SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – CAMPUS SAMAMBAIA
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

IGOR BRANDÃO DE LUCENA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL URBANA E O MODELO DE VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO ANICUNS, GOIÂNIA-GO

GOIÂNIA-GO
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[X] Dissertação [ ] Tese

2. Nome completo do autor

Igor Brandão de Lucena

3. Título do trabalho

Análise comparativa entre o modelo de fragilidade ambiental urbana e o modelo de vulnerabilidade natural à perda de solo na bacia do Ribeirão Anicuns, Goiânia-GO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **IGOR BRANDÃO DE LUCENA**, **Discente**, em 27/07/2020, às 09:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Cristina Luiz**, **Coordenadora de Pós-Graduação**, em 27/07/2020, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1455838** e o código CRC **FB980143**.

Referência: Processo nº 23070.030347/2020-19 SEI nº 1455838

IGOR BRANDÃO DE LUCENA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL URBANA E O MODELO DE VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO ANICUNS, GOIÂNIA-GO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia/PPG-GEO da Universidade Federal de Goiás – Campus Samambaia, para obtenção do Título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica

Orientadora: Profa. Dra. Gislaine Cristina Luiz

Goiânia-GO
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Lucena, Igor Brandão de
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL URBANA E O MODELO DE VULNERABILIDADE NATURAL À PERDA DE SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO ANICUNS, GOIÂNIA-GO [manuscrito] / Igor Brandão de Lucena. - 2020.
LXXI, 71 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Gislaine Cristina Luiz.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2020.
Bibliografia.
Inclui mapas, lista de tabelas.

1. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 2. Fragilidade Ambiental. 3. Vulnerabilidade Ambiental. 4. Análise Integrada. 5. Planejamento Ambiental. I. Luiz, Gislaine Cristina, orient. II. Título.

CDU 911

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 39/2020 da sessão de Defesa de Dissertação de Igor Brandão de Lucena, que confere o título de Mestre em Geografia, na área de concentração em Natureza e Produção do Espaço.

No décimo dia do mês de julho de dois mil e vinte, a partir das 14 horas, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Análise comparativa entre o modelo de fragilidade ambiental urbana e o modelo de vulnerabilidade natural à perda de solo na bacia do Ribeirão Anicuns, Goiânia-GO”. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora Gislaine Cristina Luiz (IESA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Gustavo Rodrigues Barbosa (UEMG), membro titular externo, Professora Doutora Cláudia Valéria de Lima (IESA/UFG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Gislaine Cristina Luiz, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, no décimo dia do mês de julho de dois mil e vinte.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO RODRIGUES BARBOSA**, **Usuário Externo**, em 10/07/2020, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Cláudia Valéria De Lima**, **Professor do Magistério Superior**, em 10/07/2020, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Cristina Luiz**, **Coordenadora de Pós-Graduação**, em 10/07/2020, às 16:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1425134** e o código CRC **4665C405**.

A Deus, o grande criador.
À minha esposa, Roberta Silva de Oliveira Lucena, parceira da vida e grande incentivadora neste capítulo de minha formação.
Aos meus pais, Luiz e Antonieta, meu irmão Bruno e meu filho Gabriel, que foram fundamentais nessa trajetória.
Á minha orientadora e amiga, Profa. Dra. Gislaine Cristina Luiz, imprescindível na orientação e idealização desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e orientação para concluir mais esta etapa de estudo. Em Deus busquei e encontrei a sabedoria para solucionar os imprevistos que surgiram durante o percurso. Assim, foi possível encontrar as pessoas certas, no momento certo, para executar o trabalho mais apropriado.

À minha esposa, Roberta Lucena, pelo amor, incentivo, energia, compreensão, estímulo e inspiração.

Aos meus pais, Luiz e Antonieta, responsáveis pela ideia inicial.

Ao meu irmão e melhor amigo Bruno e a meu filho Gabriel, por estarem sempre presentes, pelo carinho e paciência.

À Profa. Dra. Gislaine Cristina Luiz, por sua total disponibilidade, pela clareza e objetividade impecável na condução deste trabalho.

Ao amigo Prof. Dr. Gustavo, pela tutoria, confiança e dedicação, ao compartilhar seu conhecimento para a construção das ideias da pesquisa, além de ser um grande incentivador.

Aos amigos Cesinha, Didi, Sanduba, Tei, Paulo Roberto e Renato.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa da predisposição natural dos terrenos aos processos erosivos e à perda de solo, a partir da aplicação de dois modelos metodológicos utilizados nos estudos da fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural de uma mesma área, a bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, em Goiânia-GO. A aplicação destes modelos empíricos resultou na confecção de dois mapeamentos diferenciados, os quais foram analisados e comparados entre si. O primeiro modelo metodológico foi o da Fragilidade Ambiental Urbana, baseado nas Classes de Declividade. O segundo modelo resultou da proposta de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo, baseado nas Unidades Territoriais Básicas - UTB´s. As representações cartográficas oriundas da aplicação dos modelos empíricos permitem a identificação, hierarquização e análise de áreas em função dos diferentes níveis de suscetibilidade aos processos erosivos, constituindo-se em ferramentas de orientação no processo de ordenamento territorial de bacias hidrográficas, podendo subsidiar o planejamento estratégico ambiental. Analisando-se os produtos finais, apesar das diferenças entre as metodologias, quanto à adoção das variáveis e dos resultados relacionados aos planos de informação, os mapas-síntese apresentaram similaridades quanto à classificação final, sendo a correlação entre os mesmos considerada como muito forte.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica (SIG). Fragilidade Ambiental. Vulnerabilidade Ambiental. Análise Integrada. Planejamento Ambiental.

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of the natural predisposition of land to erosive processes and soil loss, based on the application of two methodological models used in environmental fragility and environmental vulnerability studies in the same area, Anicuns river basin, Goiânia-GO. The application of these empirical models resulted in the creation of two different mappings, which were analyzed and compared to each other. The first methodological model, Urban Environmental Fragility bases on slope classes. The second empirical model, Natural Vulnerability to Soil Loss bases on Basics Territorial Units. The cartographic representations derived from the application of the empirical models allow the identification, hierarchy and analysis of areas according to the different levels of susceptibility to erosive processes, constituting on guiding tools in the process of territorial zoning of hydrographic basins, being able to subsidize the strategic environmental planning. Analyzing the final products, despite the differences between the methodologies, regarding the adoption of the variables and the results related to the information plans, the summary maps presented similarities regarding the final classification, being the correlation between them considered as very strong.

Keywords: Geographic Information System (GIS). Environmental Fragility. Environmental Vulnerability. Integrated Analysis. Environmental Planning.

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Carta de Localização da bacia do ribeirão Anicuns 14

Mapa 2 - Carta de Solos da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns 40

Mapa 3 - Carta Geológica da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns 42

Mapa 4 - Carta de Declividade na bacia do ribeirão Anicuns 43

Mapa 5 - Carta de Precipitação na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns 45

Mapa 6 - Carta de Uso da Terra da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns 46

Mapa 7 - Carta de Fragilidade Ambiental Potencial 49

Mapa 8 - Carta de Fragilidade Ambiental Emergente 51

Mapa 9 - Carta de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo 53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações de Metadados 27

Quadro 2 - Classificação da Fragilidade relacionada à Pedologia 29

Quadro 3 - Classificação da Fragilidade relacionada à Declividade 30

Quadro 4 - Classificação da Fragilidade relacionada à Pluviosidade 30

Quadro 5 - Classificação do Uso da Terra quanto ao Nível de Urbanização 31

Quadro 6 - Graus Fragilidade Ambiental Urbana com Base nas Classes de Declividade 32

Quadro 7 - Avaliação da Vulnerabilidade das unidades de Paisagem Natural 32

Quadro 8 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Geologia 33

Quadro 9 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Geomorfologia 34

Quadro 10 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Pedologia 35

Quadro 11 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Cobertura Vegetal 36

Quadro12 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Intensidade Pluviométrica 37

Quadro 13 - Graus de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com Base nas UTB 38

Quadro 14 - Distribuição das classes pedológicas na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns 40

Quadro 15 - Distribuição das Litologias na bacia do ribeirão Anicuns 42

Quadro 16 - Distribuição das classes de declividade na bacia do ribeirão Anicuns 43

Quadro 17 - Distribuição da classe do índice de precipitação na bacia do ribeirão Anicuns, de acordo com Santos e Ross (2012) 44

Quadro 18 - Distribuição da classe do índice de precipitação na bacia do ribeirão Anicuns, de acordo com Crepani et al. (2001) 45

Quadro 19 - Distribuição das classes de Uso da Terra na bacia do ribeirão Anicuns 46

Quadro 20 - Classes de Fragilidade Ambiental 47

Quadro 21 - Área de Fragilidade Ambiental Potencial 48

Quadro 22 - Fragilidade Ambiental em relação à urbanização e fatores associados a processos erosivos 49

Quadro 23 - Classes de Vulnerabilidade Natural 51

Quadro 24 - Área de Fragilidade Ambiental Potencial da bacia do ribeirão Anicuns - Santos e Ross (2012) 54

Quadro 25 - Área de Fragilidade Ambiental Emergente da bacia do ribeirão Anicuns - Santos e Ross (2012) 54

Quadro 26 - Área de Vulnerabilidade Natural da bacia do ribeirão Anicuns - Crepani et al. (2001) 55

Quadro 27 - Áreas de Fragilidade Emergente e Vulnerabilidade Ambiental da bacia do ribeirão Anicuns 55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 REFERENCIAL TEÓRICO 18
2.1 Análise integrada da paisagem 18
2.2 Fragilidade Ambiental 20
2.3 Vulnerabilidade Ambiental 21
2.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG) 22
2.5 Modelos de Fragilidade e Vulnerabilidade Ambiental 23

3 MATERIAIS E MÉTODOS 25
3.1 Procedimentos metodológicos 25
3.2 Levantamento e processamento da base de dados 26
3.3 Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana com base nas Classes de Declividade – Santos e Ross (2012) 28
3.4 Variáveis 29
3.4.1 Pedologia 29
3.4.2 Declividade 29
3.4.3 Índices pluviométricos 30
3.4.4 Uso da terra 30
3.5 Elaboração 31
3.6 Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB) – Crepani et al. (2001) 32
3.7 Variáveis 33
3.7.1 Geologia 33
3.7.2 Geomorfologia 34
3.7.3 Pedologia 34
3.7.4 Cobertura vegetal 36
3.7.5 Intensidade pluviométrica 37
3.8 Elaboração 38
3.9 Comparação dos modelos 38

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 40
4.1 Caracterização da área de estudo 40
4.1.1 Carta de Pedologia 40
4.1.2 Carta de Geologia 41
4.1.3 Carta de Declividade 43
4.1.4 Carta de Precipitação 44
4.1.5 Carta de Uso da terra 45
4.2 Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana com base nas classes de declividade – Santos e Ross (2012) 46
4.3 Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB) – Crepani et al. (2001) 51
4.4 Comparação dos modelos 53

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 57

REFERÊNCIAS 59

1 INTRODUÇÃO

A urbanização integra um dos processos mais marcantes da sociedade atual. O desenvolvimento da sociedade humana promove intensas modificações no meio ambiente, devido às apropriações inadequadas dos recursos naturais, fato este que colabora para o desequilíbrio dos sistemas e propicia a ocorrência de impactos ambientais negativos (SPÖRL, 2007). Os sistemas ambientais, em relação às intervenções humanas, apresentam maior ou menor fragilidade em função de suas características “genéticas” (SPÖRL; ROSS, 2004).

A análise ambiental e o planejamento territorial têm como base as condições da paisagem e as características naturais da região, considerando, principalmente, informações como declividade, pedologia, intensidade pluviométrica, uso do solo e cobertura vegetal, de forma a viabilizar um efetivo gerenciamento ambiental (BOJÓRQUEZ-TAPIA et al., 2013; MARTÍN-DUQUE et al., 2012; ROSS, 2012).

O planejamento e ordenamento da ocupação do espaço físico-territorial objetiva viabilizar o desenvolvimento sustentável conciliando o progresso socioeconômico com a conservação ambiental, e consiste na delimitação de zonas ambientais e atribuição de usos e atividades compatíveis de acordo com as características, considerando tanto as potencialidades quanto as restrições de cada uma delas. Assim, ações de planejamento e ordenamento territorial devem fundamentar-se numa análise detalhada e integrada da região, considerando os impactos decorrentes da intervenção humana e a capacidade de suporte do meio ambiente.

A aplicação de geotecnologia para a elaboração de produtos cartográficos relacionados à fragilidade e vulnerabilidade ambiental difunde-se cada vez mais no Brasil, uma vez que configura um conjunto de ferramentas altamente eficientes para a gestão territorial e promoção da qualidade da paisagem (RODRIGUES et al., 2001; FRANCISCO et al., 2008). As ferramentas que compõem os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) facilitam a realização de operações complexas, permitindo a integração de grande volume de dados de natureza e escalas diferentes como, por exemplo, imagens de satélite, cartas topográficas e informações pontuais.

A integração de informações espaciais em SIG e de métodos de decisão multicritério vem proporcionando inúmeros benefícios para a resolução de problemas de planejamento e gerenciamento do mundo real (ZAMBON et al., 2005). A utilização de SIG possibilita uma avaliação ambiental integrada, permitindo estabelecer relações entre os compartimentos ambientais e as suas características de vulnerabilidade e estabilidade, com vistas à obtenção

de uma melhor retratação ambiental, de modo a possibilitar o planejamento ambiental de uso e ocupação de determinada área.

O planejamento ambiental fundamenta-se na interação e integração dos sistemas que compõem o ambiente, sendo um processo contínuo que envolve coleta, organização e análise sistematizadas das informações, por meio de procedimentos e métodos, para chegar a decisões ou a escolhas acerca das melhores alternativas para o aproveitamento dos recursos disponíveis. Sua finalidade é atingir metas específicas no futuro, levando à melhoria de uma determinada situação e ao progresso da sociedade, sem que haja comprometimento dos recursos naturais.

Nos últimos anos surgiram diversas metodologias de avaliação geoespacial da paisagem, para aferir ou avaliar o grau de vulnerabilidade frente às intervenções humanas e para diagnosticar a fragilidade natural dos ambientes. Porém, os resultados nem sempre permitem uma correta caracterização local, podendo ser abrangentes ou restritivos, deixando dúvidas quanto às decisões que devem ser tomadas.

Nesse sentido, ferramentas computacionais e o uso de geoprocessamento podem significar melhor aquisição e tratamento de dados, gerando informações confiáveis em um tempo menor. A qualidade dos dados de entrada e a correta abordagem da categoria de estudo, para qualquer modelo de análise e pesquisa, são indispensáveis para alcançar os resultados almejados. Assim, formas práticas de aquisição de informações e auxiliadas por geoprocessamento devem ser exaustivamente perseguidas e aperfeiçoadas.

Diante desta problemática, o emprego dos SIG apresenta um enorme potencial de utilização, podendo contribuir para facilitar o trabalho de representação gráfica da caracterização ambiental de uma região, tanto no que diz respeito à atualização das informações sobre as variáveis ambientais que a compõem, como sobre a predisposição natural dos terrenos em serem erodidos. Portanto, a abordagem da paisagem como categoria de análise, discutindo os aspectos do meio físico e seus limites de influência em uma bacia hidrográfica altamente antropizada, permite que maiores inferências sejam feitas sobre a fragilidade e vulnerabilidade da paisagem frente à ação humana.

Dada a importância deste tema, a presente pesquisa acadêmica visa aplicar, em um mesmo recorte espacial selecionado para estudo, o modelo de Fragilidade Ambiental Urbana (SANTOS; ROSS, 2012) e o modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo (CREPANI et al., 2001), caracterizando os terrenos quanto à sua predisposição natural aos processos erosivos e à perda de solo.

O modelo de Fragilidade Ambiental Urbana, proposto por Santos e Ross (2012), baseia-se nas Classes de Declividade, resultando no Índice de Instabilidade Potencial e Emergente quanto à fragilidade natural dos terrenos aos processos erosivos. Já o Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo, proposto por Crepani et al (2001), é baseado nas Unidades Territoriais Básicas - UTB, resultando na representação acerca da vulnerabilidade natural à perda de solo. Nesse contexto, os termos fragilidade e vulnerabilidade significam a predisposição natural dos terrenos em serem erodidos e terem a consequente perda de solo. Para a aplicação e avaliação destes modelos, foi escolhida a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns, localizada no município de Goiânia-GO.

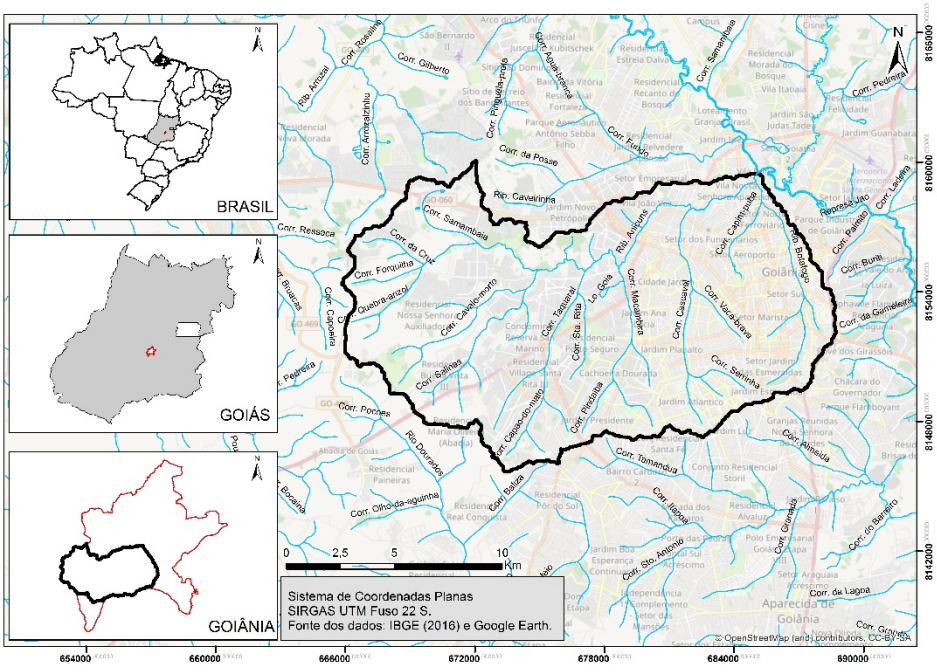
A Fragilidade Ambiental Urbana, modelo proposto por Santos e Ross (2012), como metodologia de predição da fragilidade ambiental, que será aplicada à bacia do ribeirão Anicuns, está sustentada nas concepções da Unidade Ecodinâmica de Tricart (1977), a qual considera a relação entre componentes físicos e bióticos e demonstra os espaços suscetíveis ou não a efeitos danosos para o meio. Nesse modelo, a análise da fragilidade natural dos terrenos aos processos erosivos é feita a partir das classes de declividades dos terrenos, definindo o Índice de Instabilidade Potencial, relativo aos ambientes que apresentam vegetação nativa e pouca pressão antrópica, ou Índice de Instabilidade Emergente, que se refere às áreas alteradas por intervenções antrópicas.

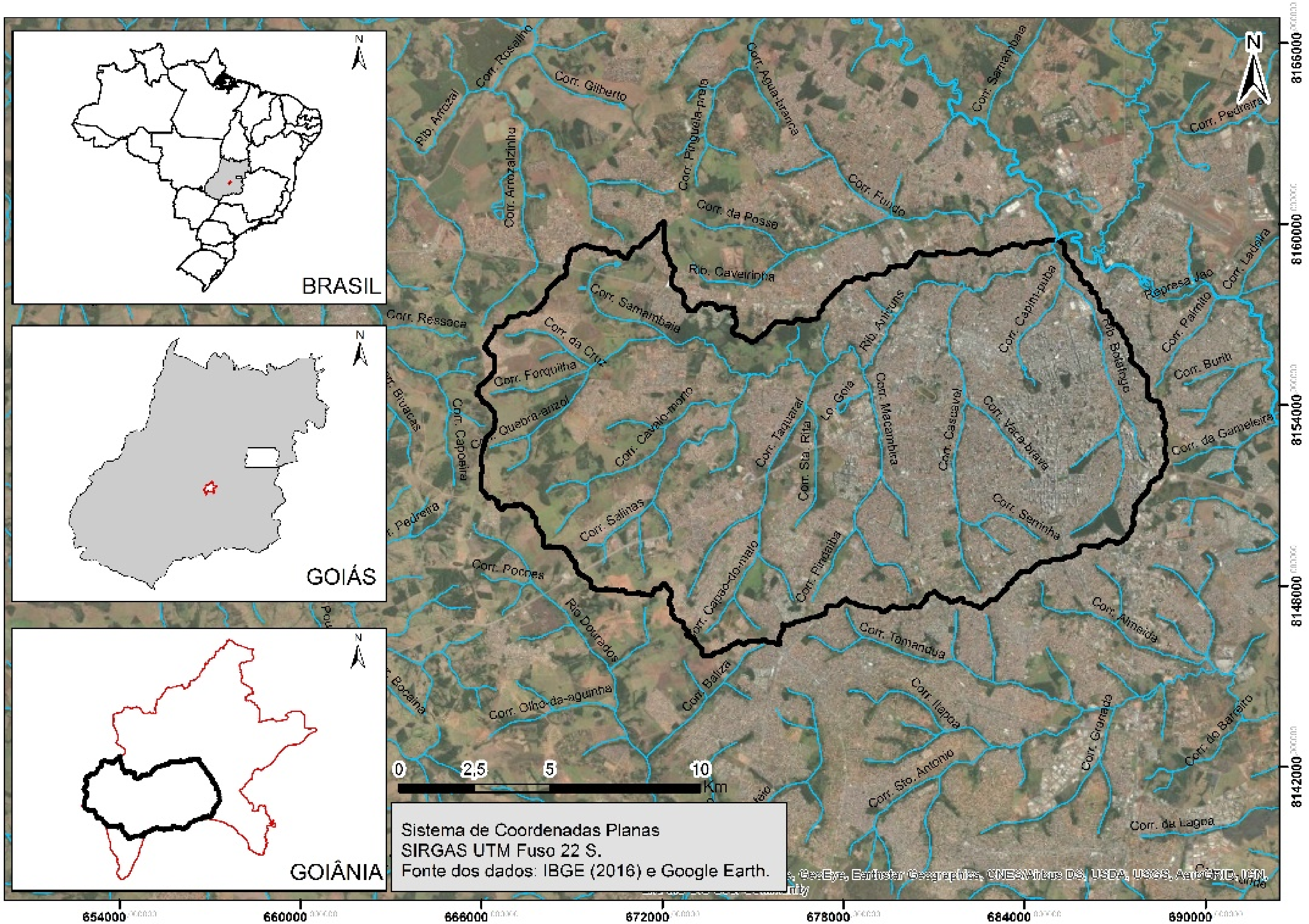
Outro modelo que será aplicado à mesma bacia fundamenta-se na metodologia de Crepani et al. (2001), cuja elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental natural se baseia nas Unidades Territoriais Básicas obtidas através da análise e interpretação de imagem satelitária e, posteriormente, na associação das informações temáticas relacionadas à geologia, geomorfologia (formas de relevo), pedologia, cobertura vegetal e intensidade pluviométrica, permitindo uma visão sintética, repetitiva e holística da paisagem. Mesmo não sendo originalmente um modelo aplicado a áreas essencialmente urbanas, no presente trabalho foram incluídas na variável de cobertura vegetal as particularidades referente ao uso e cobertura da terra, considerando principalmente o adensamento da cobertura do solo e particularidades quanto ao nível de solo exposto.

A escolha de uma bacia hidrográfica como recorte espacial para estudo e desenvolvimento de uma pesquisa acadêmica destaca-se por constituir-se numa excelente unidade de gestão, tanto de elementos naturais quanto sociais, devido ao seu aspecto integrador, onde é possível considerar as relações que a sociedade e suas atividades têm com o meio em que se encontram, para que a gestão e o planejamento possam ser entendidos de forma integrada (VILAÇA et al., 2009).

Por conseguinte, foi escolhida a bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, inserida na porção sudoeste do município de Goiânia, situada no estado de Goiás, na região Centro-Oeste do Brasil (Mapa 1), correspondendo a uma área com ambientes urbanos e rurais (ou semiurbanizados), onde os processos ambientais e as interações físicas, biológicas e sociais podem ser melhor analisados e compreendidos (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006).

Mapa 1 - Carta de Localização da bacia do ribeirão Anicuns




BRASIL
GOIÁS
GOIÂNIA
N
0 2,5 5 10 Km
Sistema de Coordenadas Planas
SIRGAS UTM Fuso 22 S.
Fonte dos dados: IBGE (2016) e Google Earth.
654000
660000
666000
672000
678000
684000
690000
8166000
8160000
8154000
8148000
8142000
Corr. Samambaia
Corr. da Cruz
Corr. Forquilha
Corr. Cavalo-morto
Corr. Salinas
Corr. Taquaral
Corr. Sta. Rita
Corr. Macambira
Corr. Cascavel
Corr. Vaca-brava
Corr. Serrinha
Corr. Capim-puba
Rib. Botafogo
Rib. Anicuns
Corr. Pindaíba
Rib. Caveirinha
Corr. da Posse
Corr. Fundo
Corr. Tamanduá
Corr. Baliza
Rio Dourados
Corr. Pocnes
Corr. Olho-da-aguinha
Corr. Ilapoa
Corr. Sto. Antonio
Corr. Almeida
Corr. do Barreiro
Corr. da Lagoa
Corr. Gilberto
Corr. Rosalino
Rib. Arrozal
Corr. Arrozalzinho
Corr. Ressaca
Corr. Capoeira
Corr. Pedreira
Corr. Samambaia
Corr. Agua-branca
Corr. Pinguela-preta
Corr. Palmito
Corr. Buriti
Corr. da Gameleira
Corr. Ladeira
Represa Jaó

A bacia do ribeirão Anicuns, marcada pela sua assimetria, drena uma área de 221,24 km² e com, aproximadamente, 95 km de perímetro. Trata-se de uma região altamente antropizada, com poucos fragmentos vegetacionais ao longo das drenagens e, eventualmente, resquícios de floresta estacional nos interflúvios, além de grande variabilidade do relevo e variedade de litologias e classes pedológicas. Como todos esses fatores são aspectos utilizados pelas metodologias adotadas nesta dissertação para predição de fragilidade ambiental, considera-se ser uma área interessante para a aplicação dos modelos empíricos escolhidos.

Segundo Caixeta (2009), cerca de 70% da população de Goiânia ocupa a área da bacia do ribeirão Anicuns, que tem como principais afluentes pela margem direita os córregos Cavalo Morto, Taquaral, Macambira, Cascavel e Botafogo, e pela margem esquerda os córregos da Cruz e Samambaia.

Estudos referentes à fragilidade e vulnerabilidade dos ambientes quanto à predisposição natural dos terrenos em serem erodidos destacam-se como de grande importância para o planejamento ambiental. A correta identificação dos ambientes naturais e suas fragilidades possibilita uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas, fornecendo subsídios à gestão do espaço físico-territorial.

Os sistemas ambientais podem responder de diferentes maneiras às intervenções humanas nos componentes da paisagem, como clima, rochas, solo, relevo, recursos hídricos e cobertura vegetal. A caraterização e mapeamento da fragilidade e vulnerabilidade ambiental permite definir áreas mais suscetíveis à ocorrência de processos erosivos e perda de solo e que, consequentemente, merecem maior atenção, pois sua má utilização pode resultar no comprometimento de todo o sistema. Franco et al. (2013) consideram que o grau de um impacto sobre o equilíbrio de um sistema, dependendo do tipo de intervenção, pode ser maior ou menor em função das características intrínsecas do ambiente.

Conforme aponta Cereda Júnior (2011), o planejamento das ações que causam interferências no sistema ambiental deve considerar as restrições e visar à conservação dos recursos naturais, comportando-se como uma importante ferramenta para que as relações entre o homem e seu meio sejam organizadas e melhor compreendidas.

Desta maneira, a avaliação sistêmica de um ambiente constitui a base para o estudo integrado da relação entre os seus elementos naturais, possibilitando um gerenciamento voltado à conservação da paisagem e da biodiversidade (SPÖRL; ROSS, 2004). O mapeamento e caracterização ambiental de unidades naturais, bem como a correta identificação dos graus de fragilidade e vulnerabilidade da paisagem podem proporcionar

melhores definições para a etapa de planejamento territorial, base para traçar diretrizes e propor ações de zoneamento e gestão das áreas especiais, que necessitam de maiores esforços para conservação do equilíbrio ambiental (MARTÍN-DUQUE et al., 2012; TOMCZYK, 2011).

Entretanto, os métodos empregados nos planejamentos territoriais nem sempre são elaborados considerando as relações complexas entre as variáveis que compõem o ambiente, sendo este um dos fatores responsáveis por resultados que não condizem com as situações encontradas na realidade (CEREDA JUNIOR; ROHM; LOLLO, 2006).

Assim, salienta-se a relevância de que os métodos de modelagem dos sistemas ambientais sejam refinados, a fim de buscar melhorias referentes à qualidade dos dados gerados e maior nível de confiança nos resultados. O aperfeiçoamento dos modelos pode ser alcançado por meio de sistemas de suporte à decisão, que são empregados para auxiliar na tomada de decisões, sendo conciliados com o Sistema de Informação Geográfica (SIG), que vem sendo utilizado como uma importante ferramenta para o planejamento ambiental, tendo em vista que seu uso permite a realização de uma avaliação integrada de um elevado número de variáveis de forma simplificada, o que resulta na rapidez da geração das informações (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006).

Sabe-se que todo modelo empírico, que propõe a elaboração de uma carta de fragilidade ou vulnerabilidade ambiental acerca da suscetibilidade dos terrenos em serem erodidos, precisa ser testado, ser validado ou, mais importante ainda, ser falseado. Os modelos devem estar num contínuo processo de busca de erros para a sua depuração. Pode-se dizer que o objetivo mais importante é verificar sob quais condições o modelo não funciona, ou seja, verificar e comprovar quais as limitações dos modelos (SPÖRL, 2007).

O modelo proposto por Santos e Ross (2012) trata-se de um método de análise empírica para determinação da fragilidade dos terrenos aos processos erosivos de ambientes naturais e antropizados, fundamentando-se no conceito das Unidades Ecodinâmicas (TRICART, 1977). Neste método, os autores sintetizam diferentes padrões de fragilidade em Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) e Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente), em que o Mapa de Fragilidade Potencial representa fatores intrínsecos à paisagem e o Mapa de Fragilidade Emergente considera também a cobertura da terra e as intervenções humanas (VALLE et al., 2016).

O outro modelo utilizado no presente estudo foi elaborado por Crepani et al. (2001). Este método também se baseia no conceito das Unidades Ecodinâmicas (TRICART, 1977), com o intuito de representar a vulnerabilidade natural à perda de solo através da

reinterpretação de mapas temáticos e de imagens de satélite. Para os autores, a vulnerabilidade das unidades de paisagem é estabelecida com base na relação morfogênese/pedogênese, por meio de uma escala de valores relativos e empíricos para cada plano de informação (PI) considerado. Pelo fato de não considerar fatores referentes à pressão antrópica, nesse modelo as características referentes ao uso e cobertura da terra foram tratadas na variável de cobertura vegetal.

Em relação aos métodos de cálculo da fragilidade ambiental, Santos e Ross (2012) adotam o agrupamento dos índices das variáveis e consideram o relevo (mapa de declividade) como variável principal. O modelo de representação da vulnerabilidade ambiental de Crepani et al. (2001) estabelece valores aritméticos médios para o produto final, no qual todas as variáveis têm a mesma importância (peso) para a determinação dos graus de vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas (UTB).

Neste contexto, apesar dos dois modelos empíricos fundamentarem-se no princípio da ecodinâmica, os mesmos apresentam divergências quanto à operacionalização dos métodos, das variáveis analisadas e dos pesos relativos atribuídos a cada variável, resultando em mapeamentos diferentes quanto comparados os produtos finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Análise integrada da paisagem

Pelo fato do presente estudo propor a realização de uma análise a partir da abordagem sistêmica, compreendendo a inter-relação entre os sistemas naturais e socioeconômicos existentes na área de estudo, destaca-se a importância do estabelecimento da paisagem como categoria de análise geográfica e de sua análise integrada.

De acordo com os pressupostos geossistêmicos de Sotchava (1976), os estudos da Geografia Física não devem ater-se somente aos componentes da natureza, mas considerar também as conexões entre eles, abrangendo análises da morfologia da paisagem, suas subdivisões e dinâmicas, não deixando de lado a conexão entre o homem e a natureza. Como assinala o autor, o estudo de geossistemas é utilizado assiduamente em pesquisas, na tentativa de melhorar a utilização e a conservação do ambiente. Embora os geossistemas sejam fenômenos naturais, todos os fatores econômicos e sociais que influenciam sua estrutura são levados em consideração durante o seu estudo.

O Geossistema, para Monteiro (1978), é representado por um complexo sistema singular, com interações de elementos humanos, físicos, químicos e biológicos, onde os elementos socioeconômicos não constituem um sistema adverso, mas inclusos no funcionamento do próprio sistema.

Desta maneira, os aspectos do meio antrópico, juntamente com os aspectos naturais, constituem uma parte fundamental no entendimento da paisagem. Bertrand (1971) define a paisagem como a combinação, dinâmica e instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, interferindo uns sobre os outros, resulta em um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução.

Para Grigoryev (1968), os estudos sobre os elementos que compõem o estrato geográfico possuem estrutura e evolução com profundas interconexões e inter-relações, formando um todo inseparável. Este autor assegura que o estudo do estrato geográfico obteria êxito, exclusivamente, quando os efeitos do modo de produção da sociedade humana na natureza (antropização decorrente do uso e ocupação do solo) fossem inteiramente considerados, sendo necessário, portanto, estudar os componentes do estrato geográfico como partes de um todo, e não isoladamente.

Tricart (1977) analisa o ambiente sob o prisma da Teoria dos Sistemas, partindo do pressuposto de que na natureza as forças de energia e matéria se processam através de

relações de equilíbrio dinâmico. Porém, este equilíbrio é frequentemente alterado pelas intervenções do homem nos diversos componentes da natureza, gerando desequilíbrios temporários ou até permanentes. Desta maneira, ao analisar a inter-relação entre o meio natural e a sociedade moderna, este autor apresenta o conceito de ecodinâmica, que consiste no estudo da organização do espaço, especificando como uma ação antrópica se insere ou não na dinâmica natural, com o intuito de ajustar certos aspectos antagônicos e facilitar a exploração dos recursos naturais do meio.

A avaliação sistêmica de um ambiente constitui a base para o estudo integrado da relação entre os seus elementos naturais, possibilitando um gerenciamento voltado à conservação da paisagem e da biodiversidade (SPÖRL; ROSS, 2004). A identificação de unidades naturais e dos graus de fragilidade (potencial e emergente) da paisagem proporcionam melhores definições para a etapa de planejamento territorial, base para traçar diretrizes e propor ações de zoneamento e gestão das áreas especiais, que necessitam de maiores esforços para a conservação do equilíbrio ambiental (MARTÍN DUQUE et al., 2012; TOMCZYK, 2011).

De acordo com Franco (2001), para a elaboração de um correto planejamento ambiental, é necessária uma abordagem interdisciplinar e integrada, analisando-se os aspectos físico-naturais e as dinâmicas antrópicas existentes, considerando o caráter complexo de uma dada situação ambiental. Assim, o planejamento implica decidir sobre ações futuras, fazer previsões e estimativas de cenários.

Neste sentido, a aplicação de modelos de mapeamento da fragilidade ambiental, através do estudo integrado dos componentes da natureza, permite a classificação do sistema em diferentes níveis de vulnerabilidade, possibilitando o reconhecimento de áreas mais suscetíveis à instabilidade e à probabilidade de ocorrência de processos erosivos e perda de solo.

2.2 Fragilidade Ambiental

Para Ratcliffe (1971), a fragilidade ambiental é uma medida da sensibilidade dos ecossistemas frente às pressões ambientais, associada também a quaisquer ameaças que sejam capazes de perturbar o equilíbrio de um sistema.

De acordo com Franco et al. (2013), o grau de um impacto sobre o equilíbrio de um sistema, dependendo do tipo de intervenção, pode ser maior ou menor em função das características intrínsecas do ambiente, ou seja, de sua fragilidade ambiental. Desta maneira, o

mapeamento e caracterização da fragilidade ambiental permite definir áreas mais instáveis e que merecem maior atenção, uma vez que sua má utilização pode resultar no comprometimento do equilíbrio de todo o sistema.

Spörl (2007) define a fragilidade ambiental como a suscetibilidade do sistema de sofrer intervenções ou de ser alterado. Uma vez alterado o estado de equilíbrio dinâmico, o sistema pode entrar em colapso, passando para uma situação de risco. A desestabilização do sistema pode ter como indutores tanto os processos naturais quanto ações antrópicas.

Ross (1994) discute a influência direta do homem no espaço onde vive, alterando-o de forma permanente com o intuito de atender a suas necessidades. O autor trabalhou o conceito de fragilidade ambiental sob a ótica das unidades de fragilidade, trazendo os termos quantitativos e qualitativos com o intuito de expandi-los e estabelecer unidades de instabilidade potencial e unidades de instabilidade emergente.

Ainda de acordo com Ross (1994), a fragilidade potencial corresponde à vulnerabilidade natural de ambientes estáveis que se apresentam em condições de equilíbrio dinâmico por estarem menos afetadas pelas ações antrópicas, porém podem apresentar certa instabilidade potencial qualitativamente previsível, devido aos seus atributos naturais e à pressão antrópica. Já a fragilidade emergente está ligada aos ambientes fortemente instáveis, ou seja, que não possuem as condições para que haja o equilíbrio ecodinâmico, e está associada aos graus de proteção que os diferentes tipos de uso do solo e cobertura vegetal exercem.

Segundo Kawakubo et al. (2005), a elaboração e representação cartográfica da fragilidade ambiental consiste em um dos principais instrumentos na idealização de um planejamento territorial ambiental adequado, pois permite avaliar as potencialidades e restrições de cada lugar, com o dimensionamento dos problemas regionais.

Avaliações da fragilidade ambiental, quando baseadas em fatores como o solo, o potencial de erosão das chuvas, a declividade e a cobertura vegetal, constituem os fundamentos básicos necessários ao planejamento ambiental. A integração das diversas variáveis que interferem nas potencialidades dos recursos naturais possibilita o conhecimento dos níveis de fragilidade presentes em uma bacia hidrográfica, permitindo a compreensão da realidade e a obtenção de uma visão mais clara sobre quais são as opções mais adequadas para o uso da terra (SPÖRL, 2001). Com isso, fica evidente que os estudos de fragilidade ambiental proporcionam melhor definição das diretrizes e ações a serem implantadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento ambiental e fornecendo subsídios à gestão do território (SPÖRL; ROSS, 2004).

2.3 Vulnerabilidade Ambiental

De acordo com Adger (2006), a ideia de vulnerabilidade é geralmente retratada em termos negativos, indicando o estado de suscetibilidade decorrente de três fatores chaves: exposição ao risco, alterações sociais e/ou ambientais e incapacidade de adaptação. Para Alves (2006), o conceito de vulnerabilidade, sob uma ótica ambiental, procura abordar o risco ao qual o meio ambiente está exposto, podendo ser este natural ou causado por fatores externos.

Aquino et al. (2017) definiram o termo vulnerabilidade ambiental como o grau de suscetibilidade ou incapacidade um sistema natural ao lidar com os efeitos das interações externas, podendo decorrer das características ambientais naturais ou de pressão causada por atividade antrópica.

Figueiredo (2010), ao tratar da vulnerabilidade ambiental, conceituou-a como a suscetibilidade de um sistema à degradação ambiental, considerando-se a exposição do sistema às interferências ambientais, avaliada por indicadores que mostram a pressão antropogênica exercida no sistema. Assim, os indicadores retratam a sensibilidade do sistema frente às pressões exercidas, avaliando as características do meio físico e biótico, próprias de uma região (tipo de solo, clima, vegetação), que já ocorrem antes de qualquer perturbação e que interagem com as pressões.

Para Lima et al. (2000), a avaliação da vulnerabilidade de um geossistema é realizada a partir da análise das características dos meios físico e biótico quando submetidas à exposição a fontes de pressão ambiental (densidade populacional, uso da terra), capazes de tornar um terreno mais ou menos instável ou sujeito a processos erosivos. Simões et al. (1998) entendem que o conhecimento da vulnerabilidade natural é fundamental para prever o comportamento futuro dos sistemas naturais diante do processo de ocupação e adensamento da atividade social.

Crepani et al. (1996, 2001) apresentaram o método de predição da vulnerabilidade natural à perda de solo, baseado no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977), através da reinterpretação de mapas temáticos e de imagens de satélite, estabelecendo a vulnerabilidade das unidades de paisagem com base na relação dos processos de morfogênese e pedogênese a partir da análise integrada (solo, rocha, vegetação), por meio de uma escala de valores relativos e empíricos para cada plano de informação considerado. Assim, a avaliação da vulnerabilidade ambiental necessita da elaboração de um plano que permita o envolvimento de outros aspectos como o social e o econômico de uma região, escolhendo-se adequadamente

indicadores que possam mostrar ao pesquisador a real fragilidade ou resistência de um sistema aos riscos a que este pode estar exposto.

2.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O avanço das geotecnologias, como aquelas referentes aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), é um dos responsáveis por facilitar a elaboração de trabalhos que utilizam múltiplas informações físico-espaciais. Os SIGs fundamentam-se em uma tecnologia destinada à coleta, armazenamento, busca, análise, tratamento e apresentação de dados espaciais, permitindo a integração de análises estatísticas, mapeamentos referenciados e operações de banco de dados (CEREDA JUNIOR, 2011; LEMKE; BEZERRA; PEREIRA, 2009).

Para Spörl (2007), os SIGs são definidos como ferramentas que permitem a investigação dos fenômenos ambientais ao combinar os avanços tecnológicos da cartografia, banco de dados automatizados, sensoriamento remoto e modelagem, permitindo o armazenamento, análise, manipulação e gerenciamento de dados geográficos, com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies. Ainda de acordo com Spörl (2007), o SIG é considerado como uma importante ferramenta em estudos relacionados aos planejamentos ambientais, como modelamento de fragilidade e vulnerabilidade ambiental, devido à necessidade de manipulação de uma elevada quantidade de informações e dados do sistema para a geração de produtos, principalmente pela capacidade de auxílio na realização de análises complexas, oriundas da integração de representações de dados.

A tecnologia SIG tem sido usada por vários setores que tratam da questão ambiental como importante ferramenta para o planejamento territorial, uma vez que a avaliação integrada de um grande número de variáveis se torna possível e simplificada com o uso deste sistema, que permite, ainda, a interação e geração de informações intermediárias e finais de maneira ágil (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006). O principal objetivo dos SIGs, de acordo com Simões-Meirelles (1997), é combinar dados espaciais oriundos de diversas fontes distintas, no intuito de descrever e analisar as interações, fazer predições através de modelos e propiciar o suporte necessário para a tomada de decisão.

2.5 Modelos de Fragilidade e Vulnerabilidade Ambiental

Aliada aos benefícios advindos da sistematização na pesquisa dos elementos paisagísticos, tem-se a contribuição de uma análise comparativa para levantamento de dados e composição de modelos. Através de um método comparativo, Alexander Von Humboldt, naturalista e explorador alemão, fazia o diagnóstico das paisagens espaciais em seus trabalhos de campo, permitindo o encontro das relações generalistas com os elementos comuns que os originavam.

Felgueiras (1999) considera que a utilização de modelos matemáticos, aritméticos e lógicos representativos de propriedades e processos do meio físico natural, implementados nos SIGs, objetivam facilitar o estudo e a compreensão das questões ambientais, propiciando usos e ocupações territoriais de forma responsável e cooperativa.

O termo “Modelo Ambiental” refere-se às representações que são desenvolvidas para simular os fenômenos ou processos da realidade, com o intuito de facilitar a descrição e a compreensão do funcionamento atual e do desempenho futuro de um ambiente (SPÖRL, 2007). Nestes casos, os SIGs são usados como base de armazenamento de dados espaciais e também como ferramentas de visualização para os dados de entrada e de saída dos modelos.

Segundo Moore et al. (1993), os modelos ambientais são usados para aumentar o conhecimento sobre um processo, predizer valores ou comportamentos em áreas não observadas e comprovar, ou não, hipóteses feitas sobre processos.

Jain e Goel (2002) apontam que modelos computacionais que integravam variáveis ambientais (relevo, tipo de solo, precipitação e uso da terra), quando aplicados a estudos ambientais para fins de ordenamento territorial resultam em mapeamentos temáticos, nos quais a área de estudo é classificada segundo uma escala de fragilidade e/ou vulnerabilidade ambiental, contribuindo assim com pressupostos para o desenvolvimento sustentável que seja capaz de promover as melhores opções de uso dos recursos naturais.

De acordo com Spörl (2007), os modelos ligados à questão da vulnerabilidade ambiental podem ser quantitativos e qualitativos. Os modelos quantitativos baseiam-se em medições e experimentos, estimando variações e perdas de solo, quantificando os fenômenos da erosão. Já os modelos qualitativos são empíricos e baseados na experiência de especialistas, objetivando avaliar o fenômeno da erosão no que diz respeito a sua origem e evolução, bem como os condicionantes e mecanismos que explicam seu surgimento e que atuam no seu desenvolvimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos foram divididos em etapas distintas, porém intimamente ligadas entre si, conforme o Fluxograma apresentado na página seguinte.

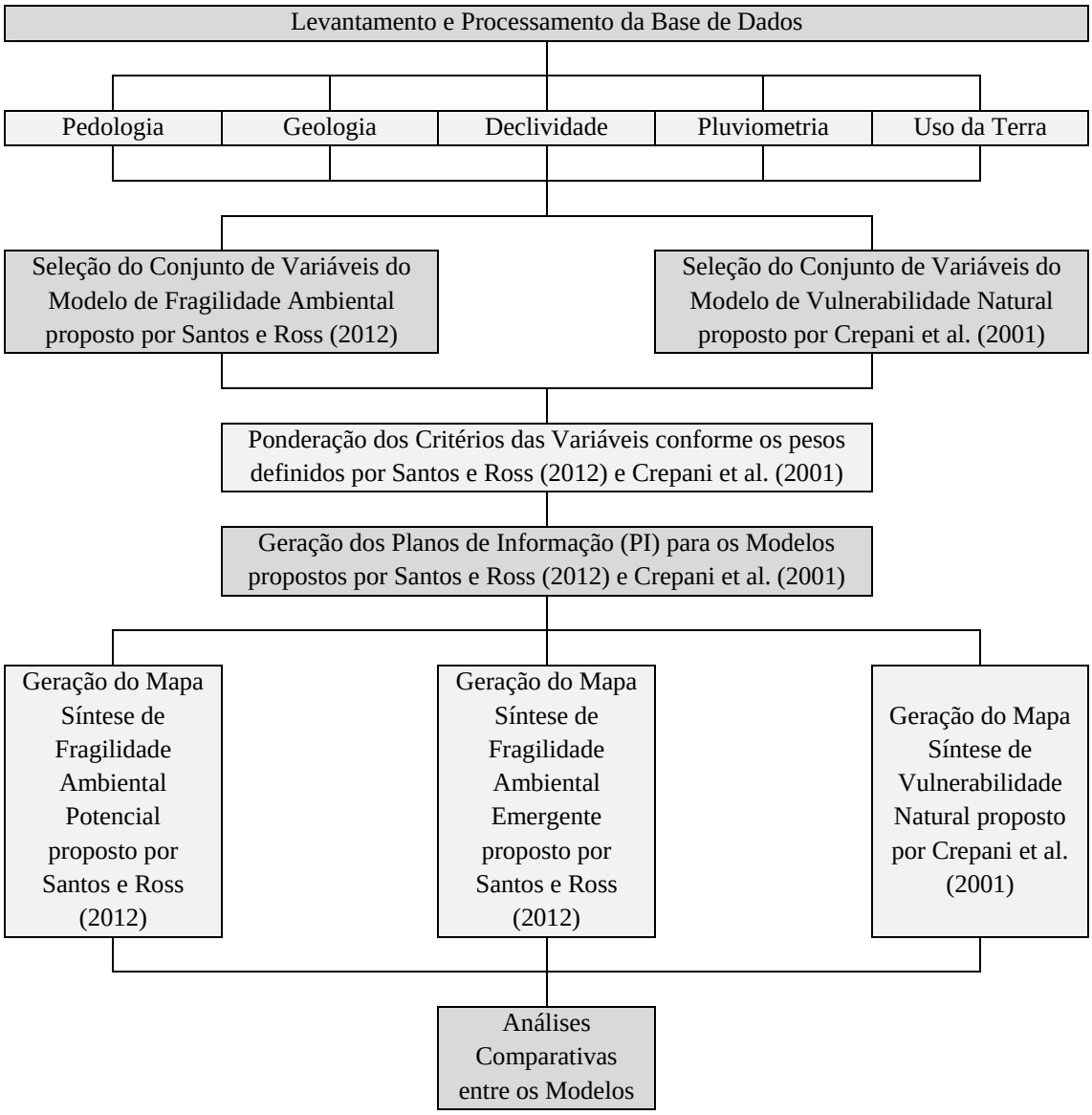
Após a definição do tema, da linha de pesquisa, da área de estudo e da abordagem metodológica, foi desenvolvida uma sequência de atividades operacionais para a execução da pesquisa. A primeira etapa compreendeu o levantamento de uma base de dados referentes às variáveis utilizadas pelos modelos empíricos de fragilidade e vulnerabilidade ambiental empregados neste estudo, sendo eles o modelo baseado nas Classes de Declividade e o modelo baseado nas Unidades Territoriais Básicas (UTB), propostos, respectivamente, por Santos e Ross (2012) e por Crepani et al. (2001).

Na segunda etapa, foram selecionadas as variáveis e atribuídos os pesos para as suas características, sendo ponderadas de acordo com as notas estabelecidas para cada critério definido pelos modelos, gerando, assim, os planos de informação (PI). A terceira etapa consistiu na elaboração dos mapas-síntese de fragilidade ambiental e vulnerabilidade ambiental a partir da associação dos planos de informação, por meio da sobreposição de mapas, seguindo as orientações propostas por cada um dos autores.

Posteriormente, na quarta etapa, foram comparados os dados e resultados dos planos de informação gerados pelos modelos empíricos e realizadas análises comparativas apoiadas em metodologias estatísticas e informações da realidade, para correlacionar os graus de fragilidade e vulnerabilidade ambiental apresentados pelos mapas-síntese produzidos a partir dos modelos supracitados.

Todos os processos das etapas metodológicas relacionados ao geoprocessamento foram realizados no software ArcGis, versão 10.3, adotando o sistema de coordenadas geográficas Universal Transverse Mercator (UTM), com Datum SIRGAS 2000.

Fluxograma das etapas metodológicas deste estudo



3.2 Levantamento e processamento da base de dados

Primeiramente, para a delimitação da área de estudo, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido por meio de imagens do sensor remoto SRTM, para extrair a rede de drenagem e, posteriormente, delimitar a bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns.

Para geração dos planos de informação (PI) dos modelos empíricos de determinação da fragilidade e vulnerabilidade ambiental utilizados neste trabalho, foi necessária uma base de dados composta pelas variáveis: pedologia, geologia, declividade, índices pluviométricos e uso da terra. Para elaboração das cartas intermediárias, foram utilizadas as informações de

metadados constantes no Quadro 1.

Quadro 1 - Informações de Metadados

VARIÁVEIS	FONTE	ESCALA/RESOLUÇÃO
Pedologia	Zoneamento Ecológico Econômico do município de Goiânia (ITCO, 2008)	1:150000
Geologia	Modificado de Campos et al. (2003) por Romão (2006)	1:50000
Declividade	Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia – MUBDG (2010)	1:5000
Pluviometria	Dados TRMM e Estação Meteorológica do INMET	Resolução 250 m
Uso da Terra	CBERS 4	Resolução 5 m

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Os dados referentes às classes pedológicas foram obtidos na base cartográfica digital do Zoneamento Ecológico Econômico do município de Goiânia, elaborado pelo Instituto de Desenvolvimento Tecnológico do Centro Oeste (ITCO, 2008). Os dados estão na escala de 1:150000, e no presente trabalho foi realizada a requalificação dos limites de cada classe pedológica.

Para a delimitação geológica foram utilizados os dados obtidos no estudo relativo ao Diagnóstico Hidrogeológico da Região de Goiânia (CAMPOS et al., 2003) adaptado por Romão (2006). Os dados referentes às Províncias Estruturais e unidades geológicas estão na escala original de 1:50000.

A declividade foi determinada através dos dados obtidos na base cartográfica do Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG, 2010) na escala de 1:5000, disponibilizado pela Companhia de Processamento de Dados do Município de Goiânia. As curvas de nível foram elaboradas com o auxílio de ortofotos com resolução de 5 metros.

As informações pluviométricas, referentes à série histórica de 30 anos (1981-2010), foram obtidas a partir de dados do sensor TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), através da obtenção de imagens mensais (resolução de pixel de 25x25km) e posterior vetorização dos arquivos *raster*. As imagens contendo as médias mensais foram somadas, gerando um centroide para cada célula com um valor de precipitação específico, possibilitando a conversão para elementos vetoriais. Desta maneira, foram selecionados 54 centroides, considerando um raio de 50 km em relação ao ponto central da bacia hidrográfica, de modo a gerar uma malha de pontos com valores de precipitação médios de toda a área de influência interna e externa do ribeirão Anicuns, com abrangência satisfatória para a área de

estudo.

Posteriormente, foi elaborada a carta de precipitação a partir da interpolação dos dados mensais obtidos por meio do método da krigagem em processamento computacional. Juntamente com os dados TRMM, foram utilizadas as médias mensais de precipitação da Estação Meteorológica de Goiânia, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1981-2010).

A classificação do uso da terra da área de estudo foi elaborada a partir dos dados do Satélite CBERS-4, com resolução de 5 metros, possibilitando a delimitação dos atributos analisados para esta variável. O satélite de observação é resultado de uma parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST).

Para a geração do mapa de uso da terra área de estudo foi utilizada a técnica de segmentação, que consiste na divisão das imagens em regiões homogêneas (segmentação) e posterior associação de cada segmento a uma classe diferente através da semelhança.

3.3 Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana com base nas Classes de Declividade – Santos e Ross (2012)

Para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental urbana de acordo com o modelo proposto por Santos e Ross (2012), foram utilizados os dados das seguintes variáveis: pedologia declividade, índices pluviométricos e uso da terra. De acordo com os autores, a hierarquização dos índices de fragilidade dos ambientes naturais decorre do tratamento integralizado das informações das variáveis selecionadas.

A cada atributo das variáveis selecionadas foram atribuídos pesos, ponderados de acordo com a hierarquia da fragilidade ambiental definida por Santos e Ross (2012), gerando os Planos de Informação, sendo a classificação da fragilidade representada pelos códigos: Muito Fraca (1); Fraca (2), Média (3), Alta (4) e Muito Alta (5). Assim, as variáveis mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 1, as intermediárias ao redor de 3, e as mais frágeis estarão próximas de 5,0.

Os critérios adotados por Santos e Ross (2012) para proposição do Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana, bem como o método para a hierarquização dos índices, estão detalhados a seguir.

3.4 Variáveis

3.4.1 Pedologia

Em relação à variável solo, é necessário o conhecimento das propriedades texturais e estruturais de cada classe, bem como a plasticidade, o grau de coesão das partículas, a profundidade e espessura dos horizontes. Em ambientes urbanizados é necessário, ainda, conhecer os diferentes estágios da ocupação antrópica e como eles podem interferir na classificação da fragilidade dos solos.

Assim, considerando o escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais e a suscetibilidade de cada classe pedológica à ocorrência de processos erosivos e consequente perda de solo, Santos e Ross (2012) determinaram as seguintes classes de fragilidade (Quadro 2).

Quadro 2 - Classificação da Fragilidade relacionada à Pedologia

Grau de Fragilidade	Classe de Fragilidade	Tipos de Solos e Urbanização
1	Muito Baixa	Latossolos de estrutura argilosa com textura média/argilosa (conforme classes 1 e 2 da proposta original); Nitossolo, Latossolos vermelho-amarelo em áreas dotadas de infraestrutura urbana.
2	Baixa	Argissolos vermelho-amarelo com textura média/argilosa em áreas urbanas dotadas de boas condições de infraestrutura.
3	Média	Argissolos de textura média/arenosa em áreas urbanas dotadas de boas condições de infraestrutura.
4	Alta	Argissolos vermelho-amarelo de textura média/arenosa; Neossolos quartzarênicos em áreas com infraestrutura urbana.
5	Muito Alta	Argissolos com carvalho; Gleissolos; Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzarênicos.

Fonte: Santos e Ross (2012).

3.4.2 Declividade

Santos e Ross (2012) determinaram o grau de fragilidade para a variável declividade de acordo com os intervalos de classes já consagrados nos estudos de aptidão agrícola associados com aqueles conhecidos como valores críticos da geotecnia, indicativos dos riscos da ocorrência de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes. Na área de estudo, as categorias estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação da Fragilidade relacionada à Declividade

Grau de Fragilidade	Classe de Fragilidade	Declividade (%)
1	Muito Baixa	0 a 3
2	Baixa	3 a 8
3	Média	8 a 12
4	Alta	12 a 20
5	Muito Alta	>20

Fonte: Santos e Ross (2012).

3.4.3 Índices pluviométricos

Para os critérios de hierarquização do comportamento pluviométrico, esta variável foi classificada por Santos e Ross (2012) conforme os graus de fragilidade apresentados no Quadro 4, obedecendo uma ordem crescente quanto à capacidade de interferência na estabilidade do ambiente.

Quadro 4 - Classificação da Fragilidade relacionada à Pluviosidade

Grau de Fragilidade	Classe de Fragilidade	Índices Pluviométricos
1	Muito Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 1000 mm/ano.
2	Baixa	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	Alta	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão, entre novembro e abril, quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas.
5	Muito Alta	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900mm/ano (semiárido).

Fonte: Santos e Ross (2012).

3.4.4 Uso da terra

Com relação à classificação da fragilidade em função do uso da terra, foram utilizadas as cinco categorias referentes à proteção do solo em função do tipo de cobertura, considerando ainda os níveis de urbanização em relação à influência antrópica. Dessa maneira, a hierarquização partiu do entendimento de que a fragilidade em áreas urbanizadas está relacionada à intensidade do escoamento superficial, possibilidade de infiltração e

drenagem após a incidência das chuvas. Para esta variável, Santos e Ross (2012) estabeleceram a seguinte hierarquia (Quadro 5), associando as diferentes tipologias com as condições infraestruturais e do ambiente natural.

Quadro 5 - Classificação do Uso da Terra quanto ao Nível de Urbanização

Grau de Proteção	Classe de Proteção	Uso da Terra e Nível de Urbanização
1	Muito Alta	Predomínio de condições naturais com um estrato vegetal bem desenvolvido e/ou em estágio avançado de regeneração que favorece a infiltração, minimizando o escoamento pluvial. Setores de média urbanização situados em área mais elevadas que apresentam baixa declividade e contam com medidas estruturais e não estruturais para o controle de cheias, como caixas de sumidouro, canteiros permeáveis, obstáculos para redução de velocidade do escoamento, reservatório para coleta de água da chuva.
2	Alta	Áreas urbanas com drenagem eficiente, baixa declividade, presença de ações para controle de cheias, infiltração e redução de escoamento nas vias de circulação, nos lotes e nas construções.
3	Média	Áreas urbanizadas predominantemente impermeabilizadas com problema de drenagem e constantes alagamentos e inundações. Ambiente com declividade praticamente nula precariamente incorporadas a drenagem, suscetíveis a inundações sazonais, que podem ter constituído antigas planícies de inundação de corpos hídricos e lacustres afetados ou não por atividades antrópicas.
4	Baixa	Locais urbanizados e/ou semiurbanizados com precariedade nas construções e na infraestrutura para eventos pluviométricos de média/baixa intensidade. Áreas de inundação natural, como planícies lacustres e setores mais abrigados das planícies fluviais e fluvio-marinhas.
5	Muito Baixa	Área críticas que deveriam ser destinadas à manutenção de sua funcionalidade sistêmica original. Ausência de infraestrutura e total precariedade das construções humanas, fruto de uso e ocupação desordenados da terra. Ambientes naturalmente favoráveis à inundação, tais como corpos hídricos e planícies de inundação. Setores com grande declividade suscetíveis a movimentos de massa.

Fonte: Santos e Ross (2012).

3.5 Elaboração

Após a escolha das variáveis e atribuição dos graus de fragilidade de cada atributo, foram produzidos e correlacionados os quatro planos por meio da álgebra de mapas, que consiste na sobreposição dos mapas utilizando uma escala comum e pesos para cada classe conforme sua importância, gerando a carta de fragilidade potencial. Após a elaboração da carta de fragilidade ambiental potencial, foi realizada a intersecção com a carta de uso da terra, no intuito de chegar à carta de fragilidade ambiental emergente.

A determinação da equação utilizada na álgebra de mapas deste modelo para geração do mapa-síntese foi baseada na metodologia proposta por Barbosa (2020), que considera fatores de evidência para cada variável, determinando especificamente para cada atributo o

valor de referência de acordo com a particularidade da bacia do ribeirão Anicuns. O autor estabelece as equações a partir de cálculos matemáticos ao se adotar a Análise Hierárquica Processual (AHP) como método multicritério, cuja técnica foi proposta por Saaty (1980).

O geoprocessamento foi utilizado para a técnica de álgebra dos mapas na geração do mapa-síntese de fragilidade ambiental, utilizando a extensão Spatial Analyst (*Reclassify* e *Raster Calculator*) no ArcGis.

Para representar os graus de fragilidade ambiental nos mapeamentos gerados por este modelo, consideraram-se os intervalos e as cores de classes apresentados Quadro 6.

Quadro 6 - Graus de Fragilidade Ambiental Urbana com base nas Classes de Declividade

Grau de Fragilidade	Intervalo de Classe
Muito Baixa	1
Baixa	2
Média	3
Alta	4
Muito Alta	5

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

3.6 Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB) – Crepani et al. (2001)

Para aplicação do modelo proposto por Crepani et al. (2001), cuja elaboração do mapa de vulnerabilidade natural à perda de solo se baseia nas Unidades Territoriais Básicas (UTB), as variáveis relacionadas à geologia, geomorfologia (formas de relevo), pedologia, cobertura vegetal e intensidade pluviométrica foram classificadas e ponderadas com base nas pontuações de vulnerabilidade propostas pelos autores.

Esta metodologia consiste, primeiramente, na elaboração de um mapa preliminar de UTB, obtido através da análise e interpretação de imagem satelitária e, posteriormente, na associação das informações temáticas preexistentes ao mapa preliminar. Mesmo não sendo originalmente um modelo aplicado a áreas essencialmente urbanas, no presente trabalho foram atribuídas à variável de cobertura vegetal as particularidades referentes ao uso e cobertura da terra.

A estabilidade ou vulnerabilidade em relação à resistência ao processo erosivo das unidades de paisagem natural é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima. De acordo com esta metodologia, as unidades mais estáveis devem

apresentar valores mais próximos de 1,0, as intermediárias ao redor de 2,0 e as UTB mais vulneráveis devem ficar próximas de 3,0, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Avaliação da Vulnerabilidade das unidades de Paisagem Natural

Unidade	Relação Pedogênese/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece Pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio entre Pedogênese e Morfogênese	2,0
Instável	Prevalece Morfogênese	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

Os critérios e seus respectivos pesos, referentes à hierarquização da vulnerabilidade natural à perda de solo das UTB utilizadas pelo modelo de Crepani et al. (2001), estão detalhados a seguir.

3.7 Variáveis

3.7.1 Geologia

Com relação à constituição litológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns, foram atribuídos valores próximos à estabilidade (1,0) para as rochas que apresentaram maior grau de coesão, valores intermediários (próximos a 2,0) para as rochas que apresentaram valores moderados no seu grau de coesão, e valores próximos à vulnerabilidade (3,0) para as rochas que apresentaram os menores valores no seu grau de coesão. Desta forma, os autores consideram que seja possível analisar a resistência das rochas à denudação (intemperismo e erosão).

Assim, a classificação de vulnerabilidade à denudação das rochas está apresentada no Quadro 8, conforme estabelecido por Crepani et al. (2001).

Quadro 8 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Geologia

Litologias	Grau de Vulnerabilidade
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-xisto, 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
Mármores	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	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

3.7.2 Geomorfologia

Para classificar os dados geomorfológicos quanto a sua vulnerabilidade natural à perda de solo, Crepani et al. (2001) consideraram as formas de relevo analisando os índices morfométricos referentes à dissecação do relevo pela drenagem, amplitude altimétrica e declividade.

O modelo proposto sugere que relevos planos a suavemente ondulados possuem formas que não favorecem a ocorrência de processos erosivos, sendo atribuídos nesses casos valores próximos de 1,0 na escala de vulnerabilidade. Para os relevos ondulados, a metodologia propõe valores de vulnerabilidade que variam de 1,7 a 2,3, dependendo da grandeza dos índices morfométricos (dissecação, amplitude de relevo e declividade). Já para os relevos fortemente ondulados e escarpados, os valores variam de 2,4 a 3,0, também dependendo da grandeza dos índices morfométricos.

Com relação às formas de acumulação, os valores atribuídos quanto à vulnerabilidade são diferenciados. Terraços fluviais, áreas de relevo plano e estável são menos vulneráveis, enquanto as planícies, áreas sujeitas a inundações e de grande dinâmica são mais vulneráveis.

Para esta variável, as formas de relevo foram classificadas de acordo com os valores propostos por Crepani et al. (2001), apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Geomorfologia

Forma de Relevo	**Influência da forma na erosão**	**Grau de Vulnerabilidade**
Plano a suavemente ondulado	Não Favorece	1,0 a 1,6
Ondulado	Moderado	1,7 a 2,3
Fortemente ondulado e formas de acumulação	Favorece	2,4 a 3,0

Fonte: Crepani et al. (2001) adaptado por Spörl (2007).

3.7.3 Pedologia

Em relação à variável pedologia, os tipos de solos foram classificados considerando os graus de vulnerabilidade e resistência de cada classe pedológica à ocorrência de processos erosivos, dependendo das suas características físicas, como textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, profundidade e pedregosidade. Neste modelo, a principal característica considerada para estabelecer as classes de vulnerabilidade relaciona-se ao grau de desenvolvimento ou maturidade do solo.

Para Crepani et al. (2001), uma unidade de paisagem natural é considerada estável quando os eventos naturais favorecem o processo de pedogênese e a ocorrência de solos mais desenvolvidos. Por outro lado, uma unidade de paisagem natural é considerada vulnerável quando prevalecem os processos de morfogênese, com predomínio de solos imaturos e pouco desenvolvidos.

Nos terrenos onde ocorrem solos estáveis, foram atribuídos valores de vulnerabilidade próximos a 1,0; valores próximos a 2,0 em solos intermediários; e onde ocorrem os solos mais vulneráveis foram atribuídos valores próximos a 3,0, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Pedologia

Classe de Solo	**Grau de Vulnerabilidade**
Latossolo Amarelo	1,0
Latossolo Vermelho-Amarelo	
Latossolo Vermelho-Escuro	
Latossolo Roxo	
Latossolo Bruno	
Latossolo Húmico	
Latossolo Bruno Húmico	
Argissolo Amarelo	2,0
Argissolo Vermelho-Amarelo	
Argissolo Vermelho-Escuro	
Argissolo Vermelho	
Luvissolo	
Chernossolo Háplico	
Chernossolo Argilúvico	
Planossolo	
Cambissolo	2,5
Neossolo Litólico	3,0
Neossolo Flúvico	
Neossolo Reolítico	
Neossolo Quartzarênico	
Vertissolo	

Organossolo	
Gleissolo	
Plintossolo	
Plintossolo Pétrico	
Afloramento Rochoso	

Fonte: Crepani et al. (2001).

3.7.4 Cobertura Vegetal

Para esta variável, a densidade de cobertura vegetal é o parâmetro a ser obtido, uma vez que Crepani et al. (2001) consideraram que a cobertura vegetal representa a defesa da unidade de paisagem contra os efeitos dos processos modificadores das formas de relevo. No presente trabalho, a adequação em relação à esta variável considerou fatores relacionados ao adensamento da cobertura do solo e situações de solo exposto, associando os parâmetros estabelecidos pelos autores e aqueles encontrados na bacia.

Dessa maneira, a densidade de cobertura vegetal agiria como um fator de proteção da unidade contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão, evitando o impacto direto da ação das chuvas, impedindo a compactação do solo e aumentando a capacidade de infiltração do solo pela difusão do fluxo d'água. Portanto, 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).

Com relação à classificação da vulnerabilidade natural à perda de solo em função da cobertura vegetal, foram considerados os valores estabelecidos por Crepani et al. (2001) (Quadro 11).

Quadro 11 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Cobertura Vegetal

Cobertura Vegetal	**Nível de Estabilidade**	**Grau de Vulnerabilidade**
Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Ombrófila Mista.	Estável	Próximo de 1,0
Floresta Estacional Semidecidual; Formação Campinarana, fisionomia Florestada e fisionomia especifíca (Com palmeiras ou Sem palmeiras); Savana Florestada e Savana Estépica Florestada; Estepe arbórea densa, com ou sem palmeiras. Incluem-se, nesta categoria, a Vegetação com influência marinha, Vegetação com influência fluviomarinha e Vegetação com influência	Moderadamente Estável	Entre 1,4 e 1,7

fluvial e/ou lacustre.		
Savana Arborizada e Savana-Estépica Arborizada; Floresta Estacional Decidual (acima de 50% de caducifolia); Campinarana Arborizada; Estepe Arborizada, (arbórea aberta, com ou sem palmeiras); Buritizal com influência fluvial e/ou lacustre.	Medianamente Estável ou Vulnerável	Próximo de 2,0
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 marinha (Restinga), porte arbustivo (das dunas); Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre, porte arbustivo (com ou sem palmeiras); Refúgio Montano e Refúgio Alto-montano.	Moderadamente Vulnerável	Entre 2,3 e 2,6
Savana Gramíneo-Lenhosa, Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa e Estepe Gramíneo-Lenhosa; Campinarana Gramíneo-Lenhosa; 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).	Vulnerável	Próximo de 3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

3.7.5 Intensidade Pluviométrica

Para esta variável, o modelo proposto por Crepani et al. (2001) considerou a intensidade e distribuição do volume precipitado representando o contraponto do papel de defesa da unidade de paisagem desempenhado pela cobertura vegetal, uma vez que a principal causa da denudação é a ação da chuva agindo sobre o solo, resultando na capacidade erosiva.

Dentre as principais características físicas das chuvas envolvidas nos processos erosivos, constam a quantidade, distribuição sazonal e intensidade, sendo a última considerada a característica mais importante para os autores na aplicação deste modelo, uma vez que representa uma relação entre as outras duas, resultando na quantidade de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética.

Portanto, para os critérios de hierarquização do comportamento pluviométrico, foram atribuídos valores de acordo com a escala de erosividade das chuvas e valores de vulnerabilidade à perda de solo, apresentados no Quadro 12.

Quadro12 - Classificação da Vulnerabilidade relacionada à Intensidade Pluviométrica

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

Fonte: Crepani et al. (2001).

3.8 Elaboração

Após a atribuição dos pesos para todas as características das variáveis adotadas neste modelo ambiental, esta metodologia apresenta a vulnerabilidade natural à perda de solo de cada unidade ambiental com base nas informações provenientes de cada tema avaliado: geologia, geomorfologia, vegetação, solos e clima.

O geoprocessamento foi utilizado para a técnica de álgebra dos mapas na geração do mapa-síntese de vulnerabilidade ambiental, utilizando a extensão Spatial Analyst (*Reclassify* e *Raster Calculator*) no ArcGIS.

Para representar os graus de vulnerabilidade natural à perda de solos nos mapeamentos gerados por este modelo, consideraram-se os intervalos de classes apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 - Graus de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com Base nas UTB

Grau de Vulnerabilidade	Intervalo de Classe
Muito Baixa	1,0 – 1,4
Baixa	1,4 – 1,8
Média	1,8 – 2,2
Alta	2,2 – 2,6

Muito Alta	2,6 – 3,0

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

3.9 Comparação dos modelos

Os planos de informação gerados pelos dois modelos empíricos foram comparados quanto às classes de fragilidade e vulnerabilidade, quanto à predisposição natural dos terrenos em serem erodidos e consequente perda de solo, considerando os termos absolutos (área) e os termos relativos (porcentagem), com o intuito de auxiliar no entendimento das convergências e divergências entre os dados extraídos dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da área de estudo

4.1.1 Carta de Pedologia

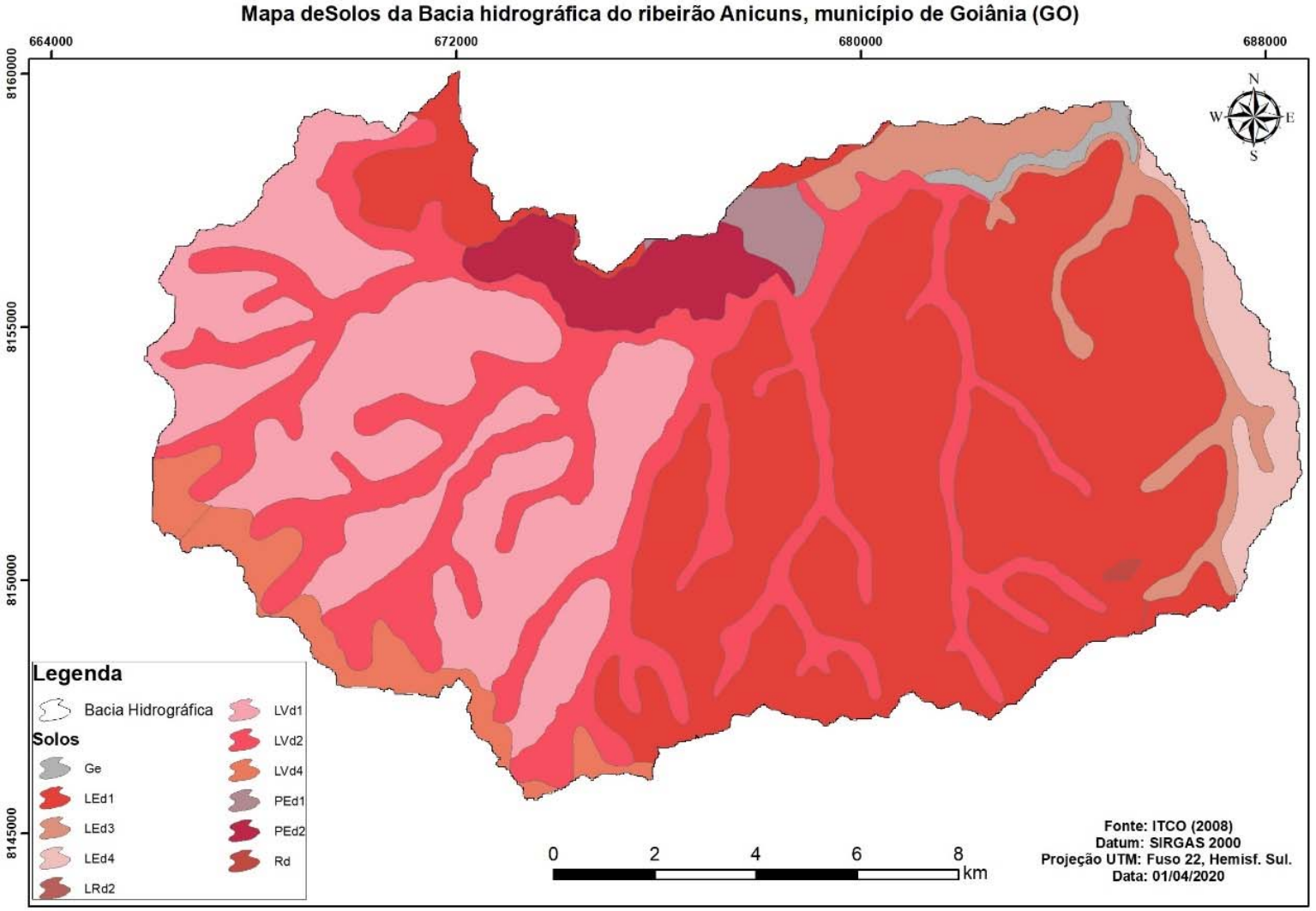
Foram diagnosticadas quatro classes pedológicas na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns: Latossolos, Argissolos, Gleissolos e Neossolos Litólicos. A espacialização dos solos na área de estudo está apresentada no Mapa 2, e as especificações de áreas (km²) e percentagens de distribuição constam no Quadro 14.

Quadro 14 - Distribuição das classes pedológicas na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns

Tipos de Solo	**Área**	
	km²	**(%)**
Gleissolo (Ge)	1,94	0,89
Neossolo Litólico (Rd)	0,50	0,23
Argissolo Vermelho Escuro (PEd1 e PEd2)	49,68	22,45
Latossolo Vermelho-Amarelo (LEd1; LEd3; e LEd4)	74,92	33,86
Latossolo Vermelho Escuro (LVd1; LVd2; e LVd4)	94,20	42,57
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte : Elaborado pelo pesquisador.

Mapa 2 - Carta de Solos da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns



Os Latossolos, solos mais representativos da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, ocorrem de forma contínua por toda a extensão da área estudada, subdividindo-se em duas classes: Latossolo Vermelho Escuro, caracterizado por textura argilosa, ocorrendo em relevo suave ondulado, e Latossolo Vermelho-Amarelo, caracterizado por textura argilosa e ocorrendo em declividades mais acentuadas, sendo ambos distróficos. Segundo Campos et al. (2003), são solos em avançado estágio de intemperismo, compostos por quantidades variáveis de óxidos de ferro e alumínio, argilas com estrutura mineral 1:1, quartzo e outros minerais resistentes ao intemperismo.

O Argissolo Vermelho Escuro, caraterizado pela sua acidez, uma vez que a saturação por bases é inferior a 50%, possui textura argilosa a muito argilosa, com pedregosidade, concreções e cascalho, ocorrendo na porção norte da bacia, associado a um relevo fortemente ondulado.

Pontualmente, a sudeste da área de estudo, ocorre o Neossolo Litólico distrófico, tipo de solo raso e pouco desenvolvido, associado a afloramentos rochosos e relevo acidentado. Na região nordeste da bacia, associada à foz do ribeirão Anicuns, ocorre o Gleissolo, considerado predominantemente hidromórfico, na parte mais baixa do relevo.

4.1.2 Carta de Geologia

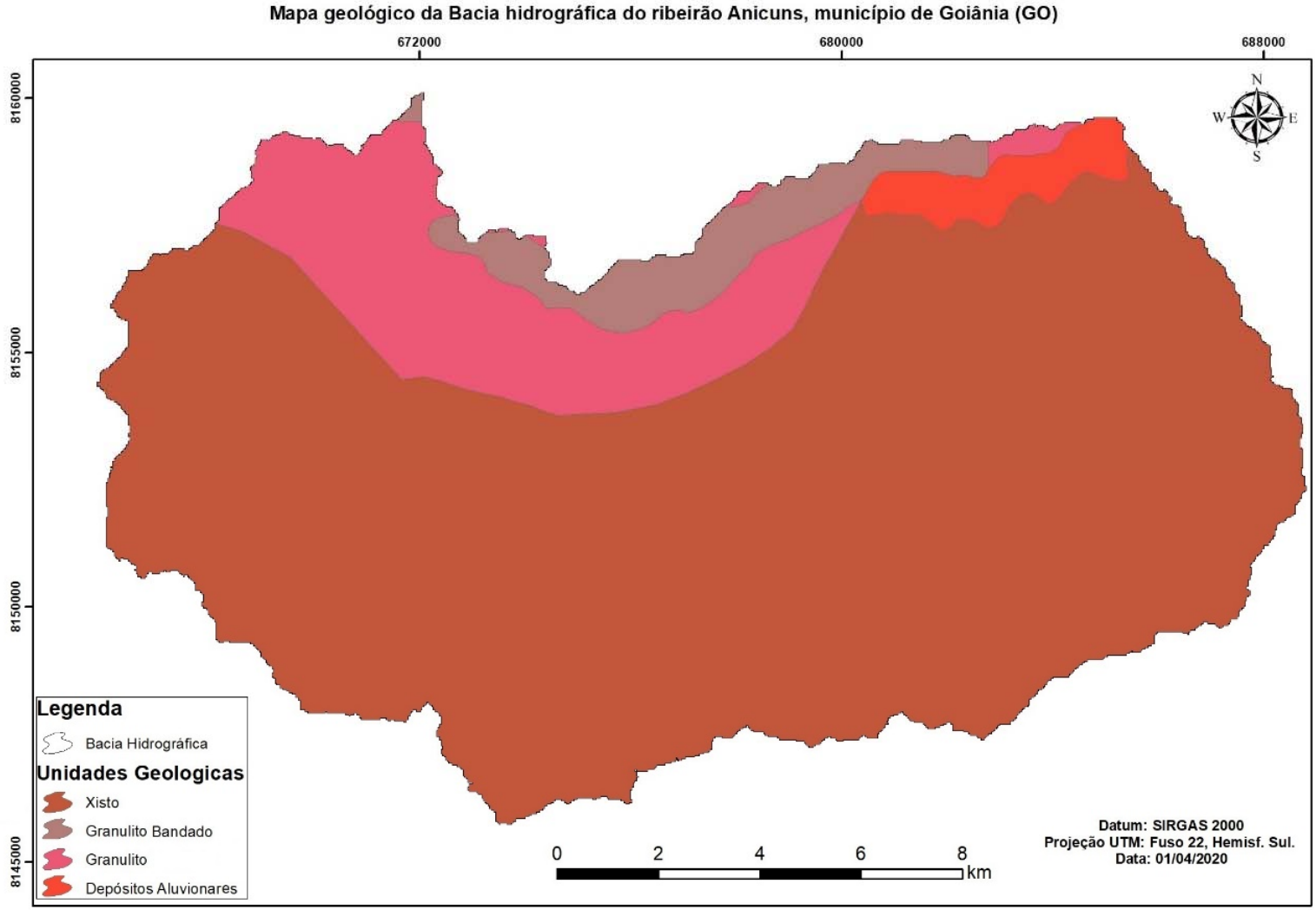
Litologicamente, a região da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns é composta pelas rochas metamórficas do Complexo Granulítico Anápolis-Itauçú, como granulitos bandados e anfibolitos, e da Unidade B do Grupo Araxá, com predomínio dos xistos. Ocorrem ainda na bacia Depósitos Aluvionares, constituídos por sedimentos areno-argilosos, soto-pondo indistintamente as unidades anteriores. A espacialização das unidades geológicas na área de estudo está apresentada no Mapa 3, e as especificações de áreas (km²) e percentagens de distribuição constam no Quadro 15.

Quadro 15 - Distribuição das Litologias na bacia do ribeirão Anicuns

Litologia	**Área**	
	km²	**(%)**
Depósitos Aluvionares	9,73	4,40
Granulitos bandados	14,16	6,40
Granulitos	45,36	20,50
Xisto	151,99	68,70
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Mapa 3 - Carta Geológica da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns



O litotipo mais abundante da bacia do ribeirão Anicuns é o xisto do Grupo Araxá, ocorrendo de maneira contínua e representando quase 70% da área estudada, favorecendo a ocorrência dos Latossolos. Na região norte da bacia, área de ocorrência dos Argissolos, afloram os granulitos do Complexo Anápolis-Itauçu, com variações bandadas e anfibolíticas. Os Depósitos Aluvionares ocorrem pontualmente na região nordeste, associados à foz do ribeirão Anicuns, propiciando a ocorrência do Gleissolo.

4.1.3 Carta de Declividade

A bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns apresenta variação quando às classes de declividade, onde é possível observar o predomínio de um relevo plano a suavemente ondulado. A carta de declividade foi elaborada de acordo com a classificação proposta por Santos e Ross (2012), utilizando-se imagens *Raster* da base cartográfica do Mapa Urbano Básico Digital de Goiânia (MUBDG, 2010) na escala de 1:5000.

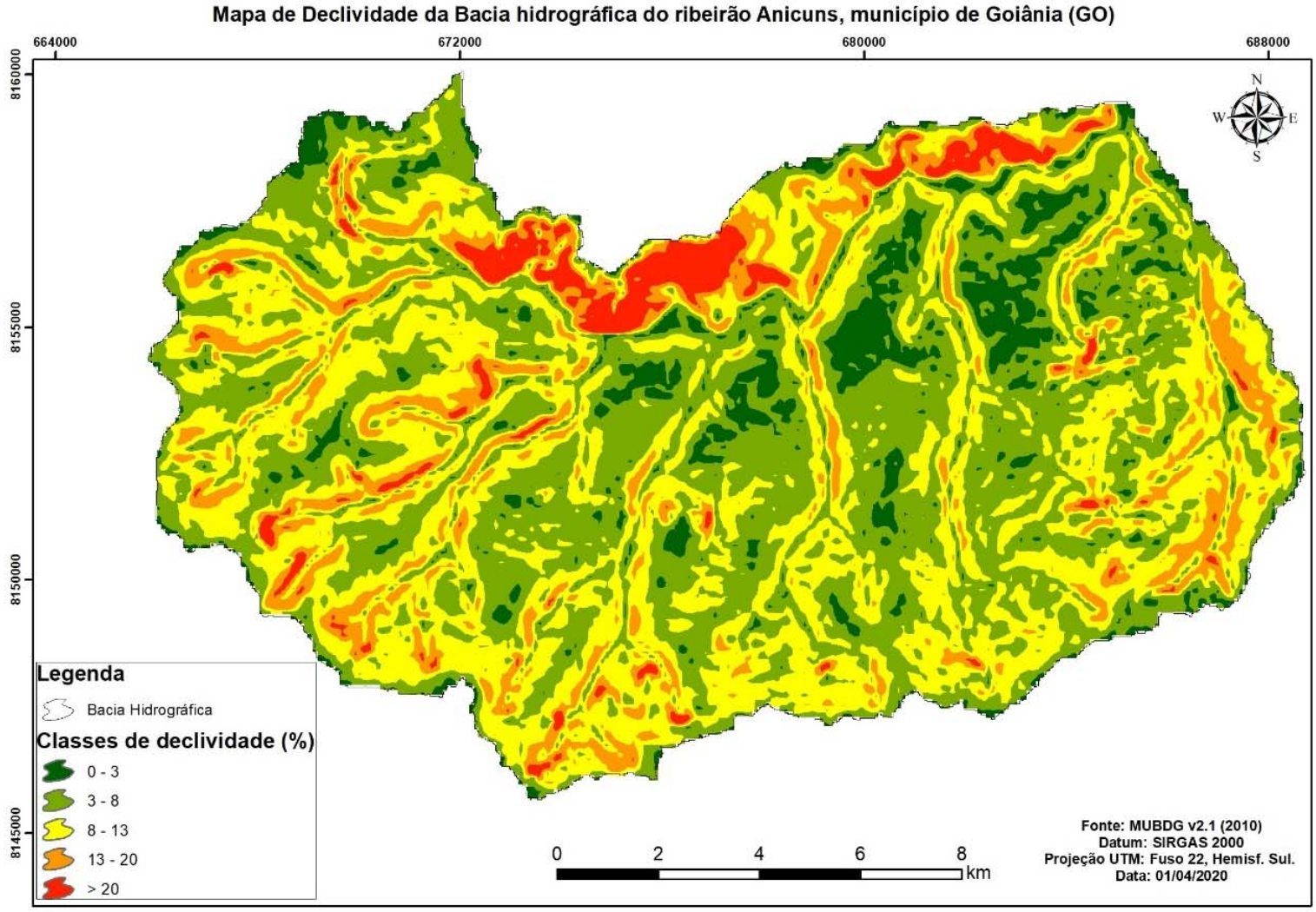
A espacialização das classes de declividade na área de estudo está apresentada no Mapa 4, e as especificações de áreas (km²) e percentagens de distribuição constam no Quadro 16.

Quadro 16 - Distribuição das classes de declividade na bacia do ribeirão Anicuns

Classes de Declividade (%)	**Área**	
	km²	**(%)**
0 - 3	32,97	14,90
3 – 8	82,44	37,26
8 – 13	60,32	27,26
13 – 20	25,96	11,73
> 20	19,55	8,84
TOTAL	221,24	100,00

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Mapa 4 - Carta de Declividade na bacia do ribeirão Anicuns



Cerca de 80% de toda a área da bacia do ribeirão Anicuns possui declividades abaixo de 13%, condicionando o predomínio de um relevo plano a suavemente ondulado.

As classes de declividades mais acentuadas estão, em sua maioria, associadas aos fundos de vales na margem direita do ribeirão Anicuns. As declividades acima de 20% concentram-se pontualmente na margem esquerda do ribeirão Anicuns, região norte da área estudada, com comprimentos de rampas curtos e aclives acentuados.

4.1.4 Carta de Precipitação

As informações pluviométricas, referentes a uma série histórica de 20 anos, foram obtidas a partir de dados do sensor TRMM em conjunto com a interpolação com os dados de precipitação da estação do INMET. De acordo com os dados da Estação Meteorológica da cidade de Goiânia (INMET, 2018) no período entre 1981 a 2010, compreendendo 30 anos de amostragem, a bacia do ribeirão Anicuns localiza-se em uma região com média anual de 1633 mm precipitados, com média de 136,08 mm mensais.

Trata-se de uma região com duas estações bem definidas com relação às chuvas. A estação chuvosa vai de outubro a abril, concentrando aproximadamente 93% do acumulado anual de precipitação, enquanto a estação seca compreende um período de estiagem nos demais meses do ano, com cerca de 7% da precipitação anual.

Conforme a metodologia proposta nos modelos adotados neste trabalho, os índices pluviométricos se enquadraram em uma mesma classe, tanto no modelo de Santos e Ross (2012) quanto no modelo de Crepani et al. (2001), como demonstrado nas especificações de áreas (km²) e percentagens de distribuição dos Quadros 17 e 18, respectivamente. A espacialização das classes de índices pluviométricos na área de estudo está apresentada no Mapa 5.

Quadro 17 - Distribuição da classe do índice de precipitação na bacia do ribeirão Anicuns, de acordo com Santos e Ross (2012)

Índice Pluviométrico	**Área**	
	km²	**(%)**
Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas	221,24	100,00
TOTAL	221,24	100,00

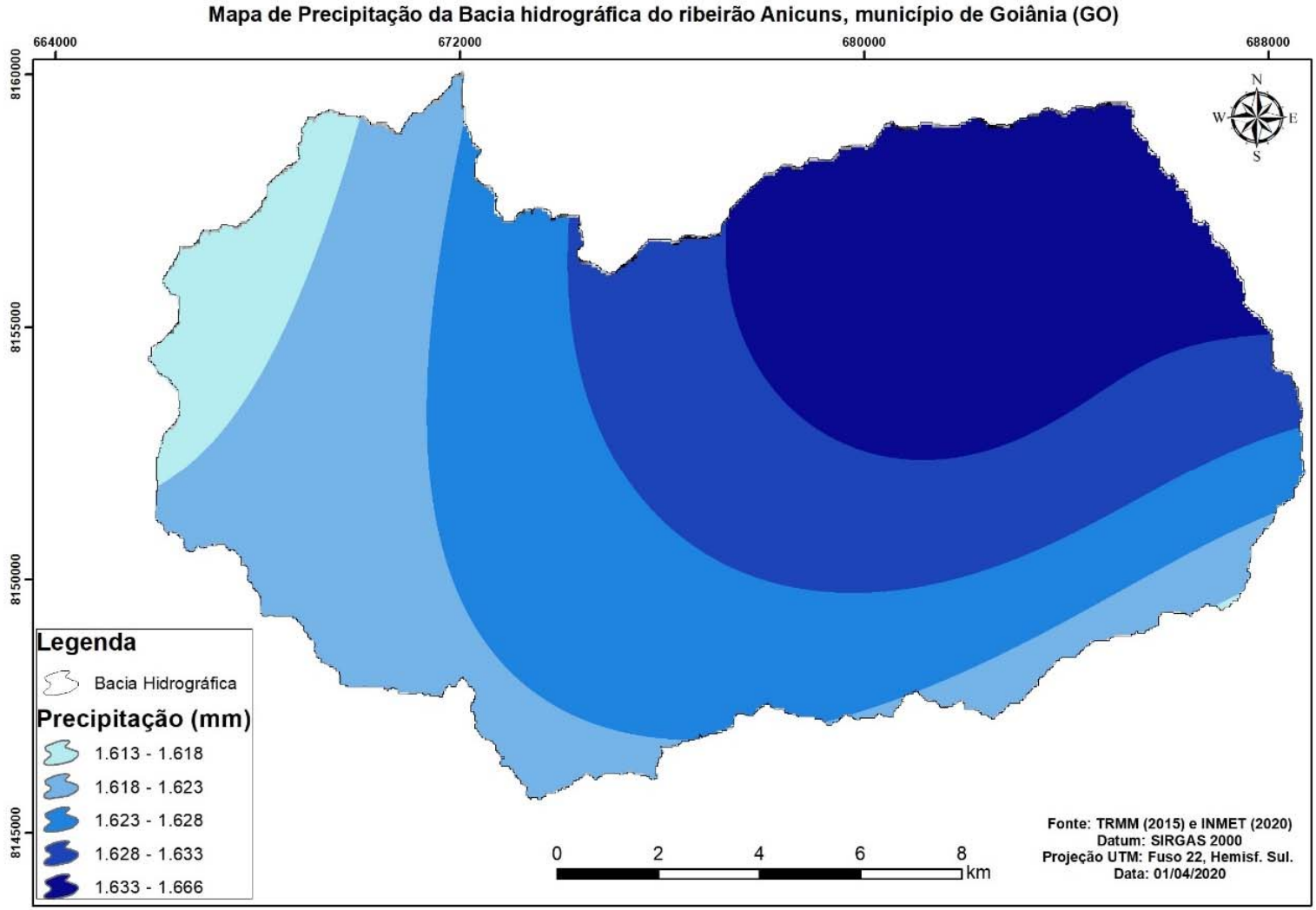
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Quadro 18 - Distribuição da classe do índice de precipitação na bacia do ribeirão Anicuns, de acordo com Crepani et al. (2001)

Índice Pluviométrico (mm/mês)	**Área**	
	km²	**(%)**
150 – 175	221,24	100,00
TOTAL	221,24	100,00

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Mapa 5 - Carta de Precipitação na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns



4.1.5 Carta de Uso da terra

Conforme os dados levantados, os remanescentes de vegetação existentes na bacia do ribeirão Anicuns são pouco expressivos, levando em consideração a sua dimensão e os usos do solo, que são intensos. A maior intensidade de uso e ocupação se deve ao predomínio de superfícies majoritariamente planas a suave onduladas, e, principalmente, por ser uma bacia localizada na capital do estado de Goiás.

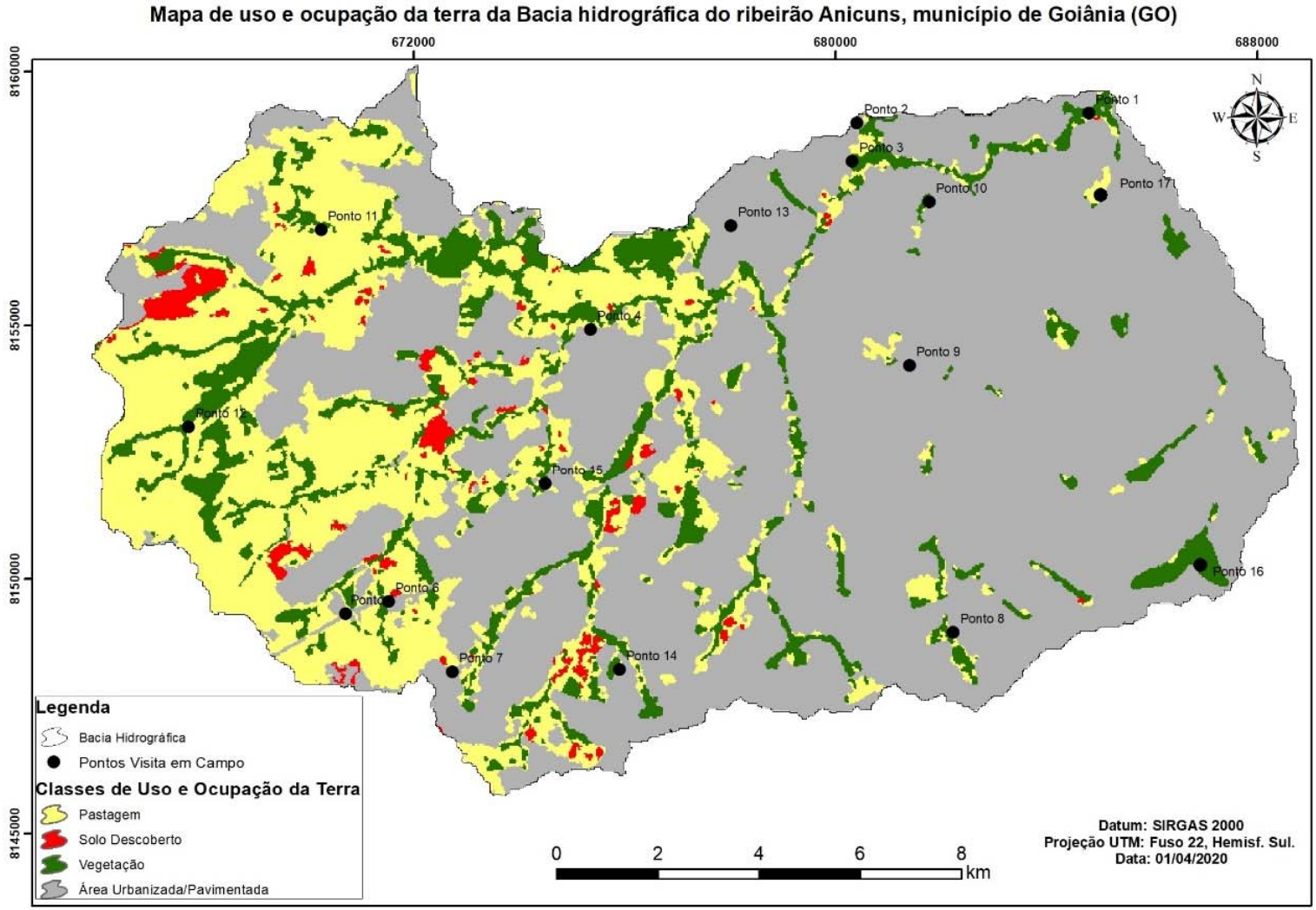
As categorias utilizadas para classificar o uso da terra foram de áreas urbanizadas, solo descoberto e vegetação. Foram visitados 17 pontos distribuídos por toda a bacia, de modo a possibilitar uma melhor definição dos limites entre as categoria analisadas. A espacialização das classes de uso da terra na área de estudo está apresentada no Mapa 6, e as especificações de áreas (km²) e percentagens de distribuição constam no Quadro 19.

Quadro 19 - Distribuição das classes de Uso da Terra na bacia do ribeirão Anicuns

Classes de Uso e Ocupação do Solo	**Área**	
	km²	**(%)**
Vegetação (APP e Parques)	79,27	35,82
Pastagem	51,07	23,08
Solo Descoberto	23,77	10,74
Área urbana	118,20	53,42
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Mapa 6 - Carta de Uso da Terra da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns



Observa-se que, ao somar as classes de solo descoberto e área urbanizada, chega-se a um total de 152,87 km² ou 66,51% da área total da área estudada, evidenciando o adensamento urbano intenso na bacia do ribeirão Anicuns. A ocorrência de cobertura vegetal está associada à existência de alguns parques municipais e condicionada às margens de corpos hídricos.

4.2 Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana com base nas Classes de Declividade – Santos e Ross (2012)

A elaboração da carta de Fragilidade Ambiental Urbana com Base nas Classes de Declividade na bacia do ribeirão Anicuns, conforme modelo proposto por Santos e Ross (2012), foi realizada a partir da combinação dos dados de declividade, índices pluviométricos, pedologia e uso e cobertura do solo relacionados com as condições da infraestrutura urbana.

O Quadro 20 apresenta a classificação das variações juntamente com as áreas e cada tipo de característica de fragilidade ambiental encontrada na área da bacia estudada.

Quadro 20 - Classes de Fragilidade Ambiental

Grau de Fragilidade	Classe de Fragilidade	Variável	Área (km²)	Área (%)
Declividade				
1	Muito Baixa	0-3	32,97	14,90
2	Baixa	3-8	82,44	37,26
3	Média	8-13	60,32	27,26
4	Alta	13-20	25,96	11,73
5	Muito Alta	>20	19,55	8,84
Precipitação				
1	Muito Baixa	-	-	-
2	Baixa	-	-	-
3	Média	-	-	-
4	Alta	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% dos chuvas.	221,24	100,00
5	Muito Alta	-	-	-
Pedologia				
1	Muito Baixa	Latossolo Vermelho Escuro	94,20	42,57
2	Baixa	Latossolo Vermelho-Amarelo	74,92	33,86
3	Média	Argissolo Vermelho Escuro	49,68	22,45
4	Alta	-	-	-
5	Muito Alta	Gleissolo e Neossolo Litólico	2,44	1,12

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A partir da análise empírica, foi possível estabelecer as áreas consideradas como de maior criticidade, do ponto de vista da Fragilidade Potencial e Emergente. As classes de Fragilidade Potencial estão relacionadas às áreas onde o equilíbrio dinâmico natural foi poupado das atividades humanas, onde a morfodinâmica encontra-se em estado natural, predominando os processos de intemperismo físico-químico sob a cobertura vegetal. Já a Fragilidade Emergente relaciona-se às áreas onde as atividades humanas desestabilizaram o equilíbrio dinâmico, onde as condições naturais de cobertura vegetal deram lugar a pastagens, agricultura, etc., possibilitando a atuação direta dos agentes climáticos, principalmente as chuvas, sobre os solos (SPÖRL, 2007).

De acordo com os dados apresentados abaixo, observa-se um predomínio, na bacia do ribeirão Anicuns, das classes “Muito Baixa” e “Baixa”, perfazendo 166,93 km² (75,30%) do total da área estudada, enquanto 20,60 km² (9,30%) foram classificados como áreas de “Alta” ou “Muito Alta” no grau de fragilidade ambiental potencial (Quadro 21).

Quadro 21 - Área de Fragilidade Ambiental Potencial

Classes de Fragilidade Potencial	Área (km²)	Área (%)
Muito Baixa	103,78	46,81
Baixa	63,15	28,49
Média	34,14	15,40
Alta	12,43	5,61
Muito Alta	8,17	3,69
TOTAL	221,24	100,00

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

O predomínio das classes de menor fragilidade justifica-se pelas características observadas na bacia do ribeirão Anicuns, que apresenta um encaixamento na margem esquerda, exibindo rampas curtas e aclives acentuados, e na margem direita uma inclinação suave e gradativa, características associadas aos baixos índices de dissecação do relevo, principalmente na margem direita.

Considerando essa particularidade da área estudada, e tendo em vista que a fragilidade é condicionada também por outras variáveis, como tipo de solo, uso da terra e características de pluviometria, adotou-se, no presente trabalho, a Equação 1, proposta por Barbosa (2020), para a elaboração da carta de Fragilidade Ambiental Potencial (Mapa 7) em ambiente SIG:

$$FAP = De * 0{,}2633 + Pe * 0{,}1219 + Plu * 0{,}0569 \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

FAP = Fragilidade Ambiental Potencial

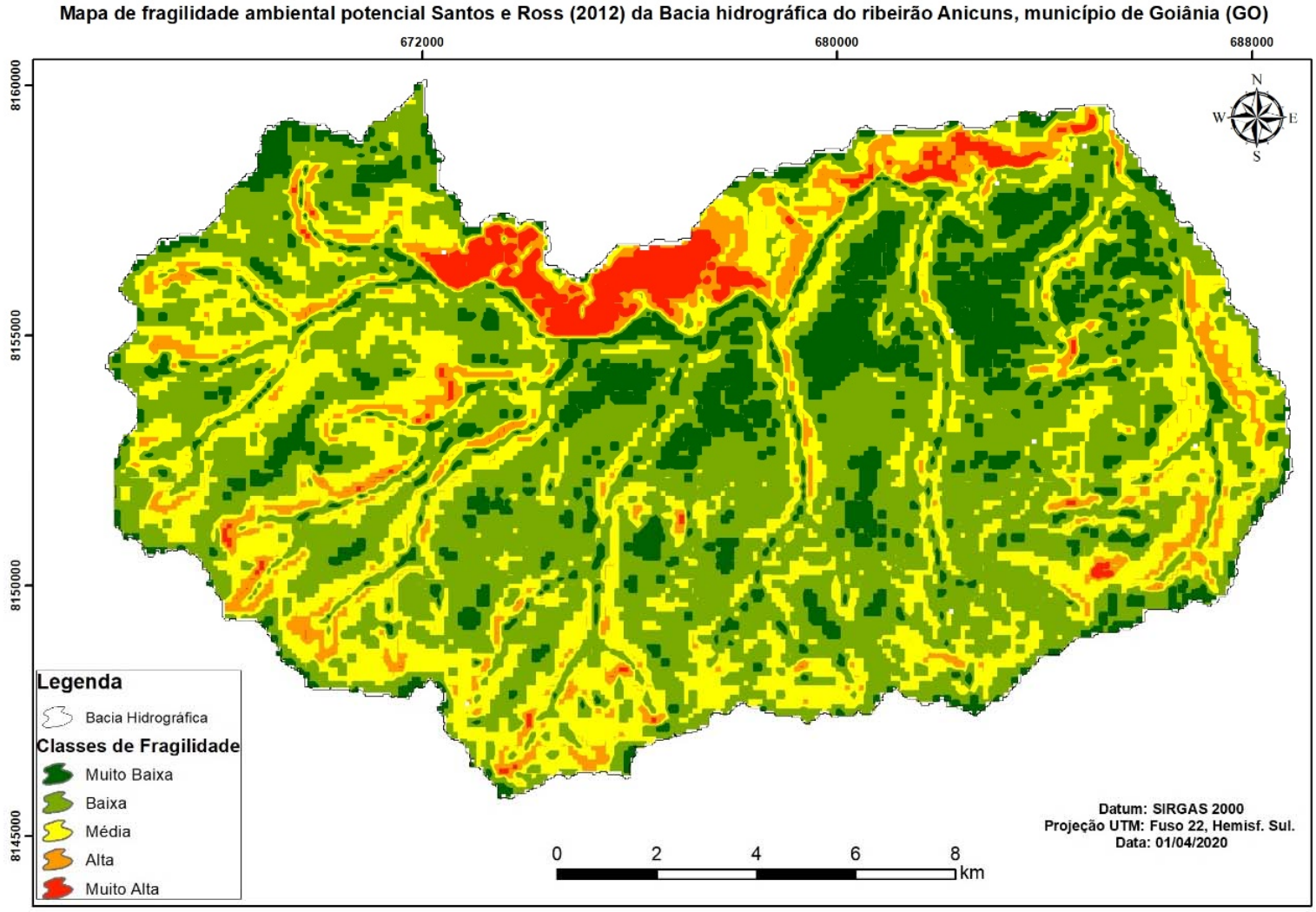
De = Declividade

Pe = Pedologia

Plu = Pluviometria

O predomínio de Latossolos e de um relevo plano a suavemente ondulado, na bacia do ribeirão Anicuns, contribuiu para a ocorrência majoritária das classes “Baixa” e “Muito Baixa”. Na margem esquerda, a presença de Argissolos e de declividades mais acentuadas foram fatores determinantes para a ocorrência das classes “Alta” e “Muito Alta”.

Mapa 7 - Carta de Fragilidade Ambiental Potencial



Para elaboração da carta de Fragilidade Ambiental Emergente, foi realizada a interpolação dos dados da carta de Fragilidade Ambiental Potencial com a carta de Uso da Terra, conforme classificação proposta por Santos e Ross (2012), na qual os autores relacionam a urbanização (cobertura do solo) com o tipo de solo e fatores associados a processos erosivos (Quadro 22).

Quadro 22 - Fragilidade Ambiental em relação à urbanização e fatores associados a processos erosivos

Grau de Fragilidade	Classe de Fragilidade	Tipo de Solo e Nível de Urbanização	Área (%)
1	**Muito Baixa**	Latossolos Vermelhos eutróficos argissólicos, Latossolos Vermelhos eutróficos típicos e Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos argissólicos. **Solos localizados preferencialmente em setores de baixo grau de urbanização contidos em áreas de baixa a média declividade**.	42,57
2	**Baixa**	Latossolos Vermelhos eutróficos típicos. **Solos localizados em setores de urbanização efetivamente consolidada e locais destinados à atividade industrial, com drenagem medianamente eficiente, com predomínio de impermeabilização por asfaltamento e concretagem, apresentando baixa a média declividade, com baixa a média presença de equipamentos para controle de cheias, infiltração e redução do escoamento nas vias de circulação, nos loteamentos e nos estabelecimentos**.	33,86
3	**Média**	Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos latossólicos e Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos abrúpticos plintossólicos. **Locais de muito baixa a muito alta declividade. Existência de cabeceiras de drenagens no terço superior de colinas dissecadas com vertentes côncavas convergentes. Baixa eficiência na drenagem urbana e elevado índice de vias não pavimentadas com solos compactados**.	22,45
4	**Alta**	Argissolos Vermelho-Amarelos de textura média/arenosa; Neossolos quartzarênicos - em áreas com infraestrutura urbana. **Áreas urbanas com drenagem eficiente, baixa declividade e presença de ações para controle de cheias, infiltração e redução de escoamento nas vias de circulação, nos lotes e nas construções**.	-
5	**Muito Alta**	Neossolos Litólicos distróficos fragmentários. Neossolos Litólicos distróficos típicos, Neossolos Quartzarênicos órticos sobrepostos a substratos de arenitos e siltitos, podendo ocorrer afloramentos rochosos, além de depósitos aluvionares, confinados nos vales fluviais dos ribeirões e córregos. **Malha urbana não consolidada com solo exposto em área industrial com elevado fluxo de veículos de grande porte**.	1,12

Fonte: Adaptado de ITCO (2008) e Santos e Ross (2012).

Considerando a particularidade da área estudada quanto à antropização e aos fatores de urbanização e solo descoberto (que ocupa 141,97 km² ou 64,13% da área), nesse caso foi admitido como fator de evidência maior. Após as adequações feitas com referência nas regras de classificação da fragilidade emergente, foram aplicados os pesos e as variáveis da Equação 2, proposta por Barbosa (2020) para elaboração da carta de Fragilidade Ambiental Potencial (Mapa 8) em ambiente SIG.

$$FAPE = FAP + (Us * 0{,}5579) \qquad \text{Equação 2}$$

Onde,

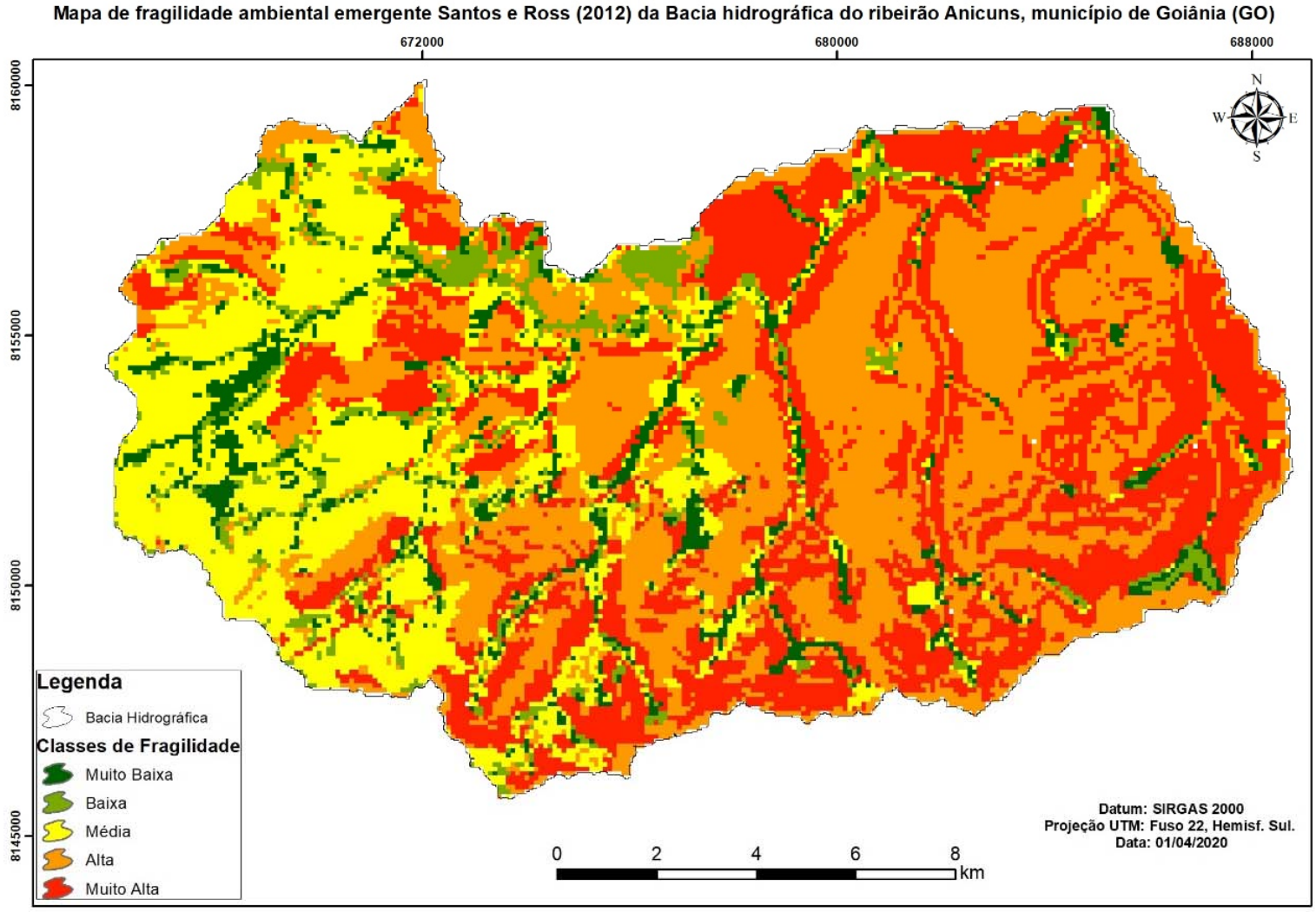
FAPE = Fragilidade Ambiental Emergente

FAP = Fragilidade Ambiental Potencial

Us = Uso da Terra

Em decorrência da grande ocorrência de áreas urbanizadas na bacia, e pelo fato da atribuição de um peso significativo à variável “Uso da Terra”, o resultado obtido demonstrou que a classe mais representativa na bacia do ribeirão Anicuns corresponde a “Muito Alta” fragilidade ambiental urbana.

Mapa 8 - Carta de Fragilidade Ambiental Emergente



4.3 Modelo de Vulnerabilidade Natural à perda de solo com base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB) – Crepani et al. (2001)

A elaboração da carta de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com Base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB) na bacia do ribeirão Anicuns, conforme modelo proposto por Crepani et al. (2001), foi realizada a partir da análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima, definindo a resistência aos processos erosivos.

O Quadro 23 apresenta a classificação das variações juntamente com as áreas e cada tipo de característica de vulnerabilidade natural encontrada na área da bacia estudada.

Quadro 23 - Classes de Vulnerabilidade Natural

Grau de Vulnerabilidade	Variável	Área (km^2)	Área (%)
Declividade			
1,0 a 1,6	Plano a suavemente ondulado	107,30	48,50
1,7 a 2,3	Ondulado	78,76	35,60
2,4 a 3,0	Fortemente ondulado e formas de acumulação	35,18	15,90
Precipitação (mm/mês)			
1,5	150 – 175	221,24	100,00
	Pedologia		
1,0	Latossolo Vermelho-Escuro	94,20	42,57
1,0	Latossolo Vermelho-Amarelo	74,92	33,86
2,0	Argissolo Vermelho-Escuro	49,68	22,45
3,0	Neossolo Litólico	0,50	0,23
3,0	Gleissolo	1,94	0,89
Cobertura Vegetal			
Próximo de 1,0	Estável	-	-
Entre 1,4 e 1,7	Moderadamente Estável - Vegetação (APP e Parques)	79,27	35,82
Próximo de 2,0	Medianamente Estável ou Vulnerável - Pastagem	51,07	23,08
Entre 2,3 e 2,6	Moderadamente Vulnerável – Solo descoberto	23,77	10,74
Próximo de 3,0	Vulnerável – Área urbana	118,20	53,42
Geologia			
1,2	Granulitos	59,52	26,90
1,7	Xisto	151,99	68,70
3,0	Depósitos aluvionares	9,73	4,40

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Após atribuir-se valores para o grau de vulnerabilidade de cada atributo, para cada uma das variáveis selecionadas, este modelo apresenta a vulnerabilidade de cada unidade ambiental em função das informações provenientes de cada tema avaliado. Assim, cada UTB recebe um valor final resultante da média aritmética dos valores individuais, conforme demostrado na Equação 3, utilizada para elaboração da carta de Vulnerabilidade Natural à

Perda de Solo (Mapa 9) em ambiente SIG:

$$V = \frac{(\mathrm{G} + \mathrm{D} + \mathrm{P} + \mathrm{Vg} + \mathrm{C})}{5} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde,

V = Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo

G = Vulnerabilidade para o tema Geologia

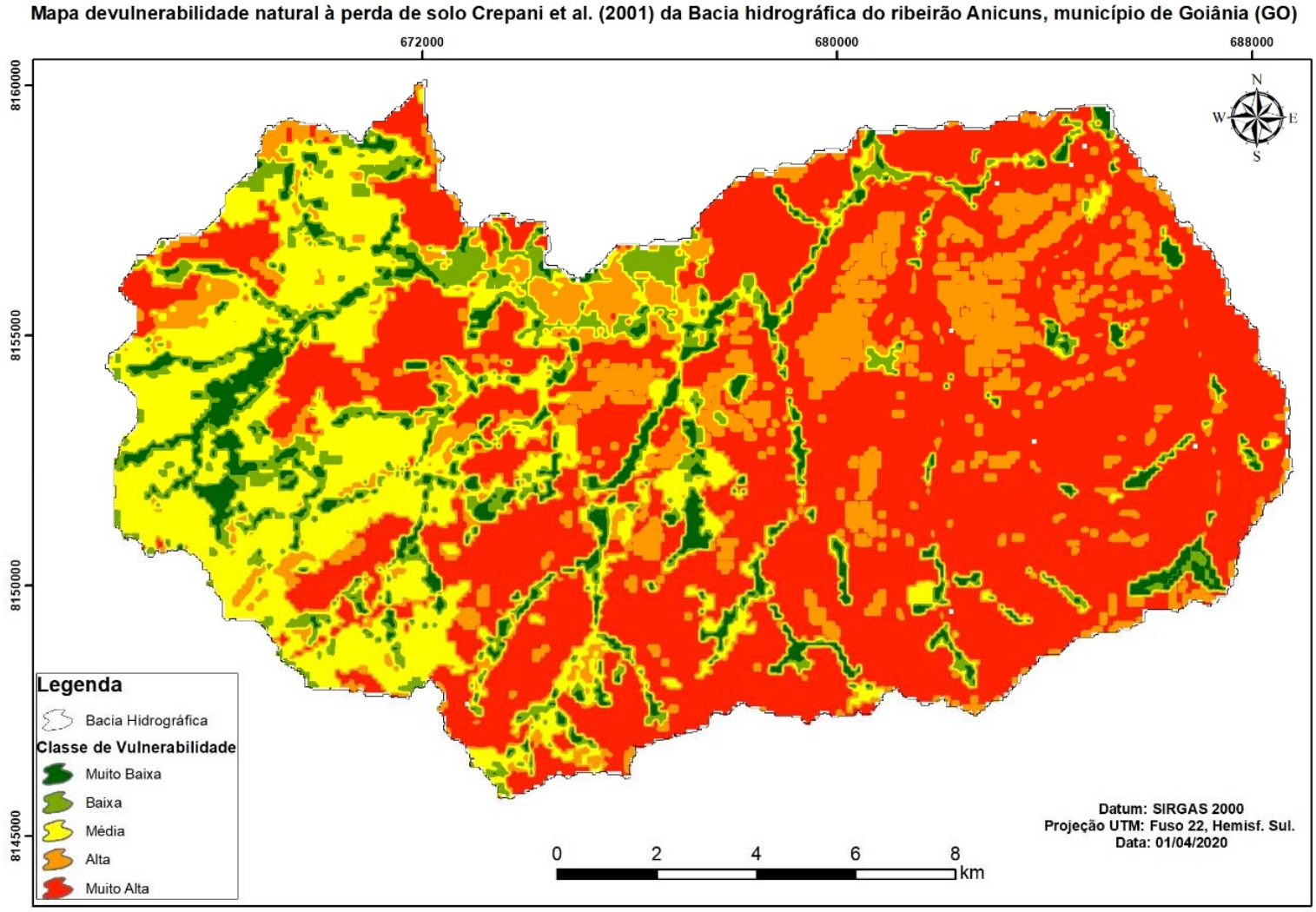
R = Vulnerabilidade para o tema Declividade

S = Vulnerabilidade para o tema Pedologia

Vg = Vulnerabilidade para o tema Cobertura Vegetal

C = Vulnerabilidade para o tema Precipitação

Mapa 9 - Carta de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo



4.4 Comparação dos modelos

Tanto o Modelo de Fragilidade Ambiental Urbana com Base nas Classes de Declividade, proposto por Santos e Ross (2012), quanto o Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo com Base nas Unidades Territoriais Básicas (UTB), proposto por Crepani et al. (2001), utilizam-se do inter-relacionamento de varáveis do meio físico na elaboração de seu produto final. No entanto, os mesmos se diferem na operacionalização dos procedimentos metodológicos.

A similaridade apresentada pelos modelos empíricos deve-se à adoção de princípio equivalente, sendo ele relacionado às Unidades Ecodinâmicas, preconizadas por Tricart (1977), para realizar delimitações de áreas em diagnósticos ambientais. Já a discrepância está associada diretamente às varáveis utilizadas por cada modelo, aos pesos atribuídos para cada componente e na hierarquização das classes de fragilidade e vulnerabilidade. Nesse contexto, no modelo de Santos e Ross (2012), os autores consideram o relevo como a variável que possui maior importância que os demais atributos, enquanto Crepani et al. (2001) admitem a mesma importância para suas variáveis.

Ao aplicar o modelo proposto por Santos e Ross (2012), a bacia do ribeirão Anicuns foi classificada, majoritariamente, como de fragilidade potencial “Baixa” e “Média” (Quadro 24). Quando foram considerados os aspectos do uso da terra e pressão antrópica, juntamente com as demais variáveis, a bacia foi classificada com fragilidade emergente “Muito Alta”, predominantemente (Quadro 25).

Quadro 24 - Área de Fragilidade Ambiental Potencial da bacia do ribeirão Anicuns - Santos e Ross (2012)

Classes de Fragilidade Potencial	**Área**	
	km²	**(%)**
Muito Baixa	18,87	8,53
Baixa	87,01	39,33
Média	79,14	35,77
Alta	27,06	12,23
Muito Alta	9,16	4,14
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Quadro 25. Área Fragilidade Ambiental Emergente da bacia do ribeirão Anicuns - Santos e Ross (2012)

Classes de Fragilidade Emergente	Área	
	km²	(%)
Muito Baixa	13,15	6,01
Baixa	11,50	5,25
Média	44,52	20,33
Alta	21,17	9,67
Muito Alta	128,70	58,75
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

As classes de instabilidade elevada justificam-se pela grande ocorrência de áreas urbanizadas na bacia, uma vez que para a variável do uso da terra, os autores atribuíram peso significativo na equação de elaboração do produto final deste modelo, considerando o nível de impermeabilização do solo, causando assim maiores problemas em relação ao escoamento superficial e a processos erosivos laminares e lineares.

Já as áreas que apresentaram baixa ou muito baixa fragilidade emergente correspondem a fragmentos de áreas verdes (presença de vegetação), condicionando classes de menor fragilidade quando comparadas às áreas urbanizadas e/ou com solo exposto.

Considerando os pressupostos do modelo proposto por Crepani et al. (2001), tendo em vista os resultados da média aritmética obtida entre suas variáveis, a bacia do ribeirão Anicuns é classificada, predominantemente, como de “Muito Alta” vulnerabilidade natural à perda de solos (Quadro 26).

Quadro 26 - Área de Vulnerabilidade Natural da bacia do ribeirão Anicuns - Crepani et al. (2001)

Classes de Vulnerabilidade	Área	
	km²	(%)
Muito Baixa	21,10	9,54
Baixa	14,50	6,56
Média	51,84	23,44
Alta	32,61	14,75
Muito Alta	101,19	45,75
TOTAL	**221,24**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

O baixo índice de cobertura vegetal nas áreas urbanizadas, a pontual ocorrência de solos imaturos e a composição litológica, formada essencialmente por xistos, contribuíram para a maior vulnerabilidade na porção centro-leste da área estudada. A presença de relevo

plano a suavemente ondulado, solos profundos e regiões menos urbanizadas favoreceu a ocorrência de áreas designadas como “Média” a “Baixa” vulnerabilidade, principalmente na porção oeste da bacia.

As similaridades e divergências entre os produtos finais dos dois modelos podem ser comprovadas ao se comparar estatisticamente os resultados obtidos, sendo confirmadas pelas correlações das áreas quanto à Fragilidade Emergente, de Santos e Ross (2012), e a Vulnerabilidade Natural à perda de solo, de Crepani et al. (2001), expostas no Quadro 27.

Quadro 27 - Áreas de Fragilidade Emergente e Vulnerabilidade Ambiental da bacia do ribeirão Anicuns

Classes de Fragilidade/Vulnerabilidade	**Área (%)**	
	Santos e Ross (2012)	**Crepani et al. (2001)**
Muito Baixa	6,01	9,54
Baixa	5,25	6,56
Média	20,33	23,44
Alta	9,67	14,75
Muito Alta	58,75	45,75
TOTAL	**100,00**	**100,00**

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

De acordo com o modelo de Santos e Ross (2012), cerca de 60% da bacia se enquadra na classe de fragilidade emergente “Muito Alta”, seguida de fragilidade “Média”, com pouco mais de 20% da área estudada. A classe “Alta” de fragilidade ocorreu em 9,67% da bacia. As classes “Baixa” e “Muito Baixa” foram as menos representativas nesse modelo, com 5,25% e 6,01% de ocorrência, respectivamente.

No modelo de Crepani et al. (2001), a classe de maior ocorrência foi a de vulnerabilidade “Muito Alta”, com 45,75% da bacia, seguida da classe de “Média” vulnerabilidade, com 23,44%. As classes com menos representatividade na área estudada foram a “Baixa” e “Muito Baixa”, com 6,56% e 9,54%, respectivamente.

Mesmo com metodologias distintas, diferenciando-se na seleção do conjunto de variáveis, ponderação dos critérios das variáveis e no modelamento para obtenção dos produtos finais, nos dois modelos adotados nesse trabalho, a bacia do ribeirão Anicuns apresentou maior ocorrência da classe “Muito Alta”, seguida das classes “Média”, “Alta”, “Baixa” e “Muito Baixa”.

Assim, de acordo com as divergências e similaridades observadas nos produtos cartográficos e no quadro de áreas, considera-se uma correlação muito forte entre os resultados finais dos dois modelos empíricos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias adotadas, os resultados obtidos e apresentados nesta dissertação evidenciam a complexidade da modelagem dos sistemas ambientais. A aplicação de modelos empíricos, que analisam a predisposição natural dos terrenos aos processos erosivos e à perda de solo na bacia do ribeirão Anicuns, em Goiânia-GO, denota a compreensão da relação entre as variáveis ambientais e o dinamismo que envolve estes componentes físicos, bióticos e socioeconômicos, em termos qualitativos e quantitativos.

Os modelos empíricos apresentados neste trabalho, propostos por Santos e Ross (2012) e por Crepani et al. (2001), contextualizam os termos fragilidade e vulnerabilidade designando-os como a suscetibilidade natural dos terrenos em serem erodidos e consequente perda de solo. No entanto, o Modelo Fragilidade Ambiental Urbana (SANTOS; ROSS, 2012), baseado nas Classes de Declividade, utiliza-se de variáveis e pesos considerando áreas antropizadas, enquanto o Modelo de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo (CREPANI et al. 2001), baseado nas Unidades Territoriais Básicas, utiliza-se de variáveis e pesos que não consideram a pressão antrópica. Além das variáveis, os modelos apresentam divergências quanto ao método para ponderação das variáveis, quanto ao cálculo, classificação e elaboração do mapeamento.

A consequência de tais diferenças foi observada nos resultados apresentados pelos planos de informação, gerados a partir da aplicação de cada modelo na bacia do ribeirão Anicuns.

Na elaboração da carta de Fragilidade Emergente, proposta por Santos e Ross (2012), as variáveis selecionadas apresentaram índices de fragilidade baixos a muito baixos, com exceção das variáveis “Índices Pluviométricos” e “Uso da Terra”. Em decorrência da grande ocorrência de áreas urbanizadas na bacia, e pelo fato dos autores atribuírem peso significativo para a variável “Uso da Terra” na equação de elaboração do produto final deste modelo, o resultado obtido demonstrou que a classe mais representativa na bacia do ribeirão Anicuns corresponde a “Muito Alta” fragilidade ambiental urbana.

Na elaboração da carta de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo, proposta por Crepani et al. (2001), as variáveis selecionadas apresentaram índices de fragilidade baixos a muito baixos, com exceção das variáveis “Índices Pluviométricos” e “Cobertura Vegetal”. Após a geração dos planos de informação e do mapa-síntese, a classe mais representativa na bacia do ribeirão Anicuns corresponde a “Muito Alta” vulnerabilidade natural à perda de solo.

Apesar das diferenças entre as metodologias, quanto à adoção das variáveis e dos resultados relacionados aos planos de informação, os mapas-síntese de Fragilidade Ambiental Emergente e de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo apresentaram similaridades quanto à classificação final, sendo a correlação entre os mesmos considerada como muito forte.

Mesmo o modelo de Santos e Ross (2012) sendo originalmente elaborado para aplicação em áreas urbanas, e o de Crepani et al. (2001) ter necessitado de adequações, e pelo fato de não apresentarem similaridades quanto à definição da ordem de importância quanto à fragilidade entre as variáveis utilizadas, o resultado final dos modelos empíricos apontaram que a região centro-leste da bacia do ribeirão Anicuns apresenta “Muito Alta” predisposição natural dos terrenos à ocorrência de processos erosivos e à perda de solo. Já as classes “Média”, “Baixa” e “Muito Baixa” concentraram-se na porção oeste da área estudada.

Apesar das semelhanças e dos índices de maior fragilidade e vulnerabilidade coincidirem com as áreas de maior ocorrência de solo exposto e que são submetidas a maior pressão antrópica frente à urbanização, os modelos empíricos podem gerar incertezas com relação à confiabilidade de seus dados. Ademais, não é atestada a obtenção de resultados similares se replicado em outros ambientes urbanos, considerando as especificidades do arranjo espacial das variáveis geoambientais que se ajustam à realidade dos mesmos.

Neste sentido, acredita-se que a principal contribuição desta dissertação tenha sido assimilar os padrões de avaliação de fragilidade e vulnerabilidade quanto à predisposição natural dos terrenos aos processos erosivos e à perda de solo, elaborados por especialistas e amplamente utilizados em estudos acadêmicos, relatórios técnicos, estudos ambientais e em planejamentos e ordenamentos da ocupação do espaço físico-territorial.

Para trabalhos futuros, pode ser sugerida a ampliação e aplicação do reconhecimento de padrões diretamente sobre a dinâmica ambiental, considerados como de suma importância para a evolução da ciência geográfica, podendo contribuir para a elaboração de uma metodologia de mapeamento e vulnerabilidade ambiental. Sugere-se complementar a análise das variáveis com a utilização de atributos como curvatura vertical, horizontal e padrão de dissecação das formas de relevo, critérios quanto à proximidade de cursos d’água, mananciais e áreas de recarga, índices referentes ao saneamento básico, além da ampliação dos atributos referentes ao uso da terra.

Para tanto seriam necessários estudos aprofundados, baseados em observações de campo e séries históricas de dados relativos às variáveis ambientais, além da compilação e aplicação de modelos recentes, elaborados considerando muitas dessas variáveis citadas.

REFERÊNCIAS

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 16, p. 268-281, 2006.

ALVES, H. P. F. Vulnerabilidade socioambiental na metrópole paulistana: uma análise sociodemográfica das situações de sobreposição espacial de problemas e riscos sociais e ambientais. **Revista Brasileira de Estudos Populacionais**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 43-59, 2006.

AQUINO, A. R.; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. (Org.). **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017. (E-Book em PDF). Disponível em: <https://www.blucher.com.br/livro/detalhes/vulnerabilidade-ambiental-1291>. Acesso em: 3 dez. 2018.

BARBOSA, R. B. **Contribuição Metodológica para o Mapeamento de Fragilidade Ambiental para Áreas Urbanas: Estudo de Caso da Bacia do Ribeirão Anicuns, no Município de Goiânia (GO)**. 2020, 146 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia/PPG-GEO - Stricto Sensu - Universidade Federal de Goiás - Regional Jataí, 2020.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global – esboço metodológico. **Cadernos de Ciências da Terra**, São Paulo, Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, n. 13, 1971.

BOJÓRQUEZ-TAPIA, L. A.; CRUZ-BELLO, G. M.; LUNA-GONZÁLEZ, L. Connotative land degradation mapping: a knowledge-based approach to land degradation assessment. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 51-64, Feb. 2013. Disponível em: <http://dx.doi. org/10.1016/j.envsoft.2012.07.009>. Acesso em: 3 ago. 2017.

CAIXETA, D. M. Mapeamento, identificação e monitoramento das áreas de proteção permanente ao longo do Ribeirão Anicuns no município de Goiânia - GO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 617-622.

CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; MAGALHÃES, L. F.; MARANHÃO SÁ, M. A. **Diagnóstico hidrogeológico da cidade de Goiânia-GO**. AGIM/GO, Superintendência de Geologia e Mineração da Secretaria da Indústria e Comércio, Goiânia, 2003. 125 p.

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A.; LOLLO, J. A. Mapeamento ecodinâmico da bacia do Rio Monjolinho, São Carlos-SP – implicações técnicas e de planejamento. In: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, 2., 2006. Braga. **Anais**... Braga - Portugal: Universidade do Minho, 2006.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritério - críticas e proposta metodológica**. 2011. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T; BARBOSA, C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: SAE/INPE, 2001.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. DE P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175-181, 2006.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. 1999. 212 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FIGUEIREDO, M. C. B. (Org.) **Análise da vulnerabilidade ambiental**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

FRANCISCO, C. E. S.; COELHO, R. M.; TORRES, R. B.; ADAMI, S. F. Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para recuperação ambiental. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 1-13, 2008.

FRANCO, M. A. R. **Planejamento ambiental para cidade sustentável**. São Paulo: Annablume: FAPESP, 2001.

FRANCO, G. B.; BETIM, L. S.; MARQUES, E. A. G.; GOMES, R. L.; CHAGAS, C. S. Relação qualidade da água e fragilidade ambiental da bacia do Rio Almada, Bahia. **Brazilian Journal of Geology**, n. 42, p. 114-127, 2013.

GRIGORYEV, A. A. Os fundamentos da geografia física moderna: o estrato geográfico da Terra. In: SHCHERBAKOV, D. I. et al. **The interaction of sciences in the study of the Earth**. Tradução de Míriam Ramos Gutyahr. Moscou: Progress Publishers, 1968.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO CENTRO OESTE – ITCO. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Município de Goiânia**. Goiânia: Prefeitura Municipal de Goiânia, 2008. 377 p. Relatório técnico.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Banco de Dados para Pesquisa e Ensino (BDMEP)**. Disponível em: <http://inmet.gov.br>. Acesso em: 9 dez. 2018.

JAIN, S. K.; GOEL, M. K. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. 1, p. 31-40, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626660209492905>. Acesso em: 3 ago. 2017.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2203-2210.

LEMKE, A. P.; BEZERRA, R. A.; PEREIRA, J. G. Uso e ocupação do solo na microbacia do córrego Água Boa. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2., 2009, Corumbá. **Anais...** Campinas: EMBRAPA-CNPTIA/INPE, 2009. p. 853-860.

LIMA, L. C.; MORAIS, J. O.; SOUZA, M. J. N. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: Fundação Universidade Federal do Ceará, 2000. 268 p.

MARTÍN-DUQUE, J. F.; GARCÍA, J. C.; URQUÍ, L. C. Geoheritage information for geoconservation and geotourism through the categorization of landforms in a Karstic Landscape: a case study from Covalagua and Las Tuerces (Palencia, Spain). **Geoheritage**, v. 4, n. 1-2, p. 93-108, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12371-012-0056-2>. Acesso em: 20 out. 2017.

MONTEIRO, C. A. Derivações antropogênicas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas: perspectivas urbanas e agrárias. In: SIMPÓSIO SOBRE A COMUNIDADE VEGETAL COMO UNIDADE BIOLÓGICA, TURÍSTICA E ECONÔMICA, 1., 1978, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1978. p. 43-74.

MOORE, I. D.; TURNER, A K.; WILSON, J. P.; JENSON, S. K.; BAND, L. E. GIS and Landsurface-Subsurface Process Modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T (Ed.). **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993.

RATCLIFFE, D. A. Criteria for the selection of nature reserves. **Advancement of Sciences**, n. 27, p. 294-296, 1971.

RODRIGUES, J. B. T.; ZIMBACK, C. R. L.; PIROLI, E. L. Utilização de Sistema de Informação Geográfica na Avaliação do Uso da Terra em Botucatu (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 675-681, 2001.

ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - região de Goiânia-GO**. 2006. 166 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, 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. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, 2012.

SANTOS, J. O.; ROSS, J. L. S. Fragilidade ambiental urbana. **Revista da ANPEGE**, v. 8, p. 127-144, 2012.

SIMÕES-MEIRELLES, M. P. **Análise integrada do ambiente através de geoprocessamento – uma proposta metodológica para elaboração de zoneamentos**. 1997. 192 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

SIMÕES, M.; BECKER, B. K.; CAMPOS, M.; SANTOS, U. **Metodologia para elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico em áreas com grande influência antrópica**. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <http://www.laget.igeo.ufrj.br/egler/pdf/maggie.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2018.

SOTCHAVA, V.B. **O estudo dos geossistemas**: métodos em questão. São Paulo, IGEOG/USP, 1976. v. 16.

SPÖRL, C. **Análise da fragilidade ambiental relevo-solo com aplicação de três modelos alternativos nas altas bacias do Rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. São Paulo, **GEOUSP – Espaço e Tempo**, n. 15, p. 39-49, 2004.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SUERTEGARAY, D. M. A. Geografia física (?) Geografia ambiental (?) ou Geografia e Ambiente (?). In: MENDONÇA, F.; KOEZEL, S. (Org.). **Elementos de epistemologia da geografia contemporânea**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 111-120.

TOMCZYK, A. M. A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: The case of Gorce National Park, Poland. **Applied Geography**, Sevenoaks, England, v. 31, n. 1, p. 339-351, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.07.006>. Acesso em: 3 dez. 2018.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1977. 97 p.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, n. 23, 2016.

VILAÇA, M. F. et al. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão: o estudo de caso do ribeirão Conquista no município de Itaguara-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. Disponível em: <http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_ completos/eixo3/070. pdf>. Acesso em: 3 dez. 2018.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 183-199, 2005.