

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação
Espacial

Jorge Batista de Souza

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE, MG

Belo Horizonte
2021

Jorge Batista de Souza

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE, MG**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. José Flávio Morais Castro

Belo Horizonte
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S729p	<p>Souza, Jorge Batista de Proposta metodológica para mapeamento de fragilidade ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, MG / Jorge Batista de Souza. Belo Horizonte, 2021. 217 f. : il.</p> <p>Orientador: José Flávio Morais Castro Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial</p> <p>1. Mapeamento ambiental - Peixe, Rio do, Bacia (MG). 2. Bacias hidrográficas 3. Solo - Uso. 4. Sistemas de informação geográfica. 5. Geografia física. 6. Análise espacial (Estatística). 7. Mapeamento geomorfológico. 8. Vegetação - Mapeamento. 9. Sensoriamento remoto. I. Castro, José Flávio Morais. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial. III. Título.</p> <p>CDU: 551.4 (815.1)</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por Elizângela Ribeiro de Azevedo - CRB 6/3393

Jorge Batista de Souza

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE, MG**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Prof. Dr. José Flávio Morais Castro – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Guilherme Taitson Bueno – UFG

Prof. Dr. Roberto Rosa – UFU

Prof. Dr. Alecir Antônio Maciel Moreiera – PUC Minas

Prof. Dr. Sandro Laudares – PUC Minas

Belo Horizonte, 10 de março de 2021

*Aos meus pais, D. Zilda, Tonão, e irmãos que foram imensuráveis nesta trajetória.
A minha esposa, Fernanda, pelo apoio incondicional.
Ao meu orientador Prof. José Flávio: gratidão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa e eterna companheira, Fernanda, que esteve ao meu lado em todos os momentos, acompanhando nos levantamentos de campo, auxiliando nos momentos finais da tese com amor e paciência.

Agradeço imensamente à minha mãe, D. Zilda, pelo amor incondicional a sua pequena “prole”, nosso exemplo de vida. Também um agradecimento especial ao meu pai, Tonão, que continua presente em nossos pensamentos.

Aos irmãos “Zizim”, Mônica, Alexandre, Fernanda e Janinho e minha enteada Letícia pelo apoio e torcida.

Ao meu orientador, José Flavio Morais Castro, pela amizade, paciência, profissionalismo e incentivo na elaboração desse trabalho. O seu apoio me tornou mais forte e resiliente para seguir em frente. Foi gratificante ter você como orientador. A você minha eterna gratidão.

Aos professores Alecir Moreira e Guilherme Taitson pelas considerações, correções e incentivos para elaboração deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Geografia pelo apoio. Uma menção especial ao professor Marcelo Zanetti, pelos gestos e palavras de incentivos.

Ao Programa Pós-graduação em Geografia e Tratamento da Informação Espacial pela oportunidade a mim concedida.

E a todos que de algum modo fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“Caminhar perto de coisas e
pessoas de verdade, desfrutar
desse amor absolutamente sem
fraudes, nunca será perda de tempo.
O essencial faz a vida valer a pena”.*

Rubens Alves

RESUMO

Este estudo teve como objetivo principal propor uma adaptação nas metodologias criadas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) para mapear fragilidade ambiental, acrescentando as variáveis morfométricas formas do terreno, dissecação fluvial e fator topográfico, utilizando como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio do Peixe, MG. Os modelos de análise da fragilidade ambiental presentes neste estudo utilizam uma abordagem sistêmica por meio das Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977) para mapear as áreas no contexto dos diagnósticos ambientais. As áreas são caracterizadas por diversas variáveis como dissecação do relevo, geologia, solo, declividade, cobertura vegetal e uso da terra e pluviosidade. Na proposta metodológica deste estudo, as variáveis morfométricas associadas as variáveis geologia, solo, cobertura vegetal e uso da terra foram processadas em sistemas de informação geográfica, por meio de técnicas de análise espacial, utilizadas para a transformação destas, mapeadas segundo a lógica booleana, em variáveis probabilísticas *fuzzy*. As variáveis *fuzzy* normalizadas foram combinadas no operador fuzzy gama, que possibilitou a geração de cenários para a fragilidade ambiental da bacia, a partir da aplicação de diferentes graus de pertinência gama (0.35, 0.75, 0.90 e 1.0). Para validar o melhor cenário do mapa final de fragilidade ambiental, utilizaram-se valores do índice Kappa, por meio da verificação da presença de processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) nas classes de maior fragilidade. Em etapa posterior, foi realizada uma análise comparativa entre o modelo do cenário gama 0,9 com os modelos de Ross (op. cit.) e Crepani et al. (op. cit.). Como os modelos apresentam diferenças na operacionalização dos métodos de classificação, utilizou-se os 5 graus de fragilidades ambiental (muito fraca, fraca, média, forte e muito forte) classificados por meio da medida de separatriz quintil, para permitir análise comparativa entre os mapeamentos gerados. As análises comparativas, associadas as informações empíricas obtidas pelos levantamentos de campo, mostraram que a metodologia proposta na tese, com a inclusão de novas variáveis morfométricas, foi eficiente para identificação e mapeamento das áreas com maior grau de fragilidade na bacia do Rio do Peixe, com destaque para os fundos de vales e vertentes de fluxo convergente.

Palavras Chaves: Fragilidade Ambiental, Inferência Fuzzy, Sistema de Informação Geográfica, Modelos.

ABSTRACT

This study had as main objective to propose a adaptation in the methodologies created by Ross (1994) and Crepani et al. (2001) to map environmental fragility, adding the morphometric variables landforms, river dissection and topographic factor, using the Rio do Peixe basin, MG as a case study. The models of analysis of environmental fragility present in this study use a systemic approach through the Ecodynamic Units recommended by Tricart (1977) to map the areas in the context of environmental diagnoses. The areas are characterized by several variables such as dissection of the relief, geology, soil, slope, vegetation cover and land use and rainfall. In the methodological proposal of this study, the morphometric variables associated with the variables geology, soil, vegetation cover and land use were processed in geographic information systems, using spatial analysis techniques, used for their transformation, mapped according to Boolean logic, in fuzzy probabilistic variables. The normalized fuzzy variables were combined in the fuzzy gamma operator, which enabled the generation of scenarios for the environmental fragility of the basin, by applying different degrees of gamma relevance (0.35, 0.75, 0.90 and 1.0). To validate the best scenario of the final environmental fragility map, Kappa index values were used, by verifying the presence of linear erosive processes (gullies erosion) in the most fragile classes. In a later step, a comparative analysis was carried out between the model of the 0.9 gamma scenario with the Ross models (op. cit.) and Crepani et al. (op. cit.). As the models present differences in the operationalization of the classification methods, we used the 5 degrees of environmental weaknesses (very weak, weak, medium, strong and very strong) classified by means of the quintile separator measure, to allow comparative analysis between the mappings generated. Comparative analyses, associated with empirical information obtained from field surveys, showed that the methodology proposed in the thesis, with the inclusion of new morphometric variables, was efficient for the identification and mapping of the areas with the highest degree of fragility in the Rio do Peixe basin, highlighting the bottom of valleys and convergent flow slopes.

Keywords: Environmental Fragility, Fuzzy Inference, Geographic Information System, Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo geossistêmico proposto por Bertrand (ação antrópica com a mesma dimensão da organização do ecossistema). II – Modelo geossistêmico proposto por Sotchava (atividades humanas influenciam a estrutura do geossistema)	33
Figura 2 - As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymore Dalrymple. Blong e Conacher(1968).	42
Figura 3 - Os quatro tipos básicos de vertentes, combinando a concavidade e convexidade, e os processos atuantes.....	43
Figura 4 - Geometria das formas das vertentes.....	44
Figura 5 – Grau de pertinência, conjunto clássico e conjunto fuzzy.....	60
Figura 6 - Representação da variável linguística.....	60
Figura 7 - As etapas do processo de fuzzyficação e defuzzyficação.....	61
Figura 8 – representação do Gráfico de distribuição da função Fuzzy Gama.....	64
Figura 9 – Pirâmide de Informação.....	66
Figura 10 - Roteiro metodológico para geração de mapa morfodinâmico, segundo Castro 1993.....	68
Figura 11 - Roteiro metodológico da pesquisa para mapeamento da fragilidade ambiental.....	69
Figura 12 - A) Dados de elevação; B) Direção do fluxo C) Codificação D8 D) Direção do fluxo codificada.....	74
Figura 13: A) Direções cardeais e colaterais; B) valores de elevação (MDE); C) valores de declive e direção do fluxo.....	74
Figura 14 – Preenchimento das depressões e remoção das cristas espúrias.....	75
Figura 15 - Exemplo de preenchimento das depressões espúrias pelo algoritmo Jenson e Domingue.....	76
Figura 16 - Exemplo de preenchimento das depressões espúrias pelo algoritmo PFS.....	77
Figura 17 - Comparação da rede de drenagem do rio do Peixe extraídas pelos algoritmos Jenson e Dominique (1998) e PFS (1992)	78
Figura 18 - Ação da declividade sobre a hidrologia de superfície.....	79
Figura 19 – Relação entre dimensão horizontal e dimensão vertical.....	80
Figura 20 – Representação das nove formas de terreno.....	85
Figura 21- exemplo da álgebra de mapas para obtenção da variável forma do terreno.....	85
Figura 22 – Relação Forma do Terreno com a concentração e dispersão do fluxo de escoamento superficial.....	86
Figura 23 – Etapas para elaboração do HAND no TerraHidro.....	88

Figura 24 – Unidades taxonômicas de Classificação do Relevo	90
Figura 25 – Etapas para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo.....	92
Figura 26 – Chaves de interpretação para classificação supervisionada da cobertura vegetal e do uso e ocupação da terra.....	94
FIGURA 27 – Localização da Bacia do Rio do Peixe.....	97
Figura 28 – imagem cor natural fusionada com banda pancromática (CBERS 04 ^a)	98
Figura 29 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero.....	103
Figura 30 – Mapa Geológico da bacia do Rio do Peixe.....	104
Figura 31 – Bloco diagrama no sentido WE, representando macroestruturas do Quadrilátero Ferrífero.....	105
Figura 32 – Mapa Hipsométricos da bacia do Rio do Peixe	106
Figura 33 – perfil topográfico representando as taxonomias segundo Ross (1992) para bacia do Rio do peixe.....	107
Figura 34– Unidades Geomorfológicas (padrões em Formas Semelhantes) da Bacia do Rio do Peixe.....	108
Figura 35 – Tipos de Vertentes e feições morfodinâmicas na bacia do Rio do peixe	109
Figura 36 – mapa de Solos da bacia do Rio do Peixe.....	114
Figura 37 – Mapa da Cobertura Vegetal e Uso da Terra da Bacia do Rio do Peixe	119
Figura 38 – Municípios pertencentes a bacia, bairros e vias de acesso.....	126
Figura 39 – Geração do mapa de IDR, com base no somatório das variáveis Dimensão Interfluvial e Amplitude Fluvial.....	131
Figura 40 – Fragilidade ambiental para variável IDR.....	133
Figura 41- Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para variável solo.....	135
Figura 42- Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Pixel para variável uso da terra.....	137
Figura 43 – Mapa de Fragilidade com base nos índices de Dissecação do Relevo	140
Figura 44- Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para variável declividade.....	142
Figura 45 – Mapa da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nas classes de declividade	144
Figura 46 – Mapa de Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável geologia.....	148
Figura 47– Mapa de Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável solo.....	150
A figura 48 - Mapa de fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para a variável geomorfologia (dissecação do relevo)	153

Figura 49- Fragilidade da bacia do Rio do Peixe para a variável cobertura vegetal e uso da terra.....	156
Figura 50 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe com base nas UTB´s	159
Figura 51 – Classificação de perfis topográficos diferentes na mesma classe de dissecação.....	161
Figura 52 – Cálculo hipotético do grau de dissecação e declividade.....	162
Figura 53 – fluxograma das principais etapas para gerar o mapa de fragilidade Fuzzy.....	164
Figura 54 – Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para a variável Forma do Terreno.....	169
Figura 55 – detalhe da sobreposição da faixa de APP marginal com o modelo HAND para a Bacia do Rio do Peixe.....	171
Figura 56 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada dissecação fluvial (vertical).....	172
Figura 57 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada fator topográfico (LS).....	174
Figura 58 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada geologia.....	176
Figura 59 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada solo.....	177
Figura 60 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada cobertura e uso da terra.....	180
Figura 61 – Relação de pertinência operador fuzzy gama.....	182
Figura 62 – Cenários da modelagem da Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe, obtidos pelo operador gama, com os respectivos graus de pertinência.....	183
Figura 63 – Exemplo de coletas de amostras para gerar o índice Kappa.....	185
Figura 64 – Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe com base no método de inferência Fuzzy Gama Fuzzy (Gama 0,90)	186
Figura 65- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Cristas.....	192
Figura 66- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e para Unidade geomorfológica de Colinas.....	194
Figura 67- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados.....	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Unidades Hierárquicas de Fragilidade Ambiental.....	38
Tabela 2 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas.....	38
Tabela 3 – Intervalos do Índice Kappa.....	96
Tabela 4 – Unidades Hierárquicas de Fragilidade Ambiental.....	129
Tabela 5 - Matriz dos Índices de Dissecação das Formas de Relevo.....	130
Tabela 6 - Grau de Fragilidade das Classes de Dissecação do relevo.....	132
Tabela 7 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo.....	134
Tabela 8 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo para Bacia do Rio do Peixe.....	134
Tabela 9- Grau de Proteção/Fragilidade das Classes de Cobertura Vegetal/Usos da terra.....	136
Tabela 10 - Grau de Proteção/Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para variável cobertura vegetal e uso da terra.....	136
Tabela 11 Grau de Fragilidade das Classes de Precipitação.....	138
Tabela 12 - Codificação para as classes de fragilidade apoiada na variável declividade.....	139
Tabela 13 - Grau de Fragilidade das Classes de Declividade.....	141
Tabela 14 - Codificação para as classes de fragilidade apoiada na variável declividade.....	143
Tabela 15 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas.....	145
Tabela 16 – escala de Vulnerabilidade à denudação das Rochas mais comuns	146
Tabela 17 - Graus de vulnerabilidade para os tipos de rochas encontradas na bacia do Rio do Peixe.....	147
Tabela 18 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo.....	149
Tabela 19 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo bacia do Rio do Peixe.....	150
Tabela 20 - Grau de Fragilidade variável amplitude do relevo.....	152
Tabela 21 - Grau de Fragilidade variável amplitude altimétrica.....	152
Tabela 22 - Grau de Fragilidade variável declividade.....	152
Tabela 23 - Grau de fragilidade para variável cobertura vegetal.....	154
Tabela 24 – Tipos de Cobertura Vegetal e Uso da Terra.....	155
Tabela 25 - Grau de fragilidade para a variável clima (pluviosidade).....	157
Tabela 26 - Escala de Vulnerabilidade a Perda de solo das Unidades de Paisagens.....	158
Tabela 27 - Intervalos dos Graus de Vulnerabilidade/Estabilidade.....	158
Tabela 28 - Matriz dos Índices de Dissecação das Formas de Relevo.....	160
Tabela 29 – Normalização da fragilidade ambiental da variável Forma do Terreno.....	168

Tabela 30 - classes de fragilidade utilizadas na normalização da fragilidade ambiental da variável dissecação fluvial (HAND).....	171
Tabela 31 – Normalização da fragilidade ambiental da variável solo.....	175
Tabela 32 – Normalização da fragilidade ambiental da variável geologia.....	176
Tabela 33 – Coeficiente c^2 (grau de impermeabilização do solo)	179
Tabela 34 – Normalização da fragilidade ambiental da variável Cobertura vegetal e uso da terra com base no coeficiente c^2 do modelo Hidrológico I-pi Wu.....	179
Tabela 35 - Porcentagem de cada classe de fragilidade de acordo com os gamas utilizados.....	184
Tabela 36 - Índice Kappa para validação dos cenários de inferência fuzzy gama	190
Tabela 37 – Porcentagens das áreas ocupadas pelos 5 graus de fragilidade, com base no método quintil.....	190
Tabela 38 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Cristas.....	193
Tabela 39 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Colinas.....	195
Tabela 40 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados.....	197
Tabela 41 – Índice Kappa para validação dos modelos de fragilidades.....	198

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 - vista do alinhamento da Serra da Moeda a partir do Unidade Morfológica em Colinas.....	110
Foto 2 - vista do alinhamento da Serra de Itabirito, ao fundo o Rio do Peixe.....	110
Foto 3 - Unidade Morfológica em Colinas. Note a grande presença de ravinas e voçorocas nesta unidade.....	111
Foto 4 - Detalhe de voçorocas em solo alterado de filito multicolorido. Em primeiro plano ocupações (bairro Balneário Água Limpa).....	112
Foto 5 – Unidade Morfológica em Morros alongados, cobertos por matas.....	112
Foto 6 – Cambissolo em filito multicolorido alterado. Cobertura vegetal de campo Cerrado/graminoso.....	115
Foto 7 – latossolo vermelho periférico no sopé da serra da moeda. sob material detrítico coluvionar proveniente da Serra da Moeda.....	117
Foto 8 – Classes de cobertura vegetal e uso da terra na Bacia do Rio do Peixe	120
Foto 9 – Cobertura vegetal de mata em vertente ravinada da Serra da Moeda	120
Foto 10 – Vegetação de Capoeira no topo de morro.....	121
Foto 11 – Campo cerrado/campo graminoso com estrato herbáceo e arbustivo.	122
Foto 12 - Campo cerrado/campo graminoso com predominância de estrato herbáceo.....	122
Foto 13 – Reflorestamento de Eucalyptus.....	123
Foto 14 - Cobertura de pastagem. Notar presença de cicatrizes de rastejamento e erosão superficial concentra (sulco).....	124
Foto 15 - Atividade mineral na Serra do Itabirito.....	124
Foto 16 - Vista geral do Bairro Água Limpa, ocupando o relevo de colinas.....	125
Foto 17 – Vista parcial da área de expansão do condomínio Alphaville lagoa dos Ingleses.....	127
Foto 18 - Vista parcial do bairro Água Limpa.....	128
Foto 19 – Unidade Morfológica de Colinas: Tipos de fluxos nas vertentes, processos erosivos e cobertura e uso e ocupação da terra.....	199
Foto 20 - Abertura de vias em loteamento, próximo a bairro Água Limpa, sem infraestrutura urbana, nas cabeceiras de drenagem do Rio do Peixe.....	200
Foto 21 – Em primeiro plano ravina originada após abertura de vias de acesso de novo empreendimento imobiliário na região.....	201

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Porcentagens das áreas ocupadas pelos 5 graus de fragilidade, com base no método quintil.....	189
Gráfico 2 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Souza (2021) para Unidade geomorfológica de Cristas.....	192
Gráfico 3 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Colinas.....	195
Gráfico 4 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados.....	197

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos geomórficos atuantes nas nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymore Dalrymple. Blong e Conacher(1968).....	42
Quadro 2 - Principais variáveis (indicadores) utilizadas para modelagem da fragilidade ambiental.....	67
Quadro 3 - Relação dos produtos cartográficos e imagens	71
Quadro 4 - Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero.....	99
Quadro 5 - Características para avaliação da vulnerabilidade.....	146
Quadro 6 - Principais variáveis (indicadores) utilizadas para modelagem da fragilidade ambiental.....	187

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP – Análise de Componentes Principais
ALOS-Palsar - Advanced Land Observing Satellite
ANA - Agência Nacional das Águas
APA – Área de Proteção Ambiental
ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer
CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite
CGIS - Canada Geographic Information System
CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
CPRM - Serviço Geológico Brasileiro
DEM - Digital Elevation Model
DH - Dissecação Horizontal
DV – Dissecação vertical
EUPS - Equação Universal de Perdas do Solo
GIS - Geographic Information Systems
GNSS - Global Navigation Satellite System
GPS - Sistema de Posicionamento Global
HAND – Height Above the Nearest Drainage
IDR – Índice de Dissecação do Relevo
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDEHC - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
NCGIA - National Centre for Geographical Information and Analysis
PFS - Priority First Search
RRL - Regional Reserch Laboratory
SAGA - Sistema de Análise Geo-Ambiental
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SITIM - Sistema de Tratamento de Imagens e o
SPRING.- Sistema para Processamento de Informações Geográficas
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
TGS - Teoria Geral dos Sistemas
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
UTB -Unidade Territorial Básica
UTBs - Unidades Territoriais Básicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 - Abordagem sistêmica como suporte para o mapeamento da fragilidade ambiental	25
2.2 - Fragilidade Ambiental	34
2.3 Variáveis Morfométricas Forma da Vertente e Comprimento da Vertente aplicados no mapeamento da Fragilidade Ambiental.....	39
2.4 - Sistemas ambientais e a bacia hidrográfica como unidade integradora nos estudos de análise ambiental.....	46
2.5 - Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e o Tratamento da Informação Espacial no mapeamento da Fragilidade Ambiental	50
2.6 Inferência Fuzzy no mapeamento da Fragilidade Ambiental	58
3 - METODOLOGIA.....	64
3.1 – Materiais.....	71
3.2 – Métodos e técnicas	72
3.2.1 – Modelo Digital de Elevação	72
3.2.2 -Delimitação da Bacia Hidrográfica da Rede de Drenagem.....	73
3.2.3 –Declividade	78
3.2.4 – Índice de Dissecação do Relevo (IDR)	79
3.2.5 –Fator topográfico (LS): comprimento da vertente e declividade.....	81
3.2.6 – Formas de Terreno (Curvatura Vertical e Horizontal)	83
3.2.7 - Dissecação Fluvial: descritor de terrenos HAND.....	86
3.2.8 - Mapa Geológico.....	88
3.2.9 - Mapa Pedológico	89
3.2.10 –Mapa Geomorfológico.....	90
3.2.11 - Cobertura Vegetal e Uso do Terra.....	92
4 CARACTERIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO	96
4.1 – Geologia.....	98
4.2 – Geomorfologia.....	105
4.3 – Pedologia	113
4.3.1 - Cambissolos	114
4.3.2 - Latossolos	116
4.3.3 - Neossolos Litólicos	118
4.4 – Cobertura Vegetal e Uso e Ocupação do Solo	118

4.5 – Ocupação Urbana na Bacia do Rio do Peixe	125
5 – APLICAÇÃO DOS MODELOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PROPOSTOS POR ROSS (1994) E CREPANI ET AL. (2001).....	129
5.1 Modelos de Fragilidade Ambiental Propostos por Ross (1994).....	129
5.1.1 - Modelo da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nos Índices de Dissecção do relevo.....	130
5.1.2 - Modelo Empírico da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nas classes de declividade.....	141
5.2 – Modelo de Fragilidade com Base nas Unidades Territoriais Básicas – UTB's (CREPANI et al., 2001)	145
6 – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ELABORAÇÃO DE MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL	160
6.1 - Normalização das Variáveis.....	167
6.1.1 - Forma de Terreno.....	167
6.1.2 - Dissecção Fluvial (modelo HAND).....	169
6.1.3 – Fator topográfico: Comprimento da vertente e declividade.....	173
6.1.4 Geologia e solo.....	175
6.1.5 - Cobertura e Uso da Terra.....	177
6.2 - Mapeamento da Fragilidade ambiental com o Operador de Inferência Fuzzy Gama	181
7- ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE ROSS (1994), Crepani ET AL. (2001) COM A PROPOSTA DE MODELAGEM DA FRAGILIDADE AMBIENTAL ..	187
7.1 - Validação do Modelo proposto por Souza (2021)	198
8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	202
REFERENCIAS	205

1 INTRODUÇÃO

A princípio, nos ambientes naturais, as trocas de energia e matéria se processam através de um estado de equilíbrio dinâmico frequentemente alterado, face as ações antrópicas, nos seus diversos componentes, gerando estado de desequilíbrios temporários ou até permanentes. Não é preciso muito esforço para perceber que as ações antrópicas no ambiente deveriam ser precedidas por um minucioso entendimento das leis que regem seu funcionamento.

O crescente aumento das pressões antrópicas sobre o meio natural exige um contínuo processo de planejamento e gestão territorial, que leve em conta não apenas as potencialidades dos seus recursos ambientais, mas principalmente suas fragilidades. De acordo com Tamanini (2008), o conceito de fragilidade diz respeito à vulnerabilidade do ambiente em sofrer qualquer tipo de dano. Relaciona-se com fatores de desequilíbrio de ordem tanto natural expresso pela própria dinâmica do ambiente, como em situações de elevadas declividades e alta susceptibilidade erosiva dos solos, quanto antropogênica como, por exemplo, o uso inadequado da terra.

O estudo de fragilidade ambiental objetiva, então, avaliar áreas suscetíveis à degradação e subsidiar ações de planejamento que restrinjam e direcionem o uso e ocupação da terra, de forma a prevenir e minimizar o surgimento de problemas relacionados à qualidade ambiental. Conforme Ross (1994, p. 64):

Os estudos relativos a fragilidade, expressos através de cartogramas e textos, são documentos de extrema importância ao Planejamento Ambiental, que tenha como centro de preocupação o desenvolvimento sustentado, onde conservação e recuperação ambiental estão lado a lado com o desenvolvimento tecnológico, econômico e social.

O conhecimento das potencialidades dos recursos ambientais passa pelos levantamentos dos solos, do relevo, das águas, do clima e da flora e fauna, enfim de todos os componentes do estrato geográfico que dão suporte a vida. Para análise da fragilidade, entretanto, exige-se que esses conhecimentos setorializados sejam avaliados de forma integrada, apoiada sempre no princípio de que a natureza se apresenta com funcionalidade intrínseca entre seus componentes físicos e bióticos, constituindo assim a continuidade dos fluxos de matéria e energia.

No Brasil, os métodos mais utilizados no mapeamento de fragilidade ambiental, referem-se aos estudos realizados por Ross (1994) e Crepani et al. (1996, 2001),

ambos fundamentados no conceito de Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977). Ross (1994) propõe os termos Unidades Ecodinâmicas Instáveis ou de Instabilidade Emergente (áreas intensamente alteradas pela ação antrópica) e Unidades Ecodinâmicas Estáveis ou de Instabilidade Potencial (áreas que se encontram em maior equilíbrio dinâmico). Tal proposição é utilizada para classificar o grau de fragilidade ambiental de determinadas áreas, as quais podem apresentar níveis de instabilidade que variam de muito fraca a muito forte. Utiliza da álgebra entre variáveis naturais e antrópicas para mapear a estabilidade das diferentes unidades Ecodinâmicas, tais como relevo, classes de solo e uso do solo.

O autor (op. cit) afirma que para escalas médias e pequenas (1:50.000, 1:100.000, 1:250.000) deve-se utilizar como base de informação os padrões de formas com a rugosidade topográfica ou os Índices de Dissecação do Relevo, enquanto para análises de maior detalhe (1:25.000, 1:10.000, por exemplo) utilizam-se as classes de declividade (ROSS, 1994)

Por sua vez, Crepani et al (2001) aplicam uma média entre dados de geologia, geomorfologia (dissecação do relevo e declividade), pedologia, cobertura vegetal e climatologia, a fim de se obterem unidades territoriais básicas de diferentes graus de vulnerabilidade. Com base na proposição de Ross (op. cit.) o autor acrescentou a variável geologia na sua proposta de modelagem.

Embora a relevância e a grande utilização no meio geográfico dos estudos realizados por Ross (1994) e Crepani et al. (2001), observam-se algumas limitações na aplicação dos mesmos, principalmente para escalas de maior detalhe, acima de 1:50.000. Muitos estudos de fragilidade em escala de detalhe acabam utilizando apenas o parâmetro morfométrico declividade e desconsiderando outros, como as formas do terreno (curvatura vertical e horizontal da vertente) e comprimento da vertente.

No que se refere à análise morfométrica da dissecação do relevo e sua incorporação ao mapeamento da fragilidade observa-se que, em geral, os parâmetros morfométricos são obtidos a partir da quantificação da relação média das distâncias Interfluviais, com a profundidade de entalhamento vertical. Tanto as técnicas de análise do índice de dissecação como a declividade, utilizadas nas análises morfométricas do relevo, geram uma grande generalização do relevo, além de conferir uma visão bidimensional a vertente. A vertente, como definida por Jan Dylik (1968,

apud Christofolletti, 1979) deve ser entendida como uma forma tridimensional modelada pelos processos de denudação, atuantes no presente ou no passado, conectada a dinâmica entre interflúvio e fundo de vale.

Percebe-se que um grande motivo de se utilizar principalmente a declividade, nos mapeamentos de fragilidade de média e grande escala, reside, principalmente, na dificuldade de obter a maioria dos parâmetros morfométricos para análise da dinâmica da vertente. Entretanto, nos últimos anos, o desenvolvimento de rotinas e procedimentos calcados no uso de modelos digitais de elevação ou *Digital Elevation Model* (DEM) e de técnicas computacionais, apresentam-se com possibilidade viável para melhoria do mapeamento da fragilidade, uma vez que permitem extrair com certa precisão e agilidade, diversos parâmetros numéricos do relevo. Esses parâmetros podem ser incorporados às metodologias tradicionais ou servir de base para a elaboração de novas propostas de modelagem da fragilidade, que consigam extrair de forma mais satisfatória a dinâmica funcional entre o interflúvio e fundo de vale de uma vertente.

Nesta perspectiva, a hipótese norteadora desta pesquisa é de que a inserção dos parâmetros morfométricos, obtido pelos modelos digitais de elevação, como dissecação fluvial, comprimento da vertente e forma do relevo (representada pela relação entre curvatura horizontal e vertical da vertente) trarão uma melhora significativa nos resultados da modelagem da fragilidade ambiental em média e grande escala, possibilitando correlacionar, de forma mais assertiva, os graus de fragilidade ambiental.

Por outro lado, observa-se que as metodologias utilizadas na identificação do grau de fragilidade ambiental, na maioria das vezes, focando principalmente na identificação de áreas frágeis aos processos erosivos, lineares e de movimento de massa apoiados na variável declividade, por exemplo, acabam por incorporar os fundos de vales como áreas de baixa fragilidade. Esse fato, pode induzir os planejadores a desconsiderarem estas áreas como sendo de grande fragilidade, principalmente com relação a solapamentos das margens dos canais fluviais e inundações. Espera-se que a proposta apresentada neste trabalho, incorpore os fundos de vales na classe de alta fragilidade ambiental.

A metodologia proposta neste estudo, além de trabalhar cada variável em mapas individuais, destaca a necessidade da geração de pesos, que possam

quantificar a importância de cada variável analisada. Muitos métodos consideram mesmos pesos para todas as variáveis, como se todas tivessem a mesma importância perante a formação dos processos. Por isto, este estudo, indica a aplicação de uma média ponderada, a qual considera a relevância real de cada variável. Ademais, os métodos tradicionais trabalham com intervalos rígidos de classes. O problema de se trabalhar com intervalos rígidos é a imprecisão dos dados, visto que não há rigidez na espacialização de fenômenos no espaço. Espera-se minimizar este problema com a aplicação da lógica de inferência *Fuzzy*, que permite mapear os intervalos de incertezas.

Desta forma, o objetivo geral desta pesquisa consiste em propor uma adaptação nas metodologias criadas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) para mapear fragilidade ambiental, acrescentando os parâmetros formas do terreno, dissecação fluvial e fator topográfico na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, MG.

Como objetivos específicos são propostos:

- georreferenciar e criar banco de dados dos indicadores de fragilidade ambiental;
- integrar variáveis ambientais por técnicas de álgebra de mapas em ambiente SIG;
- identificar cenários de fragilidade com diferentes graus de pertinência, utilizando operador de inferência *fuzzy* gama;
- analisar comparativamente os resultados obtidos com as metodologias propostas por Ross (1994). Crepani et al. (2001).

A área escolhida para aplicar a proposta metodológica apresentada neste trabalho é a bacia hidrográfica do Rio do Peixe, localizada no município de Nova Lima, MG. A definição da bacia hidrográfica como recorte espacial de estudo foi decorrente de ser considerada uma unidade fundamental de planejamento, reconhecida no arcabouço jurídico e institucional nacional e internacional. Do ponto de vista da Geografia, a bacia hidrográfica conserva seu valor como categoria de análise essencial na perspectiva da análise espacial, em especial devido a facilidade de interação da paisagem, englobando os subsistemas natural e construído (MOREIRA, 2015).

Neste trabalho, a bacia hidrográfica é entendida como um sistema complexo. Que a apresenta de forma integrada variáveis ambientais, como geomorfologia,

litologia, solos, clima, vegetação e o uso antrópico, articulados com a escala espacial e temporal, sendo do ponto de vista sistêmico um importante instrumento de pesquisa, planejamento e gestão, onde é possível analisar a interconectividade dos sistemas naturais.

Deste modo, as bacias conferem excelente campo para estudos de fragilidade ambiental, uma vez que seu estado de equilíbrio pode ser facilmente modificado, resultando em consequências que podem ser irreversíveis, dependendo do grau de impacto e da susceptibilidade da área.

A escolha da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe se deu pelo fato de constituir uma área com ambientes urbanos e rurais, onde os processos ambientais e as interações físicas e sociais podem ser melhor analisados e compreendidos. O relevo da bacia com grandes amplitudes altimétricas, e formas de terreno variadas, configura-se como uma área apta a testar a proposta de modelagem da fragilidade ambiental objeto desta pesquisa. Trata-se de uma unidade de planejamento em que se encontram condições oportunas para avaliação integrada das ações antrópicas e suas consequências no equilíbrio dinâmico.

Nesta perspectiva, a análise da fragilidade dos ambientes naturais possui uma relevância significativa, tendo em vista que seu mapeamento possibilita identificar as áreas vulneráveis à ação antrópica e suas potencialidades, fragilidades dentro da visão sistêmica, contribuindo assim, na definição das áreas que apresentam susceptibilidade de risco, proporcionando, portanto, melhores diretrizes e ações a serem adotadas e fornecendo subsídios ao planejamento e gestão territorial de bacias hidrográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A concepção sistêmica está diretamente atrelada a proposta de estudo da modelagem de fragilidade ambiental, que no contexto do trabalho baseia-se em compreendê-la não apenas como uma simples adição de elementos geográficos desconexos, e sim como resultado da combinação dinâmica, de elementos físicos, bióticos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução.

A proposta deste estudo está embasada na abordagem sistêmica (Bertalanfy, 1935), com as suas contribuições. A partir da abordagem sistêmica vários modelos metodológicos foram formulados, na Geografia, Sotchava em 1960 propõe a Teoria dos Geossistemas. A proposta consistia na classificação das paisagens naturais através de parâmetros biogeográficos definidos em nível planetário, regional e topológico. Posteriormente, na França, em 1968, Bertrand conferiu ao geossistema uma nova classificação caracterizada como espaço-temporal, pois contempla níveis taxonômicos diferenciados em Unidades Superiores (Zona, domínio e Região Natural) à Unidades Inferiores (Geossistemas, Geofáceis e Geótopo) (NASCIMENTO et al., 2005).

Posteriormente tem-se a proposta metodológica da ecodinâmica (TRICART, 1977), materializados nos trabalhos de Ross (1994) e Crepani et al. (2001) que viabilizam a compressão da relação entre potencial ecológico (clima, hidrografia, geomorfologia, solo vegetação), exploração biológica (vegetação, solo e fauna) e a ação antrópica, bem como no processo de espacialização como resultado da integração necessária na análise da fragilidade e potencialidade ambiental.

2.1 - Abordagem sistêmica como suporte para o mapeamento da fragilidade ambiental

Este estudo propõe analisar a fragilidade ambiental por meio da abordagem sistêmica, dos processos naturais e antrópicos atuantes no meio ambiente. A abordagem sistêmica, mesmo apresentado limitações, é um importante instrumento para analisar o meio ambiente, permitindo a adoção de uma atitude dialética entre a necessidade da análise de detalhe e de uma visão de conjunto. O conceito de sistema apresenta um caráter dinâmico, adequado para fornecer os conhecimentos básicos para uma atuação no meio (TRICART, 1977).

A análise dos fenômenos geográficos tem sido organizada desde o século XVII, no mundo ocidental, por meio de dois tipos de procedimentos, as abordagens reducionista e holística (CHRISTOFOLETTI,1999).

A abordagem reducionista, também chamada de mecanicista, é explicada frequentemente, por analogia ao funcionamento de um relógio mecânico por meio do entendimento de suas partes (CAPRA,2006). Para Kasper (2000), os sistemas mecânicos, assim como os relógios, são o principal produto da ciência clássica, que constituiu a base para a revolução industrial. Looijen (1998), ressalta que do ponto de vista metodológico, todo pesquisador é reducionista em algum grau, pois precisa delimitar espacialmente e temporalmente a pesquisa. A abordagem reducionista foi o principal legado da concepção cartesiana, onde qualquer fenômeno pode ser explicado a partir de causas particulares movendo-se em direção as causas mais gerais.

A abordagem holística surgiu, a partir dos séculos XVI e XVII, principalmente nos estudos de Johannes Kepler, Nicolau Copérnico, Galileu Galilei, René Descartes e Issac Newton. A partir dos trabalhos de René Descartes, na obra Discurso do Método (1637), a ciência inicia uma análise dos sistemas a partir de suas partes, ou seja, dividir um problema em tantas partes quantas forem possíveis e necessárias, levando as áreas do conhecimento científico à fragmentação dos objetos de estudos, conduzindo à compartimentação dos campos e às especializações. Toda a complexidade do universo pode ser explicada a partir de seus componentes elementares, cujas relações são determinadas por causa e efeito.

A emergência do pensamento holístico surge como resposta a incapacidade da ciência analítica de lidar com as diversas formas de complexidade. O conceito surge pela primeira vez através de Jan Smuts, pesquisador sul-africano, em 1926. As ideias do pensamento holístico foram sufocadas inicialmente pelas ideias ligadas ao misticismo e vitalismo. Posteriormente, ao longo do século XX, o termo foi resgatado e hoje vem sendo amplamente utilizado nos estudos de geografia física.

Segundo Capra (2005) o pensamento sistêmico surgiu a partir de concepções holísticas em oposição às mecanicistas. O autor cita que o importante antecessor do pensamento sistêmico foi o filósofo Immanuel Kant (1790) que introduziu a noção de auto-organização, como importante característica distintiva dos sistemas vivos.

Percebe-se que a concepção de utilizar unidades complexas, como um todo de natureza integrada, representando entidades interativas de lugares e regiões não é novidade na Geografia (GLACKEN, 1967, *apud* CHRISTOFOLLETTI, 1999). A concepção holística constituiu a base para os trabalhos do geólogo escocês James Hutton e do naturalista alemão Alexander Von Humboldt, importantes formuladores de ideias a respeito da unidade do planeta como um ecossistema. Humboldt, antecipou modernas formulações sistêmicas, nas quais os seres vivos e o clima são resultados de um processo de coevolução.

A utilização do termo sistema, representando um conjunto de elementos e de interações é antigo e disperso no conhecimento científico. Entretanto, a preocupação em se realizar abordagem sistêmica conceitual e analítica rigorosa, surgiu primeiramente na Biologia, na década de 1930. O termo já era usado para designar os sistemas biológicos. Posteriormente a abordagem foi absorvida e adaptada por outras disciplinas do conhecimento.

Para Capra (2006), no início do século XX, a ciência biológica foi marcada por disputas teóricas entre a corrente mecanicista e corrente vitalicista, na qual a força não física (vital) deveria ser acrescida as leis da física e da química para explicar a vida de modo geral. Deste conflito surge uma terceira corrente teórica, denominada biologia orgânica, como alternativa as limitações impostas por estas duas primeiras correntes. Os biólogos organicistas foram pioneiros na formatação de conceitos presentes na origem do pensamento sistêmico, tais como:

- *organização* como padrão de relações;
- *ciência* que passou a significar um “todo”, cujas propriedades tem origem da organização das relações entre as partes;
- *pensamento sistêmico*, como compreensão de um fenômeno dentro de um contexto, estabelecendo a totalidade das interações, em oposição a relações causais simples entre partes isoladas;
- *complexidade* organizada para classificar diversos tipos e níveis de complexidade que podem ser descritos pelo sistema
- *hierarquia*, como tendência dos sistemas vivos de estrutura-se em múltiplos níveis
- *propriedades emergentes* como designação das propriedades, qualidades e comportamento pelas quais são identificados e descritos os fenômenos complexos pelo conceito sistema.

O pensamento sistêmico, denominado em 1937 pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy como Teoria Geral dos Sistemas (TGS), tem como objetivo auxiliar na interpretação da complexidade que explica a organização de um sistema espacial,

com base nas interações que se processam entre seus componentes e que lhes confere caráter dinâmico.

É necessário estudar não somente partes e processos isoladamente, mas também resolver os decisivos problemas encontrados na organização e na ordem que os unifica, resultante da interação dinâmica das partes, tornando o comportamento das partes diferentes quando estudado isoladamente e quando tratado no todo (BERTALANFFY, 1973, p.53).

A TGS pressupõe uma interpretação integrada da natureza exigindo visões abrangentes em contraponto às reducionistas. A ideia de fragmentação leva a uma interpretação incompleta das relações de interdependência entre as partes de um todo. Nestas perspectivas, os termos comunicação e a organização dos sistemas são conceitos centrais na proposição da TGS.

A TGS foi a primeira tentativa de desenvolvimento das ideias sistêmicas como um novo paradigma de referência do conhecimento científico. Para Rapaport (1976) a TGS foi idealizada para ser uma nova perspectiva geral para a ciência, sem a pretensão de ser uma nova disciplina. Para Capra (1999), a TGS representou uma revolução na história do pensamento científico ocidental.

De acordo com Bertalanffy (1973), foi somente a partir de meados do século XX, após a segunda grande guerra mundial e com as transformações tecnológicas, que houve a possibilidade da adoção do pensamento sistêmico em diversas áreas do conhecimento científico.

Bertalanffy (1973) define a TGS como uma disciplina logico-matemática, puramente formal, mas aplicável às várias ciências empíricas, tendo como objetivo principal investigar as características gerais dos sistemas, desenvolvendo modelos aplicáveis a diversas áreas do conhecimento científico.

A TGS possui a organização e funcionamento baseada nos sistemas vivos contemplada pela teoria dos sistemas abertos. As concepções da teoria dos sistemas abertos foram propostas por Bertalanffy (1950) a partir da distinção entre sistemas fechados e abertos, nos quais ocorrem trocas de matéria e energia com o seu ambiente de entorno.

A teoria dos sistemas abertos contribuiu para diminuir o paradoxo que intrigava os cientistas a época, principalmente quanto ao segundo princípio da termodinâmica. Pela TGS, a primeira lei da termodinâmica, ou o princípio da conservação de energia,

postula que um sistema não pode criar ou consumir energia, mas apenas armazená-la ou transferi-la ao meio onde se encontra; na segunda lei, a quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a incrementar-se com o tempo, até alcançar um valor máximo. A energia, espontaneamente, sempre se desloca de níveis mais altos para níveis mais baixos, ou dos corpos mais quente para o mais frio, nunca o contrário.

O princípio da segunda Lei da Termodinâmica sugere que todos os sistemas físicos evoluem para estado de maior entropia, ou, para estados de maior desordem, levando a desconstituição de todas as formas organizadas existentes na natureza. Este postulado, entra em contradição com as observações empíricas quando se aplica aos seres vivos.

Este paradoxo foi resolvido quando Bertalanffy reconheceu que os sistemas abertos não obedecem ao princípio da segunda lei da termodinâmica, mas somente os sistemas fechados. Para Bertalanffy (1973), a propriedade fundamental de todo sistema aberto é a capacidade de manter o estado organizado e realizando trocas contínuas de matéria e energia com o ambiente. Conclui-se que a estabilidade de um sistema aberto é distinta do equilíbrio de um sistema fechado.

A estabilidade no sistema aberto ocorre por meio de processos que o mantem em um estado de equilíbrio dinâmico, demonstrando uma capacidade de compensar alterações temporárias do meio através de flutuações reversíveis de seus estados internos e de mecanismos de autorregulação, permitindo adaptações a novas situações.

Portanto, a partir das concepções de Bertalanffy (1973), ocorreram vários avanços acompanhados de críticas nos estudos dos sistemas, entre os quais destaca-se Morin (1977) acerca da estrutura e complexidade dos sistemas e da abordagem sistêmica como método de interpretação conjunta da realidade.

Para Morin (1977), a TGS é insuficiente no que concerne a uma reflexão sobre o próprio conceito de sistema. O sistema aparece como um conceito-apoio e, como tal, de Galileu até meados do nosso século, não foi estudado nem refletido. Podemos compreender por que motivo: ora a dupla e exclusiva atenção dada aos elementos constitutivos dos objetos e às leis gerais que os regem impedem toda a emergência da ideia de sistema; ora a ideia emerge fracamente, subordinada ao caráter sui generis dos objetos encarados disciplinarmente. Assim, no seu sentido geral, o termo

“sistema” é uma palavra-envelope; no seu sentido particular, adere totalmente à matéria que o constitui: portanto, é impossível conceber qualquer relação entre os diversos empregos da palavra “sistema”: sistema solar, sistema atômico, sistema social; a heterogeneidade dos constituintes e dos princípios de organização entre sistemas estelares e sociais é de tal modo evidente e impressionante que aniquila qualquer possibilidade de unir as duas acepções do termo “sistema” (MORIN, 1977, p. 98).

Neste sentido, cada ramo do conhecimento científico se apoia no conceito de sistema na delimitação de seu objeto. Estabelece-se então que o geossistema é o sistema do geógrafo, o ecossistema, do biólogo, o corpo humano e seus subsistemas a grandeza sistêmica dos estudiosos das ciências médicas e assim por diante (MARQUES NETO, 2008).

Morin (1977) define um sistema como uma inter-relação de elementos que constituem uma entidade ou unidade global. Ressalta-se o fato de que não basta associar inter-relação e totalidade, é preciso ligar os dois elementos por intermédio da ideia de organização. Para o referido autor, um sistema possui dinâmica alicerçada em manifestações recíprocas de ordem e desordem que atuam conjuntamente no processo de organização do sistema.

Na medida que se entende o sistema por alguma forma de interação ou interdependência e cujas unidades são reciprocamente organizadas e relacionadas, há uma necessidade de adotar um princípio organizativo e de comunicação em todos os sistemas. Então, o autor considera que existam sistemas dentro de sistemas, que podem ser classificados como subsistemas.

Para Morin (1977), o segundo princípio da termodinâmica e a ideia de entropia devem sempre ser associados à nova e complexa concepção da natureza enquanto fonte de progresso, evolução e do universo que abarca, inserida num conjunto de processos que traduzem ordem/desordem/interação/organização. É necessário que haja interações, cuja ocorrência depende dos encontros gerados por manifestações de desordem (agitação, turbulência). Neste sistema complexo, processos de ordem/desordem/interações/organização são eventos que estruturam a busca do equilíbrio-dinâmico. Neste contexto, cada um destes processos não pode ser concebido isoladamente aos outros (MARQUES NETO, 2008).

A complexidade sistêmica definida por Morin (1977) tem por propriedade apresentar alternativas interpretativas para a lei da entropia máxima, que prevê uma inexorável e gradativa passagem de um estado de ordem para uma situação de desordem no sistema. Segundo o autor, a primeira e fundamental complexidade do sistema consiste na conjugação da unidade e da diversidade, propondo que um sistema é uma unidade global, não elementar, visto que é constituído por partes diversas e inter-relacionadas.

O conceito de sistema como método de pesquisa da Geografia Física foi incorporado pela corrente de pensamento da Geografia Teorético quantitativa, na década de 1960, principalmente, por CHORLEY (1962). Entretanto, a concepção sistêmica nos estudos em geografia, pode ser detectado nos trabalhos de Alexander Von Humboldt no final do século XVIII, que através do conceito de *Landschaft*, considerava o meio em sua totalidade, com funcionamento mediante as interrelações vigentes entre seus componentes, já evidenciando o processo de ruptura entre o paradigma reducionista de interpretação do meio ambiente.

Os estudos geográficos, a partir da abordagem geossistêmica de Sotchava (1962) e dos trabalhos de Chorley e Kenedy (1971), contribuíram para a consolidação da abordagem sistêmica na Geografia Física.

A abordagem sistêmica nos estudos geográficos teve início na escola soviética dos anos de 1960/70, que preocupada com a necessidade de reordenamento do território, partiu de uma base essencialmente ecológica, considerando os aspectos relacionados com a vegetação e o uso da terra e a relação com o meio em que se inserem.

Essa linha de pensamento surgiu nos estudos do pedólogo russo Dokuchaev (1893), que influenciado pela escola alemã, desenvolveu o conceito de paisagem natural. Este conceito serviu de base para a formulação das ideias geossistêmicas na década de 1960, tendo como expoente Viktor Borisovich Sotchava.

Os geossistemas são os sistemas naturais, de nível local, regional ou global, nos quais o substrato mineral, o solo, as comunidades de seres vivos, a água e as massas de ar, particulares às diversas subdivisões da superfície terrestre, são interconectados por fluxos de matéria e de energia, em um só conjunto (SOTCHAVA, 1978, P. 19).

Apesar da concepção do conceito de geossistema estar alicerçado nos sistemas naturais, percebe-se uma conexão entre elementos biofísico e a esfera

socioeconômica. Sothva (1978), propõe uma hierarquização taxonômica para o estudo das manifestações espaciais, numa grandeza escalar que ocorre do nível planetário ao topológico, passando por uma escala regional. Esta escala taxonômica possui duas categorias interdependentes que atuam na estruturação do geossistema, designadas de geômeros (estruturas homogêneas) e geócoros (estruturas heterogêneas).

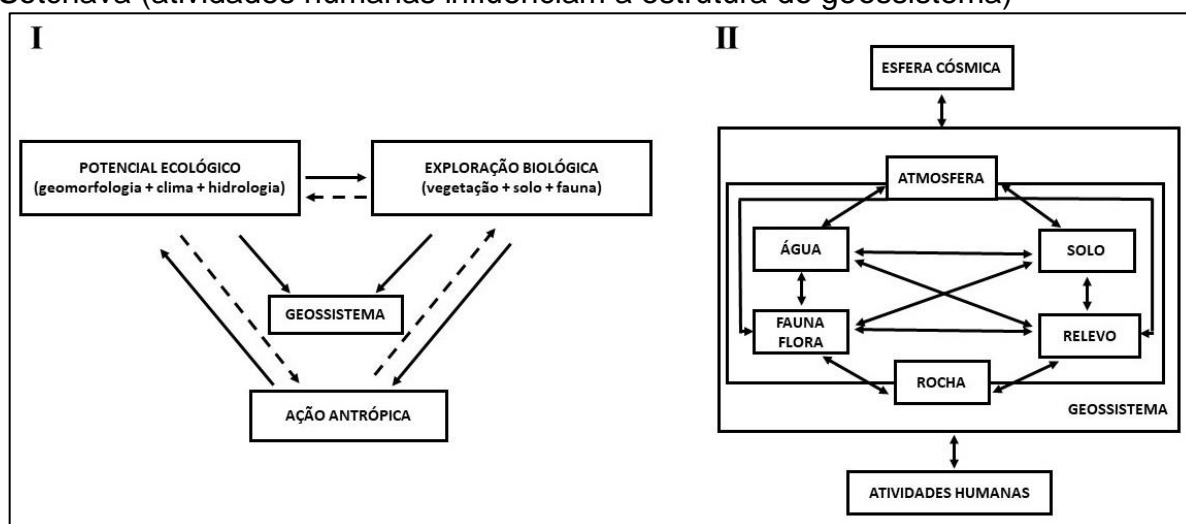
Mesmo observando a existência da discussão de escalas de grandeza, a concepção de geossistema é preferencialmente aplicável ao estudo de extensas áreas, como as planícies siberianas, base empírica para formulação do conceito. Por outro lado, Bertrand (1971), da escola francesa, propôs uma discussão integrada entre os conceitos de geossistema e de paisagem enquanto categorias de análise em geografia.

A paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados. É, numa determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução (BERTRAND, 1971, p. 2).

Bertrand (1971) utiliza os fundamentos conceituais do geossistema de Sothava (1963), incorporando a dimensão da ação antrópica, como sendo uma categoria espacial de componentes relativamente homogêneos, cuja dinâmica resulta da interação entre o potencial ecológico, a exploração biológica e a ação antrópica (ROSOLÉN, 2010) (Figura 1).

Tricart (1977, p. 25), define sistema como sendo um *conjunto de fenômenos que se processam mediante fluxos de matéria e energia*. Ao analisar a paisagem sobre a ótica da teoria dos sistemas, enfatiza que a energia e a matéria se processam no sistema através de relações de equilíbrio dinâmico. O equilíbrio pode ser alterado com frequência por fatores naturais ou pela intervenção antrópica, gerando desequilíbrios temporários ou permanentes. Como consequência, cada sistema apresenta propriedades que lhe são inerentes e diferem da soma das propriedades de cada um de seus componentes. Cada sistema tem a sua dinâmica própria.

Figura 1 – Modelo geossistêmico proposto por Bertrand (ação antrópica com a mesma dimensão da organização do ecossistema). II – Modelo geossistêmico proposto por Sotchava (atividades humanas influenciam a estrutura do geossistema)



Fonte: adaptado de Bertrand (1971).

Tricart (1977), propõe que cada fenômeno presente num determinado sistema, pode ser analisado como sendo um sistema, convencionalmente denominado de subsistema. Quanto a escala, não a limite inferior para descoberta de novos sistemas, sendo o limite superior o Universo. O estudo do sistema e subsistemas deve obedecer a uma escala taxonômica.

Monteiro (2000), define o Geossistema como singular e complexo, onde ocorre uma interação de elementos humanos, físicos, químicos e biológicos. Nesta dinâmica, os elementos socioeconômicos não são antagônicos, mas ao contrário, são partes integrantes e essenciais no funcionamento do sistema. Troppmair (1998) define a paisagem como um sistema espacial dinâmico constituído de elementos naturais e socioeconômicos. A paisagem pode ser independente da ação antrópica. Mas se o ser humano estiver presente, pode introduzir modificações, podendo gerar desequilíbrios no sistema.

Oliveira (2003), afirma que o geossistema representa um conjunto orgânico e dinâmico composto por elementos bióticos, abióticos e antrópicos regido por relações variáveis no tempo e no espaço, ao passo que a paisagem seria a materialização de um estado do geossistema através de uma combinação particular e histórica de seus constituintes.

Além do esboço teórico-metodológico do geossistema, a abordagem sistêmica associada a categoria paisagem viabilizou uma ampla elaboração de modelos e

metodologias que apresentam os princípios básicos da análise integrada como a Ecodinâmica de Tricart (1977), que utilizando bases teóricas da Ecologia e agregando instrumental lógico dos sistemas, estabeleceu relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e os fluxos de energia e matéria no meio ambiente.

Percebe-se que as iniciativas de Shotchava com os geossistemas, modificada por Bertrand, e de Tricart (Ecodinâmica), baseadas na TGS ainda são largamente utilizadas nos estudos de fragilidades ambientais. Apesar de críticas, as iniciativas incorporam os elementos do mundo humano em suas abordagens constitui um importante métodos para estudo do meio físico na Geografia (MENDONÇA, 1993).

Pra Drew (1989), o grau de instabilidade em um sistema depende da tensão aplicada pelo ser humano e do grau de susceptibilidade natural do próprio sistema. Neste contexto o mapeamento da fragilidade ambiental através de uma análise integrada dos seus componentes possibilita classificar o sistema em diferentes graus de fragilidade, através do reconhecimento de áreas mais estáveis e áreas menos estáveis, que devido às suas características naturais, podem ser alteradas em menor ou maior grau.

2.2 - Fragilidade Ambiental

As condições de equilíbrio do sistema ambiental podem ser alteradas em um de seus componentes, na troca de energia e matéria, gerando a fragilidade¹. Em muitas pesquisas o termo fragilidade ambiental. Risco ambiental, vulnerabilidade, sensibilidade ambiental aparecem como sinônimos.

Segundo Ramos et al. (1987), por fragilidade ou vulnerabilidade do meio ambiente se entende o grau de suscetibilidade ao dano, ante a incidência de determinadas ações. Tagliane (2003) define vulnerabilidade ambiental como a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer.

Spörl (2007) define o termo fragilidade do meio ou risco ambiental, como o perigo ou possibilidade de perigo ou perda, que estão vinculadas à percepção humana

¹ característica do que é frágil, do que se quebra facilmente. Tendência natural para quebrar (Dicionário Houaiss).

da dinâmica da natureza. O indutor do processo de desequilíbrio pode ser de ordem natural ou antrópica.

Becker e Egler (1997) e Câmara *et al.* (2001) afirmam que a análise da fragilidade ambiental é fundamental para as ações de planejamento, ordenação e monitoramento visando uma ocupação racional do espaço e um uso sustentável dos recursos ambientais.

A análise da fragilidade ambiental auxilia no diagnóstico-síntese, agindo como um norteador de intervenções antrópicas futuras e remediando as intervenções presentes. Sendo um instrumento importante para subsidiar o planejamento territorial na definição de ações e tomadas de decisões, assegura o uso sustentável do meio. Diante do exposto, Guerra e Cunha (1995, p. 52) afirmam que:

O conhecimento das potencialidades dos recursos naturais de um determinado sistema natural passa pelos levantamentos dos solos, relevo, rochas e minerais, das águas, do clima, da flora e fauna, enfim, de todas as componentes do estrato geográfico que dão suporte à vida animal e ao homem. Para análise da fragilidade, entretanto, exige-se que esses conhecimentos setorializados sejam avaliados de forma integrada, calcada sempre no princípio de que na natureza a funcionalidade é intrínseca entre as componentes físicas, bióticas e sócio-econômicas. As fragilidades dos ambientes naturais devem ser avaliadas quando se pretende aplicá-las ao planejamento ambiental, baseando-se nos conceitos de Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977). Dentro dessa concepção ecológica o ambiente é analisado sob o prisma da Teoria dos Sistemas que parte do pressuposto de que na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações de equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio, entretanto, é frequentemente alterado pelas intervenções do homem nas diversas componentes da natureza, gerando estado de desequilíbrio temporário, ou até permanentes. Diante disto Tricart (1977) definiu que os ambientes, quando estão em desequilíbrio são instáveis.

Para Tricart (1977), as potencialidades e fragilidades dos ambientes estão relacionadas com a interrelação das variáveis em uma escala temporal. O referido autor, propõe uma metodologia para estudo da dinâmica dos *ecótopos*, que denominou de *Ecodinâmica*, que se caracteriza por apresentar uma certa dinâmica do meio ambiente com repercussões imperativas sobre as biocenoses. Neste sentido, a morfodinâmica é determinante na análise, uma vez que depende do clima, da topografia e do material rochoso.

Tricart (op. cit.) define três grandes tipos de meios morfodinâmicos, em função das intensidades dos processos atuantes: meios estáveis, meios intergrades e os fortemente instáveis. Nos *meios estáveis*, o modelado evolui com atuação lenta dos

processos mecânicos de erosão, com pouca dissecação. Como estas condições são consideradas as melhores para a formação dos solos, favorecendo a *pedogênese*.

Os meios morfodinamicamente estáveis, encontram-se em regiões dotadas de uma série de condições como cobertura vegetal densa que freia o desencadeamento de processos mecânicos da morfogênese; dissecação moderada, com pouca incisão dos cursos d'água, com lenta evolução das vertentes e ausência de tectonismo e atividades vulcânicas. A estabilidade faz com que o ambiente se aproxime de uma condição de *clímax*.

Os *meios intergrades*, ou de transição, asseguram a passagem gradual entre os meios estáveis e os meios instáveis, sem cortes, na presença de um contínuo. Esse meio é caracterizado por uma interferência de maneira concorrente e permanente de *morfogênese* e *pedogênese* em um mesmo espaço

Os *meios fortemente instáveis*, a morfogênese, é o elemento predominante na dinâmica natural, ao qual os demais elementos estão subordinados. A geodinâmica interna intervém em números casos, em particular no vulcanismo, cujos efeitos são mais imediatos do que os das deformações tectônicas. A cobertura vegetal também intervém, introduzindo uma influência indireta do clima, sendo a maior instabilidade realizada nas regiões de forte instabilidade climática. Nestes meios, as atividades antrópicas atuam como indicativo de desequilíbrio ambiental, contribuindo no desencadeamento dos processos erosivos. Levando em consideração os processos físicos-ambientais, a ação antrópica é descuidada e destrutiva,

Segundo Spörl (2007), os modelos de fragilidade/vulnerabilidade ambiental se subdividem em dois tipos: quantitativos e qualitativos. Os modelos quantitativos se baseiam em medições e experimentos, enquanto os modelos qualitativos são empíricos e baseados na experiência dos especialistas. Um exemplo de modelo quantitativo é a Equação Universal de Perdas do Solo – EUPS (WISCHMEIER e SMITH, 1978), modificada por Willians (1975) e ajustada para o território brasileiro por Lombardi e Neto et al. (1994), utilizada para predição de perdas de solos, quantificando os fenômenos de erosão. Os modelos qualitativos ou empíricos avaliam o fenômeno de erosão segundo sua origem e evolução, analisando os condicionantes e mecanismos que podem explicar seu surgimento e evolução.

Dentre os modelos qualitativos, amplamente utilizados na análise ambiental, dois se destacam, os propostos por Ross (1994) e Crepani et al. (2001). Esses

modelos têm como suporte metodológico o conceito de Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977).

Para Ross (op. cit.), as fragilidades naturais devem ser avaliadas quando se pretende aplicá-la ao planejamento territorial ambiental, pois as intervenções antrópicas nos diversos componentes da natureza, gera um estado de desequilíbrios temporários ou até permanentes.

Ross (op. cit.) propõe o modelo de Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados, atribui critérios para classificar as Unidades Ecodinâmicas utilizando o conceito de Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial e de Instabilidade Emergente classificadas em distintos graus de fragilidade.

As Unidades de Instabilidade Potencial apresentam uma propensão natural para manifestação de processos que possam alterar a dinâmica que mantém seu equilíbrio. Em áreas de relevo íngreme com solos pouco evoluídos e rasos, por exemplo, os processos erosivos possuem uma maior tendência a ocorrer.

Nas Unidades de Instabilidade Emergente, além da possível predisposição natural do ambiente em ser alterado, as intervenções antrópicas podem intensificar a fragilidade natural do ambiente. Uma das principais características da ação humana, é a supressão da cobertura vegetal original impondo mudança no uso e ocupação da terra. Utiliza da álgebra entre variáveis naturais e antrópicas para mapear a estabilidade das diferentes unidades ecodinâmicas, tais como relevo, classes de solo, pluviosidade, cobertura vegetal e uso e ocupação da terra.

O autor propõe que para escalas médias e pequenas (1:50.000, 1:100.000, 1:250.000) deve-se utilizar como base de informação os padrões de formas com a rugosidade topográfica ou os Índices de Dissecação do Relevo, enquanto para análises de maior detalhe (1:25.000, 1:10.000, por exemplo) utilizam-se as formas de vertentes e as classes de declividade (ROSS, 1994). Além da geologia, que foi citada, mas não definida nessa proposta, outras variáveis como, por exemplo, práticas de manejo podem ser incluídas na análise da fragilidade e geração da carta síntese.

As variáveis temáticas são classificadas em cinco categorias hierárquicas, de acordo com a fragilidade. A partir da hierarquização em classes é possível determinar as áreas consideradas com maior criticidade de fragilidades potencial e emergente. Assim, o autor classificou as unidades em cinco níveis hierárquicos diferentes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, como demonstrado na tabela 1.

Tabela 1 – Unidades Hierárquicas de Fragilidade Ambiental

Unidade de Fragilidade	qualitativo	valor
Fragilidade Ambiental	Muito Baixa	1
	Baixa	2
	Média	3
	Alta	4
	Muito Alta	5

Fonte: Ross (1994)

Para Ross (1994, p.73):

A análise da fragilidade ambiental é uma proposta de classificação cujo princípio básico é definir os diferentes níveis de fragilidade dos ambientes naturais e/ou modificados pelas atividades antropogênicas em face dos desenvolvimentos das atividades humanas. As unidades de fragilidade ambiental são importante instrumento de subsídio ao planejamento ambiental e territorial, já que a identificação dos ambientes naturais e suas fragilidades potenciais e emergentes permite melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas no espaço.

Crepani et al. (2001) desenvolveram uma metodologia para geração de cartas de Vulnerabilidade Natural à perda de Solo, para subsidiar o zoneamento da Amazônia, fundamentada no conceito de Ecodinâmica, de Tricart (1977), e nas potencialidades das imagens de satélites para estudos integrados.

Os critérios desenvolvidos por Crepani et al. (op.cit), fundamentados nas categorias morfodinâmicas do meio estável, meios intergrades e meios fortemente instáveis, permitiram a criação de um modelo no qual se buscou a avaliação, de forma empírica, do estágio da morfodinâmica da unidade de paisagem, denominada Unidade Territorial Básica (UTB). Os valores de estabilidade foram então atribuídos às três categorias morfodinâmicas, conforme apresentado na tabela 2. Nessa análise, quando predomina a morfogênese, prevalecem os processos erosivos, modificadores do relevo e quando predomina a pedogênese, prevalecem os processos formadores do solo.

Tabela 2 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas.

Categoria Morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intergrade	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2
instável	Prevalece a morfogênese	3

Fonte Crepani et al. (2001)

A partir desta primeira aproximação, desenvolveram uma escala de vulnerabilidade a perda do solo composta de 21 classes, distribuídas entre situações em que há predomínio de processos de pedogênese (com valores próximos a 1,0), passando por situações intermediária (valores próximos a 2,0) e situações com

predomínio de processos de morfogênese (valores próximos a 3,0) Para Crepani et al. (2001, p.13):

Para se analisar uma unidade de paisagem natural é necessário conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, bem como o tipo da cobertura vegetal que sobre ela se desenvolve. Estas informações são fornecidas pela Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Fitogeografia e precisam ser integradas para que se tenha um retrato fiel do comportamento de cada unidade frente à sua ocupação.

O ponto em comum entre os modelos apresentados por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) é a utilização da inter-relação dos elementos do meio físico. Entretanto apesar de utilizarem as mesmas variáveis apresentam diferentes formas de calcular a fragilidade por notas e pesos distintos, sendo que Ross (1994) agrupa as demais variáveis adotando o relevo como componente principal. Crepani por outro lado incorpora a variável geologia em sua análise.

As características do relevo (geologia, dissecação fluvial, declividade), o clima (com ênfase na pluviosidade), tipos de solos e a cobertura vegetal e uso da terra são variáveis mais utilizadas nos estudos de fragilidade ambiental. Como é proposta deste estudo incorporar as variáveis Forma do relevo (curvatura vertical e horizontal) e comprimento da vertente, para análise da fragilidade ambiental, faz-se necessário uma breve revisão conceitual do conceito de vertente dentro de uma perspectiva morfométrica.

2.3 Variáveis Morfométricas Forma da Vertente e Comprimento da Vertente aplicados no mapeamento da Fragilidade Ambiental

A morfometria refere-se ao aspecto quantitativo das variáveis do relevo. As principais variáveis morfométricas para estudos integrados do meio ambiente são: altitude (hipsometria), amplitude altimétrica, comprimento da vertente, declividade curvatura vertical, curvatura horizontal e aquelas que indicam o grau de dissecação do relevo, como densidade de drenagem, amplitude interfluvial e intensidade de aprofundamento da drenagem. (FLORENZANO,2008)

O uso das variáveis como curvatura da vertente, declividade e comprimento da vertente são mais indicadas para estudos de detalhe, em escala compatível com o nível da forma ou dos setores da forma do relevo. As variáveis associadas a dissecação do relevo são mais adequadas na caracterização de unidades de paisagem.

O estudo das vertentes, análise das formas e mecanismos de evolução, constitui um dos setores mais importantes na determinação da fragilidade de um ambiente. As vertentes abrangem maior parte da paisagem, fornecendo água e sedimentos para os canais fluviais que drenam as bacias hidrográficas. Os diferentes processos que agem nas vertentes dependem de uma série de fatores, incluindo pluviosidade, cobertura vegetal, litologia e tipo de solo. Consequentemente apresentam grande variedade de formas, sendo difícil estabelecer uma generalização.

A forma da vertente representa um determinado processo predominantemente envolvido na sua formação implicando no desenvolvimento de um perfil de equilíbrio, o qual uma vez atingido, a vertente diminui por erosão mantendo a forma. Via de regra, o relevo apresenta tipos de vertentes diversificados, desde superfícies planas, suavemente inclinadas, próximas a horizontal até superfícies retilíneas, escarpas, quase verticais (BIGARELLA, 2003)

Em sentido amplo, vertente significa superfície inclinada, não horizontal, sem apresentar qualquer conotação genética ou locacional. Entretanto surge a necessidade de uma definição mais precisa para as vertentes. Conforme Dylik (1968) a vertente é uma forma tridimensional que foi modelada por processos de denudação, atuantes no presente ou no passado, e representando a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo do vale. Christoffoletti (1994) elenca os elementos que o levaram o autor (op. cit.) a propor a definição:

- A) o limite inferior da vertente somente possui um valor de orientação, pois o leito de um rio não pode defini-lo senão em casos excepcionais. Como são os processos morfogenéticos que determinam a natureza da vertente, esta termina justamente onde os processos que lhe são próprios deixam de atuar, sendo substituídos por outros;
- B) o limite superior da vertente é muito difícil de precisar. Nem sempre se pode identificá-lo com a linha de partilha das águas, mas o limite superior deve indicar a extensão mais distante e mais elevada da superfície de onde provém um transporte contínuo de materiais sólidos para a base da vertente;
- C) o limite que lhe dá a terceira dimensão, é constituído pelo embasamento rochoso ou pela superfície de ataque da meteorização. Por outro lado, a cobertura de depósitos correlativos apresenta certa espessura, testemunhando os processos morfogenéticos que modelaram a vertente em um passado mais ou menos remoto.

Nessa perspectiva, surge a quarta dimensão, a tempo-espacial, que enriquece a noção de vertente;

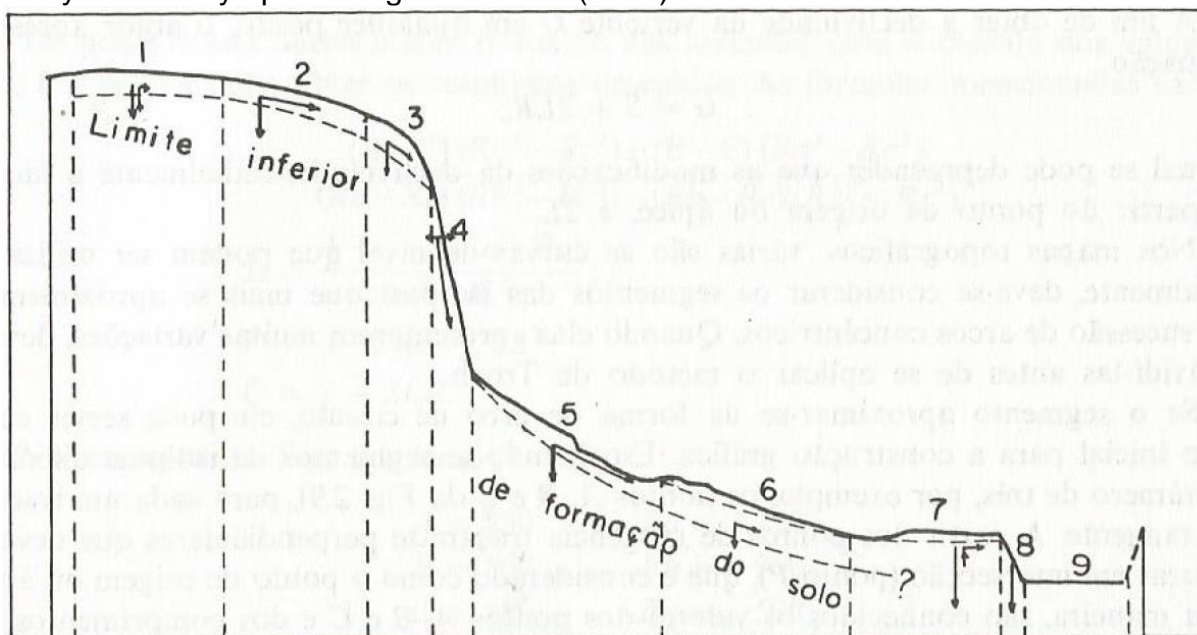
D) o processo atuante é representado pelo escoamento que ocupa posição excepcional em relação aos demais processos. O escoamento é um grupo de processos que abarca uma série de mecanismos, desde os que estão próximos aos movimentos de massa até os que se assemelham aos processos fluviais. Tais processos morfogenéticos são responsáveis pela dinâmica e pelo relacionamento funcional de todas as partes da vertente.

Em geral, o segmento convexo do perfil da vertente é controlado pelos movimentos de massa, em especial o rastejamento, predominante nas porções superiores das vertentes cobertas de vegetação. Nas porções concavas o rastejamento é superado pela ação do transporte superficial laminar ou concentrado. O segmento retilíneo intermediário parece ter sido formado durante episódios de erosão rápida. (BIGARELLA, op. cit.)

Strahler (1950) identifica três tipos de vertentes erosivas de acordo com ângulo de repouso do material: I Vertentes em repouso, dentro dos limites do ângulo de repouso; II vertentes de alta coesão, elaborada comumente em material rochoso, representando maiores declividades; III vertentes reduzidas pelo escoamento difuso e rastejamento, em declividades suaves.

Ao considerar as vertentes como sistemas complexos tridimensionais, que se estende do interflúvio até o meio do leito fluvial, da superfície do solo ao limite das rochas não intemperizadas Dalrymple. Blong e Conacher(1968) propuseram uma classificação, distinguindo nove unidades hipotéticas. Cada uma sendo em função da forma e dos processos morfogenéticos dominantes e atuantes sobre elas. As nove unidades hipotéticas no modelo de vertentes apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968) são representadas na figura 2 e no quadro 1.

Figura 2 - As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymore Dalrymple. Blong e Conacher(1968).



As setas indicam a direção e intensidade relativa do movimento da rocha intemperizada e dos materiais do solo pelos processos geomórficos dominantes). As características de cada unidade são apresentadas no quadro 1. Fonte Christofolletti (1980 p.41)

Quadro 1 – Processos geomórficos atuantes nas nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymore Dalrymple. Blong e Conacher(1968).

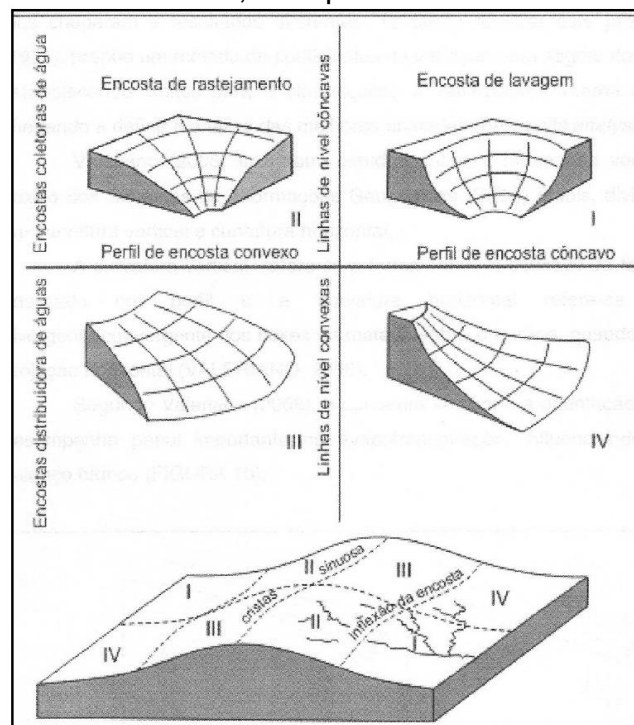
Unidade da Vertente	Processo geomórfico atuante
1 Interflúvio (0° – 1°)	Processos pedogenéticos associados com movimento vertical da água superficial
2 Declividade com infiltração (2° – 4°)	Eluviação mecânica e química pelo movimento lateral da água subsuperficial
3 Declividade convexo com reptação	Reptação e formação de terracetes
4 Escarpa (ângulo mínimo de 45°)	Desmoronamentos, deslizamentos, intemperismo químico e mecânico
5 declividades intermediário de transporte	Transporte de material pelos movimentos coletivos do solo; formação de terracetes; ação da água superficial e subsuperficial.
6 Sopé coluvial (ângulos entre 26° e 35°)	Reposição de material pelos movimentos coletivos e escoamento superficial; formação de cones de dejeção; transporte de material; reptação; ação subsuperficial da água
7 Declividade aluvial (0° – 4°)	Deposição aluvial; processos oriundos do movimento subsuperficial da água
8 Margem de curso de água	Corrasão, deslizamento, desmoronamento.
9 Leito do curso de água	Transporte de material para jusante pela ação da água superficial; gradação periódica e corrasão

Fonte Christofolletti (1980 p.41)

Segundo Troeh (1965, apud Christofolletti, 1980), ao combinar a concavidade e convexidade, é possível analisar as vertentes como formas tridimensionais, com isso podendo-se associar as vertentes a processos de acúmulo e dispersão da água, rastejamento e lavagem, fator que afeta diretamente os processos erosivos do solo. O autor (op.cit.) classificou as vertentes em quatro tipos básicos (Figura 3).

- I - Vertentes com radiais convexas e contornos côncavos
- II - Vertentes com radiais côncavas e contornos côncavos
- III - Vertentes com radiais convexas e contornos convexos
- IV - Vertentes com radiais côncavas e contornos convexos

Figura 3 - Os quatro tipos básicos de vertentes, combinando a concavidade e convexidade, e os processos atuantes



Fonte: Troh, 1965

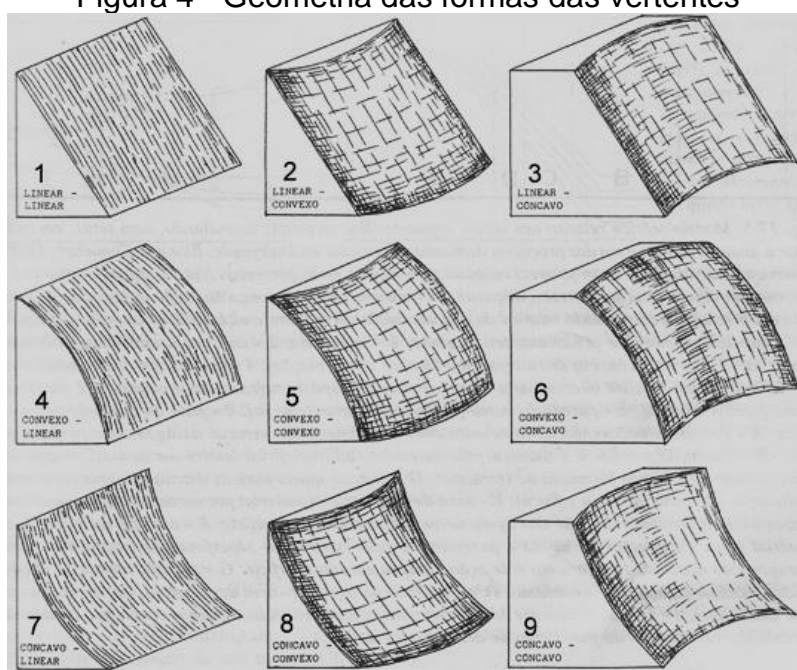
Bigarella et al. (2007) também apresentam a vertente como um componente tridimensional modificado pelos processos de degradação que atuam na formação de formas de relevo, apontando as conexões e dinâmicas entre o interflúvio (parte superior da vertente) e o fundo de vale (calha do rio).

Referindo-se a forma das vertentes, Casseti (1995) coloca alguns exemplos para ilustrar a influência da geometria das vertentes: a) vertentes portadoras de comprimento reto e largura reta respondem pelo predomínio do fluxo laminar; b) vertentes representadas por comprimento reto e largura curva respondem por

processos complexos (largura convexa: fluxo disperso; largura côncava: fluxo convergente com ocorrência de escoamento concentrado); c) vertentes de comprimento curvo e largura também curva caracterizam processos mais complexos (ocorrência de fluxo concentrado em linhas de drenagem de primeira ordem).

Segundo Ruhe (1975,1979 apud BIGARELLA, 2003), a vertente não representa simplesmente um perfil bidimensional, mas constitui uma feição tridimensional, que pode apresentar nove geometrias dependentes do perfil e da forma (figura 4).

Figura 4 - Geometria das formas das vertentes



Fonte: Bigarella (2003)

Valeriano (2008) associa a topografia e as formas da vertente aos processos erosivos, com isso é possível identificar as porções que terão maior impacto diante da fragilidade ambiental, facilitando a definição de adequações para a correção e proteção do espaço, e determinando, assim, as zonas mais vulneráveis à fragilidade ambiental. A espacialização dessas informações facilita o planejamento do uso e ocupação do solo, ao detectar as localidades em que o elemento pode ser mais intenso, podendo amenizar ou até mesmo evitar prejuízos em obras a serem executadas.

Para o autor (op. cit.) os estudos de comportamento topográficos apontam a curvatura vertical como uma das variáveis de alto poder na identificação das unidades do relevo. A curvatura vertical refere-se à forma convexo/côncavo do relevo quando

analisado em perfil. Por outro lado, a curvatura horizontal representa o caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria e energia no terreno, quando analisado em projeção horizontal. A percepção da curvatura horizontal pode ser percebida através das direções de declive, denominadas linhas de fluxo, adjacentes.

A combinação das curvaturas horizontais e verticais representa uma caracterização das formas de relevo, as quais se associam propriedades hidrológicas e de transporte de matéria. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades dos efeitos

A curvatura do terreno, que controla o fluxo superficial de água no solo, é o principal fator que determina a profundidade do solo entre as encostas côncavas e convexas, com os solos menos profundos ocupando as encostas côncavas e os mais profundos as encostas convexas. Essas formas influenciam na distribuição de água e materiais solúveis das partes mais elevadas para as mais baixas e sobre a propensão de a água convergir ou divergir à medida que atravessa o terreno (CHAGAS, 2013).

Outro dado morfométrico, o comprimento da rampa (vertente) tem importante influência sobre o comportamento do escoamento superficial, determinando a velocidade do fluxo de água na vertente. A capacidade de remoção e de transporte de partículas do solo pelo escoamento superficial esta portanto diretamente ligada ao comprimento da rampa.

Define-se como comprimento da rampa o segmento em linha reta ou curva que vai do ponto mais elevado do interflúvio, ou divisor de águas, até o canal de drenagem. Por indicar o segmento a ser percorrido pelo escoamento superficial desde a sua formação até o canal de drenagem, o comprimento da vertente por vezes é denominado de comprimento de fluxo. Para Bertoni e Lombardi Neto (1985) a intensidade da erosão pela água tem estreita relação com o comprimento da rampa e sua declividade.

O comprimento da rampa e a declividade podem ser pesquisados separadamente, mas é aconselhável que os dois sejam estudados em conjunto. Na Equação Universal de Perdas do Solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) a declividade e o comprimento da vertente são utilizados para determinar

o fator topográfico (LS). Para Silva et al. (2003), o comprimento de rampa não é menos importante que o declive, pois à medida que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas se tornam mais volumosas como também a velocidade de escoamento aumenta progressivamente e a maior energia resultante se traduz em maior erosão.

Em relação às formas de obtenção dos valores desse fator, Fujihara (2002), diz que é um dos fatores que oferecem maiores dificuldades de determinação. A sua estimativa pode ser feita através de várias metodologias, o cálculo pode ser feito manualmente, pode ser adaptado para um SIG, ou pode ser automatizado.

Para as medias e grandes escalas, as principais variáveis morfológicas que condicionam o tipo e intensidade dos processos erosivos são: forma da vertente, declividade e extensão de vertentes. A forma da vertente deve ser abordada não apenas no plano vertical (perfil convexo, concavo e retilíneo), mas associada ao plano horizontal.

2.4 - Sistemas ambientais e a bacia hidrográfica como unidade integradora nos estudos de análise ambiental

O conceito de sistemas, segundo Christofletti (1999), foi introduzido na Geografia por Chorley, em 1962. CHORLEY e KENEDNEDY (1971, pg 21) definem o sistema como:

Conjunto estruturado de objetos e/ou atributos. Esses objetos e atributos consistem em componentes ou variáveis (isto é, fenômenos que são passíveis de assumir magnitudes variáveis) que exibem relações discerníveis um com os outros e operam conjuntamente como um todo complexo, de acordo com um determinado padrão.

Os sistemas ambientais podem ser classificados a partir de diversos critérios. Para análise ambiental, o critério funcional e o da composição integrativa são os mais importantes. Um sistema é caracterizado por: a) seus elementos ou unidades; b) suas relações – os elementos dependem um dos outros, através de ligações que denunciam os fluxos; c) seus atributos – são as qualidades atribuídas a um sistema para que se possa dar-lhe características, tais como comprimento, área, volume, composição ou densidade dos fenômenos observados; d) entrada (*input*); e) saída (*output*) - (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Campbell (1958), propôs algumas normas a serem seguidas pelo pesquisador afim de diminuir a subjetividade na interpretação dos sistemas: a) proximidade

espacial de suas unidades; b) a similaridade de suas unidades; c) o objetivo comum das unidades; d) a padronagem distinta e reconhecível das unidades.

Considerando o critério funcional, Forster, Rapoport e Truco (1957) *apud* Christofletti (1999, p.5) distinguiram quatro sistemas:

a) Sistemas Isolados: após dadas as condições iniciais, o sistema não sofre perda nem adição de energia e matéria do ambiente externo. Assim, conhecendo a quantidade inicial de energia e matéria no sistema, é possível calcular a evolução do sistema e qual tempo para sua extinção.

b) Sistemas não Isolados: mantém relações com os sistemas no qual funcionam, sendo subdividido em sistema fechado e sistema aberto:

b1) Fechado: quando a troca de energia, mas não de matéria. O planeta Terra pode ser considerado um sistema isolado fechado, pois recebe energia, às não recebe e nem perde energia para outro sistema.

b2) Aberto: são aqueles nos quais ocorrem troca de energia e matéria. Podendo ser exemplificados por uma bacia hidrográfica.

Outra proposta de classificação é definida por Chorley e Kennedy (1971), que consideram a complexidade estrutural. Para os autores, os sistemas são classificados em sistemas morfológicos, sistemas em sequência, sistemas processo-resposta e sistemas controlados. Os Sistemas morfológicos, são compostos pela associação das propriedades físicas dos sistemas, ligados com os aspectos geométricos de composição, constituindo os sistemas menos complexos das estruturas naturais. Utilizados nos estudos geomorfológicos, estabelecendo-se indicadores relacionados com a forma e com os elementos físicos que o compõem como, comprimento, declividade, altura e outras. As redes de drenagem, as vertentes, os canais fluviais as dunas e as restingas são exemplos de sistemas morfológicos nos quais podem medir e correlacionar as variáveis geométricas e as de composições

Os Sistemas em sequência ou escalonados são compostos por uma cadeia de subsistemas que se inter-relacionam pela transferência de matéria e energia. Neste sistema a ênfase incide na caracterização dos fluxos de matéria e energia e nas transformações ocorridas em cada subsistema, as saídas (output) de matéria de um subsistema pode ser a entrada de para um subsistema subjacente. Como exemplo deste sistema é a avaliação de fluxos de matéria e energia. No subsistema vertente,

a água da chuva pode ser armazenada nos poros dos solos e rocha ou ser transferida para os rios ou para o lençol subterrâneo. No subsistema vegetação, a água pode ser armazenada nas plantas ou ser transferida para atmosfera, através da transpiração.

Os Sistemas processo resposta, são combinações dos sistemas morfológicos e sequência. Os sistemas morfológicos indicam o processo enquanto o morfológico representa a forma, identificando as relações entre processo e as formas que dele resultam. Ao aumento da capacidade de infiltração, haverá diminuição do escoamento superficial e na densidade de drenagem, diminuindo a declividade das vertentes. Por outro lado, o aumento do escoamento superficial, aumenta a densidade de drenagem na bacia, como consequência aumento da declividade das vertentes. É adequada para análise de fragilidade ambiental.

Os Sistemas controlados, representam atuação humana sobre os sistemas processo-resposta. Estuda a avaliação da interferência humana na dinâmica dos processos ambientais produzindo alterações na distribuição de matéria e energia dentro de um sistema. A complexidade aumenta através da intervenção humana. A introdução de espécies exóticas pode provocar impactos na cadeia alimentar

A bacia hidrográfica é um excelente exemplo de sistema aberto, que recebe energia e matéria principalmente pela água da chuva e perde energia e matéria a partir do seu exutório. Alterações nesse sistema, levam a desestabilização dos diferentes subsistemas que compõem o sistema bacia hidrográfica, devido ao complexo número de interações e retroalimentações (DREW, 2005)

Botelho e Silva (2004), definem a bacia hidrográfica como unidade natural, correspondendo a uma célula básica para estudos de análise ambiental, pois permite conhecer e avaliar os seus componentes, processos e interações atuantes, na qual a visão sistêmica e integrada do ambiente está implícita na adoção desta unidade fundamental.

Lima e Zakia (2000) ao conceituarem bacia hidrográfica, evidenciam que ela não pode ser entendida por um estudo isolado de cada um dos seus componentes, apontam sobre a impossibilidade da compreensão das bacias a partir de estudos isolados: sua estrutura, funcionamento e organização são decorrentes das inter-relações desses elementos.

[...] sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de

variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão e, desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Assim, qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou modificação na forma do sistema, ocorrerá uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito da modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico (LIMA; ZAKIA, 2000, pg.32).

Para Sacramento e Rego (2006), a bacia de drenagem pode ser entendida como unidade integradora para os estudos geoambientais, permitindo identificar e avaliar seus diversos elementos e fatores, compreendendo os atributos e as interações que nela ocorrem. Trata-se da adoção de uma unidade fundamental de estudo lastreada na visão sistêmica e integrada do ambiente. A exemplo do que ocorre em muitos outros países, pesquisas científicas na Ciências Ambientais realizadas no Brasil, têm adotado cada vez mais a bacia hidrográfica como célula natural de análise.

A lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição e no Título I que trata da Política Nacional de Recursos, no item V do Art. 1º afirma que:

[...]

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

[...]

Cabe, assim ao Poder Público o papel de atuar como gestor no planejamento e intervir se necessário, na área delimitada correspondente à bacia. Observa-se que a bacia hidrográfica está cada vez mais sendo utilizada como uma unidade sistêmica em planejamento ambiental. Por sua vez, a percepção da bacia hidrográfica entendida como um sistema, deve ser estruturada sob a forma de modelos, compreendido como sendo uma representação de um aspecto do mundo real, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999).

2.5 - Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e o Tratamento da Informação Espacial no mapeamento da Fragilidade Ambiental

O geoprocessamento compreende um conjunto de tecnologias que tratam de dados de natureza espacial, através da coleta, processamento, análise e disponibilização dessas informações com referência espacial. O Geoprocessamento é representado, especialmente pelo Sensoriamento Remoto, Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Silva e Zaidan (2004) afirmam que:

O conjunto de técnicas denominado de 'geoprocessamento de dados ambientais' ou, mais sinteticamente de geoprocessamento, destina-se a tratar os problemas ambientais levando em conta a localização, a extensão e as relações espaciais dos fenômenos analisados, visando a contribuição para a sua presente explicação e para o acompanhamento de sua evolução passada e futura (SILVA, ZAIDAN, 2004, p.48).

Percebe-se que a coleta, o tratamento e análise das informações é parte integrante das atividades desenvolvidas pela geografia. Até a primeira metade do século 20, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, dificultando uma análise que combinasse a sobreposição de diversos mapas e dados. As primeiras tentativas de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais aconteceram na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos anos de 1950, com o objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção de mapas. (CÂMARA, 2005).

Com o desenvolvimento, da tecnologia de Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, possibilitando o estudo e a implementação de diferentes formas de representação computacional do espaço geográfico, abrindo espaço para o surgimento do termo geoprocessamento.

Rodrigues (1990, p. 1) definiu o geoprocessamento como sendo um *“conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e de desenvolvimento, e uso, de sistemas que as utilizam”*. Nesta definição a coleta de dados é uma etapa importante do geoprocessamento

Rodrigues (1990), apresentou uma classificação dos sistemas de geoprocessamento, dividindo-os em:

1 - Sistemas aplicativos: conjuntos de programas que realizam operações ligadas diretamente às atividades de projeto, análise, avaliação e planejamento. Em áreas tais como transportes, mineração, hidrologia, urbanismo e turismo. São sistemas voltados à representação e operação de entes de expressão espacial, que visam à realização de um largo espectro de tarefas e podem ser agrupados segundo as classes de sistemas voltados à entrada e à saída de dados, além da realização de tarefas específicas eventualmente exigidas;

2 - Sistemas de informações: SIG - stricto sensu, denota software que desempenha as funções de coleta, tratamento e apresentação de informações sobre entes de expressão espacial e sobre o contínuo espacial. SIG - lato sensu, denota o software, o hardware, os procedimentos de entrada e saída dos dados, os fluxos de dados de fornecedores para o sistema e deste para os consumidores, as normas de codificação de dados, as normas de operação e o pessoal técnico que desempenha as funções de coleta, tratamento e apresentação das informações;

3 - Sistemas especialistas: sistemas computacionais que empregam o conhecimento na solução de problemas que normalmente demandariam a inteligência humana. Emulam o desempenho de um especialista atuando em uma dada área do conhecimento.

Segundo Xavier-da-Silva (2000) o geoprocessamento representa um conjunto de técnicas de processamento de dados, destinados a extrair informação ambiental a partir de uma base de dados georreferenciada. Nesta definição, o geoprocessamento começa a ser aplicado após a montagem da base de dados espaciais.

Para Rocha (2002 p. 210), o geoprocessamento *é uma tecnologia transdisciplinar, que, através da axiomática da localização e do processamento de dados geográficos, integra várias disciplinas, equipamentos, programas, processos, entidades, dados, metodologias e pessoas para coleta, tratamento, análise e apresentação de informações associadas a mapas digitais georreferenciados.* Ao propor os usos do geoprocessamento como uma tecnologia transdisciplinar, numa abordagem holística, o autor acredita que o geoprocessamento poderá ajudar na solução de vários problemas enfrentados pela humanidade.

O vocabulário geoprocessamento, é conhecido em outras línguas por “*Geomatic*”, um termo guarda-chuva que engloba instrumentos e técnicas para obtenção de dados espaciais, bem com teorias relativas à automação aplicada na

obtenção de informações espaciais. Neste sentido, segundo Moura (2003), o geoprocessamento engloba processamento digital de imagens, cartografia digital e os sistemas de Informação Geográfica.

O termo geoprocessamento, para Câmara e Davis (2005, p.1) '*denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional*'.

O sensoriamento remoto é uma fonte consistente de dados que pode ser bastante útil nos estudos de fragilidade ambiental, fornecendo uma gama de dados com resoluções multiespaciais, multiespectrais e multitemporais. Somando-se a isso, é possível obter uma série de variáveis relacionadas a bacia hidrográfica como, declividade, uso e ocupação da terra, relevo, entre outros.

Segundo Florenzano (2011), o sensoriamento remoto pode ser definido como uma tecnologia que permite obter imagens e dados da superfície terrestre à distância por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela mesma, bem como o processamento a análise e interpretação desses dados.

Os dados de Sensoriamento Remoto podem ser coletados em diferentes níveis: terrestre, aéreo e orbital. Em função dos níveis de coleta, são utilizados diferentes sensores e obtidos diferentes dados (FERREIRA, 2013).

Nesse sentido, sobre os dados de sensoriamento remoto, a observação da Terra por meio de satélites é a maneira mais efetiva e econômica de coletar os dados necessários para monitorar e modelar estes fenômenos, especialmente em países de grande extensão territorial, como o Brasil. Os recursos naturais e o meio ambiente da Terra estão em mudanças contínuas em resposta à evolução natural e às atividades humanas. Para compreender o complexo inter-relacionamento dos fenômenos que causam estas mudanças é necessário fazer observações com uma grande gama de escalas temporais e espaciais (SAUSEN e AVILA, 2004).

Os dados de sensoriamento remoto podem ser tratados com a utilização de softwares voltados para tratamento de imagens orbitais. Isto possibilita inúmeras ações, principalmente, processamento digital das imagens orbitais, ampliações e recortes de áreas de interesse e classificações temáticas de objetos identificados, neste caso, obtendo-se produtos como mapas temáticos.

Segundo Menezes e Fernandes (2013), novas tecnologias de sensoriamento remoto têm favorecido melhorias significativas tanto para aquisição de imagens, quanto para a construção, o armazenamento, a publicação e acesso às representações cartográficas diversas.

A partir destas informações, entende-se que produtos oriundos do Sensoriamento Remoto têm muito a contribuir com processos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, tendo em vista, os produtos orbitais disponibilizados oriundos de diferentes características dos satélites e seus sensores remotos.

Os SIGs e o sensoriamento remoto são ferramentas essenciais ao planejamento e gestão ambiental, pois permite integrar informações de forma rápida e eficiente para o ordenamento territorial e manejo sustentável de recursos naturais, contribuindo para a tomada de decisões.

A utilização do SIG para o gerenciamento ambiental em uma bacia hidrográfica permite a produção de um banco de dados geocodificados que auxilia na elaboração de modelos para o entendimento da paisagem sob o ponto de vista ecológico e ambiental, na previsão de possíveis riscos associados aos componentes do quadro físico como: água, solos, relevo, biodiversidade (PIRES, 1995).

Câmara e Davis (2004) afirmam que, “Se *onde* é importante para seu negócio, então geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho”. Sempre que o *onde* aparece, dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um sistema de informação geográfica (SIG), principal ferramenta do geoprocessamento.

Os primeiros Sistemas de Informação Geográfica (SIG), denominados na literatura internacional de Geographic Information Systems (GIS) surgiram na década de 1960, no Canadá, como parte de um programa governamental para criar um inventário de recursos naturais. (TOMLINSON, 1984).

O *Canada Geographic Information System* (CGIS) foi projetado para suportar grandes quantidades de dados coletados modelando e analisando esses dados com muita rapidez e precisão. Sistemas como o CGIS, no entanto, eram muito difíceis de usar: não existiam monitores gráficos de alta resolução, os computadores necessários eram excessivamente caros, e a mão de obra tinha que ser altamente especializada e caríssima. Não existiam soluções comerciais prontas para uso, e cada interessado

precisava desenvolver seus próprios programas, o que demandava muito tempo e, naturalmente, muito dinheiro. (CAMARA; DAVIS, 2004).

Ao longo dos anos 1970 foram desenvolvidos novos e mais acessíveis recursos de hardware, tornando viável o desenvolvimento de sistemas comerciais. Foi também nesta época que começaram a surgir os primeiros sistemas comerciais de CAD (*Computer Aided Design*, ou projeto assistido por computador), que melhoraram em muito as condições para a produção de desenhos e plantas para engenharia, e serviram de base para os primeiros sistemas de cartografia automatizada.

A década de 1980 representa o momento quando a tecnologia de sistemas de informação geográfica inicia um período de acelerado crescimento que dura até os dias de hoje. Até então limitados pelo alto custo do hardware e pela pouca quantidade de pesquisa específica sobre o tema, os GIS se beneficiaram grandemente da massificação causada pelos avanços da microinformática e do estabelecimento de centros de estudos.

Uma iniciativa de pesquisa, no Reino Unido, nos anos 1980, concretizou-se com a instituição do *Regional Reserch Laboratory* (RRL) realizado pelo *Economic and Social Research Concil*, refletindo a importância dada ao manuseio de dados censitários. Os Estados Unidos também avançaram na área, em agosto de 1988, três anos após a iniciativa britânica, foi criado o *National Centre for Geographical Information and Analysis* (NCGIA), com o objetivo de formar uma base de pesquisa em SIG. O NCGIA marca o estabelecimento do Geoprocessamento como disciplina científica independente. (CÂMARA, 2001)

No decorrer dos anos 1990, com a grande popularização e barateamento das estações de trabalho gráficas, além do surgimento e evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados relacionais, ocorreu uma grande difusão do uso de SIG. A incorporação de muitas funções de análise espacial proporcionou também um alargamento do leque de aplicações de SIG.

A introdução do SIG no Brasil inicia-se a partir do esforço de divulgação e formação de pessoal feito pelo prof. Jorge Xavier da Silva no início dos anos 80. A vinda ao Brasil, em 1982, do Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (o *Canadian Geographical Information System*), incentivou o aparecimento de vários grupos interessados em desenvolver tecnologia, entre os quais podemos citar duas iniciativas importantes. A primeira iniciativa foi a criação de

um grupo de pesquisa no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, que sob a orientação do professor Jorge Xavier, desenvolveu o SAGA (Sistema de Análise Geo-Ambiental). O SAGA tem seu forte na capacidade de análise geográfica e vem sendo utilizado com sucesso com veículo de estudos e pesquisas.

A segunda iniciativa, aconteceu nas dependências do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) com a criação da Divisão de Processamento de Imagens (DPI), que seria responsável pelo desenvolvimento de tecnologias na área de geoprocessamento e sensoriamento remoto. De 1984 a 1990 a DPI desenvolveu o SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) e o SGI (Sistema de Informações Geográficas), para ambiente PC/DOS, e, a partir de 1991, o SPRING (Sistema para Processamento de Informações Geográficas), para ambientes UNIX e MS/Windows. O SITIM/SGI foi suporte de um conjunto significativo de projetos ambientais.

Na década atual, observa-se um grande crescimento do ritmo de penetração do SIG nas organizações, sempre alavancado pelos custos decrescentes do hardware e do software, e pelo surgimento de alternativas menos custosas para construção dos SIG.

Ao longo do tempo, o termo SIG vem se modificando para se enquadrar nos diferentes objetivos propostos. Em síntese, Um SIG é constituído por um conjunto de "ferramentas" especializadas em adquirir, armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais. Esses dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento, com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos e das relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real, (BURROUGH, 1986).

Um SIG pode, ainda, ser definido como um sistema provido de quatro grupos de aptidões para manusear dados georreferenciados: entrada, gerenciamento, manipulação e análise, e saída. Os dados são georreferenciados quando estes possuem basicamente duas características: dimensão física e localização espacial, (ARONOFF, 1989).

Castro, (1993) considera os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como instrumentos dinâmicos, que oferecem mecanismos eficientes no processamento seletivo de informações especializadas no espaço, contribuindo significativamente para o enriquecimento metodológico da Geografia e da Cartografia, possibilitando a vinculação ao desenvolvimento tecnológico e valorização os potenciais de análise e síntese para o planejamento do espaço geográfico e gerenciamento ambiental. Em trabalho pioneiro, o autor utiliza os recursos do Sistema de Informação Geográfica (SGI/INPE) para tratamento das informações da morfodinâmica da Bacia do Rio Mogi em Cubatão (SP), criando planos de informações (PI's) para variáveis ambientais, com base em metodologias propostas Tricart (1977) e Ross (1990).

Castro (op. cit.) já enfatizava a necessidade a integração entre cartografia, SIG e Sensoriamento Remoto, para o tratamento dos dados espaciais. A cartografia, através do fornecimento de bases e temáticas, os SIG, através da conversão do cruzamento dessas informações da forma digital e o Sensoriamento remoto, possibilitando a atualização dessas informações através de imagens classificadas.

Contata-se que desde sua concepção inicial, os SIG têm incorporado uma crescente variedade de funções. Em especial, apresentam mecanismos sofisticados para manipulação e análise espacial de dados, permitindo uma visualização bem mais intuitiva dos dados do que a obtida através de relatórios e gráficos convencionais.

Em resumo, as principais características de SIG's são: integrar, em uma base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados; e, consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados. Os dados tratados em SIG's incluem: imagens de satélite, modelos numéricos de terreno, mapas temáticos, redes e dados tabulares. (CÂMARA, 2004).

Percebe-se definições de SIG, tenta enquadrar como sistema informatizado. Um sistema computacional que colecionam edita, integra e analisa informações georreferenciadas. Este sistema computadorizado, seria constituído de 4 subsistemas: entrada de dados; armazenamento e recuperação de dados; manipulação e análise de dados espaciais, saída. (CÂMARA, 2004).

Os SIG foram desenvolvidos para apresentar os dados em diferentes níveis ou camadas, possibilitando a obtenção de sobreposições que permitem combinações entre eles e comparações entre diferentes alternativas de ação. Pode acontecer de uma única técnica não ser suficiente para todas as situações apresentadas e nem definir as limitações para vários ambientes, podendo-se aplicar variadas técnicas conjuntamente, de forma eficiente e rápida, pois, é uma ferramenta poderosa que permite transformar dados em informações, e se tomar decisões a partir do conhecimento.

Segundo Druck et al. (2004), a distribuição espacial de fenômenos ocorridos no espaço e sua compreensão constitui uma ferramenta que auxilia em diversas questões nas mais diversas áreas do conhecimento. Devido à disponibilidade de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de dados, esses sistemas têm se tornado cada vez mais comuns, pois além da distribuição espacial do problema, podem traduzir padrões existentes na distribuição dos dados. Combinando, manipulando e aplicando técnicas matemáticas, estatísticas, etc., em dados diversos e utilizando a espacialização dos dados, é possível obter conclusões adicionais acerca do problema estudado.

O que distingue um SIG de outros sistemas de informação são as funções que realizam análise espacial. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros (CORDEIRO, et al. 1996)

Na maioria dos projetos desenvolvidos em SIG a principal proposta é a combinação de dados espaciais, com o objetivo de descrever e analisar interações, para fazer previsões através de modelos, e fornecer apoio nas decisões tomadas por especialistas. A combinação desses dados multi-fonte permite uma redução na ambiguidade das interpretações que normalmente são obtidas através da análise individual dos dados (PENDOCK e NEDELJKOVIC, 1996, apud CÂMARA et al.).

Existem vários métodos de inferência espacial para a integração das variáveis ambientais, que geram como resultado planos de informação em diferentes formatos. O método *Booleano*, por exemplo, gera dados em formato temático sendo a potencialidade expressa espacialmente em forma de polígonos que representam classes (favorável e não favorável). Os outros métodos, Média Ponderada, *Fuzzy*,

Bayesiano e inferência por Redes Neurais, geram dados em formato Numérico sendo a potencialidade expressa de forma numérica.

Muitos métodos consideram os mesmos pesos para todas as variáveis, como se todas tivessem a mesma importância perante a formação dos processos. Por isto, indica-se a aplicação de uma média ponderada, a qual considera a relevância real de cada variável. Alguns métodos trabalham com intervalos rígidos de classes. O problema de se trabalhar com intervalos rígidos é a imprecisão dos dados, visto que não há rigidez na espacialização de fenômenos no espaço. Geralmente na execução de álgebras de mapas são empregadas operações booleanas, onde as mesmas possuem limites nítidos e rígidos que, por sua vez, não representam os fenômenos naturais com todas suas características.

A natureza não possui limites rígidos e estáticos, portanto para a análise ambiental em geoprocessamento, sugere-se a utilização de técnicas de inferências geográficas que consigam lidar com dados que contêm algum tipo de incertezas. Silva (2001), relata que os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na grande maioria das vezes. Um dos métodos de inferência geográfica que busca trabalhar com as incertezas é a lógica *fuzzy* (em inglês), também chamada de lógica “difusa” ou “nebulosa”.

2.6 Inferência Fuzzy no mapeamento da Fragilidade Ambiental

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos relacionados a lógica *fuzzy*, os quais serão utilizados para mapear a fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio do Peixe. Na teoria clássica de conjuntos (ou booleana), um elemento ou pertence a uma classe ou não pertence, ou seja, é bivalente, admitindo apenas dois valores: falso (0) ou verdadeiro (1).

Portanto, os elementos de um conjunto **A** em determinado universo **X** simplesmente pertencem ou não àquele conjunto. Isso pode ser descrito pela seguinte função:

$$f_A = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Entretanto, a teoria clássica de conjuntos, não é adequada quando se trabalha com problemas e classificação de conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas, que apresentam transição entre os conjuntos de forma suave e não abrupta. As primeiras noções da lógica dos conceitos “vagos” foram desenvolvidas por Lukasiewicz (1920) que introduziu conjuntos com três graus de pertinência sendo **0**, $\frac{1}{2}$ e **1**. Posteriormente, Zadeh (1960) introduziu a lógica *fuzzy* combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, ampliando os graus de pertinência, com valores variando no intervalo entre **0** e **1**.

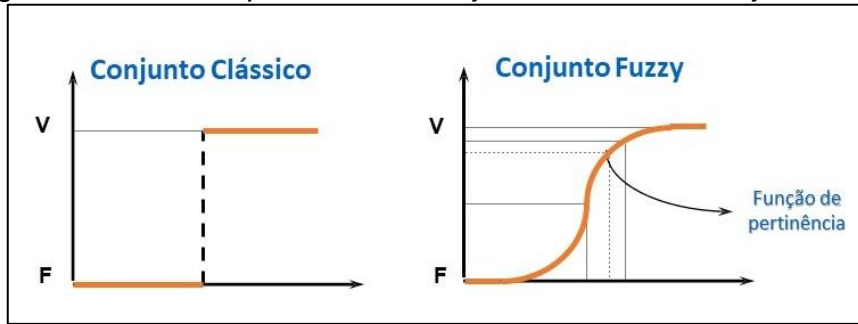
Diferente da lógica clássica de conjuntos que é bivalente, um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência (características) onde a transição de não pertinências é gradual, não abrupta dentro de um intervalo entre 0 e 1, sendo que o valor (0) indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência. A noção de união, intersecção, complementar, relação, convexidade etc., é estendida para tais conjuntos, e várias propriedades dessas noções no contexto dos conjuntos *fuzzy* estão estabelecidas (ZADEH, 1965).

Em síntese, um conjunto *fuzzy* **A** do universo de discurso **U**, será definido por uma função de pertinência $\mu:U \rightarrow [1,0]$. Essa função associa a cada elemento de **X** de **U** o grau $\mu(x)$, com a qual **X** pertence ao conjunto **A**. ou seja:

- $\mu(x)=1$ indica que x é completamente compatível com A.
- $\mu(x)= 0$ indica que x é completamente incompatível com A.
- $0<\mu(x)<1=$ indica que x é parcialmente compatível com A, com grau de pertinência $\mu(x)$.

A ideia do método de inferência *fuzzy*, não apenas fica restrita entre verdadeiro e falso, mas sim existem vários níveis entre o verdadeiro e falso (KOHAGURA, 2007). De modo figurativo enquanto a lógica clássica enxerga apenas Falso e Verdadeiro, a inferência *fuzzy* é capaz de além do Falso e Verdadeiro, enxergar vários graus de pertinência entre eles, como pode ser ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Grau de pertinência, conjunto clássico e conjunto *fuzzy*

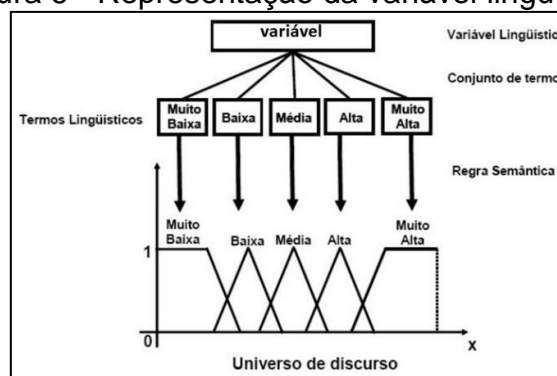


Fonte: elaborado pelo autor (2021)

A inferência *fuzzy* cria linguisticamente escalas de valores que buscam quantificar o objeto a ser estudado. O uso dessa teoria implica na criação das chamadas variáveis linguísticas que, diferentemente da lógica clássica, são de extrema relevância pois possibilitam captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelamento matemático. Esta possibilidade da lógica *fuzzy* é chamada grau de participação, ou também conhecido como função de pertinência (AGUADO; CANTANHEDE, 2010).

De maneira geral, conceitos humanos são expressos de forma qualitativa, como: “por volta de”, “aproximadamente”, “levemente”, “mais ou menos”, ao invés de valores quantitativos. Elementos qualitativos podem ser representados por meio de variáveis linguísticas, as quais assumem valores dentro de um conjunto de termos linguísticos. Assim ao invés de assumir instâncias numéricas, estas variáveis assumem instâncias linguísticas. No caso deste estudo a fragilidade ambiental poderá assumir como valor um dos termos do conjunto (muito baixa, baixa, média, alta, muito alta). Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se cada um destes termos um conjunto *fuzzy* definido sobre um universo comum, que neste caso será fragilidade ambiental (figura 6).

Figura 6 - Representação da variável linguística



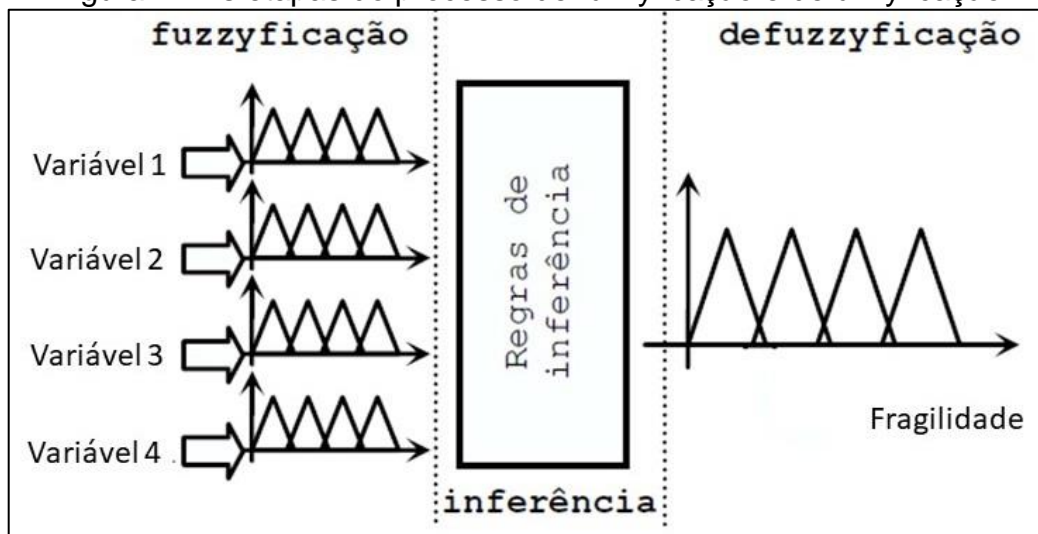
Fonte: Adaptado de Souza (2009)

O processo de inferência *fuzzy*, pode ser dividido em três etapas. Na primeira etapa, conhecida como *fuzzyficação*, ocorre a transformação dos dados de entrada iniciais em suas respectivas variáveis linguísticas. Nesta etapa, todas as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada a estas variáveis devem ser consideradas, e deve atribuir os valores relacionados aos graus de pertinência para cada uma das variáveis em estudo, contribuindo assim para maior precisão nos resultados.

Na segunda etapa de inferência *fuzzy* cuja finalidade é relacionar as possíveis variáveis entre si, através de regras pré-estabelecidas, cumprindo assim com os objetivos do algoritmo, algoritmos esses também denominados operadores *fuzzy*.

A terceira e última etapa do sistema lógico *fuzzy* é chamada *defuzzyficação*, consiste na tradução do resultado linguístico do processo de inferência *fuzzy*, em um valor numérico. As etapas do processo de *fuzzyficação* e *defuzzyficação* são representados na figura 7.

Figura 7 - As etapas do processo de *fuzzyficação* e *defuzzyficação*



Fonte: daptado de Cox (1995)

Existem vários operadores de inferência *fuzzy*. Estas operações podem ser utilizadas de forma a se obter um dado resultante (mapa) da sobreposição de vários dados *fuzzy*, gerando assim o mapa de fragilidade ambiental. Os operadores *fuzzy* mais conhecidos são: **AND**, **OR**, **Soma Algébrica**, **Produto Algébrico**, e **Operador Gama**, que serão detalhados a seguir de acordo com Câmara et al. (2004)

A) Fuzzy AND (interseção)

Esta operação equivale ao AND Booleano. A interseção significa uma sequência de “E” e é obtida através do operador MIN.

$$\mu = \text{MIN} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots) ,$$

onde μ_a , μ_b , e μ_c são valores de pertinência dos mapas A, B e C, para uma dada localização.

B) Fuzzy OR (União)

Fuzzy OR é como o OR Booleano, onde o valor de pertinência de saída é controlado pelos valores máximos dos mapas de entrada de cada localização e é dado por :

$$\mu = \text{MAX} (\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots)$$

C) Produto Algébrico Fuzzy

A função de pertinência combinada, neste caso, é dada por:

$$\mu = \prod \mu_i$$

onde μ_i é o valor de pertinência fuzzy para o número de mapas que deverão ser combinados. Os valores de pertinência tendem a ser muito pequenos quando se utiliza este operador, devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores do que 1.

D) Soma Algébrica Fuzzy

Este operador é complementar ao produto Algébrico Fuzzy, e é representado por:

$$\mu = 1 - \prod(1-\mu_i)$$

O resultado desta operação é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência fuzzy de entrada. O efeito desta operação é, portanto, de aumentar o valor de pertinência. Observa-se que, enquanto o produto algébrico Fuzzy é um produto algébrico, a soma algébrica Fuzzy, não é uma simples soma algébrica. (CAMARA et al., 2004)

E) Operador *gama*

Este operador é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy*. Este operador é expresso pela função:

$$\mu = (\text{soma algébrica Fuzzy})^\gamma \times (\text{produto algébrico Fuzzy})^{1-\gamma}$$

O produto algébrico *Fuzzy* é expresso pela função, $\mu = \prod_{i=1}^n \mu_i$, onde μ_i representa o valor do membro *Fuzzy* para um plano de informação “i”.

O operador executa a multiplicação dos membros dos diferentes planos de informação ($i= 1,2,3,\dots$), sendo que o valor de saída de um dado ponto é sempre menor ou igual ao valor do menor membro *Fuzzy*. Isto ocorre devido a multiplicação de valores iguais ou menores que 1. (CAMARA et al., 2004)

A soma algébrica *Fuzzy* é definida pela função:

$$\mu = 1 - \prod(1 - \mu_j) ,$$

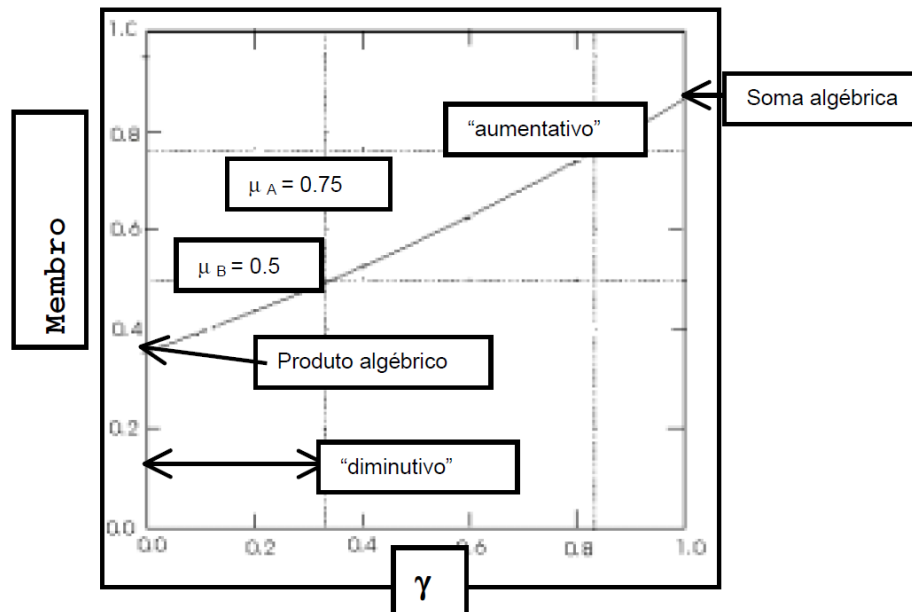
onde o termo μ_i representa o valor dos membros *Fuzzy* para um plano de informação “i”. O operador executa a multiplicação do termo $(1 - \mu_i)$.

Na soma algébrica o resultado é sempre maior ou igual ao valor de entrada do maior membro *Fuzzy* (μ_i). No operador gama pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico *Fuzzy*). A importância de cada termo no operador gama é definida atribuindo-se valores entre $(0,1)$ para o expoente “ γ ”.

A atribuição de importância é melhor entendida através do gráfico representado na figura 8. Na figura pode-se observar que quando o gama for igual a $\gamma=0$, o resultado dependerá apenas do termo “produto algébrico *Fuzzy*”, e quando $\gamma=1$, o resultado dependerá apenas do termo “soma algébrica *Fuzzy*”.

Os valores de gama entre $0 < \gamma < 0,35$ apresentaram um caráter “diminutivo”, ou seja sempre menor ou igual que o menor membro *Fuzzy* de entrada (μ_i). Valores gama entre $0,8 < \gamma < 1,0$ terão um caráter “aumentativo” e o valor de saída será igual ou maior que o valor do maior membro *Fuzzy* de entrada (μ_i).

Figura 8 – representação do Gráfico de distribuição da função *Fuzzy Gama*



Fonte: Modificado de Bonham- Carter (1994) por Câmara et al. (2004).

Para os valores de gama entre $0,35 < \gamma < 0,8$, os μ_i não apresentaram nem um caráter “aumentativo” nem “diminutivo”, os valores dos μ_i de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor dos μ_i de entrada (BONHAM-CARTER, 1994, *apud* CÂMARA et al., 2004).

3 - METODOLOGIA

O desenvolvimento da presente pesquisa baseou-se na concepção metodológica de integração de dados norteadas pelos pressupostos da abordagem sistêmica, amplamente utilizada para os estudos integrados do ambiente. Considera-se a metodologia adequada por contemplar o princípio básico referente aos fluxos de matéria e energia os quais são imprescindíveis para a compreensão da fragilidade ambiental do sistema, sendo este o elemento principal da investigação. Desse modo, entendem-se a paisagem como fruto da interação do relevo, clima, dos solos, da declividade do terreno, do uso da terra e das práticas conservacionistas.

A partir da concepção de que a visão sistêmica possibilita estabelecer e analisar tais inter-relações pretende-se, a partir dela, compreender os vínculos de dependência entre as diferentes variáveis do meio. Com relação à questão da funcionalidade dos sistemas, compreende-se que a integração das informações dos

elementos da paisagem deve ser concebida como um sistema aberto, no qual é inerente a ideia de que ao se alterar um elemento deste, todo o sistema será afetado, sendo que seu funcionamento procurará um novo ponto de equilíbrio frente a esta mudança, ou seja, procurará produzir ajustamento à nova situação.

Para atingir o objetivo proposto foi necessário o processamento de diferentes tipos de variáveis ambientais ou indicadores suficientemente estáveis que permitam analisar espacialmente a fragilidade ambiental em escala média e de detalhe (1:50.000 ou superior) da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe. Para Shields et al. (2002), um índice revela o estado de um sistema ou fenômeno. Prabhu et al. (1996) argumentam que um índice pode ser construído para analisar dados através da junção de um jogo de elementos com relacionamentos estabelecidos. Segundo a OECD (1993) os índices constituem os resultados numéricos de um indicador.

Um índice pode ser considerado como o resultado da combinação de diversas variáveis ou indicadores em um único valor atribuindo-se um peso relativo a cada componente do índice. Os índices são construídos pela composição ou agregação de indicadores, que podem ser um ou mais, mediante vários modelos de funções matemáticas ou regras heurísticas. Pressupõe-se sempre a padronização tendo em vista a utilização de uma escala convencional (MELO, 1996). Os índices não são capazes de resolver os problemas ambientais, mas devem ser considerados como importante mecanismo de suporte a tomada de decisões na área ambiental (GUTIERREZ-ESPELATA, 1998)

O termo indicador (variável) é um parâmetro selecionado e considerado isoladamente ou em combinação com outros para refletir sobre as condições do sistema em análise. Segundo Mitchell (1996), indicador permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade. Para Mueller et al. (1997), um indicador pode ser um dado individual ou um agregado de informações, sendo que um bom indicador deve conter os seguintes atributos: simples de entender; quantificação estatística e lógica coerente; e comunicar eficientemente o estado do fenômeno observado.

Ainda sobre a definição, um índice ambiental é uma classificação numérica ou descritiva de um grande volume de informação ambiental, cuja finalidade é de realizar a simplificação desses dados facilitando a tomada de decisões relativas à questão ambiental. Um índice ambiental resulta de uma manipulação matemática de um grupo

de valores de indicadores que foram definidos em relação a um determinado padrão. Os índices refletem de maneira sintética a situação ambiental do meio ou seu grau de sustentabilidade (GIRALDO, 1999).

Assim, de acordo com Direcção Geral do Ambiente (2000), os indicadores e os índices ambientais podem ser visualizados como fazendo parte de uma pirâmide, cuja base é constituída pela informação original não tratada (Figura 9).

Figura 9 – Pirâmide de Informação.



Fonte: Adaptado de Direcção-Geral do Ambiente, 2000.

Metodologicamente, o presente trabalho estrutura-se como estudo de caso a partir da aplicação de métodos e técnicas de sensoriamento Remoto e SIG, articulando e adaptando procedimentos metodológicos das propostas de Ross (1994) e Crepani et al. (2001). A metodologia proposta pelo autor envolve as seguintes variáveis: dissecação do relevo, declividade, solo, clima e uso e ocupação da terra. Crepani et al. (2001) elaboraram uma metodologia partido da Proposta de Ross (1994) acrescentando a variável geologia.

O presente trabalho propõe uma adaptação metodológica, a partir da agregação aos modelos tradicionais, acrescentando as variáveis forma do terreno (Curvatura vertical da vertente, curvatura horizontal da vertente), dissecação fluvial fator topográfico (comprimento da vertente e declividade). O mapeamento da fragilidade foi gerado com o uso de funções de padronização da lógica *fuzzy*, ou lógica difusa, em uma análise de multicritério a partir de uma combinação linear ponderada, utilizando o operador gama. O quadro 2 indica as principais variáveis (indicadores) utilizadas para modelagem da fragilidade ambiental.

Quadro 2 - Principais variáveis (indicadores) utilizadas para modelagem da fragilidade ambiental.

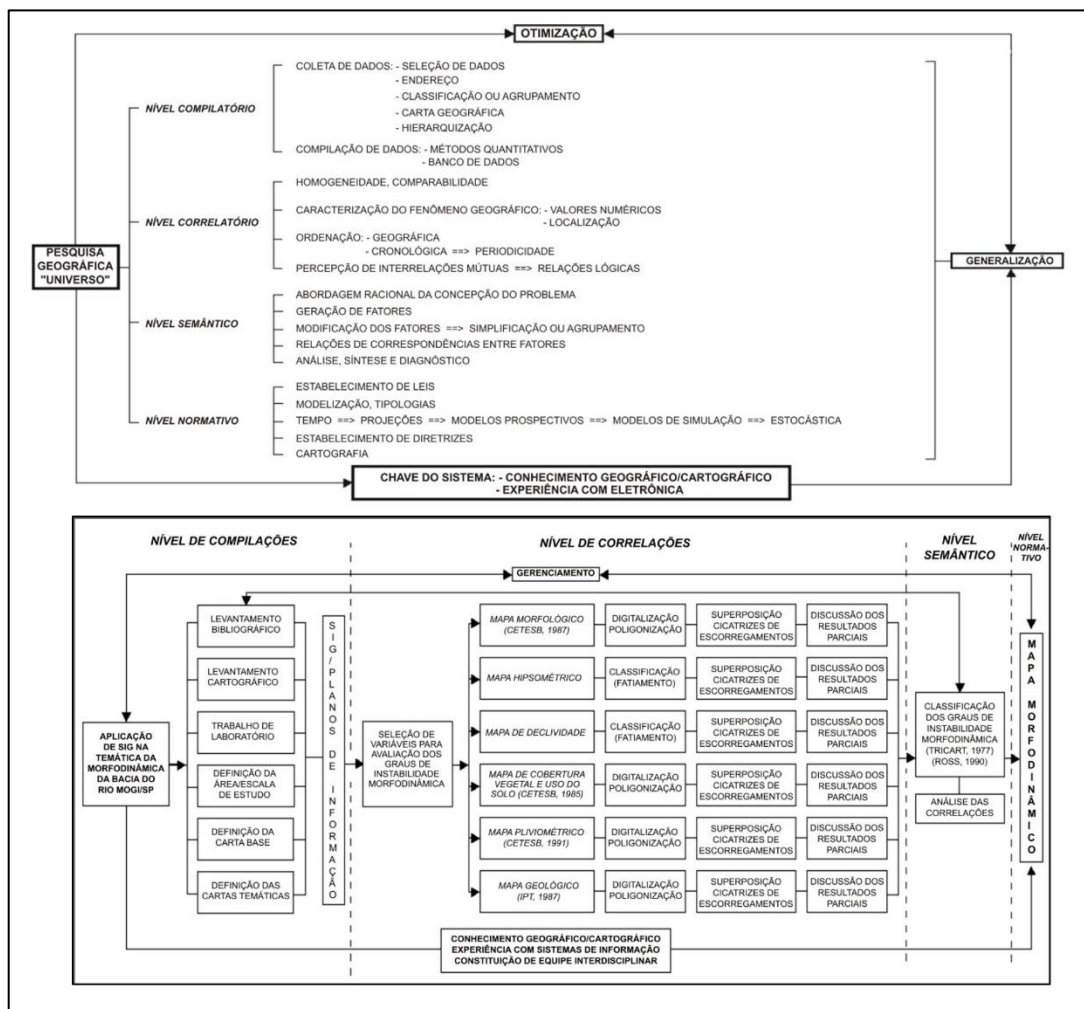
Metodologias	Índice de dissecação do relevo (Ross 1994)	Classes de declividade (Ross 1994)	Crepani et al. (2001)	PMMFA (Proposta da tese)
Variáveis				
Dissecação do Relevo (curvaturas das vertentes)	x		x	
Dissecação fluvial				x
Forma do Relevo				x
Fator Topográfico (comprimento da vertente e declividade)				x
Declividade		x	x	x
Rocha			x	x
Solo	x	x	x	x
Cobertura vegetal e uso da terra	x	x	x	x
Clima	x	x	x	

Fonte: dados da pesquisa (2021)

A análises integradas têm sido utilizadas para gerenciar impactos ambientais a partir das interações existentes entre os elementos do meio físico e antrópico, bem como das complexidades, expressas sob a forma de relações existentes entre os elementos morfológicos, pedológicos, litológicos, vegetacionais e de uso e ocupação da terra. Essas análises requerem sistemática por meio dos órgãos públicos organizacional a fim de separá-las em etapas, imprimindo uma ordem lógica.

O encaminhamento metodológico desta tese foi embasado no roteiro metodológico de Castro (1993) para geração de mapa morfodinâmico, que trouxe importante contribuição metodológica para as análises espaciais em ambiente SIG (figura 10). No direcionamento metodológico o autor (op. cit) utilizou o direcionamento metodológico proposto por Libault (1971) que divide a pesquisa geográfica em quatro níveis a saber: o nível compilatório; o nível correlatório; o nível semântico; o nível normativo.

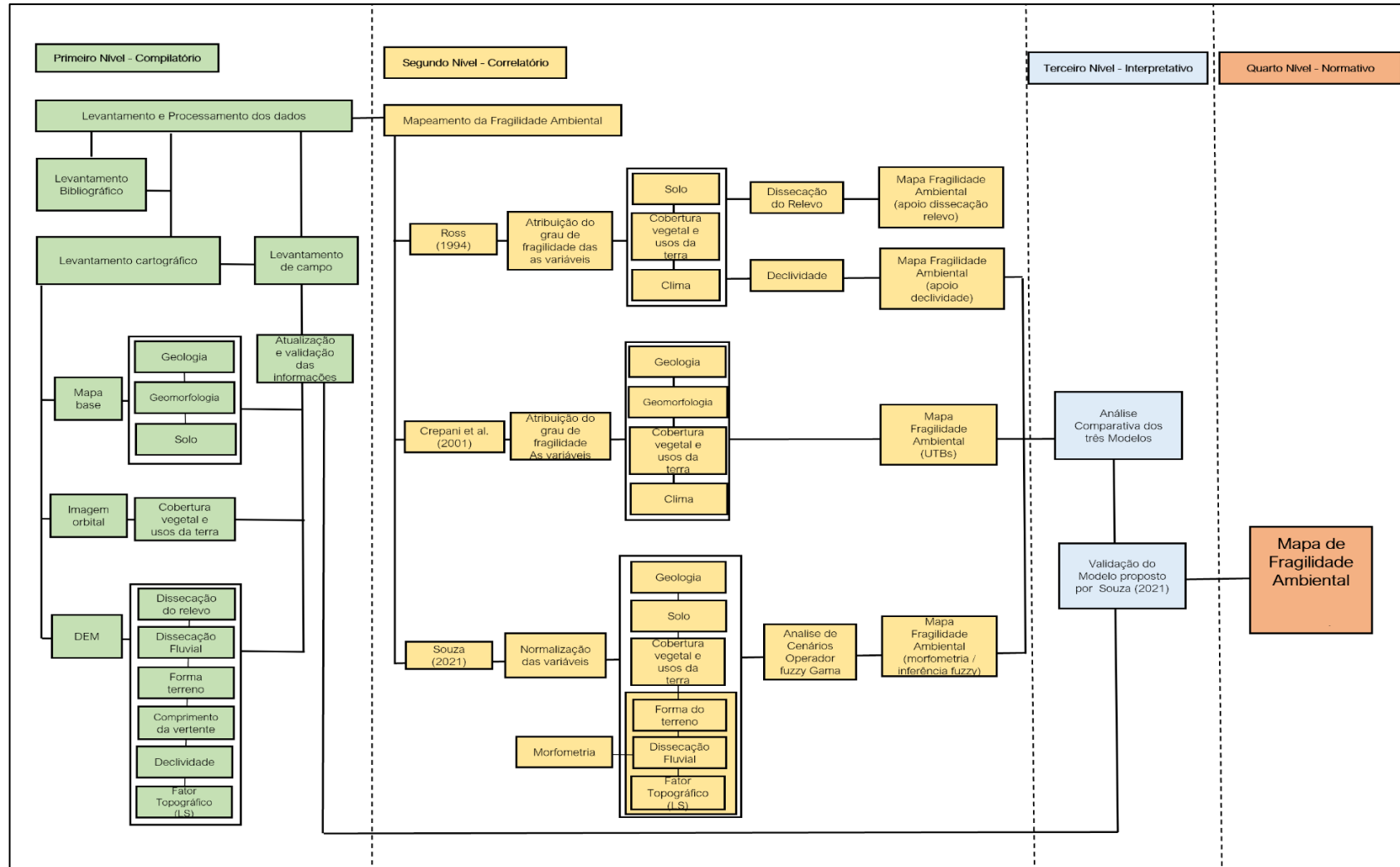
Figura 10 - Roteiro metodológico para geração de mapa morfodinâmico, segundo Castro 1993.



Fonte: Castro (1993)

Esses níveis preconizam uma ordem lógica de encaminhamento e desenvolvimento das etapas de trabalho. Para o autor (*op. cit.*), a sistematização e a organização das etapas de trabalho em níveis distintos, proporcionam melhor compreensão e adequação dessas atividades ao longo da pesquisa. As etapas adotadas do desenvolvimento desta pesquisa estão representadas no fluxograma apresentado na figura 11.

Figura 11 – Roteiro metodológico da pesquisa para mapeamento da fragilidade ambiental



Fonte: adaptado de Castro (1993)

Primeiro Nível - Compilatório: aquisição das informações pré-existentes

O nível compilatório, prevê a coleta dos dados e posterior compilação dos mesmos. Nesse nível foram coletados, analisados e selecionados os dados a serem utilizados no trabalho. Esses dados foram extraídos da consulta à bibliografia textual e cartográfica já existente e de informações elencadas em campo.

Os trabalhos de interpretação de documentos cartográficos e de imagem de satélite recaem sobre as atividades de levantamento de informações primárias e foram, portanto, acoplados ao nível aqui considerado. Como o levantamento bibliográfico e a aquisição das informações, em geral, acompanham todas as etapas da pesquisa, o nível compilatório se interpôs aos outros três níveis.

De forma geral, exigiu, num primeiro momento, o levantamento prévio da bibliografia, representada por obras de referências, documentos cartográficos temáticos e imagens de satélites. Momentos posteriores, demandaram a checagem e atualização da bibliografia, com inserção e complementação dos dados adquiridos em campo.

Segundo Nível - Correlatório: Correlação da Informação

Esse nível é caracterizado pelas atividades de correlação dos dados levantados. Essas atividades estiveram correlacionadas à análise dos dados, à interpretação das imagens de satélites, modelos digitais de terreno e mapeamentos temáticos. Os mapeamentos intermediários permitiram o levantamento das variáveis para mapeamento da fragilidade ambiental propostos por Ross (1994) e Crepani et al. (2001).

Neste nível também foi apresentada a proposta metodológica objeto desta pesquisa, para mapeamento da fragilidade ambiental com a introdução de novas variáveis ambientais, descritas no

Terceiro Nível - Semântico: reorganização e interpretação da informação

Neste nível foram interpretadas as informações obtidas nos mapeamentos das fragilidades ambientais para atingir os objetivos propostos na pesquisa. Assim no nível semântico, estiveram envolvidas atividades de interpretação dos produtos resultantes da proposta da tese. Também neste nível foram elaboradas comparação entre os

modelos de Ross (1994) e Crepani et al. (2001) e o modelo proposto nesta pesquisa (PMMFA)

Quarto Nível – Normativo: distribuição dos resultados

Representa normatização da apresentação do mapeamento da fragilidade ambiental proposto na pesquisa, com apresentação, discussão do resultados e proposições.

3.1 – Materiais

Neste trabalho foram utilizados os documentos cartográficos e imagens de satélites listados no quadro 3.

Quadro 3 - Relação dos produtos cartográficos e imagens utilizadas.

Documento cartográfico				
Produto	Escala	Folha	Projeção	Fonte/Data
Mapa Geológico	1:50.00	Folhas Itabirito SF.23-X-A-III-1 Casa de Pedra SF.23-X_A-III-3	UTM/SIRGAS2000 Fuso 23S	CODEMIG/2005
Carta Topográfica	1:50.000	Folhas Itabirito SF.23-X-A-III-1 Casa de Pedra SF.23-X_A-III-3	UTM/SAD69 Fuso 23S	IBGE/1977
Mapa Pedológico	1:50.000	Projeto APA SUL	UTM/SAD69 Fuso 23S	CPRM/2005
Imagens de satélite				
Produto	Resolução	Orbita/ponto	Projeção	Fonte/Data
Modelo Digital de Elevação Alos Palsar	12.5 metros	-----	UTM/WGS84 Fuso 23S	UGS/2011
CBERS 4A	8 metros	152/123 152/124	UTM/SIRGAS2000 Fuso 23S	INPE/2021

Fonte: dados da pesquisa (2021)

O material disponível serviu de base para identificação das variáveis que subsidiaram os mapeamentos de fragilidade ambiental, tais como, hipsometria, geologia, solo, cobertura vegetal e uso da terra, dissecação do relevo, forma do relevo, e fator topográfico (LS). A seguir são apresentadas as descrições de cada um dos produtos.

3.2 – Métodos e técnicas

3.2.1 – Modelo Digital de Elevação

No que se refere aos estudos do relevo, os modelos digitais de elevação (MDE) fornecem informações espaciais de grande importância. Os dados para geração podem ser provenientes de levantamentos de campo com teodolito, fotografias aéreas (estereopar) e cartas topográficas, as quais necessitam de um controle manual e de interpolação para gerar um MDE. Estes são métodos ainda recorrentes de se gerar os MDE, mas que, vem sendo substituído por métodos automatizados, como os modelos obtidos por meio da interferometria por radar de abertura sintética (InSAR), fontes ativas de sensores acoplados a bordo de satélites (orbitais) ou aviões (sub-orbitais) (CARVALHO, 2009).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) possuem inúmeras aplicações, assim como tipos e fontes de aquisição. Muitos produtos são disponibilizados gratuitamente e podem ser usados para a extração de informações e elaboração de produtos, possibilitando assim a diminuição dos custos de execução.

Variados MDE com cobertura quase que global são disponibilizados online gratuitamente, como: o MDE v3 do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*) Global DEM2 (GDEM2), o ALOS-Palsar (*Advanced Land Observing Satellite-1*) e o *Bare-Earth* oriundo do MDE v1 do SRTM. Com resolução espacial de 30 metros, os MDE do SRTM v3 e do ASTER GDEM2 são as versões mais recentes disponibilizadas, respectivamente, pelas missões SRTM e pelo satélite ASTER. O ALOS-Palsar, com resolução espacial de 12,5 metros, corresponde a uma versão com pixels reamostrados a partir dos dados do SRTM v3 (30 metros).

Para delimitação da bacia hidrográfica do Rio do peixe das variáveis morfométricas neste trabalho, optou-se por utilizar os MDE ALOS-Palsar, por apresentar escala compatível com a proposta de mapeamento desta tese. No que se refere à escala de acurácia dos dados do MDE ALOS-Palsar, Barbosa et al. (2019) apontam que eles possuem precisão vertical compatível com a classe A para escala de 1:50.000 e C para escala 1:25.000 do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico).

3.2.2 -Delimitação da Bacia Hidrográfica da Rede de Drenagem

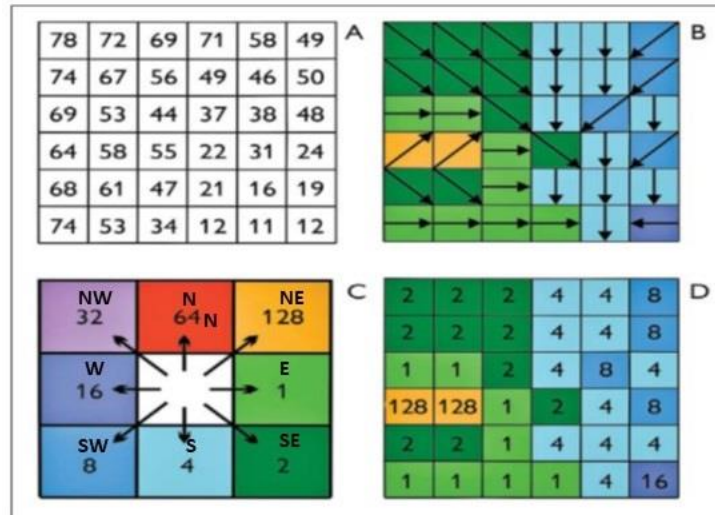
A bacia hidrográfica constitui a unidade geográfica natural para os estudos de fragilidade ambiental aqui proposto. Portanto a delimitação da bacia e, principalmente da sua rede de drenagem, são informações fundamentais, uma vez que a definição das variáveis morfometrias dependem que estes dois parâmetros estejam em concordância com o MDE.

Os principais métodos para extração automatizada de feições morfométricas de interesse hidrológico do MDE passam inicialmente, pela identificação da rede de drenagem. Com a existência de diferentes algoritmos destinados à obtenção de direções de escoamento a partir do MDE, surgiu a indagação sobre qual método fornece o melhor resultado em diferentes situações, principalmente na modelagem da rede drenagem nas áreas planas do relevo.

A maioria dos métodos para extração utiliza, para uma determinada célula, um código de direção de fluxo que indica para qual das 8 células vizinhas o escoamento deverá seguir numa uma direção de fluxo única. O algoritmo denominado D8 (*deterministic eight-neighbors*), ou de “oito direções” (D8) é o método mais utilizado para extração automática de redes de drenagens e de bacias hidrográficas. Jenson & Domingue (1988) propuseram uma codificação para as direções de fluxo em potência de 2 (2^x), onde o expoente da potência (x) recebe valores de 0 a 7, representando os oito vizinhos mais próximos da célula em análise.

Assim as codificações de direções de fluxo recebem os seguintes valores: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128. A partir de um MDE (Figura 12A), define-se a direção única de fluxo em direção a célula de maior declividade (Figura 12B), em seguida as células são codificadas com valores de 1 a 128, de acordo com os pontos cardeais e colaterais (Figura 12C), gerando-se a matriz de direções de fluxo (Figura 12D), onde os valores codificados representam a direção de fluxo de cada célula.

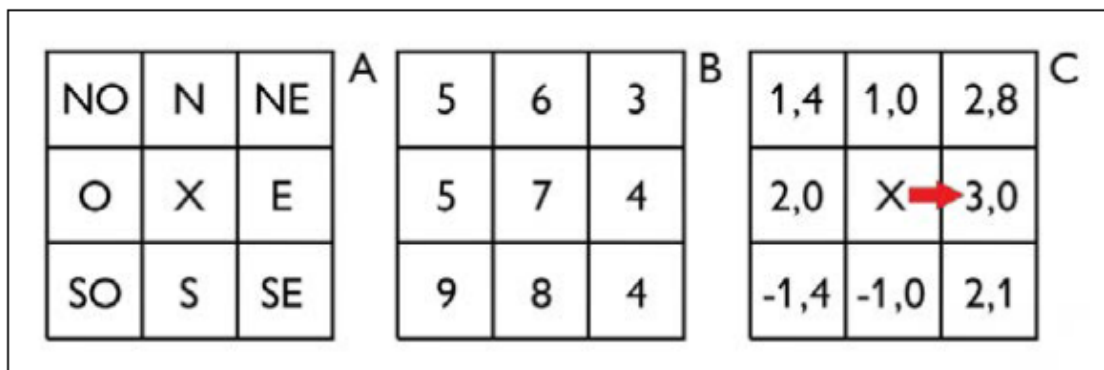
Figura 12 - A) Dados de elevação; B) Direção do fluxo C) Codificação D8 D) Direção do fluxo codificada



Fonte ESRI (2017)

O cálculo da declividade de uma determinada célula (X) para os seus vizinhos nas direções cardiais (N, S, E e O), é definida com base no valor da elevação da célula que é subtraído pelo valor da elevação da célula vizinha (Figura 13A). Para os as células vizinhas nas direções colaterais (NE, SE, NO e SO), o valor da declividade é dividida pela raiz quadrada de 2 (Figura 13A) Os declives (descidas) ocorrem quando o valor da diferença é positivo. Os valores negativos representam subidas (aclives), e zero indica a ocorrência de mesma elevação (plano).

Figura 13 - A) Direções cardiais e colaterais; B) valores de elevação (MDE); C) valores de declive e direção do fluxo



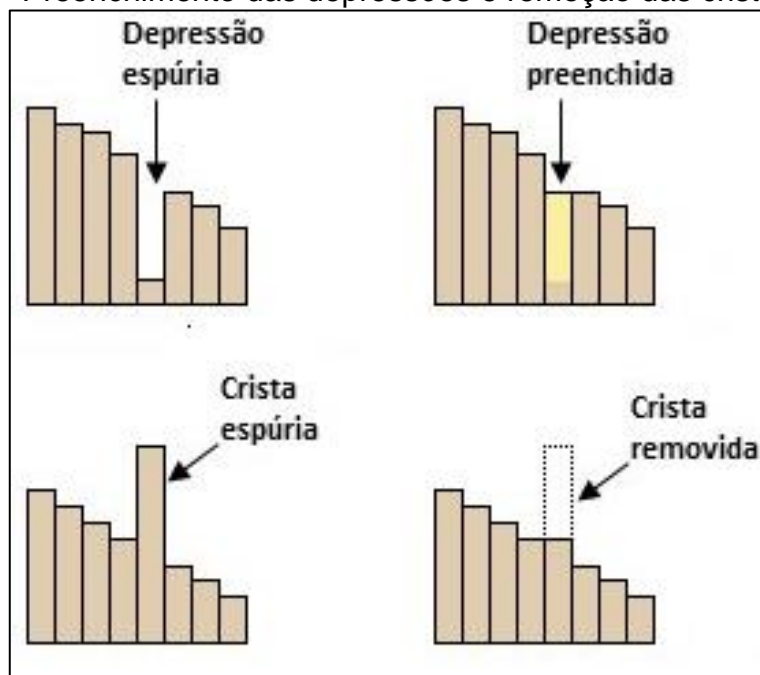
Fonte Rosim et al. (2013)

Independentemente do método D8 a ser utilizado, antes da extração das redes de drenagens e bacias hidrográficas, é necessário identificar e remover as depressões

espúrias nos MDE, gerando um modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC) (Mark, 1984; Wang & Liu, 2006). A não retirada pode alterar significativamente a direção do escoamento superficial.

As depressões espúrias são células circundadas por células com valores maiores de elevação, produzindo uma descontinuidade do escoamento superficial em direção a uma célula vizinha. As depressões são decorrentes do próprio processo de geração do MDE. Outra fonte de erro são falsas elevações que constituem de células circundadas por menor valor, entretanto são menos prejudiciais aos cálculos da direção do escoamento. Uma das propostas para correção é a elevação do valor da célula das depressões espúrias até o ponto em que se estabeleça o escoamento superficial para célula vizinha de menor declividade e a remoção das cristas, conforme ilustrado na figura 14.

Figura 14 – Preenchimento das depressões e remoção das cristas espúrias



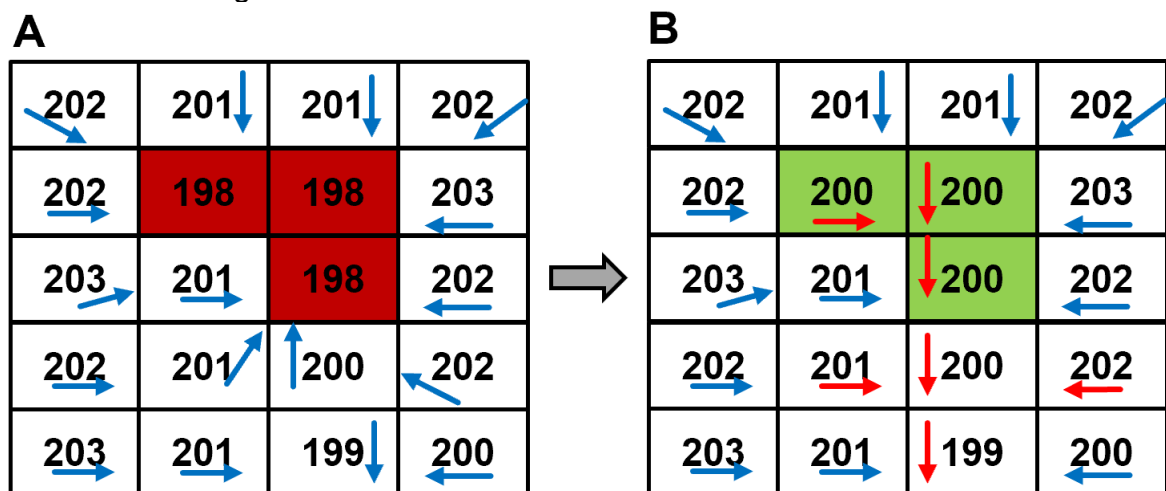
Fonte: adaptado de ESRI

Para extração automática de rede de drenagem e da bacia hidrográfica do Rio do Peixe foram testados e comparados dois algoritmos que utilizam o método D8: o algoritmo de Jenson e Dominique (1998) presente no software ESRI-ArcGIS® e o algoritmo PFS (*Priority First Search* – Sedgewick, 1992) presente no software TERRA HIDRO desenvolvido pelo INPE. A diferença entre os dois métodos está na forma como são tratadas as situações em que não existe uma declividade máxima única

para determinar a direção do fluxo, na forma como são consideradas as regiões planas, e na forma como são resolvidas as áreas de depressões, que são regiões isoladas com cotas mais baixas que a vizinhança. As características básicas de cada método serão descritas a seguir.

O algoritmo de Jenson e Domingue é baseado em dois princípios: a atribuição de direções de fluxo conforme a maior declividade e o preenchimento das depressões (fossos) até que se encontre um caminho de escoamento (figura 15A). A ideia básica do algoritmo é preencher as depressões até o valor da célula vizinha, de maneira que se crie um caminho para o fluxo (figura 15B).

Figura 15 - Exemplo de preenchimento das depressões espúrias pelo algoritmo Jenson e Domingue



Fonte: adaptado de Jardim (2012)

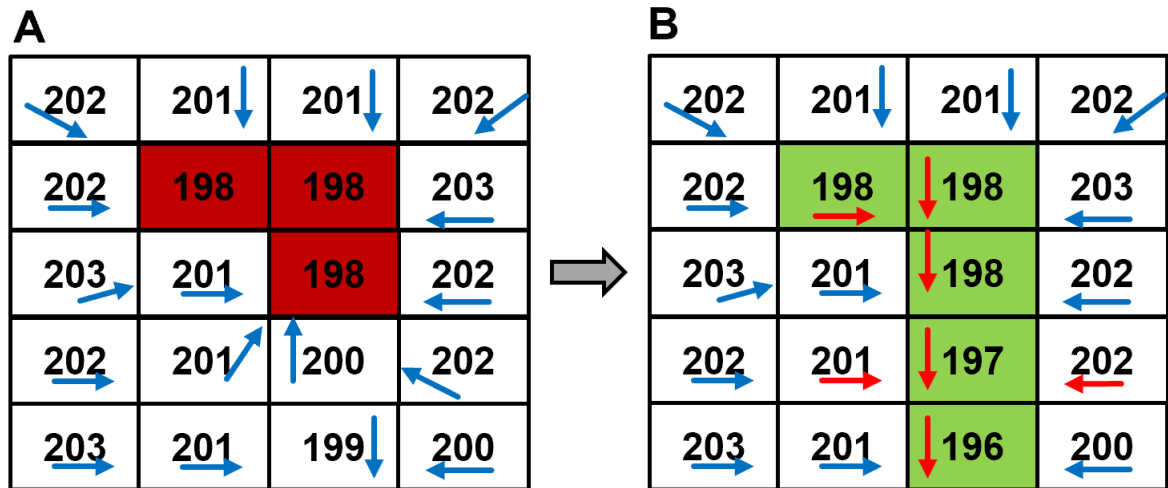
A limitação do método consiste em criar áreas planas que não existem no MDE original e não corrige as áreas planas que já existiam. As direções de fluxo nas áreas planas tendem a criar linhas paralelas não naturais nos padrões de área de contribuição e redes de drenagem. (JARDIM, 2017)

A ideia básica do algoritmo PFS (*Priority First Search*) é tentar encontrar uma célula que tenha altimetria menor que a depressão levando em conta o menor caminho e que passa pelas células de menor valor do MDE. O primeiro passo é a identificação de uma depressão que não pode ser removida por um preenchimento simples, como é o caso das células destacadas em vermelho na Figura 16A.

O segundo passo é a identificação das células de saída do fluxo, as células destacadas em verde na Figura 16B e a definição do caminho que o fluxo percorrerá

para chegar até a célula de saída (Figura 16B). Por fim, os valores das células ao longo do caminho do fluxo são diminuídos (escavados), formando um caminho com valores decrescentes da célula da depressão até a célula de saída (Figura 16B).

Figura 16 - Exemplo de preenchimento das depressões espúrias pelo algoritmo PFS

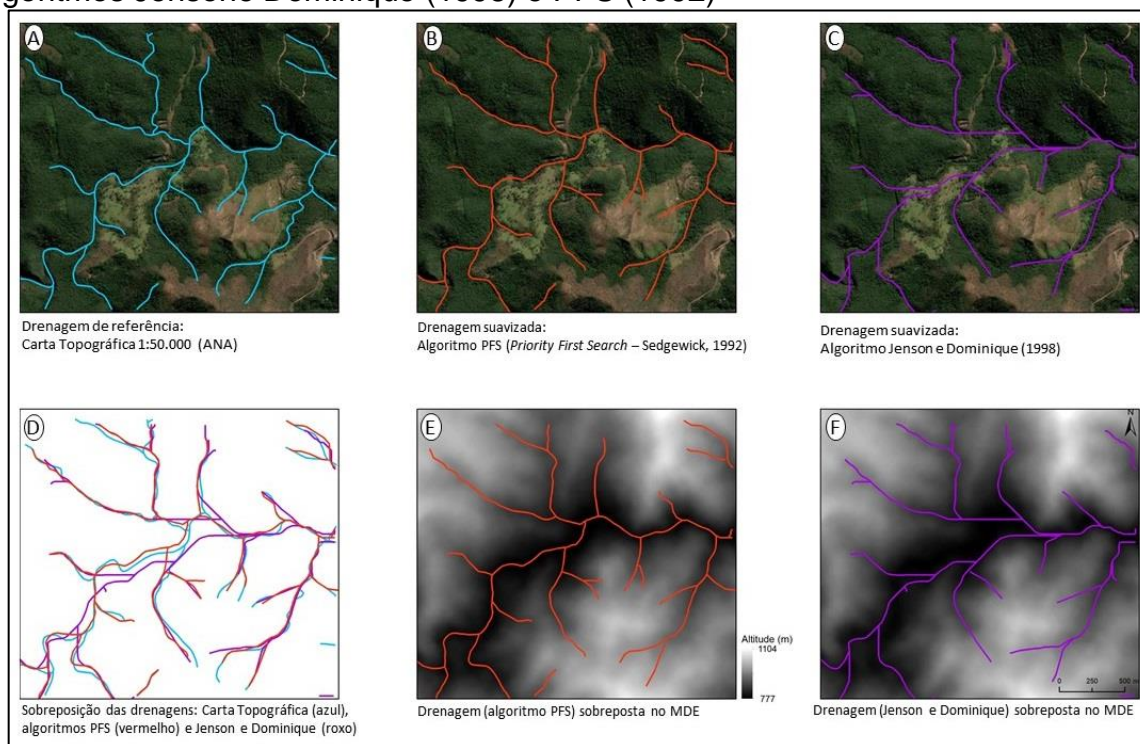


Fonte: adaptado de Jardim (2012)

As áreas planas são identificadas e alteradas. As altimetrias das áreas planas são diminuídas da borda para o centro, formando um v, por onde irá correr a drenagem.

Nos testes realizados na Bacia do Rio do Peixe, o algoritmo PFS (*Priority First Search* – Sedgewick, 1992) presente no software TERRA HIDRO (resultou na extração de uma rede de drenagem com melhor concordância com a rede de drenagem de referência (carta topográfica 1:50.000 – ANA), quando comparada à extração pelo algoritmo de Jenson e Dominique (1998) presente no software ESRI-ArcGIS®. (Figuras 17A, 17B, 17C e 17D).

Figura 17 - comparação da rede de drenagem do rio do Peixe extraídas pelos algoritmos Jenson e Dominique (1998) e PFS (1992)



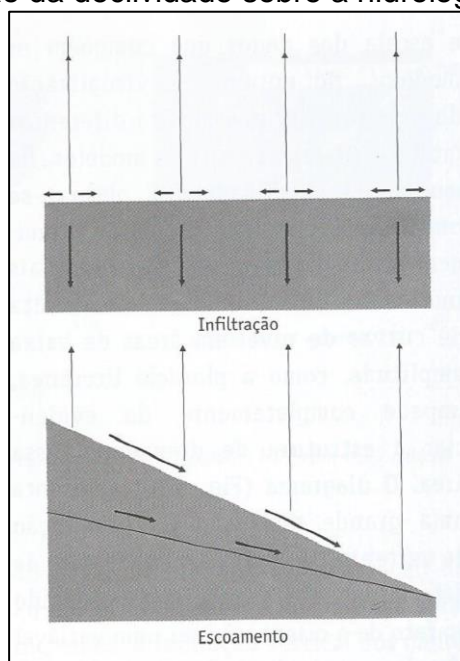
Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Nas áreas mais planas da bacia o algoritmo PFS apresentou uma performance melhor na determinação do canal de drenagem (figura 17 E), em comparação a drenagem obtida pelo algoritmo de Jenson e Dominique, para o mesmo trecho analisado (figura 17F). Dessa forma, na sequência de estudos sobre a fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe, o software TerraHidro foi utilizado na extração de uma rede de drenagem detalhada para a bacia.

3.2.3 –Declividade

A declividade, uma variável de 1ª ordem dos dados altimétricos, representa o ângulo de inclinação zenital da superfície local em relação ao plano horizontal, cujos valores podem variar de 0° a 90°, podendo também ser representada em porcentagem. Apresenta uma importância fundamental na análise ambiental, possuindo uma associação com os processos de transporte gravitacional como escoamento, erosão e escorregamentos de massa. O grau de inclinação da vertente exerce uma importante ação de equilíbrio entre escoamento superficial e a infiltração de água no solo (figura 18).

Figura 18 - Ação da declividade sobre a hidrologia de superfície.



Fonte: Florenzano (2008)

A maioria dos métodos de análise espacial, baseados em modelagem numérica do modelado do relevo, utilizam a variável declividade. O processamento automático para geração da declividade é obtido por meio de janelas moveis, explorando a função de derivação na vizinhança de cada célula para toda área de interesse no MDE.

O modelo proposto por Ross (1994) adota a declividade como elemento de maior importância na definição do grau de fragilidade. Crepani et al. (2001) utiliza a declividade em associação com as variáveis grau de entalhamento dos vales e dimensão interfluvial média para determinar a variável geomorfologia da equação de vulnerabilidade de paisagem a perda de solo. O modelo proposto no presente estudo associa a declividade ao comprimento da verte para determinar o fator topográfico - LS (o mesmo utilizado pela Equação Universal de Perda de solo).

3.2.4 – Índice de Dissecação do Relevo (IDR)

A dissecação é uma característica do relevo que reflete a energia que perpassa determinado sistema geomorfológico ao longo de sua esculturação recente. Por isso a mensuração desta variável constitui instrumento importante para avaliação morfodinâmica da paisagem.

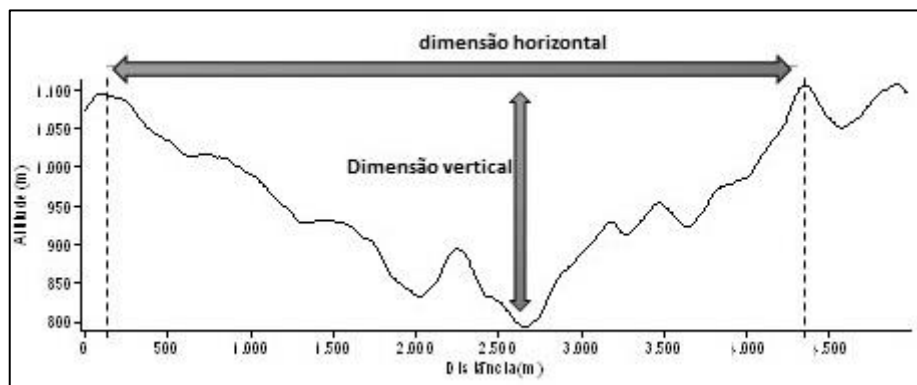
No que se refere aos estudos relativos ao mapeamento geomorfológico, Radam (1974), Ross (1994) e Crepani (1998), empregam, na maioria das citações, o índice

de dissecação do relevo como o uma variável que correlaciona duas magnitudes a saber:

- dimensão horizontal - dimensão média Interfluvial ou densidade de drenagem – mensura o afastamento horizontal médio de diferentes interflúvios de uma mesma unidade morfológica e;
- dimensão vertical - grau de entalhamento dos vales - medida que se refere à amplitude vertical do processo de dissecação.

Desse modo, como proposto por Ross (1997) trabalhando-se com dados morfométricos do tipo dimensão interfluvial média versus grau de entalhamento dos canais fluviais chega-se à hierarquização dos índices de dissecação do relevo (figura 19).

Figura 19 – Relação entre dimensão horizontal e dimensão vertical



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

Tais dimensões, dispostas em classes em uma matriz de dados, possibilita o enquadramento de uma dada porção da superfície terrestre em uma das classes relativas à dissecação do relevo. Por sua vez, as classes podem ser associadas à referenciais qualitativos de dissecação, com variações de escala de muito fraca à muito forte.

O MDEHC ALOS-Palsar é a base para obtenção dos dados morfométricos neste estudo. O primeiro passo para gerar de forma automatizada o indicador grau de entalhamento dos vales, é inverter os valores das altitudes do MDEHC, multiplicando por -1. Este procedimento faz com que o fluxo seja direcionado aos topos de morros, permitindo a delimitação dos interflúvios como se fossem fundos de vales. Em seguida delimitam-se microbacias hidrográficas (meias bacias) sobre o raster gerado após o

último procedimento. Estas microbacias irão delimitar a base de cada morro da área de estudo. Os procedimentos mencionados até aqui foram desenvolvidos por Hott *et al.* (2005). O último passo é calcular a amplitude altimétrica entre a base do morro e o topo, definidos respectivamente pelas linhas de fluxo concentrado(interflúvio) e limite das bacias (base dos morros).

Para cálculo da dissecação Horizontal (DH) utilizou-se a malha vetorial dos interflúvios das bacias hidrográficas (bases dos morros). Utilizaram-se as equações de comprimento da bacia e largura média da bacia, definidas por Cristofolletti (1980) para a distância interfluvial:

Para calcular o comprimento da bacia utilizou-se a fórmula:

$$C=P/2$$

Onde,

C= comprimento da bacia

P= Perímetro

Por último para calcular a largura média da bacia, utilizou-se a fórmula:

$$L= A/C$$

Onde,

L= Largura média

C= comprimento da bacia

A= Área

Por meio de álgebra de mapas os produtos gerados, dissecação Fluvial e distância horizontal foram enquadrados nas classificações propostas por Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001). Importante ressaltar que Crepani *et al.* (op. cit.), acrescenta a variável declividade no Índice de Dissecação do relevo em sua metodologia para mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo.

3.2.5 –Fator topográfico (LS): comprimento da vertente e declividade

Segundo Beskow *et al.* (2009) a intensidade da erosão hídrica pode ser fortemente afetada pelo comprimento da vertente ou rampa (fator L) e sua declividade (fator S). O fator L representa a relação de perdas de solos entre comprimento do declive e comprimento de uma vertente para os mesmos fatores solo, chuva, grau de declive, cobertura e manejo.

O fator S trata da relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% (pode ser alterado), sendo apresentada uma equação para possíveis ajustes às características locais. Nas aplicações práticas a equação universal de perda de solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), os fatores L e S são avaliados em conjuntos.

Para cálculo do comprimento da vertente utilizou-se o algoritmo de Desmet; Govers (1996), que emprega o conceito de contribuição de área e, requer a geração de um mapa de fluxo acumulado. Para cada pixel, calculam-se a declividade, a direção de fluxo e a quantidade de fluxo que se acumulou a montante daquele pixel.

Com a definição dos parâmetros $A_{i,j-in}$ (fluxo acumulado), $D_{x_{i,j}}$ (área do pixel) e m , foi possível determinar, utilizando-se o software ArcView, o fator de comprimento de vertente (L), de acordo com a equação de Desmet & Govers (1996):

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D_{x_{i,j}})]^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}}{[D^{m+2} x_{i,j}^m (22,13)^m]}$$

Onde:

$L_{i,j}$: fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i,j);

$A_{i,j-in}$: área de contribuição de uma célula com coordenada (i,j) (m²)

D: tamanho da grade de células(m)

$x_{i,j}^m$: valor da direção do fluxo

m: coeficiente que assume os valores 0,5 se $s > 5\%$; 0,4 se $3 < s < 5\%$; 0,3, se $1\% < s < 3\%$, e 0,2, se $s < 1$

*s é o grau de declividade

O fator declividade (S) foi obtido pela equação de a metodologia de Wischmeier & Smith (1978):

$$S = 0,00654s^2 + 0,0456s + 0,065$$

onde:

S: fator de declividade (adimensional); e

s: declividade média da vertente (%).

O fator topográfico (LS) foi obtido pelo produto dos fatores L e S. O método de Desmet & Govers (1996) tem a vantagem de fornecer, pixel a pixel, o valor de LS ao longo das vertentes.

3.2.6 – Formas de Terreno (Curvatura Vertical e Horizontal)

A vertente pode apresentar formas variadas, podendo ser classificadas de acordo com sua curvatura horizontal (plano) ou curvatura vertical (perfil). Para Florenzano (2008) os estudos de comportamento topográficos apontam a curvatura vertical como uma das variáveis de alto poder na identificação das unidades do relevo. A curvatura vertical refere-se à forma convexo/côncavo do relevo quando analisado em perfil. Por outro lado, a curvatura horizontal representa o caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria e energia no terreno, quando analisado em projeção horizontal. A percepção da curvatura horizontal pode ser percebida através das direções de declive, denominadas linhas de fluxo, adjacentes.

A combinação das curvaturas horizontais e verticais representam uma caracterização das formas de relevo, as quais se associam propriedades hidrológicas e de transporte de matéria. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). As combinações intermediárias têm características hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades dos efeitos individuais (VALERIANO, 2008)

Para obtenção da variável morfométrica Forma do Terreno (curvatura Vertical, Curvatura Horizontal) do MDEHC ALOS-Palsar (12,5 metros), foram gerados os padrões de Curvatura Horizontal e vertical de acordo com a proposta de Valeriano (2008). As classes temáticas foram fatiadas em três classes côncava, retilínea e convexa. Curvatura horizontal em planar, convergente e divergente.

Segundo Valeriano (2008) a curvatura vertical refere-se à forma convexo/concavo do relevo, quando analisada em perfil, podendo ser expressa em uma medida de ângulo por meio de uma distância horizontal (grau por metro). No SIG, o cálculo da curvatura vertical é realizado através de uma análise comparativa entre as diferenças altimetria dos pixels vizinhos as células em análise. O resultado são valores positivos e negativos, se côncava ou convexa. A curvatura horizontal por ser caráter divergente/convergente de fluxos, é percebida através das direções das linhas de fluxo. As áreas em que essas linhas são paralelas têm a curvatura horizontal nula e a superfície é caracterizada como planar. As áreas com linhas de fluxo indicando

convergência ou divergência têm curvatura não nulas e de sinais opostos. Assim como a curvatura vertical, a curvatura horizontal é expressa em ângulo por distância.

No SIG, a curvatura horizontal é baseada na comparação entre as orientações de vertente comparando-se nas células vizinhas. As curvaturas foram obtidas utilizando aplicativos presentes nos softwares *QGIS*, *ARCGIS* e *TerraHIDRO*.

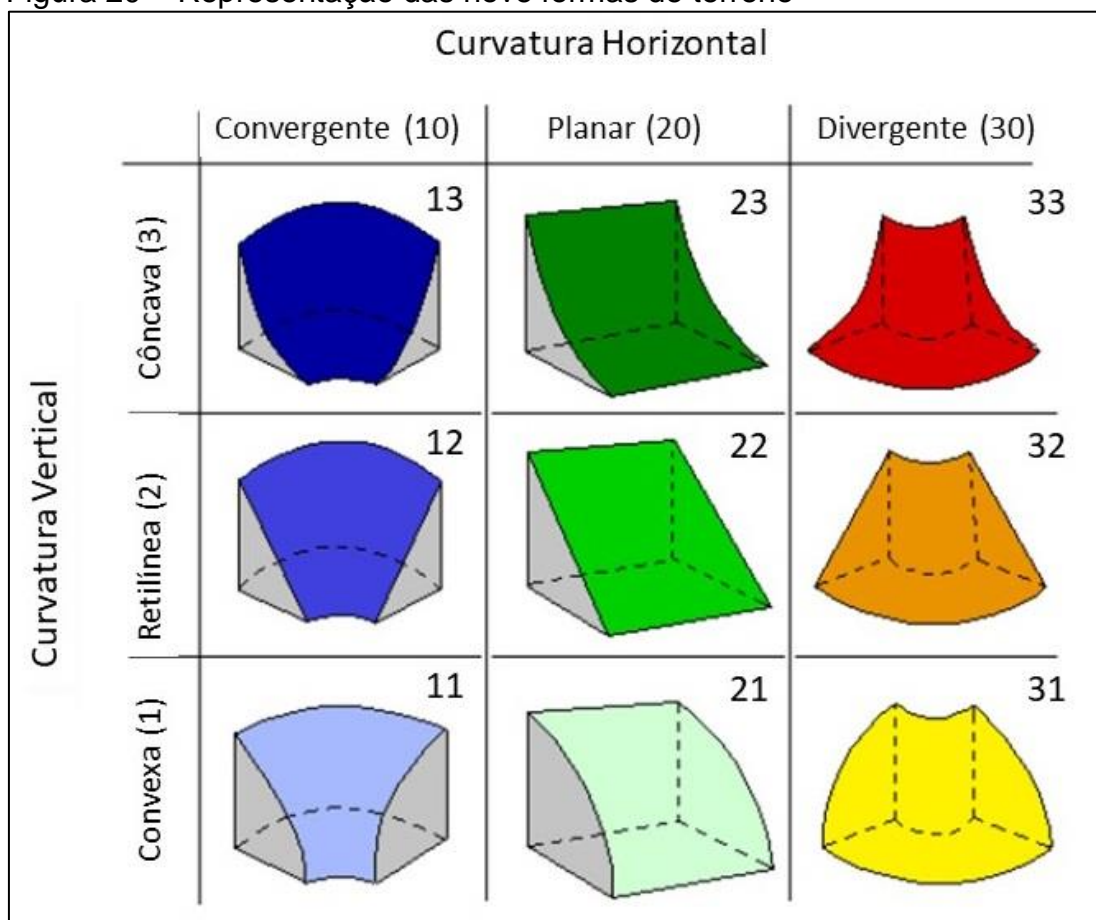
Segundo Valeriano (2008) ensaios comparativos com descrições geomorfológicas levaram ao estabelecimento da faixa entre $-0,010^{\circ}/m$ a $0,010^{\circ}/m$ como valores de curvatura típicos de vertentes tidas como retilíneas. Assim, valores inferiores a este intervalo foram considerados como terrenos côncavos e valores superiores foram considerados como terrenos convexos. Da mesma forma que para curvaturas verticais, faz-se necessário o estabelecimento de uma faixa de valores admitidos como nulos para determinar a classificação das vertentes planares. Baseado nos testes feitos por Valeriano (2008) admitiu-se o intervalo de $-0,038^{\circ}$ a $0,051^{\circ}/m$ para determinar superfícies planares, ocorrendo valores inferiores a esse intervalo considerou o terreno como sendo convergente e superiores ao intervalo como sendo divergente.

A curvatura do terreno, que controla o fluxo superficial de água no solo, é o principal fator que determina a profundidade do solo entre as encostas côncavas e convexas, com os solos menos profundos ocupando as encostas côncavas e os mais profundos as encostas convexas. Essas formas influenciam na distribuição de água e materiais solúveis das partes mais elevadas para as mais baixas e sobre a propensão de a água convergir ou divergir à medida que atravessa o terreno (CHAGAS, 2013).

As Formas de Terreno são obtidas a partir da sobreposição entre as curvaturas horizontais e verticais (Figura 20) foram determinados valores para cada tipo de curvatura e a soma desses valores representam uma determinada forma conforme indicado na tabela: a soma dos valores representam uma determinada forma.

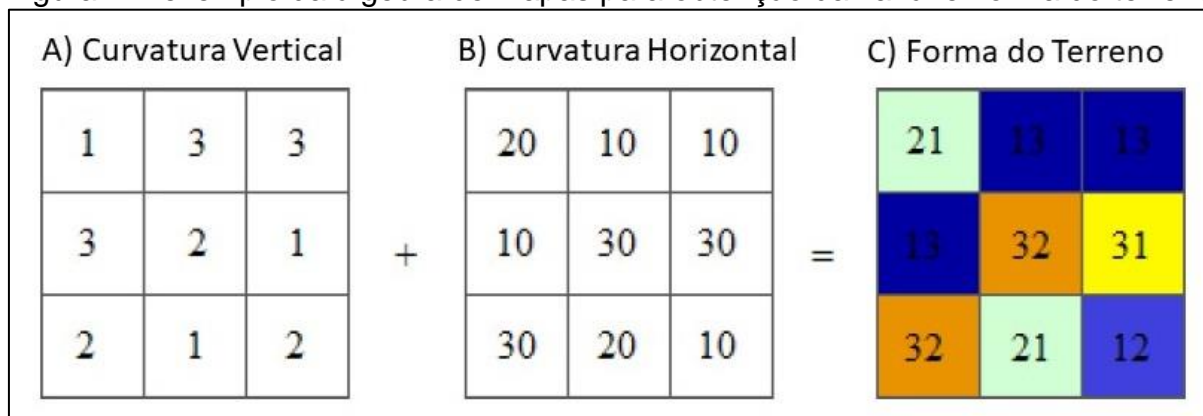
Por meio de álgebra de mapas, associou-se cada dados raster os valores atribuídos para as classes de curvatura. A soma dos dados raster permitiu a identificação dos tipos de formas de acordo com o padrão de concentração ou dispersão do escoamento. (Figura 21).

Figura 20 – Representação das nove formas de terreno



Fonte: Valeriano (2008)

Figura 21- exemplo da álgebra de mapas para obtenção da variável forma do terreno

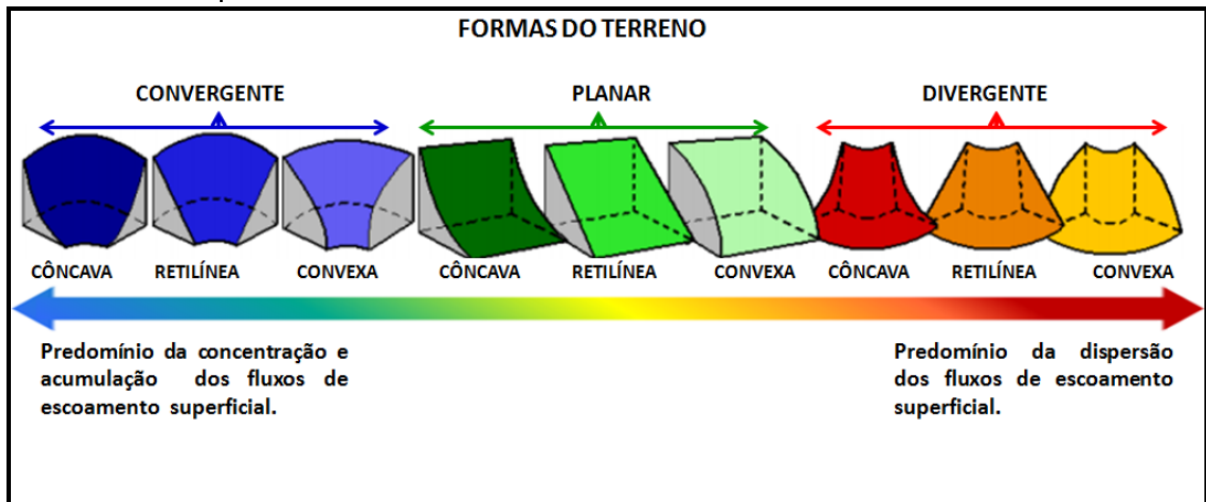


Fonte: Valeriano (2008)

As formas do terreno resultam da combinação entre as curvaturas vertical e horizontal. Como produto da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e

convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), estabelecendo-se nove classes distintas para as formas do terreno (VALERIANO, 2008) (Figura 22).

Figura 22 – Relação Forma do Terreno com a concentração e dispersão do fluxo de escoamento superficial.



Fonte: Valeriano (2008)

Desse modo, apoiado na literatura referida no presente estudo, considerou-se a forma do terreno, côncava - convergente como a classe de maior concentração e acúmulo de escoamento superficial, que corresponderia também à classe com maior vulnerabilidade aos processos erosivos mais intensos. As formas do terreno convexas - divergentes caracterizam-se como a classe de maior dispersão do escoamento superficial e menor concentração e acúmulo. Essas classes apresentam formas do terreno onde o escoamento superficial apresenta baixa capacidade de transporte e de remoção das partículas do solo, portanto, apresentam baixa vulnerabilidade à perda de solos.

3.2.7 - Dissecação Fluvial: descritor de terrenos HAND.

A maioria das técnicas automatizadas de obtenção da dissecação fluvial ou grau de entalhamento fluvial, baseiam seus cálculos na média da amplitude entre o fundo de vale e interflúvio de uma microbacia (meio bacia) de dimensões definida pelo analista. Para medias e grande escala este, procedimento não traduz em sua totalidade a dinâmica dos processos erosivos atuantes entre o interflúvio e fundo de

vale. em uma vertente, principalmente em relação as ações desencadeadas pelo fluxo do escoamento superficial.

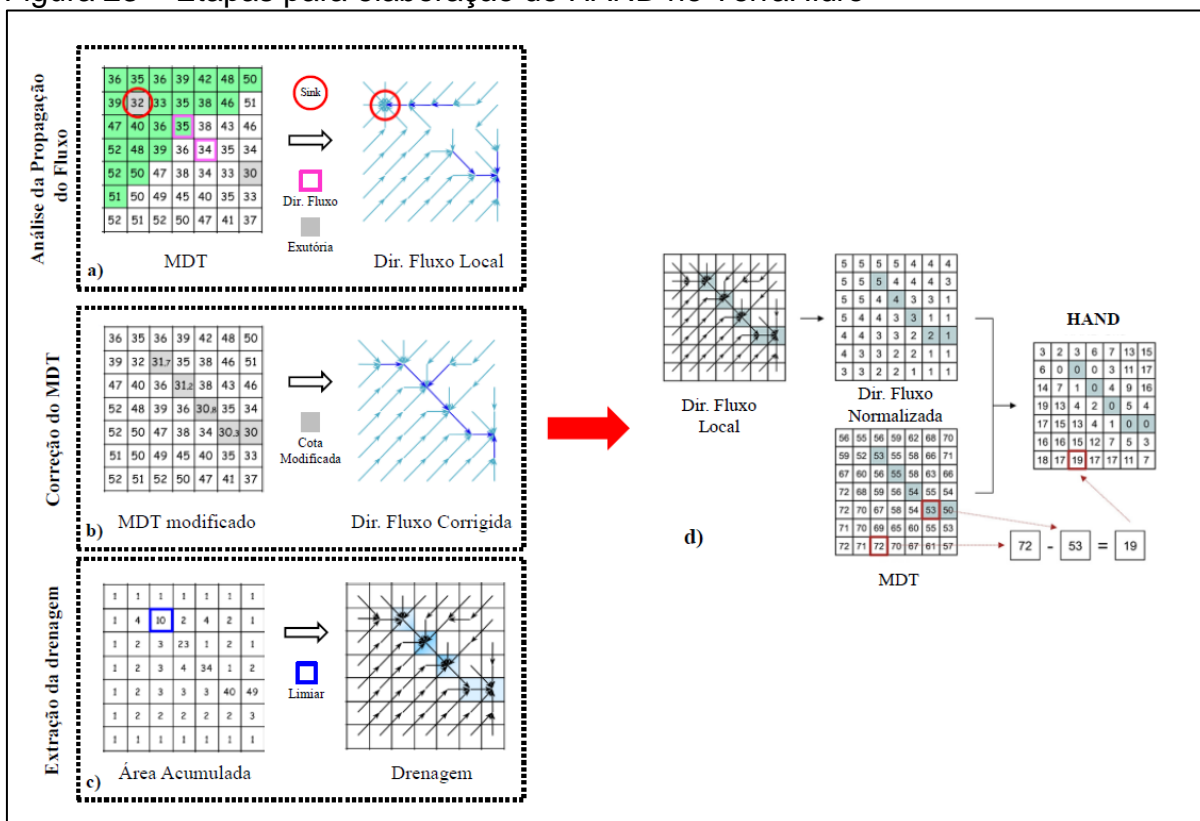
Para alcançar a proposta de identificar as nuances de rugosidade na vertente que influenciam no escoamento superficial e como consequência na dinâmica erosiva, utilizou-se o modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage* ou Altura Acima da Drenagem Mais Próxima) para determinar o indicador dissecação fluvial.

Desenvolvido no INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, o descritor de terrenos HAND – *Height Above the Nearest Drainage* (NOBRE et al., 2010 e RENNÓ et al., 2008) insere na compreensão da paisagem uma abordagem que relaciona hidrologia e geomorfologia através da normalização de dados topográficos. A cota altimétrica é considerada em relação à rede de drenagem e esta normalização permite, por exemplo, simulação de áreas mais suscetíveis à inundação, identificação da profundidade do lençol freático em relação a topografia do terreno. Alguns estudos têm demonstrado de modo indireto que a topografia exerce influência sobre a vegetação, uma vez que determina as feições hidrológicas, variações de disponibilidade hídrica, distribuição dos tipos de solo e topoclimas (Bispo e Valeriano, 2009).

Dentro do modelo HAND, a primeira etapa é a correção hidrológica do MDE, eliminando os sinks (Figura 23A), para garantir a propagação do fluxo em todas as células do MDE (Figura 23B). Posteriormente, procedimentos automáticos determinaram as direções de fluxo e as áreas acumuladas de drenagem, ou seja, é definido para qual dos *pixels* vizinhos um determinado pixel drena (direção do fluxo) e a área de drenagem que contribui para cada *pixel* (área acumulada), dando origem à rede de drenagem. Estabelecendo um limiar mínimo para iniciar um canal (Montgomery e Dietrich, 1988), a rede de drenagem é extraída do MDE (Figura 23C). Quanto menor o limiar, maior a densidade de drenagem.

A segunda etapa do modelo HAND é a normalização da altimetria com base nas cotas da drenagem. Assim, o MDE é reclassificado com base na diferença entre a cota do canal mais próximo e as cotas da planície de inundação e/ou das encostas adjacentes a este canal (Figura 23D). No presente trabalho foi utilizada a versão do HAND implementada no software TerraHidro.

Figura 23 – Etapas para elaboração do HAND no TerraHidro



Fonte: Rennó et al. (2008),

Como explicam Rennó et al. (2008) e Nobre et al. (2010), a partir da rede de drenagem extraída do dado topográfico, a diferença entre cada elemento da grade do MDE e o ponto mais próximo associado à rede de drenagem extraída dá origem ao modelo de superfície HAND. O nível de referência deixou de ser fixo em relação ao nível do mar e passou a ser relativo à rede de drenagem mais próxima. Em outras palavras, o valor do atributo de altitude de um determinado ponto é definido pela posição que este se encontra em relação à o curso d'água para o qual ele deságua, iniciando a contagem a partir de zero (na drenagem) e aumentando na medida em que este se distância da drenagem.

3.2.8 - Mapa Geológico

A identificação e caracterização da geologia da bacia do Rio do Peixe foi obtida com base na compilação de duas folhas (Itabirito SF.23-X-A-III-1 e Casa de Pedra SF.23-X-A-III-3) da carta geológica do Projeto Quadrilátero Ferrífero, na escala de

1:50.000, produzidas pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) e Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005.

Segundo Crepani et al. (2001) a contribuição da geologia na análise da vulnerabilidade compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade geológica se encontra e ao grau de coesão das rochas. O grau de coesão está relacionado com a intensidade da ligação entre os minerais que as constituem, sendo assim, rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto rochas muito coesas prevalecem os processos de formação dos solos.

A partir do mapa Geológico foram obtidas as principais rochas presentes na área em estudo. Estas rochas compõem a variável geologia dos modelos de fragilidade Crepani et al. (2001) e da prosta metodológica desta pesquisa.

3.2.9 - Mapa Pedológico

O termo erodibilidade se refere à capacidade de um determinado solo resistir à erosão. A erodibilidade de um solo é função das condições internas ou *intrínsecas* do solo, como sua composição mineralógica e granulométrica e características físicas e químicas.

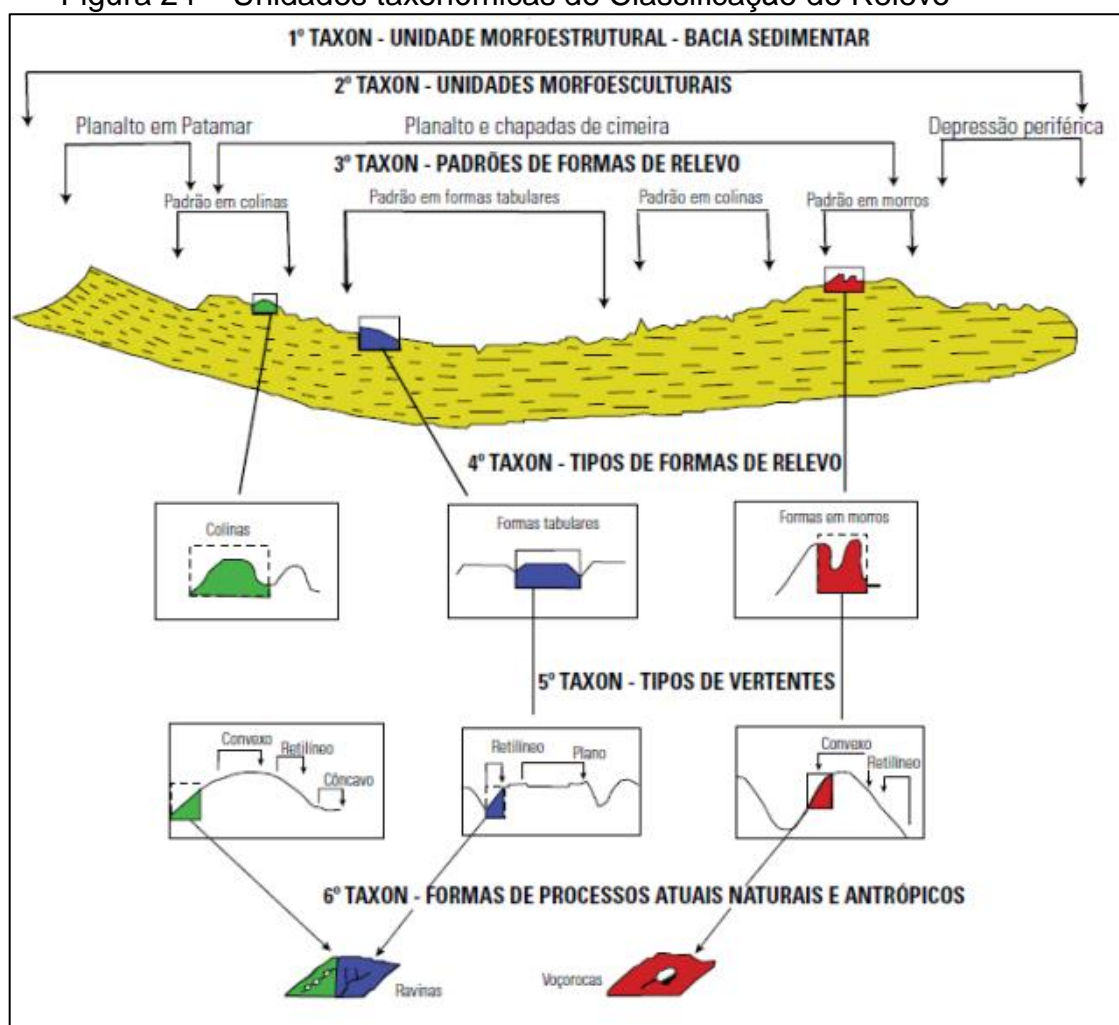
A maior ou menor suscetibilidade de um solo a sofrer os processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores e os mais importantes são: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis. As características do solo definem sua maior ou menor susceptibilidade aos processos erosivos, por esse motivo é uma importante variável a ser considerada no mapeamento da fragilidade do ambiente.

A identificação dos tipos de solos presentes na área em estudo foi obtida através de análise empírica em campo e compilação de dados do mapa pedológico, na escala de 150.00, do Projeto APA Sul Região Metropolitana de Belo Horizonte – estudos do Meio Físico, elaborado pelo serviço Geológico Brasileiro – CPRM (2005).

3.2.10 – Mapa Geomorfológico

O mapeamento geomorfológico teve como objetivo identificar os compartimentos morfoestruturais e morfoesculturais, formas de vertentes e processos erosivos presentes na bacia do Rio do Peixe. O mapeamento e análise geomorfológica foram baseados nos pressupostos da metodologia de Ross (1992, 1996), que propôs uma classificação em seis níveis taxonômicos, com base na morfologia e na gênese, como mostra a figura 24.

Figura 24 – Unidades taxonômicas de Classificação do Relevo



Fonte: Modificado de Ross (1992)

O 1º **táxon** corresponde as “*Unidades Morfoestruturais*”, cuja escala permite a identificação dos efeitos da estrutura no relevo. Este táxon organiza o relevo em grandes arranjos morfoestruturais. Como exemplo para este nível, pode-se citar o cinturão orogênico do Quadrilátero Ferrífero.

O **2º táxon** refere-se às “*Unidades Morfoesculturais*” Refere-se a compartimentos que foram gerados pela ação climática ao longo do tempo geológico. Incluem-se neste táxon a Unidades Morfoesculturais do Platô Sinclinal Moeda (CPRM, 2005).

O **3º táxon** representa as “*Unidades Morfológicas ou Padrões de Formas Semelhantes*”, que se encontram nas Unidades Morfoesculturais. Trata-se de compartimentos diferenciados em uma mesma unidade, relacionados a processos morfoclimáticos específicos, com importante participação dos eventos tectônicos ou diferenciações litoestratigráficas. Incluem nesta categoria as Zonas de Colinas, Cristas do Platô Sinclinal Moeda.

O **4º táxon** refere-se às formas de relevo individualizadas na unidade de padrão de formas semelhantes. Estas formas, quanto à gênese, podem ser: de acumulação, como as planícies fluviais do Rio do Peixe, ou de dissecação como colinas, e cristas.

O **5º táxon** refere-se às partes das vertentes ou setores das vertentes de cada uma das formas do relevo. As vertentes de cada tipologia de forma são geneticamente distintas, e cada um dos setores dessas vertentes pode apresentar características geométricas, genéticas e dinâmicas diferentes.

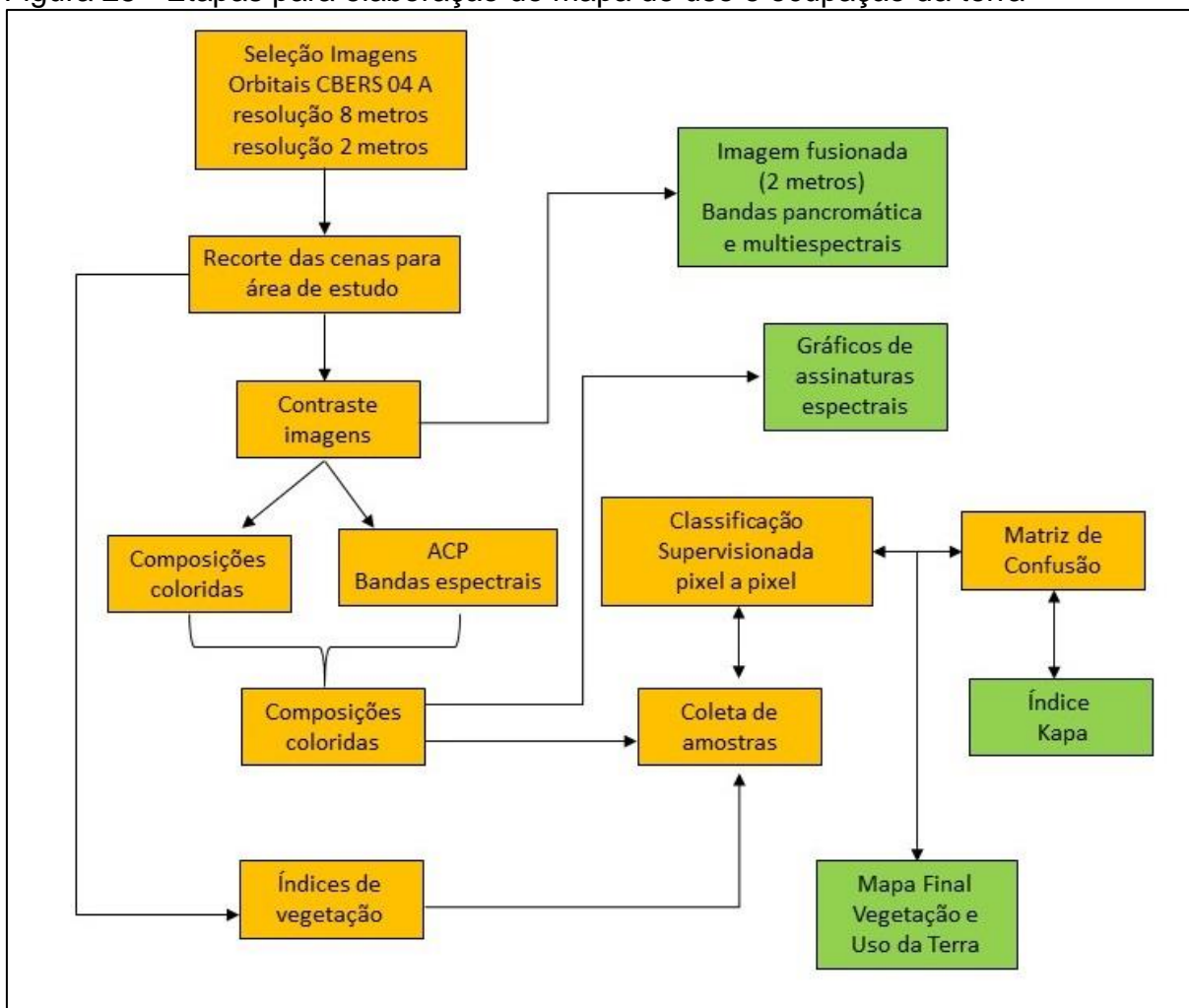
O **6º táxon** corresponde às pequenas formas de relevo que se desenvolvem por interferência antrópica direta ou indireta ao longo das vertentes. São formas geradas pelos processos erosivos atuais como ravinas, voçorocas, assoreamentos, escorregamentos, dentre outros.

Os estudos geomorfológicos da área da bacia do Rio do Peixe, em função da escala de análise 1:50.000, enfatizaram o 5º e o 6º táxon. Os mapas geomorfológicos e os perfis topográficos foram obtidos através de interpretação de imagem de satélite *CBERS 4A*, com resolução espacial de 8 metros), do mapa geológico, do mapa hipsométrico e das variáveis morfometrias obtidas pelo modelo digital de elevação. Os mapeamentos das formas geradas pelos processos erosivos (ravinas, voçorocas, escorregamentos e remoção basal) foram utilizadas para verificar o nível de acurácia dos mapeamentos de fragilidade ambiental.

3.2.11 - Cobertura Vegetal e Uso do Terra

O mapeamento da vegetação foi obtido a partir da utilização de sensor orbital passivo CBERS 04A, com resolução espacial de 8 metros no modo multispectral e 2 metros no modo pancromático. Estas foram selecionadas segundo os critérios de maior atualidade, e menor cobertura nebulosa, tendo em vista que esta característica é um empecilho para trabalhos que objetivam mapear o uso e cobertura da terra, pois geram lacunas na informação espacial da superfície terrestre sobretudo na faixa visível do espectro eletromagnético. Foram selecionadas cenas do dia 13 de setembro de 2021. A figura 25 apresenta o fluxograma da elaboração do mapa de cobertura vegetal e uso da terra

Figura 25 - Etapas para elaboração do mapa de uso e ocupação da terra



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Os níveis de processamento das imagens das câmeras do satélite CBERS 04A, com exceção do processamento por passagem, que é uma novidade, permanecem os mesmos das missões CBERS anteriores. As imagens foram disponibilizadas no nível 4 (L4) ortorretificadas, ou seja, apresentam correção radiométrica e correção geométrica de sistema refinada pelo uso de pontos de controle e de um modelo digital de elevação do terreno (INPE, 2021).

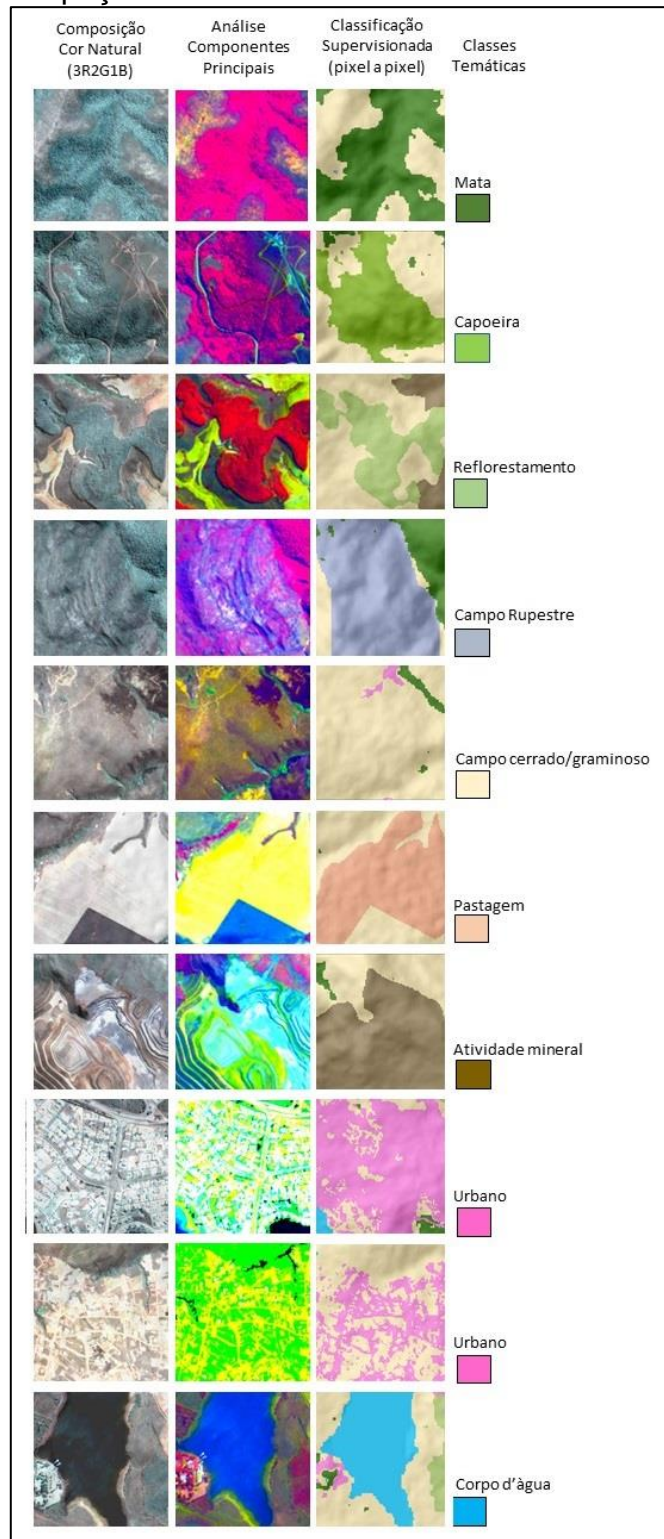
Para classificação visual foram elaboradas composições coloridas cor natural e falsa cor utilizando as bandas espectrais azul (banda1) verde (banda 2), vermelho (banda 3) e infravermelho próximo (banda 4). Também foi gerado uma imagem colorida com resolução espectral de 2 metros, por meio da fusão de imagem composição cor natural (bandas 1, 2 e 3) com a pancromática (Banda 0) - (Figura 25).

Além disso, foram executadas análises de componentes principais (ACP) a partir das bandas 1 a 4. A principal função da ACP é determinar a extensão da correlação existente entre as bandas e, através de uma transformação matemática apropriada, remover a correlação existente entre as bandas. Assim, a ACP é aplicada da seguinte forma: um conjunto de N imagens de entrada, depois de processadas pela ACP, vai produzir um outro conjunto de N imagens de saída com nenhuma correlação entre si. O primeiro conjunto de saída será chamado de primeira componente principal ou CP1, o segundo conjunto de saída será chamado de CP2, o terceiro, de CP3, e assim por diante. A primeira componente principal ou CP1 irá conter a informação que é comum a todas as bandas N originais. A CP2 conterá a feição espectral mais significativa do conjunto. As CPs seguintes conterão feições espectrais cada vez menos significantes, até a última CP, que conterá a informação que sobrar, ou seja, a menos significativa (CROSTA, 1992).

Posteriormente foram realizadas composições coloridas a partir das três primeiras componentes principais. Foram utilizadas técnicas de contraste às imagens a fim de otimizar o processo de interpretação das mesmas. As tipologias de cobertura vegetal e de uso e ocupação do solo, para treinamento do algoritmo, foram baseadas na classificação proposta pela CPRM (2005) para a região de abrangência da Área de Proteção Ambiental APA SUL. Foram identificadas as seguintes classes na bacia do Rio do Peixe: mata, capoeira, reflorestamento, campo rupestre, campo cerrado/graminoso, pastagem, atividade mineral, urbano e corpos d'água. As chaves

de interpretação utilizadas na classificação supervisionada estão representadas na figura 26.

Figura 26 – Chaves de interpretação para classificação supervisionada da cobertura vegetal e do uso e ocupação da terra



Fonte: dados da pesquisa (2021)

A classificação das imagens foi elaborada através método *random forest*. Trata-se de um algoritmo de aprendizado de máquinas baseado em um conjunto de árvores de decisão que permite a entrada simultânea de variáveis preditoras categóricas e numéricas (BREIMAN, 2001). Para extração das áreas urbanizadas/construídas foram utilizadas as bandas componentes 2 e 3, que apresentaram melhor resultado para este tema.

No mapa classificado foi aplicado um filtro majoritário de janela móvel de tamanho de 3 x 3 *pixels* para suavização do efeito sal e pimenta. De acordo com Rosa (2013) para que o produto resultante da classificação das imagens apresente uma concordância com a realidade observada em campo, o mesmo deve possuir uma confiabilidade estatística aceitável tanto em precisão, quanto em exatidão do mapeamento.

O mapa temático obtido a partir de imagens de satélite tem por objetivo representar o mundo real, contudo essa representação possui erros introduzidos durante todo o processo de elaboração do mapa, advindas de falhas do fotointerprete na identificação das classes, na delimitação dos diferentes alvos, na escolha da escala de trabalho, nas limitações da resolução espacial e espectral do sensor, na data de obtenção das imagens e no desenho final do mapa. (ROSA, 2013, p. 130)

Dentro desse contexto de validação, o coeficiente Kappa é o método mais conhecido e indicado para aferição de classificações temáticas (MOREIRA, 2001). Segundo Rosa (op. cit.), o índice Kappa é um coeficiente para escalas nominais que mede a proporção de concordância depois que a concordância atribuída à casualidade é retirada.

Para Cohen (1960), o coeficiente Kappa considera todos os elementos da matriz de erros ao invés de apenas aqueles que se situam na diagonal principal da mesma, ou seja, estima a soma da coluna e linha marginais. Considera-se que valores próximos a 1 indicam melhor concordância entre a realidade no terreno e o resultado encontrado com a classificação, por outro lado quando valores próximos a zero (0) indicam que não há concordância entre os dados classificados pelo algoritmo e os dados de referência da amostra para treinamento. A tabela 03 apresenta os intervalos utilizados para determinar o desempenho do valor kappa encontrado.

Tabela 03 – Intervalos do Índice Kappa

Índice Kappa	Desempenho
<0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Landis; Koch (1977)

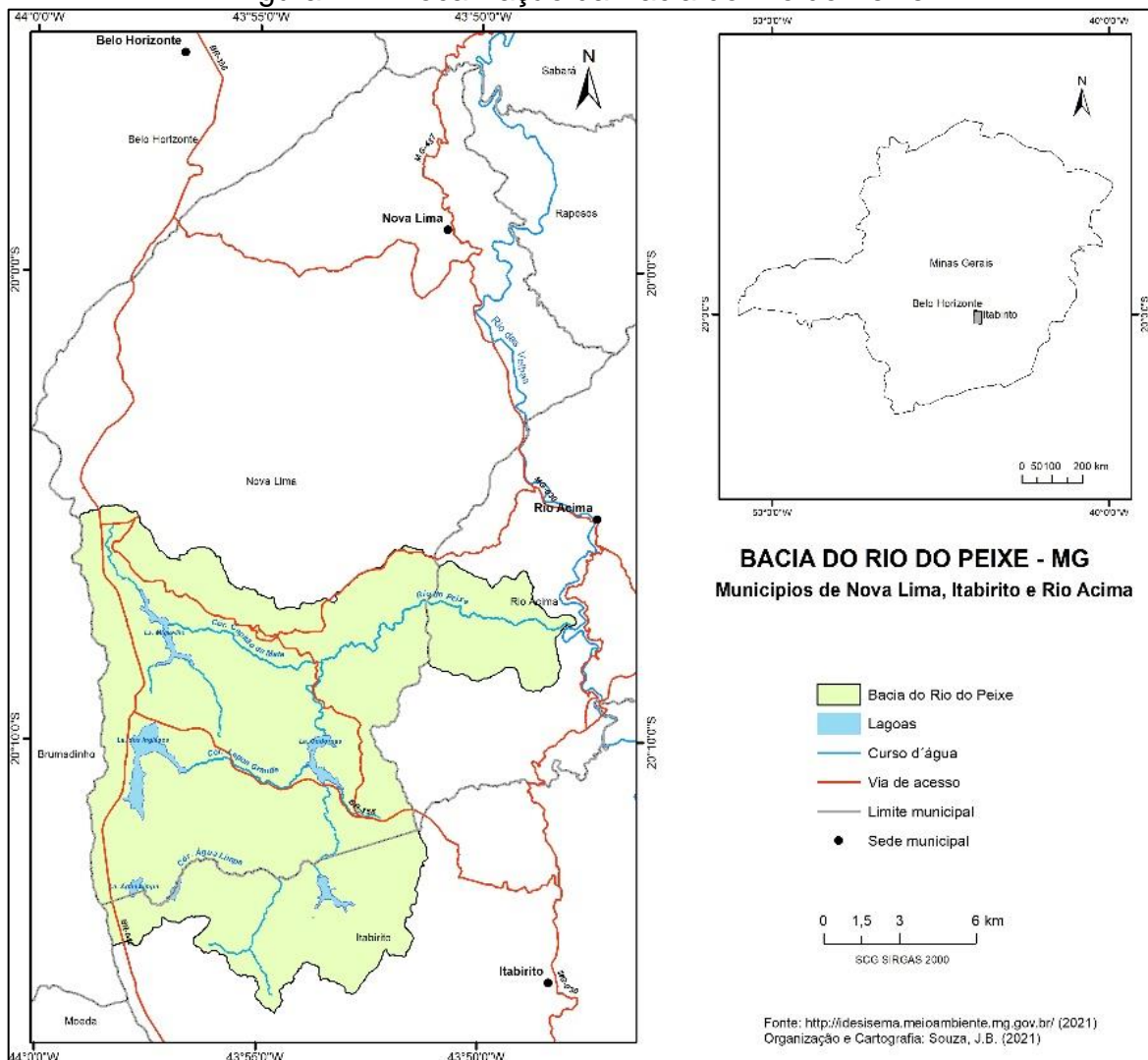
O mapeamento da cobertura vegetal e uso da terra foi validado pelo Índice Kappa e a exatidão global pela coleta de pontos distribuídos aleatoriamente sobre as classes temáticas, obtidos em trabalho de campo registrados via sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*). A acurácia do mapeamento foi de 0,89, considerado muito bom, conforme parâmetros estabelecidos por Landis e Koch (1977).

4 CARACTERIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para este trabalho, a bacia hidrográfica do Rio do Peixe drena uma área de 213,86 km² entre os municípios de Nova Lima, Rio Acima e Itabirito, situados a sudeste da capital mineira, na região denominada Quadrilátero Ferrífero. A bacia esta é delimitada pelas coordenadas Geográficas inferiores 43°59'11".760W / 20°15'48".596S e superiores 43°47'48".782W / 20°5'0".744S. Afluente da margem direita do Rio das Velhas, tem como principais afluentes o ribeirão Marinho, Ribeirão capitão, córrego.

A bacia possui várias represas construídas com a finalidade de geração de energia elétrica e abastecimento das atividades minerárias presentes na bacia e entorno (figura 27).

Figura 27 – Localização da Bacia do Rio do Peixe

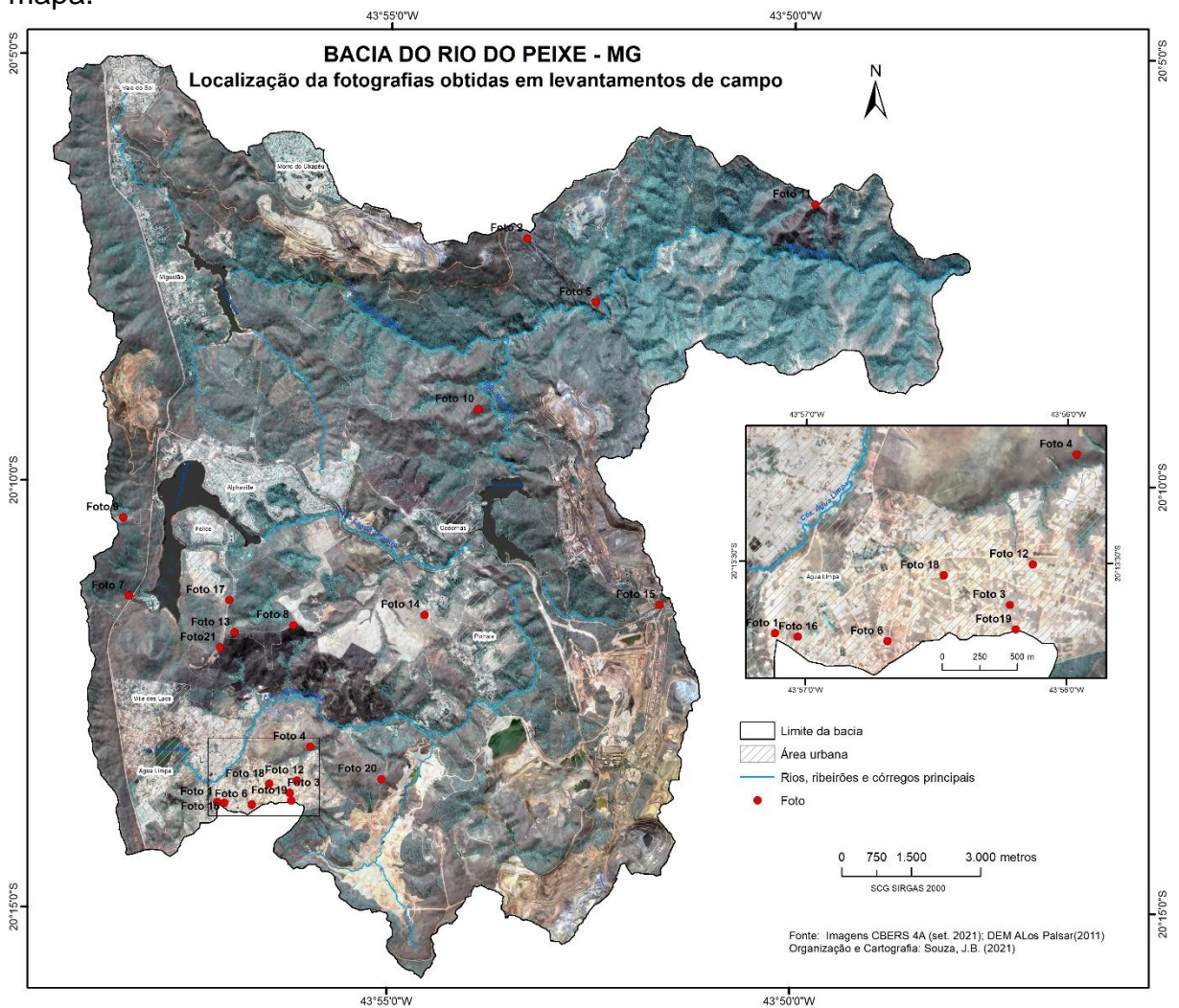


Fonte: dados da pesquisa (2021)

Trata-se de uma região altamente antropizada pela atividade minerária e recentemente pelo acelerado processo de urbanização em seu médio e alto curso. Possui vegetação predominante de campo gramíneo, com poucos fragmentos de mata nativas, além de grande amplitude altimétrica, formas variadas de relevo, de litologias e classes pedológicas.

A figura 28 traz imagem cor natural fusionada com banda pancromática (2 metros) obtida pelo satélite CBERS 04A, permitindo uma visualização da paisagem que compõe a bacia do Rio do Peixe. As fotografias obtidas em levantamentos de campo para compor o estudo da fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe, estão especializadas na figura 28.

Figura 28 – imagem cor natural fusionada com banda pancromática CBERS 04A (2 metros). A fotografias obtidas nos levantamentos de campo estão localizadas no mapa.



Fonte: dados da pesquisa (2021)

4.1 – Geologia

A bacia hidrográfica do Rio do peixe está inserida na unidade geológica conhecida como Quadrilátero Ferrífero. O Quadrilátero Ferrífero posiciona-se no extremo sudeste do Cráton do São Francisco, de idade tectônica arqueana, consolidado ao final do Ciclo Transamazônico e limitado por cinturões orogênicos do ciclo brasileiro brasileiro (Almeida, 1977). No Arqueano esta província era parte de

um bloco crustal mais extenso, o Cráton do Paramirim (Almeida, 1981), estabilizado ao final do Arqueano e com margens remobilizadas no Ciclo Transamazônico.

O Quadrilátero Ferrífero tem geometria definida por megadobras sinformes e antiformes, truncadas por cinturões de falhas de empurrão norte-sul, na sua parte oriental. A homoclinal da serra do Curral e as sinclinais Dom Bosco, Santa Rita e Moeda marcam, respectivamente, seus limites norte, sul, leste e oeste. A leste, as sinclinais do Gandarela, Ouro Fino, Conta História e Santa Rita dispõem-se segundo amplo arco de direção norte-sul afetadas pelos cinturões de cisalhamento brasileiros.

Consiste em uma das mais importantes províncias minerais do Brasil, sendo a complexa geologia regional caracterizada, principalmente, por quatro grandes unidades litoestratigráficas (ALKMIM; MARSHAK, 1998) (Quadro 4): Embasamento Cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. Segundo Uhlein; Oliveira (2001), cada unidade representa um estágio evolutivo que se iniciou com a formação de uma bacia sedimentar, seguida de orogênese, formação de cadeia montanhosa e, por fim, o rebaixamento do relevo devido a inúmeros ciclos erosivos (LADEIRA, 2014)

Quadro 4 - Coluna estratigráfica simplificada para o Quadrilátero Ferrífero

COBERTURAS SEDIMENTARES RECENTES			
PROTEROZOÍCO	SUPER GRUPO ESPINHAÇO	Grupo Conselheiro Mata	Formação Cambotas
		Grupo Itacolomi	
	SUPER GRUPO MINAS	Grupo Sabará	
		Grupo Piracicaba	Formação Barreiro
			Formação tabões
			Formação Fecho do Funil
			Formação Cercadinho
		Grupo Itabira	Formação Gandarela
			Formação Caué
		Grupo Caraça	Formação Batatal
Formação Moeda			
ARQUEANO	SUPER GRUPO RIO DAS VELHAS	Grupo Maquiné	Formação Casa Forte
			Formação palmital
		Grupo Nova Lima	Xisto metassedimentar e metavulcânico
	Grupo Quebra-Osso	Associação metavulcânica máfica-ultramáfica	
	TERRENOS GRANITO-GNÁISSICO-ARQUEANOS		

Fonte: CPRM (2005)

Os Terrenos Granito-Gnáissico são constituídos por diversos complexos metamórficos, geralmente, periféricos e supracrustais, exceto o Complexo Metamórfico Bação, localizado na porção central do Quadrilátero Ferrífero (HERZ, 1970). São compostos pelas rochas mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, geralmente, terrenos arqueanos com idades que variam entre 3,28 e 2,61 bilhões de anos (MACHADO & CARNEIRO, 1992; CARNEIRO, 1992).

O Supergrupo Rio das Velhas é constituído por uma sequência vulcano-sedimentar arqueana, tipo *greenstone belt*, com idade aproximada entre 2,7 e 2,8 bilhões de anos, que se encontram sobrepostas em discordância com os Terrenos Granito-gnáissico (MACHADO et al., 1992). Sua litologia é representada por komatitos e basaltos, rochas vulcanoclásticas, lavas riolíticas e rochas sedimentares (LADEIRA, 1980). Apresenta-se subdividido em dois grupos: Nova Lima e Maquiné (DORR, 1969).

- **O Grupo Nova Lima** ocupa maior área de afloramento no Supergrupo Rio das Velhas, com uma espessura total estimada de 4000 metros, principalmente, na localidade de Nova Lima (DORR II, 1969). É composto basicamente por rochas metavulcânicas (komatitos, serpentinitos, metabasaltos, esteatitos), metassedimentares clásticas (quartzitos, metaconglomerados e quartzos-xisto) e químicas (xistos carbonáticos, dolomitos, formação ferrífera bandada e filitos grafitosos) (LADEIRA, 1980).
- **O Grupo Maquiné** encontra-se sobreposto ao Grupo Nova Lima, sendo formado, essencialmente, por pacotes de rochas clásticas (filitos, xistos e quartzitos), (DORR, 1969).

O Supergrupo Minas é constituído por metassedimentos de origem química e clástica cuja idade varia entre 2,5 e 1,8 bilhões de anos, que repousam em nítida discordância regional sobre as rochas dos Terrenos Granito-Gnaissico ou do Supergrupo Rio das Velhas (DORR, 1969; ALKMIM & MARSHAK, 1998). Segundo Alkmim & Marshak (1998), o Supergrupo Minas pode ser subdividido da base para o topo em quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

- **O Grupo Caraça** está situado na base inferior do Supergrupo Minas, sendo constituído por sedimentos clásticos que são divididos, da base para o topo, em Formações Moeda e Batatal (DORR et al., 1957). A Formação Moeda é

constituída por quartzitos sericíticos e lentes de conglomerados, gradando para filitos arenosos (WALLACE, 1958; DORR, 1969). Já a Formação Batatal encontra-se capeando a Formação Moeda, constituída basicamente por filitos e xistos, cujas camadas afloram raramente em alguns escarpamentos e cortes artificiais nas encostas (MAXWELL, 1957 *apud* DORR II, 1969).

- **O Grupo Itabira** encontra-se depositado sobre o Grupo Caraça, sendo constituído basicamente por metassedimentos químicos (BARBOSA, 1968; DORR et al., 1957), com uma idade estimada de 2,58 bilhões de anos (RENGER et al., 1994). Segundo Dorr II (1969), o Grupo Itabira pode ser dividido, da base para o topo, em Formação Cauê e Formação Gandarela. A Formação Cauê apresenta como rochas típicas o itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico, onde são encontrados os maiores depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. A Formação Gandarela encontra-se depositada sobre a Formação Cauê, sendo constituída basicamente por rochas carbonáticas e itabiritos dolomíticos, onde são exploradas pedras para ornamentação e construção, além de depósitos de hematita com alto teor de ferro, manganês e de topázio nos distritos de Antônio Pereira e Rodrigo Silva em Ouro Preto (GANDINI, 1994).
- **O Grupo Piracicaba** é constituído por espesso pacote de sedimentos clásticos intercalados na base com lentes de carbonatos (ALKMIM & MARSHAK, 1998), de idade estimada entre 2,4 e 2,159 bilhões de anos (RENGER et al., 1994). Encontra-se dividido, da base para o topo, nas formações: Cercadinho, constituída por filitos, dolomitos, quartzitos, quartzitos ferruginosos; Fecho do Funil, constituída por filitos quartzosos, filitos dolomíticos e dolomitos silicosos; Taboões, constituída por quartzitos lenticular de granulação fina e Barreiro, constituída por filitos e filitos grafitosos (DORR II, 1969). A importância econômica desse grupo advém da ocorrência de jazidas do Topázio Imperial localizadas nas Formações Cercadinho e Fecho do Funil (PIRES et al., 1983).
- **O Grupo Sabará** constitui a unidade mais recente do Supergrupo Minas, com idade Paleoproterozóica, aproximadamente 2,1 bilhões de anos e, posiciona-se por discordância erosiva sobre o topo do Grupo Piracicaba (ALMEIDA et al., 2005). É composto por xistos, filitos, metarenitos, metavulcanoclásticas,

metaconglomerados e metadiamicictitos (DORR II, 1969; RENGER et al., 1994; ALKMIM; MARSHAK, 1998).

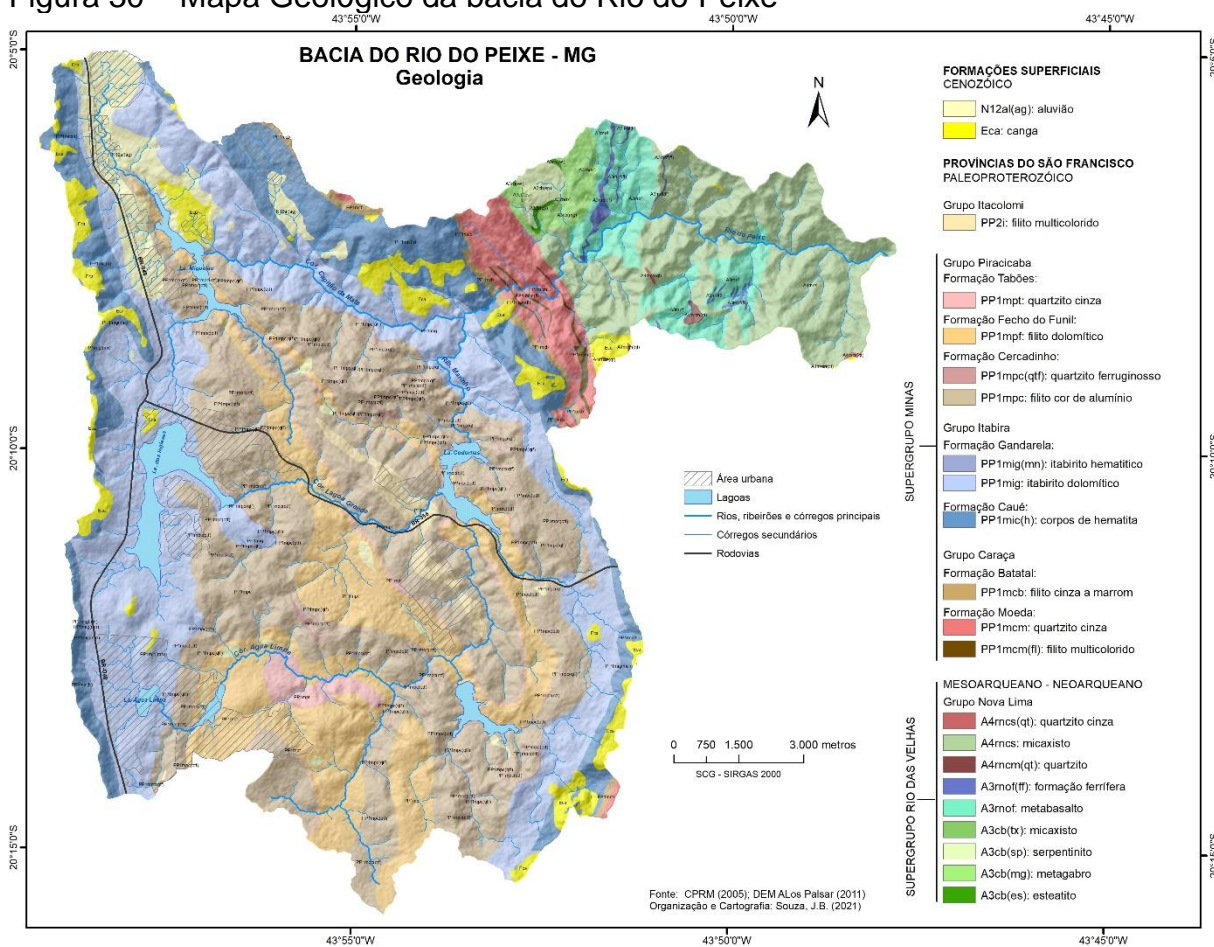
- **O Grupo Itacolomi** ocorre de forma restrita no Quadrilátero Ferrífero (ALKMIM, 1985), sendo mais comum no Pico do Itacolomi, Serra de Ouro Branco e no Morro do Frazão. É formado por metassedimentos clásticos proterozóicos (ALKMIM; MARSHAK, 1998), com cerca de 2,1 bilhões de anos (MACHADO et al., 1996), que repousam através de uma profunda discordância erosiva sobre a parte superior do Supergrupo Minas (BARBOSA & RODRIGUES, 1967). Sua litologia é composta por quartzitos na base e no topo, metaconglomerados na base e filitos originados de depósitos aluviais e fluviais na porção intermediária (LDEIRA, 1980).

O Supergrupo Espinhaço aparece localmente no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero, especialmente, na Serra das Cambotas que se encontra no distrito de Cocais, município de Barão de Cocais. Segundo Dorr II (1969), a sua ocorrência na região está associada aos quartzitos e conglomerados de idade Proterozoica, do Grupo Diamantina.

Além desses pacotes de rochas, no Quadrilátero Ferrífero são encontrados diques intrusivos de rochas básicas, aflorantes ou não, de idade estimada em 1,714 bilhões de anos (SILVA et al., 1995) cortando as sequências do Grupo Itacolomi, Supergrupo Minas, bem como, bacias de origem terciária e continental que recobrem estratigraficamente unidades pré-cambrianas, denominadas por Gorceix (1884), como Bacia do Fonseca e Bacia do Gandarela, que aparecem na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero. E ainda, as couraças constituídas por fragmentos de rochas ferruginosas, cimentadas por limonita (Hidróxido de Ferro), conhecidas como cangas (LADEIRA, 2014)

As cangas aparecem comumente recobrimdo as elevações da Serra da Moeda, Serra do Curral e Serra da Piedade, desempenhando um papel importante de resistência a erosão. Os sedimentos quaternários na região do Quadrilátero Ferrífero estão associados a depósitos aluviais, que aparecem comumente nas planícies de inundação. A drenagem da bacia do Rio do Peixe corta litologias do Supergrupo Minas e do Super Rio das Velhas (figura 29)

Figura 30 – Mapa Geológico da bacia do Rio do Peixe



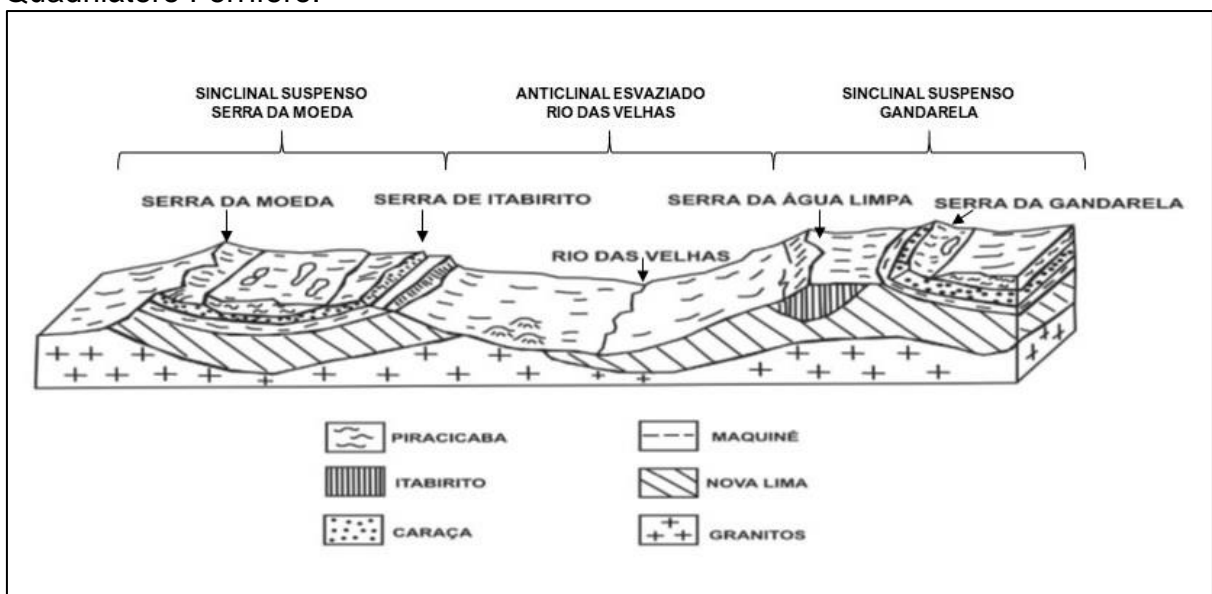
Fonte: dados da pesquisa (2021)

Silva et al. (2005) propões uma evolução para a megaestrutura do Sinclinal Moeda com base em três eventos deformacionais:

- **Evento E1:** Evento de caráter distensivo, com a formação de uma calha, sob condições dúcteis a dúcteis-rúpteis. Ocorreu a acomodação das supracrustais sobre um sistema de falhas extensionais responsável por formar a megaestrutura, hoje denominada de Sinclinal da Moeda. Este sistema está mais preservado no flanco oeste deste sinclinal.
- **Evento E2:** O segundo evento deformacional, seria de natureza compressiva com vergência para N, redobrando o sinclinal e sua expressão decresce para o norte
- **Evento E3:** O último evento foi também compressivo, mas com polaridade tectônica de ESSE para WSW, associado à inversão brasileira e teria causado a formação das principais estruturas da região.

Após estes eventos tectônicos responsáveis pela estruturação do arcabouço geológico, a região passou por inúmeros processos denudacionais. Este intrincado arcabouço geológico, presente na Bacia do rio do Peixe, proporcionou uma diversidade de formas única na região, tanto pela condição estrutural quanto pela condição litológica. Esse controle litológico sobre a morfologia é observado nos relevos do tipo sinclinais suspensos, anticlinais esvaziadas ou escavadas e de inúmeras cristas (BARBOSA e RODRIGUES, 1967). Figura 31.

Figura 31 – Bloco diagrama no sentido WE, representando macroestruturas do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: modificado de Barbosa e Rodrigues (1967)

Salgado et al. (2004) em seu estudo sobre a evolução do relevo do Quadrilátero demonstrou quantitativamente a existência de uma erosão diferencial na região, onde os quartzitos e itabiritos constituem as rochas mais resistentes e determinam as cristas onde o relevo é mais elevado. Os xistos, filitos e granito-gnaisses ocorrem nas porções de relevo intermediário e normalmente preenchendo os sinclinais e anticlinais rebaixados, enquanto os gnaisses ocupam as terras baixas. Devido a sua fraca resistência ao intemperismo e erosão.

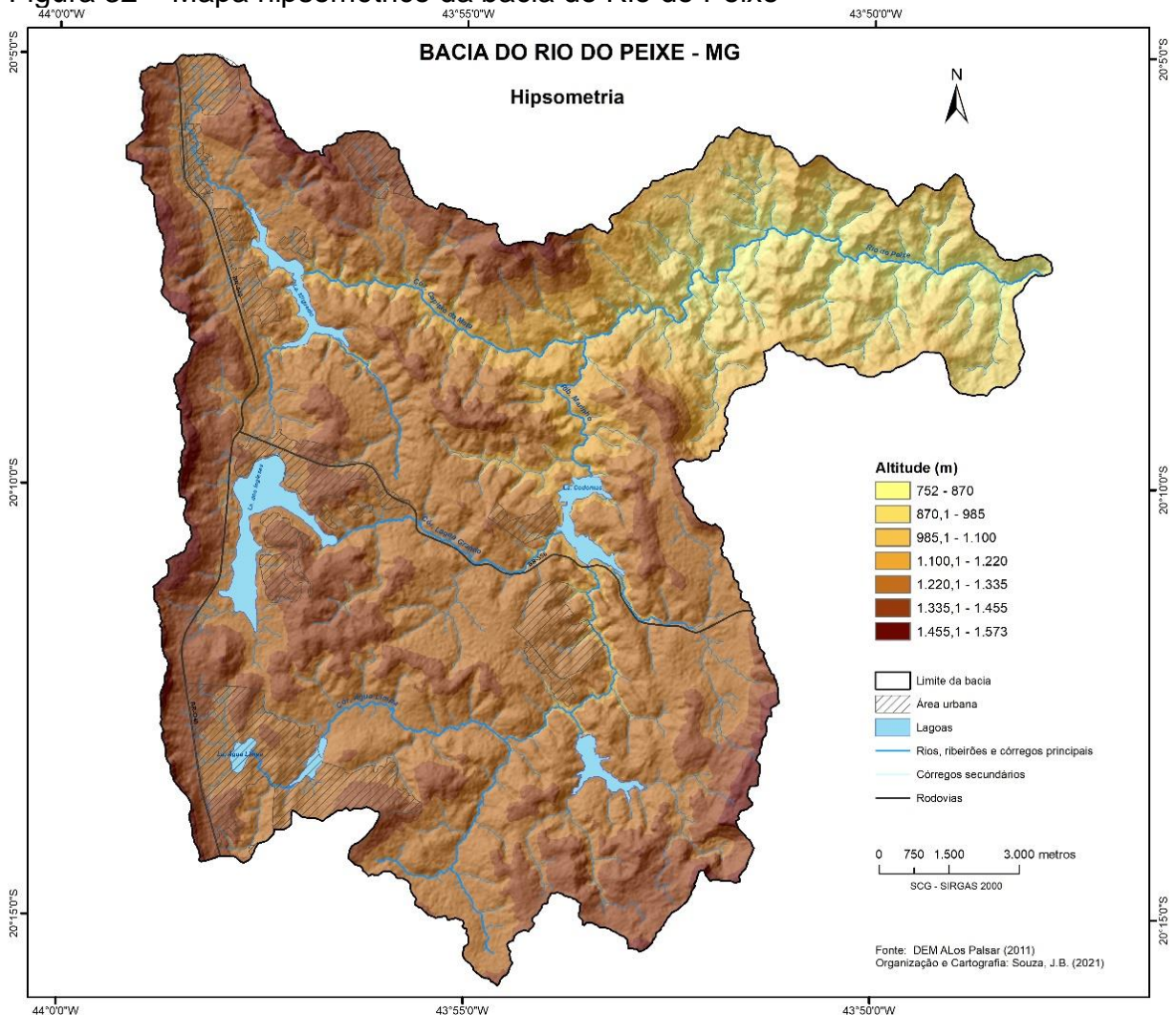
4.2 – Geomorfologia

Ao analisar a hipsometria de uma área, compreende-se a distribuição da variação de faixas altimétricas em relação às unidades horizontais de um determinado

espaço. Com essa variável, também é possível compreender a configuração e condições do desgaste do relevo. Ao se criar a curva hipsométrica, esta não demonstra apenas onde são as áreas mais rebaixadas pelos agentes externo, como aponta, também, as áreas mais preservadas devido à resistência litológica. (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Na área de estudo e suas proximidades as maiores altitudes chegam a aproximadamente 1570 m na Serra da Moeda e as partes mais baixas em torno 870 m, na confluência do Rio do Peixe com o Rio das Velhas. A figura 32 representa a hipsometria obtida pelo MDEHC da bacia.

Figura 32 – Mapa hipsométrico da bacia do Rio do Peixe

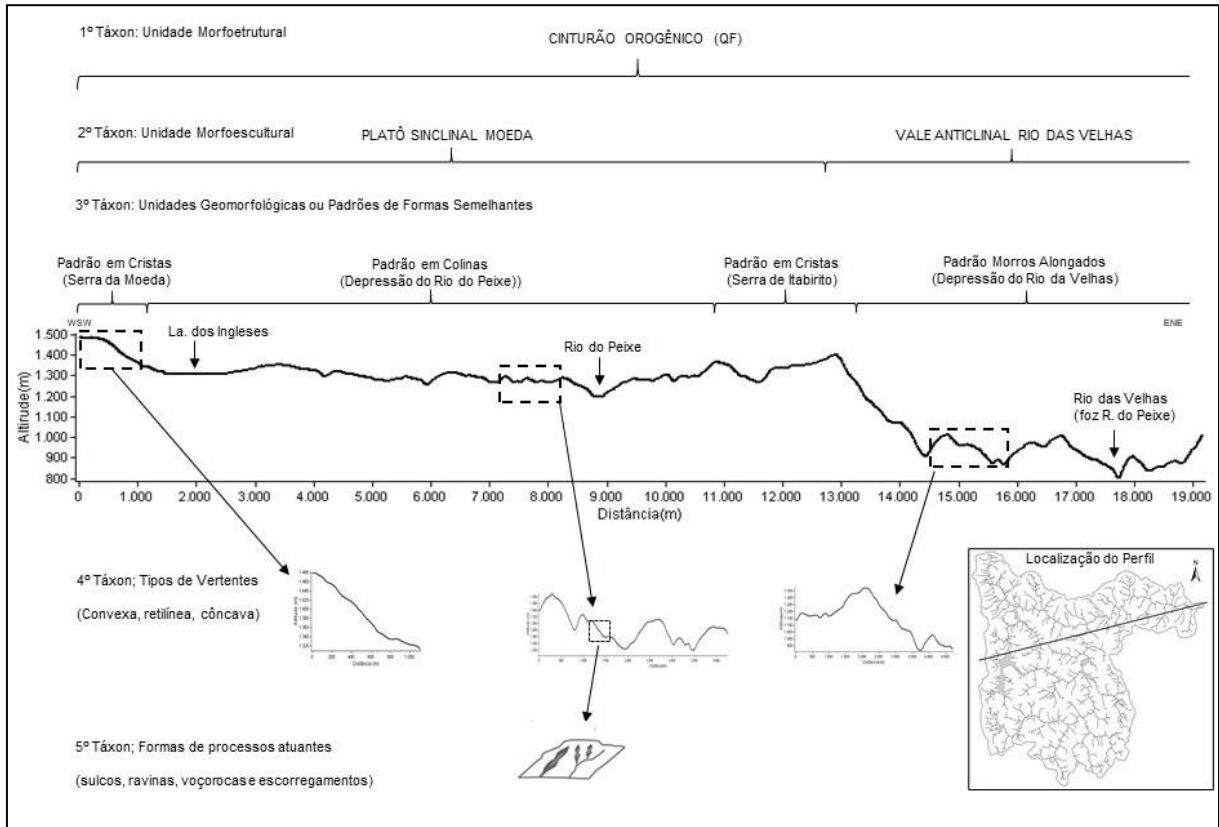


Fonte: dados da pesquisa (2021)

A hipsometria da bacia, associada as variáveis declividade, geologia e curvatura vertical das vertes, permitiram identificar importantes compartimentos geomorfológicos na bacia do Rio do peixe. Esta compartimentação realizada, com

base na taxonomia de Ross (1992) está representada no perfil topográfico de orientação WSW/ENE (figura 33).

Figura 33 – perfil topográfico representando as taxonomias segundo Ross (1992) para bacia do Rio do Peixe

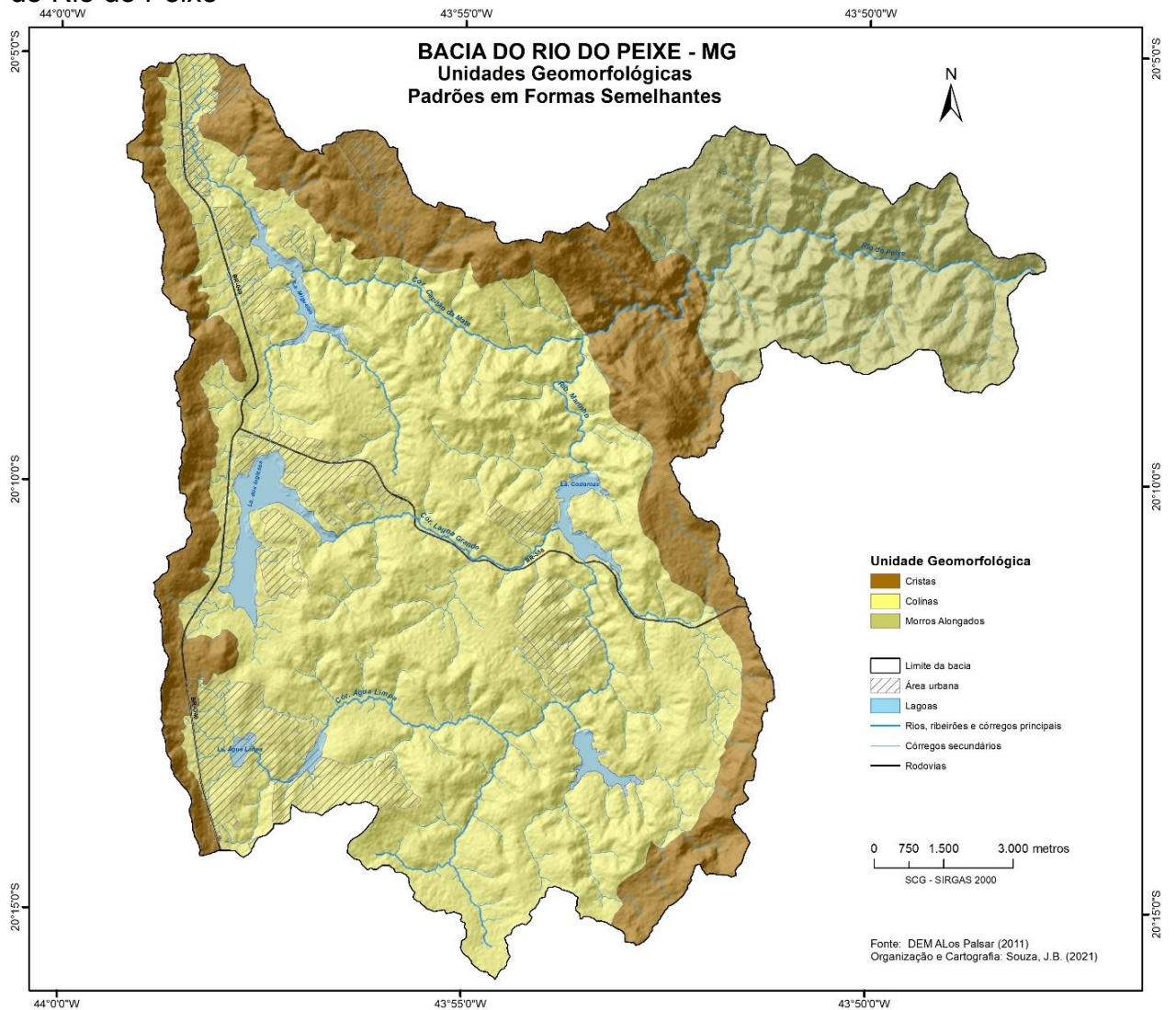


Fonte: dados da pesquisa (2021)

As denominações das duas unidades morfoesculturais Platô Sinclinal Moeda e Vale Anticlinal Rio das Velhas foram adaptadas de CPRM (2005). Cada unidade morfoescultural, por sua vez, compreende um conjunto de formas de relevo relativamente homogêneas (sistemas de colinas, morros alongados, escarpas e rampas de colúvio).

O platô do siclinal Moeda consiste em uma extensa superfície suspensa, disposta na direção norte-sul e exibe uma configuração morfológica que foi subdividida em três padrões de formas semelhantes ou unidades geomorfológicas: em Cristas e em Colinas. O Vale Anticlinal do Rio das Velhas apresenta uma superfície esvaziada por longos processos denudacionais comandados pela dinâmica do rio das Velhas. Nesta unidade morfoescultural foi identificada uma unidade geomorfológica: Morros alongados (figura 34).

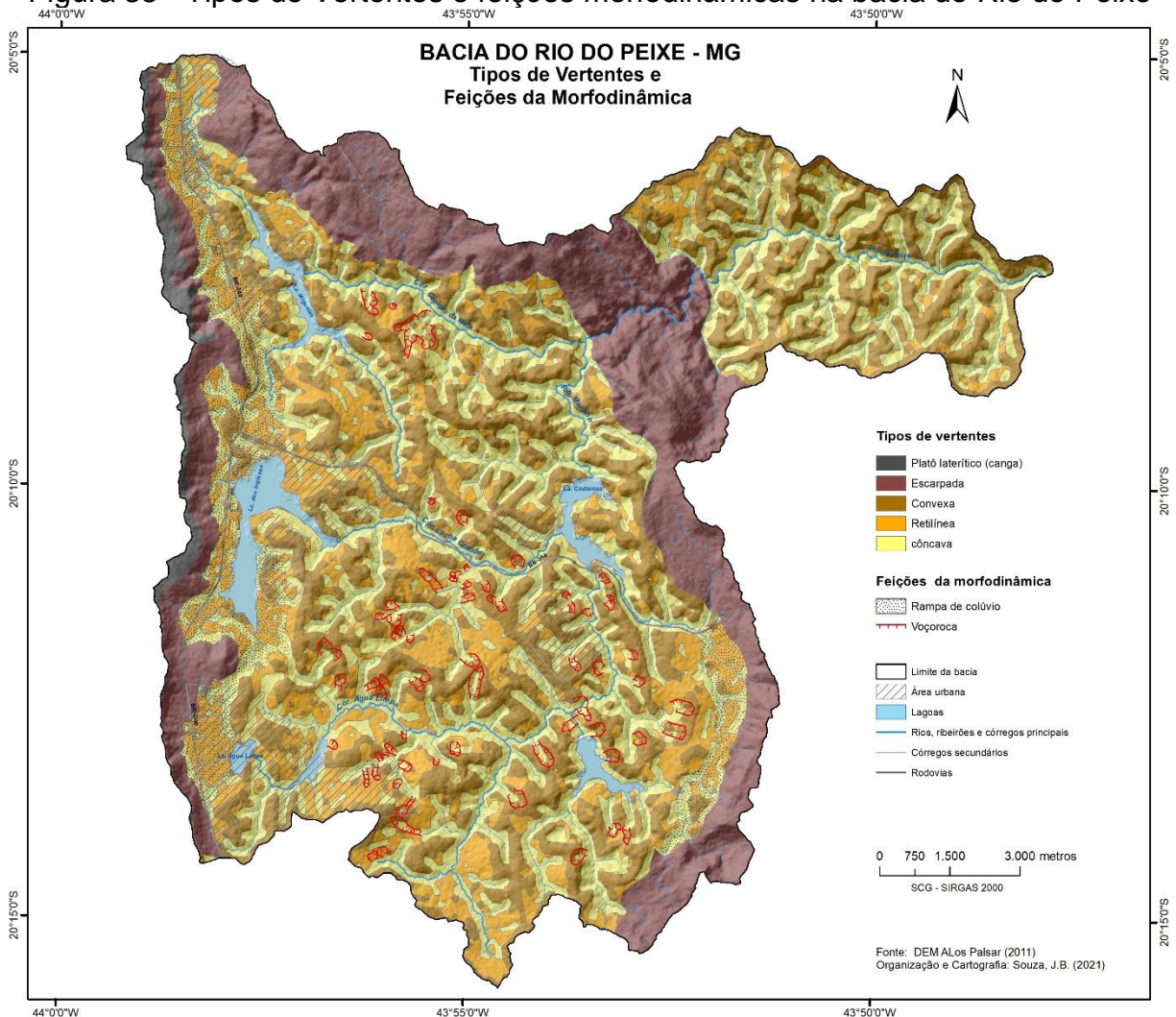
Figura 34 – Unidades Geomorfológicas (padrões em Formas Semelhantes) da Bacia do Rio do Peixe



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Dentro de cada uma das Unidades Geomorfológicas, foram identificadas as unidades de formas semelhantes com as tipologias de vertentes de vertentes e feições morfodinâmicas atuantes (figura 35).

Figura 35 - Tipos de Vertentes e feições morfodinâmicas na bacia do Rio do Peixe



Fonte: dados da pesquisa (2021)

A Unidade Morfológica em Cristas, corresponde as abas do sinclinal alçadas em altitudes que variam entre 1500 e 1600 m, sustentadas por quartzitos da Formação Moeda (Grupo Caraça) e itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira). No topo das abas, notam-se cristas ou platôs, muitas vezes capeados por canga, atingindo larguras entre 500 e 1.300 m. As declividades, que se situam na faixa de 0 a 30% no sopé da serra, nos trechos mais próximos ao topo chegam a ser superiores a 47%. As abas do sinclinal ressaltam topograficamente por erosão diferencial. Essas estão delimitadas por escarpamentos abruptos que apresentam amplitudes de relevo muito elevadas, invariavelmente, superiores a 400 m, com vertentes muito íngremes e paredões rochosos. Essas feições de relevo recebem denominação local de serra da Moeda (borda Oeste) e serra de Itabirito (borda Leste), representando os relevos mais elevados da área em estudo. A aba ocidental do sinclinal (Serra da Moeda) é o divisor

de águas das bacias dos rios das Velhas e Paraopeba (fotos 1 e 2). Nas encostas das abas do sinclinal, os processos morfogenéticos são caracterizados por escoamentos difusos e concentrados tornando as vertentes suscetíveis a processos erosivos de ravinamento e movimentos de massa. Os processos morfogenéticos prevalecem em relação aos pedogenéticos, resultando em várias ravinas que sulcam os afloramentos rochosos.

Foto 1 - vista do alinhamento da Serra Moeda a partir do Unidade Morfológica em Colinas



Fonte: acervo pessoal (2021)

Foto 2 - vista do alinhamento da Serra de Itabirito, ao fundo o Rio do Peixe



Fonte: acervo pessoal (2021)

A Unidade Morfológica em Colinas abrange a maior parte da área, apresenta uma topografia menos acidentada onde predominam declividades inferiores a 30%. Entre o topo das abas do sinclinal, capeadas por canga, e o interior colinoso do platô, observasse um degrau de 100 a 150 m de desnivelamento e 30° a 50° de declividade, sendo que na base foram depositadas extensas rampas de colúvio em ambos os flancos internos do siclinal, com declividades em tomo de 5 a 10% e altitudes por volta de 1320 a 1350 metros

O relevo colinoso do platô caracteriza-se por colinas amplas e suaves de geometria convexa e topos arredondados a aplainados, com pouca sedimentação aluvial, apresentando altitudes entre 1200 e 1300 m. O intervalo de desnivelamento varia de 40 a 80 m, com declividades entre 5° e 15°. Este relevo apresenta uma densidade de drenagem média com padrão dendrítico. Destaca-se a intensidade dos processos de voçorocamento sobre esses terrenos, concentrado em zonas de cabeceiras de drenagem, onde as feições erosivas atingem grandes dimensões. (fotos 3 e 4).

Foto 3 - Unidade Morfológica em Colinas. Note a grande presença de ravinas e voçorocas nesta unidade.



Fonte: acervo pessoal (2021)

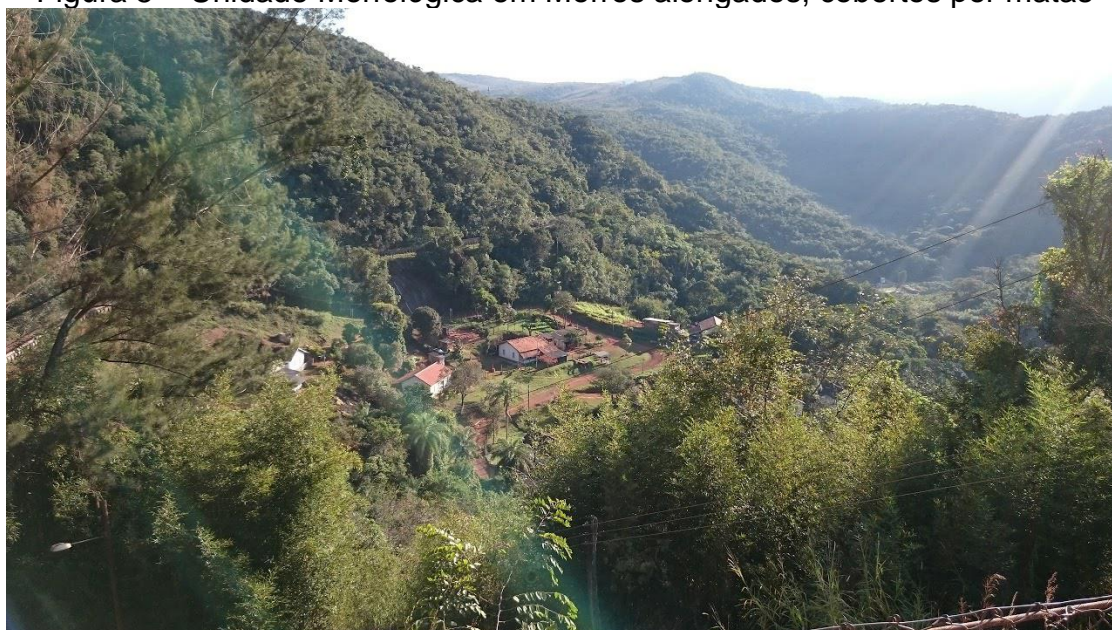
Foto 4 - Detalhe de voçorocas em solo alterado de filito multicolorido. Em primeiro plano ocupações (bairro Balneário Água Limpa).



Fonte: acervo pessoal (2021)

A Unidade Morfológica em Morros Alongados é sustentada por rochas do Supergrupo Rio das Velhas, sendo sua maior parte do Grupo Nova Lima (xistos e filitos). Apresenta um relevo predominantemente constituído por morros de topos alinhados, formando pequenas cristas e vertentes de geometria retilínea a côncava, bastante dissecadas, com um intervalo de altitudes entre 1.000 e 1.200 m (foto 5).

Figura 5 – Unidade Morfológica em Morros alongados, cobertos por matas

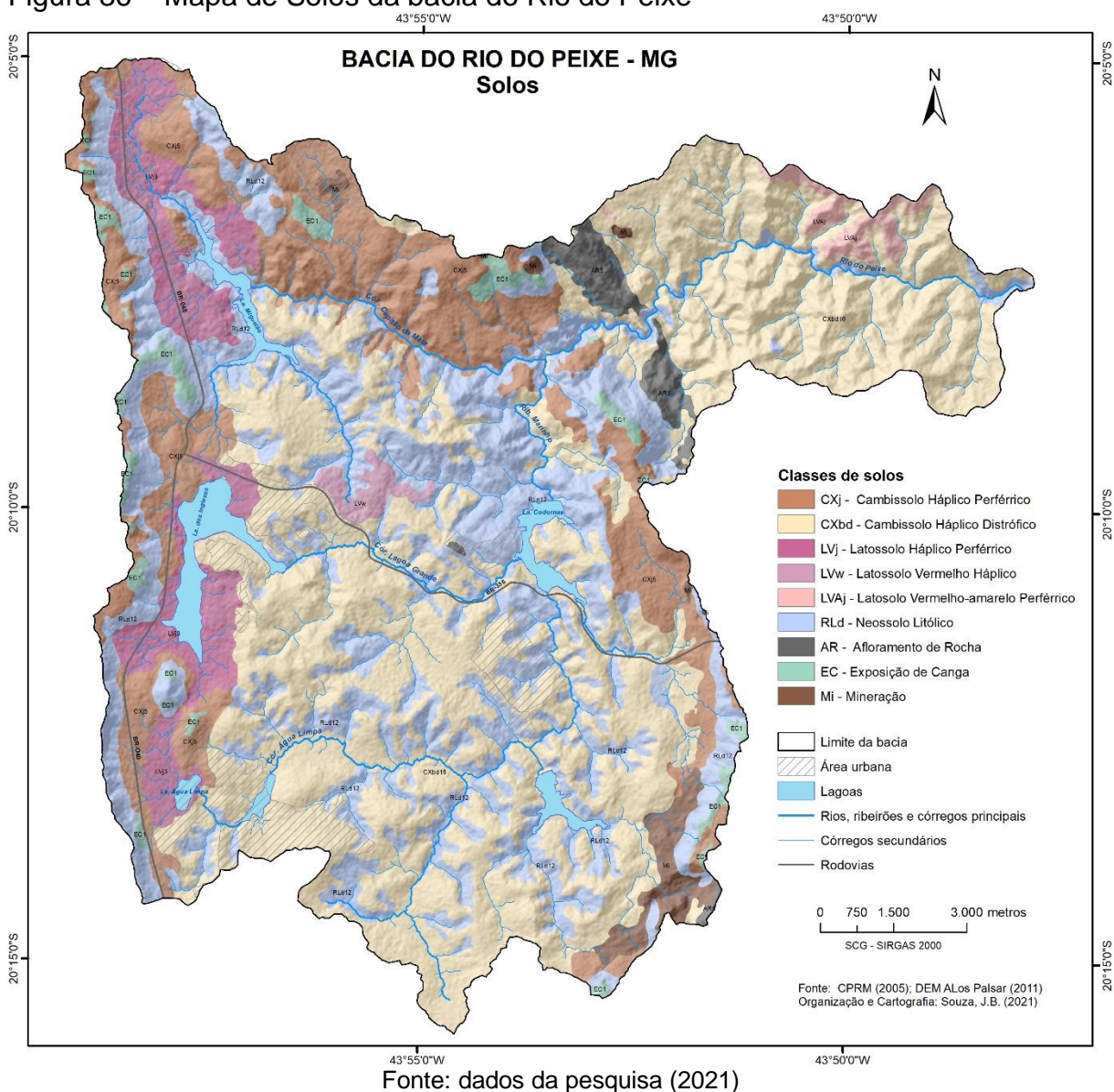


Fonte: acervo pessoal (2021)

4.3 – Pedologia

O mapeamento das classes de solo presentes na bacia Hidrográfica do Rio do Peixe foi realizado com base no Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico, pedologia, (CPRM/EMBRAPA/SEMAD, 2005). Na área em estudo, foram identificadas as seguintes classes de solo: Cambissolo Háplico Perférico, Cambissolo Háplico Distrófico, Latossolo Vermelho Perférico, Latossolo vermelho Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo Perférico, Neossolo Litólico (figura 36). Foram também mapeados os tipos de terreno, como exposição de canga, Afloramentos de Rocha e algumas áreas degradadas por mineração. (CPRM, 2005)

Figura 36 – Mapa de Solos da bacia do Rio do Peixe



4.3.1 - Cambissolos

Esta classe compreende solos minerais não hidromórficos que apresentam horizonte B incipiente, subjacente a horizonte A de qualquer tipo ou a horizonte hístico com menos de 40 cm de espessura. Distinguem-se pelo baixo grau de desenvolvimento pedogenético, o que, em geral, condiciona uma forte influência dos materiais de origem sobre as características dos solos. São diferenciados, em terceiro nível categórico, em função do teor de ferro, saturação de bases e atividade da argila e profundidade efetiva do solo. É a classe de maior ocorrência na área de estudo.

A) Cambissolos Háplicos Perféricos

Essa classe compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente subjacente a horizonte A de qualquer tipo. São solos pouco desenvolvidos, pouco profundos ou rasos e com teores de silte relativamente elevados apresentam sequência de horizontes do tipo A-Bi-C, com modesta diferenciação entre eles. Devido a seu desenvolvimento ainda incipiente, as características desses solos são em geral bastante influenciadas pelo material de origem, neste caso, o Itabirito, rocha rico em ferro.

B) Cambissolos Háplicos Tb Distróficos

Assim como a classe anterior, compreende solos minerais, não hidromórficos, com o horizonte Bi subjacente a horizonte A de qualquer tipo, exceto A húmico ou horizonte hístico. Em função do seu desenvolvimento ainda incipiente, as características desses solos, são em geral, bastante influenciadas pelo material originário. Ocupa as áreas de relevo ondulado, forte ondulado e montanhoso. São solos bastante erodíveis, principalmente por decorrência das suas características físicas intrínsecas, pouca profundidade, baixa velocidade de infiltração, que somadas ao tipo de relevo facilitam uma velocidade maior do escoamento superficial da água e conseqüentemente uma energia maior de transporte de material sólido. (Foto 6)

Foto 6 – Cambissolo em filito multicolorido alterado. Cobertura vegetal de campo Cerrado/graminoso



Fonte: Acervo pessoal (2021)

4.3.2 - Latossolos

Esta classe compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte A. São solos em avançado estágio de intemperização e bem desenvolvidos. São normalmente muito profundos, com espessura do *solum* em geral superior a dois metros, de elevada permeabilidade e comumente bem acentuadamente drenados. Apresentam sequência de horizontes do tipo A, Bw, C, com reduzido incremento de argila em profundidade. (CPRM, 2005)

Os Latossolos apresentam excelente permeabilidade interna, excessiva ou muito rápida, garantindo a maior resistência aos processos erosivos entre as classes de solos. Nos relevos mais suavizados podem ser classificados como de baixa susceptibilidade a erosão.

Diferenciam-se em segundo nível categórico em função de características de cor e, no nível subsequente, quanto à saturação por bases e teor de óxidos de ferro pelo ataque sulfúrico. Na área em estudo foram identificados

A) Latossolos Vermelhos Perféricos

Estes solos caracterizam-se por possuírem horizonte B latossólico de cor 2,5YR ou mais vermelha, com baixa saturação por bases (distrófico) e teores de ferro Fe₂O₃ superiores ou iguais a 36% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA. Ocupa diversas posições no relevo desde o suave ondulado até o montanhoso (Foto 7)

Foto 7 – latossolo vermelho perférrico no sopé da serra da moeda. sob material detrítico coluvionar proveniente da Serra da Moeda.



Fonte: Acervo pessoal (2021)

B) Latossolos Vermelhos Distróficos

Esta classe diferencia-se da descrita anteriormente devido aos teores de Fe_2O_3 do horizonte Bw serem inferiores a 18%. Diferenciam-se quanto à composição granulométrica, em solos de textura argilosa. Não obstante tais diferenças, os solos dessa classe apresentam de forma indistinta fertilidade natural extremamente baixa, com presença de alumínio trocável em níveis tóxicos e valores muito reduzidos de soma e saturação por bases, mais elevados apenas na camada superficial. Originalmente encontravam-se recobertos por vegetação de campo graminoso, com árvores esparsas de cerrado, e áreas restritas sob floresta tropical subperenifólia. (CPRM, 2005)

C) Latossolos Vermelho-Amarelos Perférricos

Estes solos caracterizam-se por possuírem horizonte B latossólico, com matiz de 5YR ou mais vermelho e mais amarelo que 2,5YR, com baixa saturação por bases (distrófico) e teores de ferro Fe_2O_3 superiores ou iguais a 36% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA. Relacionam-se a relevos ondulados

4.3.3 - Neossolos Litólicos

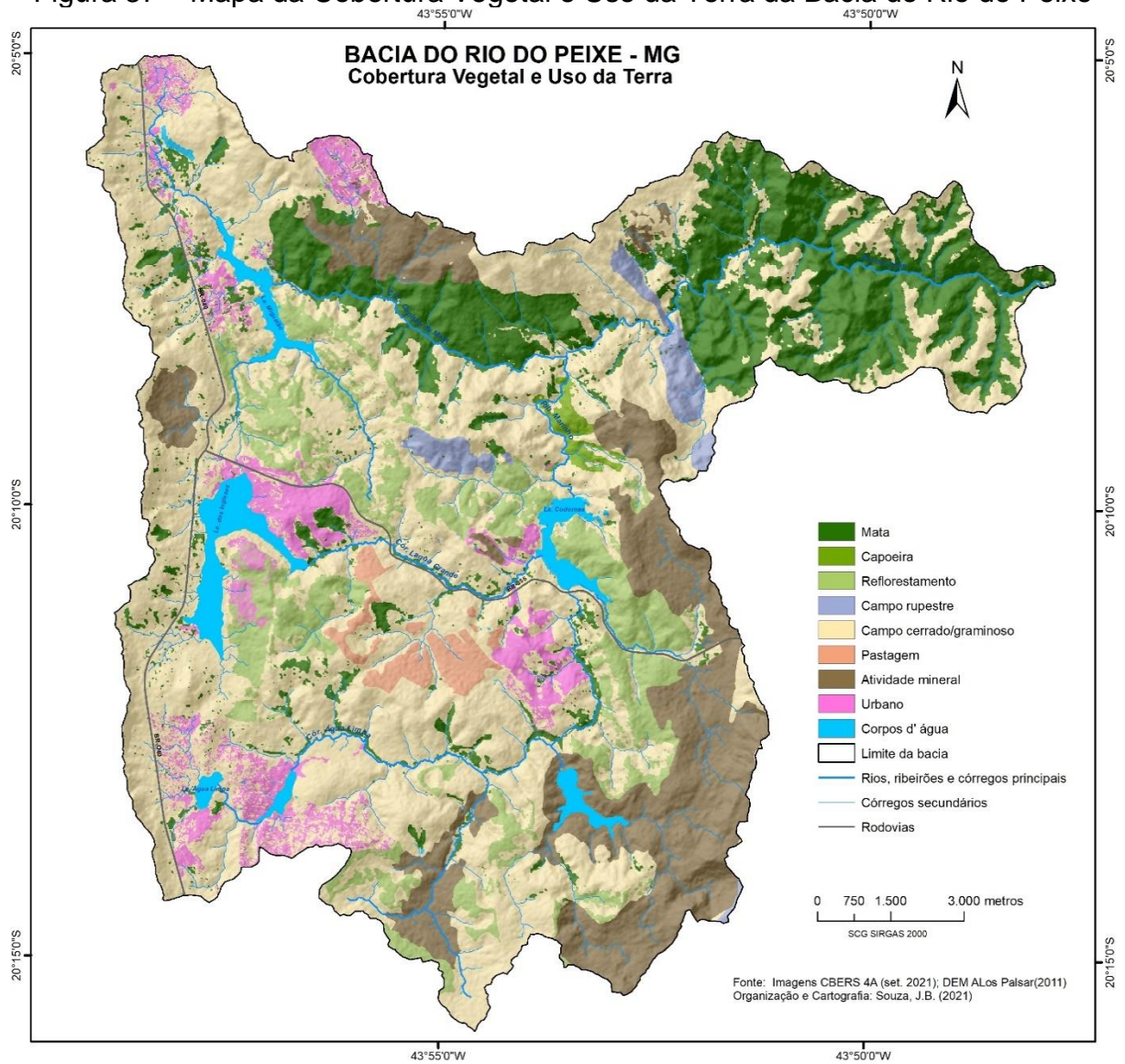
Esta classe envolve solos minerais pouco desenvolvidos, rasos, constituídos por um horizonte A assentado diretamente sobre a rocha, ou sobre um horizonte C ou B pouco espesso, e apresentam contato lítico dentro de 50 cm da superfície do solo. Devido a pouca espessura, é comum possuírem elevados teores de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo, assim como cascalhos e calhaus de rocha semi-intemperizada na massa do solo.

São predominantemente distróficos com saturação de bases inferior a 50%. A pequena profundidade efetiva do solo limita o desenvolvimento radicular da maioria das plantas cultivadas. O horizonte A é, normalmente, de textura média ou argilosa, porém é freqüente a ocorrência de pedregosidade e de rochosidade nestes solos. São muito susceptíveis à erosão em virtude da espessura reduzida e do relevo onde se localizam. Compreendem terras de pequena aptidão agrícola e são solos mais indicados para preservação da flora e da fauna.

4.4 – Cobertura Vegetal e Uso e Ocupação do Solo

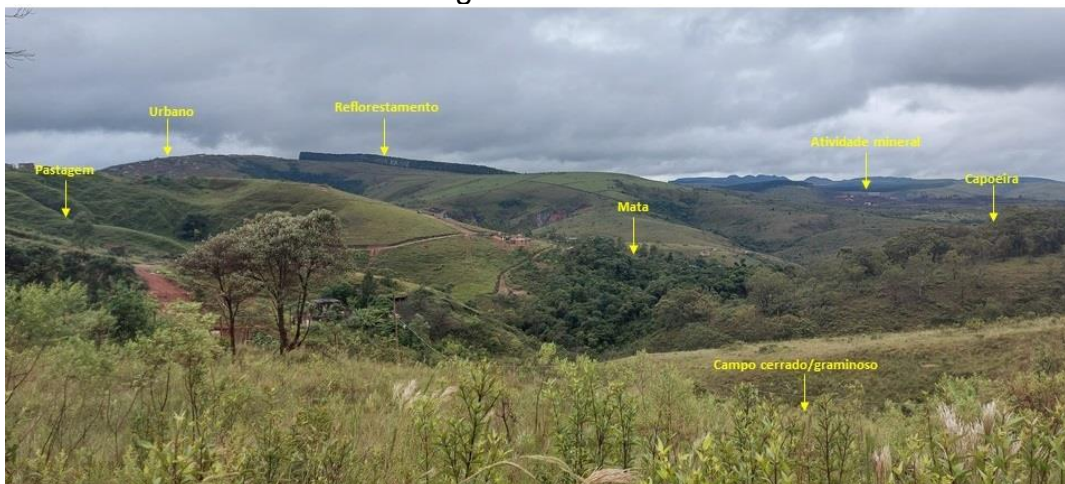
A classificação supervisionada das imagens de satélite constituiu a base do mapeamento de cobertura e uso da terra. Os polígonos gerados por essa classificação foram checados em campo e corrigidos na etapa de pós-classificação. Foram identificadas 9 classes de cobertura e uso da terra: mata, capoeira, campo Cerrado/graminoso, campo rupestre, reflorestamento, pastagem, atividade minerária, urbano e corpos d'água. As classes estão representadas na figura 37 e foto 8.

Figura 37 – Mapa da Cobertura Vegetal e Uso da Terra da Bacia do Rio do Peixe



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Foto 8 – Classes de cobertura vegetal e uso da terra na Bacia do Rio do Peixe



Fonte: acervo pessoal (2021)

A Mata corresponde a uma formação mesófila cuja característica principal é a perda de parte significativa das folhas de seus componentes, notadamente do estrato arbóreo, durante a época seca. Ocorre em ambientes com estação seca bem definida, de três a cinco meses, na maioria dos casos com precipitação anual de mais de 1.100 mm. A fisionomia dessa vegetação pode confundir-se com a da floresta subperenifólia durante a época chuvosa, entretanto, na época de estiagem, torna-se inconfundível, com árvores desfolhadas e aspecto seco. (CPRM, 2005).

Na área em estudo, em sua maior parte, a ocorrência das matas está relacionada a solos mais profundos, como os latossolos e cambissolos Háplicos profundos. As matas também ocorrem nos fundos de vales próximos as linhas de drenagem, na forma de matas ciliares (foto 9). Ressalta que as áreas de matas mais preservadas se encontram localizadas na unidade de formas semelhantes dos morros alongados, no baixo curso do rio do Peixe. (Foto 9)

Foto 9 – Cobertura vegetal de mata em vertente ravinada da Serra da Moeda



Fonte: acervo pessoal (2021)

A Capoeira, corresponde à primeira fase do processo de sucessão vegetal. Compreende aquelas áreas onde houve intervenção humana no terreno, com distintas finalidades, tais como: mineração, agricultura ou pecuária. Essas atividades descaracterizaram a vegetação primária e as áreas ficam sujeitas a um processo de regeneração natural quando abandonadas, de acordo com o tempo e seu uso (figura 10). O tempo para a recuperação natural dessas áreas depende do estado de abandono. A perda da matéria orgânica pelas queimadas e a dos elementos químicos do solo pela lixiviação, esta provocada pelas águas das chuvas, empobrecem rapidamente os solos tropicais que mostram processo lento de recuperação natural.

A Capoeira é uma formação secundária que apresenta grandes variações nos aspectos de porte e diâmetro das árvores ou arbustos, pois depende da vegetação original e do seu grau de regeneração que, por sua vez, depende das condições edafo-climáticas da região.

Figura 10 – Vegetação de Capoeira no topo de morro



Fonte: acervo pessoa (2021)

O Campo Cerrado/Campo Graminoso é a formação vegetal mais expressiva em toda área de estudo, distribuindo-se nas escarpas das abas do sinclinal Moeda, nas rampas de colúvio e nas colinas. Essa classe constitui uma formação vegetal associada ou mista, composta de cerrado, com ocorrência expressiva de espécies típicas de campo. O cerrado ocorre entremeado com a vegetação graminóide e herbácea do campo. A unidade Campo Cerrado/Campo Graminoso está relacionada

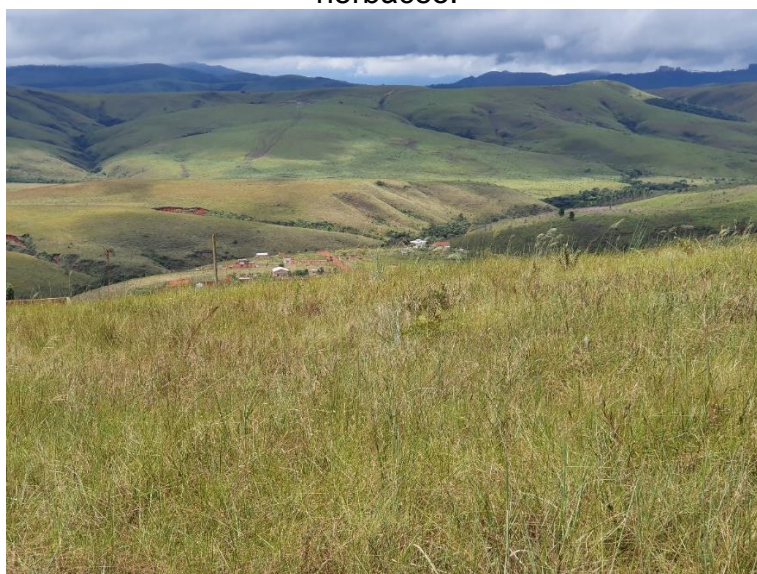
à ocorrência de solos pobres e/ou solos rasos, cascalhentos ou pedregosos, principalmente das classes dos Cambissolos e Neossolos Litólicos. (foto 11 e 12).

Figura 11 – Campo cerrado/campo gramíneo com estrato herbáceo e arbustivo.



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Foto 12 - Campo cerrado/campo gramíneo com predominância de estrato herbáceo.



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Os Campos Rupestres constituem a formação vegetal assentada diretamente sobre os afloramentos rochosos. Nesses terrenos, praticamente, não há solo contínuo, apenas pequenas camadas que sustentam, em parte, esse tipo de vegetação. Distribuem-se por toda a área ocupando, nas partes mais elevadas, os

afloramentos de rochas. Quando presentes sobrepondo às cangas lateríticas recebem o nome de campo ferruginoso.

O Reflorestamento, representa a área plantada com espécies florestais comerciais. Na bacia do Rio do peixe a sua maioria é de *Eucalyptus*, que exibe um padrão homogêneo, com espaçamento regular. (Foto 13)

Foto 13 – Reflorestamento de *Eucalyptus*



Fonte: Acervo Pessoal (2021)

A Pastagem abrange, além de pastagem plantada, as classes denominadas de “pasto sujo”. O termo “pasto sujo” refere-se às áreas cobertas por gramíneas - brachiária, capim-gordura, rabo-de-burro, entre outras - com intensa infestação de espécies invasoras herbáceas e sem investimento na formação da pastagem. Corresponde à primeira fase do processo de sucessão vegetal do sistema secundário. (foto 14)

Foto 14 - Cobertura de pastagem. Notar presença de cicatrizes de rastejamento e erosão superficial concentrada (sulco)



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Atividade mineral compreende toda a área abrangida pela mineração. Refere-se às minerações a céu aberto de médio a grande porte em atividade e toda a sua área de influência. Fazem parte também dessa classe as áreas de terra, as cavas, as pilhas de estéril ou de rejeito, todas as instalações de beneficiamento e instalações industriais, bem como as sedes ou áreas administrativas (foto 15).

Foto 15 - Atividade mineral na Serra do Itabirito



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Área Urbana corresponde às áreas ocupadas pelos seguintes usos: uso residencial, localidades, condomínios e sítios (foto 16).

Foto 16 - Vista geral do Bairro Água Limpa, ocupando o relevo de colinas



Fonte: Acervo pessoal (2021)

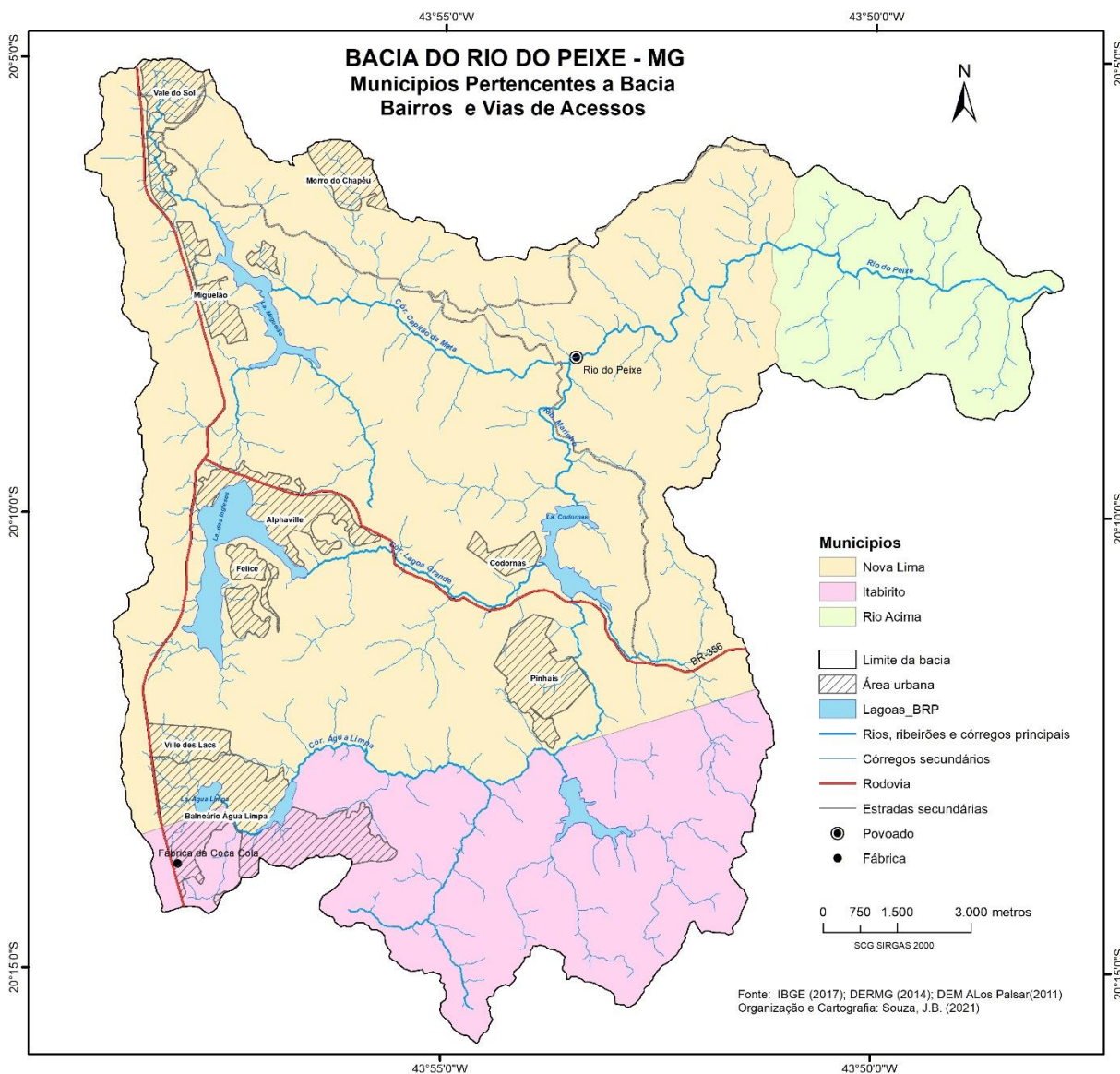
4.5 – Ocupação Urbana na Bacia do Rio do Peixe

A aprovação dos primeiros parcelamentos destinados à sítios de recreio na bacia do Rio do Peixe ocorreu com a aprovação do Balneário Água Limpa em 1953, com 3473 lotes. A busca pelos lotes cumpriu um caráter de retenção pelos proprietários visando uma posterior valorização. (MENECALE, 2002)

Embora outros parcelamentos vizinhos e com mesma finalidade tenham se consolidado ainda na época, o mesmo não aconteceu com o Balneário Água Limpa, que permaneceu em sua maior parte desocupado. Recentemente, com a ampliação do loteamento Alphaville e com a construção da fábrica da Coca Cola no município de Itabirito, o Balneário Água Limpa teve parte de seus terrenos ocupados (a partir 2012), principalmente por população “periférica”, grande parte trabalhadora dos parcelamentos de renda alta da região e população na expectativa nos postos de emprego a serem gerados pela Coca Cola.

Uma parte do parcelamento original do Balneário de Água Limpa, sem aprovação legal individualizada, se constituiu no empreendimento Ville des Lacs sendo implantado no início de 2000. Esta parcela do Balneário conseguiu resguardar seus terrenos em sua forma e função e dispõe de infraestrutura urbana implantada (figura 38).

Figura 38 – Municípios pertencentes a bacia, bairros e vias de acesso.



Fonte: dados da pesquisa (2021)

As lagoas da bacia do Rio do Peixe, que foram utilizadas para a geração energética durante a extração do ouro, se tornaram elementos importantes para o futuro desenvolvimento da atividade urbana na região. Soma-se a isto a concentração fundiária de grandes áreas vazias pertencentes às mineradoras. A beleza cênica das lagoas, atualmente, é utilizada como *marketing* para venda dos empreendimentos instalados na região, empreendimentos estes possíveis, devido à concentração fundiária identificada anteriormente.

Este complexo de lagoas, atualmente formadas pelas lagoas do Miguelão, das Codornas, Grande ou dos Ingleses, se formou a partir de 1904, com a inauguração do

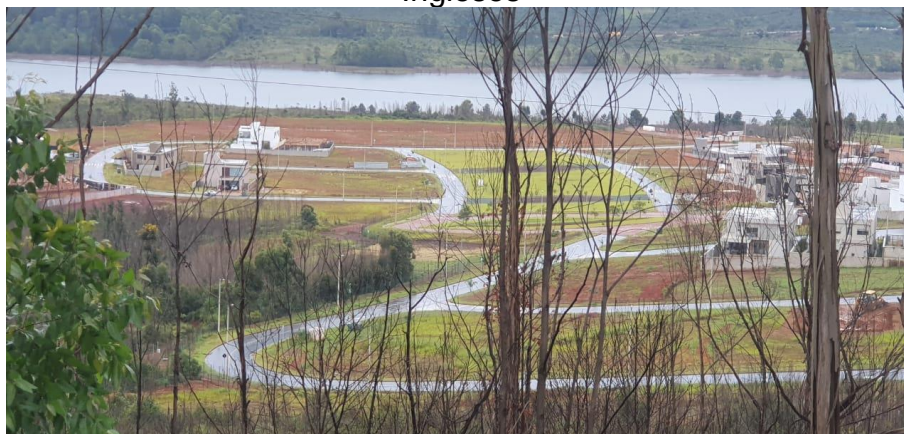
Complexo Hidroelétrico de Rio de Peixe, localizado ao sul da mede municipal e Nova Lima, em região acidentada banhada pelo Rio das Velhas e seus afluentes: Ribeirão dos Cristais, Ribeirão dos Macacos e Rio do Peixe.

Em 1998, o vetor de expansão em direção sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte estendeu-se ao longo da Rodovia Federal BR-356 e um dos grandes empreendimentos que veio a se instalar em Nova Lima, induzido por este desenvolvimento, foi a Lagoa dos Ingleses (Lagoa Grande) com a implantação do e denominado Alphaville.

Toda a região do entorno da Lagoa dos Ingleses e do Alphaville foi alvo da inclusão do empreendimento conhecido como CSul, que pretende urbanizar extensa região entre a lagoa e a Serra da Moeda. Este empreendimento será destinado a constituir um tecido urbano heterogêneo, que abrigue desde atividades econômicas de serviços, comércios e indústrias de base tecnológica, ao longo da Rodovia Federal BR-040, assim como de empreendimentos logísticos, até edificação de uso uni ou multifamiliar. (CSul, 2021)

Em se tratando dos sistemas de infraestrutura urbana básicos de toda esta região, é realizada por empresa terceirizada responsável também pelo serviço de saneamento, regulamentada pela Lei Municipal nº 1651 de 13 de julho de 2001, onde está inserido o condomínio Alphaville. A empresa é também responsável pelo sistema de drenagem de água pluvial de todo o empreendimento. No levantamento de campo, foi possível identificar, a presença de bocas de lobo, poços de visita, assim como guias e sarjetas (foto 17).

Foto 17 – Vista parcial da área de expansão do condomínio Alphaville lagoa dos Ingleses



Fonte: acervo pessoal (2021)

Segundo informações coletadas em campo, o loteamento Ville des Lacs não possui cobertura do sistema pública e saneamento básico, sendo utilizada como solução para o sistema de esgotamento sanitário a fossa séptica e a captação de água por poço artesiano do próprio condomínio. Este poço é tratado e vistoriado pelos condôminos.

Existe sistema de drenagem de águas pluviais implantado no loteamento, que também é facilitado pelo tipo de pavimentação, visto que, parte possui pavimentação asfáltica – as avenidas principais – e a maior parte é pavimentada com intertravado. Também podem ser vistas diversas áreas com canteiros e jardins permeáveis.

A ocupação do Balneário de Água Limpa é completamente desprovida de qualquer tipo de infraestrutura urbana, não havendo pavimentação, tampouco saneamento básico. Os moradores fazem os poços artesanais e o sistema de esgotamento sanitário é realizado por fossa negra e, até mesmo, a céu aberto.

Observa-se também à desobediência na implantação do loteamento quanto aos limites das Áreas de Preservação Ambiental. Todos estes fatores se refletem em um loteamento inicialmente implantado nos fundos de vales, que avança sobre as vertentes compostas por cambissolo de grande fragilidade. (foto 18)

Foto 18 - Vista parcial do bairro Balneário Água Limpa.



Fonte: acervo pessoal (2021)

5 – APLICAÇÃO DOS MODELOS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PROPOSTOS POR ROSS (1994) E CREPANI ET AL. (2001)

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para elaboração dos mapas de fragilidades ambiental utilizando as três alternativas metodológico-operacionais propostas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001), e conseqüentemente, a apresentação e análise dos produtos gerados. Estes modelos serão utilizados na análise comparativa como modelo de fragilidade ambiental proposta nesta tese.

5.1 Modelos de Fragilidade Ambiental Propostos por Ross (1994)

Ross (1994) propôs dois modelos de análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. O primeiro está apoiado na variável dissecação do relevo e o segundo na variável declividade.

A **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nos índices de dissecação do relevo**, resulta da correlação entre dados de levantamento de índice de dissecação do relevo, solos, cobertura vegetal e pluviosidade. O grau de fragilidade para cada variável analisada é hierarquizado em códigos: muito fraca (1), fraca (2), média, forte (4) e muito forte (5). As classes de fragilidade expressam, principalmente, a vulnerabilidade do ambiente em relação aos processos erosivos ocasionados pelo escoamento superficial difuso e concentrado, oriundos das águas pluviais. Tabela 04

Tabela 04 – Unidades Hierárquicas de Fragilidade Ambiental

qualitativo	valor
Muito Baixa	1
Baixa	2
Média	3
Alta	4
Muito Alta	5

Fonte: Ross (1994)

A outra metodologia proposta por Ross (1994), é a **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nas classes de declividade**, em substituição a variável dissecação do relevo. Para Ross (1994), no

mapeamento em escala superior a 1:50.000, a variável declividade se torna mais apropriada do que a dissecação do relevo.

A seguir, são descritos os procedimentos operacionais indicados por Ross (1994) para elaboração dos mapas de fragilidade ambiental com base no índice de dissecação e na declividade da área de estudo desta pesquisa.

5.1.1 - Modelo da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nos Índices de Dissecação do relevo

A carta de Fragilidade com base nos índices de dissecação do relevo, é obtida a partir da elaboração e integração, em ambiente SIG, das variáveis temáticas geomorfologia (índice de dissecação), solos, clima(pluviosidade) e cobertura vegetal e uso da terra, conforme descrito a seguir:

A) Índice de dissecação do relevo

Para elaboração do índice de dissecação do relevo (IDR), utilizou-se a matriz desenvolvida por Ross (1992), baseada na relação dimensão interfluvial média (dimensão horizontal) e no grau de entalhamento dos vales (dimensão vertical), conforme visualizado na tabela 05.

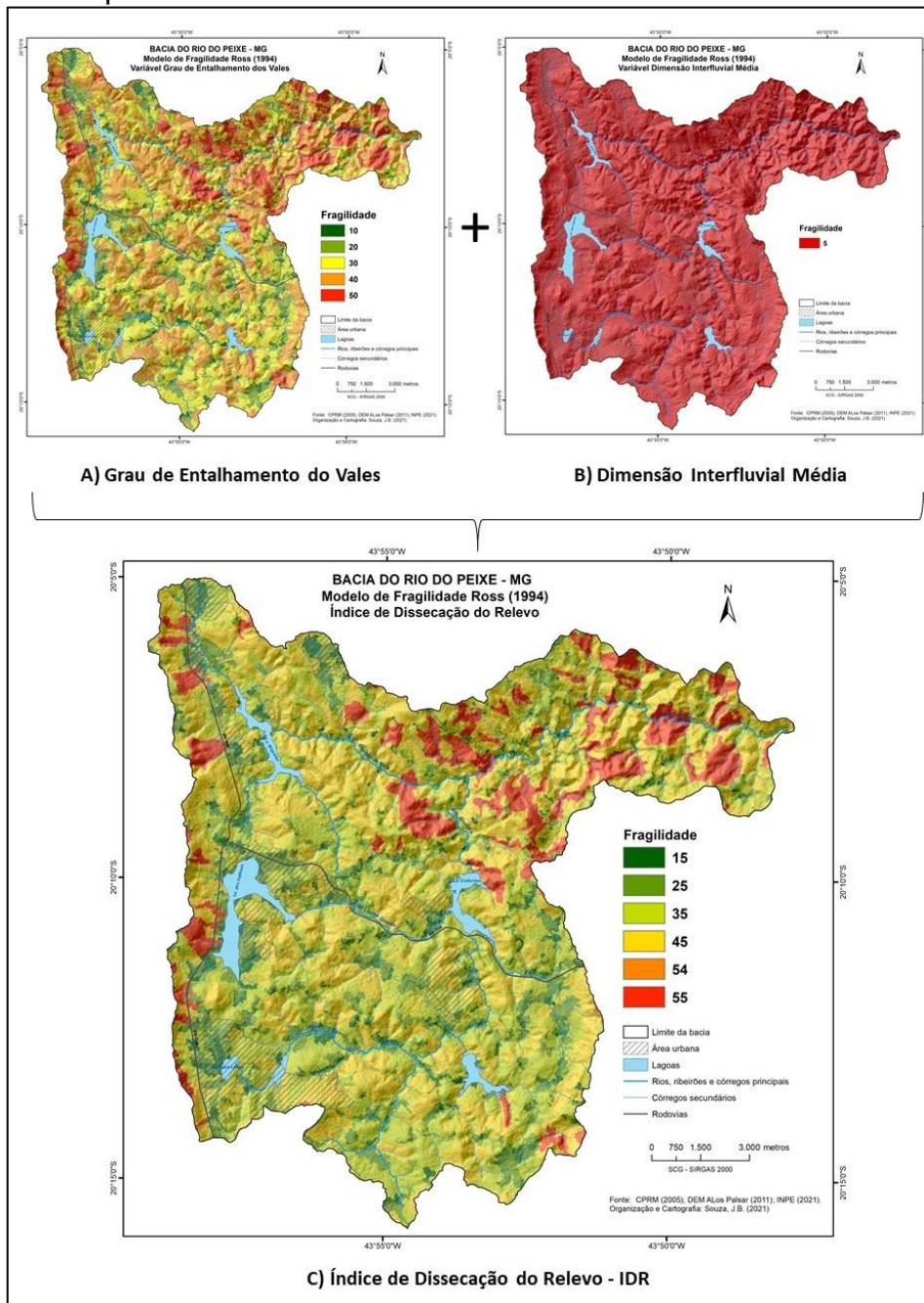
Tabela 05 - Matriz dos Índices de Dissecação das Formas de Relevo

Grau de Entalhamento dos vales	Dimensão Interfluvial Média				
	Fraco (1) > 3.750m	Fraco (2) 1.750m a 3.750m	Fraco (3) 750m a 1.750m	Fraco (4) 250m a 750m	Fraco (5) <250m
Muito fraco (1) < 20 m	11	12	13	14	15
Fraco (2) 20m a 40m	21	22	23	24	25
Médio (3) 40m a 80m	31	32	33	34	35
Forte (4) 80m a 160m	41	42	43	44	45
Muito Forte (5) > 160m	51	52	53	54	55

Fonte: Ross (2006)

Os procedimentos metodológicos para obtenção em ambiente SIG, das variáveis dimensão interfluvial média e entalhamento dos vales, foram detalhados no capítulo 03. Posteriormente, com base na Matriz são estabelecidos os graus de fragilidade ambiental para a variável dissecação do relevo, de muito fraca a muito forte. O IDR será resultante do somatório destas duas variáveis. A figura 39, esquematiza o procedimento para gerar o IDR da bacia do Rio do Peixe.

Figura 39 – Geração do mapa de IDR, com base no somatório das variáveis Dimensão Interfluvial e Amplitude Fluvial



Fonte: dados da pesquisa (2021)

As cinco classes fragilidade do IDR, são obtidas a partir do fatiamento proposto na tabela 6, sendo que o primeiro dígito representa o valor da dimensão vertical e o segundo dígito a dimensão horizontal.

Tabela 6: Grau de Fragilidade das Classes de Dissecação do Relevo

Fragilidade	Dissecação*
1 – Muito fraca	11
2 – Fraca	21,22,12
3 – Média	31,32,33,13,23
4 – Forte	41,42,43,44,14,24,34
5 – Muito Forte	51,52,53,54,55, 25, 45

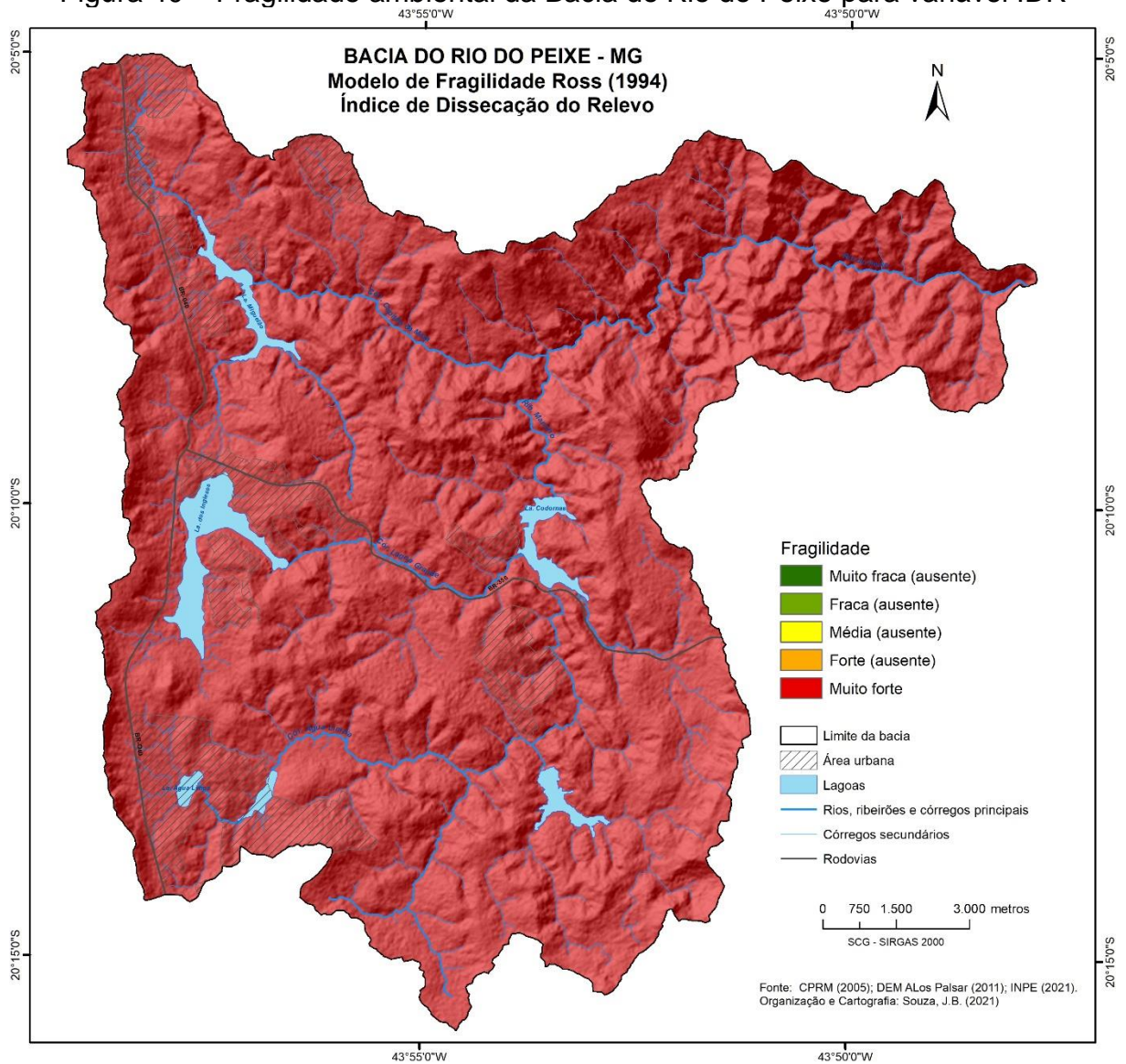
*segundo a Matriz de dissecação do relevo

Fonte: Ross (1994)

Com base nos valores encontrados (**25, 35, 45, 54 e 55**), o IDR da bacia do Rio do Peixe ficou enquadrado na classe muito forte (5) para esta variável, conforme visualizado na figura 53. Isto se deve, primeiro, ao fato da proposta de classificação do autor (op.cit) privilegiar as classes mais altas.

As classes muito alta, por exemplo, é constituída de nove valores enquanto as classes muito baixa e baixa são formadas por apenas um e três valores, respectivamente (figura 40). Também, é importante ressaltar que a proposta de classificação é recomendada para escalas regionais, não sendo adequada para área em estudo, que foi mapeada em escala superior a 1:50.000.

Figura 40 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para variável IDR



Fonte: dados da pesquisa (2021)

B) solos.

No enquadramento das classes de fragilidade da variável solo, Ross (1994) levou em consideração as características de textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade. A tabela 7, apresenta os tipos de solos hierarquizados de acordo com as características citadas.

Tabela 7 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo

Fragilidade	Tipos de Solo (Ross, 1994)	Tipos de Solo (SIBCS, 2013)
1 – Muito fraca	Latossolo roxo, latossolo vermelho-escuro e vermelho-amarelo com textura argilosa	Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho Amarelo textura argilosa.
2 – Fraca	Latossolo amarelo e vermelho-amarelo com textura média/argilosa	Latossolo amarelo e vermelho-amarelo com textura média/argilosa
3 – Média	Latossolo vermelho-amarelo;terra roxa, terra bruna; podzólico vermelho-amarelo com textura média/argilosa	Latossolos Vermelho Amarelo, Nitossolos Vermelhos, Argissolos Vermelho Amarelo textura média/argilosa.
4 – Forte	Podzólico vermelho-amarelo com textura média/arenosa;cambissolo	Argissolos Vermelho Amarelo textura média/arenosa, Cambissolos.
5 – Muito Forte	Podzolizados com cascalhos; litólicos e areias quartzozas	Argissolos com cascalho, Neossolos Litólicos e Neossolo Quartzarênico.

Fonte: Ross (1994) atualizada com nomenclatura recente da SIBCS (2013)

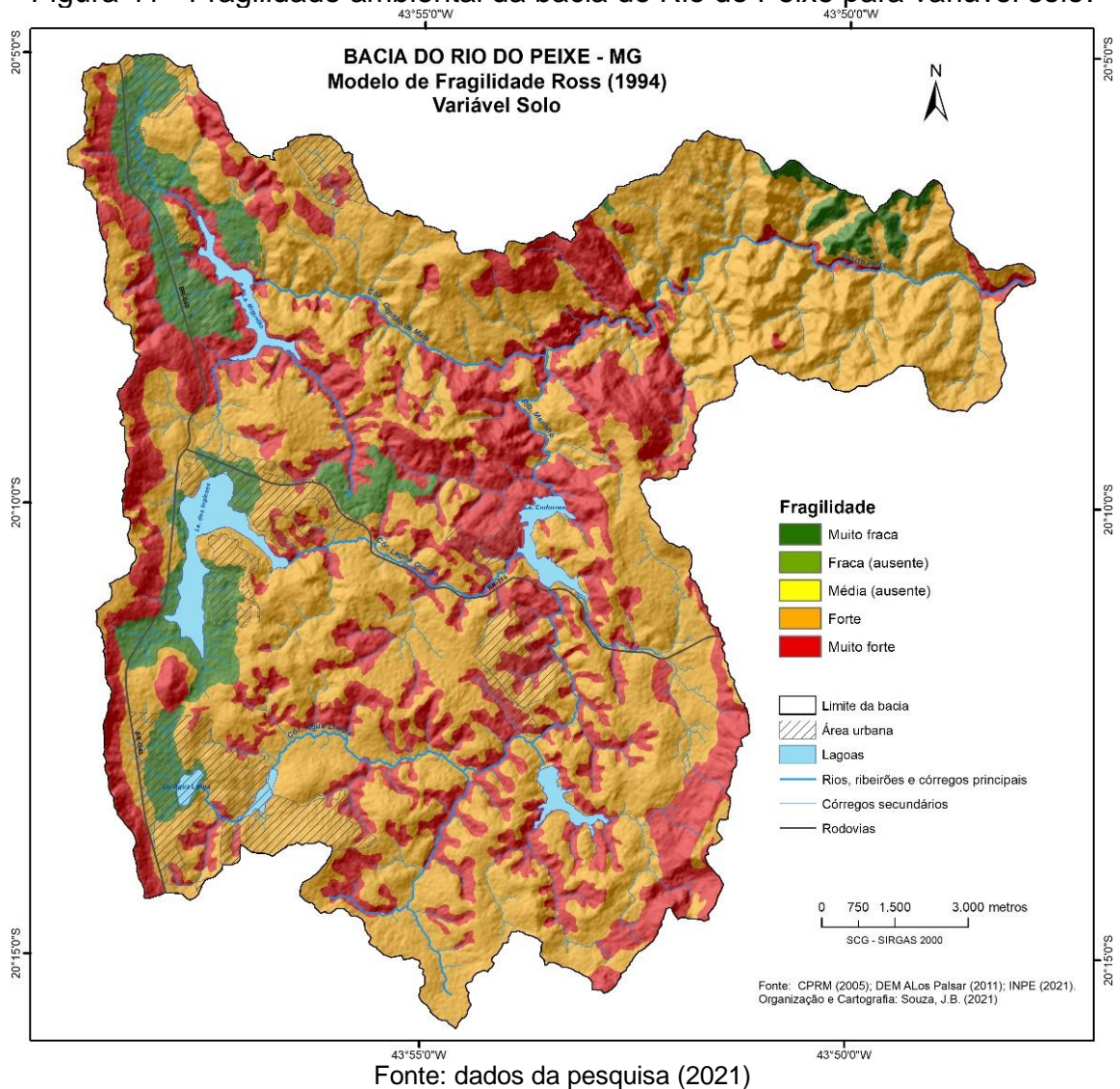
Desta forma, foi estabelecida uma relação entre os tipos de solos identificados na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe com as classes apresentadas na tabela 7. As classes de fragilidades de solos encontradas na área em estudo, estão relacionadas na tabela 8, com seus respectivos graus de fragilidade. A figura 41 apresenta o mapa da fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável solo

Tabela 8 - Grau de Fragilidade das Classes de Solo para Bacia do Rio do Peixe

Fragilidade	Tipos de Solo
1 – Muito fraca	Latossolo vermelho
2 – Fraca	ausente
3 – Média	ausente
4 – Forte	Cambissolo
5 – Muito Forte	Neossolo litólico, afloramento rochoso, Canga

Fonte: dados da pesquisa (20210)

Figura 41 - Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para variável solo.



C) Cobertura e Uso da terra

Para Ross (1994) a cobertura vegetal oferece diferentes graus de proteção aos solos, conforme apresentado na tabela 9. As áreas cobertas por mata, por exemplo, oferecem um grau de proteção muito alto ao impacto das gotas de chuva enquanto as áreas recobertas por reflorestamento um grau de proteção menor ao solo. Áreas destinadas a pastagens oferecem proteção média, enquanto áreas mineradas e de solo exposto oferecem proteção muito baixa ao solo.

Tabela 9 - Grau de Proteção/Fragilidade das Classes de Cobertura Vegetal/Usos da terra

Grau de Proteção/Fragilidade	Tipos de Cobertura Vegetal/Usos da terra
1 – Muito alta/Muito fraca	Floresta/matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade
2 – Alta/Fraca	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso, formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa), mata homogênea de pinus densa, pastagens, cultivadas com baixo pisoteio de gado, cultivo de ciclo longo (como cana)
3 – Média/Média	Cultivo de ciclo longo em curva de nível/terraceamento (como café, laranja com forrageira entre ruas), pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas
4 – Muito Baixa/Muito Forte	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta do reino, laranja) com solo exposto entre ruas, culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento
5 – Baixa a Nula/Forte	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas

Fonte: Ross (1994)

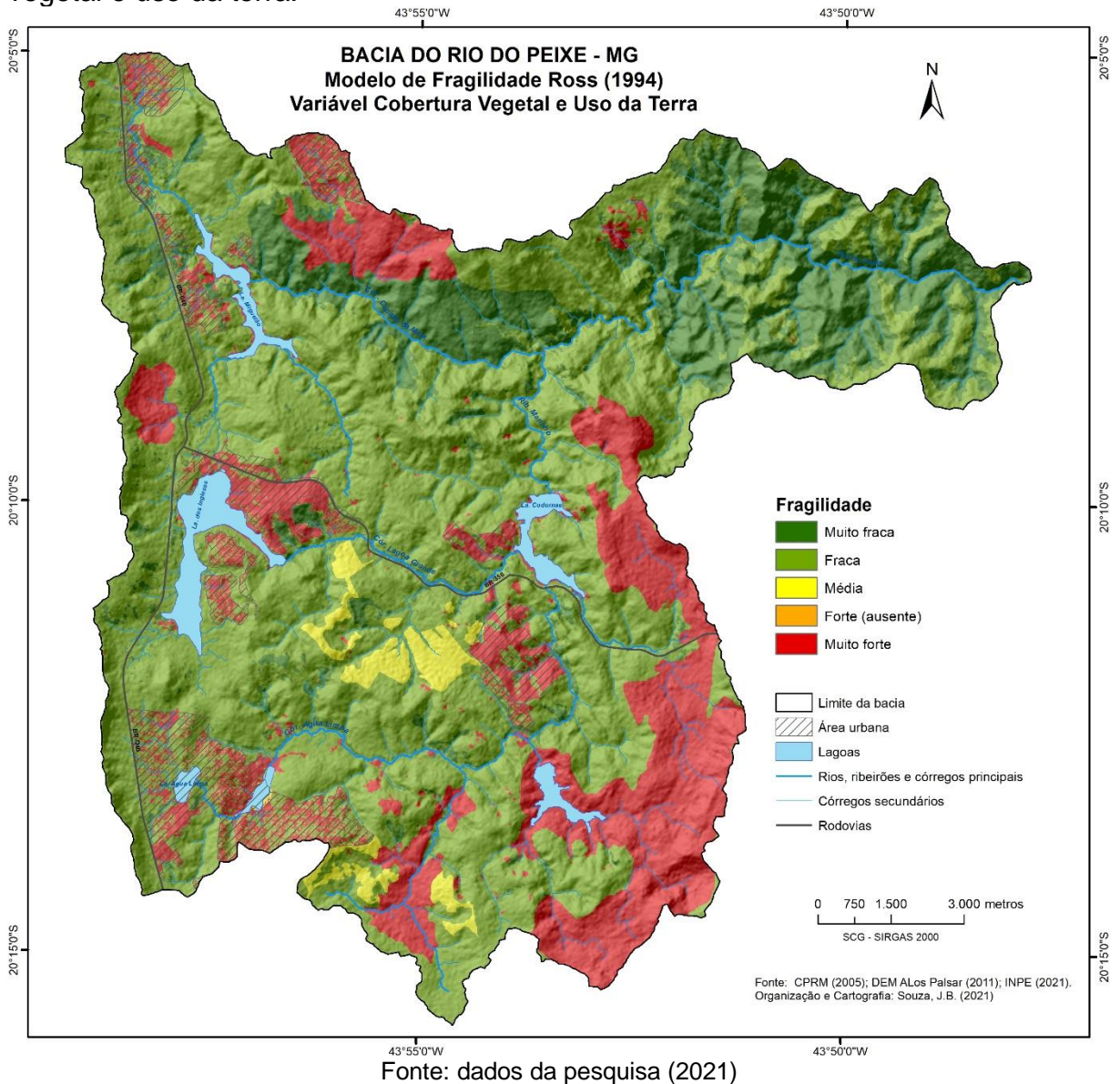
A tabela 10 e a figura 42 apresentam o mapa da fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável cobertura vegetal e uso da terra

Tabela 10 - Grau de Proteção/Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para variável cobertura vegetal e uso da terra

Grau de Proteção/Fragilidade	Tipos de Cobertura Vegetal/Usos da terra
1 – Muito alta/Muito fraca	mata
2 – Alta/Fraca	campo cerrado/campo gramíneo, campo rupestre,
3 – Média/Média	reflorestamento, pastagem com baixo pisoteio
4 – Muito Baixa/Muito Forte	ausente
5 – Baixa a Nula/Forte	Solo exposto, Atividade mineral, loteamento (urbano)

Fonte: Ross (1994)

Figura 42- Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para variável cobertura vegetal e uso da terra.



D) Clima (precipitação)

De acordo com Ross et al. (2008), o comportamento das precipitações corresponde a uma hierarquia de ordem crescente quanto à capacidade de interferência na estabilidade ambiental, estando diretamente relacionada a presença ou ausência da cobertura vegetal. Um ambiente que possui um bom estágio de desenvolvimento vegetativo apresenta uma maior proteção quanto às ações diretas das gotículas de chuva em queda livre; em contrapartida, onde não há vegetação,

existe maior suscetibilidade a esse agente morfogênico, assim, apresentando maior fragilidade ambiental.

Avaliando a tabela 11, que apresenta o Grau de Fragilidade das Classes de Precipitação, chega-se à conclusão de que as características apresentadas para as situações de pluviosidade são aplicadas para região de escalas macro. Deste modo, analisando as características climáticas da região onde está inserida a bacia do Rio do Peixe a Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril, quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas (grau de fragilidade 4).

Para amenizar essa inconsistência, Santos e Ross (2012) atrelaram a precipitação ao uso da terra, levando em consideração o escoamento superficial da água e seu impacto na perda de solo e inundações.

Tabela 11 - Grau de Fragilidade das Classes de Precipitação

Fragilidade	Situação Pluviométrica
1 – Muito fraca	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes não muito superiores a 1000 mm/ ano
2 – Fraca	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ ano.
3 – Média	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno e, no verão, com maiores intensidades de dezembro a março
4 – Forte	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril, quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas.
5 – Muito Forte	Situação pluviométrica com distribuição regular ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semiárido).

Fonte: Ross (1994)

A partir das variáveis apresentadas tem-se os seguintes planos de informação:

- Índice de dissecação do relevo – classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)
- Solos - classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)
- Cobertura vegetal e uso da terra - classes de proteção muito alta (1) a muito baixo (5)
- Pluviosidade - classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)

Com base nos graus de fragilidades apresentadas pelas quatro variáveis (dissecação do relevo, solo, cobertura vegetal e uso da terra e pluviosidade), foi estabelecido a cada uma das variáveis, planos de informação composta por categorias e dígitos acima mencionados (1,2,3,4 e 5). Onde o primeiro se relaciona com o relevo (dissecação), o segundo ao solo, o terceiro à cobertura vegetal e uso do solo e o quarto à pluviosidade.

Com a combinação dos algarismos entre obedecendo a ordem das variáveis é possível realizar a hierarquização dos graus de fragilidade do ambiente natural. Assim, por exemplo, o conjunto numérico 1111 apresenta todas as variáveis favoráveis (fragilidade muito baixa), e o conjunto numérico 5555 representa todas as variáveis desfavoráveis (fragilidade muito forte). Assim, o conjunto 1111 apresenta um pixel com dissecação muito fraca, solos de muita fraca erodibilidade, recobertos por vegetação densa e situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais superiores a 1000 mm/ano.

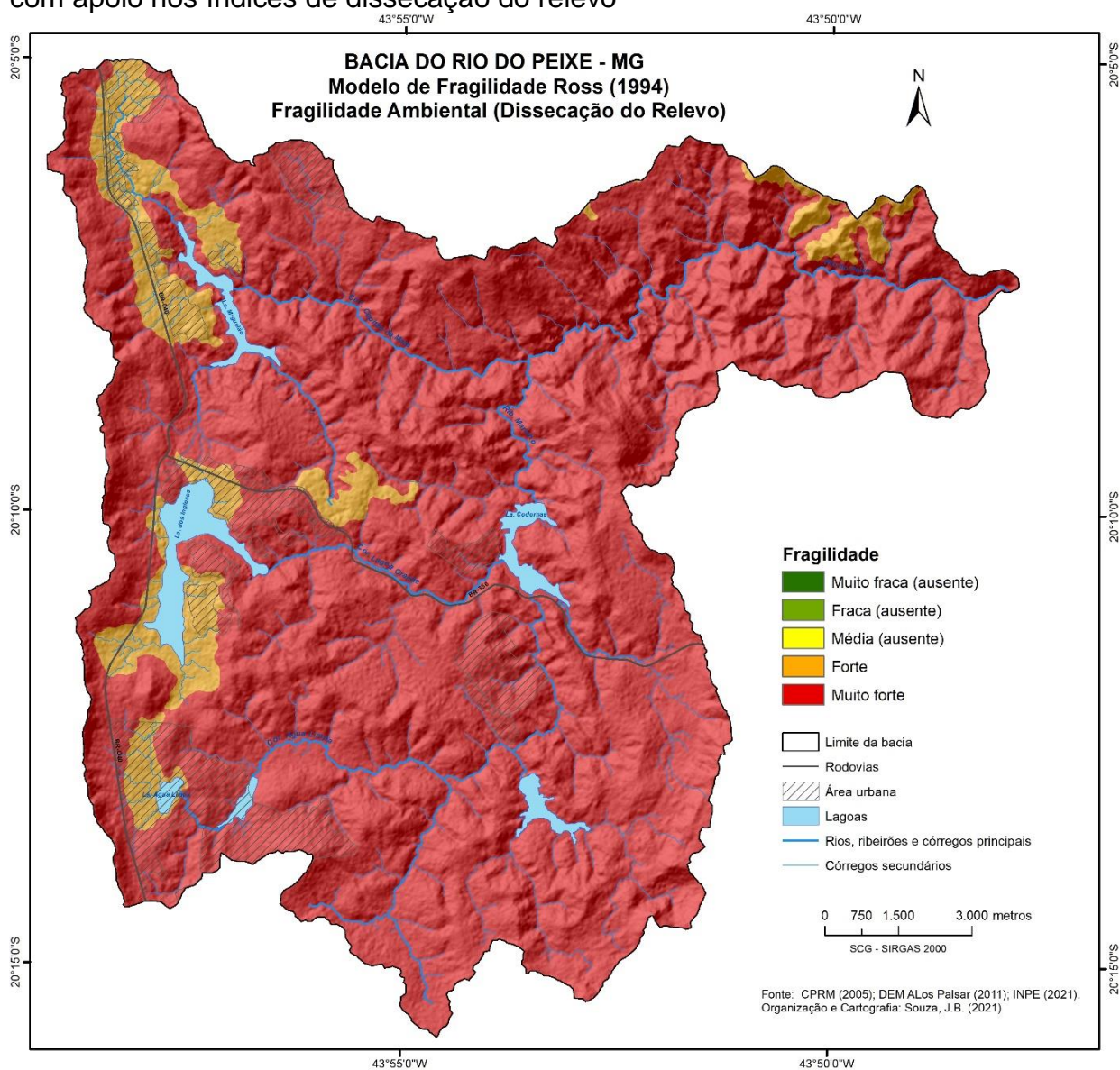
Já o pixel com a combinação 5555, apresenta todas as variáveis com grau de fragilidade muito forte a erosão. Entre os dois extremos, fragilidade muito baixa (1111) e fragilidade muito alta (5555) encontram-se áreas intermediárias. (tabela 12 e figura 43)

Tabela 12 - Codificação para as classes de fragilidade apoiada na variável declividade

Fragilidade	Codificação
1 – Muito fraca	ausente
2 – Fraca	ausente
3 – Média	ausente
4 – Forte	5114, 5124, 5134, 5154
5 – Muito Forte	5414, 5414, 5424, 5434, 5424, 5514, 5414, 5534, 5554

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 43 - Fragilidade dos ambientes naturais antropizados da bacia do Rio do Peixe, com apoio nos índices de dissecação do relevo



Fonte: dados da pesquisa (2021)

5.1.2 - Modelo Empírico da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nas classes de declividade

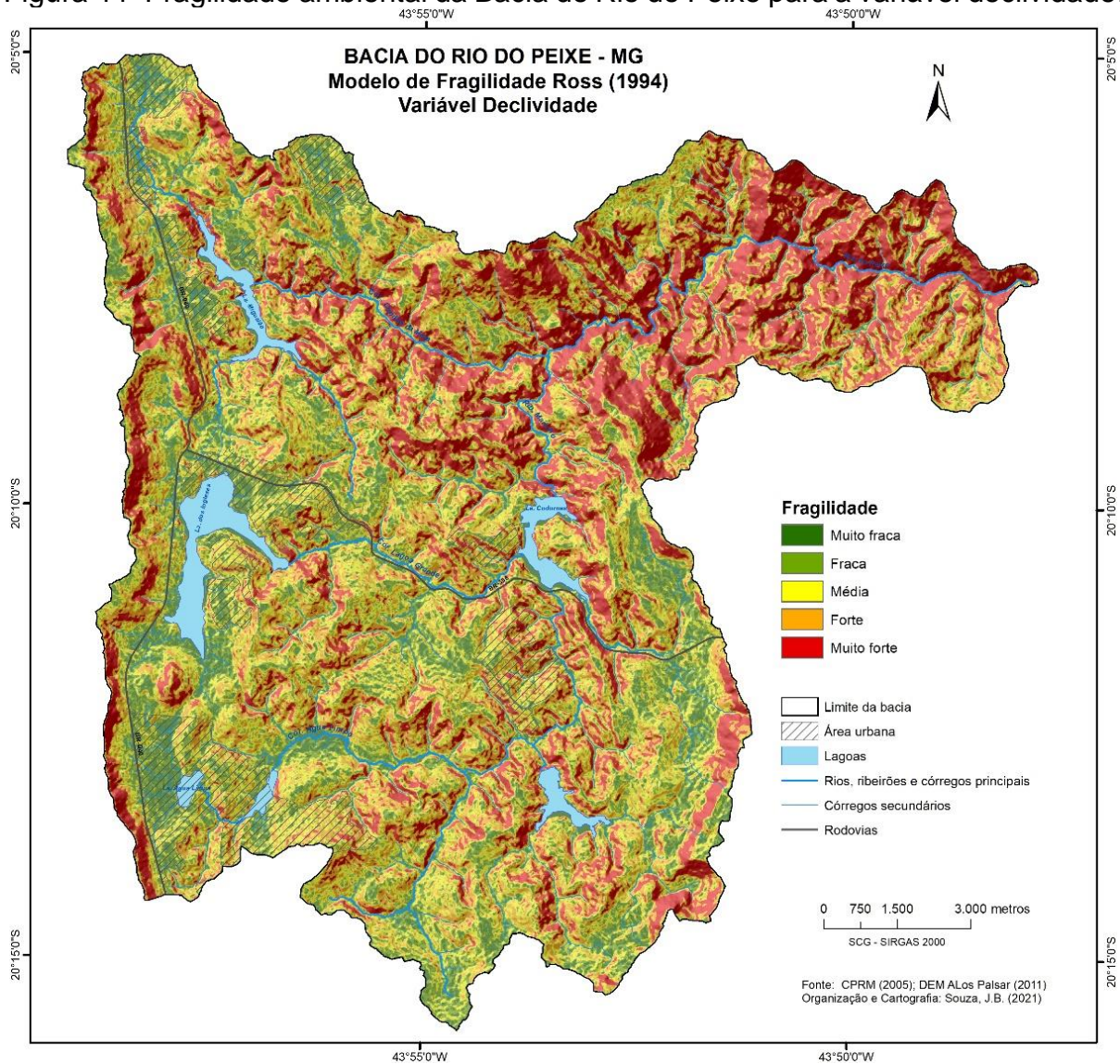
Na Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados, com apoio nas classes de declividade, a variável índice de dissecação é substituída pela declividade, mantendo as demais variáveis. A tabela 13 apresenta as classes de declividades utilizadas no mapeamento da fragilidade. O mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para a variável declividade está representada na figura 44.

Tabela 13 - Grau de Fragilidade das Classes de Declividade

Fragilidade	Declividade
1 – Muito fraca	< 6%
2 – Fraca	6% a 12%
3 – Média	12% a 20%
4 – Forte	20% a 30%
5 – Muito Forte	> 30%

Fonte: Ross (1994)

Figura 44- Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável declividade.



Fonte: dados da pesquisa (2021)

A partir das variáveis apresentadas tem-se os seguintes planos de informação:

- Declividade – classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)
- Solos - classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)
- Cobertura vegetal e uso da terra - classes de proteção muito alta (1) a muito baixo (5)
- Pluviosidade - classes de fragilidade muito baixa (1) a muito forte (5)

Com base nos graus de fragilidades apresentadas pelas quatro variáveis (declividade, solo, cobertura vegetal e uso da terra e pluviosidade), foi estabelecido a cada uma das variáveis, planos de informação composta por categorias e dígitos

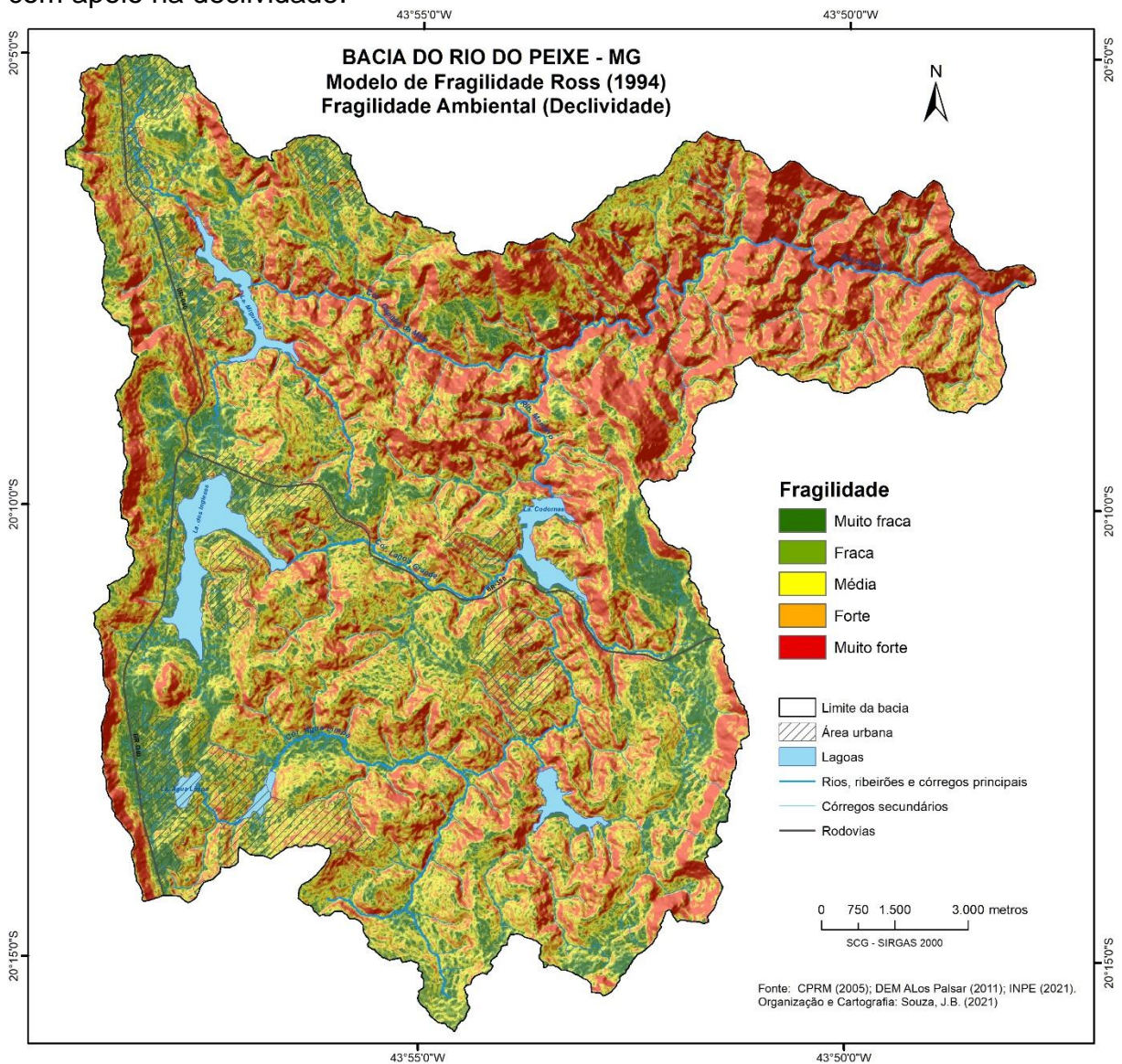
acima mencionados (1,2,3,4 e 5). Onde o primeiro se relaciona com a declividade, o segundo ao solo, o terceiro à cobertura vegetal e uso da terra e o quarto à pluviosidade (figura 45). A codificação para elaboração do Mapa da Fragilidade dos Ambientes Naturais Antropizados com apoio nas classes de declividade, são apresentadas na tabela 14.

Tabela 14 - Codificação para as classes de fragilidade apoiada na variável declividade

Fragilidade	Código
1 – Muito fraca	1114, 1124, 1154, 1414, 1434, 1454, 1514, 1524, 1534, 1554, 2114,2124,2154
2 – Fraca	2414, 2424, 2434, 2454, 2514, 2524, 2534, 2554, 3114, 3124, 3134, 3154
3 – Média	3414, 3424, 34334, 3454, 3514, 3524, 3533, 3553, 4113, 4123, 4134, 4154
4 – Forte	4414, 4424, 4434, 4454, 4514, 4524, 4533, 4554, 5114, 5124, 5134, 5154,
5 – Muito Forte	5414, 5424, 5434, 5454, 5514, 5524, 5534, 5554

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 45 - Fragilidade dos ambientes naturais antropizados da bacia do Rio do Peixe, com apoio na declividade.



Fonte: dados da pesquisa

De acordo com o procedimento técnico operacional desta metodologia a variável do 1º dígito estabelece o grau de fragilidade de cada área examinada. Ou seja, dependendo do caso a variável índice de dissecação ou declividade sobrepõe-se às variáveis solo, cobertura vegetal e pluviosidade, que irão definir uma hierarquização através de seus coeficientes, fixando graus de fragilidade distintos para a área.

Já a variável cobertura vegetal e uso do solo irá identificar áreas onde o equilíbrio dinâmico foi mantido ou rompido e classificá-las como áreas estáveis (mantido) ou instáveis (rompido).

5.2 – Modelo de Fragilidade com Base nas Unidades Territoriais Básicas – UTB's (CREPANI et al., 2001)

A seguir são descritos os procedimentos metodológicos propostos por Crepani et al. (2001) para mapeamento da Vulnerabilidade de paisagem à perda de solo. Como já referido anteriormente, esta metodologia está fundamentada no conceito de Ecodinâmica (TRIACRT, 1977) e na potencialidade das imagens de satélites para estudos integrados do meio ambiente.

O primeiro passo da metodologia é a delimitação, por meio de imagens de satélites, das Unidades Territoriais Básicas (UTBs), que podem ser divididas em duas categorias, as ‘Unidades de Paisagem Natural’ e os ‘Polígonos de Intervenção Humana’. As UTBs são associadas a variáveis temáticas da geologia, geomorfologia, solo, clima e vegetação.

Seguindo a proposta metodológica é utilizada uma escala de vulnerabilidade à perda de solo que estabelece 21 classes, dentro do intervalo que varia de 1 a 3, conforme tabela 15.

Tabela 15 - Avaliação da Estabilidade das categorias Morfodinâmicas.

Categoria Morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1
Intergrade	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2
instável	Prevalece a morfogênese	3

Fonte Crepani et al. (2001)

A classe, de cada variável (Geologia, Geomorfologia, Pedologia Vegetação/Usos da Terra e Clima) que compõe a UTB, são associados valores que indicam o seu grau de vulnerabilidade. O quadro 5 resume as características observadas para avaliar a vulnerabilidade à perda de solo e atribuir esses valores que serão detalhados a seguir para cada variável.

Quadro 5 - características para avaliação da vulnerabilidade

Variáveis	Características
Geologia	História da evolução Geológica
	Grau de coesão da Rocha
Geomorfologia	Amplitude altimétrica
	Amplitude interfluvial
	Declividade
Pedologia	Maturidade de solo
Vegetação/Usos da terra	Densidade da cobertura vegetal/tipo de uso
Clima	Intensidade pluviométrica (pluviosidade anual/ duração do período chuvoso)

Fonte Crepani et al. (2001)

A) Geologia

Segundo Crepani et al. (2001), a contribuição da geologia na análise da vulnerabilidade compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade geológica se encontra e ao grau de coesão das rochas. O grau de coesão está relacionado com a intensidade da ligação entre os minerais que as constituem, sendo assim, rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto rochas muito coesas prevalecem os processos de formação dos solos. A tabela 16 apresenta a posição das rochas mais comumente encontradas na superfície do planeta, organizadas de acordo com a escala de vulnerabilidade.

Tabela 16 – escala de Vulnerabilidade à denudação das Rochas mais comuns

Rocha	Frag.
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9
Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	2,0
Filito, Metassiltito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Arcózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001),

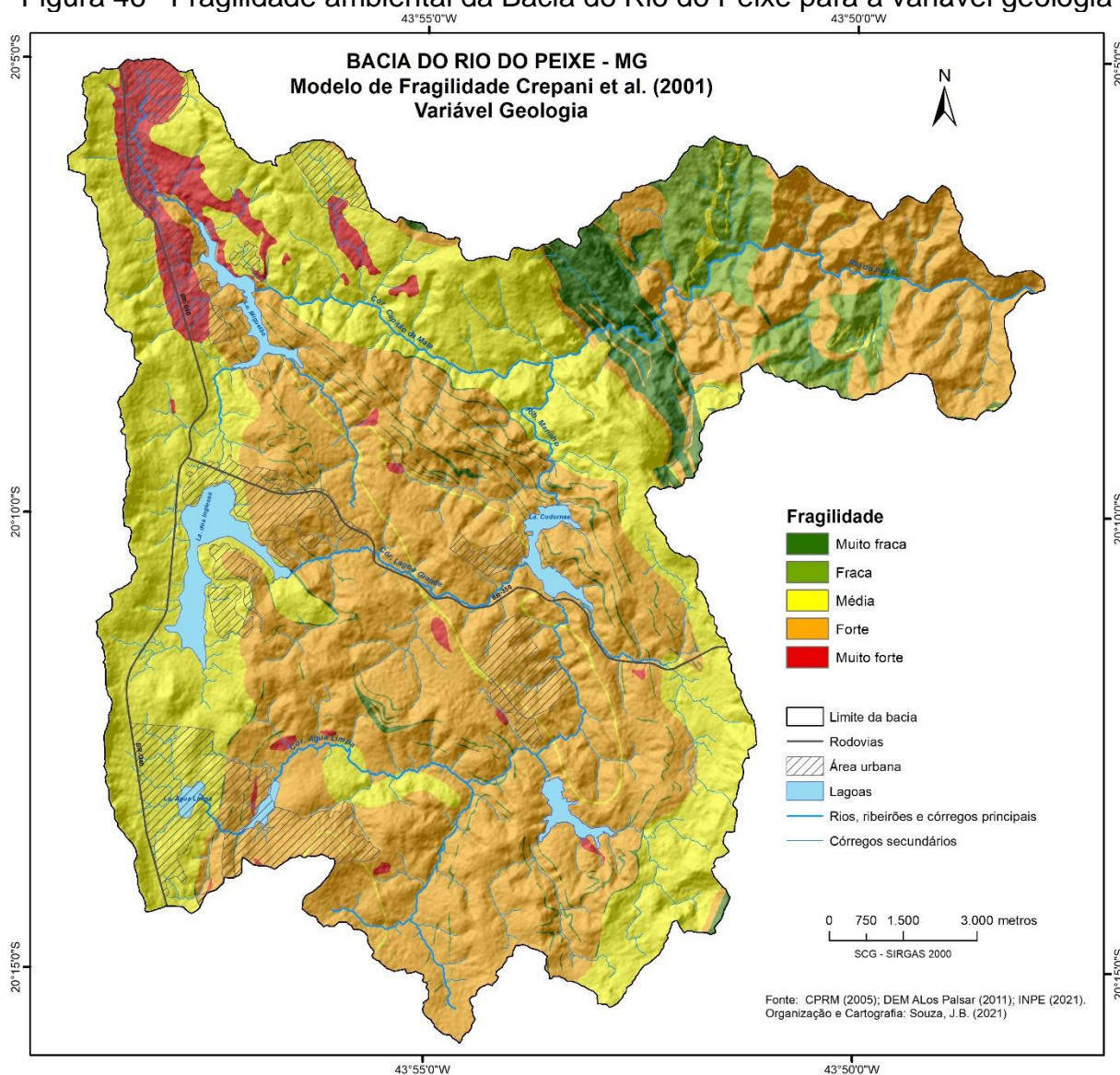
A tabela 17 – apresenta os graus de fragilidade para os tipos de rochas encontradas na bacia do Rio do Peixe, utilizadas para elaboração do mapa de vulnerabilidade/fragilidade para a variável geologia. (Figura 46)

Tabela 17 - Graus de vulnerabilidade para os tipos de rochas encontradas na bacia do Rio do Peixe

Rocha	Fragilidade
Quartzito ferruginoso Itabirito hematítico	1,0
Canga ferrinosa	1,2
Cianita	1,4
Metabasalto	1,5
Metagsbro	1,6
Clorita xisto, xisto verde, talco xisto	1,7
Filito	2,1
Mármore	2,3
Arenito	2,4
Diabásio	2,5
Argilito	2,7
Aluvião	3,0

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 46 –Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável geologia



B) Solo

A erodibilidade que se refere a capacidade de um solo resistir a erosão, é função das condições *intrínsecas* do solo, como sua composição mineralógica e granulométrica e características físicas e químicas, e das suas condições externas ou *atributos da superfície* do solo, relacionadas ao manejo do solo.

A maior ou menor suscetibilidade de um solo a sofrer os processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores e os mais importantes são: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis. O grau de desenvolvimento do solo é um

importante elemento para compor os indicadores de vulnerabilidade, já que uma UTB é estável quando favorece o processo de pedogênese. (CREPANI et al., 2001).

Sendo assim, foram atribuídos aos solos uma escala de valores para estabelecer sua vulnerabilidade a erosão. Nas UTBs onde ocorrem solos estáveis foram atribuídos valores próximos a 1,0 e 3,0 onde ocorrem solos vulneráveis (tabela 18). Onde ocorrem solos intermediários foram atribuídos valores de estabilidade próximo a 2,0. A tabela apresenta o grau de vulnerabilidade estabelecido para cada tipo de solo segundo Crepani et al. (2001).

Tabela 18 - Grau de Fragilidade da Classes de Solo

Classificação de solos (Camargo; Klamt; Kauffman, 1987)	Classificação de Solos (Embrapa,1999)	Fragilidade	
Latossolos amarelos	Latossolos amarelos	1,0	
Latossolos vermelho-amarelos	Latossolos vermelho-amarelos		
Latossolos vermelho-escuros	Latossolos vermelhos		
Latossolos roxos	Latossolos vermelhos		
Latossolos brunos	Latossolos brunos		
Latossolos húmicos	Latossolos húmicos		
Latossolos húmicos brunos	Latossolos húmicos brunos		
Pdzólicos amarelos	Argissolos	2,0	
Podzólicos vermelho-amarelos	Argissolos, luvisolos,alissolos, nitossolos		
Podzólicos vermelho-escuros	rgissolos, luvisolos,alissolos, nitossolos		
Terra roxas estruturadas	Argissolos, nitossolos		
Brunos não-cálcicos	Luvissolos		
Brunizéns	Chernossolos		
Brunizéns avermelhados	Chernossolos		
Rendzinas	Chernossolos		
Planossolos	Planossolos		
Solos hidromórficos (abrupticos)	Planossolo		
Podzóis	Espodossolos		
Cambissolos	Cambissolos		
Solos litólicos	Neossolos litólicos		3,0
Solos aluviais	Neossolos flúvicos		
Regossolos	Neossolos regolíticos		
Areias quartzosas	Neossolos quartzarênicos		
Vertissolos	Vertissolos		
Solos orgânicos	Organossolos		
Solos hidromórficos(não abrupticos)	Gleissolos		
Glei húmico	Gleissolos, plintossolos		
Plintossolo	Gleissolos, plintossolos		
Laterita hidromórfica	Plintossolos		
Solos concrecionários lateríticos	Plintossolo		
Afloramento rochoso	Afloramento rochosos		

Fonte: Crepani et al. (2001), incluindo a correlação com a nova nomenclatura de solos da Embrapa (1999), baseado em Prado (2001)

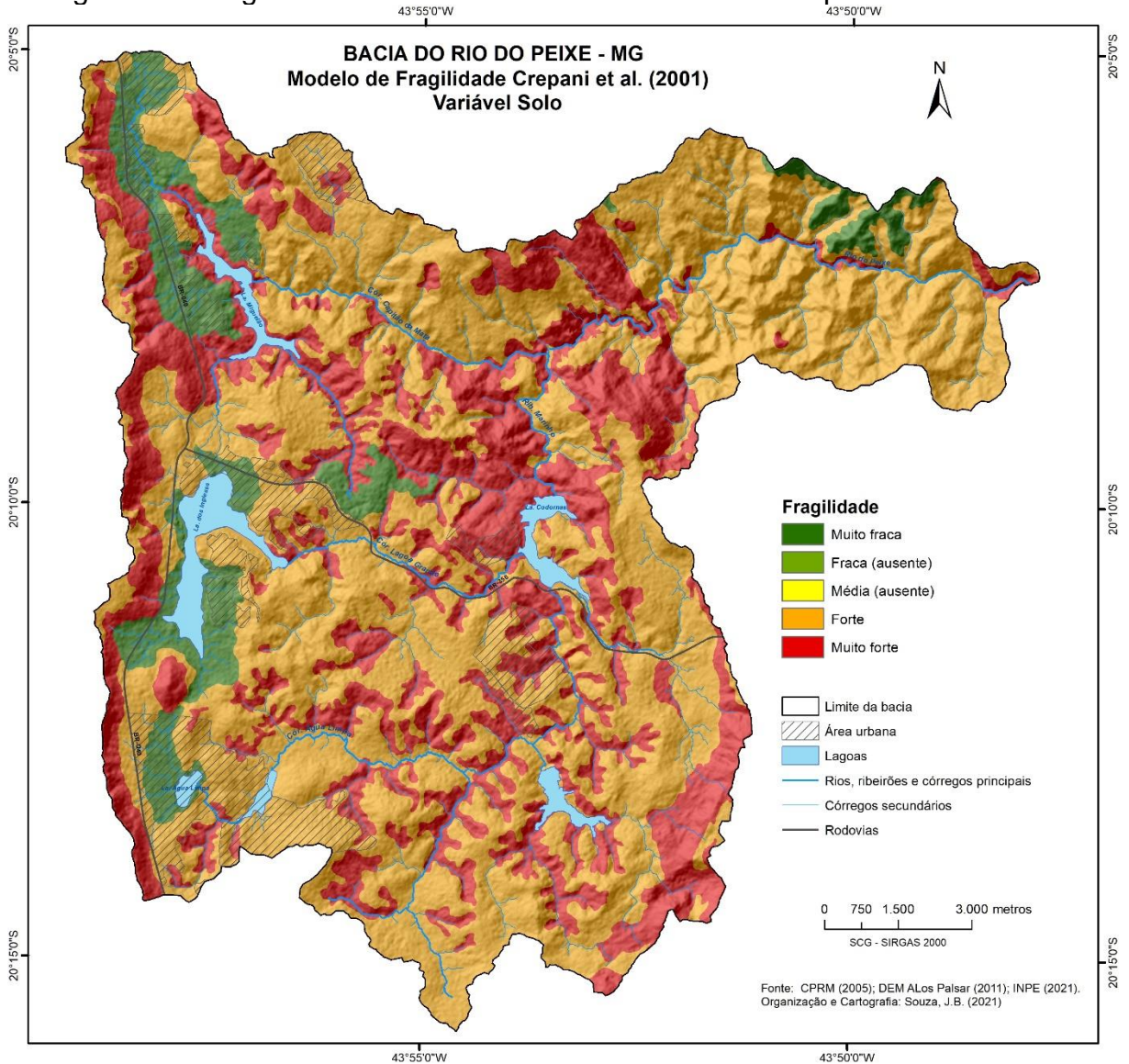
A tabela 19 apresenta os graus de fragilidade para os tipos de rochas encontradas na bacia do Rio do Peixe, utilizadas para elaboração do mapa de vulnerabilidade/fragilidade para a variável geologia (figura 47).

Tabela 19 - Grau de Fragilidade da Classes de Solo bacia do Rio do Peixe

Solo	fragilidade
Latossolo vermelho	1,0
Cambissolo	2,5
Neossolo litólico, afloramento rochoso, plintossolo	3,0

Fonte: dados da pesquisa (2001)

Figura 47 –Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável solo



Fonte: dados da pesquisa (2021)

C) Geomorfologia

Os valores da escala de vulnerabilidade em relação a geomorfologia são obtidos a partir da análise das seguintes variáveis morfométricas: dissecação do relevo pela drenagem, amplitude altimétrica e declividade. A intensidade de dissecação está relacionada com a permeabilidade e porosidade do solo e da rocha. A amplitude altimétrica refere-se ao aprofundamento da dissecação em função da energia potencial disponível para gerar o escoamento superficial. A declividade tem relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética, com a velocidade das massas de água em movimento.

Quanto maiores forem os interflúvios (ou menor for a intensidade de dissecação) menores são os valores atribuídos às unidades de paisagem natural na escala de vulnerabilidade, ou seja, valores mais próximos à estabilidade (valores próximos a 1,0), da mesma forma as unidades de paisagem natural que apresentem os menores interflúvios (ou maiores intensidades de dissecação) recebem valores da escala de vulnerabilidade mais próximos de 3,0 (próximos da vulnerabilidade) (ver tabela 20).

Aos maiores valores de amplitude altimétrica estão associados os valores mais próximos de 3,0 na escala de vulnerabilidade e, portanto, as situações de maior vulnerabilidade; por outro lado, aos menores valores de amplitude altimétrica estão associados os menores valores da escala de vulnerabilidade (próximos de 1,0), que traduzem situações de maior estabilidade das unidades de paisagem natural, onde prevalecem os processos pedogenéticos. (tabela 21)

O termo *declividade* refere-se à inclinação do relevo em relação ao horizonte. A declividade guarda relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade das massas de água em movimento responsáveis pelo “*runoff*”. Quanto maior a declividade mais rapidamente a energia potencial das águas pluviais transforma-se em energia cinética e maior é, também, a velocidade das massas de água e sua capacidade de transporte, responsáveis pela erosão que esculpe as formas de relevo e, portanto, prevalece a morfogênese. (tabela 22)

Tabela 20 - Grau de Fragilidade variável amplitude do relevo

Amplitude do Interflúvio (m)	Frag.	Amplitude do Interflúvio (m)	Frag.	Amplitude do Interflúvio (m)	Frag.
>5000	1,0	3250 - 3500	1,7	1500 - 1750	2,4
4750 - 5000	1,1	3000 - 3250	1,8	1250 - 1500	2,5
4500 - 4750	1,2	2750 - 3000	1,9	1000 - 1250	2,6
4250 - 4500	1,3	2500 - 2750	2,0	750 - 1000	2,7
4000 - 4250	1,4	2250 - 2500	2,1	500 - 750	2,8
3750 - 4000	1,5	2000 - 2250	2,2	250 - 500	2,9
3500 - 3750	1,6	1750 - 2000	2,3	<250	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001),

Tabela 21 - Grau de Fragilidade variável amplitude altimétrica

Amplitude Altimétrica (m)	Frag.	Amplitude Altimétrica (m)	Frag.	Amplitude Altimétrica (m)	Frag.
<20	1,0	77 - 84,5	1,7	141,5 - 151	2,4
20 - 29,5	1,1	84,5 - 94	1,8	151 - 160,5	2,5
29,5 - 39	1,2	94 - 103,5	1,9	160,5 - 170	2,6
39 - 48,5	1,3	103,5 - 113	2,0	170 - 179,5	2,7
48,5 - 58	1,4	103,5 - 113	2,1	179,5 - 189	2,8
58 - 67,5	1,5	122,5 - 132	2,2	189 - 200	2,9
67,5 - 77	1,6	132 - 141,5	2,3	>200	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001),

Tabela 22 - Grau de Fragilidade variável declividade

Declividade		Frag.	Declividade		Frag.	Declividade		Frag.
Graus	Porcent.		Graus	Porcent.		Graus	Porcent.	
<2	<3,5	1,0	9,9 - 11,2	17,4 - 19,8	1,7	19,1 - 20,4	34,6 - 37,2	2,4
2 - 3,3	3,5 - 5,8	1,1	11,2 - 12,5	19,8 - 22,2	1,8	20,4 - 21,7	37,2 - 39,8	2,5
2 - 3,3	5,8 - 8,2	1,2	12,5 - 13,8	22,2 - 24,5	1,9	21,7 - 23,0	39,8 - 42,4	2,6
4,6 - 5,9	8,2 - 10,3	1,3	13,8 - 15,2	24,5 - 27,2	2,0	23,0 - 24,4	42,4 - 45,3	2,7
5,9 - 7,3	10,3 - 12,9	1,4	15,2 - 16,5	27,2 - 29,6	2,1	24,4 - 25,7	45,3 - 48,1	2,8
7,3 - 8,6	12,9 - 15,1	1,5	16,5 - 17,8	29,6 - 32,1	2,2	25,7 - 27	48,1 - 50	2,9
8,6 - 9,9	15,1 - 17,4	1,6	17,8 - 19,1	32,1 - 34,6	2,3	>27	>50	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001),

A vulnerabilidade geomorfológica é definida de forma empírica através da equação:

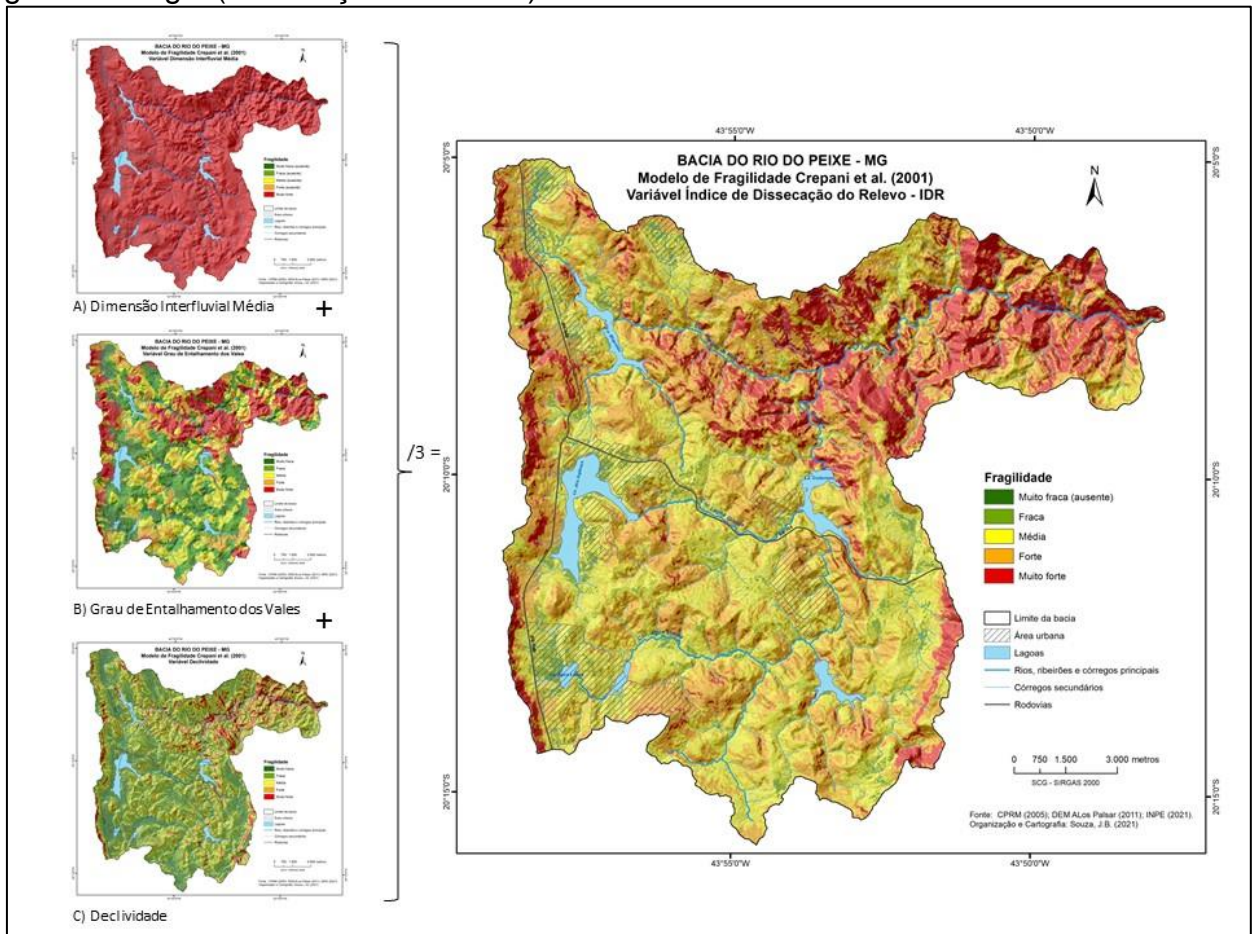
$$R = \frac{(G + A + D)}{3}$$

Onde:

- R – Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia
- G – Vulnerabilidade atribuída ao grau de dissecação
- A – Vulnerabilidade atribuída a amplitude Altimétrica
- D – Vulnerabilidade atribuída à Declividade.

A figura 48 apresenta a equação para obtenção da variável geomorfologia (dissecação do relevo) para a Bacia do rio do Peixe.

A figura 48 - Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para a variável geomorfologia (dissecação do relevo)



Fonte: dados da pesquisa (2021)

D) cobertura Vegetal e Uso da terra

A contribuição da cobertura vegetal é retardar o escoamento superficial, aumentando a capacidade de infiltração da água pluvial no solo. O aumento da infiltração diminui o escoamento superficial e conseqüentemente a capacidade de erosão nas vertentes. Para Crepani et al. (2001) a ação da cobertura vegetal na proteção do solo se dá em diversas formas: evita o impacto direto contra o terreno das gotas de chuva que promovem a desagregação das partículas; impede a compactação do solo que diminui a capacidade de absorção de água; aumenta a capacidade de infiltração do solo pela difusão do fluxo de água.

A densidade de cobertura vegetal é um fator de proteção da UTB contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão, por isso para as altas densidades de cobertura os valores atribuídos na escala de vulnerabilidade se aproximam da estabilidade (1,0), para as densidades intermediárias atribuem-se valores intermediários (ao redor de 2,0), e para baixas densidades de cobertura vegetal valores próximos da vulnerabilidade (3,0). (tabela 23).

Tabela 23 - Grau de fragilidade para variável cobertura vegetal

Cobertura Vegetal	Frag.
Floresta Ombrófila Densa, independentemente da posição topográfica (Aluvial, Terras baixas, Submontana, Montana e Alto-montana) e da fisionomia específica (dossel, uniforme ou emergente).	1,0
Floresta Ombrófila Aberta, independentemente da posição topográfica (Terras baixas, Submontana e Montana) e da fisionomia específica (Palmeiras, Cipó, Bambu e Sororoca).	
Floresta Ombrófila Mista, independente da sua posição topográfica (Aluvial, Submontana, Montana e Alto-montana).	
Floresta Estacional Semidecidual (20 a 50% de caducifolia), independente da sua posição topográfica (Aluvial, Terras baixas, Submontana e Montana) e de sua fisionomia específica (dossel uniforme ou emergente).	1,4 a 1,7
Formação Campinarana, fisionomia Florestada e fisionomia específica (Com palmeiras ou sem palmeiras).	
Savana Florestada e Savana Estépica Florestada, independente do relevo e de suas fisionomias específicas, (com ou sem floresta-de-galeria).	
Estepe arbórea densa, com ou sem palmeiras. Incluem-se, nesta categoria, a Vegetação com influência marinha (restinga arbórea), Vegetação com influência fluviomarinha (Manguezal) e Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre (arbórea com palmeiras ou sem palmeiras).	
Savana Arborizada e Savana-Estépica Arborizada, independente do relevo e de suas fisionomias específicas (com ou sem Floresta de Galeria).	2,0
Floresta Estacional Decidual (acima de 50% de caducifolia), independente da posição topográfica (Aluvial, Terras baixas, Submontana e Montana) e da fisionomia específica (dossel uniforme e emergente).	

Campinarana Arborizada, independente de sua formação específica (Com ou Sem floresta-de-galeria).	2,3 a 2,6
Estepe Arborizada, (arbórea aberta, com ou sem palmeiras), independente de apresentar floresta-de-galeria ou não.	
Buritizal com influência fluvial e/ou lacustre	
Campinarana arborizada, com ou sem palmeiras.	
Savana Parque, Savana Estépica Parque e Estepe Parque com ou sem floresta-degaleria, independente do relevo.	
Campinarana e Estepe com porte arbustivo.	
Vegetação com influência marianha (Restinga), porte arbustivo (das dunas).	
Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre, porte arbustivo (com ou sem palmeiras).	
Refúgio Montano e Refúgio Alto-montano	3,0
Savana Gramíneo-Lenhosa, Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa e Estepe Gramíneo-Lenhosa, independente do relevo e de suas fisionomias específicas (com ou sem Floresta de Galeria).	
Campinarana Gramíneo-Lenhosa, independente do relevo (tabular e/ou depressão fechada), e de sua fisionomia específica (com ou sem floresta-de-galeria).	
Vegetação com influência marinha herbácea (das praias), vegetação com influência fluviomarinha e a vegetação com influência fluvial e/ou lacustre (porte herbáceo).	
Refúgios Montano e Alto-montano (porte herbáceo).	

Fonte: Crepani et al. (2001)

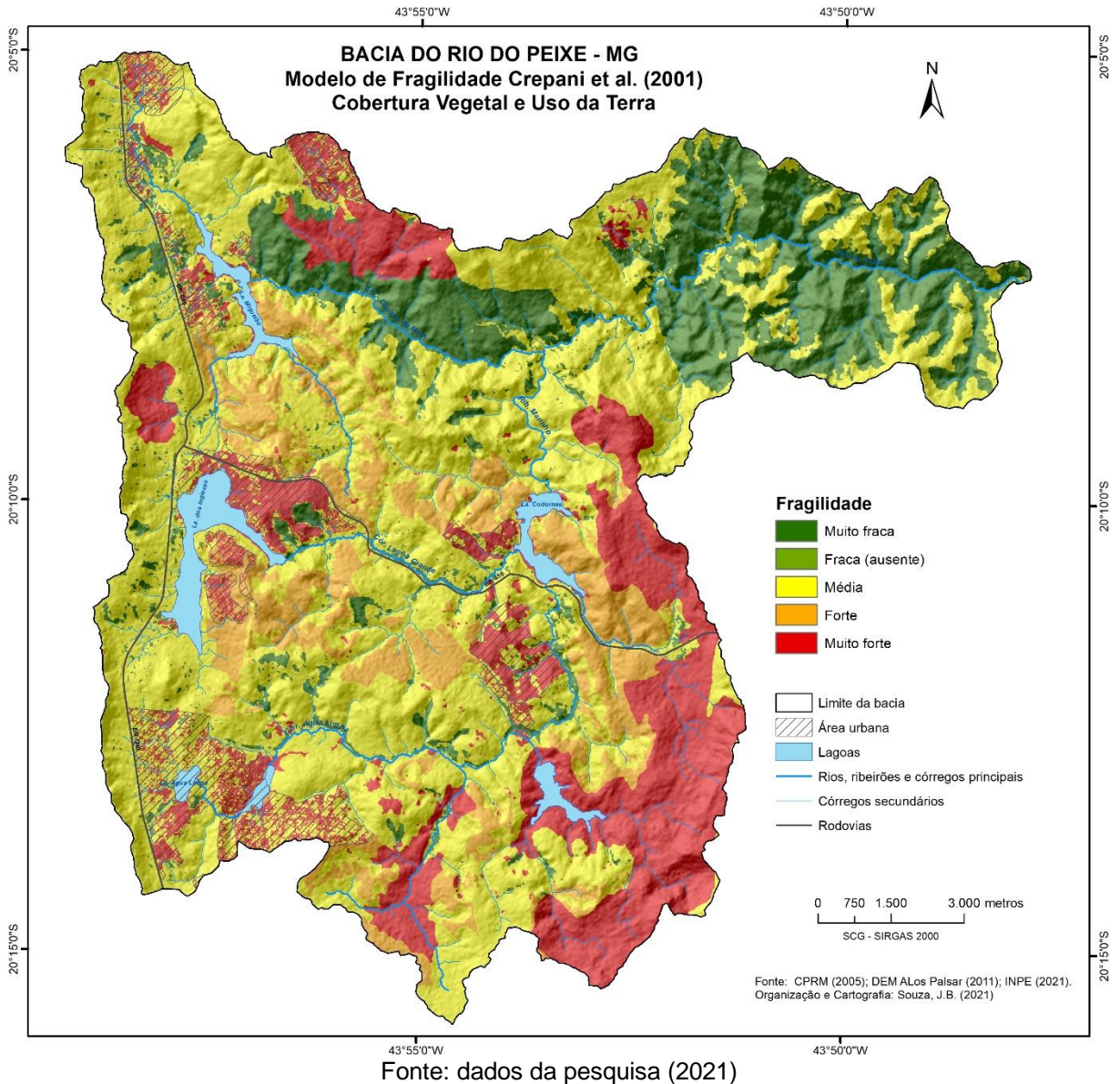
A tabela 24 apresenta os graus de fragilidade para os tipos Cobertura vegetal e uso da terra encontradas na bacia do Rio do Peixe, utilizadas para elaboração do mapa de vulnerabilidade/fragilidade para a variável Cobertura vegetal e uso da terra (figura 49).

Tabela 24 – Tipos de Cobertura Vegetal e Uso da Terra

Tipos de Cobertura Vegetal e Uso da Terra	Fragilidade
Mata	1,0
campo cerrado/campo gramíneo, campo rupestre,	1,9
Campo rupestre	2,0
capoeira	2,2
Reflorestamento	2,3
Pastagem	2,5
Solo exposto, atividade minerária, urbano	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001)

Figura 49- Fragilidade da bacia do Rio do Peixe para a variável cobertura vegetal e uso da terra



E) *Clima (pluviosidade)*

As principais características da chuva envolvidas na vulnerabilidade são; quantidade, ou pluviosidade total; a intensidade, ou intensidade pluviométrica; e a distribuição sazonal. A intensidade pluviométrica é a característica mais importante, apresentando relação direta com a quantidade de energia potencial disponível para ser transformada em energia cinética. A causa fundamental da denudação é a ação da chuva agindo inicialmente sobre as rochas provocando o intemperismo, e mais tarde sobre o solo removendo-o pela erosão hídrica. O impacto direto das gotas e o

escoamento superficial do excesso de água da chuva (“runoff” ou enxurrada) são os agentes ativos da erosão hídrica, o solo é o agente passivo. (CREPANI, et al.2001)

Em função da dimensão da área em estudos, os dados da pluviosidade para a área em estudo foram obtidos nas estações pluviométricas de Belo Horizonte e Ibirité do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distantes dentro de um raio de 25 km da área central da bacia. As estações apresentaram uma precipitação média mensal de 125 mm/ano nos últimos 40 anos. Enquadrando a bacia no nível de vulnerabilidade estável (1,4). (Tabela 25)

Tabela 25 - Grau de fragilidade para a variável clima (pluviosidade)

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	fragilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Fragilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Fragilidade
< 50	1,0	200 - 225	1,7	375 - 400	2,4
50 - 75	1,1	225 - 250	1,8	400 - 425	2,5
75 - 100	1,2	250 - 275	1,9	425 - 450	2,6
100 - 125	1,3	275 - 300	2,0	450 - 475	2,7
125 - 150	1,4	300 - 325	2,1	475 - 500	2,8
150 - 175	1,5	325 - 350	2,2	500 - 525	2,9
175 - 200	1,6	350 - 375	2,3	> 525	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001),

Após atribuição dos valores para todas as classes, de todos os mapas temáticos (Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação/Usos da Terra e Clima), é feita a integração via álgebra de mapas em ambiente SIG para gerar o mapa de Vulnerabilidade à perda de solo das unidades de Paisagem.

Cada UTB recebe um valor final resultante da média aritmética dos valores individuais segundo uma equação empírica que irá representar a posição desta unidade dentro da escala de vulnerabilidade a perda de solo:

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5}$$

Onde:

V – Vulnerabilidade da Unidade da Paisagem

G – Vulnerabilidade para o tema Geologia

R – Vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

S – Vulnerabilidade para o tema Solos








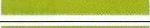













Vg - Vulnerabilidade para o tema Vegetação/Usos da Terra

C – Vulnerabilidade para o tema Clima-

A representação cartográfica da vulnerabilidade, utiliza 21 valores identificados por uma graduação de cores obtidas a partir da combinação das três cores aditivas

primárias (azul, verde e vermelho). O valor de maior estabilidade (1,0) é associado a cor azul, ao valor de instabilidade intermediária (2,0) a cor verde e ao valor de maior instabilidade, a cor vermelha. Tabela 26






Tabela 26 - Escala de Vulnerabilidade a Perda de solo das Unidades de Paisagens

UNIDADE DE PAISAGEM	MÉDIA	GRAU DE VULNERABILIDADE	GRAU DE SATURAÇÃO			CORES
			VERMELHO	VERDE	AZUL	
U1	3,0		255	0	0	
U2	2,9		255	51	0	
U3	2,8	Vulnerável	255	102	0	
U4	2,7		255	153	0	
U5	2,6		255	204	0	
U6	2,5	Moderado	255	255	0	
U7	2,4	Vulnerável	204	255	0	
U8	2,3		153	255	0	
U9	2,2		102	255	0	
U10	2,1	Mediano	51	255	0	
U11	2,0	Estável	0	255	0	
U12	1,9	Vulnerável	0	255	51	
U13	1,8		0	255	102	
U14	1,7		0	255	153	
U15	1,6	Moderado	0	255	204	
U16	1,5	Estável	0	255	255	
U17	1,4		0	204	255	
U18	1,3		0	153	255	
U19	1,2		0	102	255	
U20	1,1	Estável	0	51	255	
U21	1,0		0	0	255	

Fonte: Crepani et al. (2001)

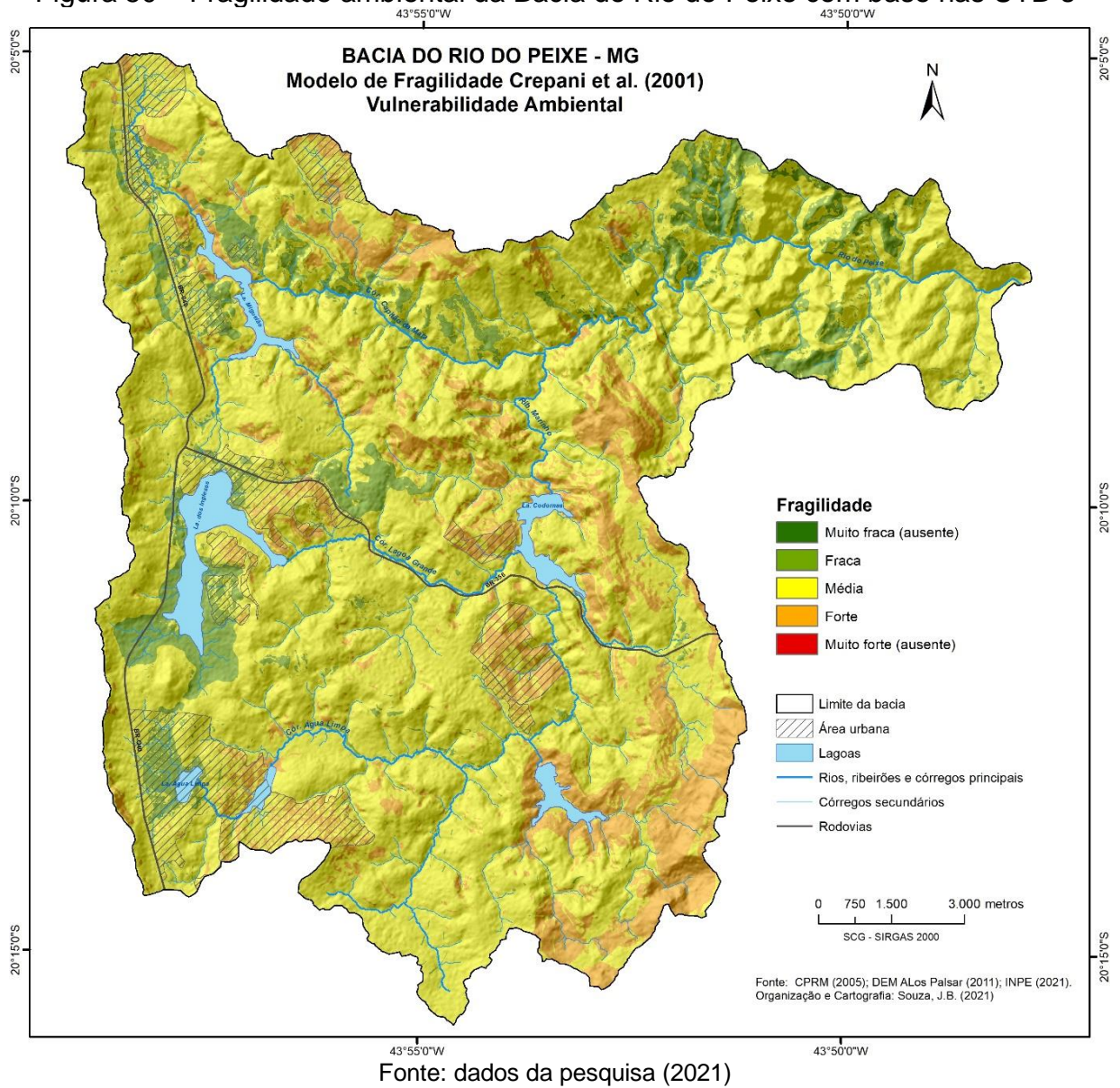
Assim como na escala proposta para o grau de vulnerabilidade foi fatiado em 5 intervalos iguais. Visando uma padronização das cores para que os modelos de fragilidades possam ser comparados, foi utilizada a paleta de cores descrita na tabela 27 para representar o mapa da vulnerabilidade ambiental proposto por Crepani et al. (2001). (Figura 50)

Tabela 27 - Intervalos dos Graus de Vulnerabilidade/Estabilidade

Grau de Vulnerabilidade	Intervalo de Classe	Cores
Estável	1,0 – 1,4	
Moderado Estável	1,4 – 1,8	
Médio Estável Vulnerável	1,8 – 2,2	
Moderado Vulnerável	2,2 – 2,6	
Vulnerável	2,6 – 3,0	

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001)

Figura 50 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe com base nas UTB's



6 – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ELABORAÇÃO DO MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL

Conforme analisado no capítulo anterior, onde foram apresentados os três modelos de fragilidade ambiental, percebe-se que apesar de utilizarem praticamente as mesmas variáveis ambientais apresentam diferentes formas de calcular a fragilidade ambiental. Cada modelo apresenta ponderações (notas e pesos) distintos para analisar cada variável, materializadas em mapeamentos com resultados bem diferentes.

Outra constatação que deve ser levada em questão é a escala proposta para o mapeamento. Fica evidente que a utilização da variável dissecação do relevo, principalmente da forma como é obtida na maioria dos casos não é adequada para mapeamento de média e grande escalas. Neste estudo, por exemplo, conforme exposto na metodologia, utilizou-se média da distância interfluvial e da amplitude altimétrica, a partir da análise de bacias hidrográficas utilizando ambiente SIG.

Estes procedimentos técnicos metodológicos, em função da escala, generalizam os processos atuantes na vertente. Cabe observar, que a matriz de dissecação proposta por Ross (1994) utilizada para a classificação do índice de dissecação possibilita enquadrar em uma mesma classe, diferentes níveis de dissecação. conforme apresentado na tabela 28.

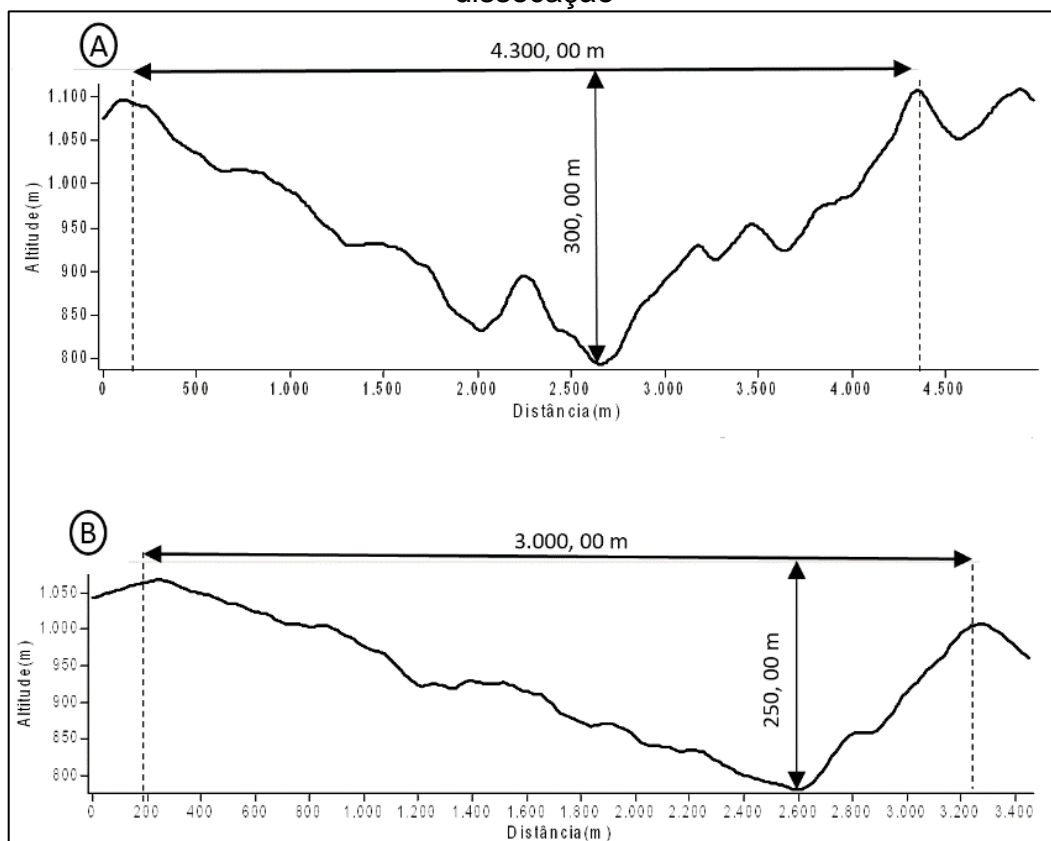
Tabela 28 - Matriz dos Índices de Dissecação das Formas de Relevo

Grau de Entalhamento dos vales	Dimensão Interfluvial Média				
	Fraco (1) > 3.750m	Fraco (2) 1.750m a 3.750m	Fraco (3) 750m a 1.750m	Fraco (4) 250m a 750m	Fraco (5) <250m
Muito fraco (1) < 20 m	11	12	13	14	15
Fraco (2) 20m a 40m	21	22	23	24	25
Médio (3) 40m a 80m	31	32	33	34	35
Forte (4) 80m a 160m	41	42	43	44	45
Muito Forte (5) > 160m	51	52	53	54	55

Fonte: Ross (2006)

Tal fato pode ser demonstrado a partir do exemplo apresentado na figura 51 no qual são apresentados dois perfis topográficos (A e B), a partir da Matriz de Dissecação, encontram-se com o mesmo grau de dissecação muito forte (52), apesar de apresentarem diferentes processos de dissecação e indicarem diferentes estágios evolutivos evidenciados pelas diferenças nos perfis das formas das vertentes.

Figura 51 - Classificação de perfis topográficos diferentes na mesma classe de dissecação



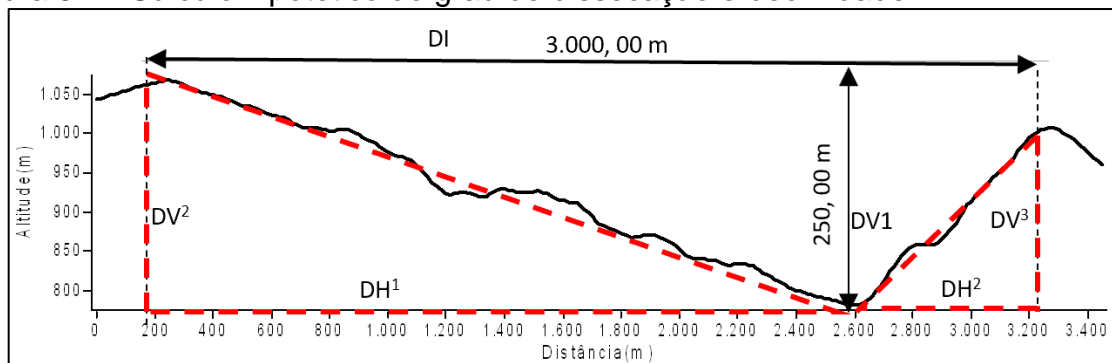
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Provavelmente atento a isso Ross (1994), propõe substituir à variável dissecação do relevo pela declividade, para mapeamento em escala superior a 1:25.000. Crepani et al. (2001) por sua vez, acrescenta a variável declividade no indicador geomorfologia. O indicador geomorfologia, é então obtido pela soma das variáveis dimensão interfluvial e grau de entalhamento dos talwegues.

A dissecação do relevo, enquanto índice obtido pela razão entre dimensão vertical sob dimensão horizontal, possibilita relacioná-lo à medida de declividade. A dimensão interfluvial refere-se à duas vezes a medida horizontal utilizada no cálculo da declividade, enquanto o grau de entalhamento refere-se a medida vertical.

Entretanto, o índice de dissecação difere do valor da declividade por levar em consideração a medida horizontal tomada, não da base ao topo, mas entre dois interflúvios. Desta forma, o valor obtido pelo índice será sempre um valor inferior ao valor da declividade, mesmo quando considerada a declividade média, ou seja, aquela que desconsidera as ondulações intermediárias e toma como referência a base e o topo da vertente, conforme pode ser observado na equação, tomando como base as medidas encontradas na figura 52.

Figura 52 – Cálculo hipotético do grau de dissecação e declividade



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

IDR (índice de dissecação do relevo) = dimensão vertical (DV) / Dimensão Interfluvial (DI)

$$\text{IDR} = 250/3000$$

$$\text{IDR} = 0,083$$

D (Declividade) = Distância vertical (DV) / Distância horizontal (DH) x 100

$$D^1 = \text{DH}^1/\text{DV}^1 = 250/2400 = 0,104 \times 100 = 10,4\%$$

$$D^2 = \text{DH}^2/\text{DV}^2 = 250/600 = 0,416 \times 100 = 41,6 \%$$

Conclui-se que a medida da declividade, mesmo quando considerada em uma linha direta base-topo, reflete não o grau de dissecação, mas retrata o comportamento da vertente frente aos agentes que a modelaram. A declividade, pode apresentar valores distintos entre duas vertentes de um mesmo canal considerado, valores estes desconsiderados pelo índice de dissecação. (SAMPAIO et al. 2007)

Dentre a variáveis morfométricas, a declividade é considerada uma das variáveis mais importantes no condicionamento da gênese e da evolução dos processos erosivos (RODRIGUES, 1982).

Para Guerra (1995), a declividade não deve ser levada em conta separadamente, mas sim em conjunto com outras variáveis, que, igualmente afetam a remoção do solo e a quantidade de *escoamento superficial*.

Uma variável morfométrica de grande importância é o comprimento da rampa ou da vertente, que representa a distância do interflúvio até o fundo de vale. As duas variáveis, declividade e comprimento da vertente, são pesquisadas separadamente, mas quando aplicada na EUPS, são analisados em conjunto, constituindo o fator topográfico (LS). O comprimento da vertente não é menos importante que o grau de declividade, pois uma vez que o caminho percorrido pelo escoamento superficial vai aumentando, não somente o volume aumenta, mas também a velocidade do escoamento aumenta progressivamente, podendo ser traduzida em aumento da erosão. (SILVA et al.2003)

Outra variável morfométrica que atua diretamente no escoamento superficial diz respeito a forma do terreno. A associação entre curvatura horizontal da vertente e curvatura vertical da vertente, gerando a variável Forma do terreno. Segundo Valeriano (200), a curvatura vertical refere-se ao caráter convexo, retilíneo ou côncavo do terreno, quando analisado em perfil, respondem de forma diferenciada na infiltração e escoamento da água da chuva, gerando diferenças significativas no desenvolvimento dos processos erosivos.

As curvaturas horizontais destacam a característica de concentração ou divergente do escoamento superficial da água no terreno. Ao analisar as projeções de forma horizontal, observa-se que as áreas que apresentam a formação convergente são as que sofrem maior transporte e deposição de solos que são carreados com o fluxo da água, e as áreas de divergência são responsáveis pelo espalhamento e dispersão do sedimento. (SILVA NETO, 2013).

Como afirma Guerra (1995) às características relativas à declividade, comprimento e forma das vertentes (Forma do terreno) atuam em conjunto entre si e com outros fatores relativos à erosividade da chuva (pluviosidade), bem como às propriedades do solo, geologia e cobertura vegetal e uso e ocupação do solo promovendo maior ou menor fragilidade da vertente à erosão.

O desenvolvimento de rotinas e procedimentos apoiados no uso de modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model - DEM*) apresenta-se com possibilidade viável para melhoria do mapeamento da fragilidade ambiental, permitindo extrair

parâmetros numéricos do relevo, os quais podem ser incorporados às metodologias tradicionais ou servir de base para a elaboração de novas propostas (VALERIANO, 2008; MINÁR; EVANS, 2008; BISHOP *et al.*, 2012).

Diante do exposto, é proposta desta pesquisa apresentar uma adaptação metodológica para mapeamento da fragilidade ambiental, para médias e grandes escalas. A proposta da tese acrescenta as variáveis morfometrias acima descritas (Forma do terreno, comprimento da vertente) ao conjunto de variáveis já consagradas nas metodologias propostas por Ross (1994) e Crepani *et al.* (2001).

Outra contribuição desta pesquisa, é incorporação dos fundos de vales como regiões de grande fragilidade ambiental. Nos modelos analisados, observa-se que a forma como os pesos são atribuídos a variável declividade, dando destaque as altas declividade nos processos erosivos, acaba negligenciado as áreas de baixa declividade, geralmente localizadas nos fundos de vales. Os fundos de vales são áreas de extrema fragilidade ambiental, não somente devido a processos sedimentação e inundação, como também são regiões sujeitas a processo erosivos associados a remoção lateral das margens dos cursos d'água.

Para Florenzano (2008) a erosão lateral ocorre quando as margens do canal são removidas, geralmente por processos de solapamento basal e colapso. Desse modo, a erosão lateral produz o desgaste do material das margens, pelo solapamento basal nos barrancos, com auxílio da ação do fluxo do próprio curso d'água. Esta erosão pode ser acelerada pela ação antrópica e, por fortes precipitações, resultando no aumento da carga sedimentar, que atua diretamente no controle da largura do canal e a formação de formas e feições fluviais (barras de meandro, bancos de sedimentação, barras laterais e outros).

A metodologia proposta nesta tese, além de se trabalhar cada variável individualmente, destaca a necessidade da geração de pesos, os quais possam quantificar a importância de cada variável ambiental. Geralmente os métodos tradicionais consideram mesmos pesos para todas as variáveis, como se todas tivessem a mesma importância perante a formação dos processos. Nesse caso, indica-se a aplicação de uma média ponderada, a qual considera a relevância real de cada variável.

Os métodos tradicionais trabalham com intervalos rígidos de classes. Entretanto, problema de se trabalhar com intervalos rígidos é a imprecisão dos dados,

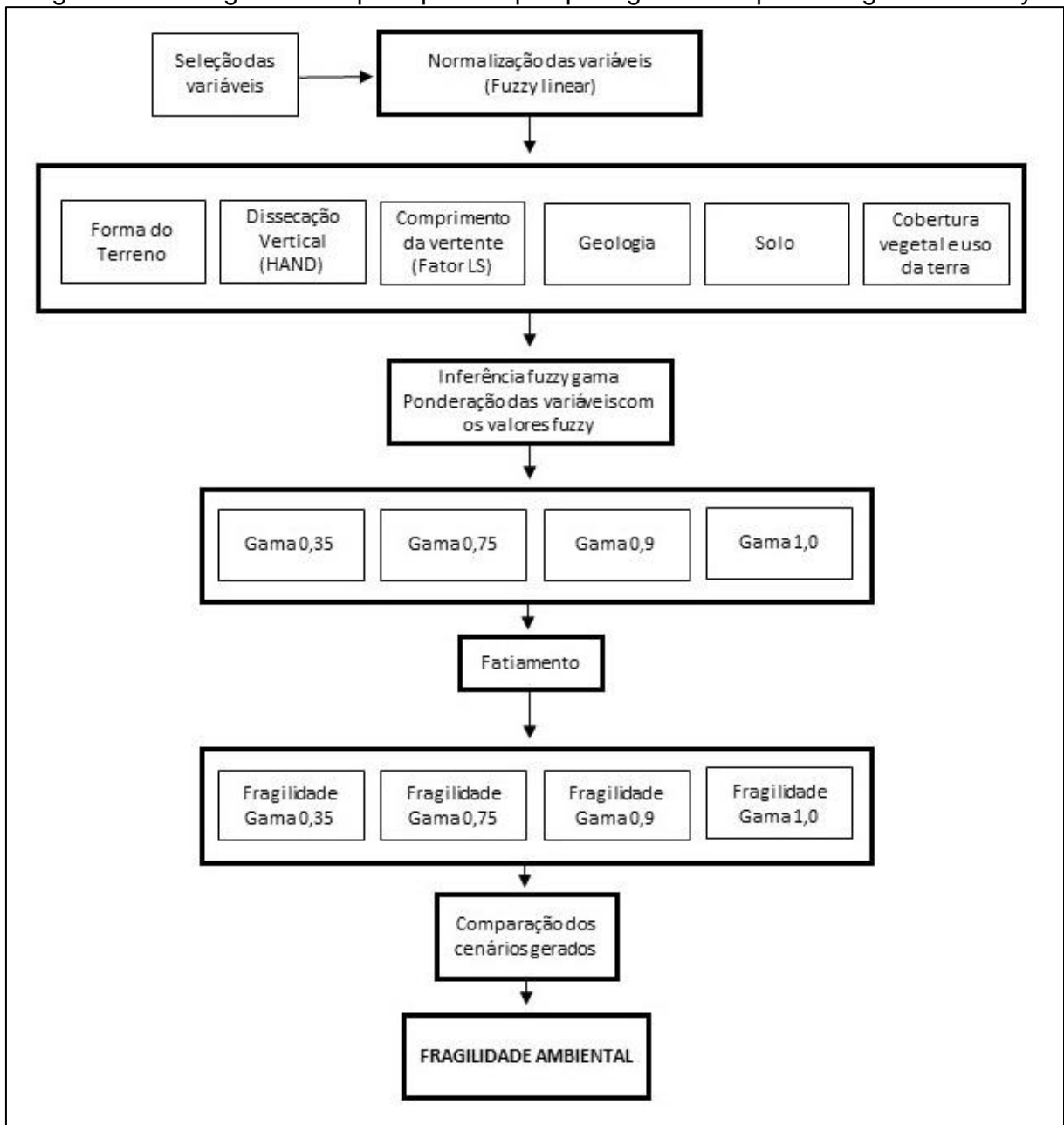
já que não existe rigidez na espacialização de fenômenos no espaço. Uma solução para evitar a rigidez é a aplicação de intervalos *Fuzzy*, gerando mapas em superfícies contínuas e intervalos que variam entre 0 e 1.

Em síntese, abordagem *Fuzzy*, possui como característica principal ausência de fronteiras definidas entre as classes. Na teoria dos conjuntos *Fuzzy*, o mesmo elemento pode pertencer a várias classes, mas com grau de pertinência diferentes. É utilizado quando se tem que trabalhar com ambiguidade abstração e ambivalência na conceituação e representação dos fenômenos estudados (CÂMARA *et al.*, 2001).

Existem vários tipos de operadores de inferência *Fuzzy*, dentre eles o *Fuzzy* AND, que expressa intercessão, *Fuzzy* OR, que expressa união, produto algébrico *Fuzzy*, que expressa um produto entre as variáveis envolvidas, soma algébrica, que expressa uma soma entre as variáveis estudadas e operador gama que inclui o produto entre soma algébrica *Fuzzy* e o produto *Fuzzy*. A proposta metodológica desta pesquisa, se concentra no operador *Fuzzy* gama.

A seguir são apresentadas as etapas realizadas para o desenvolvimento da proposta metodológica de elaboração do modelo de fragilidade ambiental. A figura 53 apresenta o fluxograma das principais etapas.

Figura 53 - fluxograma das principais etapas para gerar o mapa de fragilidade Fuzzy



Fonte: elaborado pelo autor (2021)

6.1 - Normalização das Variáveis

Os procedimentos metodológicos aplicados para aquisição das variáveis morfometrias foram descritos no capítulo 03. A seguir serão descritos os critérios adotados para definição das notas e normalização das variáveis utilizadas na modelagem:

- Forma do Terreno (curvatura horizontal e curvatura vertical)
- Dissecação vertical (HAND)
- Comprimento da vertente
- Declividade
- Geologia
- Solo
- Cobertura vegetal e uso e ocupação do solo.

Para aplicação do operador de inferência *Fuzzy* gama, foi necessário realizar a normalização das variáveis acima relacionadas. Para tal, foi aplicada transformação linear simples para que todos os valores das variáveis e ficassem no intervalo entre 0 e 1. A transformação linear tem como característica preservar as operações de adição vetorial e multiplicação escalar, por isso aplicando-se a transformação linear neste caso, modificam-se conservando a estrutura algébrica de como os valores estão posicionados na grade. Usou-se, nesse caso, a equação de reta definida como $y = ax + b$, para determinar o ganho (a) e o offset (b) a serem aplicados em cada escala.

6.1.1 - Forma de Terreno.

As Formas de relevo são obtidas a partir da sobreposição entre as camadas curvaturas horizontais e verticais foram determinados valores para cada tipo de curvatura e a soma desses valores representam uma determinada forma. Como produto da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente), estabelecendo-se nove classes distintas para as formas do terreno (VALERIANO, 2008)

Desse modo, apoiado na literatura referida no presente estudo, considerou-se a forma do terreno, Côncava - convergente como a classe de maior concentração e acúmulo de escoamento superficial, que corresponderia também à classe com maior

vulnerabilidade aos processos erosivos mais intensos. As formas do terreno convexas - divergentes caracterizam-se como a classe de maior dispersão do escoamento superficial e menor concentração e acúmulo. Essas classes apresentam formas do terreno onde o escoamento superficial apresenta baixa capacidade de transporte e de remoção das partículas do solo, portanto, apresentam baixa fragilidade à perda de solos.

Observa-se que as formações retilínea-convergente e côncava-convergente retratam a classe “muito alto”, e as formas de relevo convexo-convergente e côncavo-planar retratam as classes de fragilidade “alta”. Silva Neto (2013) afirma que tais classes apresentam maior propensão a concentração dos fluxos de escoamento superficial, com isso tornando-se mais vulneráveis a processos erosivos lineares.

Já para as formas de terreno centrais, resultantes da composição da forma de vertente retilíneo-planar, podem apresentar fragilidade moderada ou média para os processos de escoamento superficial e classificada também como área de transição de formas de relevo (DURÃES; DE MELLO, 2016).

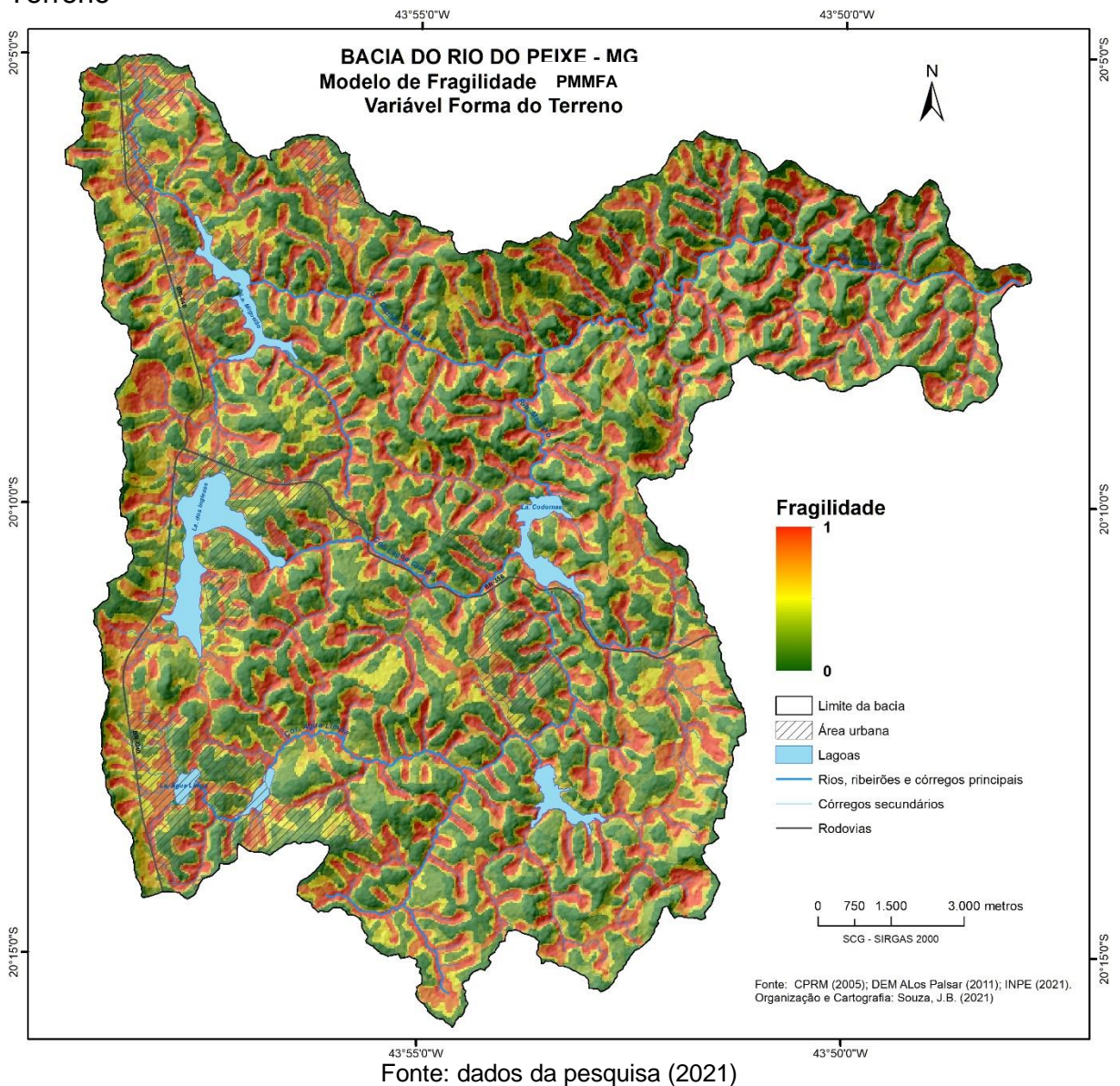
A tabela 29 – apresenta os graus de fragilidade normalizados para os tipos de Formas do terreno encontradas na bacia do Rio do Peixe, que foram utilizadas para elaboração do mapa de fragilidade para a variável Forma de Terreno (figura 54).

Tabela 29 – Normalização da fragilidade ambiental da variável Forma do Terreno

Formas do Terreno	Fluxo	Valor referência	Normalização
Convexa- convexa	Divergente	1	0
Convexa-retilínea	Divergente	2	0,22
Convexa - côncava	Divergente	3	0,33
Retilínea - convexa	Planar	4	0,44
Retilínea - retilínea	Planar	5	0,55
Retilínea - côncava	Planar	6	0,66
Côncava - convexa	Convergente	7	0,77
Côncava - retilínea	Convergente	8	0,88
Côncava - côncava	Convergente	9	1,0

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 54 – Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe para a variável Forma do Terreno



6.1.2 - Dissecação Fluvial (modelo HAND)

A dissecação fluvial do relevo é uma variável importante no grau de estabilidade ou instabilidade morfodinâmica da área. Vertentes muito íngremes favorecem os processos morfogenéticos em detrimento à pedogênese, levando a um comportamento morfodinâmico instável. Por outro lado, planícies e fundos de vales com fraca declividade também se caracterizam por elevada instabilidade morfodinâmica, já que estão sujeitos a inundações. Em consequência, a ocupação

humana nestes dois tipos de relevo representa alto risco ambiental, que se intensifica quanto maior à vulnerabilidade social da população.

A rede de drenagem utilizada como base para elaboração da dissecação vertical do relevo é compatível com a escala de 1:50.000 da Agência Nacional das Águas (ANA). Para elaboração da dissecação vertical do relevo, o descritor de terrenos HAND – *Height Above the Nearest Drainage* (Nobre et al., 2010 e Rennó et al., 2008). Os procedimentos metodológicos para elaboração do modelo HAND para área de estudo foram descritos no capítulo 03.

Como explicam Nobre et al. (2010) e Rennó et al. (2008), a partir da rede de drenagem extraída do dado topográfico, a diferença entre cada elemento da grade do MDE e o ponto mais próximo associado à rede de drenagem extraída dá origem ao modelo de superfície HAND. O nível de referência é relativo à rede de drenagem mais próxima. Em outras palavras, o valor do atributo de altitude de um determinado ponto é definido pela posição que este se encontra em relação ao curso d'água para o qual ele deságua, iniciando a contagem a partir de zero (na drenagem) e aumentando na medida em que este se distância da drenagem. Cada célula do modelo apresenta uma altura que representa a amplitude altimétrica em relação ao nível de base mais próximo.

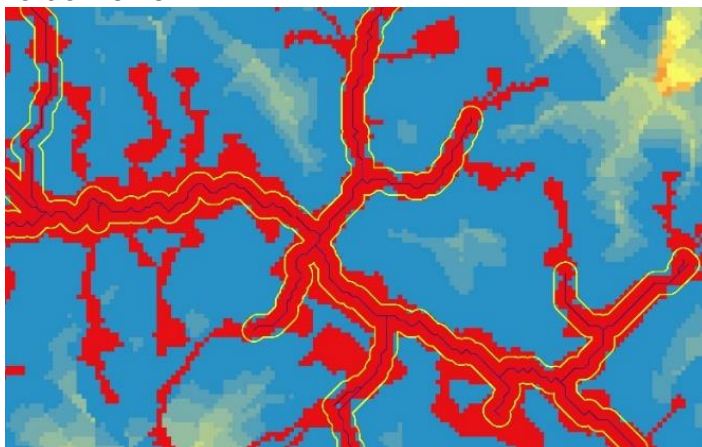
O modelo HAND, foi criado com o propósito de identificar áreas susceptíveis a inundação e correlação entre perfil topográfico e profundidade do lençol freático. Neste estudo o modelo HAND foi obtido para identificar as áreas de alta vulnerabilidade dos fundos de vales e o grau de fragilidade da dissecação vertical. Reno et al. (2008) e Nobre et al. (2011) sugerem o intervalo altimétrico de 0 a 5 metros como sendo uma região de erodibilidade muito alta, situado em geral em áreas de nascentes, fundos de vales e de cabeceiras de cursos de água.

O Código Florestal (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012), Lei que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa ou Lei Florestal, em vigor desde maio de 2012, define uma faixa de preservação permanente de até 30 metros no entorno dos rios, com largura mínima de 10 metros.

Os cursos d'água da bacia se enquadram nesta faixa de largura para aplicação da lei. A sobreposição da faixa de APP de 30 metros nos cursos d'água da bacia, com a classe de 05 metros obtida no modelo HAND, evidencia uma concordância entre elas, conforme ilustrado na figura 55. A indicação dos fundos de vale como áreas de

alta fragilidade ambiental, associadas ao código florestal, podem reforçar a necessidade de preservação destes ambientes. Este detalhe, colaborou para manutenção do intervalo de 0 a 5 metros como área de alta fragilidade ambiental.

Figura 55 – Detalhe da sobreposição da faixa de APP marginal com o modelo HAND para a Bacia do Rio do Peixe



Legenda: em vermelho classe HAND no intervalo de 0 a 5 metros de altura. faixa de app marginal de 30 metros (linha amarela) d'água (linha azul). Fonte: dados da pesquisa (2021).

O intervalo de 5 metros foi utilizado como referência para delimitar os fundos de vales com seu respectivo grau de fragilidade. Para as demais classes de altura vertical utilizou-se a tabela de vulnerabilidade vertical proposta por Crepani et al. (2001).

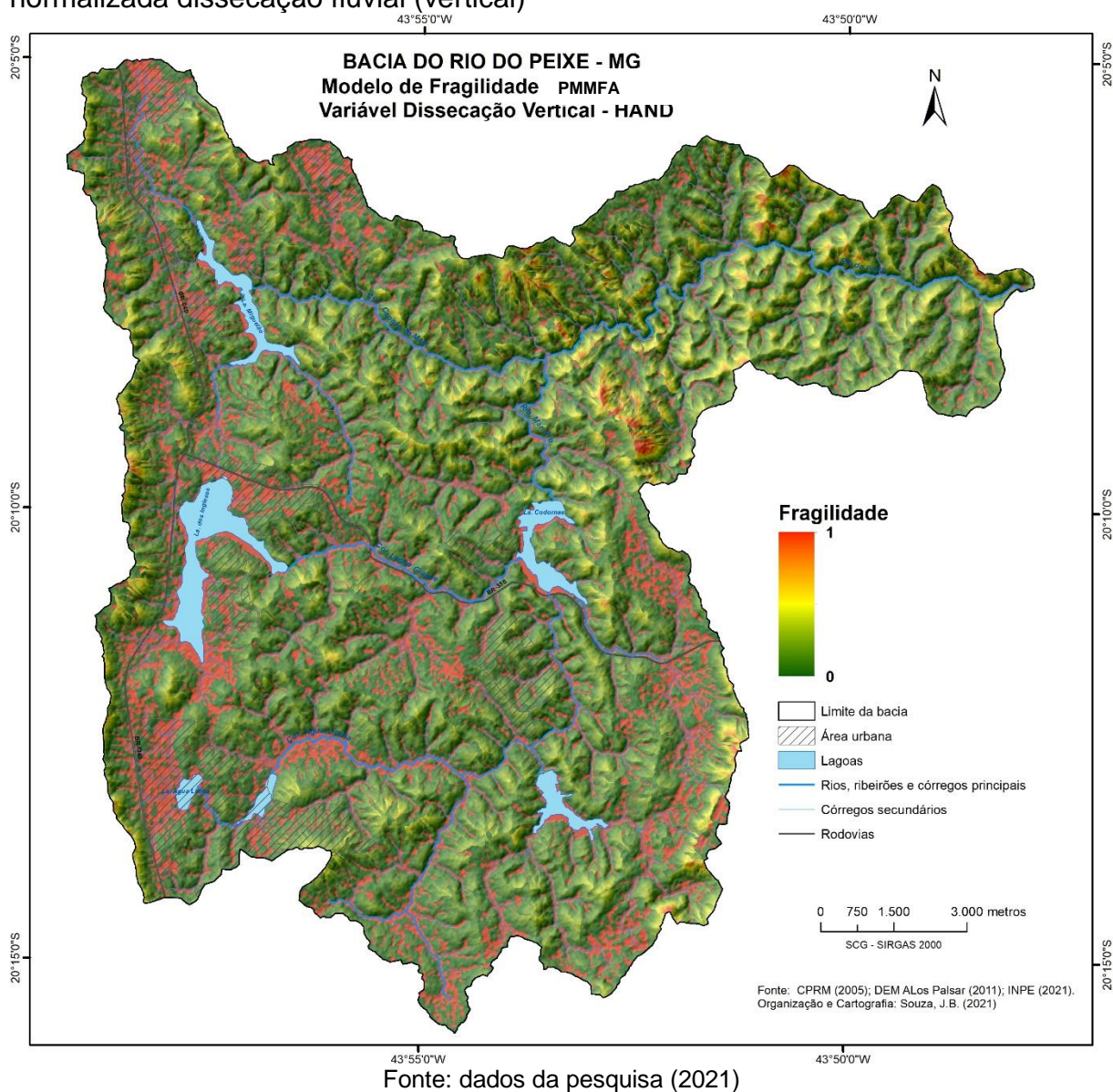
Na normalização linear fuzzy o intervalo de amplitude altimétrica de 0 a 5 recebeu o valor de fragilidade 3,0 (tabela 30). Os demais valores receberam uma normalização linear crescente do menor valor em direção ao maior valor, indicando passagem gradual de ambiente estável (0) para instável (1). A figura 56 apresenta o mapa normalizado da bacia do Rio do Peixe para a variável dissecação fluvial (vertical).

Tabela 30 - Classes de fragilidade utilizadas na normalização da fragilidade ambiental da variável dissecação fluvial

Amplitude Altimétrica (m)	frag.	Norm	Amplitude Altimétrica (m)	frag.	Norm	Amplitude Altimétrica (m)	frag.	Norm
0 - 5	3,0	1,0	77 - 84,5	1,7	0,36	141,5 - 151	2,4	0,73
5 - 20	1,0	0	84,5 - 94	1,8	0,42	151 - 160,5	2,5	0,78
20 - 29,5	1,1	0,05	94 - 103,5	1,9	0,47	160,5 - 170	2,6	0,84
29,5 - 39	1,2	0,10	103,5 - 113	2,0	0,52	170 - 179,5	2,7	0,85
39 - 48,5	1,3	0,15	103,5 - 113	2,1	0,57	179,5 - 189	2,8	0,89
48,5 - 58	1,4	0,21	122,5 - 132	2,2	0,63	189 - 200	2,9	0,94
58 - 67,5	1,5	0,26	132 - 141,5	2,3	0,68	>200	3,0	1,0
67,5 - 77	1,6	0,31						

Fonte: adaptado de Crepani et al. (2001),

Figura 56 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada dissecação fluvial (vertical)



Fonte: dados da pesquisa (2021)

6.1.3 – Fator topográfico: Comprimento da vertente e declividade

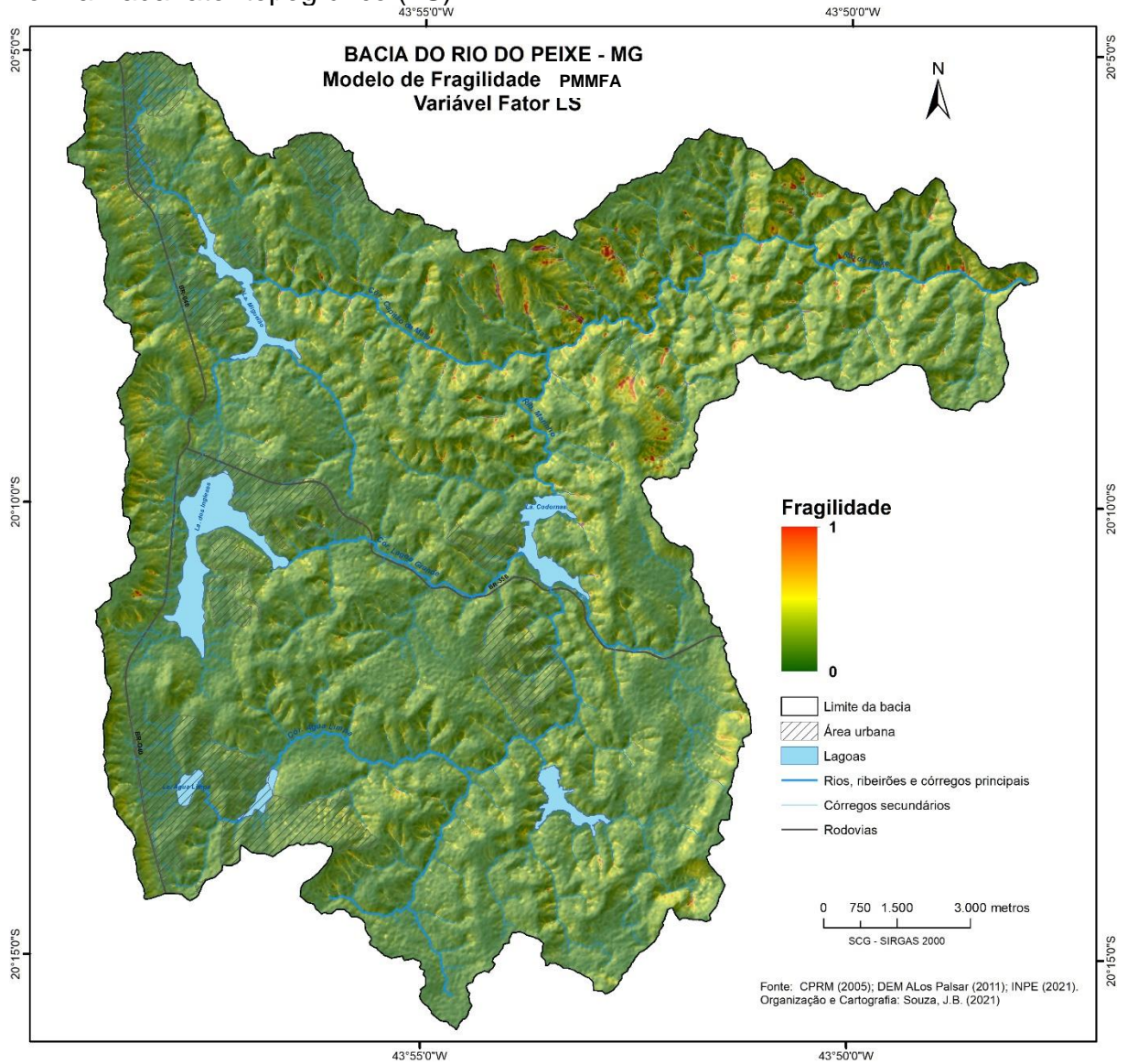
O comprimento da rampa associado a declividade responde por processos erosivos em regiões com baixa inclinação. A unidade de Colinas apresenta áreas de vertente retilínea-retilínea, retilínea-côncava, de média a baixa declividade, com presença de ravinas e voçorocas. Esta constatação empírica realizada com base em levantamentos de campo contribui para incluir o fator LS como uma das variáveis no modelo de fragilidade.

O fator topográfico (LS) parte da da EUPS (WISCHMEIER e SMITH ,1965), obtido através do comprimento da vertente e da inclinação do relevo. A análise do Fator LS recebe grande importância, pois, influencia diretamente nos fluxos de matéria e energia, fornecidos pelo escoamento superficial das águas pluviais, que vão condicionar a dinâmica erosiva no sistema vertente.

No tocante ao foco da pesquisa, Bigarella (2003) afirma que o escoamento superficial é o grande responsável pela erosão pluvial, porém, no início do processo não há energia suficiente para haver erosão, no entanto, o potencial erosivo aumenta vertente abaixo, influenciado pelo aumento do comprimento da vertente e da inclinação da superfície.

Assim, o mapeamento do Fator LS gerado neste trabalho (Figura 69), seguindo a metodologia proposta por O método de Desmet e Govers (1996) e Wischmeier e Smith (1978), apresentou dados satisfatórios, com valores mais elevados localizando-se nas porções das baixas vertentes, onde o escoamento superficial possui mais energia. A declividade exerceu papel preponderante também, pois, as maiores declividades na unidade de Colinas, localizam abaixo da linha de ruptura topográfica na média vertente nos dois lados dos canais fluviais (figura 57).

Figura 57 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada fator topográfico (LS)



Fonte: dados da pesquisa (2021)

6.1.4 Geologia e solo.

Para as variáveis Geologia e solo, utilizou-se as escalas de fragilidade propostas por Crepani et al. (2001). As tabelas 31 e 32 apresentam os dados normalizados para as variáveis solo e geologia, representados respectivamente nas figuras 58 e 59.

Tabela 31 – Normalização da fragilidade ambiental da variável solo

Solo	Vul.	Normalização
Latossolo vermelho	1,0	0
Cambissolo	2,5	0,75
Neossolo litólico, afloramento rochoso, plintossolo	3,0	1

Fonte: dados da pesquisa (2001)

Tabela 32 – Normalização da fragilidade ambiental da variável geologia para Bacia do Rio do Peixe

Rocha	Fragilidade	Normalização
Quartzito ferruginoso, quartzito cinza, Itabirito hematítico, formação ferrífera	1,0	0
Canga ferruginosa	1,2	0,25
Serpentinito	1,4	0,30
Metabasalto	1,5	0,35
Metagabro	1,6	0,42
Micaxisto	1,7	0,50
Filito multicolorido, filito dolomítico, filito cinza a marrom, filito cor de alumínio	2,1	0,63
Esteatito	2,3	0,72
Aluvião	3,0	1

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 58 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada geologia

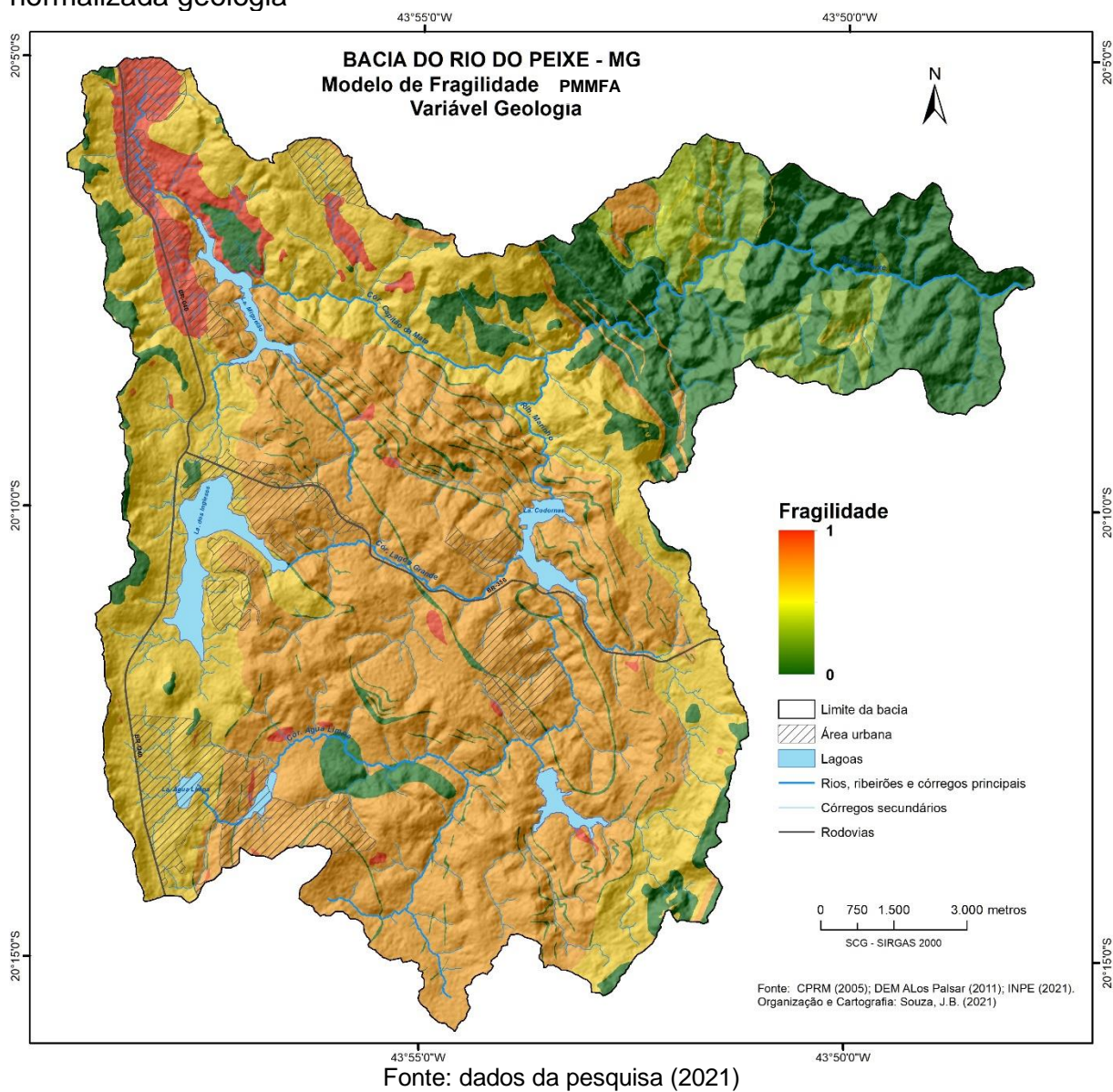
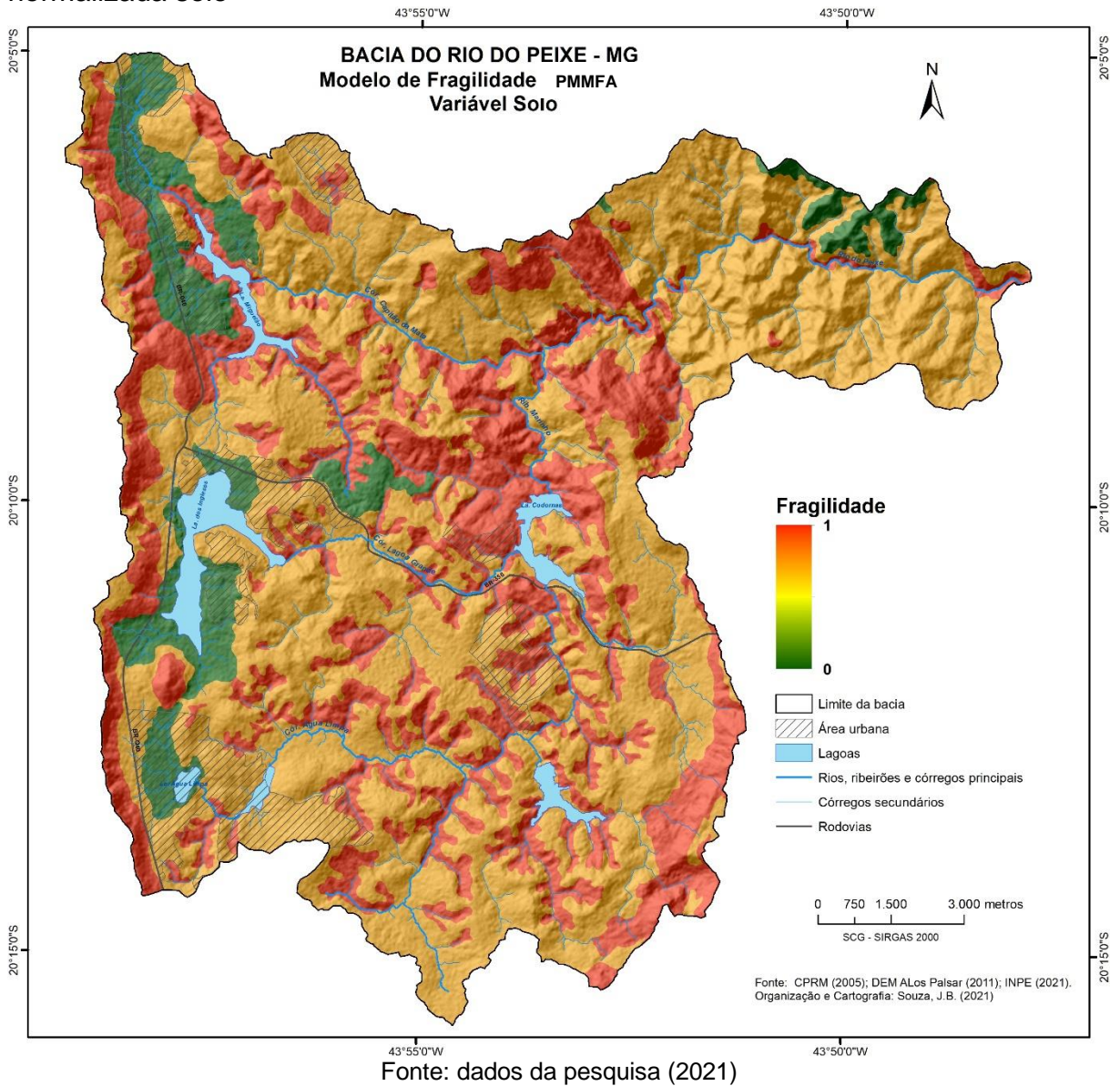


Figura 59 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada solo



6.1.5 - Cobertura e Uso da Terra

Como discutido anteriormente os dados climáticos da área são inconsistentes para utilizá-los no índice de fragilidade. Na proposta do Ross a região se enquadra na classe 4 de fragilidade. Para Crepani et al. (2001), com taxa de pluviosidade média de 125 mm ao ano, se encontra na classe baixa (1,4) fragilidade. Diante do exposto, para compensar a falta do indicador confiável de pluviosidade, na classificação da

cobertura vegetal e uso da terra foi utilizado o critério impermeabilização do solo. Segundo Sebusuiani (2001) a intensidade de uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica está fortemente associada ao nível de impermeabilização do solo, sendo possível que estas duas variáveis sejam trabalhadas em conjunto.

A impermeabilização do solo tem influência preponderante nas dinâmicas climáticas e hidrológicas características dos ambientes urbanos. As superfícies impermeabilizadas impedem a infiltração da água das chuvas e leva a aumentos no volume e na velocidade do escoamento superficial, fatores que propiciam maior frequência e intensidade de enchentes. O excesso de impermeabilização também provoca mudanças na capacidade térmica da área, na evaporação da água e na circulação das massas de ar, favorecendo a formação de ilhas de calor. Todos estes problemas são agravados pelo motivo do avanço das áreas impermeabilizadas ser feito às custas da supressão das áreas verdes (MATTOS, 2005)

A introdução de superfícies impermeáveis diminui a infiltração e reduz a superfície de retenção, portanto tem-se uma diminuição do abastecimento do lençol freático, o que pode implicar na diminuição da vazão dos cursos d'água. A mesma impermeabilização causa um aumento no escoamento superficial combinado com o aumento da velocidade produzida pela drenagem artificial, resultando em maiores vazões de pico com tempo de ocorrência mais rápido, provocando as enchentes em áreas urbanas (TUCCI, 2002). Devido aos problemas ocasionados pela impermeabilização do solo, se justifica a utilização deste critério para atrelar os dados de ocupação e uso ao índice de qualidade ambiental proposto.

O Método I-Pai Wu de modelagem hidrológica foi desenvolvido no início da década de 1960 por um engenheiro hidrólogo que dá nome ao método, ao estudar bacias hidrográficas americanas no Estado de Indiana. No método, um dos parâmetros utilizados é o coeficiente de escoamento superficial, dados pela relação entre vegetação/uso da terra e tipo de solo. Com base em estudos hidrológicos em bacias no Brasil e o Departamento de Água e Esgoto do estado de São Paulo (DAEE) disponibiliza uma tabela de referência para obtenção do parâmetro de escoamento superficial (tabela 33)

Tabela 33 – Coeficiente c^2 (grau de impermeabilização do solo)

Cobertura ou tipo de solo	Uso do solo ou grau de urbanização	Coeficiente c^2 (grau de impermeabilização)
Terreno seco e muito arenoso Terreno com vegetação densa Terreno plano	Zonas verdes não urbanizadas Zonas de proteção de mananciais com vegetação densa Parques e áreas vazias	0,1
Vegetação rala e/ou esparsa Solo arenoso seco Terrenos cultivados	Zonas especiais (universidades, cemitérios, aeroportos)	0,3
Manto fino de material poroso Pouca vegetação Gramados amplos, prados e campinas Declividade média	Zona residencial com lotes amplos (maiores que 1000 m ²) Zona residencial rarefeita	0,5
Pavimentado com declividade média Solos argilosos ou pantanosos Terrenos rochosos estéreis ondulados Vegetação quase inexistente	Zona de apartamento e edifícios comerciais	0,7
Pavimentado com declividade forte Rocha viva não porosa Estéril montanhosos Vegetação inexistente	Zona de concentração de prédios comerciais e /ou residenciais	0,9

Fonte: DAEE (2012)

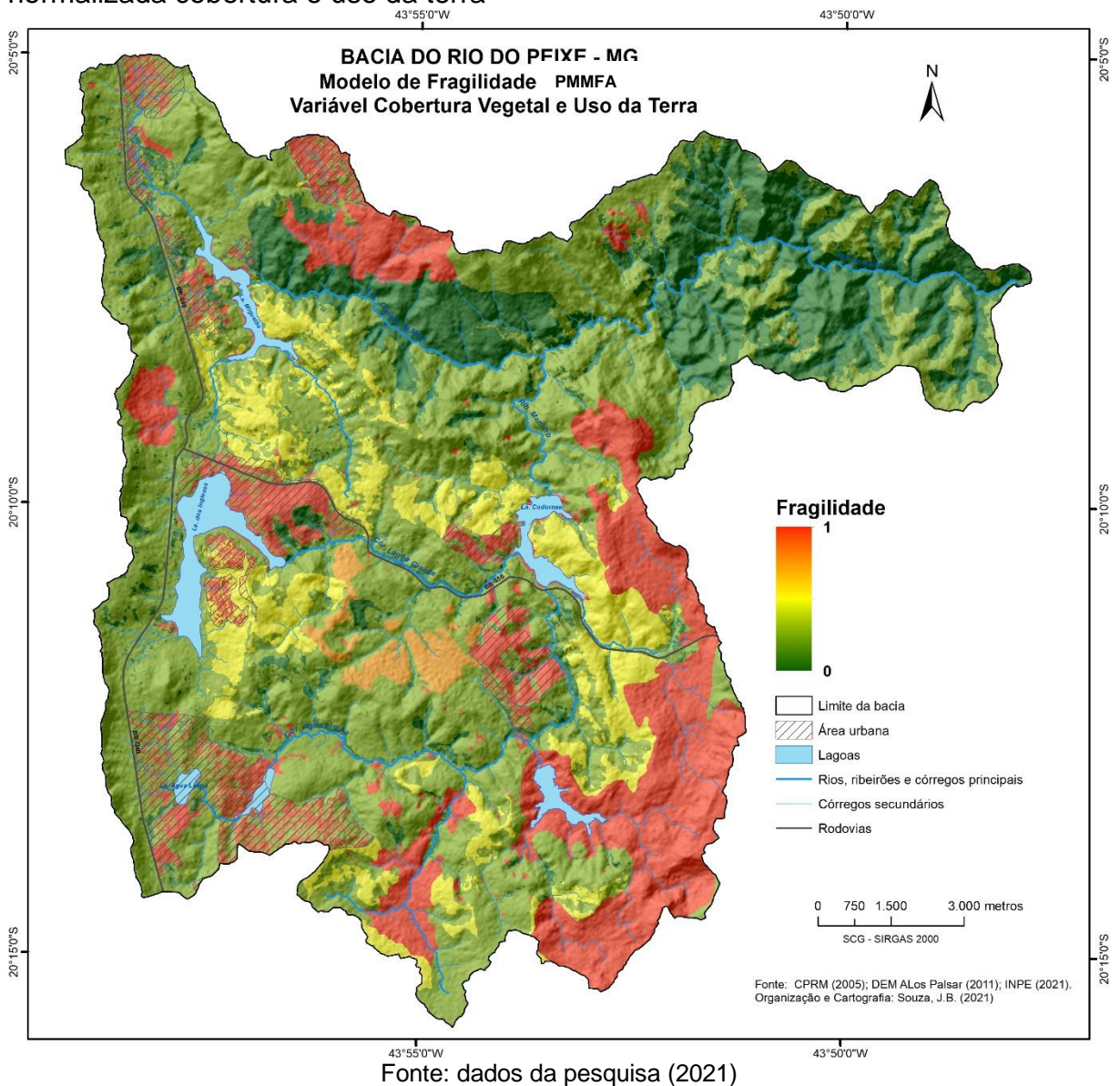
Com base nos coeficientes C^2 do modelo hidrológico I-pi_Wu, foi normalizada a fragilidade ambiental para a variável cobertura vegetal e uso da terra, apresentadas na tabela 34. O mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do Rio do peixe, para a variável cobertura da vegetação e uso e ocupação da terra, está representado na figura 60.

Tabela 34 – Normalização da fragilidade ambiental da variável Cobertura vegetal e uso da terra com base no coeficiente c^2 do modelo Hidrológico I-pi Wu

Tipos de Cobertura Vegetal/Uso da terra	fragilidade	Normalização
Mata	0,1	0
campo cerrado/campo gramíneo, campo rupestre, capoeira	0,3	0,25
Reflorestamento	0,5	0,5
Pastagem	0,7	0,75
Atividade minerária, urbano	0,9	1,0

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Figura 60 – Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe para a variável normalizada cobertura e uso da terra



A normalização das variáveis descritas acima, foi realizada pelo ArcMap 10.6, utilizando-se a função *Fuzzy Membership*, do *Spatial Analyst Tools*. Utilizou-se a função linear, a qual atribui 0 para o mínimo valor e 1 para o máximo valor, transformando o raster de entrada de forma linear (ESRI, 2012).

Deste modo, reescalou-se o maior valor de cada variável para 1 e o menor valor para 0, assim como os valores intermediários entre eles.

6.2 - Mapeamento da Fragilidade ambiental com o Operador de Inferência Fuzzy Gama

A modelagem da fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe foi obtida pelo operador de inferência fuzzy gama, possibilitando uma maior flexibilidade na geração de cenários de de fragilidade. O operador gama é representado por:

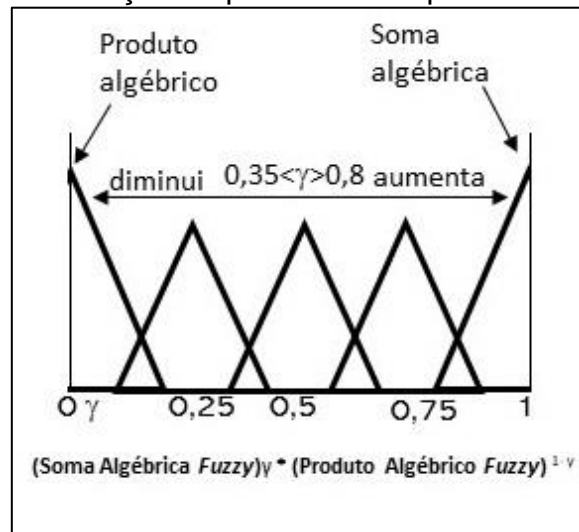
$$\text{Gama} = (\text{Soma Algébrica Fuzzy})^\gamma * (\text{Produto Algébrico Fuzzy})^{1-\gamma},$$

onde γ é um valor escolhido entre zero e 1. Este valor representa a flexibilização dos valores de saída, levando em conta a tendência de maximização da soma algébrica *Fuzzy* e de minimização do produto algébrico *Fuzzy*. Logo, quando gamma foi igual a zero, os valores de saída serão resultado do produto algébrico *Fuzzy*. Quando o gamma for igual a 1, os valores de saída serão a soma algébrica *Fuzzy*. (ESCADA,1998).

Os valores de gama entre $0 < \gamma > 0,35$ apresentaram um caráter “diminutivo”, ou seja sempre menor ou igual que o menor membro *Fuzzy* de entrada. Valores gama entre $0,8 < \gamma > 1,0$ terão um caráter “aumentativo” e o valor de saída será igual ou maior que o valor do maior membro *Fuzzy* de entrada. Para os valores de gama entre $0,35 < \gamma > 0,8$, o resultado não apresentará nem um caráter “aumentativo” nem “diminutivo”, os valores dos de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor de entrada.

A criação de cenários mais ou menos restritivos dependerá do valor atribuído ao expoente gama, assim, quanto maior o valor de gama, mais restritivo será o cenário. A figura 61 ilustra a relação de pertinencia de acordo com o valor fuzzy atribuído

Figura 61 - Relação de pertinência operador fuzzy gama



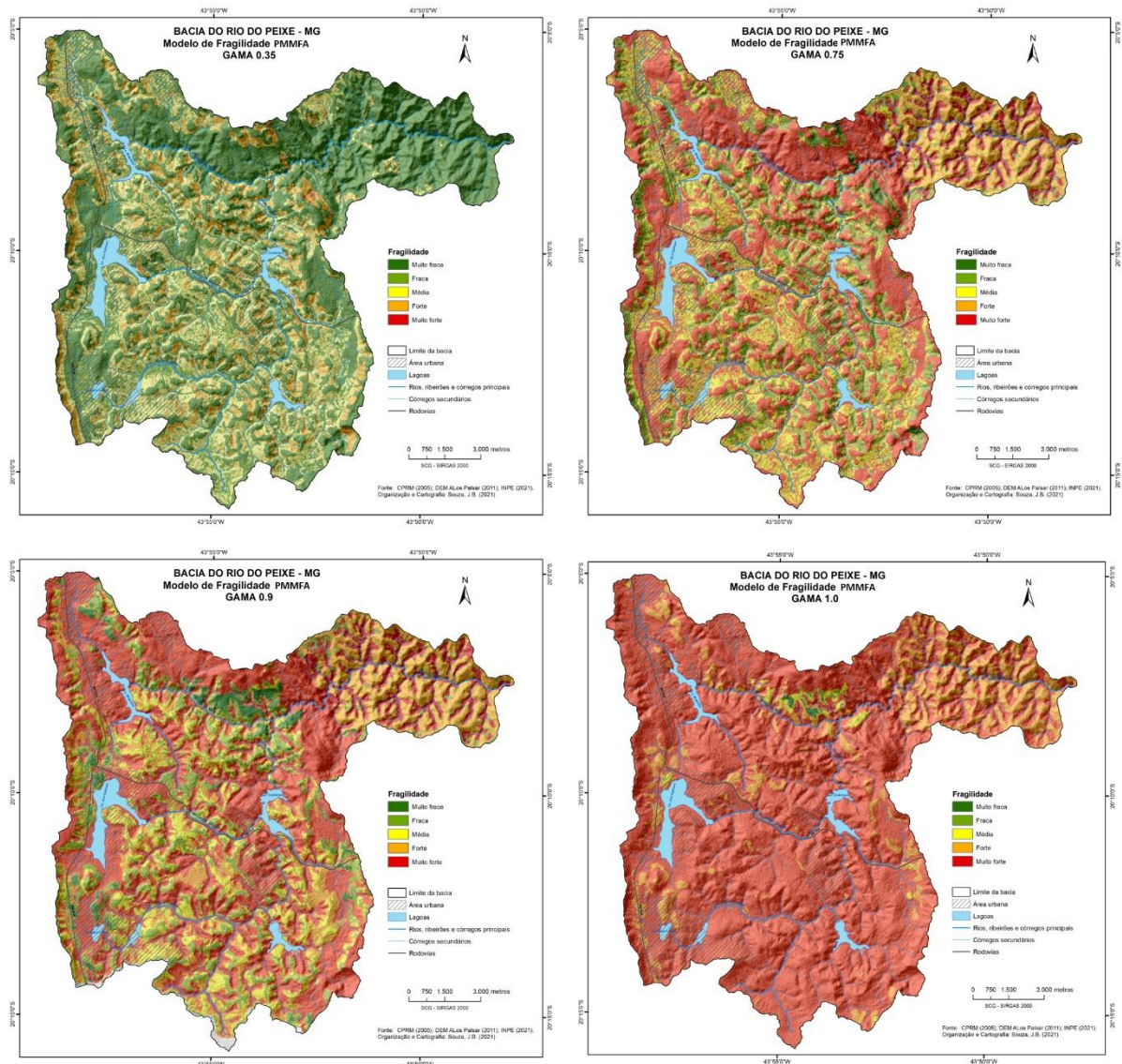
Fonte: dados da pesquisa (2021)

Com relação à modelagem e aos procedimentos, na etapa de inferência fuzzy gama, foram testados vários cenários. Para efeito de comparação, optou-se pela apresentação de quatro cenários distintos através dos seguintes valores do índice gama: 0,35; 0,75; 0,90 e 1,0.

Após a aplicação dos operadores *Fuzzy* gama e os respectivos fatiamentos foram gerados os mapas temáticos com representação matricial para cada valor de gama. O fatiamento das classes de acordo com a proposta de escala de fragilidade proposta por Ross (1994) a saber: muito fraca (1), fraca (2), média (3), alta (4) e muito alta(5).

A análise comparativa dos produtos gerados, mostra que o aumento do valor do índice gama gerou cenários de maior fragilidade ambiental, ou seja, aumentou a ocorrência das classes alta e muito alta. Por outro lado, os valores abaixo de 0,75 apresentaram cenários de menor fragilidade para todas as classes. Isto pode ser verificado nas Figura 62 e na tabela 28 de porcentagem das classes de fragilidade para cada valor de índice utilizado.

Figura 62 - Cenários da modelagem da Fragilidade ambiental da Bacia do Rio do Peixe, obtidos pelo operador gama, com os respectivos graus de pertinência



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

De acordo os resultados obtidos, observou-se uma tendência na geração dos cenários, indo do menos suscetível ao mais suscetível à medida que o valor de gama aumenta. Os resultados ainda mostram que existe grande diferença nos cenários gerados entre a soma algébrica *Fuzzy* (gama 1) e o produto algébrico *Fuzzy* (gama 0,35).

No modelo gerado com gama 0,35 observa-se maior concentração de área com muito fraca fragilidade, enquanto no mapa gerado com gama 1, ocorre concentração de área na classe de maior fragilidade, como pode ser evidenciado na tabela 35.

Tabela 35 - porcentagem de cada classe de fragilidade de acordo com grau de pertinência gama

Fragilidade	Gama 0,35	Gama 0,75	Gama 0,90	Gama 1,0
1 – Muito fraca	61,81916	0,65345	0,936864	0,134922
2 – Fraca	16,14905	3,94172	6,605644	0,098874
3 – Média	11,8728	19,32535	12,46805	0,42981
4 – Forte	9,116796	22,66205	22,36337	3,174595
5 – Muito Forte	1,042189	53,07088	57,62607	96,1618

Fonte: dados da pesquisa (2021)

No modelo com pertinência 0,35 verifica-se que a maior parte da área estudada se encontra na classe Muito Fraca quando o valor gama se aproxima do zero. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de que produto algébrico recebeu maior pertinência. No produto algébrico, as multiplicações são feitas entre diversos números menores que 1, logo os valores de saída serão sempre menores ou iguais ao menor valor do membro *Fuzzy*, comprovado pelos resultados obtidos. No caso em que o valor de gama se aproxima de 1 (soma algébrica), observa-se que as classes de maior fragilidade aumentam. Na soma algébrica, o resultado será sempre um valor maior ou igual ao maior valor do membro *Fuzzy*.

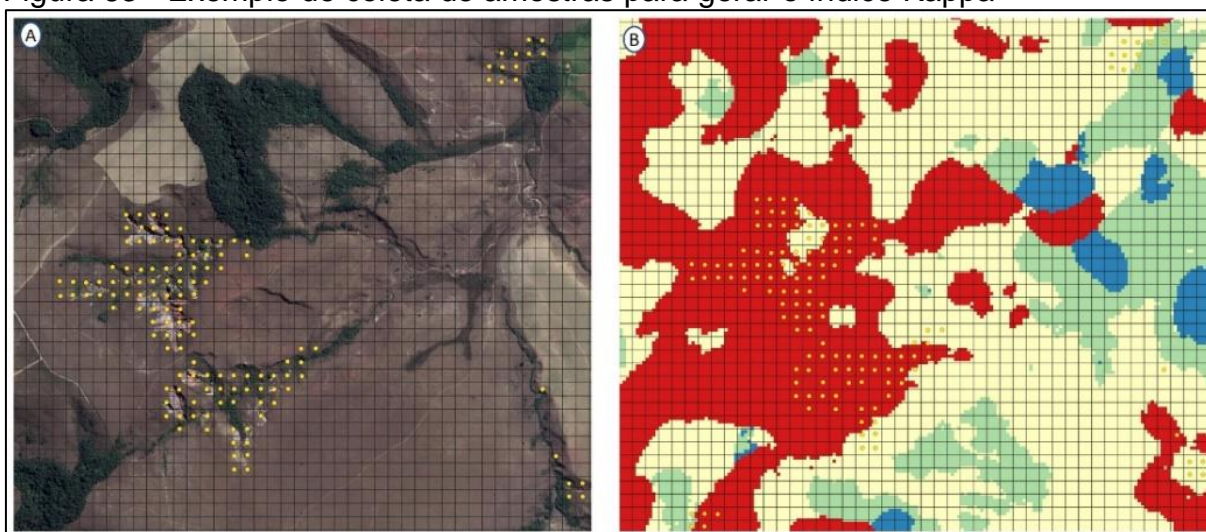
Os resultados obtidos permitiram evidenciar a versatilidade do operador gama, permitindo uma flexibilidade na modelagem da fragilidade da área estudada à degradação ambiental. O estudo ainda permitiu a comparação entre os resultados gerados pelo produto algébrico *Fuzzy* e a soma algébrica *Fuzzy*.

Os resultados obtidos confirmam que o operador foi utilizado de maneira correta, uma vez que os cenários criados acompanharam a tendência da lógica do operador gama, ou seja, o grau de restrição variava à medida que o valor do expoente gama era trocado. A criação de vários cenários a partir a aplicação de valores diferentes do expoente gama, permite atribuir pertinências diferentes a cada um dos termos envolvidos na operação, criando cenários mais ou menos suscetíveis

Os modelos 0,75 e 0,90 geraram resultados mais satisfatórios ao estudo da fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe. Para validar a acurácia, foi aplicado o índice Kappa para os quatro cenários gerados. A validação tomou como base a correspondência entre os focos erosivos identificados na imagem de satélite e sua localização em relação as classes de fragilidade. Para ter uma concordância positiva, as amostras de fragilidade deveriam estar totalmente contidas dentro de uma das classes de referências alta (4) e muito alta (5).

Para coletar as amostras de fragilidade foi sobreposta na imagem de satélite uma grade de tamanho 12,5 x 12,5, correspondendo a resolução espacial padrão utilizada no trabalho. Um ponto (identificado em amarelo na figura 63A) foi inserido no centroide de cada célula que continha uma parte expressiva do foco erosivo. Numa segunda etapa (figura 63B) os pontos foram sobrepostos nas camadas matriciais dos 4 modelos em análise, para captura da classe de fragilidade que cada ponto estava contido. Este procedimento foi realizado para toda a área da bacia hidrográfica.

Figura 63 - Exemplo de coleta de amostras para gerar o índice Kappa



Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Posteriormente com base na matriz de confusão, mostrando coincidência o não das amostras com as classes de referência, foi gerado o índice Kappa. Após a aplicação da estatística Kappa chegou-se aos valores da tabela 36.

Tabela 36 Índice Kappa para validação dos cenários de inferência fuzzy gama

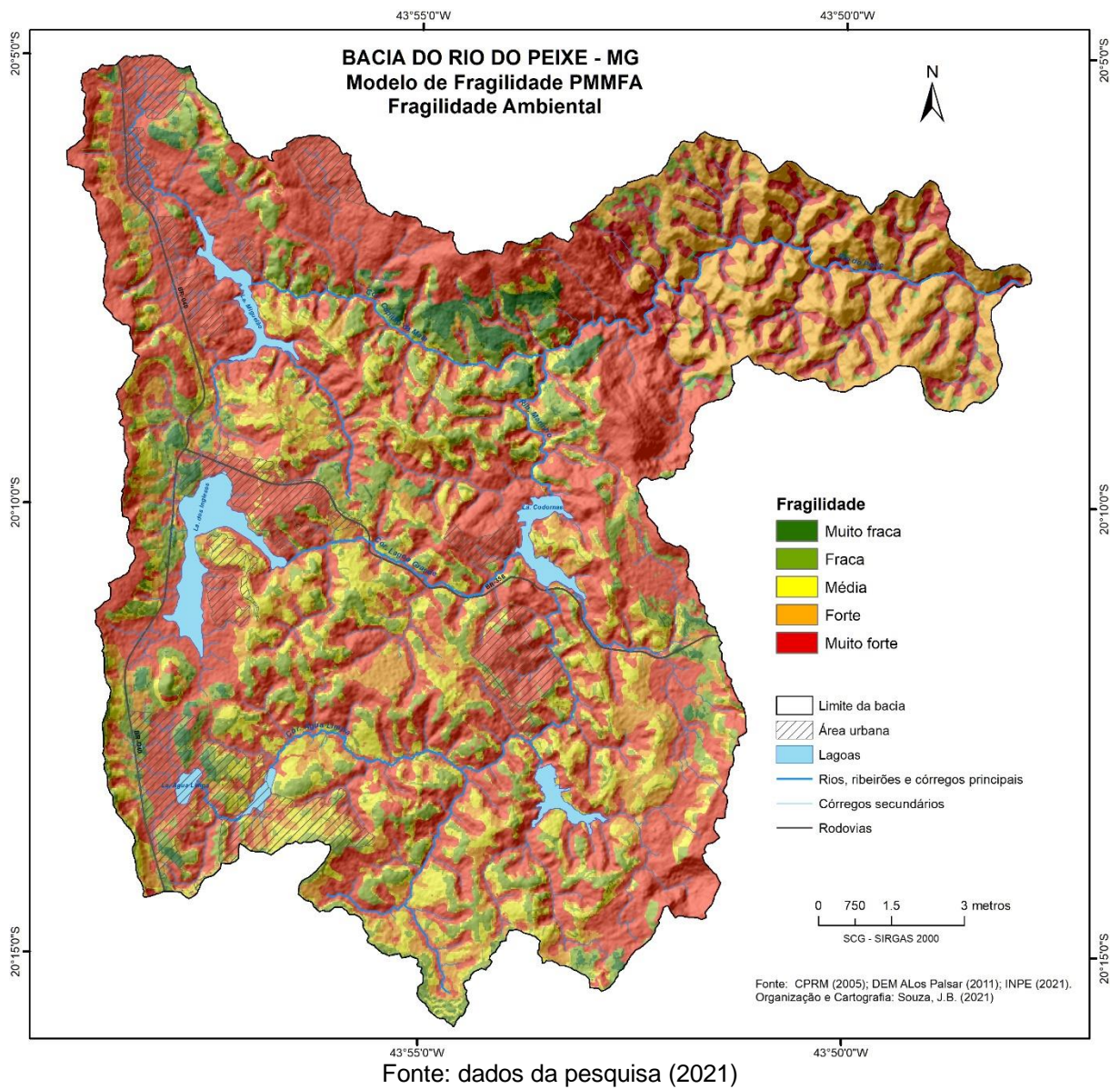
Valor gama	Variância	Kappa	Acurácia	Desempenho
Gama 0,35	0,000980	0,361251	36%	Razoável
Gama 0,75	0,000522	0,820871	82%	Excelente
Gama 0,90	0,000256	0,916116	91%	Excelente
Gama 1,0	0	1	100%	Excelente

Fonte: dados da pesquisa (2021)

O modelo gama 0,35 foi descartado por apresentar baixo desempenho ao mapeamento da fragilidade ambiental. Por sua vez, o modelo gama 1 também foi descartado, uma vez generalizou toda a área da bacia em uma classe de alta fragilidade ambiental. Diante do exposto, o modelo gama 0,90 (figura 64) será utilizado

para avaliar a proposta metodológica da tese em comparação aos modelos propostos por Ross (1994) e Crepani et al. (2001)

Figura 64 - Fragilidade ambiental da bacia do Rio do Peixe com base no método de inferência Fuzzy Gama Fuzzy (Gama 0,90)



7 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE ROSS (1994), CREPANI ET AL. (2001) COM A PROPOSTA DE MODELAGEM DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

O foco do presente capítulo é avaliar a eficácia da Proposta de Modelagem da Fragilidade Ambiental (PMMFA) por meio de uma análise comparativa com o modelo de fragilidade ambiental com base na declividade (ROSS, 1994) e com o modelo de Fragilidade com Base nas Unidades Territoriais Básicas (CREPANI et al., 2001). O modelo de Fragilidade com base na Dissecação do relevo proposto por Ross (op. cit.), não foi incluído na análise comparativa pelo motivo de apresentar somente uma classe de fragilidade ambiental. Este fato se deve ao motivo da metodologia priorizar a variável dissecação nos pesos. A bacia do Rio do peixe, de acordo com os critérios adotados foi incluída em apenas duas classes de fragilidade a dissecação: muito forte (5) e forte (2).

Os três modelos em análise estão fundamentados na abordagem sistêmica, materializada nos fundamentos metodológicos da Unidade Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977), que serviram de apoio na escolha e análise integrada das variáveis de fragilidade ambiental. Entretanto, os três modelos apresentam diferenças na operacionalização dos métodos e nas variáveis utilizadas, resultando em divergências nos resultados do mapeamento. O quadro 6 relaciona as variáveis ambientais utilizada em cada um dos modelos:

Quadro 6 - Principais variáveis (indicadores) utilizadas para modelagem da fragilidade ambiental.

Metodologias Variáveis	Classes de declividade Ross 1994	UTB,s Crepani et al. (2001)	PMMFA (proposta da tese)
Dissecação do Relevo		x	
Dissecação Fluvial			x
Forma do Relevo (curvaturas da vertente)			x
Fator topográfico – LS (Comprimento da vertente e declividade)			x
Declividade	x	x	x
Rocha		x	x
Solo	x	x	x
Cobertura vegetal e uso da terra	x	x	x
Precipitação	x	x	

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Com base quadro 6 observa-se que as variáveis declividade, solo, cobertura vegetal e uso do solo são comuns. As demais variam de acordo com a proposta metodológica adotada. Crepani et al. (2001) incorpora a variável rocha em sua análise e a declividade é analisada em conjunto com a grau de entalhamento do vale e distância interfluvial para determinar a variável geomorfologia. A proposta metodológica da tese incorpora as variáveis morfometrias dissecação fluvial (HAND), forma do terreno e fator topográfico (LS) na proposta de modelagem ambiental.

Com relação a álgebra de mapas utilizadas pelos modelos, o Modelo das UTB's utiliza valores de média aritmética para o produto. O modelo de Fragilidade apoiado na declividade define o grau de fragilidade ambiental pela hierarquização de cada uma das variáveis, tendo a declividade como variável principal. O modelo proposto na tese adota a inferência fuzzy gama, com variação do grau de pertinência dentro do intervalo definido ente 0 e 1.

Outra diferença são os valores utilizados para determinar o grau de fragilidade de cada das variáveis analisadas. O modelo UTB's classifica com valores de vulnerabilidade na escala de 1 a 3, sendo que o valor 1 se relaciona ao ambiente estável e o valor 3 ao ambiente instável. O modelo de Ross (1994) classifica o grau de fragilidade de 1 a 5. O modelo PMMFA adota a inferência fuzzy, nua escala de fragilidade variando de 0 a 1.

Com relação ao fatiamento para gerar as classes de fragilidade, no modelo da UTB,s se dá por intervalos iguais, onde os valores máximos e mínimos são divididos pelos números de classes, gerando 5 intervalos iguais. No modelo proposto por Ross a classificação dos graus de fragilidade é estabelecida por um código hierarquizado, gerado pelo agrupamento dos índices das variáveis, considerando a variável declividade como a de maior relevância, as outras variáveis, solo, cobertura vegetal e uso e ocupação da terra e pluviosidade são adicionados na sequência seguindo uma ordem hierárquica de importância. O modelo proposto utiliza a gradação normalizada no intervalo de 0 a 1, sendo o valor (0) zero indicando baixa fragilidade e o valor 1, muito alta fragilidade.

Os diferentes intervalos de classes de fragilidade adotados inviabilizam uma análise comparativa entre os três modelos. Para uma análise comparativa dos modelos de fragilidade é necessário utilizar os mesmos critérios de classificação para

avaliação. Antes de proceder a análise comparativa dos modelos, foi necessário padronizar os intervalos de classe utilizados por cada modelo, utilizando o critério das medidas separatrizes.

As separatrizes são valores que dividem a distribuição em um certo número de partes iguais como a mediana divide em 2 partes iguais, os quartis dividem em 4 partes iguais e o quintil que divide em 5 partes iguais, com o objetivo de proporcionar uma melhor ideia da dispersão do conjunto, principalmente da simetria ou assimetria da distribuição. Utilizou-se a separatriz quintil para padronizar os intervalos de classes dos modelos:

- 1º quintil; Baixa fragilidade – 20% das áreas menos frágeis
- 2º quintil: baixa fragilidade – 20%
- 3º quintil: média fragilidade – 20%
- 4º quintil: alta fragilidade – 20%
- 5º quintil: muito alta fragilidade – 20% das áreas de muito alta fragilidade

Para o modelo Ross (1994) é necessário antes de proceder a divisão das classes de fragilidade em quintil, transformar os códigos em valores ponderados que permitam seu ordenamento. Cada código indica uma importância relativa de cada variável. Na proposta de classificação apresentada por Ross (1994), a última variável pluviosidade tem peso 1, em seguida a variável cobertura vegetal, representa 5 vezes o valor da variável pluviosidade. Na sequência, a variável solo representa 25 vezes o valor da variável cobertura vegetal e a declividade, primeira variável, tem uma importância 125 vezes maior que a variável solo. Spörl (2012) propôs a seguinte equação para conversão dos códigos para pesos:

$$GF = 125 \times (c1 - 1) + 25 \times (c2 - 1) + 5(c3-1) + 1(C4 - 1)$$

Onde:

Gf = grau de fragilidade

C1= grau de fragilidade da variável índice de dissecação

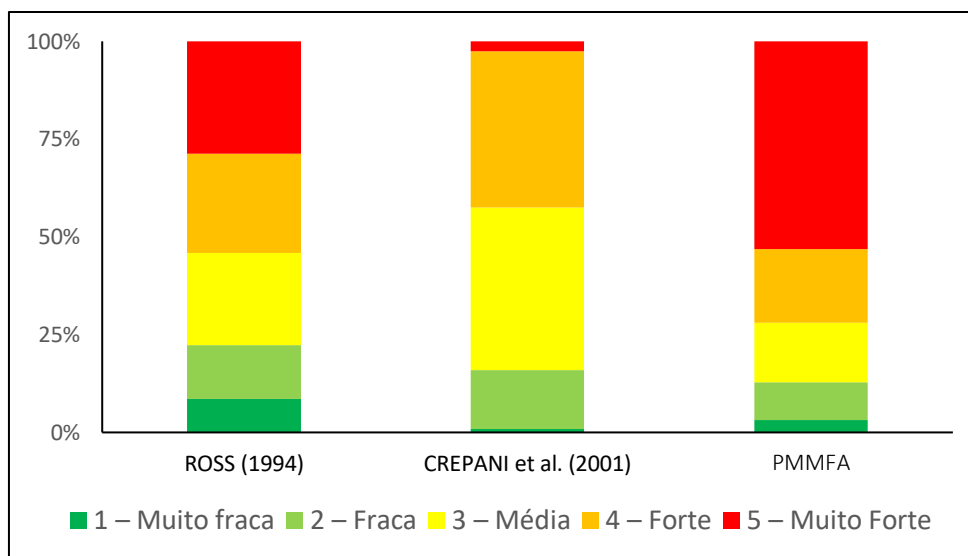
C2 – grau de variável solo

C3 = grau de fragilidade relativo ao uso do solo

C4 = grau de fragilidade relativo aos dados do clima

A separatriz quintil permitiu então comparar os intervalos de classes de fragilidade ambiental dos modelos. O gráfico 1 e a tabela 37 apresentam as porcentagens de áreas ocupadas pelos 5 graus de fragilidade, com base no método quintil.

Gráfico 1 – Porcentagens das áreas ocupadas pelos 5 graus de fragilidade, com base no método quintil.



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Tabela 37 – Porcentagens das áreas ocupadas pelos 5 graus de fragilidade, com base no método quantil.

Fragilidade	ROSS (1994)	CREPANI et al. (2001)	PMMFA
1 – Muito fraca	8,578892	0,827067	3,15874
2 – Fraca	13,75846	15,18778	9,62308
3 – Média	23,53068	41,44899	15,239
4 – Forte	25,36944	40,02581	18,8825
5 – Muito Forte	28,76252	2,510354	53,0967

Fonte: dados da pesquisa (2021)

A análise do gráfico 1 e da tabela 34, mostra uma divergência nas porcentagens dos três modelos analisados, em relação a área total da bacia. A única classe de fragilidade que se aproxima nos três modelos é a fraca, enquanto as demais apresentam significativa divergência. Segundo observações inferidas a partir do gráfico e da tabela, verifica-se que o grau de fragilidade muito forte é a classe que mais contrastante em termos de total da área classificada nas propostas metodológicas. Esta classe é categorizada em 2,5% utilizando-se o modelo de Ross (1994), 28,7% quando se aplica a proposta de Crepani et al. (2001) 53% quando se aplica o PMMFA.

A aplicação da proposta metodológica de Crepani et al. (op. cit.) resulta numa classificação em que, aproximadamente, 42% da área de estudo é considerada como grau de fragilidade médio. As outras duas propostas metodológicas apresentam valores inferiores a este para o mesmo grau de fragilidade, para o modelo de Ross (op. cit.) de 23,5 % e para o modelo PMMFA é de 9,6%.

Os modelos Ross (op. cit.) e PMMFA classificam grandes extensões de área como frágeis a muito frágeis, enquanto o modelo de Crepani et al. (op. cit.) apenas 2% são qualificadas como muito frágil. Este fato é explicado pelos procedimentos utilizados por Crepani et al. (op.cit) em aplicar a média aritmética para cada variável resultando na atenuação dos resultados, tendendo posicionar o modelo nas classes de valores medianos. Este procedimento atenua os resultados, sobretudo quando as variáveis analisadas no contexto do modelo apresentam graus de fragilidades contrastantes entre si.

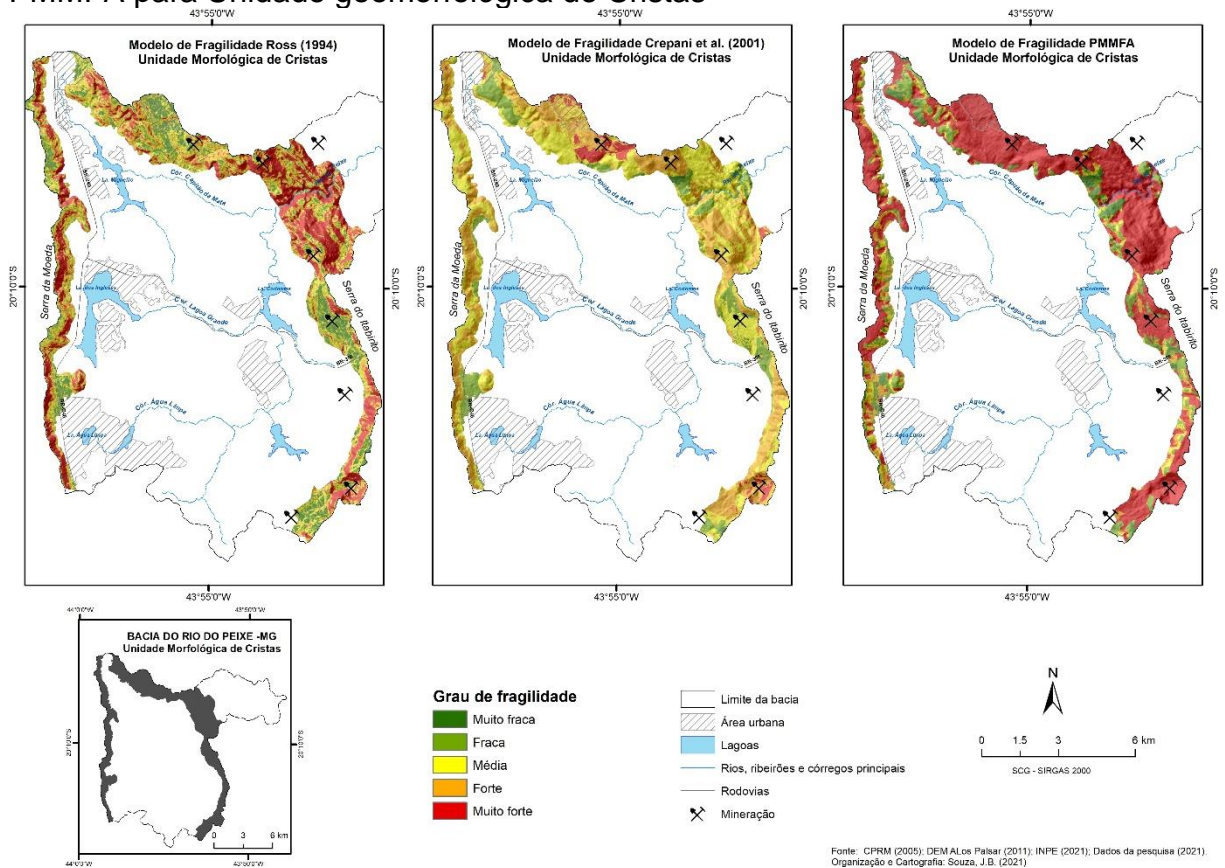
Por outro lado, o motivo para o modelo PMMFA apresentar maior porcentagem de área na classe muito forte, é explicado pela inclusão dos fundos de vales como área de muita fragilidade ambiental. O modelo de Ross (op. cit.) ao dar um maior peso a variável declividade, considera todas as áreas com declividades baixas como sendo de fraca a baixa fragilidade, reduzindo o grau de influência das outras variáveis.

Para estabelecer o porquê destas divergências é necessário analisar os mapas resultantes destes modelos empíricos. Para melhor compreensão destas divergências, optou-se por fazer as análises comparativas utilizando as unidades geomorfológicas definidas na caracterização do relevo da bacia: Cristas, Colinas e Morros Alongados

A) Unidade Geomorfológica de Cristas

A Unidade Geomorfológica de Cristas, corresponde as abas do Sinclinal Moeda, representadas pela Serra da Moeda e Serra do Itabirito. O cambissolo é o solo predominante nas encostas, e os neossolos litólicos ocupam os topos das Serras da Moeda e Itabirito. A vegetação predominante é o campo cerrado/graminoso na média e baixa vertente e o campo rupestre nos afloramentos rochosos e nas cangas lateríticas. Apresenta uma amplitude altimétrica de aproximadamente 205 metros e declividade média em torno de 25 %. A figura 65 destaca as fragilidades ambientais propostas pelos três modelos para a Unidade Geomorfológica de Cristas

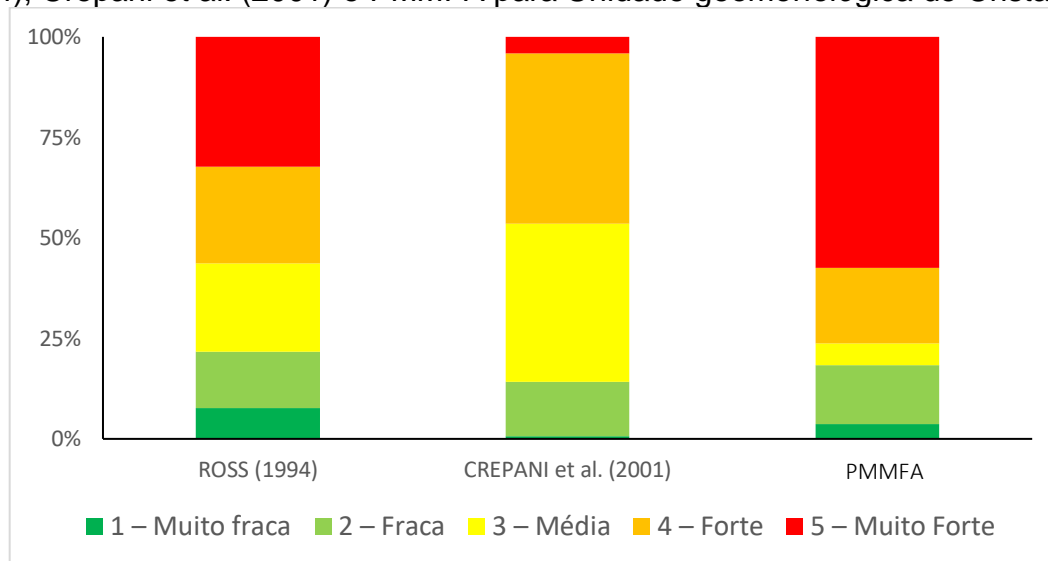
Figura 65- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Cristas



Fonte: dados da pesquisa (2021)

O modelo de Crepani et al. (2001) classifica esta unidade como de média a forte fragilidade ambiental devido, principalmente a média aritmética obtida pela alta fragilidade da variável geomorfologia, é oposição a litologia composta por itabirito e vegetação de campo cerrado/graminoso que conferem um grau de fragilidade média a fraca. Ao aplicar média aritméticas observa-se uma redução das porcentagens das áreas nas classes de muito alta e muito baixa fragilidade. Gráfico 2 e tabela 38.

Gráfico 2 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Cristas



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Tabela 38 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Cristas

Fragilidade	ROSS (1994)	CREPANI et al. (2001)	PMMFA
1 – Muito fraca	7,657496	0,697919	3,741985
2 – Fraca	14,07264	13,48003	14,54012
3 – Média	21,99169	39,42556	5,506624
4 – Forte	24,03623	42,22446	18,832144
5 – Muito Forte	32,24195	4,172029	57,37913

Fonte: dados da pesquisa (2021)

O relevo da unidade, intercalado por cristas e platôs estruturais, principalmente na Serra de Itabirito, conferem uma grande variação nos valores da declividade na unidade. Devido a estas variações, o modelo de Ross (2001) apoiado na variável declividade, distribuiu o grau de fragilidades nas classes média, forte e muito forte. Por outro lado, a grande amplitude altimétrica do relevo nesta região, em torno de 700 metros, aumenta a pertinência das variáveis dissecação vertical e fator topográfico presentes no modelo PMMFA, gerando uma classificação com predomínio de mais de 57% para a classe de grande fragilidade

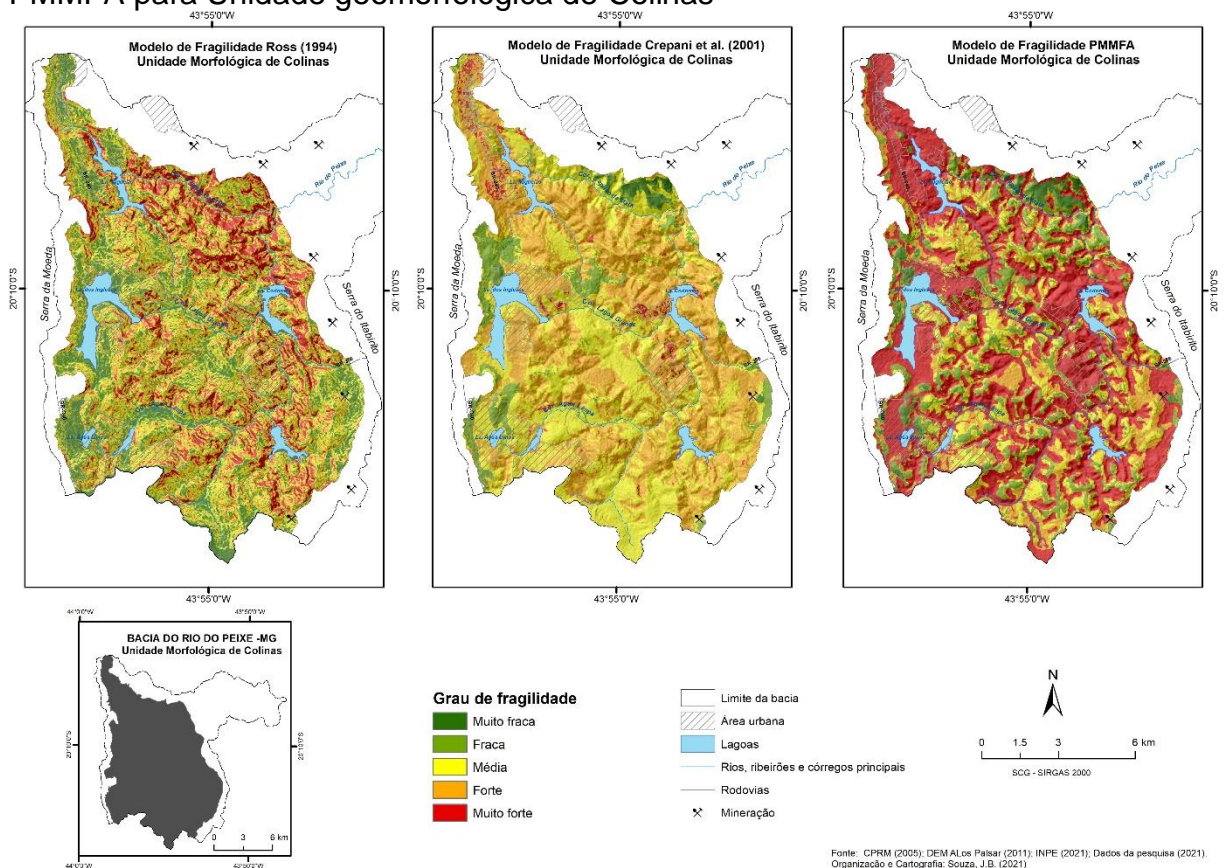
Os modelos PMMFA e Ross (1994) na variável cobertura vegetal e uso da terra, classificam as atividades minerárias presentes na unidade como muito forte fragilidade. Entretanto, na classificação geral, as áreas de atividade minerárias aparecem no modelo Ross (1994) como sendo de fraca a muito fraca, devido,

principalmente a baixa declividade apresentada nos fundos das cavas e lagoas de rejeito.

B) Unidade Geomorfológica de Colinas

Na Unidade Geomorfológica de Colinas, predominam declividade média em torno de 18 %. O relevo é de colinas amplas, com convexidade próximas ao topo e concavidade nas proximidades dos fundos de vales. A região ao sopé da unidade Serra da Moeda apresenta vertentes suaves com perfil retilíneo. A vegetação predominante é o campo cerrado/graminoso sobre cambissolo háplico. A vegetação de mata aparece nos fundos de vales, na forma de mata ciliar. A figura 66 destaca as fragilidades ambientais propostas pelos três modelos para a Unidade Geomorfológica de Colinas.

Figura 66- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Colinas



Fonte: CPRM (2005); DEM Alcos Palsar (2011); INPE (2021); Dados da pesquisa (2021).
Organização e Cartografia: Souza, J.B. (2021)

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Conforme observado no gráfico 3 e na tabela 39, o mapeamento elaborado pelo método PMMFA apresentou a predominância de áreas de maior fragilidade ambiental,

enquanto no resultado obtido por Crepani et al. (2001) privilegiou áreas de média a forte fragilidade.

Gráfico 3 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Colinas

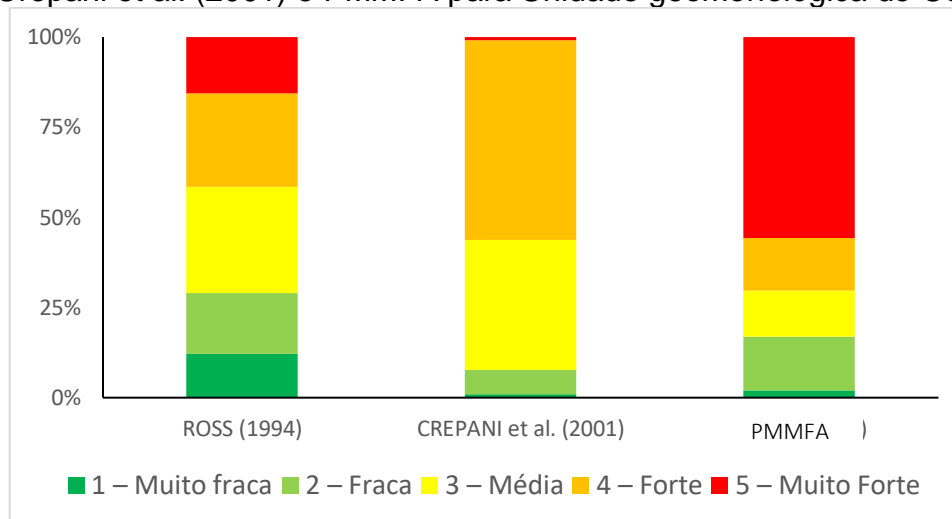


Tabela 39 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica de Colinas

Fragilidade	ROSS (1994)	CREPANI et al. (2001)	PMMFA
1 – Muito fraca	12,05938	0,907322	2,005353
2 – Fraca	16,94833	6,812852	14,94805
3 – Média	29,47182	35,96944	12,68702
4 – Forte	25,88238	55,46346	14,68415
5 – Muito Forte	15,63809	0,846925	55,67542

Fonte: dados da pesquisa (2021)

A grande variação nos valores das classes de declividade leva o modelo Ross a uma distribuição mais homogênea dos graus de fragilidade, com destaque as classes de média a forte. O modelo Crepani et al. (2001) em concordância com a média aritmética aplicada, concentra as classes de fragilidade em média a forte. Nesta unidade, os fundos de vales e as vertentes retilíneas por se tratar de áreas de baixa declividades, induzem o modelo proposto por Ross (1994) a considerar a unidade com grau de fragilidade média a forte.

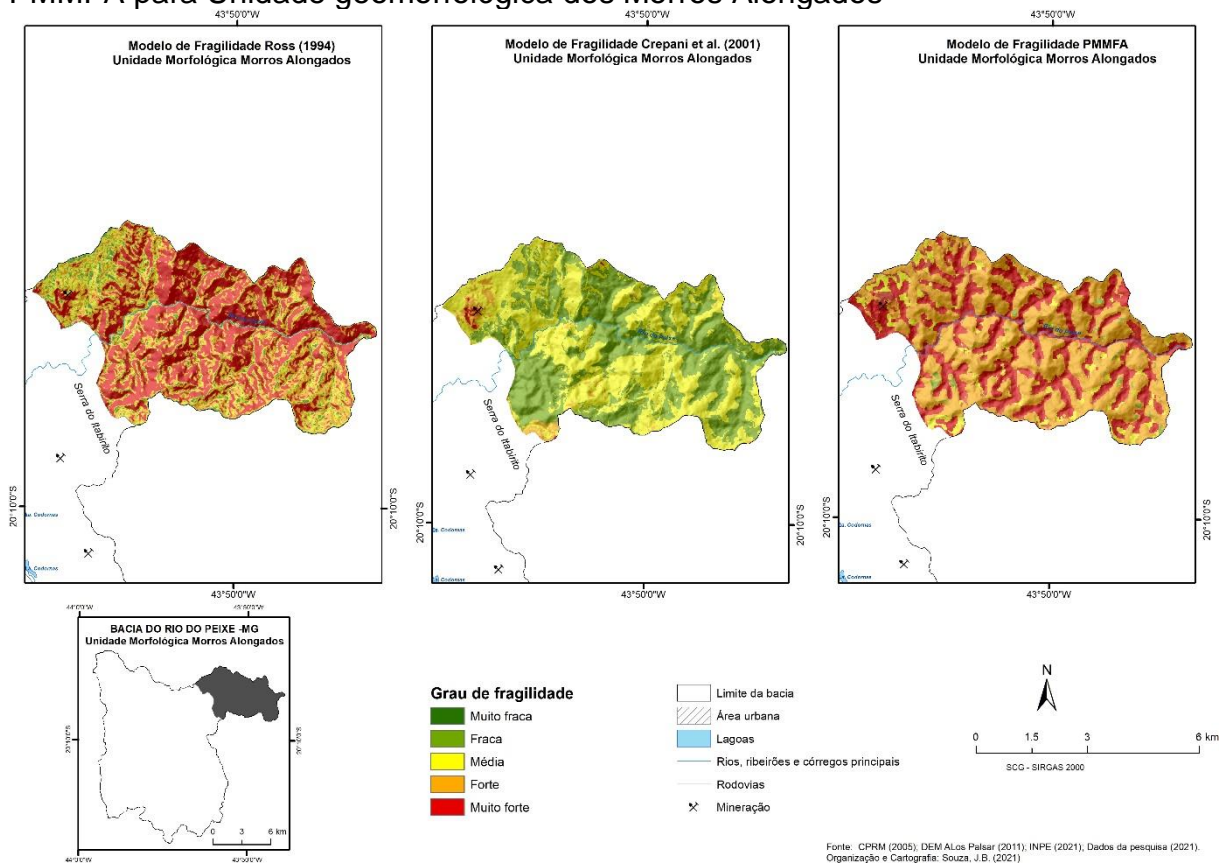
O modelo PMMFA ao contrário dos outros dois modelos, classifica a depressão no grau de alta fragilidade ambiental. Este fato é explicado pela inclusão dos fundos de vales como áreas de grande fragilidade, mas também a presença de vertentes concavas-concavas, responsáveis pela convergência do escoamento superficial. As vertentes retilíneas amplas, a presença das vertentes concavas na média e baixa

vertente, associadas a presença de cambissolo, explicam a concentração das voçorocas nesta unidade de relevo.

C) Unidade Geomorfológica Morros alongados

A unidade Geomorfológica é representada por morros alongados com topos convexos e vales encaixados, ainda recobertos em grande parte por matas na média e baixa vertente e campos cerrados nos topos, cobrindo cambissolos e neossolos litólicos de grande fragilidade. A declividade média está em torno de 26 %. A figura 67 destaca as fragilidades ambientais propostas pelos três modelos para a Unidade Geomorfológica dos Morros alongados.

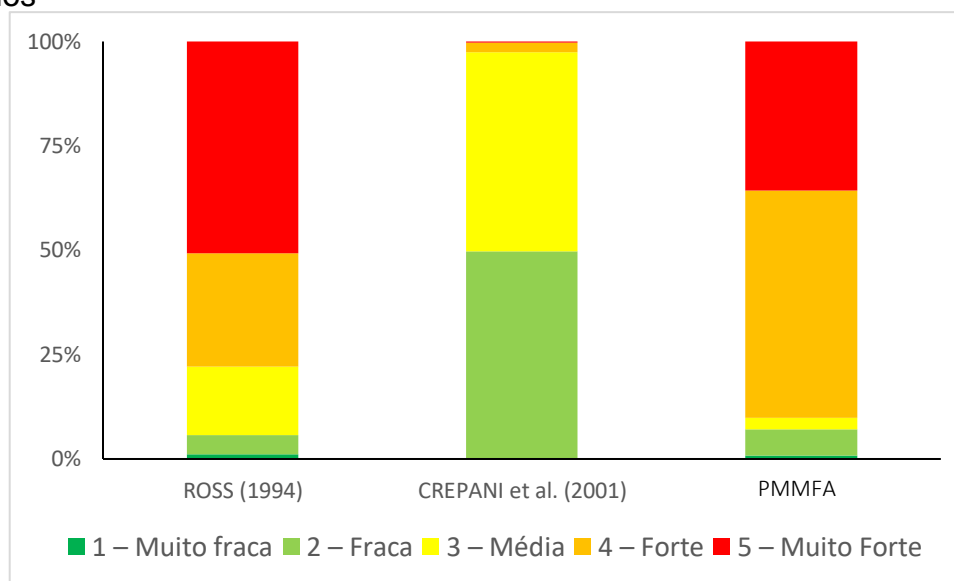
Figura 67- Fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Fonte: CPRM (2005), DEM ALos Palsar (2011), INPE (2021), Dados da pesquisa (2021).
Organização e Cartografia: Souza, J.B. (2021)

Gráfico 4 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados



Fonte: dados da pesquisa (2021)

Tabela 40 – Porcentagens dos graus de fragilidades ambientais propostas por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e PMMFA para Unidade geomorfológica dos Morros Alongados

Fragilidade	ROSS (1994)	CREPANI et al. (2001)	PMMFA
1 – Muito fraca	1,180387	0	0,813012
2 – Fraca	4,535982	49,71222	6,24895
3 – Média	16,43959	47,69529	2,79839
4 – Forte	27,14147	2,343905	54,421208
5 – Muito Forte	50,70258	0,248581	35,71843

Fonte: dados da pesquisa (2021)

A presença da vegetação de mata e predomínio dos itabiritos e quartzitos conferem um grau de fragilidade baixa a unidade. Entretanto, o alto grau de dissecação do relevo confere grau de fragilidade muito alto. Ao aplicar o modelo Crepani, a unidade passa a apresentar um grau de média a baixa fragilidade, o que não confere com a realidade. A variável declividade, em contrapartida insere a unidade na classe de alta fragilidade no modelo Ross.

O modelo PMMFA deixa evidente que todas as variáveis participam da fragilidade ambiental. Se por um lado o grau de proteção da vegetação, o predomínio de vertentes dispersoras de água e a resistência da rocha conferem a unidade um grau de fragilidade média a forte, por outro, a inclusão dos fundos de vale como área de muito forte fragilidade.

7.1 - Validação do Modelo proposto

Fragilidade ambiental é uma medida da sensibilidade intrínseca dos ecossistemas às pressões ambientais, associadas também a quaisquer ameaças que sejam capazes de perturbar o equilíbrio de um sistema. Os sistemas ambientais podem responder de diferentes maneiras às intervenções humanas nos componentes da paisagem, como relevo, solo, clima, e cobertura vegetal. Mapear a fragilidade ambiental permite definir áreas mais frágeis e que merecem maior atenção, pois sua má utilização pode resultar no comprometimento de todo sistema. (VALLE, 2016)

A análise comparativa dos três modelos, associadas a análises empírica no campo demonstram que a inclusão de variáveis morfométricas como forma do terreno, dissecação vertical e fator topográfico, aproximam o modelo de fragilidade proposta por PMMFA de forma mais coerente com as características de fragilidade encontradas na bacia, principalmente na unidade de colinas.

Em especial neste compartimento, o modelo PMMFA foi mais assertivo que os demais analisados. Foi aplicado o índice kappa nos três modelos, considerando a região corte para presença de ravinas e voçorocas, as classes 4 e 5 de graus de fragilidade. O fatiamento das classes utilizadas para os três modelos, no cálculo do Índice Kappa foi a de medida separatriz quintil (tabela 41).

O modelo Crepani et al. (2001) apresentou um desempenho razoável. Já os modelos Ross (1994) e PMMFA apresentaram um desempenho excelente, com um ganho maior ao modelo PMMFA.

Tabela 41 – Índice Kappa para validação dos modelos de fragilidades

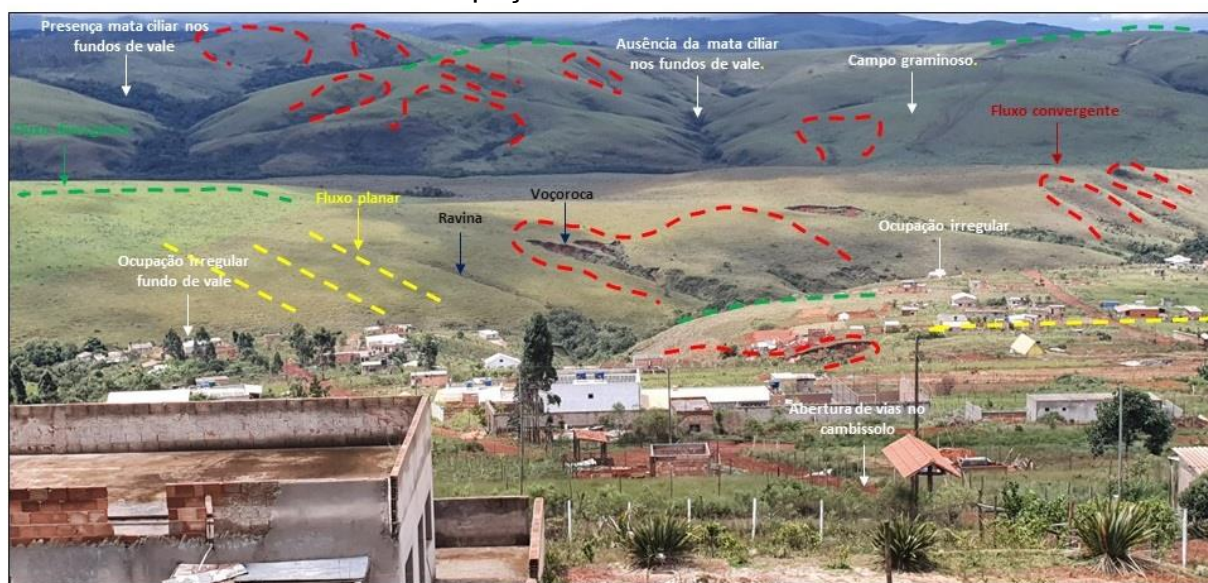
Modelos	Kappa	Acurácia	Desempenho
Crepani et al. (2001)	0,51432	51%	Razoável
Ross (1994)	0,820871	82%	Excelente
PMMFA	0,899321	89%	Excelente

Fonte: dados da pesquisa

De forma empírica, foram realizados levantamentos de campo com o propósito de verificar in loco as características e atributos físicos e antrópicos para validação das classes de fragilidade mapeadas pelo modelo PMMFA. O fato do modelo apresentar os maiores valores de fragilidade entre as metodologias analisadas, só corrobora com a realidade encontrada em campo, estando os resultados encontrados em consonância com as variáveis morfométricas utilizadas.

A Unidade Geomorfológica de Colinas representou as áreas mais propensas à ocorrência de processos erosivos aparentes como ravinas e voçorocas. As variáveis morfométricas consideradas foram sensíveis às características naturais desta unidade. Localizaram-se geralmente em áreas identificadas como de fragilidade alta e muito alta nos produtos cartográficos finais. As variáveis morfométricas permitiram identificar as porções das vertentes com maior propensão a concentração do escoamento superficial que em associação com fragilidade do cambissolo háplico presente, tornam a unidade naturalmente susceptível aos processos erosivos oriundos do escoamento superficial. É importante salientar que mesmo áreas com baixa declividade, em função do comprimento e da forma da vertente, aumentam a propensão dos processos erosivos sobre os cambissolos, como observado na foto 19.

Foto 19 – Unidade Morfológica de Colinas: Tipos de fluxos nas vertentes, processos erosivos e cobertura e uso e ocupação da terra



Fonte: acervo pessoal (2021)

Estas áreas de relevo suave ondulado a ondulado, apresentam severas restrições de uso devendo ter uma atenção especial do poder público, o que não é verificado nas áreas ocupadas do bairro Água Limpa. A ocupação do Bairro de Água Limpa, completamente desprovida de qualquer tipo de infraestrutura urbana, não havendo pavimentação, tampouco saneamento básico, demonstram a influência que a forma de uso e ocupação da terra exerce sobre a estabilidade do terreno.

Os planos diretores municipais de Nova Lima e Itabirito consideram as imediações do bairro Água Limpa como zona destinada a expansão urbana. Entretanto, os resultados obtidos pelo modelo indicam a necessidade de cautela no processo de ocupação da região em questão (foto 20).

Foto 20 - Abertura de vias em loteamento, próximo a bairro Água Limpa, sem infraestrutura urbana, nas cabeceiras de drenagem do Rio do Peixe.



Fonte: acervo pessoal (2021)

Devido ao fato da área ainda não estar totalmente ocupada, é possível, ainda, preservar os recursos naturais ali presentes, principalmente os recursos hídricos e os campos cerrado/graminosos, e proteger a permeabilidade do solo, garantindo sua importante função como área de recarga das nascentes do Rio de Peixe

Dentre as áreas que apresentam risco médio de degradação física, merece destaque aquelas localizadas próximo ao bairro Alphaville Lagoa dos Ingleses. Embora dotada de infraestrutura urbana, essas áreas apresentam risco potencial de degradação. Encontram-se, portanto, num estágio de fragilidade que qualquer intervenção que venha alterar seu equilíbrio dinâmico poderá resultar em degradação dos solos com sérias consequências sobre os recursos hídricos da região. A fragilidade dos solos nessas áreas pôde ser atestada em campo com o registro de feições erosivas em diferentes estágios de desenvolvimento. A foto 21 apresenta uma ravina originada após abertura de vias de acesso de novo empreendimento imobiliário na região.

Foto 21 – Em primeiro plano ravina originada após abertura de vias de acesso de novo empreendimento imobiliário na região.



Fonte: acervo pessoal (2021)

Outra região que merece destaque no mapeamento é a região da Unidade de Morros alongados. O modelo de fragilidade classifica a região como de muita forte fragilidade. O mapeamento final considerou como forte fragilidade ambiental, destacando o papel da cobertura vegetal para estabilidade no ambiente. As condições limitantes a ocupação humana favorece a manutenção da cobertura florestal nessa área, o que minimiza o risco à erosão relacionada aos fatores naturais na bacia em estudo.

Dessa forma, o presente estudo, propõe considerar a unidade como área prioritária para preservação e conservação ambiental, de grande susceptibilidade natural à erosão, vinculadas ao grau de dissecação dos vales e aos solos pouco desenvolvidos.

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebeu-se nas metodologias de Ross (1994) que a declividade exerce uma grande importância para a classificação da fragilidade, enquanto em Crepani et al. (2001) por ponderar precipitação e geologia com o mesmo peso das variáveis de solo, uso do solo e geomorfologia, o produto final resulta em valores de médias fragilidades, não condizendo com realidade observada nos levantamentos de campo realizados na bacia do Rio do Peixe. O modelo proposto nesta tese (PMMFA) mostrou-se eficiente na identificação de áreas sujeitas à instalação de processos erosivos lineares, com destaque para a Unidade Geomorfológica de Colinas.

Considerando-se as análises comparativas feitas entre os modelos de fragilidade, é possível observar que, ao incorporar as variáveis forma de terreno (curvaturas das vertentes), a dissecação vertical das vertentes e fator topográfico (LS) as classes de maior fragilidade ambiental, apresentaram melhor espacialização. Tal conclusão pode ser atestada pelos levantamentos de campo realizados no local e pelo Índice Kappa.

Em relação ao Índice Kappa, foi possível observar que a correlação feita com o modelo proposto por Crepani et al. (2001) O modelo Crepani et al. (2001) apresentou um desempenho razoável. Já os modelos Ross (1994) e PMMFA apresentaram um desempenho excelente, com um ganho maior ao modelo PMMFA.

A modelagem também demonstrou que a cobertura pedológica constituída por solos pouco coesos permite uma fácil remoção das partículas por escoamento das águas superficiais. O cambissolo distrófico háplico, está ligada áreas favoráveis à concentração de fluxos de água por escoamento superficial, nem sempre associados a terrenos de alta declividade.

Ficou evidente ainda, que as áreas de declividades suave ondulada a onduladas podem apresentar grande fragilidade erosiva, quando se associa comprimento da vertente, forma da vertente e uso da terra que não atenta para estas características de fragilidade natural do ambiente. Estas áreas devem ser priorizadas na atenção dos gestores municipais.

Ressalta-se que o modelo HAND utilizado para determinar a dissecação fluvial, possui uma vantagem em relação aos métodos convencionais que utilizam o valor médio da distância entre o interflúvio e fundo de vale para determinar o grau de entalhamento fluvial. O método HAND, ao considerar a amplitude altimétrica de cada

pixel sempre em relação ao nível de base local mais próximo, possibilita identificar as rugosidades presentes vertente, que de certa forma interferem escoamento superficial. Em específico neste estudo, o modelo HAND permitiu incorporar os fundos de vales como áreas de muito forte fragilidade ambiental.

Observou-se que a metodologia de mapeamento de fragilidade ambiental proposta nesta tese, quando aplicada à especificidade local da bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, poderia induzir aparentemente a um impedimento da utilização efetiva do espaço, na medida que concentra a área da bacia hidrográfica dentro do intervalo das classes de fragilidade ambiental forte e muito forte. O modelo retrata a realidade da fragilidade ambiental da região, apresentada pelas variáveis utilizadas no mapeamento e validadas em campo. Ademais, nem sempre uma intervenção humana no meio é sinônimo de aumento da degradação ambiental, desde que as práticas de intervenção empregadas estejam em acordo com as potencialidades e fragilidades apresentadas pelo ambiente.

Uma vantagem de se utilizar a lógica de inferência *fuzzy* é a possibilidade de criar e estudar cenários durante a modelagem, não ficando condicionado a um único peso ou a falta de peso. Por sua vez, a proposta metodológica não demanda muitos recursos, as bases digitais para elaboração das variáveis morfométricas (escala compatível com 1:50.000 a 1:25.000) podem ser adquiridas gratuitamente na internet, podendo ser manipulados facilmente em softwares de proprietário e softwares livres.

Os resultados apresentados mostram o quão complexa é a modelagem dos sistemas ambientais. O processo de modelagem ambiental é um grande desafio, pois implica compreender de forma qualitativa e quantitativa a relação entre as variáveis ambientais e a dinâmica que envolvem os componentes físicos, bióticos e socioeconômicos. Nesta perspectiva, deve-se ressaltar que não se propôs aqui um modelo inovador de mapeamento da fragilidade, mas apresentar uma contribuição com a inserção de novas variáveis ambientais para modelagem da fragilidade dos sistemas ambientais.

É importante destacar que estudos voltados para essa temática apresentam uma grande relevância social, pois constituem em um importante instrumento no subsídio à tomada de decisões no que tange a intervenções na paisagem, gestão ambiental e planejamento territorial, como para a elaboração de contenção de

processos erosivos, principalmente por prefeituras municipais e organizações da sociedade civil.

Diante do exposto, considera-se que a pesquisa atingiu seus objetivos ao promover um novo método para mapeamento da fragilidade ambiental de bacia hidrográficas ao incorporar as variáveis morfometrias citadas na modelagem e utilização de técnicas operacionais em SIG, como a inferência fuzzy.

Deve-se ressaltar que, há necessidade de mais aplicações desta metodologia, para que se avalie o grau de sensibilidade e suas restrições em outros ambientes. Pode-se afirmar que a metodologia foi eficiente para a realidade ambiental da bacia do Rio do Peixe, havendo a possibilidade de sua utilização em outras áreas. Espera-se que aplicações futuras da metodologia em bacias hidrográficas com características ambientais diferentes das encontradas na bacia do Rio do Peixe possam testar sua consistência e inspirar possíveis melhorias.

REFERENCIAS

. Acesso em: 25 de nov. 2019.

AB'SÁBER, A. N. **Um conceito de geomorfologia à serviço das pesquisas sobre o Quaternário**. Geomorfologia. São Paulo, v. 18, 1969.

ABREU, A. A. **A Teoria geomorfológica e sua edificação: análise crítica**. Revista Brasileira de Geomorfologia. n. 2, (51-57), 2003

ALKMIM, F. F. & MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, n.90, p.29-58, 1998.

ARGENTO. M. S. Mapeamento Geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.p. 365-392

ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa, WDL Publications, 1989. 295 p.

ARONOFF, S. **Geographical Information Systems: A Management Perspective**. Ottawa, WDI Publications, 1989.

ATTANASIO, C. M. Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade. 2004. 193p. **Tese** (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004

BARBOSA, G. V. & RODRIGUES, D. M. S. O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. **Boletim Mineiro de Geografia**, Belo Horizonte, n.10/11, p. 3-35, 1965.

BARBOSA, G. V. & RODRIGUES, D. M. S. **Quadrilátero Ferrífero** Belo Horizonte: UFMG, IGC, 130p., 1967.

BARBOSA, G. V.; Silva, T. C. da; Natali Filho, T; DEL'ARCO, D. M.; COSTA, R. C. R. da. Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do Projeto Radambrasil. **Boletim Técnico, Série Geomorfologia**. Salvador n. 1, p. 187, out. 1984.

BARBOSA, J.J; PEREIRA, T.M.; OLIVEIRA, F.L.P de. Uma proposta para identificação de outliers multivariados. *Ciência e Natura*, v.40, 2018.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. Detalhamento da Metodologia para Execução do Zoneamento Ecológico- Econômico pelos Estados da Amazônia Legal. Brasília. SAE Secretaria de Assuntos Estratégicos/ MMA - Ministério do Meio Ambiente. 1997.

BENEVIDES, R. B. G. Vida, Auto-organização e teleologia em Immanuel Kant e Francisco Varela. **PERI** • Florianópolis/SC, Brasil • v.12 n.01, 2020 • p.263-281

BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1973.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. (5. ed.) Ícone, São Paulo, 2005.

- BERTONI, J. E LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo, Ed. Ícone. 1985.
- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física global: esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**. n.13. São Paulo, 1971. 27p.
- BERTRAND, G.; BERTRAND, C.. **Uma geografia transversal e de travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades**. Maringá: Massoni, 2007. 332 p.
- BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v3. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, D.B.; PASSOS, E. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. v. 2.
- BOERNER, Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts. In: **Principles & Applications of Imaging Radar**, Manual of R.S, A.S.P.R.S, Cap. 5, pp: 271-357, 1998
- BOORSTIN, D. J. **Os Descobridores**: de como o Homem começou a conhecer-se a si mesmo e ao mundo. Lisboa: Gradiva, 1983. 646p.
- BOTELHO, R. G. M; SILVA, A. S. da; VITTE, A. C. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. Cap. 6, 2004 In: VITTE, Antonio Carlos e GUERRA, Antonio José Teixeira (org.). **Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.
- BRANCO, S. M. **Ecosistêmica: uma abordagem integrada dos problemas do meio ambiente**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 143p.
- BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographic Information Systems**. Oxford: Oxford University, 352 p., 1998.
- CALIJURI, M. L. Treinamento em Sistemas de Informações Geográficas. Núcleo SIGEO. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 156p, 2000.
- CÂMARA, C.; MOREIRA, F.R.; BARBOSA FILHO, C. R.A.; BÖNISCH,S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, M.V.M. (Coords.), **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, p. 241-288, 2001.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; Campos, INPE, 2004. Disponível em:
<<http://www.dpi.inpe.br/ilberto/livro/introd/index.html>>. Acesso em: 07 out. 2019.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Tendências de Evolução do Geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. (Org.) **Sistemas de Informações Geográficas**. (2 ed.) Brasília: Embrapa,. Cap. XX, p. 411-424. 2003
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. Representações Computacionais do Espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da informação. **Geografia**, Rio Claro, v.28, n. 1, p. 83-96, 2003.
- CAPRA, F. **As conexões ocultas: ciência para uma vida sustentável**. São Paulo: Cultrix, 2005.

- CAPRA, F. EICHEMBERG, N. R.. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 2006.
- CASSETI, V. **Elementos da geomorfologia**. São Paulo: Contexto, 2003.
- CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. 2ª ed. São Paulo: Contexto, 1995.
- CASSETI, V. **Cartografia Geomorfológica**. Disponível em: http://www.observatoriogeogoiias.com.br/observatoriogeogoiias/artigos_pdf/CASSETI,%20Valter.pdf. Acesso em 20/11/2020.
- CASTRO, J. F. M. Análise comparativa entre informações morfométricas obtidas por métodos convencionais e por métodos digitais. **Geografia**, Rio Claro, SP, v.20, n.2, p.115-133, 1995.
- CASTRO, J. F. M. Aplicação de um sistema de informação geográfica na temática da morfodinâmica: o exemplo do estudo da Bacia do Rio Mogi - Cubatão/SP. **Dissertação** (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- CASTRO, J. F. M.; VIADANA, A. G. A relevância da cartografia nos estudos de bacias hidrográficas: o exemplo da Bacia do Rio Corumbataí. **Geografia**, Rio Claro, SP, v.27, n.3, p.157-169, 2002.
- CESAR, A. L. Estudo de bacias hidrográficas através de parâmetros morfométricos de análise areal. 1977. **Dissertação** (Mestrado em Geografia). São Paulo, 1977.
- CHAGAS, C. da S., FERNANDES FILHO, E. I. BHERING, S. B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 25 n. 1, p. 147-162, 2013.
- CHAGAS, C. da S., FONTANA, A., CARVALHO JUNIOR, W. de, CAIRES, S. M. de. Atributos topográficos na diferenciação de argissolos. **Revista Brasileira de Ciências do solo**. Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1441-1453, 2013.
- CHORLEY, R. J. A Geomorfologia e a Teoria dos Sistemas Gerais. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 11, n. 21, p. 3-22, jun. 1971.
- CHORLEY, R. J. HAGGET, P. **Modelos físicos e de informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1975. 260p.
- CHORLEY, R. J. **Spatial analysis in Geomorphology**. London: Harper & Row, 1972. 393p.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical Geography: a systems approach**. London: Prentice Hall, 1971
- CHRISTOFOLETTI, A. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 21, n. 42, p. 3-22, dez. 1981.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec-Edusp, 1979. 106p.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise hipsométrica de bacias de drenagem. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 10, n. 9, p. 68-76, jun. 1970.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG). **Tese de Livre Docência**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1970.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 9, n. 18. 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. L. H. Sistemas dinâmicos: A abordagem da Teoria do Caos e da geometria fractal em Geografia. In: VITTE, A. C. e GUERRA, A. J. T. (org.) **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2004.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Büchler, 1999.236p.

CHRISTOFOLETTI, A. O Desenvolvimento Teórico Analítico em Geomorfologia: do ciclo da erosão aos sistemas dissipativos. **Geografia**. Vol. 14, nº 18. Rio Claro, 1989

CHRISTOFOLETTI, A. Significância da Teoria de Sistemas em Geografia Física. **Boletim de Geografia Teórica**, Rio Claro, v. 16-17, n. 31-34, 1987.

CHRISTOFOLETTI, A.; OKA-FIORI, C. O Uso da densidade de rios como elemento para caracterizar as formações superficiais. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 20, n. 39, p. 73- 85, dez. 1980.

CHRISTOFOLETTI, A.; PEREZ FILHO, A. Estudos sobre as formas de bacias hidrográficas. **Boletim de Geografia Teórica**, Rio Claro, v. 3, n. 9-10, p. 83-92, 1975.

CHRISTOFOLETTI, A.; TAVARES, A. C. Análise de vertentes: caracterização e correlação de atributos do sistema. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 17, n. 34, p. 65-83, dez. 1977.

COHEN, J. A Coeficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Measurment**. Vol XX, No 1, p. 37-46, 1960

CONTI, J. B. Resgatando a “fisiologia da paisagem”. **Revista do Departamento de Geografia**. FFCLH. n. 14. São Paulo, 2001.

CORDEIRO, J. P.; AMARAL, S.; FREITAS, U.M.; CÂMARA, G. “Álgebra de geo-campos e suas aplicações”. In: VIII **Simpósio** Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador. 14-19 de abril. 1996.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE. 124p, 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G. DUARTE, V. AZEVEDO, L. G.. “Uso de sensoriamento remoto no zoneamento ecológicoeconômico”. In: VIII **Simpósio** Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Salvador. 14-19 de abril. 1996.

CROSTA, A.P. 1. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas – SP: IG /UNICAMP. 170p. 1992

DEMEK, J. Generalization of geomorphological maps. In: **Progress Made in Geomorphological Mapping**. Brno, 35-66, 1967.

DEMEK, J. **Manual of detailed geomorphological mapping**. Praga: Academy of Sciences.1972. 343p.

- DIAS NUNES, E. Modelagem de Processos Erosivos Hídricos Lineares no Município de Mineiros – GO. **Tese Doutorado**, 242p. 2015
- DORR J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM. *Professional Paper 641-A*. 110p.
- DORR J. V. N. II., GAIR J. E., POMERENE J. B., RYNEARSON G. A. 1957. *Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. **Avulso**. 81. 36p.
- DREW, D. **Processo Interativos Homem-Meio Ambiente**. Editora Bertrand Brasil, 2ª ed., Rio de Janeiro, 1989
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/> Acessado em 12 out. 2018
- EASTMAN, R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K.; TOLEDANO, J. Rasters procedures for multicriteria/ multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.
- FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 27, n. 5, p. 709-717, 1991. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0026359853&partnerID=40&md5=fddb4cb3381eb61254cae9815667029a>>.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **REVIEWS OF GEOPHYSICS**, 2007.
- FLORENZANO, T. G (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318 p.
- FLORENZANO, T. G. Unidades geomorfológicas na região sudeste (SP) identificadas por imagens satélite. **Dissertação** (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, 1993.168p
- FUJIARA, A.K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo do oeste paulista com suporte de geoprocessamento**. 2002. Dissertação (mestrado em ciências florestais). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.
- GANDOLFI, N. Bacia do Mogi-Guaçu: morfometria da drenagem, sedimentologia e investigações físico-químicas. 1968. 123p. **Tese** (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, USP, São Carlos, 1968.
- GIOMETTI, A. L. B. R.; GARCIA, G. J. Análise Morfométrica e Hidrográfica da Bacia do Rio Jacaré Pepira (SP). **Geografia**. Rio Claro, v. 19, n 2, 1999.
- GIRALDO, J. P. S. Índices e indicadores para evaluación y seguimiento ambiental. Universidad de Caldas. Disponível em: <<http://usuarios.lycos.es/JuanP/impac.htm>> . Acesso em: 03 dez. 2020.
- GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1992. 367p.
- GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. (Orgs) 2º Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.

- GUERRA, A. T.; MENDONÇA, J. K. S. **Erosão dos solos e Questão ambiental. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.
- GUTIÉRREZ-ESPELETA, E. E. **Designing environmental indicators for decision makers.** International Statistical Institute. 1998. Disponível em: . Acessado em: 14 maio 2019.
- HAGGET, P. **Geography: a modern synthesis.** New York: Harper & Row, Publishers, 1979. 627p.
- HOWARD, A. D. Equilíbrio e dinâmica dos sistemas geomorfológicos. **Notícia Geomorfológica.** 13(26). Campinas, 1973
- IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Geomorfologia (Coord. Bernardo de Almeida Nunes et al.). **Série Manuais Técnicos em Geociências.** Número 5, Rio de Janeiro, 1995.
- INPE, Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> . Acessado em: agosto 2016.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres;** tradução José Carlos Neves Epiphânio (coordenador). São Jose dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres** / John R. Jensen; tradução: José Carlos Neves Epiphânio (coord.) et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- JONES, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 9, p. 1051-1060, 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300402000225>>. .
- KASPER, Hu. O Processo de Pensamento Sistêmico: Um Estudo das Principais Abordagens a partir de um Quadro de Referência Proposto. **Dissertação** de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2000.
- KATINSKY, M. (1994) Fuzzy set modelling in Geographical Information Systems. **MSc Thesis**, University of Wisconsin-Madsin, USA.
- KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia.** 18(2), 1956
- KING, L. C. **A The morphology of the earth.** Oliver & Boyd. Edinburgh, 1962. 599p.
- KOHAGURA, Tiago. **Lógica fuzzy e suas aplicações.** 2007. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina; Londrina.
- LADEIRA E. A.. *Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.* University of Western Ontario, Canadá, Ontario, PhD. **Thesis**, 272p. 1980
- LADEIRA, W.G. Caracterização dos quartzitos da Formação Taboões, presentes na área da mina da ERG Mineração, São Joaquim de Bicas, MG, para usos industriais. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal de Minas Gerais, 121p. 2014
- LAM, N. S. N.; DE COLA, L. **Fractals in Geography.** New York: Pentice Hall, 1993.

- LANDIS, J. R. KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977; 33: 159-74.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p.159-174, 1977.
- LIBAULT, A. **Os quatro níveis da pesquisa geográfica**. Métodos em Questão, Instituto de Geografia (USP), São Paulo, n. 1, 1971, p. 1-14.
- LILLESAND, T. M., Kiefer, R. W. e CHIPMAN, J.W. (2003). **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 704 pp.
- LIMA, W. P.; ZAKIA M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006.908 p.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora UNIDERP, 2007. v. 1. 908 p.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Revista de Ciências Agrônômicas**, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992.
- LOOIJEN. R. C. Holism and reductionism in biology and ecology. The mutual dependence of the higher and lower level research programmes. **Tese Doutorado**, Rijksuniversiteit Groningen. 1998.
- MACHADO, L. M. C. P. A estruturação hortoniana de bacias hidrográficas do planalto paulistano e das escarpas da Serra do Mar, SP. 1979. **Dissertação** (Mestrado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, 1979.
- MANDELROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco: W. H. Freeman, 1982.
- MATTOS, S. H. V. L. Avaliação da qualidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego do Piçarrão (Campinas-SP). 2005. 96f. **Dissertação (Mestrado)** – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- MEDEIROS, J. S. **Introdução a Ciência da Geoinformação**, (ed.) São José dos
- MELO, J. J. SPIA – **Sistema pericial para aplicação e análise de índices ambientais**. Lisboa: [s.n.], 1996.
- MENDONÇA, F. A. Dualidade e dicotomia da geografia moderna: A especificidade científica e o debate recente no âmbito da geografia brasileira. **RA'É GA – O espaço geográfico em análise**, n. 2, ano II, 1998, p. 153-166.
- MENDONÇA, F. A. **Geografia e meio ambiente**. São Paulo: Contexto, 1a ed., 1993.
- MENDONÇA, F. A. Geografia e metodologia científica – Da problemática geral às especificidades da geografia física. **Geosul**, v. 14, n. 27, nov. 1998, p. 63-70
- MENDONÇA, F. A. Geografia física: Ciência humana? São Paulo: Contexto, 1a ed., 1989.

- MENEGALE, M. C. S A transformação territorial de um município de tradição mineradora: estudo de caso sobre a recente ocupação do norte de Nova Lima, circundante à Mata do Jambreiro. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.2002.
- MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. **Sustainable Development**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 1996.
- MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. **Sustainable Development**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 1996. •
- MONTEIRO, C. A. F. Geossistemas: a história de uma procura. São Paulo: **Contexto**, 2000. 127p.
- MONTEIRO, C. A. F. Willian Morris Davis e a Teoria Geográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Vol. 2, nº 1, 2001.
- MORAES, A. C. R. **Geografia**: pequena história crítica. São Paulo: Hucitec, 1987. 138p.
- MOREIRA, A. A. Desafios à conservação na Bacia do Paraopeba-MG: identificando valores. Belo Horizonte, 2015. 287 p. **Tese** (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Geografia Tratamento da Informação Espacial, pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 250 p.
- MORIN, E. **O Método 1**: a natureza da natureza. Publicações Europa-América Ltda. 1977.
- MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: Ed. da autora, 2003.
- MUELLER, C. C.; TORRES, M.; MORAIS, M. P. Referencial básico para a construção de um sistema de indicadores urbanos. **IPEA**, Brasília, 1997.
- MUELLER, C.; TORRES, M.; MORAIS, M. **Referencial básico para a construção de um sistema de indicadores urbanos**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 1997.
- NASCIMENTO, F. R. de; SAMPAIO. J. L. F. Geografia Física, geossistemas e estudos integrados da paisagem. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v.6/7, n.1, 2005.
- NUNES, E; CASTRO, S.S. Distribuição de focos erosivos lineares e sua relação com compartimentação morfoopedológica do município de Mineiros – GO. Res. **COMPEEX**
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 323-344, 1984. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734189X84800110>>.
- ODUM, E. The emergence of ecology as new intergrative discipline. **Science** 1977. 195:1289-1293.

OLIVEIRA, A. A. B. A abordagem sistêmica no planejamento e gestão de bacias hidrográficas. IN: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA (**Anais**). Rio de Janeiro: UERJ, 2003.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Glossary of statistical terms. Paris: OECD. 2007. Disponível em: <<http://stats.oecd.org/glossary/download.asp>>. Acesso em: 03 dez. 2020.

PENTEADO-ORELLANA, M. M. Metodologia integrada no estudo do meio-ambiente. **Geografia**. Rio Claro, vol. 10, n. 20. p. 125-148, 1986.

PRABHU, R., COLFER, C. J. P., DUDLEY, R. G. Guidelines for developing, testing and selecting criteria and indicators for sustainable forest management. **Toolbox Series**, n. 1. Indonesia: CIFOR, 1999

RAMOS, R. A. R.; MENDES, J. F. G. Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: o caso de Valença. **Revista Engenharia Civil**, Minho, Portugal, n. 10, Universidade do Minho, 2001. p. 7-29.

RANSON, K. J.; SUN, G.; WEISHAMPEL, J. F.; KNOX, R. G. Forest biomass from combined ecosystem and radar backscatter modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 118-133, 1997.

RENGER F. E., NOCE C. M., ROMANO A. W., MACHADO N.. Evolução sedimentar do Supergupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, 2(1): 1-11. 1994

Rennó, C.D., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G., Tomasella, J., Waterloo, M., 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment* 112, 3469–3481.

RICHARDS, J. A. e JIA, X. (2006). **Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction**. Springer, Nova Iorque, 439 pp.

ROCHA, C. H. **Geoprocessamento tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: ed. Do Autor, 2002.

ROCHA, J.V.; LOMBARDI NETO, F.; BACELLAR, A.A.A. Cálculo do fator comprimento de rampa (L): uma metodologia para uso em sistema de informação geográfica. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão. **Anais**. Bauru, 1997.

RODRIGUES, A. M. **Produção e consumo no espaço: problemática ambiental urbana**. São Paulo: Hucitec, 1982.

RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, **Anais**. POLI/USP, São Paulo, p.1-26,1990

RODRIGUES, S. A. **Destrução e equilíbrio: o homem e o ambiente no espaço e no tempo**. São Paulo: Atual Ed., 1989.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7 ed. Uberlândia: EDUFU, 262 p., 2009.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2016/12/Introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-Geoprocessamento-Roberto-Rosa.pdf>. 2013. Acessado em 15 nov 2019.

- ROSIM, S.; MONTEIRO, A. M. V.; RENNÓ, C. D.; SOUZA, R. C. M. DE; SOARES, J. V. Terrahidro - uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos s. **Anais XI SBSR**. p.2589-2596, 2003. Belo Horizonte
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.
- ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: Subsídios para o Planejamento Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 208 p.
- ROSS, J. L. S. **Geomorfologia, ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.
- ROSS, J. L. S. **O Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, v. 10, 1995.
- ROSS, J.L. S. e SPÖRL, C. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Espaço e Tempo**, n. 15, GEOUSP, 2004.
- RUHOFF, A.L. **Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com simulação de cenários preservacionistas**. Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria.
- SACRAMENTO, M. F.; REGO, M. J. M. A Bacia de drenagem enquanto unidade integrada nos estudos geoambientais. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia [s.n] 2006
- SCHNEIDER, V. Mapeamento geomorfológico e zoneamento ambiental de fragilidades na bacia hidrográfica do Rio Barra Seca – Espírito Santo. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) -Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2011. 138p. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_5240_vailson.pdf. Acesso em: 05 de nov. 2020.
- SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: John Wiley & Sons, 1977. 338p.
- SEBUSIANI, H. R. V.; BETTINE, S. C. Metodologia de análise do uso e ocupação do solo em micro bacia urbana. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 256-285, jan-abr/2011.
- SHIELDS, D.; SOLAR, S.; MARTIN, W. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. **Ecological Indicator**, v. 2, n. 1-2, p. 149-160, nov. 2002.
- SILVA, A.M. & SCHULZ, H.E. Estimativa e análise do fator topográfico (LS) da Equação Universal de Perda de Solo feito com o uso de aplicativo informatizado compatível com *software* de geoprocessamento. **Revista Fator GIS**, 2000. Disponível em <http://www.fatorgis.com.br>. Acesso 20/12/2008.
- SILVA, A.M. & SCHULZ, H.E. Estimativa e análise do fator topográfico (LS) da Equação Universal de Perda de Solo feito com o uso de aplicativo informatizado compatível com *software* de geoprocessamento. **Revista Fator GIS**, 2000. Disponível em <http://www.fatorgis.com.br>. Acessado em 20 de out. 2019.
- SOTCHAVA, V. B. O estudo dos geossistemas. **Métodos em Questão**. São Paulo, n. 6, 1977. 50p.

SOTCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação dos geossistemas de vida terrestre. **Biogeografia**. São Paulo, n. 14, 1978. 24p.

SOUZA, D, M, B.S. Abordagem Baseada em Lógica Fuzzy para alocação de Indicadores de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 118 p. 2009

SPÖRL, C. Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais. **Tese** (Doutorado em Geografia) -Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo – USP, 2007. 185p. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-10102007-145640/pt-br.php>. Acessado em 10 de nov. 2020.

SRTM. In: **BRASIL em relevo**: Embrapa monitoramento por satélite. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2000. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>>. Acesso em: out. 2019.

TAGLIANI, C.R.A. Técnica para Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Ambientes Costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informação. In: **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** INPE, Belo Horizonte MG, 2003.

TAMANINI MAS. Diagnóstico físico-ambiental para a determinação da fragilidade potencial e emergente da Bacia do Baixo curso do Rio Passaúna em Araucária **Dissertação** Curitiba: Universidade federal do Paraná/UFPR;2008.118p.

TANCREDI, H. S. N.; BORGES, S. M. Aplicação de Geoprocessamento na análise ambiental das bacias hidrográficas do Igarapé Juruti Grande e rio Aruã – Juruti – Pará. In: **Anais XIV do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal: SBSR, 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.04.45/doc/6321-6328.pdf>

TIEZZI, E. **Tempos históricos, tempos biológicos**: a Terra ou a morte: os problemas de uma nova ecologia. São Paulo: Nobel, 1988. 204p.

TOMLINSON, R. F. Geographic Information Systems - A new frontier. Keynote to the International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich : **ASPRS**, p. 20-24, 1984.

TRICART, J. A geomorfologia nos estudos integrados de ordenação do meio natural. **Boletim Geográfico**, Rio de Janeiro: IBGE, v. 34, n. 251, p. 15-42, out./dez. 1976.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1977. 97 p.

TRICART, J. **Paisagem e ecologia. Inter-fácies: escritos e documentos**, São José do Rio Preto: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, n. 76, p. 1-55, 1982.

TRICART, J. **Principés et méthodes de la Géomorphologie**. Paris: Masson, 1965. p. 86-128 TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977.

TROPPIAIR, H. Ecossistemas e geossistemas do Estado de São Paulo. **Boletim de Geografia Teórica**. Rio Claro, vol. 13, n. 25, p. 27-36, 1983.

TROPPIAIR, H. **Geossistemas paulistas**. Rio Claro: edição do autor, 2001.

TROPPIAIR, H. **Sistemas/ Geossistemas/ Geossistemas Paulistas/ Ecologia da Paisagem**. Edição do autor. Rio Claro, 2004. 130 p.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.7, n.1 p. 5-27, Jan/Mar 2002.

UFG, 2013.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 3(7): 539-546. 2003

VALERIANO, M. M. Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos. **Tese** (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, Brasil. **Anais...**São José dos Campos, INPE, 3595- 3602.

VALERIANO, M. M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia**, 1 (5): 69-85. 2002

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São Jose dos Campos: INPE, 2008.

VALERIANO, M. M.; Carvalho Junior, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 1:17-29. 2003

VALERIANO, M.M. **Dados topográficos**. In: FLORENZANO, T.G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo, Oficina de textos. 2008

VALERIANO, M.M.; Kuplich, T. M.; Storino, M.; Amaral, B.D.; Mendes Junior, J. N.; Lima, D.J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, 32:1169-1181. 2006

VEIGA, T. C.; XAVIER DA SILVA, J. Geoprocessamento Aplicado à Identificação de Áreas Potenciais para Atividades Turísticas: o Caso do Município de Macaé-RJ. In: XAVIER DA SILVA, J., ZAIDAN, R. T. (Org). **Geoprocessamento e Análise Ambiental**: Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 179-215.

VENTURI, L. A. B. (Org.). **Praticando geografia: técnicas de campo e de laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VICENTE, L. E.; PEREZ FILHO, A. Abordagem sistêmica e Geografia. **Geografia**. Rio Claro, vol. 28, n. 3. p. 323-344, 2003.

WERLANG, M.K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: Conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul**, 2004. Tese (Doutorado em ciência do solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

WISCHMEIER, W.C. SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. **Agricultural Handbook**, US Departament Agriculture, Washington-DC, n. 537, p. 1-58, 1978.

WISCHMEIER, W.C. SMITH, D.D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. **Agricultural Handbook**, US Departament Agriculture, Washington-DC, n. 282, p. 47, 1965.

XAVIER-DA-SILVA, J. X.; Z AidAN, R. T. **Geoprocessamento e análise ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 368 p. 2004

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and control. v. 8. p. 338-353, 1965.