5	3.7	2.7	
21	2.0	1.6	1.2	0.4	1.2	2.4	1.4	1.0	2.4	0.9	0.9	3.2	2.0	0.6	0.8	0.5	1.3	0.9	1.6	1.6	0.0	1.2	2.1	1.3	0.7	1.8	1.3	2.6	1.1	
22	3.1	2.6	2.3	1.5	2.3	3.3	2.6	1.2	1.6	1.9	2.0	3.7	2.2	0.7	1.8	0.7	2.4	2.0	2.8	0.4	1.2	0.0	3.1	2.3	1.0	2.9	2.2	3.4	2.2	
23	1.9	2.0	1.7	1.9	0.9	0.8	1.3	2.3	4.5	1.2	1.2	2.3	2.4	2.6	1.3	2.5	0.8	1.3	1.1	3.6	2.1	3.1	0.0	0.8	2.2	0.6	1.2	1.4	1.1	
24	1.9	1.8	1.3	1.2	0.1	1.2	1.1	1.4	3.7	0.4	0.5	2.3	1.8	1.8	0.5	1.7	0.3	0.6	1.1	2.7	1.3	2.3	0.8	0.0	1.4	0.8	0.5	1.5	0.6	
25	2.6	2.2	1.8	1.0	1.4	2.3	1.9	0.3	2.6	1.0	1.1	2.8	1.4	0.9	0.9	0.6	1.5	1.3	2.1	1.4	0.7	1.0	2.2	1.4	0.0	2.1	1.1	2.4	1.4	
26	1.3	1.5	1.1	1.5	0.8	1.4	0.7	2.2	4.1	1.0	0.9	2.8	2.6	2.3	1.2	2.2	0.5	0.9	0.5	3.3	1.8	2.9	0.6	0.8	2.1	0.0	1.3	2.0	0.7	
27	2.4	2.2	1.8	1.4	0.6	1.2	1.6	1.1	3.6	0.6	0.8	2.0	1.3	1.8	0.5	1.6	0.9	1.0	1.6	2.5	1.3	2.2	1.2	0.5	1.1	1.3	0.0	1.3	1.0	
28	3.3	3.3	2.9	2.7	1.7	0.7	2.6	2.2	4.9	1.9	2.0	0.9	1.7	3.1	1.8	2.9	1.8	2.2	2.4	3.7	2.6	3.4	1.4	1.5	2.4	2.0	1.3	0.0	2.1	
29	1.4	1.2	0.8	0.8	0.4	1.6	0.6	1.6	3.4	0.4	0.4	0.3	2.9	2.3	1.6	0.7	1.5	0.3	0.2	0.7	2.7	1.1	2.2	1.1	0.6	1.4	0.7	1.0	2.1	0.0

(b)

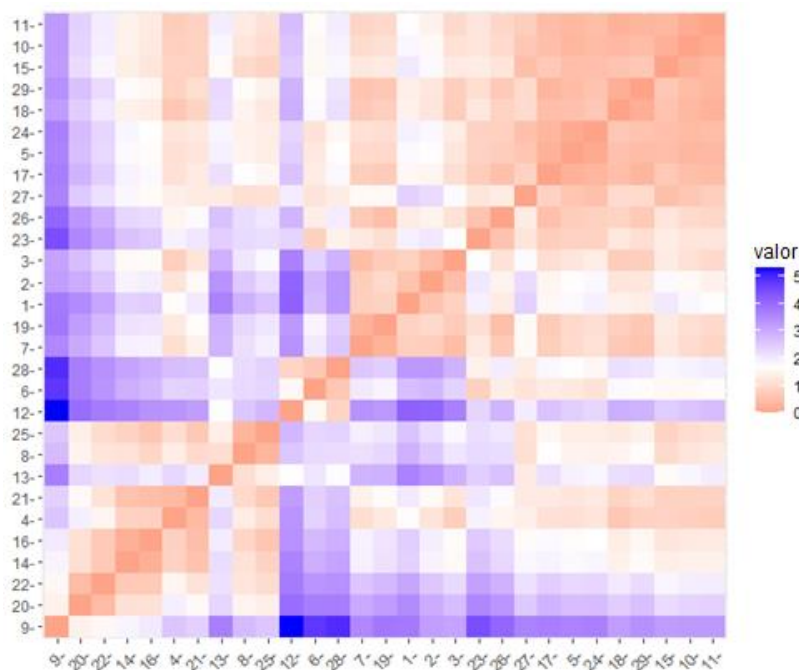
(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

As matrizes de distância também foram geradas, conforme é observado na Figura 40. Os menores valores, de maior correlação, estão em tons vermelhos. Ao passo que os maiores valores, que indicam menor correlação, são representados por tons azuis.

Figura 40 – Matrizes de distância dos dados anuais de precipitação total e temperatura média.



(a)



(b)

(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Para Lavras, os indivíduos de menor similaridade foram: 3 (1994), 18 (2009), 1 (1991), 17 (2008) e 5 (1996) em relação ao indivíduo 29 (2020). Uma possível justificativa é que o ano de 2020 apresentou o menor valor de precipitação total do conjunto (388,3 mm), uma vez que não teve registro nos meses de janeiro a maio, e novembro. Tendo em vista que os meses mais chuvosos são de outubro a março, alguns dos maiores valores acumulados de chuva do ano não foram contabilizados e diminuíram o valor final para 2020. Considerando que os anos de 1994, 1996, 1991, 2008 e 2009 mostraram os valores mais altos de precipitação total do conjunto (entre 1759,6 e 1623,6 mm), é coerente admitir que os indivíduos têm menor correspondência.

Para São João del Rei, as menores similaridades ocorreram entre os indivíduos 12 (2002), 28 (2020), 6 (1996) e 23 (2015) em relação ao 9 (1999). O ano de 1999 apresenta os menores valores de precipitação total e temperatura média do conjunto, sendo 524 mm e 18,17°C, respectivamente. Salienta-se que esse ano não teve registro nos meses de janeiro a março, bem como setembro. Da mesma forma que ocorreu com 2020 de Lavras, os valores total e médio das variáveis consideradas nesta análise foram menores do que o esperado, pois os meses chuvosos (alta precipitação e temperatura) não foram computados. O ano de 2015 apresentou a segunda maior precipitação total, ao passo que 1996, 2020 e 2002 ocuparam o quinto, décimo e décimo sétimo lugares. Quanto à temperatura média, esses anos possuem maior similaridade, visto que 2002 e 2020 mostram as maiores temperaturas médias do conjunto,

com 21,82°C e 21,25°C, respectivamente. 1996 (20,86°C) e 2015 (20,26°C), por sua vez, apresentam a quinta e a sétima maiores temperaturas médias.

Os números ótimos de *clusters* foram definidos a partir da relação entre o número de *clusters* k e a soma total dos quadrados. Estabeleceu-se que o conjunto de Lavras tem 7 *clusters* e o conjunto de São João del Rei tem 5 *clusters*.

As médias de cada variável por *cluster*, com os valores originais e não normalizados, podem ser observadas na Tabela 20.

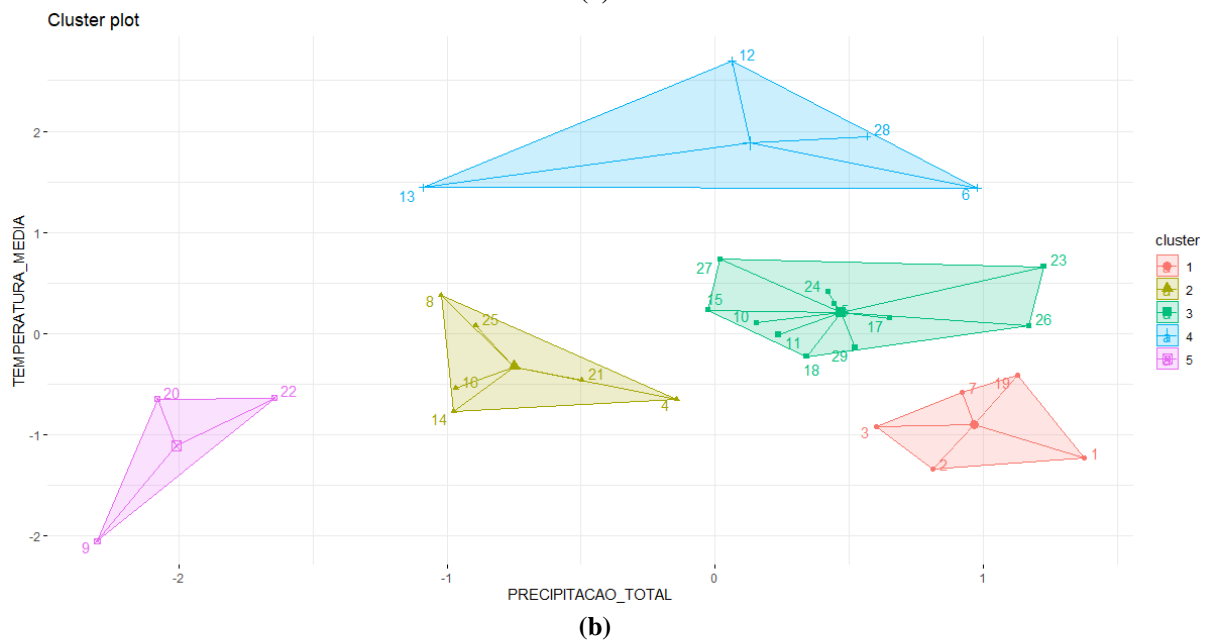
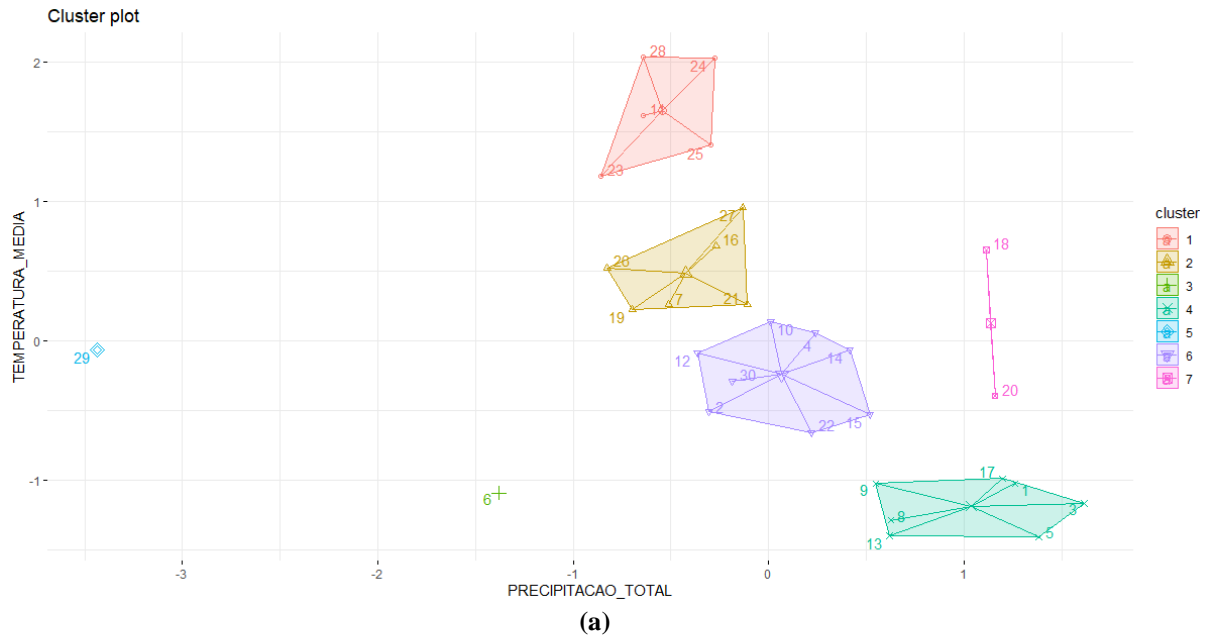
Tabela 20 – Médias de cada variável por cluster com os valores originais.

Conjunto de dados	Cluster	Precipitação Total (mm)	Temperatura Média (°C)
Lavras (1991-2021)	1	1173,400	21,22
	2	1205,983	20,78
	3	946,200	20,17
	4	1602,171	20,14
	5	388,300	20,57
	6	1339,575	20,50
	7	1629,600	20,64
São João del Rei (1991-2021)	1	1726,4200	19,06
	2	1095,5333	19,50
	3	1543,3455	19,91
	4	1418,4000	21,20
	5	632,5667	18,89

Fonte: Da autora.

Os gráficos de *clusters* foram gerados para os dois conjuntos, conforme a Figura 41. Os indivíduos que compõem os *clusters* correspondem aos anos dos dados, sendo estes descritos na Tabela 21.

Figura 41 – Gráficos de clusters.



(a) Lavras, (b) São João del Rei. Fonte: Da autora.

Tabela 21 – Clusters e respectivos indivíduos.

Conjunto de dados	Cluster	Tamanho	Indivíduos
Lavras (1991-2021)	1	5	11 (2002), 23 (2014), 24 (2015), 25 (2016), 28 (2019)
	2	6	7 (1998), 16 (2007), 19 (2010), 21 (2012), 26 (2017), 27 (2018)
	3	1	6 (1997)
	4	7	1 (1991), 3 (1994), 5 (1996), 8 (1999), 9 (2000), 13 (2004), 17 (2008)
	5	1	29 (2020)
	6	8	2 (1993), 4 (1995), 10 (2001), 12 (2003), 14 (2005), 15 (2006), 22 (2013), 30 (2021)
	7	2	18 (2008), 20 (2011)
São João del Rei (1991-2021)	1	5	1 (1991), 2 (1992), 3 (1993), 7 (1997), 19 (2011)
	2	6	4 (1994), 8 (1998), 14 (2005), 16 (2008), 21 (2013), 25 (2017)
	3	11	5 (1995), 10 (2000), 11 (2001), 15 (2006), 17 (2009), 18 (2010), 23 (2015), 24 (2016), 26 (2018), 27 (2019), 29 (2021)
	4	4	6 (1996), 12 (2002), 13 (2003), 28 (2020)
	5	3	9 (1999), 20 (2012), 22 (2014)

Fonte: Da autora.

Não foi possível gerar elipses para os *clusters* que possuem apenas um ou dois indivíduos, como ocorre no conjunto de Lavras, nos grupos 3, 5 e 7. O grupo 3 é composto apenas pelo ano de 1997, que apresenta o segundo menor valor de precipitação total do conjunto. O grupo 5 consiste no ano de 2020, que mostrou a menor precipitação total de Lavras. O grupo 7 reuniu os anos de 2008 e 2011, que correspondem ao quinto e ao sexto maiores acumulados de chuva do período analisado. O grupo 1 englobou os anos nos quais se registrou as cinco maiores médias de temperatura do conjunto. As menores médias, por sua vez, estão reunidas no grupo 4. Os grupos 2 e 6 mostram anos que se mantiveram na média tanto de precipitação total quanto de temperatura média.

Em São João del Rei, o menor *cluster* é o 5, composto por três anos (1999, 2012 e 2014). Os três apresentaram os menores valores de precipitação total do conjunto, sendo: 524,1 mm, 606,6 mm e 767 mm, respectivamente. Em contraste com esse grupo, tem-se os grupos 1 – que inclui 1991, com a máxima de precipitação total, e 2011, quarto maior valor de precipitação total – e 3 – que inclui o segundo e o terceiro maiores acumulados de chuva, os anos de 2015 e 2018. O grupo 1 também agregou as menores médias de temperatura do conjunto, com exceção de 1999, sendo os anos de 1992, 1991 e 1993. Os dois anos de maior temperatura média, 2002 e 2020, estão agrupados no *cluster* 4. O grupo 2 reuniu anos com temperaturas médias variadas e precipitação total tendendo de valores medianos a próximos das mínimas.

7.2.7 Considerações sobre os tratamentos estatísticos

A aplicação de técnicas estatísticas de análise não paramétrica por meio da análise da componente principal (PCA) e a análise de agrupamentos (*cluster*) permite obter informações de grandes volumes de dados, especificamente sobre as correlações entre os dados climáticos de 30 anos das estações meteorológicas estudadas. Dessa forma, foi possível identificar os indivíduos de maior contribuição por meio do PCA e visualizar os agrupamentos de indivíduos com maiores similaridades a partir do *cluster*. Além disso, os dados climatológicos foram utilizados na modelagem dos processos erosivos no InVEST, para compor a variável de erosividade da chuva na bacia do Córrego do Palmital.

Os indivíduos de maior contribuição foram geralmente os que apresentaram valores mais distantes das médias de precipitação total e temperatura média para as estações meteorológicas.

De acordo com INMET (2017), períodos consecutivos de ausência ou poucas chuvas são denominados “veranicos”. Quando ocorrem antes do período usual (entre janeiro e fevereiro), que acompanha o início da diminuição da temperatura média, podem culminar na diminuição da qualidade hídrica dos solos, pois a temperatura média ainda está alta (entre dezembro e janeiro) e a água contida no solo é evaporada devido às ondas de calor.

Em contrapartida, quando os valores dos acumulados de precipitação são muito altos e, especialmente, quando ocorrem eventos extremos de chuva com precipitação diária ultrapassando as médias para o mês concernente, há favorecimento do escoamento superficial. Isto é, chuvas persistentes que ocorrem consecutivamente colaboram para a saturação gradual do solo. E chuvas intensas e concentradas em períodos curtos podem atuar como deflagradores do processo erosivo, tendo em vista que a saturação da superfície do solo contribui para a ocorrência do escoamento superficial e grandes volumes de chuva implicam em maior velocidade e, portanto, maior potencial erosivo da chuva.

Considerando que a bacia do Córrego do Palmital apresenta condicionantes favoráveis à erosão, a ocorrência de eventos de chuvas persistentes e intensas é crítica para a deflagração e desenvolvimento de processos erosivos.

7.3 Modelagem dos Processos Erosivos - InVEST

7.3.1 Cenário Atual

Os resultados para o cenário atual, elaborados com base nas imagens de satélite de 2019, são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário Atual – Bacia do Córrego do Palmital.

Classe	Área (ha)	Erosão média total (t/ano)	Erosão média (t/ha.ano)	Exportação de sedimentos (t/ano)	Retenção de sedimentos (t/ano)	Deposição de sedimentos (t/ano)
Área urbana, edificação, via pavimentada	4,52	37,84	8,37	0,93	10.490,74	36,91
Estrada de terra	99,20	103,24	1,04	2,04	10.489,63	101,20
Voçoroca	383,70	5.117,03	13,34	532,98	9.958,69	4.584,06
Solo exposto	221,00	2.407,10	10,89	162,89	10.328,78	2.244,21
Campo	311,97	41,61	0,13	0,96	10.490,71	40,65
Cafezal	267,84	245,84	0,92	7,49	10.484,18	238,35
Floresta plantada	3,46	0,50	0,14	0,0031	10.491,67	0,49
Agricultura temporária	1.195,45	3.116,27	2,61	142,21	10.349,46	2.974,06
Pastagem	2.297,54	5.052,51	2,20	223,04	10.268,63	4.829,43
Floresta	1.037,32	4,92	0,0047	0,06	10.491,61	4,87
Água	27,33	0	0	0	0	0
TOTAL	5.866,52	16.126,86	2,75	1.449,54	9.042,13	14.677,29

Fonte: Da autora.

Os menores valores de erosão média são para a floresta, campo e floresta plantada, que correspondem a 17,73%, 5,33% e 0,06% da área de estudo, respectivamente. Isto é justificado pois essas coberturas de solo são menos favoráveis ao desenvolvimento de erosão, visto que oferecem maior proteção ao solo à ação da água da chuva. Assim, os valores de fator C destas classes são mais baixos, o que implica em valores de perda de solo também mais baixos.

Os maiores valores de erosão média, por sua vez, são associados às voçorocas (6,56% da bacia) e solo exposto (3,78% da bacia). Estas coberturas são as que possuem fator C igual a 1, onde se supõe maior exposição do solo ao impacto das gotas de chuva e mobilização de partículas pelo escoamento superficial.

Os principais usos presentes na bacia mostram erosão média de 2,20 t/ha.ano (pastagem, correspondente a 39,28% da bacia) e 2,61 t/ha.ano (agricultura temporária, 20,44% da bacia). A pastagem geralmente ocorre em áreas cujo solo é o cambissolo, mais erosivo. O manejo inadequado propicia exposição deste solo à ação da chuva, bem como o pisoteamento do gado proporciona a compactação da superfície do solo, favorecendo o escoamento superficial em

detrimento da infiltração da água. A agricultura temporária nesta bacia é composta essencialmente por cultura de milho e soja, que são culturas anuais. Assim, o fator C da agricultura temporária é maior do que seria se a agricultura fosse permanente (com plantação de mudas, por exemplo) e, portanto, o potencial erosivo é maior, ainda mais se não são aplicadas técnicas conservacionistas.

Os usos que implicam em maior exportação de sedimentos na bacia são: voçorocas (532,98 t/ano), pastagem (223,04 t/ano), solo exposto (162,89 t/ano) e agricultura temporária (142,21 t/ano).

A retenção de sedimentos varia, no geral, entre 10.268,63 e 10.491,67 t/ano. As menores retenções são das áreas de voçoroca (9.958,69 t/ano) e solo exposto (10.328,78 t/ano). Os usos e coberturas relacionados aos maiores valores de deposição de sedimentos são a pastagem (4.829,43 t/ano) e voçorocas (4.584,06 t/ano). Entretanto, destaca-se que as voçorocas mobilizam mais sedimentos do que os acumulam, pois as partículas dos materiais geológicos que as compõem são retiradas do local, e o *software* InVEST não é otimizado para a quantificação deste parâmetro especificamente para voçorocas.

A erosão média, ou perda de solo, da bacia do Córrego do Palmital é de 16.126,86 t/ano (2,75 t/ha.ano), a exportação de sedimentos é de 1.449,54 t/ano (ou 0,25 t/ha.ano), a retenção de sedimentos é de 9.042,13 t/ano (1,54 t/ha.ano) e a deposição de sedimentos é de 14.677,3 t/ano (2,50 t/ha.ano).

A Tabela 23 apresenta valores de perda de solo e exportação de sedimentos de alguns estudos em outras áreas do Brasil, que também aplicaram o InVEST na modelagem.

Tabela 23 – Comparativos de valores de perda de solo e exportação de sedimentos de outros estudos.

Trabalho	Área de estudo	Área	Perda de solo	Exportação de sedimentos
Conceição (2014)	Bacia do Passaúna (RJ)	15.100 ha	17,46 t/ha.ano	2,01 t/ha.ano
Azevedo (2017)	Bacia do ribeirão Pipiripau (DF/GO)	23.527 ha	-	0,008 a 0,236 t/ha.ano
Guglielmeli (2017)	APA municipal do rio Uberaba (MG)	52.000 ha	-	50,38 t/ha.ano
Rodrigues et al. (2021)	Bacia do rio Iquiri (Ituxi) (AC)	24.612,05 ha	-	2,71 t/ha.ano
Soares (2022)*	Bacia do Córrego do Palmital	5.866,62 ha	2,75 t/ha.ano	0,25 t/ha.ano

- Sem informação. *O presente estudo.

Comparando os valores encontrados para estes estudos e o que se obteve na presente pesquisa, os valores de perda do solo e exportação de sedimentos da bacia do Córrego do

Palmital são geralmente menores, com exceção da bacia do ribeirão Pipiripau, que mostrou máxima de exportação de sedimentos próxima ao valor encontrado para a bacia do Córrego do Palmital. As principais classes de uso e cobertura do solo nas áreas das bacias e APA são de pastagem, agricultura e vegetação natural. Ressalta-se que estes resultados dependem das diferenças nas características de topografia, erosividade, erodibilidade e uso e cobertura do solo de cada área de estudo.

7.3.2 Cenário Hipotético 1

O Cenário Hipotético 1, ou Cenário 1, considera que foram aplicadas técnicas conservacionistas nos usos de cafezal e agricultura temporária (milho e soja), mudando o fator P de 1,0 para 0,5. Além disso, onde era pastagem, houve substituição por agricultura temporária, alterando o fator C dessa classe. Esta simulação objetivou comparar principalmente os resultados de erosão média e exportação de sedimentos em relação ao cenário atual (2019), que não considerou técnicas conservacionistas e tem maior área correspondente a pastagem, que tem a segunda maior perda de solos da bacia – abaixo apenas de áreas com voçorocas.

Os resultados para o Cenário 1 são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 1 na bacia do Córrego do Palmital.

Classe	Área (ha)	Erosão média total (t/ano)	Erosão média (t/ha.ano)	Exportação de sedimentos (t/ano)	Retenção de sedimentos (t/ano)	Deposição de sedimentos (t/ano)
Área urbana, edificação, via pavimentada	4,52	37,84	8,37	0,93	10.490,74	36,91
Estrada de terra	99,20	103,24	1,04	2,04	10.489,63	101,20
Voçoroca	383,70	5.117,03	13,34	532,98	9.958,69	4.584,06
Solo exposto	221,00	2.407,10	10,89	162,89	10.328,78	2.244,21
Campo	311,97	41,61	0,13	0,96	10.490,71	40,65
Cafezal	267,84	122,92	0,46	3,75	10.487,93	119,17
Floresta plantada	3,46	0,50	0,14	0,0031	10.491,67	0,49
Agricultura temporária	1.195,45	1.558,13	1,30	71,10	10.420,57	1.487,03
Pastagem*	2.297,54	3.663,07	1,59	177,94	10.313,73	3.485,10
Floresta	1.037,32	4,92	0,0047	0,06	10.491,61	4,87
Água	27,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	5.866,52	13.056,37	2,23	1.300,59	9.191,08	11.755,76

*Anteriormente pastagem, foi transformada em agricultura temporária. Fonte: Da autora.

Os maiores valores de erosão média continuam sendo das voçorocas (13,34 t/ha.ano) e solo exposto (10,89 t/ha.ano), seguidos pela agricultura temporária, correspondente à soma da

agricultura temporária (1,30 t/ha.ano) e antiga pastagem (1,59 t/ha.ano), neste cenário. Estes valores são justificados pela exposição do solo à ação da água da chuva e escoamento superficial nas classes de voçorocas, solo exposto e agricultura temporária (de culturas anuais). A perda de solo na área que era pastagem e foi transformada em agricultura temporária com plantio em curvas de nível foi reduzida de 2,20 t/ha.ano para 1,59 t/ha.ano. Com a aplicação de técnicas conservacionistas, a perda de solo dos cafezais foi reduzida de 0,92 t/ha.ano para 0,46 t/ha.ano, e das áreas de agricultura temporária, de 2,61 t/ha.ano para 1,30 t/ha.ano.

Apesar da aplicação de técnicas conservacionistas (plantio em curvas de nível) e mudança da pastagem para agricultura temporária, a área que era pastagem e se tornou cultura de milho e soja continua sendo a maior exportadora de sedimentos – com exceção das voçorocas, que mostraram 532,98 t/ano –, uma vez que a área desta classe é a maior da bacia, sendo correspondente a 2.297,54 ha. Porém, a substituição do uso provocou redução de 223,04 t/ano (0,097 t/ha.ano) para 177,94 t/ano (0,077 t/ha.ano). A exportação de sedimentos também foi reduzida ao considerar plantio em curvas de nível, sendo de 7,49 t/ano (0,028 t/ha.ano) para 3,75 t/ano (0,014 t/ha.ano), em comparação com o cenário atual.

Em seguida, tem-se o solo exposto (162,89 t/ano) e a agricultura temporária (71,10 t/ano) como os maiores valores de exportação de sedimentos.

Neste cenário, a erosão média é de 2,23 t/ha.ano, a exportação de sedimentos é de 1.300,59 t/ano (0,22 t/ha.ano), a retenção de sedimentos é de 9.191,08 t/ano e a deposição é de 11.755,76 t/ano. Comparando com os valores encontrados para o cenário atual, houve redução de cerca de 20%, 10% e 20% na erosão média, exportação e deposição de sedimentos, respectivamente. A retenção de sedimentos teve aumento de 2%. Portanto, obteve-se resultados efetivos com a mudança do uso do solo (pastagem para agricultura temporária) e técnicas conservacionistas nas áreas de cultivo.

7.3.3 Cenário Hipotético 2

O Cenário Hipotético 2, ou Cenário 2, tem seus resultados apresentados na Tabela 25. Este considerou que as áreas de pastagens (maiores áreas da bacia e um dos usos mais associados com a perda do solo) foram substituídas por floresta plantada (menor potencial erosivo). Não foram modificados os valores de fator P, referentes às técnicas conservacionistas, em relação ao Cenário Atual, para avaliar apenas esta mudança.

Tabela 25 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 2 na bacia do Córrego do Palmital.

Classe	Área (ha)	Erosão média total (t/ano)	Erosão média (t/ha.ano)	Exportação de sedimentos (t/ano)	Retenção de sedimentos (t/ano)	Deposição de sedimentos (t/ano)
Área urbana, edificação, via pavimentada	4,52	37,84	8,37	0,93	10.490,74	36,91
Estrada de terra	99,20	103,24	1,04	2,04	10.489,63	101,20
Voçoroca	383,70	5.117,03	13,34	532,98	9.958,69	4.584,06
Solo exposto	221,00	2.407,10	10,89	162,89	10.328,78	2.244,21
Campo	311,97	41,61	0,13	0,96	10.490,71	40,65
Cafezal	267,84	245,84	0,92	7,49	10.484,18	238,35
Floresta plantada	3,46	0,50	0,14	0,0031	10.491,67	0,49
Agricultura temporária	1.195,45	3.116,27	2,61	142,21	10.349,46	2.974,06
Pastagem*	2.297,54	202,10	0,09	3,73	10.487,94	198,37
Floresta	1.037,32	4,92	0,0047	0,06	10.491,61	4,87
Água	27,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	5.866,52	11.276,45	1,92	1.046,69	9.444,98	10.229,77

*Anteriormente pastagem, foi transformada em floresta plantada. Fonte: Da autora.

Os maiores valores de erosão média na bacia são nas áreas de voçorocas (13,34 t/ha.ano), solo exposto (10,89 t/ha.ano) e agricultura temporária (2,61 t/ha.ano). Quanto à exportação de sedimentos, destacam-se as voçorocas (532,98 t/ano), agricultura temporária (142,21 t/ano) e solo exposto (162,89 t/ano).

Ao substituir a pastagem por área de reflorestamento, tanto a erosão média quanto a exportação de sedimentos diminuiriam substancialmente, de 2,20 t/ha.ano e 223,04 t/ano para 0,09 t/ha.ano e 3,73 t/ano, respectivamente. Assim, ambos são menores que os valores encontrados para os cafezais (erosão média de 0,92 t/ha.ano e exportação de sedimentos de 7,49 t/ano).

Neste cenário, a erosão média é de 1,92 t/ha.ano, a exportação de sedimentos é de 1.046,69 t/ano, a retenção de sedimentos é de 9.444,98 t/ano e a deposição de sedimentos é de 10.229,77 t/ano. Em relação ao cenário atual, houve diminuição de aproximadamente 30% na erosão média, exportação e deposição de sedimentos. A retenção de sedimentos aumentou 4%. Dentre os três cenários hipotéticos, o Cenário 2 apresentou a maior redução da erosão média e deposição de sedimentos.

As pastagens podem induzir processos erosivos, pois geralmente estão associadas com o manejo inadequado, com sobrepastoreio, e degradação do solo por modificação nas propriedades do solo, perda de nutrientes e matéria orgânica (ANTONELI et al., 2018). Na bacia do Córrego do Palmital, a situação ainda é agravada pois muitas das áreas de pastagem

são em locais cujo solo é o Cambissolo, um solo de maior vulnerabilidade à erosão. Assim, há necessidade do controle das pastagens para reduzir os impactos deste uso na área. O reflorestamento das áreas de pastagem modificaria substancialmente a dinâmica do processo erosivo na bacia, visto que reduziria a perda de solo e a deposição de sedimentos, associada com o assoreamento de corpos hídricos.

7.3.4 Cenário Hipotético 3

O Cenário Hipotético 3, ou Cenário 3, considerou que todos os proprietários respeitam a área de proteção permanente de margens de rio, sendo 30 metros de cada margem, representada pela classe “mata ciliar”. Não foram modificados os valores de fator P e C das demais classes. Seus resultados são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados da modelagem no InVEST para o Cenário 3 na bacia do Córrego do Palmital.

Classe	Área (ha)	Erosão média total (t/ano)	Erosão média (t/ha.ano)	Exportação de sedimentos (t/ano)	Retenção de sedimentos (t/ano)	Deposição de sedimentos (t/ano)
Área urbana, edificação, via pavimentada	4,27	44,61	10,45	1,11	10.477,60	43,50
Estrada de terra	95,22	93,40	0,98	1,71	10.477,00	91,68
Voçoroca	307,12	4.055,51	13,20	190,18	10.288,53	3.865,34
Solo exposto	163,82	1.828,61	11,16	67,32	10.411,39	1.761,29
Campo	222,09	25,33	0,11	0,39	10.478,32	24,94
Cafezal	263,57	230,28	0,87	6,70	10.472,01	223,58
Floresta plantada	3,46	0,45	0,13	0,0027	10.478,71	0,45
Agricultura temporária	1.135,46	2.896,38	2,55	97,53	10.381,18	2.798,85
Pastagem	2.146,52	4.637,88	2,16	150,92	10.327,79	4.486,96
Floresta	823,74	3,80	0,0046	0,04	10.478,67	3,76
Água	27,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mata ciliar	745,66	6,85	0,0092	0,11	10.478,60	6,73
TOTAL	5.866,52	13.823,11	2,36	616,65	9.862,06	13.206,47

Fonte: Da autora.

Apesar das áreas de proteção permanente serem previstas por lei, os levantamentos de uso do solo na bacia em 2016 e 2019 não identificaram cumprimento da proteção de 30 metros de mata ciliar, havendo uso e cobertura de todas as classes levantadas, com exceção de floresta plantada, a 30 ou menos metros de distância dos cursos d’água.

As áreas de outras classes que foram sobrepostas pela APP foram desconsideradas, ou seja, foram substituídas pela mata ciliar – implicando em mudanças de área em diversas classes

de uso e cobertura do solo. As maiores mudanças de área foram do campo, solo exposto, floresta e voçorocas, com perdas de 40, 35, 26 e 25% de área para a mata ciliar, respectivamente. Dessa forma, a diminuição nas perdas de solo devido à mudança do uso do solo e proteção da mata ciliar é ainda maior pois incluiu áreas de solo exposto e voçorocas, grandes contribuintes para a erosão na bacia.

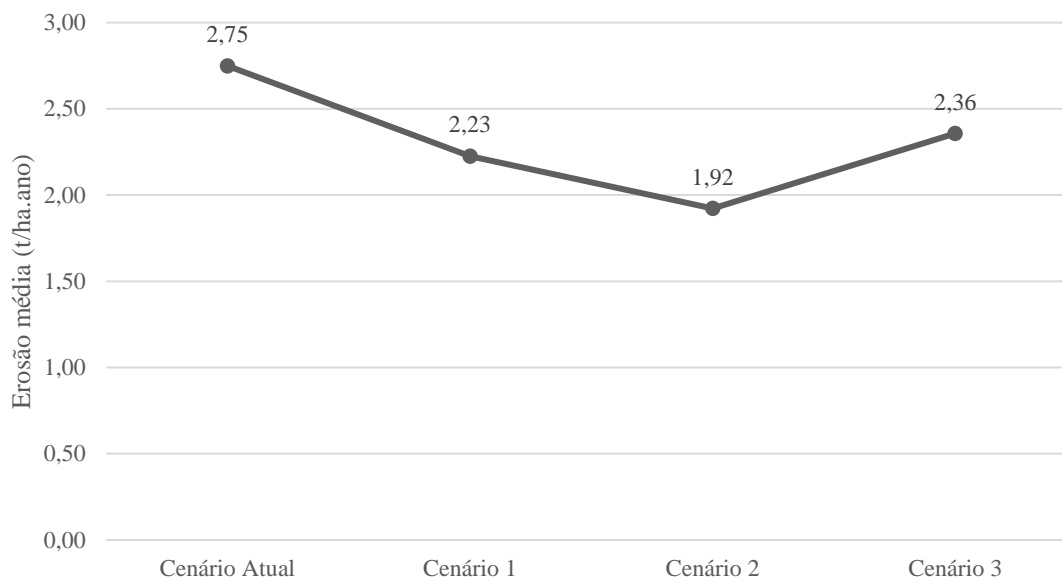
A mata ciliar consistiu na segunda menor erosão média (0,0092 t/ha.ano), depois apenas da floresta (0,0046 t/ha.ano). Sua exportação de sedimentos foi de 0,11 t/ano. A floresta plantada mostrou o menor valor, de 0,0027 t/ano, e a floresta, o segundo menor (0,04 t/ano). Os maiores valores de erosão média são das voçorocas (13,20 t/ha.ano), área urbana, edificação e vias pavimentadas (10,45 t/ha.ano) e solo exposto (11,16 t/ha.ano). Os maiores valores de exportação de sedimentos são de voçorocas (190,18 t/ano), pastagem (150,92 t/ano), agricultura temporária (97,53 t/ano) e solo exposto (67,32 t/ano).

Neste cenário, a erosão média é de 2,36 t/ha.ano, a exportação de solo é de 616,65 t/ano, a retenção de solo é de 9.862,06 t/ano e a deposição de solo é de 13.206,47 t/ano. A perda de solo é 14% menor em relação ao cenário atual. Também houve redução de 57% e 10% na exportação e deposição de solo, respectivamente. A retenção de sedimentos aumentou 9%. O Cenário 3 apresentou a maior redução de exportação de sedimentos das três simulações.

7.3.5 Considerações sobre o modelamento no InVEST

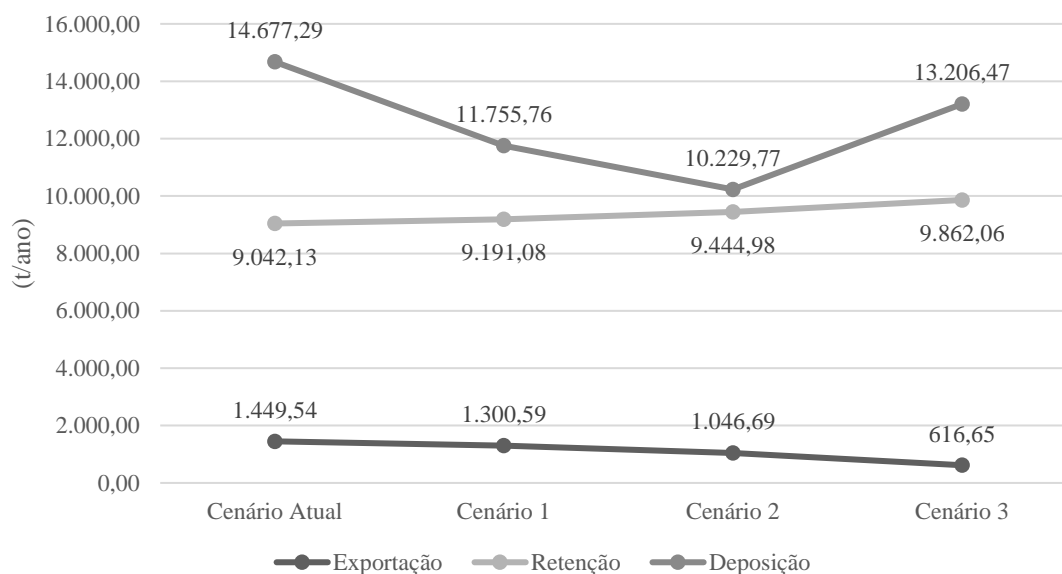
Os valores de erosão média por ano (t/ha.ano) dos quatro cenários são apresentados na Figura 42. Os valores referentes a exportação, retenção e deposição de sedimentos (t/ano) são apresentados na Figura 43.

Figura 42 – Erosão média nos cenários atual e hipotéticos 1, 2 e 3 da bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Figura 43 – Exportação, retenção e deposição de sedimentos nos cenários atual e hipotéticos 1, 2 e 3 da bacia do Córrego do Palmital.



Fonte: Da autora.

Conforme comentado anteriormente, houve diminuição nos valores de erosão média, exportação e deposição de sedimentos em todos os cenários simulados, em comparação com o cenário atual. A retenção de sedimentos apresentou aumento em relação ao valor referente ao uso e cobertura do solo em 2019.

Tendo em vista que a pastagem corresponde ao uso predominante na bacia (aproximadamente 39% da área), e é uma das classes de uso e cobertura do solo mais relacionada com as perdas de solo e exportação de sedimentos – devido ao manejo inadequado, compactação do solo e presença de cambissolos –, foram realizadas duas simulações de cenários que consideraram sua substituição por outro uso menos crítico.

Com a aplicação de técnicas conservacionistas e substituição da pastagem por agricultura temporária (cultura de milho e soja), no Cenário 1, houve redução da perda de solo (erosão média) de quase 20%, bem como redução de 10% na exportação de sedimentos e 20% na deposição de sedimentos. Assim, esse cenário teve o segundo melhor desempenho dentre os três realizados.

Com a substituição da pastagem por reflorestamento, no Cenário 2, a erosão média foi 30% menor, a exportação de sedimentos diminuiu 28% e a deposição de sedimentos foi reduzida em 30%. Este cenário teve as menores médias de erosão e deposição de sedimentos.

Com a preservação da APP da mata ciliar (30 metros de distância de cursos d'água), no Cenário 3, foi observada redução de 14% na erosão média, 57% na exportação de sedimentos e 10% na deposição de sedimentos. Este cenário teve o melhor desempenho na redução do aporte de sedimentos na bacia, principalmente porque a área vegetada incluiu áreas que anteriormente pertenciam às classes de solo exposto e voçorocas.

Azevedo (2017) simularam cenários de ações de passivo ambiental que incluíram a preservação da APP da mata ciliar e a aplicação de boas práticas agrícolas em 50 e 100% das áreas de pastagem e agricultura. Foi identificada redução de até 44% do aporte de sedimentos na bacia de estudo. O cumprimento da preservação da APP também foi simulado por Guglielmi (2017), que obteve redução de 48% na exportação de sedimentos. Estas reduções são compatíveis com o observado nos cenários 1 e 3 desta pesquisa, que indicaram diminuição da exportação de sedimentos de 10 e 57%, respectivamente.

O estudo de Saad et al. (2021) considerou aumento de apenas 3% nas áreas de floresta e adoção de práticas conservacionistas nas áreas cultivadas, o que implicou em redução de 0,9 a 2,5% na perda do solo. A exportação de sedimentos também foi reduzida em 4 a 13,3%. Considerando que o Cenário 2 representou aumento de mais de 220% da área de floresta, é razoável que se obtenha redução de 30% na erosão média e 28% na exportação de sedimentos.

Os três cenários simulados foram efetivos na redução das médias de erosão, exportação e deposição de sedimentos na bacia do Córrego do Palmital, indicando que medidas como a mudança no uso e cobertura do solo para classes de uso menos degradantes, aplicação de boas práticas por meio de técnicas conservacionistas, e a preservação da mata ciliar, são apropriadas

para o objetivo de diminuir a perda de solo e as condições favoráveis para o desenvolvimento de processos erosivo na região.

A combinação dessas alterações pode fornecer resultados melhores, de modo a manter a qualidade das áreas produtivas, indo de acordo com a afirmação de Lal (2019) de que pode ser necessário “sacrificar” áreas de produção agrícola em curto prazo para reverter a tendência de degradação, pois a sustentabilidade de longo prazo dos agroecossistemas têm prioridade mais alta.

8 CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, foi possível concluir que o uso do anaglifo no mapeamento das voçorocas utilizando imagens de satélite do *Google Earth PRO* proporcionou maior precisão em relação às formas, tamanhos e delimitação das voçorocas.

A bacia do Córrego do Palmital possui 5.866 ha de área total. Em levantamentos anteriores, foram identificadas 78 voçorocas na bacia, que somaram área de 287,18 ha para o ano de 2016. O presente estudo delimitou 63 feições erosivas, com área total de 397,93 ha, para o mesmo ano. Assim, a análise com anaglifo possibilitou melhor entendimento da delimitação das voçorocas. Na realidade, algumas destas feições estavam conectadas com outras vizinhas, sendo uma única voçoroca e não voçorocas distintas, o que explica a diminuição no número de voçorocas delimitadas na bacia em 2016, com e sem o emprego de anaglifo.

No mapeamento realizado com anaglifos elaborados a partir de imagens de 2019, foi possível identificar 65 voçorocas, cuja área total é de 404,48 ha. Com este levantamento, foi observado aumento de 6,55 ha, ou 1,6%, em relação às feições levantadas em 2016 também com o uso de anaglifos. Isto indica que o processo erosivo ainda está ativo e continua se desenvolvendo na região. Dessa forma, conclui-se também a importância do estudo espaço-temporal no acompanhamento da degradação por processos erosivos na bacia de estudo.

Quanto ao uso do solo, na imagem de satélite de 2019, observou-se aumento nas áreas de cultura de milho e soja, cuja produção passou a ocupar algumas áreas anteriormente utilizadas para pastagem. A lavoura temporária, que consiste na cultura anual de milho e soja, correspondeu a 20,5% dos usos da bacia. A pastagem continua sendo o uso predominante na bacia, correspondendo a 39% da área. Os cafezais corresponderam a 4,6% da área de estudo, e outros usos (áreas de várzea, áreas vegetadas, solo exposto, infraestrutura, água e áreas não utilizadas comercialmente) totalizaram 35,4% da bacia.

Quanto à Análise da Componente Principal (PCA), foi possível observar que as variáveis de precipitação total e temperatura média não são correlacionáveis, e que foram geradas duas dimensões.

A Análise de *Cluster* foi realizada utilizando os dados anuais, levando em consideração os resultados do PCA, que indicaram melhor facilidade de manusear os dados anuais. Em Lavras, a relação de menor similaridade foi entre 1991, 1993, 1996, 2008 e 2009 em relação a 2020. Em São João del Rei, as menores correlações foram entre 1996, 2002, 2015 e 2020 em relação a 1999. Os anos destacados, em sua maioria, mostraram-se como os anos nos quais houve a maior medida de precipitação total e/ou temperatura média dos conjuntos de dados. Ou

seja, são os anos que se mostraram menos semelhantes em relação às médias esperadas para o período analisado.

Estas discriminações ajudaram a destacar anos de eventos extremos quanto à precipitação e temperatura. Os maiores acumulados de chuva, principalmente relacionados a eventos de chuvas intensas e persistentes (como os ocorridos em 2020 e 2021), são relacionados com a saturação do solo e aumento do escoamento superficial, que favorecem o processo erosivo.

A modelagem da erosão, realizada com o pacote SDR do InVEST, indicou erosão média total de 2,75 t/ha.ano no cenário atual (imagem de satélite de 2019) da bacia do Córrego do Palmital, sendo as maiores médias de erosão relacionadas às voçorocas e ao solo exposto. Estes apresentaram exportação de sedimentos de 532,98 e 162,89 t/ano, respectivamente. A exportação de sedimentos das pastagens foi de 223,04 t/ano, e a agricultura temporária foi responsável por 142,21 t/ano.

Foram realizadas simulações de três cenários hipotéticos. O Cenário 1 considerou substituição das áreas de pastagem por agricultura temporária e aplicação de técnicas conservacionistas nos cafezais e na agricultura temporária. O Cenário 2 considerou substituição das áreas de pastagens por áreas de reflorestamento (floresta plantada). E o Cenário 3 considerou que há preservação de 30 metros de distância dos cursos d'água (Área de Preservação Permanente – classificada como mata ciliar).

Ao comparar os resultados dos quatro cenários, tem-se que os maiores valores de erosão média, exportação e deposição de sedimentos são no cenário atual. Em seguida, tem-se o Cenário 3, que está em segundo lugar para erosão média e deposição de sedimentos, e mostrou maior valor de retenção de sedimentos e o menor de exportação. Isto porque, apesar do Cenário 3 considerar a mata ciliar como área de preservação, não há alteração nas demais classes de uso do solo que contribuem substancialmente na geração de sedimentos por erosão: voçorocas, solo exposto, pastagem e agricultura temporária.

O Cenário 1 apresentou valores menores de erosão média e deposição de sedimentos em relação ao cenário atual e ao Cenário 3. No que se refere à exportação de sedimentos, o Cenário 1 tem valor menor apenas que o cenário atual. O Cenário 2, por sua vez, mostrou a menor erosão média e deposição de sedimentos, e a segunda menor exportação de sedimentos. Estes resultados são coerentes, uma vez que a pastagem é o principal uso da bacia do Córrego do Palmital, sendo correspondente à maior porcentagem em área. Sendo esse uso substituído por florestas, que possuem risco a erosão muito menor, é natural que os indicativos de processos erosivos também diminuam.

A problemática dos processos erosivos na bacia do Córrego do Palmital é geralmente relacionada com o uso inadequado do solo, que colabora com a erosão principalmente em áreas onde o cambissolo está exposto, uma vez que este solo tem alta erodibilidade. A pastagem, principal uso na bacia, é uma das classes de uso e cobertura do solo que está relacionada com a perda do solo e, portanto, necessita de manejo adequado e/ou ser substituída por outras formas de uso menos favoráveis à erosão.

A substituição de pastagens por agricultura temporária (cultura de milho e soja) tem sido uma tendência observada entre 2016 e 2019, como resposta à alta no preço dos grãos e maior viabilidade econômica com a mudança de produção. Somada à adoção de práticas conservacionistas, que modificam a forma do plantio de forma a melhor conservar o solo, pode ser uma opção viável para a redução no aporte de sedimentos da bacia. Outras opções são a intensificação na fiscalização do cumprimento da preservação das áreas de várzea, previstas por lei, bem como a substituição da pastagem por áreas de reflorestamento.

Tendo em vista que o solo está relacionado com diversos serviços ecossistêmicos de provisão (alimentos, água e fibras), regulação (clima, água e resíduos), suporte (formação do solo e ciclos de nutrientes) e culturais, é necessário que sejam realizadas ações para evitar sua perda e manter seu equilíbrio. O estudo da área quanto às características dos condicionantes do meio físico, agentes deflagradores da erosão, uso e cobertura do solo, e levantamentos das feições erosivas são essenciais para possibilitar melhores decisões na gestão do solo, evitando o avanço das degradações e recuperando as áreas degradadas.

REFERÊNCIAS¹⁵

- ABERA, W.; TAMENE, L.; KASSAWMAR, T.; MULATU, K.; KASSA, H.; VERCHOT, L.; QUINTERO, M. Impacts of land use and land cover dynamics on ecosystem services in the Yayo coffee forest biosphere reserve, southwestern Ethiopia. **Ecosystem Services**, v. 50, 101338, 2021. DOI 10.1016/j.ecoser.2021.101338.
- ALBALADEJO, Juan; DÍAZ-PEREIRA, Elvira; DE VENTE, Joris. Eco-Holistic Soil Conservation to support Land Degradation Neutrality and the Sustainable Development Goals. **Catena**, v. 196, 104823, 2021. DOI 10.1016/j.catena.2020.104823.
- ALBUQUERQUE, João Carlos Valério de; TAVARES, Arthur Costa Falcão. Impactos ambientais de cava de mineração de calcário a partir de anaglifos e geoprocessamento. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 16, número suplementar, p. 43-47, 2018. DOI 10.28998/rca.v16i0.6645.
- ANESEYEE, A.B.; ELIAS, E.; SOROMESSA, T.; FEYISA, G.L. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. **Science of the Total Environment**, v. 728, 138776, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.138776.
- ANJINHO, Phelipe da Silva; BARBOSA, Mariana Abibi Guimarães Araujo; MAUAD, Frederico Fábio. Evaluation of InVEST's Water Ecosystem Service Models in a Brazilian Subtropical Basin. **Water**, v. 14, 1559, 2022. DOI 10.3390/w14101559.
- ANTONELI, V.; REBINSKI, E.A.; BEDNARZ, J.A.; RODRIGO-COMINO, J.; KEESSTRA, S.D.; CERDÀ, A.; FERNÁNDEZ, M.P. Soil Erosion Induced by the Introduction of New Pasture Species in a Faxinal Farm of Southern Brazil. **Geosciences**, v. 8, n. 5, 166, 2018. DOI 10.3390/geosciences8050166.
- ARABAMERI, A.; CERDA, A.; RODRIGO-COMINO, J.; PRADHAN, B.; SOHRABI, M.; BLASCHKE, T.; BUI, D.T. Proposing a Novel Predictive Technique for Gully Erosion Susceptibility Mapping in Arid and Semi-arid Regions (Iran). **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, 2577, 2019. DOI 10.3390/rs11212577.
- ARABAMERI, A.; REZAIE, F.; PAL, S. C.; CERDA, A.; SAHA, A.; CHAKRABORTTY, R.; LEE, S. Modelling of piping collapses and gully headcut landforms: Evaluating topographic variables from different types of DEM. **Geoscience Frontiers**, v. 12, 101230, 2021. DOI 10.1016/j.gsf.2021.101230.
- ARAÚJO, Alexandre Romeiro de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande (MG): base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2006. 345 p.
- ARAÚJO, Alexandre Romeiro de; OLIVEIRA, Juliana Mara de; PEREIRA, Polyana; CURI, Nilton; MARQUES, António Francisco S. M.; MARQUES, João José G. S. M. **Geomorfologia, solos e aptidão agrícola das terras da Bacia do Alto Rio Grande, Minas Gerais**. 1. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2018. 237 p.
- ARAÚJO, Alinne Jéssica Dantas de; BONGIOLO, Everton Marques; ÁVILA, Ciro Alexandre. The Southern São Francisco Craton puzzle: Insights from aerogeophysical and geological data.

¹⁵ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

Journal of South American Earth Sciences, v. 94, 102203, 2019. DOI 10.1016/j.jsames.2019.05.019.

AREFIN, Riad; MOHIR, Md. Mohirul Islam; ALAM, Jahangir. Watershed prioritization for soil and water conservation aspect using GIS and remote sensing: PCA-based approach at northern elevated tract Bangladesh. **Applied Water Science**, v. 10, 91, 2020. DOI 10.1007/s13201-020-1176-5.

ARRUDA, Karlla Emmanuelle Cunha. Mapeamento Geomorfológico da Folha Ouricuri - Pernambuco, Através da Utilização de *Softwares* de Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 5, p. 1046-1055, 2012. DOI 10.26848/rbgf.v5i5.232819.

ARUNYAWAT, S.; SHRESTHA, R.P. Assessing Land Use Change and Its Impact on Ecosystem Services in Northern Thailand. **Sustainability**, v. 8, 768, 2016. DOI 10.3390/su8080768.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2018. 68 p.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Capítulo 11: Aplicação de SIG em Geotecnia Ambiental. *In*: ZUQUETTE, Lazaro Valentin. (org.) **Geotecnia Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ÁVILA, C.A.; TEIXEIRA, W.; CORDANI, U.G.; BARRUETO, H.R.; PEREIRA, R.M.; MARTINS, V.T.S.; DUNYI, L. The Glória quartz-monzodiorite: isotopic and chemical evidence of arc-related magmatism in the central part of the paleoproterozoic Mineiro belt, Minas Gerais State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 3, p. 543-556, 2006. ISBN: 0001-3765. DOI 10.1590/S0001-37652006000300013.

ÁVILA, Ciro Alexandre. **Geologia, petrografia e geocronologia de corpos plutônicos paleoproterozoicos da borda meridional do Cráton São Francisco, região de São João del Rei, Minas Gerais**. 2000. Tese (Doutorado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ÁVILA, Ciro Alexandre. **Geologia, Petrografia e Geoquímica das rochas plutônicas pré-cambrianas (Unidade Metadiorítica Ibitutinga e Unidade Metatrondhjemítica Caburu) intrusivas nas rochas do Greenstone Belt Barbacena, São João del Rei, Minas Gerais**. 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992. 260 p.

ÁVILA, Ciro Alexandre; BONGIOLO, Everton Marques; SEOANE, José Carlos Sícoli; VILELA, Francisco Teixeira; PINHEIRO, Marco Aurélio Piacentini; VASCONCELOS, Fabiana Franco de; CARDOSO, Carolina Dantas; SILVEIRA, Viktor Souto Louback; SILVA, Pamella Regina Santos da; SIMON, Maurício Bulhões; FAULSTICH, Fabiano Richard Leite; PIRES, Gustavo Luiz Campos; TEDESCHI, Mahyra Ferreira. **Projeto ARIM: Reavaliação das Sequências Metavulcanossedimentares a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero: Carta Geológica Folha Nazareno SF.23-X-C-I-2, escala 1:50.000**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2019b.

ÁVILA, Ciro Alexandre; BONGIOLO, Everton Marques; VASQUES, Fernando de Souza Gonçalves; SOUZA, Alexandre Nascimento de; SEOANE, José Carlos Sícoli; RÍTIŇŠ, Janis Ivars Valença; VILELA, Francisco Teixeira; PINHEIRO, Marco Aurélio Piacentini;

VASCONCELOS, Fabiana Franco de; CARDOSO, Carolina Dantas; SILVEIRA, Viktor Souto Louback; SILVA, Pamella Regina Santos da; SIMON, Maurício Bulhões; FAULSTICH, Fabiano Richard Leite; PIRES, Gustavo Luiz Campos; STOHLER, Rômulo de Campos; OLIVEIRA, Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares de; TEDESCHI, Mahyra Ferreira. **Projeto ARIM: Reavaliação das Sequências Metavulcanossedimentares a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero: Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2019a.

ÁVILA, Ciro Alexandre; CHERMAN, Angélica Freitas; VALENÇA, Joel Gomes. Metamorfismo paleoproterozóico do Cinturão Mineiro: considerações petrográficas a partir dos dioritos Brumado e Rio Grande. **Arquivos do Museu Nacional**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 3-4, p. 631-660, jul./dez. 2008. ISSN 0365-4508.

ÁVILA, Ciro Alexandre; TEIXEIRA, Wilson; BONGIOLO, Everton Marques; DUSSIN, Ivo Antônio; VIEIRA, Thayla Almeida Teixeira. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 243, p. 221-251, 2014. DOI 10.1016/j.precamres.2013.12.028.

ÁVILA, Ciro Alexandre; TEIXEIRA, Wilson; CORDANI, Umberto Giuseppe; MOURA, Candido Augusto Veloso; PEREIRA, Ronaldo Mello. Rhyacian (2.23-2.20 Ga) juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: Geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 464-482, 2010. DOI 10.1016/j.jsames.2009.07.009.

ÁVILA, Ciro Alexandre; TEIXEIRA, Wilson; VASQUES, F. de S. G.; DUSSIN, I. A.; MENDES, J. C. Geoquímica e idade U-Pb (LA-ICPMS) da crosta oceânica Riacciana do Cinturão Mineiro, borda meridional do Cráton São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: SBG, Núcleo São Paulo, 2012. Disponível em: <http://repositorio.usp.br/directbitstream/8c47706b-24f4-4343-a265-19685f424b51/2329382.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2021.

ÁVILA, Ciro Alexandre; VALENÇA, Joel Gomes; MOURA, Candido Augusto Veloso; PEREIRA, Ronaldo Mello; KLEIN, Victor de Carvalho. Geoquímica e idade do Tonalito/Trondhjemito Cassiterita, borda meridional do Cráton São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Arquivos do Museu Nacional**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 4, p. 267-284, out./dez. 2003. ISSN 0365-4508.

ÁVILA, Ciro Alexandre; VASQUES, Fernando de Souza Gonçalves; SOUZA, Alexandre Nascimento de; VILELA, Francisco Teixeira; PINHEIRO, Marco Aurélio Piacentini; STOHLER, Rômulo de Campos; OLIVEIRA, Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares de; TEDESCHI, Mahyra Ferreira. **Projeto ARIM: Reavaliação das Sequências Metavulcanossedimentares a Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero: Carta Geológica Folha São João del Rei SF.23-X-C-II-1, escala 1:50.000**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2019c.

AZEVEDO, Lícia Maria Nunes de. **Calibração, validação e aplicação do modelo InVEST para a estimativa de benefícios aos serviços ecossistêmicos na bacia do Ribeirão Pípiripau (DF/GO)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2017. 98 p.

BABBAR, D.; AREENDRAN, G.; SAHANA, M.; SARMA, K.; RAJ, K.; SIVADAS, A. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, 123333, 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123333.

BARBOSA, Caio C. de Araujo; ATKINSON, Peter M.; DEARING, John A. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. **Ecological Indicators**, v. 52, p. 430-443, 2015. DOI 10.1016/j.ecolind.2015.01.007.

BARBOSA, Natali da Silva. **Evolução Paleoproterozoica do Cinturão Mineiro: Geocronologia U-Pb, isótopos de Nd-Hf-Sr e geoquímica de rochas plutônicas**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2015. 229 p.

BARBOSA, Natali da Silva; TEIXEIRA, Wilson; ÁVILA, Ciro Alexandre; MONTECINOS, P.M.; BONGIOLO, Everton Marques. 2.17–2.10 Ga plutonic episodes in the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil: U-Pb ages, geochemical constraints and tectonics. **Precambrian Research**, v. 270, p. 204-225, 2015. DOI 10.1016/j.precamres.2015.09.010.

BARBOSA, Natali da Silva; TEIXEIRA, Wilson; ÁVILA, Ciro Alexandre; MONTECINOS, P.M.; BONGIOLO, Everton Marques; VASCONCELOS, Fabiana Franco de. U-Pb geochronology and coupled Hf-Nd-Sr isotopic-chemical constraints of the Cassiterita Orthogneiss (2.47 – 2.41-Ga) in the Mineiro belt, São Francisco craton: Geodynamic fingerprints beyond the Archean-Paleoproterozoic Transition. **Precambrian Research**, v. 326, p. 399-416, 2019. DOI 10.1016/j.precamres.2018.01.017.

BARUQUI, Alfredo Melhem; NAIME, Uebi Jorge; MOTTA, Paulo Emílio Ferreira da; CARVALHO FILHO, Amaury de. (org.) **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da Zona Campos das Vertentes – MG**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 96. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 326 p. ISSN 1678-0892.

BATISTA, P.V.G.; SILVA, M.L.N.; SILVA, B.P.C.; CURTI, N.; BUENO, I.T.; ACÉRBI JÚNIOR, F.W.; DAVIES, J.; QUINTON, J. Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin – Brazil. **Catena**, v. 157, p. 139-150, 2017. DOI 10.1016/j.catena.2017.05.025.

BENAHMED, Loucif; HOUICHI, Larbi. The effect of simple imputations based on four variants of PCA methods on the quantiles of annual rainfall data. **Environmental Monitoring Assessment**, v. 190, 569, 2018. DOI 10.1007/s10661-018-6913-y.

BERTONI, José. LOMBARDI NETO, Francisco. **Conservação do Solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURTI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49-59, 2009. DOI 10.1016/j.catena.2009.05.010.

BEZAK, N.; MIKOS, M.; BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; ANACHE, J.A.A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; BIDDOCCU, M.; CERDÀ, A.; CHALISE, D.; CHEN, S.; CHEN, W.; GIROLAMO, A.M.; GESSESSE, G.D.; DEUMLICH, D.; DIODATO, N.; EFTHIMIOU, N.; ERPUL, G.; FIENER, P.; FREPPAZ, M.; GENTILE, F.; GERICKE, A.; HAREGEWEYN, N.; HU, B.; JEANNEAU, A.; KAFFAS, K.; KIANI-HARCHEGANI, M.;

VILLUENDAS, I.L.; LI, C.; LOMBARDO, L.; LÓPEZ-VICENTE, M.; LUCAS-BORJA, M.E.; MAERKER, M.; MIAO, C.; MODUGNO, S.; MÖLLER, M.; NAIPAL, V.; NEARING, M.; OWUSU, S.; PANDAY, D.; PATAULT, E.; PATRICHE, C.V.; POGGIO, L.; PORTES, R.; QUIJANO, L.; RAHDARI, M.R.; RENIMA, M.; RICCI, G.F.; RODRIGO-COMINO, J.; SAIA, S.; SAMANI, A.N.; SCHILLACI, C.; SYRRIS, V.; KIM, H.S.; SPINOLA, D.N.; OLIVEIRA, P.R.; TENG, H.; THAPA, R.; VANTAS, K.; VIEIRA, D.; YANG, J.E.; YIN, S.; ZEMA, D.A.; ZHAO, G.; PANAGOS, P. Soil erosion modelling: A bibliometric analysis. **Environmental Research**, v. 197, 111087, 2021. DOI 10.1016/j.envres.2021.111087.

BLANCO, Humberto; LAL, Rattan. **Principles of Soil Conservation and Management**. 1. ed. Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8708-0.

BOARDMAN, John. The value of Google Earth™ for erosion mapping. **Catena**, v. 143, p. 123-127, 2016. DOI 10.1016/j.catena.2016.03.031.

BOITHIAS, Laurie; ACUÑA, Vicenç; VERGOÑÓS, Laura; ZIV, Guy; MARCÉ, Rafael; SABATER, Sergi. Assessment of the water supply:demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. **Science of the Total Environment**, v. 470-471, p. 567-577, 2014. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.10.003.

BONGIOLO, Everton Marques; ÁVILA, Ciro Alexandre; TEIXEIRA, Wilson; DUSSIN, Ivo Antônio; PASSAMANI, Fernanda M. Geologia, petrografia e geocronologia do ortognaisse monzogranítico Itutinga (MG) e seu contexto na evolução tectônica do cinturão Mineiro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 14., 2013, Rio de Janeiro, RJ. **Anais [...]**, Rio de Janeiro: SBGq, 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/0f7fbc50-0ac7-448a-be88-bfe14d724aa9/2996399.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2021.

BONO, J.A.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; EVANGELISTA, A.R.; CARVALHO, M.M.; SILVA, M.L.N. Cobertura vegetal e perdas de solo por erosão em diversos sistemas de melhoramento de pastagens nativas. **Pasturas tropicais**, v. 18, n. 2, p. 2-8, 1996.

BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; ANACHE, J.A.A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; BEZAK, N.; BIDDOCU, M.; CERDÀ, A.; CHALISE, D.; CHEN, S.; CHEN, W.; GIROLAMO, A.M.; GESSESSE, G.D.; DEUMLICH, D.; DIODATO, N.; EFTHIMIOU, N.; ERPUL, G.; FIENER, P.; FREPPAZ, M.; GENTILE, F.; GERICKE, A.; HEREGWEYN, N.; HU, B.; JEANNEAU, A.; KAFFAS, K.; KIANI-HARCHEGANI, M.; VILLUENDAS, I.L.; LI, C.; LOMBARDO, L.; LÓPEZ-VICENTE, M.; LUCAS-BORJA, M.E.; MÄRKER, M.; MATTHEWS, F.; MIAO, C.; MIKOS, M.; MODUGNO, S.; MÖLLER, M.; NAÍPAL, V.; NEARING, M.; OWUSU, S.; PANDAY, D.; PATAULT, E.; PATRICHE, C.V.; POGGIO, L.; PORTES, R.; QUIJANO, L.; RAHDARI, M.R.; RENIMA, M.; RICCI, G.F.; RODRIGO-COMINO, J.; SAIA, S.; SAMANI, A.N.; SCHILLACI, C.; SYRRIS, V.; KIM, H.S.; SPINOLA, D.N.; OLIVEIRA, P.T.; TENG, H.; THAPA, R.; VANTAS, K.; VIEIRA, D.; YANG, J.E.; YIN, S.; ZEMA, D.A.; ZHAO, G.; PANAGOS, P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. **Science of the Total Environment**, v. 780, 146494, 2021. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.146494.

BRASIL. Casa Civil. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.ºs 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 n.ºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n.º 2.166-67, de 24 de agosto de

2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 102, p. 1, 28 mai. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 26 mai. 2022.

BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. **Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1983. 780 p.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E.; CAMPOS, S. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 23-25, 2010.

CAMPOS, José Carlos Sales; CARNEIRO, Maurício Antônio. Neoproterozoic and Paleoproterozoic granitoids marginal to the Jeceaba-Bom Sucesso lineament (SE border of the southern São Francisco craton): Genesis and tectonic Evolution. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 26, p. 463-484, 2008. DOI 10.1016/j.jsames.2008.09.002.

CARDOSO, Carolina Dantas; ÁVILA, Ciro Alexandre; NEUMANN, Reiner; OLIVEIRA, Elson Paiva; VALERIANO, Claudio de Morisson; DUSSIN, Ivo Antônio. A Rhyacian continental arc during the evolution of the Mineiro belt, Brazil: Constraints from the Rio Grande and Brumado metadiorites. **Lithos**, v. 326-327, p. 246-264, 2019. DOI 10.1016/j.lithos.2018.12.025.

CASSARO, Raul. **Análise dos processos erosivos na bacia do Córrego do Forro – Município de Conceição da Barra de Minas (MG): Estudo dos condicionantes geológicos-geotécnicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. 159 p.

CASSARO, Raul. **Caracterização dos solos e proposta de recuperação na voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG)**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. 87 p.

CASTILLO, Carlos; TAGUAS, Encarnación V.; ZARCO-TEJADA, Pablo; JAMES, Mike R.; GÓMEZ, Jose A. The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, p. 2002-2015, 2014. DOI 10.1002/esp.3595.

CAVALIERI, Adriana. **Estimativa da adequação de uso das terras na quadrícula de Moji Mirim (SP) utilizando diferentes métodos**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1998. 112 p.

CENTENO, V. V.; SILVA JR, O. G. Utilização dos *softwares* Google Earth Pro e Zone Photo Studio para a obtenção de imagens 3D. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DOS GRUPOS PET, 11., (XI JICPET), Amazônia: a interatividade científica e o elo multiprofissional em prol da sustentabilidade, 2015, Belém, PA. **Anais [...]**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2015, p. 251-256.

CERRI, C.E.P. **Mapeamento das áreas de risco de erosão dos solos da bacia do Rio Piracicaba, utilizando geoprocessamento**. 1999. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1999. 89 p.

CHEN, Hung-Chi; CHEN, Walter W. High Resolution 3D Images of Natural Terrains and Landslides. DOI 10.1109/IS3C.2012.156. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER, CONSUMER AND CONTROL*, 2012. **Proceedings** [...]. Taichung, Taiwan: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. p. 598-601.

CHERMAN, A. F. **Geologia e petrografia de áreas dos *Greenstone Belt* Rio Capivari-Rio das Mortes e Itumirim-Tiradentes e rochas granitoides associadas, entre Nazareno e Lavras (Estado de Minas Gerais)**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

COELHO, Gilberto; MELLO, Carlos R. de; REZENDE, José L. P. de; SILVA, Antônio M. da; MATTOS, Roberto de. Evaluation of an indicator for water yield in a watershed of Alto Rio Grande Region, State of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 698-707, jul./ago., 2012. DOI 10.1590/S0100-69162012000400009.

CONCEIÇÃO, José Roberto da. **Metodologia para identificação de áreas prioritárias para redução da erosão hídrica em bacias de mananciais de abastecimento público do Paraná: Estudo de caso Bacia do Passaúna**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014. 94 p.

CONG, Wencui; SUN, Xiaoyin; GUO, Hongwei; SHAN, Ruifeng. Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. **Ecological Indicators**, v. 112, 106089, 2020. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.106089.

CONSTANZA, Robert; D'ARGE, Ralph; GROOT, Rudolf de; FARBER, Stephen; GRASSO, Monica; HANNON, Bruce; LIMBURG, Karin; NAEEM, Shahid; O'NEILL, Robert V.; PARUELO, Jose; RASKIN, Robert G.; SUTTON, Paul; VAN DEN BELT, Marjan. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253-260, 1997.

COSTA, Tony Carlos Dias da. **Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotécnico visando formulação de diretrizes para a cartografia no trópico úmido e aplicação na Região Metropolitana de Belém**, Escala 1:50.000. 2001. Tese (Doutorado em Ciências) – Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica e Área de Concentração em Geologia, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2001.

CUNHA, E.R.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P.T.S.; OLIVEIRA, N.S.; FALCÃO, K.S. Assessment of current and future land use/cover changes in soil erosion in the Rio da Prata basin (Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 818, 151811, 2022. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.151811.

DENG, Qingchun; QUIN, Fachao; ZHANG, Bin; WANG, Haipeng; LUO, Mingliang; SHU, Chengqiang; LIU, Hui; LIU, Gangcai. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. **Geomorphology**, v. 228, p. 703-713, 2015. DOI 10.1016/j.geomorph.2014.10.032.

DERAKHSHAN-BABAEI, F.; NOSRATI, K.; MIRGHAED, F.A.; EGLI, M. The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. **Catena**, v. 204, 105412, 2021. DOI 10.1016/j.catena.2021.105412.

DUARTE, Miqueias Lima. **Estimativa de perda do solo na bacia do rio Juma no município de Apuí/AM com uso da Equação Universal de Perda de Solo Revisada**. 2018. Dissertação

(Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, Rondônia, 2018. 121 p.

DUBE, H. B.; MUTEMA, M.; MUCHAONYERWA, P.; POESEN, J.; CHAPLOT, V. A global analysis of the morphology of linear erosion features. *Catena*, v. 190, 104542, 2020. DOI 10.1016/j.catena.2020.104542.

DUTRA, D. C. **Geologia e petrografia de rochas metavulcânicas e metaplutônica do embasamento das bacias meso-neoproterozóicas, a oeste de São João del Rei (Minas Gerais)**. 2001. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

EBERT, James I. Chapter 3: Photogrammetry, Photointerpretation, and Digital Imaging and Mapping in Environmental Forensics. In: MURPHY, Brian L.; MORRISON, Robert D. **Introduction to Environmental Forensics**. 3. ed. Elsevier, 2015. ISBN: 978-0-12-404696-2.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA ACADÊMICA. **Gis**. 2020. Disponível em: <http://www.academic-eb-britannica.com/levels/collegiate/article/GIS/396653>. Acesso em: 25 jul. 2020.

ENCICLOPÉDIA BRITÂNICA. **Louis Ducos du Hauron**. 2019. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Louis-Ducos-du-Hauron>. Acesso em: 25 jul. 2020.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; RAMOS, V.M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, n. 2, p. 73-85, 2006.

FERNANDES, M.M.; FERNANDES, M.R.M.; GARCIA, J.R.; MATRICARDI, E.A.T.; LIMA, A.H.S.; ARAÚJO FILHO, R.N.; GOMES FILHO, R.R.; PISCOYA, V.C.; PISCOYA, T.O.F.; CUNHA FILHO, M. Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco river basin, Brazil. *Environmental Challenges*, v. 5, 100247, 2021. DOI 10.1016/j.envc.2021.100247.

FERNANDES, M.M.; FERNANDES, M.R.M.; GARCIA, J.R.; MATRICARDI, E.A.T.; ALMEIDA, A.Q.; PINTO, A.S.; MENEZES, R.S.C.; SILVA, A.J.; LIMA, A.H.S. Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030. *Land Use Policy*, v. 99, 104795, 2020. DOI 10.1016/j.landusepol.2020.104795.

FERREIRA, D. B.; BARROSO, G. R.; DANTAS, M. S.; OLIVEIRA, K. L.; CHRISTOFARO, C.; OLIVEIRA, S. C. Pluviometric patterns in the São Francisco River basin in Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, e27, 2021. DOI 10.1590/2318-0331.262120210035.

FERREIRA, Rogério Resende Martins; FERREIRA, Vinicius Martins. Levantamento de Áreas Degradadas e seus Atributos Químicos na Bacia Alto Rio Grande, MG. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal, RN. **Anais [...]**. Natal: Centro de Convenções, 2015.

FERREIRA, Rogério Resende Martins; FERREIRA, Vinicius Martins; TAVARES FILHO, João; RALISCH, Ricardo. Levantamento de voçorocas na Bacia Alto Rio Grande, Minas Gerais. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO*, 8., 2008, São Paulo, SP. **Anais [...]**. São Paulo, 2008.

FERREIRA, Rogério Resende Martins; MACIEL, Bruno Vieira; SOUSA, LEMES, Anna Igenes de Sousa Braga Carneiro Lemes; MELO, Thadeu Rodrigues de; TAVARES FILHO, João. Qualidade de solo em áreas de cambissolo com diferentes manejos de pastagem. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, suplemento 2, p. 3069-3074, 2012. DOI 10.5433/1679-0359.2012v33Supl2p3069.

FERREIRA, V. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRA, A.H.; SILVA, M.A.; AVANZI, J.C. Influência antrópica e atributos de solo: inter-relações em ambientes de voçorocas na mesorregião Campo das Vertentes, MG. **Geografia**, Rio Claro, v. 36, n. 1, p. 209-219, 2011.

FERREIRA, Vinicius Martins. **Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2005.

FIORUCCI, Federica; ARDIZZONE, Francesca; ROSSI, Mauro; TORRI, Dino. The Use of Stereoscopic Satellite Images to Map Rills and Ephemeral Gullies. **Remote Sensing**, v. 7, 14151-14178. DOI 10.3390/rs71014151.

FORNASARI FILHO, N.; FARIA, M.S.C. Capítulo 11: Relevo e dinâmica superficial. *In: OLIVEIRA, A.M.S.; MONTICELI, J.J. (org.) Geologia de engenharia e ambiental, volume 2: métodos e técnicas*. 1. ed. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018.

FRUGIS, Gabriella Labate; CAMPOS NETO, Mario da Costa; LIMA, Rafael Bittencourt. Eastern Parapanema and southern São Francisco orogenic margins: Records of enduring Neoproterozoic oceanic convergence and collision in the southern Brasília Orogen. **Precambrian Research**, v. 308, p. 35-57, 2018. DOI 10.1016/j.precamres.2018.02.005.

FUJIHARA, Alberto Kazutoshi. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2002. 118 p.

GAROSI, Younes; SHEKLABADI, Mohsen; CONOSCENTI, Christian; POURGHASEMI, Hamid Reza; OOST, Kristof Van. Assessing the performance of GIS- based machine learning models with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion. **Science of the Total Environment**, v. 664, p. 1117-1132, 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.02.093.

GASHAW, T.; BANTIDER, A.; ZELEKE, G.; ALAMIREW, T.; JEMBERU, W.; WORQLUL, A.W.; DILE, Y.T.; BEWKET, W.; MESHESHA, D.T.; ADEM, A.A.; ADDISU, S. Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers. **Environmental Challenges**, v. 5, 100381, 2021. DOI 10.1016/j.envc.2021.100381.

GOLOSOV, Valentin; YERMOLAEV, Oleg; RYSIN, Ivan; VANMAERCKE, Matthias; MEDVEDEVA, Regina; ZAYTSEVA, Mariya. Mapping and spatial-temporal assessment of gully density in the Middle Volga region, Russia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, p. 2818-2834, 2018. DOI 10.1002/esp.4435.

GOMIDE, Plínio Henrique Oliveira. **Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2009. 89 p.

GUERRA, Antonio Jose Teixeira. Processos erosivos nas encostas. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia – uma atualização de bases e conceitos**. 15. ed. Editora Bertrand Brasil, 2017. p. 149-209.

MAFRA, Neusa Maria Costa. Erosão e planificação de uso do solo. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia – uma atualização de bases e conceitos**. 15. ed. Editora Bertrand Brasil, 2017. p. 149-209.

GUERRA, Antonio Jose Teixeira; JORGE, Maria do Carmo Oliveira. Degradação dos solos – Abordagens teóricas e estudos de casos, ao longo de 25 anos (1994-2019), no âmbito do Lagesolos. **Revista Humboldt** (Rio de Janeiro), v. 1, n. 2, e57375, 2021.

GUERRA, Antonio Jose Teixeira; SILVA, Antonio Soares da; BOTELHO, Rosangela Garrido Machado. **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 340 p.

GUGLIELMELI, Aline Claro de Oliveira. **Modelagem do controle da erosão como suporte à identificação de áreas provedoras de serviços ambientais: Estudo de caso na Área de Proteção Ambiental Municipal do Rio Uberaba – Uberaba, MG**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 84 p.

GUIMARÃES, Eduardo Henrique Andrade de. **Anfibolitos do Greenstone Belt Rio das Mortes e diques de metagabro-diabásio da região de Resende Costa, Estado de Minas Gerais**. 2010. Monografia (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. 100 p.

HAMEL, P.; GUERRY, A.D.; POLASKY, S.; HAN, B.; DOUGLASS, J.A.; HAMANN, M.; JANKE, B.; KUIPER, J.J.; LEVREL, H.; LIU, H.; LONSDORF, E.; MCDONALD, R.I.; NOOTENBOOM, C.; OUYANG, Z.; REMME, R.P.; SHARP, R.P.; TARDIEU, L.; VIGUIÉ, V.; XU, D.; ZHENG, H.; DAILY, G.C. Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. **Urban Sustainability**, v. 1, n. 25, 2021. DOI 10.1038/s42949-021-00027-9.

HAMEL, Perrine; CHAPLIN-KRAMER, Rebecca; SIM, Sarah; MUELLER, Carina. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. **Science of the Total Environment**, v. 524-525, p. 166-177, 2015. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.04.027.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M.; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Beca, 2012. 900 p.

HE, C.; ZHANG, D.; HUANG, Q.; ZHAO, Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. **Environmental Modelling & Software**, v. 75, p. 44-58, 2016. DOI 10.1016/j.envsoft.2015.09.015.

HEILBRON, Mônica; DUARTE, Beatriz Paschoal; VALERIANO, Cláudio de Morisson; SIMONETTI, Antonio; MACHADO, Nuno; NOGUEIRA, José Renato. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U–Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. **Precambrian Research**, v. 178, p. 136-148, 2010. DOI 10.1016/j.precamres.2010.02.002.

HIPÓLITO, Juliana; SOUSA, Bruna dos Santos Bandeira; GIANINNI, Tereza Cristina. **Uso do Programa InVEST para a avaliação e valoração de serviços ecossistêmicos em áreas protegidas pela Vale**. Belém: ITV, 2017. 48 p.

HONGYU, Kuang; SANDANIELO, Vera Lúcia Martins; OLIVEIRA JUNIOR, Gilmar Jorge de. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 1, n. 5, 2015. DOI 10.18607/ES20165053.

HORTA, I.D.M.F.; COSTA, A.M.; ARAÚJO, A.R.; MARQUES, J.J.; PEREIRA, J.A.A.; OLIVEIRA, L.T.; CARVALHO, L.M.T. Caracterização dos solos do município de Nazareno - MG. *In*: CONGRESSO DOS PÓS-GRADUANDOS DA UFLA, 14., 2005. **Anais [...]**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2005.

HORTA, I.M.F.; PEREIRA, J.A.A.; MARQUES, J.J.; CARVALHO, L.M.T. Levantamento de reconhecimento com apoio digital dos solos do município de Nazareno – MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, Edição Especial, p. 1940-1947, 2009.

HORTA, Ivana de Marco Fonseca. **Levantamento dos solos e ocupação da superfície do Município de Nazareno, MG**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006. 74 p.

IMWANGANA, F. M.; VANDECASTEELE, I.; TREFOIS, P.; OZER, P.; MOEYERSONS, J. The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (D.R. Congo). **Catena**, v. 125, p. 38-49, 2015. DOI 10.1016/j.catena.2014.09.019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Carta do Brasil. Folha SF-23-X-C-I-2 Nazareno**. IBGE, 1975a. 1 mapa, color. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Carta do Brasil. Folha SF-23-X-C-I-4 Itutinga**. IBGE, 1975b. 1 mapa, color. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha municipal**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 29 abr. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **As chuvas na Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo**. INMET, 2021. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_CHUVAS_BA_MG_ES-1_2021-12-28-174949_didl.pdf. Acesso em: 21 jun. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Fortes chuvas atingem os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais**. Brasília: INMET, 2020. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_T%C3%A9cnica_Chuvas_MG_ES_1.pdf. Acesso em: 21 jun. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Nota técnica 004/17 – Estação chuvosa em Minas Gerais**. Belo Horizonte: INMET, 2017. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/notas_tecnicas/2017/OUTUBRO/Nota_tecnica_CEDEC_04_17.pdf. Acesso em: 16 jun. 2021.

ITO, Helena Kiyoe. **Previsão de Erosão e Demarcação de Talhões para Plantação de Eucalipto na Microbacia do Rio Itupeva (São Paulo), com Base num Sistema de Informação Geo-Referenciada**. 1998. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Produção Agropecuária) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1998. 88 p.

IWASA, O.Y.; PRANDINI, F.L. Diagnóstico da origem e evolução de boçorocas: condição fundamental para a prevenção e correção. *In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSAO*, 1980. **Anais** [...]. Curitiba: ABGE, 1980. p. 5-34.

JAHREN, Hope. **Lab Girl: a jornada de uma cientista entre plantas e paixões**. 1. ed. Rio de Janeiro: Harper Collins Brasil, 2017. 320 p.

KANDRIKA, Sreenivas; DWIVEDI, R.S. Reclamative grouping of ravines using Cartosat-1 PAN stereo data. **J. Indian Soc. Remote Sens.**, v. 41, n. 3, p. 731-737, 2013. DOI 10.1007/s12524-012-0259-7.

KASSAMBARA, A. **Practical Guide to Cluster Analysis in R**. STHDA, 2017b.

KASSAMBARA, A. **Practical Guide to Principal Component Methods in R**. STHDA, 2017a.

KORNEJADY, A.; JIRANDEH, A. G.; ALIZADEH, H.; SARVARINEZHAD, A.; BAMERI, A.; LOMBARDO, L.; CONOSCENTI, C.; ALIZADEH, A.; KARIMI, M.; SAMADI, M.; SILAKHORI, E. Chapter 38: Doing more with less: A comparative assessment between morphometric indices and machine learning models for automated gully pattern extraction (A case study: Dashtiari region, Sistan and Baluchestan Province). DOI 10.1016/B978-0-323-89861-4.00007-5. *In: PURGHASEMI, H. R. Computers in Earth and Environmental Sciences*. 1. ed. Elsevier, p. 523-534, 2022.

KUSTER, Klaus; RIBEIRO, André; TROUW, Rudolph Allard Johannes; DUSSIN, Ivo; MARIMON, Rodrigo S. The Neoproterozoic Andrelândia group: Evolution from an intraplate continental margin to an early collisional basin south of the São Francisco craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 102, 102666, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102666>.

LAL, Rattan. Fate of Soil Carbon Transported by Erosional Processes. **Applied Sciences**, v. 12, 48, 2022. DOI 10.3390/app12010048.

LAL, Rattan. Managing soils for resolving the conflict between agriculture and nature: The hard talk. **Eur. J. Soil Sci.**, v.71, p. 1-9, 2019. DOI 10.1111/ejss.12857.

LAL, Rattan. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, p. 519-539, 2001. DOI 10.1002/ldr.472.

LAL, Rattan. Soil Erosion and Gaseous Emissions. **Applied Sciences**, v. 10, 2784, 2020. DOI 10.3390/app10082784.

LANA, X.; RODRÍGUEZ-SOLÀ, R.; MARTÍNEZ, M.D.; CASAS-CASTILLO, M.C.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Characterization of standardized heavy rainfall profiles for Barcelona city: clustering, rain amounts and intensity peaks. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 142, p. 255-268, 2020. DOI 10.1007/s00704-020-03315-z.

LEH, M.D.K.; MATLOCK, M.D.; CUMMINGS, E.C.; NALLEY, L.L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 165, p. 6-18, 2013. DOI 10.1016/j.agee.2012.12.001.

LI, S.; YANG, H.; LACAYO, M.; LIU, J.; LEI, G. Impacts of Land-Use and Land-Cover Changes on Water Yield: A Case Study in Jing-Jin-Ji, China. **Sustainability**, v. 10, 960, 2018. DOI 10.3390/su10040960.

LIU, K.; DING, H.; TANG, G.; SONG, C.; LIU, Y.; JIANG, L.; ZHAO, B.; GAO, Y.; MA, R. Large-scale mapping of gully-affected areas: An approach integrating Google Earth images and terrain skeleton information. **Geomorphology**, v. 314, p. 13-26, 2018. DOI 10.1016/j.geomorph.2018.04.011.

MA, S.; WANG, L.J.; ZHU, D.; ZHANG, J. Spatiotemporal changes in ecosystem services in the conservation priorities of the southern hill and mountain belt, China. **Ecological Indicators**, v. 122, 107225, 2021. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.107225.

MACHIWAL, Deepesh; KUMAR, Sanjay; MEENA, Hari M.; SANTRA, Priyabrata; SINGH, Ranjay K.; SINGH, Dharam V. Clustering of rainfall stations and distinguishing influential factors using PCA and HCA techniques over the western dry region of India. **Meteorological Applications**, v. 26, p. 300-311, 2019. DOI 10.1002/met.1763.

MARQUES, J.F.; LOMBARDI NETO, F.; BACELLAR, A.A.A. Erosão do Solo: Indicadores Físicos e Econômicos. In: MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. (Ed.). **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 281 p. Parte II, cap.3, p. 129-153.

MARQUES, S.M.; CAMPOS, F.S.; DAVID, J.; CABRAL, P. Modelling Sediment Retention Services and Soil Erosion Changes in Portugal: A Spatio-Temporal Approach. **International Journal of Geo-Information**, v. 10, 262, 2021. DOI 10.3390/ijgi10040262.

MCBRATNEY, Alex; FIELD, Damien J.; KOCH, Andrea. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203-213, 2014. DOI 10.1016/j.geoderma.2013.08.013.

MELLO, Carlos Rogério de; NORTON, Lloyd Darrel; CURI, Nilton; YANAGI, Silvia Nazaré Monteiro. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 1, p. 53-59, jan./fev., 2012. DOI 10.1590/S1413-70542012000100007.

MENCK, Paulo César Martins. **Avaliação econômica do controle da erosão na microbacia do Ribeirão Ipero, em Araçoiaba da Serra, Estado de São Paulo**. 1993. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1993. 181 p.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. 1. ed. Washington: Island Press, 2005. ISBN 1-59726-040-1.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2175-2182, 2011. DOI 10.1590/S0100-06832011000600032.

MOREIRA, M.; FONSECA, C.; VERGÍLIO, M.; CALADO, H.; GIL, A. Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal). **Land Use Policy**, v. 78, p. 637-649, 2018. DOI 10.1016/j.landusepol.2018.07.015.

MORGAN, R.P.C.; NEARING, M.A. (orgs.) **Handbook of Erosion Modelling**. 1. ed. Blackwell Publishing, 2007. 401 p.

MORGAN, Royston Philip Charles. **Soil Erosion and Conservation**. 3. ed. Blackwell Publishing, 2005. ISBN 1-4051-1781-8.

MOTA E SILVA, J. R.; RODRIGUES, J.A.M.; OLIVEIRA, L.F.C.; VIOLA, M. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 119-132, 2021. DOI 10.17765/2176-9168.2021v14n1e007659.

MOTA E SILVA, J.R.; RODRIGUES, J.A.M.; OLIVEIRA, L.F.C.; VIOLA, M. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 14, n. 1, p. 119-132, 2021. DOI 10.17765/2176-9168.2021v14n1e007659.

MOUSAZADEH, Fatemeh; SALLEH, Khairulmaini Osman. The influence of lithology and soil on the occurrence and expansion of gully erosion, Toroud basin – Iran. **Procedia**, Social and Behavioral Sciences, v. 120, p. 749-756, 2014. DOI 10.1016/j.sbspro.2014.02.158.

NAIME, Uebi Jorge; MOTTA, Paulo Emílio Ferreira da; CARVALHO FILHO, Amaury de; BARUQUI, Alfredo Melhem. (org.) **Avaliação da aptidão agrícola das terras da Zona Campos das Vertentes – MG**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 91. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 59 p.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **InVEST**. 2021a. Disponível em: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>. Acesso em: 13 out. 2021.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **Our Core Partners**. 2021b. Disponível em: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/who-we-are/partners>. Acesso em: 13 out. 2021.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **SDR: Sediment Delivery Ratio**. 2021c. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/sdr.html>. Acesso em: 13 out. 2021.

NEVES, Charlys Vaz de Sant'Anna. **Cartografia geológica e petrografia do Metagranitoide Macuco de Minas, norte de Itutinga, Minas Gerais**. 2019. Monografia (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. 92 p.

NOCE, Carlos M.; PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos; SILVA, Luiz Carlos da; ALKMIM, Fernando F. de. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do Orógeno Araçuai. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 17-23, 2007. DOI 10.18285/geonomos.v15i1.104.

NOCE, Carlos M.; TEIXEIRA, Wilson; QUÉMÉNEUR, Jean J.G.; MARTINS, Veridiana T.S.; BOLZACHINI, Érica. Isotopic signatures of Paleoproterozoic granitoids from the southern São Francisco Craton and implications for the evolution of the Transamazonian Orogeny. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 13, p. 225-239, 2000. DOI 10.1016/S0895-9811(00)00019-5.

OLIVEIRA, Maria Paula Pires de. **Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na Boçoroca do Córrego do Cravo – Nazareno/MG**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. 143 p.

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; DURÃES, M.F.; SILVA, A.M. Soil erosion vulnerability in the Verde River Basin, Southern Minas Gerais. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 38, n. 3, p. 262-269, 2014. DOI 10.1590/S1413-70542014000300006.

OUGOUGDAL, H.A.; KHEBIZA, M.Y.; MESSOULI, M.; BOUNOUA, L.; KARMAOUI, A. Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. **Scientific African**, v. 10, e00646, 2020. DOI 10.1016/j.sciaf.2020.e00646.

OUTEIRO, L.; RODRIGUES, J.G.; DAMÁSIO, L.M.A.; LOPES, P.F.M. Is it just about the money? A spatial-economic approach to assess ecosystem service tradeoffs in a marine protected area in Brazil. **Ecosystem Services**, v. 38, 100959, 2019. DOI 10.1016/j.ecoser.2019.100959.

OZSOY, Gokhan; AKSOY, Ertugrul; DIRIM, M. Sabri; TUMSAVAS, Zeynal. Determination of Soil Erosion Risk in the Mustafakemalpaşa River Basin, Turkey, Using the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographic Information System, and Remote Sensing. **Environmental Management**, v. 50, p. 679-694, 2012. DOI 10.1007/s00267-012-9904-8.

PACIULLO, Fabio Vito Pentagna; RIBEIRO, André; ANDREIS, Renato Rodolfo; TROUW, Rudolph Allard Johannes. The Andrelândia Basin, a neoproterozoic intraplate continental margin, Southern Brasília Belt, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 200-202, mar. 2000. DOI 10.25249/0375-7536.2000301200202.

PASCOTO, Tamara Vieira. **Análises fatorial e de componentes principais aplicadas ao estudo dos fatores influenciadores de processos erosivos**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2020. 123 p.

PAVANI, B. F.; SOUSA JÚNIOR, W.C.; INOUE, C.E.N.; VIEIRA, S.A.; MELLO, A.Y.I. Estimating and valuing the carbon release in scenarios of land-use and climate changes in a Brazilian coastal area. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 416-427, 2018. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.08.059.

PEREIRA, José A. A.; GOULART, Rodrigo M.; SILVA, Marx L. N.; LOSCHI, Ricardo A.; OGUSUKU, Leonardo M.; COSTA, Malcon do P. Caracterização dos atributos dos regolitos de uma voçoroca em Nazareno, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 2, p. 204-212, 2012. DOI 10.5039/agraria.v7i2a1063.

PEREIRA, José Aldo Alves; BARROS, Dalmo Arantes de; SILVA, Rossi Allan; LOSCHI, Ricardo Ayres. Voçorocas em Nazareno (MG): análise perceptiva como subsídio para políticas ambientais. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 7, n. 9, p. 33-50, 2014. ISSN 1904-3240. DOI 10.17271/198432407920141114.

PEREIRA, Ronaldo Mello; ÁVILA, Ciro Alexandre; NEUMANN, Reiner. Estudo mineralógico e químico da cassiterita e de suas inclusões sólidas: implicações com a paragênese das mineralizações da província pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. **Arquivos do Museu Nacional**, v. 62, n. 3, p. 321-336, 2004. ISSN 0365-4508.

PINESE, José Paulo Peccinini. **Geoquímica, geologia isotópica e aspectos petrológicos dos diques máficos pré-cambrianos da região de Lavras (MG), porção sul do Cráton do São Francisco**. 1997. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 1997. 178 p.

PINHEIRO, Marco Aurélio Piacentini; ÁVILA, Ciro Alexandre; BONGIOLO, Everton Marques; MAGALHÃES, Joana R.; VILELA, Francisco Teixeira; TEDESCHI, Mahyra Ferreira. (org.). **Reavaliação do potencial mineral das sequências metavulcanossedimentares a sudoeste do Quadrilátero Ferrífero – área de Nazareno – MG: texto e mapa geológico integrado, escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2020. 87 p. ISBN 978-65-5664-028-0.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003. DOI 10.1016/S0341-8162(02)00143-1.

POLASKY, Stephen. What's Nature Done for You Lately: Measuring the Value of Ecosystem Services. **Choices**, v. 23, n. 2, p. 42-46, 2008. Disponível em: http://www.choicesmagazine.org/magazine/pdf/issue_4.pdf. Acesso em: 27 jun. 2022.

POWER, Alison G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 365, p. 2959-2971, 2010. DOI 10.1098/rstb.2010.0143.

PRADO, R.B.; FIDALGO, E.C.C.; MONTEIRO, J.M.G.; SCHULER, A.E.; VEZZANI, F.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, A.P.; VIANA, J.H.M.; PEDREIRA, B.C.C.G.; MENDES, I.C.; REATTO, A.; PARRON, L.M.; CLEMENTE, E.P.; DONAGEMMA, G.K.; TURETTA, A.P.D.; SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1021-1038, 2016. DOI 10.1590/S0100-204X2016000900002.

REAL, Lígia Sampaio Corte. **Fractal, multifractal e lacunaridade como uma nova ferramenta de análise para voçorocas: um estudo de caso**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.

REAL, Lígia Sampaio Corte; CRESTANA, Silvio; FERREIRA, Rogério Resende Martins; RODRIGUES, Valéria Guimarães Silvestre. Evaluation of gully development over several

years using GIS and fractal analysis: a case study of the Palmital watershed, Minas Gerais (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 434-456, 2020a. DOI 10.1007/s10661-020-08362-7.

REAL, Lígia Sampaio Corte; CRESTANA, Silvio; FERREIRA, Rogério Resende Martins; SÍGOLO, Joel Barbujianni; RODRIGUES, Valéria Guimarães Silvestre. Proposition for a new classification of gully erosion using multifractal and lacunarity analysis: A complex of gullies in the Palmital stream watershed, Minas Gerais (Brazil). **Catena**, v. 186, mar. 2020b. DOI 10.1016/j.catena.2019.104377.

REDHEAD, J.W.; MAY, L.; OLIVER, T.H.; HAMEL, P.; SHARP, R.; BULLOCK, J.M. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom. **Science of the Total Environment**, v. 610-611, p. 666-677, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.08.092.

RIBEIRO FILHO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M. de; SANTOS, J. C. N. dos; BRASIL, J. B. Rainfall characterization and sedimentological responses of watersheds with diferente land uses to precipitation in the semiarid region of Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 468-478, 2017. DOI 10.1590/1983-21252017v30n222rc.

RIBEIRO, André; TROUW, Rudolph Allard Johannes; ANDREIS, Renato Rodolfo; PACIULLO, Fabio Vito Pentagna; VALENÇA, Joel Gomes. Evolução das bacias proterozoicas e o termo-tectonismo brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 235-248, dez. 1995.

RĪTIŅŠ, Jānis Ivars Valença. **Mapeamento geológico e petrografia dos corpos plutônicos félsicos próximos a cidade de Macuco de Minas, Minas Gerais**. 2017. Monografia (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 51 p.

RODRIGUES, G.P.; FERREIRA, R.R.M.; GOMES, M.A.F.; ZOLIN, C.A.; QUARTAROLI, C.F. Estimativa preliminar da exportação de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Iquiri (Ituxi) em Acrelândia-AC por meio do software InVEST. *In*: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021. **Anais [...]**. Instituto de Zootecnia, 2021.

RODRIGUES, J.A.M.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; RODRIGUES, M.C. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Cervo – MG. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 531-542, 2017.

RODRIGUES, V. G. S.; FERREIRA, M. D.; ZUQUETTE, L. V. Capítulo 10: Estudos geológicos e geotécnicos de áreas degradadas por mineração e erosão. *In*: ZUQUETTE, L.V. (org.) **Geotecnia Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, p. 308-339.

ROTTA, C.M.S.; ZUQUETTE, L.V. Capítulo 5: Processos Erosivos. *In*: ZUQUETTE, L.V. (org.) **Geotecnia Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ROUHANI, Hamed; FATHABADI, Aboalhasan; BAARTMAN, Jantiene. A wrapper feature selection approach for efficient modelling of gully erosion susceptibility mapping. **Progress in Physical Geography**, v. 45, n. 4, p. 580-599, 2021. DOI 10.1177/03091333209798907.

RUHOFF, Anderson Luis; PENNA E SOUZA, Bernardo Sayão; GIOTTO, Enio; PEREIRA, Rudiney Soares. Avaliação dos processos erosivos através da Equação Universal de Perdas de Solos, implementada com algoritmos em LEGAL. **Geomática**, v. 1, n. 1, p. 12-22, 2006.

SAAD, S.I.; SILVA, J.M.; PONETTE-GONZÁLEZ, A.G.; SILVA, M.L.N.; ROCHA, H.R. Modeling the on-site and off-site benefits of Atlantic forest conservation in a Brazilian watershed. **Ecosystem Services**, v. 48, 101260, 2021. DOI 10.1016/j.ecoser.2021.101260.

SAMPAIO, L.F.; OLIVEIRA, M. P. P.; GIMENES, F. B. Q.; RODRIGUES, V. G. S.; PEJON, O. J. 2013. Utilização de SIG e índices morfométricos para estudo dos processos erosivos em uma bacia do município de Nazareno/MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14., 2013, Rio de Janeiro. **Anais [...]**, p. 1-9.

SAMPAIO, L.F.; OLIVEIRA, M.P.P.; CASSARO, R.; RODRIGUES, V.G.S.; PEJON, O.J.; SÍGOLO, J.B.; FERREIRA, V.M. Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: a case of study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil). **DYNA**, Medellín, v. 83, p. 198-206, 2016. DOI 10.15446/dyna.v83n199.54843.

SAMPAIO, L.F.; RODRIGUES, V.G.S.; BRESSIANI, D.A.; FERREIRA, R.R.M. Hydrologic and hydraulic simulations for use in macrodrainage designs for gully management and recovery. **DYNA**, Medellín, v. 84, p. 129-136, 2017. DOI 10.15446/dyna.v84n202.61254.

SAMPAIO, Lígia de Freitas. **Estudo geológico-geotécnico dos processos erosivos e proposta de macrodrenagem**: Voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno-MG). 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

SÁNCHEZ-CANALES, M.; BENITO, A.L.; PASSUELLO, A.; TERRADO, M.; ZIV, G.; ACUÑA, V.; SCHUHMACHER, M.; ELORZA, F.J. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed. **Science of the Total Environment**, v. 440, p. 140-153, 2012. DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.07.071.

SATTAR, Farha; WASSON, R.J.; PEARSON, Diane; BOGGS, Guy; AHMAD, Waqar; NAWAZ, Muhammad. The development of geoinformatics based framework to quantify gully erosion. *In*: INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE, 10., 2010. **Conference Proceedings [...]**, v. 1. Bulgária: Albena Resort, 2010. p. 37-44. ISBN-10 954-91818-1-2. DOI 10.5593/SGEM2010.05.11.S1.926.

SEIXAS, Luís Antônio Rosa; BARDINTZEFF, Jacques-Marie; STEVENSON, Ross; BONIN, Bernard. Petrology of the high-Mg tonalites, dioritic enclaves of the ca. 2130 Ma Alto Maranhão suite: evidence for a major juvenile crustal addition event during the Rhyacian orogenesis, Mineiro Belt, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 238, p. 18-41, 2013. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2013.09.015>.

SHAETZL, Randall; ANDERSON, Sharon. **Soils: Genesis and Geomorphology**. 1. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-81201-6.

SHARP, R.; DOUGLASS, J.; WOLNY, S.; ARKEMA, K.; BERNHARDT, J.; BIERBOWER, W.; CHAUMONT, N.; DENU, D.; FISHER, D.; GLOWINSKI, K.; GRIFFIN, R.; GUANNEL, G.; GUERRY, A.; JOHNSON, J.; HAMEL, P.; KENNEDY, C.; KIM, C.K.; LACAYO, M.; LONSDORF, E.; MANDLE, L.; ROGERS, L.; SILVER, J.; TOFT, J.; VERUTES, G.; VOGL, A. L.; WOOD, S.; WYATT, K. **Invest 3.9.1 User's Guide**. The Natural Capital Project,

Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2020. Disponível em: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>. Acesso em: 14 out. 2021.

SILVA, A.M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, J.C.; FERREIRA, M.M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1811-1820, 2009. DOI 10.1590/S0100-06832009000600029.

SILVA, Arnaldo de Queiroz da; DOMINGOS, Fabio Henrique Garcia; SILVA JUNIOR, Antônio Gonçalves da; CONCEIÇÃO, Raimundo Almir da Costa; SOUZA, Jefferson Jesus de. Uso de estereoscopia digital no ensino de mapeamento geológico nos cursos de formação em geociências. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 18., 2017. **Anais [...]**. Santos: INPE, 2017. ISBN 978-85-17-00088-1.

SILVA, Luiz Carlos da; ARMSTRONG, Richard; NOCE, Carlos Maurício; CARNEIRO, Maurício Antônio; PIMENTEL, Márcio; PEDROSA-SOARES, Antonio Carlos; LEITE, Carlos Augusto; VIEIRA, Válter Salino; SILVA, Márcio Antonio da; PAES, Vinícius José de Castro; CARDOSO FILHO, João Moraes. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuá, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 513-528, dez. 2002. DOI 10.25249/0375-7536.2002324513528.

SILVA, M.A. **Geologia e petrografia do corpo metagabroico pré-cambriano de São Sebastião da Vitória, Minas Gerais**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

SILVA, M.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, J.C.; LEITE, F.P. Sistemas de Manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n.4, p. 765-776, 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/51824/1/avanzi.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022.

SILVA, Polyanna Mara de Oliveira. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2006. 155 p.

SILVA, Polyanna Mara de Oliveira; MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antônio M. da; COELHO, Gilberto. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, Valdeir Demetrio da. **Análise de perda de solo, utilizando o modelo (RUSLE) Revised Universal Soil Loss Equation, aplicado com auxílio das técnicas de geoprocessamento na bacia do Ribeirão Reis, Maringá-PR**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2008. 96 p.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - MINAS GERAIS (SISEMA-MG). **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio**

Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2019. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 27 ago. 2020.

SOARES, A.K.M. **Mapeamento geotécnico aplicado à seleção de áreas preferenciais para implantação de aterros sanitários e cemitérios na Região Metropolitana de Belém (PA).** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2018.

SOLEIMANPOUR, S. M.; POURGHASEMI, H. R.; ZARE, M. A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *Catena*, v. 207, 105679, 2021. DOI 10.1016/j.catena.2021.105679.

SOUZA, A.N. **Evolução petrográfica e geoquímica do granitóide Ritápolis, borda meridional do cráton São Francisco.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. 118 p.

SU, Y.Y.; LI, Y.P.; LIU, Y.R.; FAN, Y.R.; GAO, P.P. Development of an integrated PCA-SCA-ANOVA framework for assessing multi-factor effects on water flow: A case study of the Aral Sea. *Catena*, v. 197, 104954, 2021. DOI 10.1016/j.catena.2020.104954.

SUN, X.; CRITTENDEN, J.C.; LI, F.; LU, Z.; DOU, X. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, v. 622-623, p. 974-987, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.12.062.

SUN, Xiaoyin; JIANG, Zhai; LIU, Fei; ZHANG, Dazhi. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, eastern China, from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, v. 102, p. 716-723, 2019. DOI 10.1016/j.ecolind.2019.03.041.

SWINTON, Scott M.; LUPI, Frank; ROBERTSON, G. Philip; HAMILTON, Stephen K. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics*, v. 64, p. 245-252, 2007. DOI 10.1016/j.ecolecon.2007.09.020.

TAVARES, A.C.F. **Diagnóstico agroambiental para gestão do uso da terra da microbacia do Rio Jundiá-Mirim.** 2001. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas, São Paulo, 2001. 92 p.

TAVARES, S.R.L. (org.). **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 228 p.

TEIXEIRA, W.; OLIVEIRA, E. P.; MARQUES, L. S. Nature and evolution of the archean crust of the São Francisco Craton. In: HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F. (ed.). **São Francisco Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent.** Amsterdam: Springer, 2017. p. 29-36.

TEIXEIRA, Wilson; ÁVILA, Ciro Alexandre; BONGIOLO, Everton Marques; HOLLANDA, Maria Helena Bezerra Maia de; BARBOSA, Natali da Silva. Age and tectonic significance of the Ritápolis Batholith, Mineiro Belt (Southern São Francisco Craton): U-Pb, LA-ICP-MS, Nd isotopes and geochemical evidence. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 9., 2014. São Paulo, SP. **Proceedings [...]**. São Paulo: 2014.

TEIXEIRA, Wilson; ÁVILA, Ciro Alexandre; DUSSIN, Ivo Antônio; CORRÊA NETO, A.; BONGIOLO, Everton Marques; SANTOS, J. O.; BARBOSA, Natali da Silva. A juvenile accretion episode (2.35-2.32 Ga) in the mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 256, p. 148-169, jan. 2015. DOI 10.1016/j.precamres.2014.11.009.

TEIXEIRA, Wilson; ÁVILA, Ciro Alexandre; NUNES, Luciana Cabral. Nd-Sr Isotopic Geochemistry and U-Pb Geochronology of the Fé Granitic Gneiss and Lajedo Granodiorite: Implications for Paleoproterozoic Evolution of the Mineiro Belt, Southern São Francisco Craton, Brazil. **Revista do Instituto de Geociências, Geologia USP, Série Científica**, v. 8, n. 1, p. 53-74, abr. 2008. DOI 10.5327/Z1519-874x2008000100005.

TERASSI, P. M. B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; SOBRAL, B. S.; GALVANI, E.; BIFFI, V. H. R. Analysis of Daily Rainfall and Spatiotemporal Trends of Extreme Rainfall at Paraná Slope of the Itararé Watershed, Brazil. **Rev. Bras. de Meteorol.**, v. 35, n. 2, p. 357-374, 2020. DOI 10.1590/0102-7786352025.

TERRADO, M.; SABATER, S.; CHAPLIN-KRAMER, B.; MANDLE, L.; ZIV, G.; ACUÑA, V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. **Science of the Total Environment**, v. 540, p. 63-70, 2016. DOI 10.1016/j.scitotenv.2015.03.064.

THOMPSON, Dayse; FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso. **Vulnerabilidade dos solos à erosão: estimativa da perda de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 30 p.

TOLEDO, C. L. B. **Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, região de Nazareno, MG**. 2002. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2002.

TOMAZONI, J.C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. 235-244, 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 4 mapas, color. Escala: 1:650.000.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Yong. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005. DOI 10.1016/j.catena.2005.06.001.

VALLADARES, Claudia Sayão; MACHADO, Nuno; HEILBRON, Monica; GAUTHIER, Giller. Ages of Detrital Zircon from Siliciclastic Successions South of the São Francisco Craton, Brazil: Implications for the Evolution of Proterozoic Basins. **Gondwana Research**, v. 7, n. 4, p. 913-921, 2004. DOI 10.1016/S1342-937X(05)71074-1.

VARELLA, C. A. A. **Análise de Componentes Principais**. 2008. Monografia (Pós-Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2008.

VASCONCELOS, Fabiana Franco de; ÁVILA, Ciro Alexandre; NEUMANN, Reiner; TEIXEIRA, Wilson; CAMARA, Beatriz de Oliveira; MENEZES, Victor Hugo; MATTOS, Fernanda. Minerais contendo terras raras no Ortognaisse Morro do Resende, Nazareno, Estado de Minas Gerais. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 14; *SIMPÓSIO DO CRETÁCEO DO BRASIL*, 8, 2015, Campos do Jordão, SP. **Anais** [...], Campos do Jordão: Sociedade Brasileira de Geologia - SBG, Núcleo São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2015/CAC00580015.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2021.

VASCONCELOS, Fabiana Franco de; ÁVILA, Ciro Alexandre; NEUMANN, Reiner; TEIXEIRA, Wilson; BONGIOLO, Everton Marques; BARBOSA, Natali da Silva; CAMARA, Beatriz de Oliveira; MENEZES, Victor Hugo; CUNHA, Fernanda Caetano de Mattos. Ortognaisse Morro do Resende: mineralogia, petrografia, geoquímica e geocronologia. **Revista do Instituto de Geociências**, Geologia USP, Série Científica, v. 17, n. 1, p. 143-164, mar. 2017. DOI 10.11606/issn.2316-9095.v17-285.

VASQUES, Fernando de Souza Gonçalves. **Mapeamento geológico de rochas metamáficas e metassedimentares do Greenstone Belt Rio das Mortes na região de São Tiago – Cassiterita e estudo petrográfico e geoquímico de diques metabásicos e de diabásio**. 2007. Monografia (Graduação em Geologia) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 63 p.

WATCH, Alfred F. The anaglyph: a new method of producing the stereoscopic effect. **Journal of The Franklin Institute**, v. 140, n. 6, p. 398–400, 1895.

WEILL, M.A.M. **Estimativa da erosão do solo e avaliação do seu impacto na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP), através do índice de tempo de vida**. 1999. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1999. 100 p.

WHITE, Robert Edwin. **Principles and practice of soil Science: the soil as a natural resource**. 4. ed. Blackwell Publishing, 2006. ISBN-13: 978-0-632-06455-7. ISBN-10: 0-632-06455-2.

WILSON, M.J. The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context. **Catena**, v. 182, 104131, 2019. DOI 10.1016/j.catena.2019.104131.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation**. Agriculture Handbook, n. 282. Washington: Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture (USDA), 1965.

YAN, Y.; ZHUANG, Q.; ZAN, C.; REN, J.; YANG, L.; WEN, Y.; ZENG, S.; ZHANG, Q.; KONG, L. Using the Google Earth Engine to rapidly monitor impacts of geohazards on ecological quality in highly susceptible areas. **Ecological Indicators**, v. 132, 108258, 2021. DOI 10.1016/j.ecolind.2021.108258.

YANG, Dong; LIU, Wen; TANG, Lingying; CHEN, Le; Li, Xuezhang; XU, Xianli. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. **Landscape and Urban Planning**, v. 182, p. 133-143, 2019. DOI 10.1016/j.landurbplan.2018.10.011.

YANG, Siqu; ZHAO, Wenwu; LIU, Yanxu; WANG, Shuai; WANG, Jing; ZHAI, Ruijie. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: Dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 556-566, 2018. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.06.348.

ZAKERINEJAD, Reza; OMRAN, Adel; HOCHSCHILD, Volker; MAERKER, Michael. Assessment of gully erosion in relation to lithology in the southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling. **Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria**, v. 41, n. 2, 2018. DOI 10.4461/GFDQ.2018.41.15.

ZHAO, Minmin; HE, Zhibin; DU, Jun; CHEN, Longfei; LIN, Pengfei; FANG, Shu. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models. **Ecological Indicators**, v. 98, p. 29-38, 2019. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.10.052.

ZHOU, M.; DENG, J.; LIN, Y.; BELETE, M.; WANG, K.; COMBER, A.; HUANG, L.; GAN, M. Identifying the effects of land use change on sediment export: Integrating sediment source and sediment delivery in the Qiantang River Basin, China. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 38-49, 2019. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.05.336.

ZUQUETTE, L.V. Capítulo 1: Aspectos conceituais e abrangências do tema. In: ZUQUETTE, L.V. (org.). **Geotecnia Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ZUQUETTE, L.V.; RODRIGUES, V.G.S.; PEJON, O J. Capítulo 23: Recuperação de áreas degradadas. In: CALIJURI, M.C.; CUNHA, D.G.F. (coord.). **Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013, p. 589-619.

ANEXOS

Anexo 1 – Mapa de Geologia da bacia do Córrego do Palmital, Minas Gerais, Brasil.

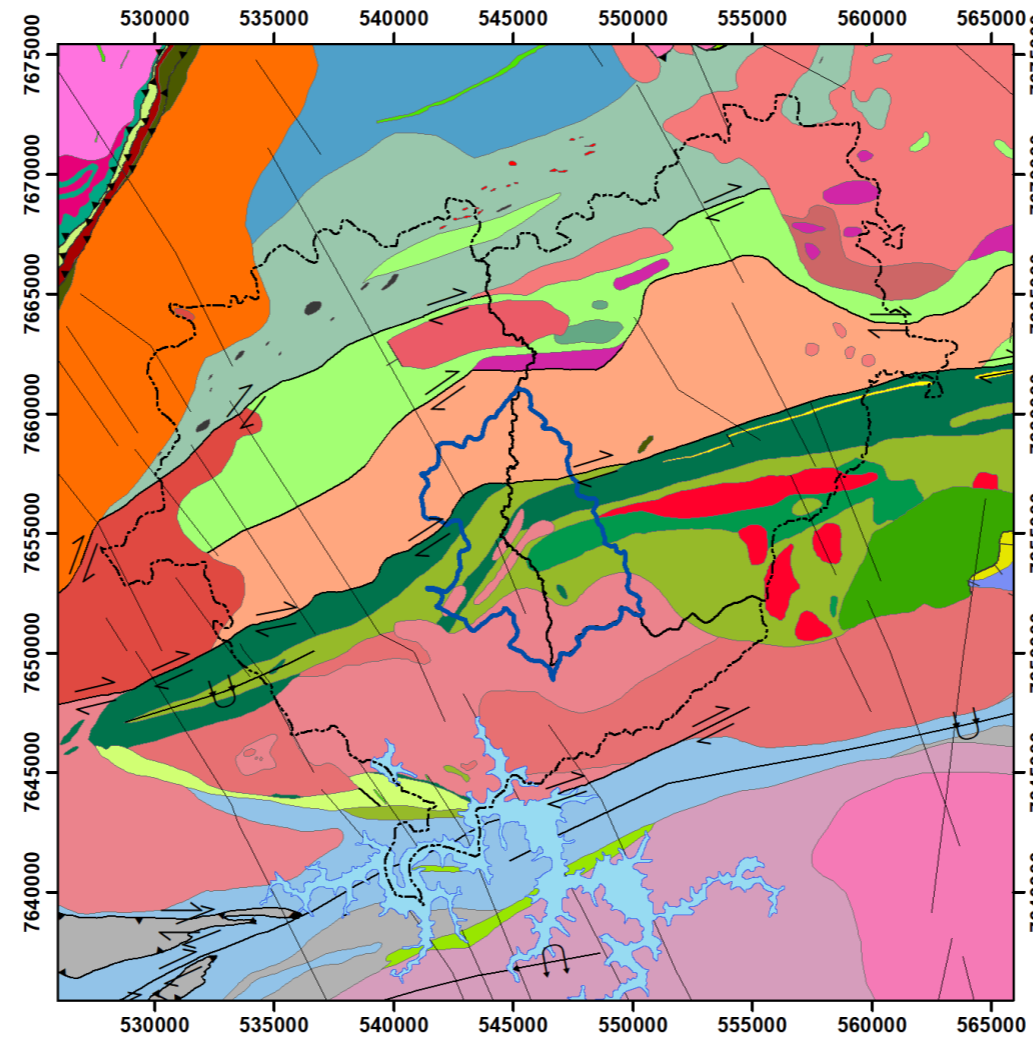
MAPA DE UNIDADES LITOLÓGICAS BACIA DO CÓRREGO DO PALMITAL E PROXIMIDADES, EM NAZARENO E CONCEIÇÃO DA BARRA DE MINAS, NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Convenções Cartográficas

- Bacia Córrego do Palmital
- Municípios na área de estudo
- Represa de Camargos

Convenções Geológicas

- Anticlinal ou antiforme invertido
- Anticlinal ou antiforme invertido com caimento indicado
- Anticlinal ou antiforme normal com caimento indicado
- Falha Contracional
- Falha extensional (normal)
- Falha indiscriminada
- Falha ou zona de cisalhamento transpressional
- Falha transcorrente dextral
- Falha transcorrente sinistral
- Falha transpressional dextral
- Lineamentos obtidos pela geofísica: M -Magnéticos
- Sinclinal ou sinforme invertido
- Sinclinal ou sinforme normal com caimento indicado



Escala 1:250.000
 Sistema de Coordenadas Projetadas
 Projeção: UTM
 DATUM: SIRGAS 2000 Zona 23S
 Bases cartográficas: IBGE (1975a, 1975b, 2019),
 SISEMA/MG (2019) e CPRM (Ávila et al., 2019a)

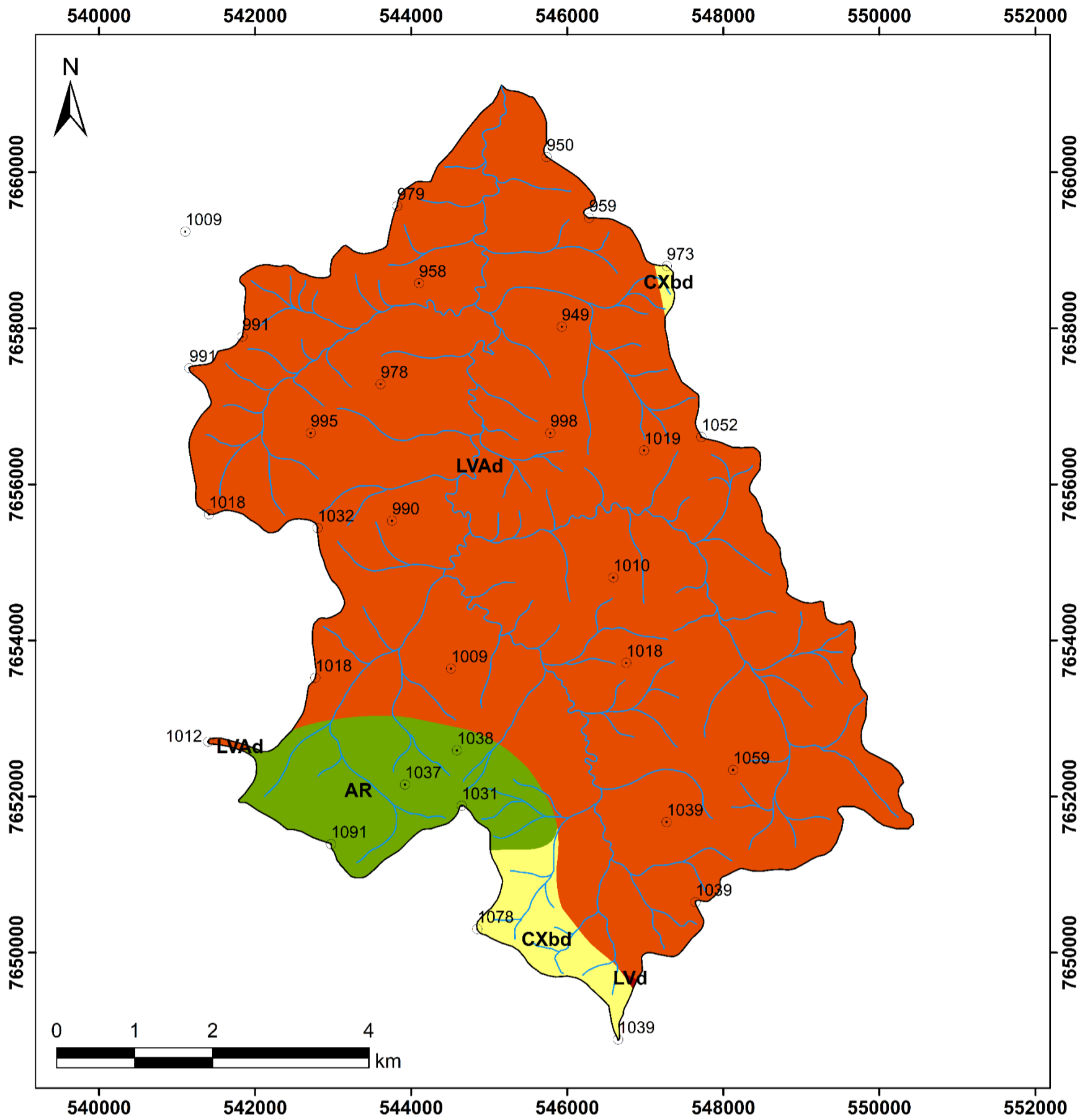
Unidades Litoestratigráficas

- CENOZOICO**
- ENpc Formação Pinheiro Chagas
- NEOPROTEROZOICO**
Ediacarano
- Grupo Andrelândia
- NP3asa Formação Santo Antônio
- Grupo Carrancas
- NP1carcp Formação Campestre
 - PP1NP1β Diques máficos
- MESOPROTEROZOICO**
Estentiano
- Grupo Carandaí
- MP23cb Formação Barroso

- PALEOPROTEROZOICO**
Riáciano
- PP2og Formação Serra do Ouro Grosso
 - PP2pie Complexo Piedade
 - PP2ma Complexo Mantiqueira (v: metavulcanossedimentar)
 - PP2y3rt Metagranitoide Ritápolis (f: textura equigranular média a fina; p: com pegmatitos)
 - PP2y2mm Metagranito Macuco de Minas
 - PP2δ2rg Metadiorito Rio Grande
 - PP2δdp Dacito Conceição da Barra de Minas
 - PP2y1mr Ortognaisse Morro do Resende
 - PP2y1rc Metagranodiorito Represa dos Camargos
 - PP2y1sr Suíte Serrinha
 - PP2y1it Ortognaisse Itutinga
 - PP2δ1sv Metagabro São Sebastião da Vitória
- Formação Rio das Mortes
- PP2rmm Membro metassedimentar (m: níveis manganésíferos)
 - PP2δrm Membro metamáfico
 - PP2μrm Membro metaultramáfico
 - PP2rμmi Corpo Manoel Inácio
- Formação Nazareno
- PP2δna Membro metamáfico
 - PP2μnv Membro metaultramáfico vulcânico
 - PP2μf Corpo Forro

- PP2yta Metatonalito Tabuões
- Sideriano**
- PP1y1ct Ortognaisse Cassiterita
- Formação Bom Sucesso
- APRbst Membro Tabuãozinho
 - APRbsff Membro Formação Ferrífera
 - APRbslp Membro Lagoa da Prata
- NEOARQUEANO**
- A4y2st Ortognaisse São Tiago
 - A4y2bs Metagranitoide Bom Sucesso
 - A4y3au Metagranito Aureliano-Mourão
- MESOARQUEANO/NEOARQUEANO**
- A4μma Complexo Morro das Almas

Anexo 2 – Mapa de Solos da bacia do Córrego do Palmital, Minas Gerais, Brasil.



Legenda

- Pontos Cotados
- Hidrografia
- Bacia Córrego do Palmital
- Afloramento rochoso
- Cambissolo háplico
- Latossolo vermelho
- Latossolo vermelho-amarelo

Escala 1:50.000
 Escala original 1:50.000
 (IBGE 1975a, 1975b)
 Projeção: UTM
 SIRGAS 2000 / ZONA 23S

Base cartográfica: Universidade Federal de Viçosa, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Universidade Federal de Lavras e Fundação Estadual do Meio Ambiente (2010)

Fonte: A autora.