



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
*CAMPUS DE POMBAL-PB*

PRISCILLA GOMES BARBOSA

**SISTEMA DE INDICADORES LOCAIS DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL  
(SILVA): UMA PROPOSTA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E A GESTÃO NA  
SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SABUGI (PB/RN)**

POMBAL-PB

2018

**PRISCILLA GOMES BARBOSA**

**SISTEMA DE INDICADORES LOCAIS DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL  
(SILVA): UMA PROPOSTA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E A GESTÃO NA  
SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SABUGI (PB/RN)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

**Orientador(a):** Prof. Dr. Luís Gustavo de Lima Sales

**POMBAL-PB**

**2018**

B238s      Barbosa, Priscilla Gomes.  
Sistema de indicadores locais de vulnerabilidade ambiental (SILVA):  
uma proposta de apoio ao planejamento e a gestão na sub-bacia  
hidrográfica do Sabugi (PR/RN) / Priscilla Gomes Barbosa. – Pombal,  
2018.

83 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia  
Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de  
Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Luís Gustavo de Lima Sales".

Referências.

1. Gestão ambiental. 2. Bacia hidrográfica. 3. Vulnerabilidade  
ambiental. 4. Lógica fuzzy. I. Sales, Luís Gustavo de Lima. II. Título.

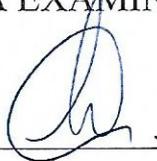
CDU 37:502 (043)

PRISCILLA GOMES BARBOSA

**SISTEMA DE INDICADORES LOCAIS DE VULNERABILIDADE  
AMBIENTAL (SILVA): UMA PROPOSTA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E  
A GESTÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SABUGI (PB/RN)**

Aprovado em 07 / 12 / 2018

BANCA EXAMINADORA



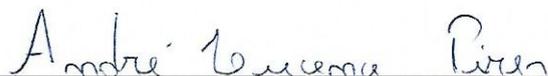
---

Prof. Dr. Sc. Luis Gustavo de Lima Sales  
Orientador – UFCG/*Campus* de Pombal – PB



---

Prof.ª Dra. Sc. Ricélia Maria Marinho Sales  
Examinadora Interna – UFCG/*Campus* de Pombal - PB



---

M. Sc. André Lucena Pires  
Examinador Externo – CH/UFCG – *Campus* de Campina Grande

Pombal – PB  
Dezembro 2018

**Dedico** aos meus pais, por todo amor e incentivo durante toda essa minha jornada acadêmica, por estarem sempre do meu lado em todas as dificuldades e conquistas. Aos meus irmãos e amigos, que sempre me apoiaram e me deram força para continuar e conseguir essa vitória.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, por ter me abençoado e ter guiado durante toda a minha jornada.

Aos meus pais, pelo amor, o apoio, o incentivo e a confiança, por toda educação e ensinamentos que me tornaram a pessoa que sou hoje.

Aos meus irmãos que sempre estiveram de acordo com as minhas decisões e ações, e que mesmo longe sempre me deram motivação para que eu pudesse vencer essa batalha, vocês são os anjos da minha vida.

A toda minha família, as minhas avós que sempre me motivaram e confiaram, em especial a vó Ester (*in memorian*), aos meus tios e tias, em especial a Adriano Gomes, Célia Gomes, Simone Gomes, Luiza Barbosa, e Dagmar Barbosa que sempre me incentivaram e me ajudaram na escolha dos caminhos mais justos, aos meus primos e primas que muitas vezes me deram palavras de conforto, quando eu estava com minhas inseguranças.

A meu orientador Dr. Luís Gustavo de Lima Sales por toda confiança e oportunidade concedida para realização desse trabalho, por permitir usufruir de sua colaboração, talento, apoio e amizade. Você é um exemplo de ser humano no mundo acadêmico.

A toda a turma 2014.2 pela contribuição no aprendizado e no convívio coletivo, onde eu encontrei o significado da palavra companheirismo, em especial para Luan Carlos, Rayanne Silva, Viviane Borges, Gabriella Moreira e Olavio Rocha Neto, que por muitas vezes abdicavam de assuntos particulares para me dar ensinamentos pertinentes. E a todos colegas que fiz no campus da UFCG Pombal vocês são muito especiais.

A secretária da Unidade Acadêmica de Engenharia Ambiental Anna Karina por todo o carinho e atenção.

A todo pessoal do LABGEO, pelos momentos de descontração e incentivos, em especial a Andréa Karla pela amizade, paciência e ensinamentos, vocês foram fundamentais na minha formação acadêmica.

Aos professores: Andréa Brandão, Érica Cristiane, José Cleidimário, José Roberto, Jussara Dantas, Manoel Moises, Ricélia Marinho, Rômulo Gil, Rosinete Batista, Virgínia de Fátima, Walker Gomes de Albuquerque, Fernanda Medeiros, Adriano Sant'Anna Silva agradeço por todo ensinamento e pelas oportunidades concebidas e confiadas, como também por todo incentivo e amizade.

A todos da Equipe da SUDEMA NUREG PATOS, por me proporcionarem os melhores meses de aprendizado, confiança e amizade, em Especial a Alessandra e Alex, que me passaram todo conhecimento que tenho hoje e cuidaram de mim de uma forma fraternal.

À Residência Feminina do Campus de Pombal, pela convivência, pelas risadas, e por todos os ensinamentos. E em especial a Erica Lima, Patricia de Jesus, Thalyne de Jesus, Tatiane Chaves, Cristiane Milenna, Amanda Ariely e Emanoela, vocês foram de extrema importância nesses anos, se eu não tivesse cada um de vocês ao meu lado, esse caminho com certeza seria muito mais árduo.

Aos amigos que fiz ao longo desses anos, que me completaram quando me faltava algo, me amaram, me acolheram, Leila Leite, Danielle Leite, Matheus Dias, Luan Gutierrez, Edmilson Júnior, Milena Kareli, Airton Gonçalves, Ronildo Silva, Rafael Dioni, Rafael Romano, Íthalo Henrique, Iris Rebeca, Mayara Dantas, Silmara Lopes, Ednalva Alves, Taiane Dantas, Rayane Priscila, Tainá de Sousa, Damares Lopes, Beatriz Jordana, Évile Farias, Ronaldo Oliveira, Maryze Lima, Juliermes Nunes, Elisa Brito, Ester Brito, Georgia Tavares, Geysiane Tavares, Lucas Tavares (*in memoriam*), Sophia Maria (*in memoriam*), minha eterna gratidão pela paciência, companheirismo e amizade.

Enfim, agradeço a todos que, de maneira direta ou indireta, participaram dessa caminhada e que estiveram ao meu lado nos momentos de alegrias e tristezas. A todos os meus sinceros agradecimentos.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Pirâmide de Informações .....	20
FIGURA 2- Localização geográfica da sub bacia do Sabugi.....	24
FIGURA 3- Mapa da composição geológica da sub bacia do Sabugi .....	42
FIGURA 4- Mapa da composição geomorfológica da sub bacia do Sabugi.....	44
FIGURA 5- Visualização espacial da declividade na sub bacia do Sabugi .....	46
FIGURA 6- Mapa da composição pedológica da sub bacia do Sabugi .....	48
FIGURA 7- Mapa de precipitação (1994-2016) da sub bacia do Sabugi.....	50
FIGURA 8- Mapa de uso do solo da sub bacia do Sabugi .....	51
FIGURA 9- Mapa da vulnerabilidade ambiental da sub bacia do Sabugi .....	53
FIGURA 10- Visualização do modelo <i>Fuzzy</i> desenvolvido .....	57
FIGURA 11- Visualização das variáveis linguísticas definidas para determinação da vulnerabilidade ambiental.....	58
FIGURA 12- Visualização das regras atribuídas ao modelo .....	60
FIGURA 13- Diagrama das funções pertinências das variáveis geologia e pedologia .....	61
FIGURA 14- <i>Defuzzyficação</i> para obtenção da vulnerabilidade ambiental .....	62
FIGURA 15- Visualização espacial da modelagem <i>Fuzzy</i> desenvolvida .....	63
FIGURA 16- Visualização espacial da modelagem <i>Fuzzy</i> para três situações de combinação das variáveis .....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Propensão ao risco à perda de solo para o tema geologia .....	42
TABELA 2- Porcentagem das áreas para o tema geomorfologia na sub bacia do Sabugi .....	44
TABELA 3- Propensão ao risco à perda de solo para amplitude altimétrica .....	45
TABELA 4- Propensão ao risco à perda de solo para declividade .....	46
TABELA 5- Porcentagem das áreas para o tema pedologia da sub bacia do Sabugi .....	48
TABELA 6- Propensão ao risco à perda de solo para o tema climatologia .....	49
TABELA 7- Classes de uso e ocupação do solo .....	51
TABELA 8- Propensão ao risco à perda de solo para o tema uso e ocupação do solo .....	52
TABELA 9- Áreas das UPHs estudadas e a propensão à perda de solo de acordo com a metodologia utilizada .....	54

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- Classificação dos riscos referentes à geologia.....	28
QUADRO 2- Risco para a amplitude altimétrica.....	30
QUADRO 3- Declividade e a propensão ao risco.....	31
QUADRO 4- Classificação de risco em relação a amplitude do interflúvio .....	31
QUADRO 5- Pesos adotados para os níveis de risco a pedologia.....	32
QUADRO 6- Risco para o uso do solo da sub bacia do Sabugi.....	33
QUADRO 7- Classificação em relação a intensidade pluviométrica .....	34
QUADRO 8- Escala de propensão ao risco à vulnerabilidade ambiental .....	35
QUADRO 9- Classificação dos indicadores de vulnerabilidade ambiental .....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AESA-PB – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

ANA- Agência Nacional de Águas

ERPAN- Empresa de Pesquisa Agropecuária

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGARN – Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte

MDE- Modelo Digital de Elevação

OCDE- Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

QGIS- Quantum Gis

SIG- Sistemas de Informação Geográfica

SILVA – Sistema de Indicadores Locais de Vulnerabilidade Ambiental

UNISDR – Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres

UPH- Unidade de Planejamento Hídrico

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
<b>2.1 Vulnerabilidade Ambiental</b> .....	15
<b>2.2 Bacia Hidrográfica como Espaço para Gestão Ambiental</b> .....	17
<b>2.3 Indicadores de vulnerabilidade ambiental</b> .....	19
<b>2.4 Logica Fuzzy como instrumento de tomada de decisão</b> .....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1 Desenvolvimento</b> .....	26
GEOLOGIA .....	27
GEOMORFOLOGIA .....	29
PEDOLOGIA .....	32
USO DO SOLO .....	33
CLIMATOLOGIA .....	33
DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS VARIÁVEIS (MODELO <i>FUZZY</i> ) .....	36
CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	41
<b>4.1 Vulnerabilidade Ambiental através do SILVA</b> .....	41
GEOLOGIA .....	41
GEOMORFOLOGIA .....	43
HIPSOMETRIA .....	45
DECLIVIDADE .....	46
PEDOLOGIA .....	47
CLIMATOLOGIA .....	49
USO DO SOLO .....	51
VULNERABILIDADE AMBIENTAL .....	53
<b>4.2 Modelagem Fuzzy</b> .....	57
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	68
<b>ANEXOS</b> .....	74

BARBOSA, G. P. **SISTEMA DE INDICADORES LOCAIS DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL (SILVA): UMA PROPOSTA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E A GESTÃO NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO SABUGI (PB/RN)**. (2018). 84 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. (2018).

## RESUMO

A sub bacia do Sabugi localizada entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte exerce um importante papel do desenvolvimento socioeconomico da região, desempenhada pela atividade agrícola, pecuária entre outras formas de ocupação. As bacias hidrográficas são territorios essenciais para o crescimento de uma região, sendo desejavel que apresentem as melhores condições nas propriedades do solo, bem como do seu uso e ocupação, com o objetivo de manter a capacidade de abrangencia hídrica para as diversas atividades ali desenvolvidas. O estudo da vulnerabilidade ambiental em áreas de bacia hidrografica, torna-se indispensavel, dada a importancia do diagnóstico das condições ambientais na mitigação de impactos que ameacem a dinamica do ecossistema. Neste estudo, foi proposto um sistema de indicadores que representassem espacialmente os diversos níveis de vulnerabilidade: O Sistema de Indicadores Locais de Vulnerabilidade Ambiental (SILVA). Este sistema abrangeu como indicadores: geologia, geomorfologia, pedologia, climatologia e vegetação, tendo sido adotado uma escala de variação que vai de 1 a 3, sendo 1 estável e 3 instável, conforme sugere a metodologia adotada. Propõe-se ainda a utilização do Sistema *Fuzzy*, com o intuito de auxiliar na tomadas de decisão, uma vez que este permite uma ampla visão das situações que podem existir na área de estudo. Os resultados demonstraram as possibilidades do Sistema que se destina a apoiar os gestores no processo de conhecimento das condições ambientais das bacias hidrograficas e no monitoramento e implementação de programas de gestão do territorio hídrico.

**Palavras-chave:** vulnerabilidade ambiental, lógica *fuzzy*, gestão ambiental.

BARBOSA, G. P. **SYSTEM INDICATORS ENVIRONMENTAL VULNERABILITY OF LOCAL (SILVA): A PROPOSAL FOR SUPPORT TO PLANNING AND MANAGEMENT IN WATERSHEDS OF THE SABUGI (PB/RN)** (2018). 84 pgs. Work of Course Conclusion (Graduation in Environmental Engineering) - Federal University of Campina Grande, Pombal-PB. (2018).

## **ABSTRACT**

The watersheds of the Sabugi located between the states of Paraíba and Rio Grande do Norte plays an important role of the socioeconomic development of the region, performed by agriculture, livestock and other forms of occupation. The watersheds are essential territories for the growth of a region, and it is desirable that they present the best conditions in the soil properties, as well as their use and occupation, in order to maintain the capacity of water coverage for the various activities developed there. The study of environmental vulnerability in hydrographic basin areas becomes indispensable given the importance of diagnosing environmental conditions in mitigating impacts that threaten the dynamics of the ecosystem. In this study, a system of indicators that spatially represented the various levels of vulnerability was proposed: The System of Indicators of Environmental Vulnerability (SILVA). This system covers the following indicators: geology, geomorphology, pedology, climatology and growth, with a scale of variation of 1 to 3, being 1 stable and 3 unstable, as indicated by another adopted option. of the Fuzzy System, with the purpose of assisting in decision making, is an option that allows a hierarchical view of the situations that may exist in the study area. The functions of the human resources management system can be managed in water resource management systems.

**Keywords:** environmental vulnerability, *fuzzy* logic, environmental management.

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são fatores de vulnerabilidades ambientais que resultam dos impactos provocados pelas atividades humanas a nível global. Tais vulnerabilidades refletem o potencial de degradação em uma região como respostas a qualquer perturbação dos padrões e processos, onde um sistema de indicadores deve ser capaz de apontar vulnerabilidades no espaço analisado, diferenciando as regiões segundo o grau relativo de maior ou menor fragilidade, refletindo possíveis alterações nos diferentes componentes do meio (CRUZ et al., 2003).

A importância das inter-relações dos recursos hídricos podem ser reconhecidas como o território, Cunha (2015) afirma que uma articulação robusta da gestão da água e do território, com dinâmicas próprias e específicas de cada setor, é essencial para a proteção dos recursos hídricos e dos serviços dos ecossistemas associados, bem como para minimizar os riscos de uma ocupação inadequada do solo para facilitar a adaptação às alterações climáticas.

Os fatores que permitem estimar a vulnerabilidade são numerosos. Eles devem ser classificados segundo sua importância, em uma escala escolhida com cuidado segundo os sítios analisados e a precisão dos dados disponíveis. Assim eles podem ser ponderados a fim de que seja obtido um valor de vulnerabilidade por unidade de superfície definida. Diante disso, a elaboração de um banco de dados dando subsídio à implementação de um Sistema de Indicadores de Vulnerabilidade ligado ao uso e as propriedades do solo em bacias hidrográficas são fundamentais para um entendimento integrado da vulnerabilidade ambiental destes ambientes tão complexos.

A partir destas considerações, o objetivo deste estudo foi analisar a vulnerabilidade ambiental da sub bacia hidrográfica do Rio Sabugi (PB/RN) através de um Sistema de Indicadores Locais de Vulnerabilidade Ambiental (SILVA), abrangendo as seguintes especificações: revisão bibliográfica a cerca do tema; adaptação de um sistema de indicadores locais de vulnerabilidade ambiental; geração de dados espaciais e mapas temáticos (uso do solo, declividade, pedologia, geomorfologia, geologia, climatologia); aplicação do sistema na área objetivo do estudo e o posterior desenvolvimento de um modelo matemático capaz de auxiliar a avaliação da vulnerabilidade ambiental de uma área a partir das variáveis utilizadas ao longo do estudo, por meio da lógica Fuzzy.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Vulnerabilidade Ambiental**

A magnitude dos impactos ao ambiente depende da vulnerabilidade local. Vulnerabilidade é um conjunto de condições determinadas por fatores e processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao perigo. Para Saito (2011), a palavra vulnerabilidade tem sentido negativo e está relacionada sempre com perdas. O termo vulnerabilidade denota um grau de suscetibilidade ou fragilidade que um determinado ambiente possui a um determinado tipo de impacto. A Resolução CONAMA nº 01/1986 define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente; causada por qualquer forma de matéria ou energia, resultante das atividades humanas, que afete direta ou indiretamente a saúde; a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais.

De acordo com Adger (2006), as definições de vulnerabilidade, usualmente, atrelam esse conceito a um ou mais dos seguintes fatores: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta do sistema. O estudo desses fatores permite a avaliação da maior ou menor vulnerabilidade de um sistema a determinadas questões ambientais. A exposição significa o grau, duração ou extensão em que o sistema está em contato com perturbações. A sensibilidade está relacionada à extensão ou ao grau em que um sistema pode absorver as pressões sem sofrer alterações no longo prazo. A capacidade adaptativa é a habilidade do sistema de se ajustar a um dano ocorrido, fazer uso de recursos ou oportunidades ou responder a mudanças ambientais que venham a ocorrer. Nesse contexto, um sistema é mais vulnerável quanto maiores as pressões, maior a sensibilidade do meio e menor sua capacidade adaptativa.

A maioria dos territórios considerados vulneráveis o são porque as comunidades ou as atividades econômicas preponderantes no local, apresentam vulnerabilidades estruturais. Ou seja, os “territórios vulneráveis correspondem a concentrações geográficas, de dimensões variáveis, de situações de acentuada vulnerabilidade social e econômica”. (FEYISA et al., 2013, p.24) diz que, as alterações dos impactos ambientais nos sistemas naturais e na sociedade são utilizados em grande escala nas pesquisas, baseados na perspectiva de que as

águas superficiais estão entre os recursos vitais na terra, e as mudanças provocadas pelo uso e ocupação inadequado do solo, podem causar alterações climáticas no meio, despertando efeitos negativos de ordem social, econômica e climática, comprometendo a saúde das pessoas.

O uso do termo “vulnerabilidade” tem crescido nos últimos anos no campo das ciências sociais e climáticas. Este termo tem sido utilizado para compreender os estados de exposição e sensibilidade do território frente a determinadas ameaças. A vulnerabilidade pode ser analisada a partir de várias abordagens para os objetivos e campos de estudo (PIRES, 2015). O escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres (UNISDR) define a vulnerabilidade como uma condição produto das ações humanas. Indica que o grau em que a sociedade está exposta, ou protegida do impacto das ameaças naturais. Depende do estado de assentamentos humanos e sua infra-estrutura, a maneira que a administração pública trata as políticas de gestão de risco e o nível de informação e educação da sociedade sobre os riscos existentes e como lidar com eles (ONU, 2014).

A vulnerabilidade natural mostra a predisposição do ambiente frente a fatores ambientais (GRIGIO, 2008). Já a vulnerabilidade ambiental, segundo Tagliani (2003), é definida como qualquer susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer.

O crescimento e a concentração da população e das atividades humanas em muitas circunstâncias, com deficiências de planejamento, conjuntamente com o manejo ambiental deficiente e a ocorrência de desmatamentos e avanços excessivos de algumas culturas agrícolas pode gerar territórios vulneráveis (GRECO, 2015).

Consideram-se territórios vulneráveis os que apresentam uma exposição elevada e duradoura a riscos e ameaças que, pela sua gravidade, exigem intervenções coordenadas envolvendo diferentes atores e distintos instrumentos de política. Os territórios podem ser vulneráveis por razões intrínsecas, como acontece, por exemplo, com alguns trechos da zona costeira face a subida do nível médio do mar (GOVINT, 2014).

Com o agravamento dos problemas ambientais, conhecer as aptidões e restrições das atividades que ocorrem na superfície terrestre tem sido necessário para disciplinar o uso e a ocupação do solo. Visando contribuir com a minimização

destes impactos, o estudo da vulnerabilidade ambiental constitui como um instrumento estratégico de adequação do uso da terra, desempenhando um papel importante na sustentabilidade, tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico (CAMPBELL; KIM; ECKERD, 2014; CASTANHEIRA et al., 2014; LOPES, LOURENÇO; STRENZEL, 2016).

## **2.2 Bacia Hidrográfica como Espaço para Gestão Ambiental**

Atualmente a unidade geográfica Bacia Hidrográfica vem se destacando como um importante objeto de análises e estudos na temática ambiental. Tal delimitação geográfica possibilita a integração de vários fatores e componentes de forma sistemática e holística, nesse sentido, destaca-se a importância desse objeto delimitado pelas características topográficas do relevo. De acordo com Siqueira e Silva (2011), a Bacia Hidrográfica é utilizada como um modelo abrangente de entender os ecossistemas tendo em vista a interação dos ambientes aquáticos com os aspectos geológicos, pedológicos, climáticos, vegetação, uso e cobertura da terra interagindo com processos bióticos e abióticos.

De acordo com Ferreira (2010), a compartimentação do espaço em “unidades de área” seria possível mediante o estudo das características físicas e bióticas que as individualizam em relação às áreas vizinhas que individualiza de cada unidade possível por meio de ampla integração de suas variáveis com base na identificação da interação entre o processo de apropriação de um território pelo homem e a base natural, em compartimentos espaciais delimitados segundo variados critérios. Sobre esse processo de apropriação de um território pelo homem na base natural. Sporn (2007) descreve:

“Em princípio os ambientes naturais mostravam-se em estado de equilíbrio dinâmico, no entanto, as sociedades humanas passaram progressivamente a intervir cada vez de forma mais intensa na apropriação dos recursos naturais causando significativas alterações nas paisagens num ritmo mais intenso do que o determinado pela natureza” (SPORN, 2007, p.18).

Do ponto de vista técnico ou de gestão é verídico que as bacias hidrográficas possuem importância direta para a análise ambiental e representam a melhor forma

de análise dos impactos antropogênicos sobre o território e múltiplas possibilidades para a investigação científica, ressaltando a intrínseca relação entre homem e água e a necessidade da organização destes territórios (LOPES, 2018).

No entanto, a bacia hidrográfica como modelo de gestão é adotada por instituições e profissionais da área de recursos hídricos e engenharia ambiental, geografia, biologia e ecologia dentre outras áreas afins. É bastante difundida quando se quer analisar uma paisagem de forma completa, por estar inserido na dinâmica natural do meio ambiente em seus aspectos morfológicos e do escoamento superficial, sendo suficiente para uma simulação de modelagem ambiental buscando a realização de diagnósticos (MAGALHÃES JR. 2011).

Para avaliações e estudos adotando a paisagem como categoria de análise em Bacias Hidrográficas com a finalidade do entendimento das vulnerabilidades ambientais associadas ao uso e cobertura da terra, é prioritário que haja o levantamento de dados primários e secundários referente à área estudada, ou seja, a geração de um inventário com a caracterização sistemática do meio físico/natural e antrópico para fornecer elementos para uma avaliação da vulnerabilidade dos recursos naturais, bem como das fragilidades dos sistemas naturais e a identificação de áreas degradadas, como subsídio para a elaboração de um planejamento ambiental inserido em um processo de gestão ambiental (FERREIRA; PIROLI, 2016).

Com isso, Bordallo (1995), afirma que a utilização da Bacia Hidrográfica, como unidade de estudo, para a gestão das distintas formas de atividade e uso das potencialidades ambientais, tem como finalidade projetar, interceder, executar e manusear as melhores formas de apropriação e exploração de seus recursos naturais. Desde modo, pode-se proporcionar o desenvolvimento econômico e social da respectiva população que usufrui do recurso, bem como a sustentabilidade, mitigando o impacto negativo na qualidade de vida (BERNARDI, PANZIEIRA, BURIOL e SWAROWSKY, 2013).

Reconhecendo a importância das inter-relações dos recursos hídricos com o território, Cunha (2015) afirma que uma articulação robusta da gestão da água e do território, com dinâmicas próprias e específicas de cada setor, é essencial para a proteção dos recursos hídricos e dos serviços dos ecossistemas associados, bem

como para minimizar os riscos de uma ocupação inadequada do solo e para facilitar a adaptação as alterações climáticas.

No contexto da gestão de bacias hidrográficas, faz-se necessário avançar nas estratégias que assegurem caminhos concretos para a elaboração deste instrumento, reconhecendo que estas áreas apresentam uma complexidade ecossistêmica em seus atributos ambientais, enfática importância para a gestão dos recursos hídricos perenes e reconhecimento como unidade básica do planejamento ambiental (TUNDISI, 2006; SANTOS JUNIOR, 2011; LEAL, 2012; CARVALHO, 2014).

### **2.3 Indicadores de vulnerabilidade ambiental**

Segundo Bellen (2005), o objetivo dos indicadores “é agregar e quantificar informações de modo que sua significância fique mais aparente.” Dessa forma considera os indicadores como um modelo da realidade, mas que não pode substituir a própria realidade, “entretanto devem ser analiticamente legítimos e construídos dentro de uma metodologia coerente de mensuração.” De maneira geral, Santos (2004), define um indicador da seguinte forma: “indicadores são parâmetros, ou funções derivadas deles, que tem a capacidade de descrever um estado ou uma resposta dos fenômenos que ocorrem em um meio.”, ou seja, corresponde a uma forma de percepção da realidade que se dá através de um conjunto de dados representativos de parâmetros capazes de traduzir o estado de um ambiente.

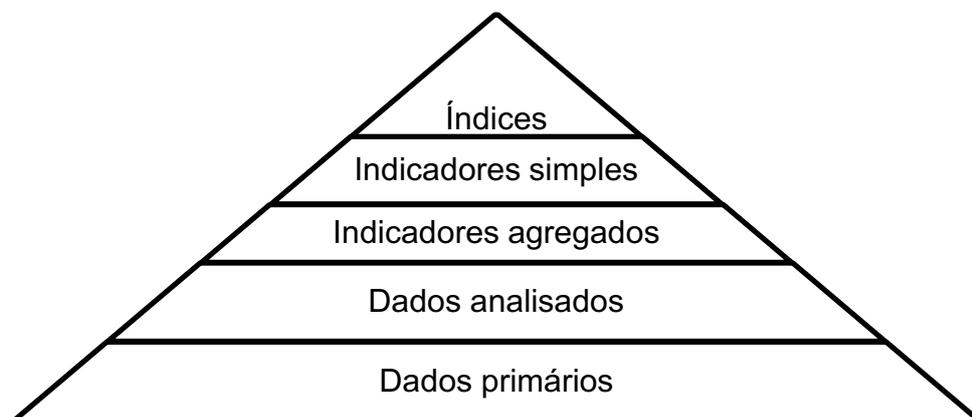
A Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) define um indicador como sendo um parâmetro, ou um valor derivado de um parâmetro, descrevendo um estado de fenômeno do meio ambiente ou de zona geográfica. Tem um significado que se estende além da informação diretamente emitida pelo valor do parâmetro (OCDE, 1993).

Os indicadores têm como papel principal a transformação de dados em informações relevantes para os tomadores de decisão e o público. Em particular, eles podem ajudar a simplificar um arranjo complexo de informações sobre saúde, meio ambiente e desenvolvimento, possibilitando uma visão “sintetizada” das condições e tendências existentes (OMS, 2002). A capacidade dos indicadores em agregar e relacionar dados de diferentes fontes, naturezas e escalas, torna essencial

a organização e hierarquização desses elementos, a fim de conferir credibilidade e evitar redundância e discrepâncias de escala.

Winograd (1995) e Hammond (1995) propuseram a organização dos diferentes níveis de informações, conforme apresentado na figura 2, estabelecendo as relações entre dados primários e indicadores levando em consideração o seu grau de complexidade, o que possibilita uma melhor ordenação dos elementos a serem utilizados na construção de indicadores. De modo a elencar a melhor forma de apresentação das informações, pois é capaz, segundo Santos (2004) “de simplificar, quantificar, comunicar e expressar de forma resumida fenômenos complexos, a partir da agregação de dados e informações.”.

**FIGURA 1- Pirâmide de Informações**



**Fonte: adaptado de Santos (2004) e Bellen (2005)**

Índice pode ser entendido “como o resultado da combinação de um conjunto de parâmetros associados uns aos outros por meio de uma relação pré-estabelecida que dá origem a um novo e único valor.” A definição quanto à utilização de indicadores agregados ou simples, ou a formulação de um índice depende do nível de análise que se pretende, se global, regional ou local, e está associada a questões econômicas, políticas, sociais, culturais e técnicas (SANTOS, 2004).

O emprego adequado de indicadores é capaz de possibilitar a execução de inúmeras análises, inclusive de caráter preventivo, tal como a construção de cenários e tendências, o que possibilita agilizar as ações a serem implementadas na solução de problemas ou mesmo na avaliação de uma determinada realidade em relação as metas previamente estipuladas (COUTO, 2016).

Os indicadores têm sido bastante utilizados em estudos ambientais. Diversos indicadores têm sido desenvolvidos no sentido de descrever o estado de variáveis ambientais em nível regional, estados, municípios ou de países. A distribuição espacial dos indicadores de vulnerabilidade pode ser feita tomando-se como unidade de estudo e analise a sub-bacia da bacia hidrográfica, permitindo entendimento das variações relacionadas as influências das características intrínsecas naturais e antrópicas no território das bacias como um todo (PIRES, 2015).

## **2.4 Logica Fuzzy como instrumento de tomada de decisão**

A lógica Fuzzy pode ser definida como, a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural (PAULA & SOUZA, 2007).

Segundo Silva (2003), a Lógica *Fuzzy* fora concebida para estudar as regiões onde se instalam as incertezas, como também em regiões não ambíguas. As ambigüidades contidas nos componentes deixam de ser colocadas à margem do processo de análise. Os dados são transformados para um espaço de referência e processados por combinação numérica através da Lógica *Fuzzy*, obtendo-se uma superfície de decisão, onde se classifica em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade. Este tipo de classificação ocorre em várias aplicações e em Zoneamentos Ambientais.

Na tomada de decisão espacial, a teoria fuzzy permite atribuir a cada localidade representada em um geocampo, um valor de pertinência entre 0 e 1 que reflete o grau de atendimento dessa localidade a um determinado critério ou objetivo. Na lógica convencional, os únicos valores possíveis de serem atribuídos são 0, no caso de não atendimento, e 1, no caso de atendimento.

A Lógica *Fuzzy* flexibiliza a avaliação incluindo na análise as incertezas da avaliação por meio da escala contínua. Os conjuntos fuzzy correspondem a geocampos, que atribuem a cada coordenada espacial um valor no intervalo de 0 a 1, definido de modo a refletir o nível em que os objetivos estão sendo satisfeitos, do ponto de vista do decisor. Tendo sido construídos os conjuntos fuzzy para cada critério adotado, é possível aplicar diferentes operações de agregação para combinar as avaliações das alternativas conforme os diferentes critérios e, deste

modo, definir uma avaliação global para cada solução alternativa (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011).

A natureza não possui limites rígidos e estáticos, portanto para a análise ambiental em Geomática, é necessário as técnicas de inferências geográficas Fuzzy a fim de representar de maneira mais complexa os fenômenos naturais. Reforçado por Silva (2001), que relata sobre “os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na grande maioria das vezes”. Assim, quando da diferenciação de relevo suave e íngreme, percebe-se uma gradual passagem de uma característica para outra, e para se modelar essas características, aplica-se a lógica Fuzzy, que possibilitará a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo”, significando que, o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (RUHOFF, 2006).

Câmara et al. (2001) afirmam que partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas tendo como vantagem a habilidade de avaliar graus de potencialidade em vez de apenas avaliar presença ou ausência da potencialidade. Segundo Paula & Souza (2007), este tipo de classificação transforma os dados para um espaço de referência onde são processados pela combinação numérica da lógica Fuzzy resultando em uma superfície de decisão, classificando as áreas mais ou menos vulneráveis.

Silvert (2000) acrescenta que a utilização da lógica Fuzzy em estudos de natureza ambiental possibilita a execução de estudos capazes de descrever modificações naturais e antropogênicas, ocorrentes no meio. O autor (opcit) enfatiza que o emprego da lógica possibilita a integração de diferentes tipos de dados, permitindo realizar um balanço entre observações favoráveis e desfavoráveis e, entre efeitos incomensuráveis como impactos sociais, econômicos e biológicos. Ainda possibilita a classificação e quantificação ambiental de atributos de natureza subjetiva. A técnica classifica e transforma os dados para um espaço de referência entre [0 e 1], ou seja, entre [0 e 100%]. O resultado será, ao invés de um mapa temático com limites rígidos, uma superfície de decisão numérica que representa uma variação contínua, uma dinâmica numérica espacial (BARBOSA et al., 2001 segundo RUHOFF, 2006).

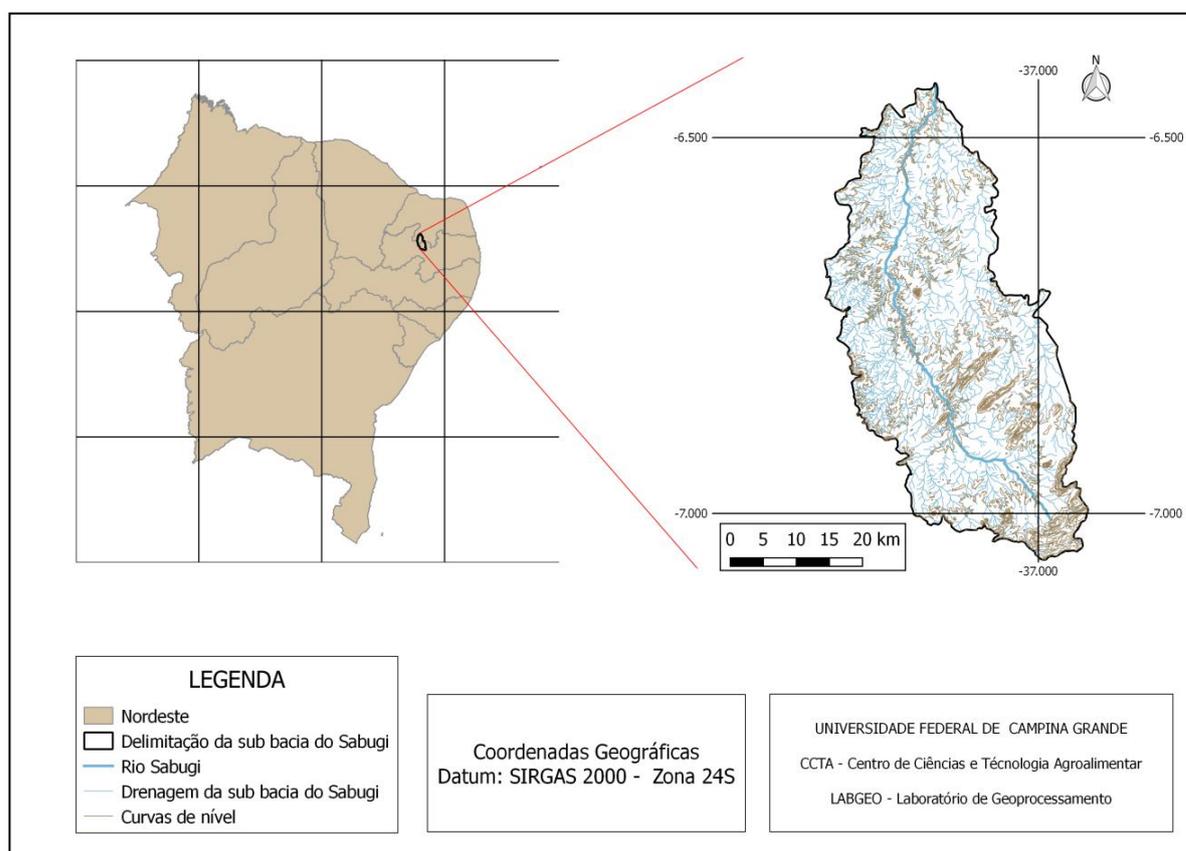
As principais vantagens da utilização dos Sistemas Fuzzy envolvem:

- 1) A capacidade de controlar sistemas com múltiplas variáveis de saída;
- 2) A facilidade de utilizar expressões utilizadas na linguagem natural como resultado final, facilitando a interpretação de dados e a tomada de decisões;
- 3) Possibilidade de controlar processos com característica não-linear e de alta ordem, qual a determinação do modelo matemático e o controle clássico do sistema são muito complexos;
- 4) Facilidade de implementar técnicas de controle baseadas na experiência de um especialista e em aspectos intuitivos, utilizando proposições linguísticas (regras) e entradas imprecisas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste estudo envolve a construção de um sistema de indicadores, cálculo e avaliação da vulnerabilidade referente ao solo e seu uso na sub bacia do Sabugi, região inserida no semiárido da Paraíba e do Rio Grande do Norte (ver Figura 2). A sub bacia hidrográfica do rio Sabugi está inserida na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, no qual fazem parte 7 municípios (sendo três no Rio Grande do Norte: Caicó, São João do Sabugi, Ipueira e quatro na Paraíba: Patos, Santa Luzia, São Mamede e Várzea) foi caracterizada geograficamente até o limite do açude de São Mamede com a produção de mapas que especificou a geologia, geomorfologia, clima, pedologia e uso do solo.

**FIGURA 2- Localização geográfica da sub bacia do Sabugi**



Fonte: autoria própria, 2018

Para execução do trabalho foi necessária a obtenção de informações referentes às características da sub bacia do Sabugi através de:

- 1) Cartas topográficas digitais, disponíveis no banco de dados do Exército Brasileiro. Foram utilizadas as cartas (SB-24-Z-B-I; SB-24-Z-B-IV; SB-24-Z-B-V; SB-24-Z-D-I; SB-24-Z-D-II);

- 2) Dados pluviométricos mensais fornecidos pela:
  - a) Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAPB);
  - b) Agência Nacional de Águas (ANA);
  - c) Empresa de Pesquisa Agropecuária (ERPAN);
- 3) Base vetorial de dados cartográficos disponíveis gratuitamente no banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) sobre relevo, geologia e tipos de solo;
- 4) Dados matriciais (*raster*) imagem multiespectral do satélite Landsat 8 (215/64) com cena do dia 15/08/2017, disponível gratuitamente na base de dados da USGS (United States Geological Survey – Serviço Geológico dos Estados Unidos).

A integração dos dados foi realizada com o uso de Sistemas de Informações Geográficas – SIG's, que possibilita realizar o tratamento matemático de dados geográficos, bem como armazenar informações relacionadas à geometria e aos atributos dos dados georreferenciados, através da utilização do software QGIS 2.14, que permite especializar dados vetoriais e *raster* de modo a visualizar, criar, editar, analisar e compor mapas de acordo com a necessidade do estudo. O mapa de uso de solo foi gerado a partir do plugin *SemiAutomatic Classification Plugin - SCP* que é um complemento desenvolvido para o QGIS que possibilita a classificação de imagens pixel a pixel.

O mapa de uso do solo foi obtido via imagem multiespectral disponibilizada pelo satélite Landsat 8, que pode ser adquirida gratuitamente pelo USGS, e envolveu inicialmente a correção atmosférica das bandas que compõe a imagem, ajustando assim refletância, corrigindo a imagem para o início do processo de caracterização desejado, em seguida realizou-se o recorte da imagem para área de interesse e criou-se o bandset cujo objetivo é unir em uma única imagem as 12 bandas que compõe a imagem Landsat 8, facilitando assim o trabalho a ser realizado. Posteriormente realizou a classificação dos componentes que abrangem a região de estudo, considerando características vistas como importantes neste tipo de análise, possibilitando deste modo, a visualização espacial das interações que ocorrem na região estudada.

O processamento dos dados utilizando o plugin SCP envolveu: 1) o *download* dos dados; 2) a preparação da base cartográfica; 3) a elaboração da chave de interpretação, que consiste na análise visual dos elementos presentes na imagem (tonalidade, cor, textura, forma, tamanho, padrão e outros) determinando as categorias temáticas presentes na imagem, tais como mata/caatinga, agricultura, solo, água, urbanização (ROSA,2009). Neste estudo em específico, foram identificadas 8 (oito) classes temáticas, sendo: Corpos d'água, Nuvem, Sombra de Nuvem, Mata ciliar, Vegetação, Solo exposto, Urbanização e Agricultura. Gerou-se ainda o relatório com as informações e a acurácia da classificação.

A elaboração dos mapas de: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Climatologia e Uso e ocupação do solo envolveu os conceitos de cartografia temática para favorecer a comunicação cartográfica, para a posterior elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental da sub bacia hidrográfica do Sabugi, de modo a identificar as áreas mais suscetíveis a fenômenos naturais e/ou antrópicos negativos.

Já o mapeamento da vulnerabilidade ambiental da área estudada foi feito por meio de inferência Fuzzy, integrando dados relativos ao meio físico (geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e climatologia) de forma a disponibilizar um instrumento de auxílio na avaliação para tomadas de decisões públicas em sub bacias hidrográficas e/ou áreas de interesses.

### **3.1 Desenvolvimento**

A análise da vulnerabilidade ambiental da sub bacia do Sabugi, iniciou-se com a delimitação da área a partir das cartas topográficas e a partir dos dados vetoriais caracterizou-se a área para as classes: geologia, geomorfologia, pedologia e climatologia.

Os critérios para atribuição da vulnerabilidade para os temas: Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e clima, foram determinados por Crepani et al., (2001), segundo o qual, para se analisar uma unidade de paisagem natural é necessário conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, bem como o tipo de cobertura vegetal constituinte.

Essas informações foram fornecidas pelos atributos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e fitogeográficos, que uma vez integrados forneceram

um retrato do comportamento da unidade de paisagem frente a sua ocupação. Recorreu-se também a climatologia regional, no qual foram levantadas algumas características climáticas da sub bacia onde se localiza a unidade de paisagem.

A metodologia de Crepani et al., (2001), fornece uma visão holística da paisagem ao possibilitar a integração de estudos morfodinâmicos de forma empírica, de acordo com o estágio de evolução das unidades de paisagem. No caso desse trabalho, optou-se por trabalhar com as Unidades de Planejamento Hídrico (UPH), e todas as informações relacionadas à geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima (FLORENZANO, 2011), na qual se utiliza a equação descrita a seguir.

$$V = \frac{(G+R+S+Vg+C)}{5} \quad (1)$$

Onde:

V= vulnerabilidade;

G = vulnerabilidade para o tema Geologia

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

S = vulnerabilidade para o tema Solos;

Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação;

C = vulnerabilidade para o tema clima

Para cada classe analisada determinou-se um intervalo de valores pré-estabelecidos segundo a metodologia adotada, tanto para a propensão ao risco (SILVA), quanto para o peso na inferência do sistema *Fuzzy*, conforme pode ser observado a seguir:

## **GEOLOGIA**

A contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõe, onde quanto maior e o grau de coesão maior será a estabilidade local, e quanto menor o grau de coesão mais instável será o ambiente. Por grau de coesão entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as constituem (Crepani et al., 2001).

O peso de cada classe geológica tanto para o SILVA quanto para o Sistema *Fuzzy* segue no Quadro 1, a seguir. Além da descrição da variável linguística resultante da utilização da metodologia *Fuzzy* para a determinação do grau de vulnerabilidade ambiental.

**QUADRO 1- Classificação dos riscos referentes à geologia**

Litologia	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência ( <i>Fuzzy</i> )	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
Riólito, Granito, Dacito	1,1		1,1	
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2		1,2	
Migmatitos, Gnaisses	1,3		1,3	
Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	1,4	Moderadamente estável	1,4	Baixo
Andesito, Diorito, Basalto	1,5		1,5	
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6		1,6	
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7		1,7	
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8	Medianamente estável/instável	1,8	Moderado
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9		1,9	
Estaurolita xisto, Xisto granatífero	2,0		2,0	
Filito, Metassiltito	2,1		2,1	
Ardósia, Metargilito	2,2		2,2	
Mármore	2,3	Moderadamente instável	2,3	Alto
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4		2,4	
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5		2,5	
Grauvacas, Arcózios	2,6		2,6	
Siltitos, Argilitos	2,7	Instável	2,7	Muito Alto
Folhelhos	2,8		2,8	
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9		2,9	
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc	3,0		3,0	

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

## GEOMORFOLOGIA

Para estabelecer os valores da escala de vulnerabilidade para as unidades de paisagem natural com relação à geomorfologia, são analisados os seguintes índices morfométricos do terreno: dissecação do relevo pela drenagem, amplitude altimétrica e declividade. Aplicando a metodologia de Crepani et al., (2001), verifica-se que para as formas de origem estrutural e denudacional, caracterizadas por relevos planos a suavemente ondulados, como as superfícies pediplanadas, os interflúvios tabulares e as colinas de topos aplainados, o mais provável é que os valores de vulnerabilidade variem entre 1,0 e 1,6, porque quanto mais baixos forem individualmente os índices morfométricos mais próximos de 1,0 serão os valores de vulnerabilidade e quanto mais altos forem esses índices mais próximos de 1,6 serão os valores de vulnerabilidade destas formas. O peso de cada variável segundo os critérios estabelecidos na metodologia adotada segue nos Quadros 2, 3 e 4 respectivamente. A Equação 2 apresenta como se procedeu o cálculo referente ao indicador geomorfologia:

$$R = \frac{G+A+D}{3} \quad (2)$$

Onde:

R= risco para o tema geomorfologia;

G= risco atribuído ao tema grau de dissecação;

A= risco atribuído a amplitude altimétrica;

D= risco atribuído a declividade

### a) ALTIMETRIA

De acordo com Crepani et al., (2001) a amplitude altimétrica está relacionada com o aprofundamento da dissecação (dimensão interfluvial e profundidade dos tavelgues), que é um indicador da energia potencial disponível para o “runoff”. Quanto maior a amplitude altimétrica maior é a energia potencial, pois as águas pluviométricas que caem sobre os pontos mais altos do terreno, adquirem maior energia cinéticas no seu percurso em direção as partes mais baixas e, conseqüentemente, apresentarão maior capacidade de erosão ou de morfogênese. A variável numérica para cada classe altimétrica pode ser observada no Quadro 2 abaixo:

**QUADRO 2- Risco para a amplitude altimétrica**

Amplitude altimétrica (m)	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência (Fuzzy)	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
<20	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
20-29,5	1,1		1,1	
29,5-39	1,2		1,2	
39-48,5	1,3		1,3	
48,5-58	1,4	Moderadamente estável	1,4	Baixo
58-67,5	1,5		1,5	
67,5-77	1,6		1,6	
77-84,5	1,7		1,7	
84,5-94	1,8	Medianamente estável/instável	1,8	Moderado
94-103,5	1,9		1,9	
103,5-113	2,0		2,0	
113-122,5	2,1		2,1	
122,5-132	2,2		2,2	
132-141,5	2,3	Moderadamente instável	2,3	Alto
141,5-151	2,4		2,4	
151-160,5	2,5		2,5	
160,5-170	2,6		2,6	
170-179,5	2,7	Instável	2,7	Muito Alto
179,5-189	2,8		2,8	
189-200	2,9		2,9	
>200	3,0		3,0	

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

#### b) DECLIVIDADE

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

**QUADRO 3- Declividade e a propensão ao risco**

Declividade (%)	Classe morfométrica	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência ( <i>Fuzzy</i> )	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
<2	Muito Baixa	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
2-6	Baixa	1,5	Moderadamente estável	1,5	Baixo
6-20	Média	2,0	Medianamente estável/instável	2,0	Moderado
20-50	Alta	2,5	Moderadamente instável	2,5	Alto
>50	Muito Alta	3,0	Instável	3,0	Muito Alto

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

### c) AMPLITUDE ALTIMÉTRICA

A amplitude altimétrica é uma variável calculada como sendo o inverso da densidade de drenagem, que foi determinada inicialmente na etapa da caracterização fisiográfica da sub-bacia do Sabugi.

**QUADRO 4- Classificação de risco em relação à amplitude do interflúvio**

Amplitude do interflúvio (m)	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência ( <i>Fuzzy</i> )	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
<5000	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
4750-5000	1,1		1,1	
4500-4750	1,2		1,2	
4250-4500	1,3		1,3	
4000-4250	1,4	Moderadamente estável	1,4	Baixo
3750-4000	1,5		1,5	
3500-3750	1,6		1,6	
3250-3500	1,7		1,7	
3000-3250	1,8	Medianamente estável/instável	1,8	Moderado
2750-3000	1,9		1,9	
2500-2750	2,0		2,0	
2250-2500	2,1		2,1	
2000-2250	2,2		2,2	
1750-2000	2,3		2,3	
1500-1750	2,4		2,4	
1250-1500	2,5		2,5	

1000-1250	2,6	Moderadamente instável	2,6	Alto
750-1000	2,7	Instável	2,7	Muito Alto
500-750	2,8		2,8	
250-500	2,9		2,9	
>250	3,0		3,0	

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

## PEDOLOGIA

A maior ou menor suscetibilidade de um solo a sofrer os processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores e os mais importantes são: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis. Na metodologia proposta a principal característica considerada para estabelecer as 21 classes de vulnerabilidade do tema solos é o grau de desenvolvimento ou maturidade do solo. A partir de dados bibliográficos, associados à interpretação da imagem, são atribuídos valores de vulnerabilidade ao solo ou a associação de solos (CREPANI et al., 2001). O peso de cada variável podem ser observados no Quadro 5 a seguir:

**QUADRO 5- Pesos adotados para os níveis de risco a pedologia**

Classe de solo	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência (Fuzzy)	Grau de Vulnerabilidade de Ambiental
Latosolos	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
Argissolos	2,0	Medianamente Estável/Instável	2,0	Moderado
Luvissolos				
Chernossolos				
Planossolos				
Espodossolos				
Cambissolos	2,5	Moderadamente instável	2,5	Alto
Neossolos	3,0	Instável	3,0	Muito Alto
Vertissolos				
Organossolos				
Gleissolos				
Plintossolos				
Afloramento rochoso				

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

## USO DO SOLO

Os valores de risco atribuídos ao uso do solo estão diretamente relacionados a densidade de cobertura vegetal da área analisada segundo a metodologia de Crepani et al., (2001). Sendo esta constatação comum de diversos autores que, a vegetação é um fator de proteção da unidade territorial contra processos erosivos (PIRES, 2015).

A densidade de cobertura vegetal da unidade de paisagem natural (cobertura do terreno) é um fator de proteção da unidade contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão, por isso para as altas densidades de cobertura os valores atribuídos na escala de vulnerabilidade se aproximam da estabilidade (1,0), para as densidades intermediárias atribuem-se valores intermediários (ao redor de 2,0), e para baixas densidades de cobertura vegetal valores próximos da vulnerabilidade (3,0) (CREPANI et al., 2001).

**QUADRO 6- Risco para o uso do solo da sub bacia do Sabugi**

Uso e ocupação do solo	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência (Fuzzy)	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
Vegetação	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
Água	0		0	
Mata ciliar	1,0		1,0	
Agricultura	3,0	Instável	3,0	Muito Alto
Urbanização	3,0		3,0	
Solo exposto	3,0		3,0	

Fonte: adaptado de Cavalcanti (2014)

## CLIMATOLOGIA

As principais características físicas da chuva envolvidas nos processos erosivos são: a quantidade ou pluviosidade total, a intensidade ou intensidade pluviométrica e a distribuição sazonal. Dentre as três características é especialmente importante se conhecer a intensidade pluviométrica porque representa uma relação entre as outras duas (quanto chove / quando chove), resultado que determina, em última análise, a quantidade de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética. Os valores de intensidade pluviométrica podem ser considerados representantes de valores de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética responsável pela erosividade da chuva, logo podemos dizer que quanto maiores os valores da

intensidade pluviométrica maior é a erosividade da chuva e podemos criar uma escala de erosividade da chuva que represente a influência do clima nos processos morfodinâmicos. O peso de cada variável segundo os critérios estabelecidos na metodologia adotada para a sub bacia do Sabugi segue no Quadro 7.

**QUADRO 7- Classificação em relação a intensidade pluviométrica**

Intensidade pluviométrica (mm/mês)	Média (SILVA)	Propensão ao risco (SILVA)	Peso na Inferência (Fuzzy)	Grau de Vulnerabilidade Ambiental
<50	1,0	Estável	1,0	Muito Baixo
50-75	1,1		1,1	
75-100	1,2		1,2	
100-125	1,3		1,3	
125-150	1,4	Moderadamente estável	1,4	Baixo
150-175	1,5		1,5	
175-200	1,6		1,6	
200-225	1,7		1,7	
225-250	1,8	Medianamente estável/instável	1,8	Moderado
250-275	1,9		1,9	
275-300	2,0		2,0	
300-325	2,1		2,1	
325-350	2,2		2,2	
350-375	2,3	Moderadamente instável	2,3	Alto
375-400	2,4		2,4	
400-425	2,5		2,5	
425-450	2,6		2,6	
450-475	2,7		2,7	
475-500	2,8	Instável	2,8	Muito Alto
500-525	2,9		2,9	
>525	3,0		3,0	

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

A partir dos indicadores gerados, foi possível obter a situação espacial da área quanto a vulnerabilidade ambiental, a geração de mapas referentes a tal permitiu uma análise completa e objetiva da sub bacia do Sabugi.

Na escala do Quadro 8 os valores próximos a 1,0 correspondem às áreas consideradas estáveis, os valores próximos a 2,0 correspondem à média estabilidade e os valores próximos a 3,0 representam as áreas instáveis, com alto índice de vulnerabilidade.

**QUADRO 8- Escala de propensão ao risco à vulnerabilidade ambiental**

Unidade de Paisagem	Média		Propensão ao risco	Grau de Saturação			
				Vermelho	Verde	Azul	Cores
UNIDADE DE PLANEJAMENTO HIDRICO (UPH1, UPH2...UPHn)	↑ -----INSTABILIDADE----- ↓	3,0	Instável	255	0	0	Red
		2,9		255	51	0	Red-Orange
		2,8		255	102	0	Orange
		2,7		255	153	0	Orange-Yellow
		2,6	Moderadamente Instável	255	204	0	Yellow-Orange
		2,5		255	255	0	Yellow
		2,4		204	255	0	Yellow-Green
		2,3		153	255	0	Yellow-Green
		2,2	Medianamente Estável/Instável	102	255	0	Green-Yellow
		2,1		51	255	0	Green
		2,0		0	255	0	Green
		1,9		0	255	51	Green
		1,8	Moderadamente Estável	0	255	102	Green
		1,7		0	255	153	Green-Cyan
		1,6		0	255	204	Cyan
		1,5		0	255	255	Cyan
		1,4	Estável	0	204	255	Light Blue
		1,3		0	153	255	Blue
		1,2		0	102	255	Blue
1,1	0	51		255	Blue		
1,0	0	0		255	Dark Blue		
			↓ -----ESTABILIDADE----- ↑				

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

Dada a variabilidade espacial de uma sub bacia hidrográfica, a construção de um índice global de vulnerabilidade ambiental, depende do estabelecimento de uma relação descritiva da importância de cada variável influente na vulnerabilidade final da área, considerando-se inclusive a resiliência do sistema ou de um conjunto de elementos territoriais. Deste modo, preferiu-se não elaborar um índice global.

O Quadro 9, detalha a representação da vulnerabilidade associada a uma coloração para representação gráfica. Selecionou-se a classificação dos indicadores com base na distribuição por classes de parâmetros de vulnerabilidade relacionados com as características naturais e antropogênicas da área, assim como cita Coelho et al., (2011).

**QUADRO 9- Classificação dos indicadores de vulnerabilidade ambiental**

Classificação da vulnerabilidade					
Valor do índice	1,0 à 1,3	1,4 à 1,7	1,8 à 2,2	2,3 à 2,6	2,7 à 3,0
Critério para a Vulnerabilidade Ambiental (SILVA)	Estável	Moderadamente Estável	Medianamente Estável/Instável	Moderadamente Instável	Instável
Critério para a vulnerabilidade Ambiental (FUZZY)	Muito Baixa	Baixa	Média	Elevada	Muito Elevada
Coloração atribuída					

Fonte: adaptado de Coelho et al., (2011)

### **DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS VARIÁVEIS (MODELO FUZZY)**

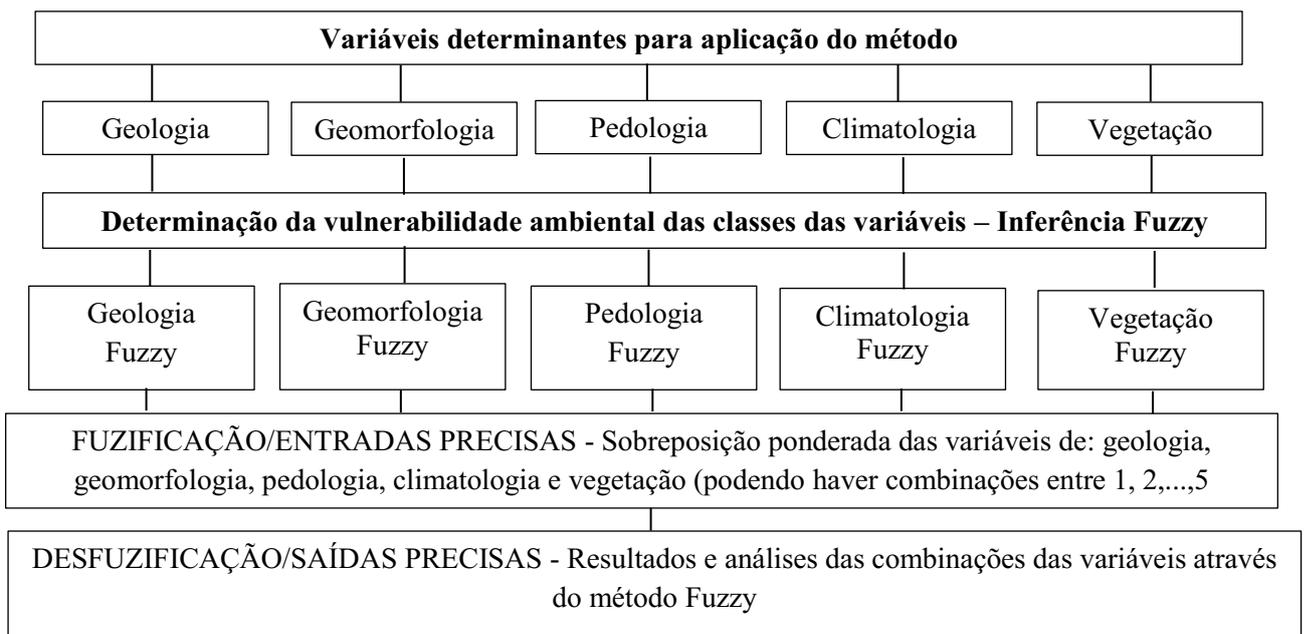
A determinação da vulnerabilidade ambiental utilizando a modelagem *Fuzzy*, ocorreu via sobreposição ponderada, havendo a necessidade de que sejam estipulados os pesos *Fuzzy* de cada classe das variáveis dos índices: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e climatologia, de acordo com suas características em cinco categorias: Muito Baixa (1,0-1,3), Baixa (1,4-1,7), Média (1,8-2,2), Elevada (2,3-2,6), Muito Elevada (2,7-3,0), esta escala de vulnerabilidade foi adaptada com base na metodologia de Crepani et al., (2001) adota ao longo de todo o estudo. Sendo assim, a variabilidade da vulnerabilidade ambiental adotada segue o mesmo valor de índice apresentado nesta metodologia. E o critério para o estabelecimento da variável linguística final da vulnerabilidade pelo sistema *Fuzzy*

foi adaptado de Coelho et al., (2011), sendo a nomeação da vulnerabilidade dividida em cinco classes: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta.

### CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo *Fuzzy* proposto é baseado nos dados gerados e na metodologia adotada. Deste modo, a construção do modelo foi feita mediante as variáveis expostas acima, seguindo os pesos definidos e a descrição do grau de vulnerabilidade. O modelo determina a vulnerabilidade a partir da combinação de varias variáveis. As regras descritas seguiram o que é encontrado na literatura utilizada neste estudo, bem como em outros trabalhos que relacionam o sistema *Fuzzy*. O fluxograma a seguir mostra o método de obtenção da vulnerabilidade ambiental a partir da utilização da lógica *Fuzzy*.

**Fluxograma 1.** Método para obtenção da vulnerabilidade ambiental.



Sabendo que os indicadores utilizados neste estudo são definidos como índices, que segundo Januzzi (2004), buscam dar uma visão geral por meio de um único valor, ou seja, a lógica *Fuzzy* será modelada com base nas incertezas relacionadas a vagueza, imprecisão e subjetividade dos conceitos da linguagem humana. Deste modo, podemos considerar um dado conjunto universo  $X$  e um subconjunto  $A$  de  $X$ , a função característica  $A(x)$  do subconjunto  $A$  é uma função cujo domínio é o conjunto universo  $X$  e a imagem é o conjunto  $Im=\{0;1\}$ , a qual

associa a cada elemento de  $x \in X$  o valor “1” caso o elemento  $x \in A$  e “0” caso contrario, ou formalmente:

$$\begin{aligned} A: X &\rightarrow \{0,1\} \\ X &\rightarrow A(x) \end{aligned} \quad (3)$$

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (4)$$

Definida a função característica, na logica Fuzzy a relação de pertinência é relaxada e a função característica pode assumir qualquer valor em um dado intervalo, como por exemplo  $[0,1]$ , ou seja, um elemento pode pertencer parcialmente ao conjunto. Deste modo, a função característica para subconjuntos *Fuzzy* é:

$$\begin{aligned} A: X &\rightarrow [0,1] \\ X &\rightarrow A(x) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde: A representa o grau com que x pertence ao subconjunto A.

Partindo desde princípio matemático, e sabendo que, variáveis linguísticas são expressas por termos linguísticos, interpretados como números *Fuzzy* específicos, definidos utilizando-se uma variável base, que em termos clássicos pode ser exemplificada como fenômenos físicos (temperatura, pressão, velocidade, umidade, etc) ou qualquer variável numérica (idade, performance, salário, etc). De modo geral, neste caso específico, as variáveis linguísticas são totalmente caracterizadas por:

- O nome da variável (geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, climatologia);
- O conjunto de termos linguísticos relativos a variável ou a combinação de variáveis no que desrespeito a vulnerabilidade ambiental (muito baixa, baixa, moderada, alta, muito alta)

- Regras semânticas, que atribuem a cada termo linguístico o seu significado (número Fuzzy)

Sendo assim o modelo construído será composto basicamente de três elementos: as entradas ou *inputs*, ou ainda antecedentes, as saídas, ou *outputs*, ou ainda consequentes, e as regras de inferência, de acordo com o descrito abaixo:

- Se {entradas} então {saídas}

As entradas descrevem uma condição (premissas), enquanto a saída descreve uma conclusão ou uma ação que pode ser esboçada quando as premissas se verificam. As regras são determinadas e utilizadas quando as entradas são atendidas (ORTEGA, 2001). Neste estudo específico podemos exemplificar, considerando a condição numérica da nossa análise em acordo com Crepani et al., (2001) a seguinte descrição:

- Entrada: Geologia, Geomorfologia, Pedologia {muito baixa; baixa; baixa}
- Saída: Vulnerabilidade: {baixa}

A variável linguística adotada, obedecerá a escala numérica de vulnerabilidade proposta por Crepani et al., (2001) utilizada na primeira fase deste estudo, isto valerá para todas as cinco classes analisadas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e climatologia. A modelagem *Fuzzy* será composta por “n” conjuntos com diferentes combinações de variáveis, de modo que se consiga minimizar as incertezas, que também serão reduzidas mediante a criação de regras baseadas nas informações obtidas na primeira parte deste estudo, posteriormente, as condições de vulnerabilidade produzidas serão transformadas em arquivo de texto, e serão exportadas para o *software* livre Qgis 2.14 como dados de pontos contendo informações de banco de dados de saída, o tratamento destes dados exportados, ao serem convertidos em um arquivo raster, geram o mapa de vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do Sabugi, com base nas regras estabelecidas no modelo *Fuzzy*.

Este tipo de modelagem poderá ajudar na tomada de decisão para implementação de programas/planos de gestão em áreas de bacia hidrográfica, com base na introdução das diferentes hipóteses a depender da localidade de estudo. A

decisão é suportada pela consideração de critérios que servem como normas para encontrar a melhor alternativa que representam as condições de qualificar ou avaliar contribuindo para a tomada de decisão. Deste modo, a metodologia valida-se mediante apresentação, análise e posterior discussão dos resultados gerados, esses dados, segundo a demonstra a metodologia adotada, integram toda a composição fisiográfica da área, possibilitando portanto, um confiável banco de dados que servirá como suporte para o desenvolvimento de estudos futuros voltados ao monitoramento, preservação e recuperação da qualidade ambiental da sub bacia do Sabugi, diante da expressiva expansão das atividades antrópicas na região, bem como pela presença de eventos climáticos intensos que tendem a gerar prejuízos as comunidades inseridas nesse contexto.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Vulnerabilidade Ambiental através do SILVA**

Segundo Pires (2015), os indicadores de vulnerabilidade referentes às características dos solos e seu uso e ocupação nas bacias hidrográficas devem refletir as influências antrópicas considerando os meios físico, biótico e econômico. A maioria dos territórios considerados vulneráveis o são porque as comunidades ou as atividades econômicas prevaletentes apresentam vulnerabilidades estruturais, ou seja, os “territórios vulneráveis” correspondem a concentrações geográficas, de dimensão variável, de situações com acentuada vulnerabilidade social e econômica: famílias que vivem com renda inferior a um salário mínimo, áreas rurais em processo de desertificação e em declínio demográfico persistente entre outras.

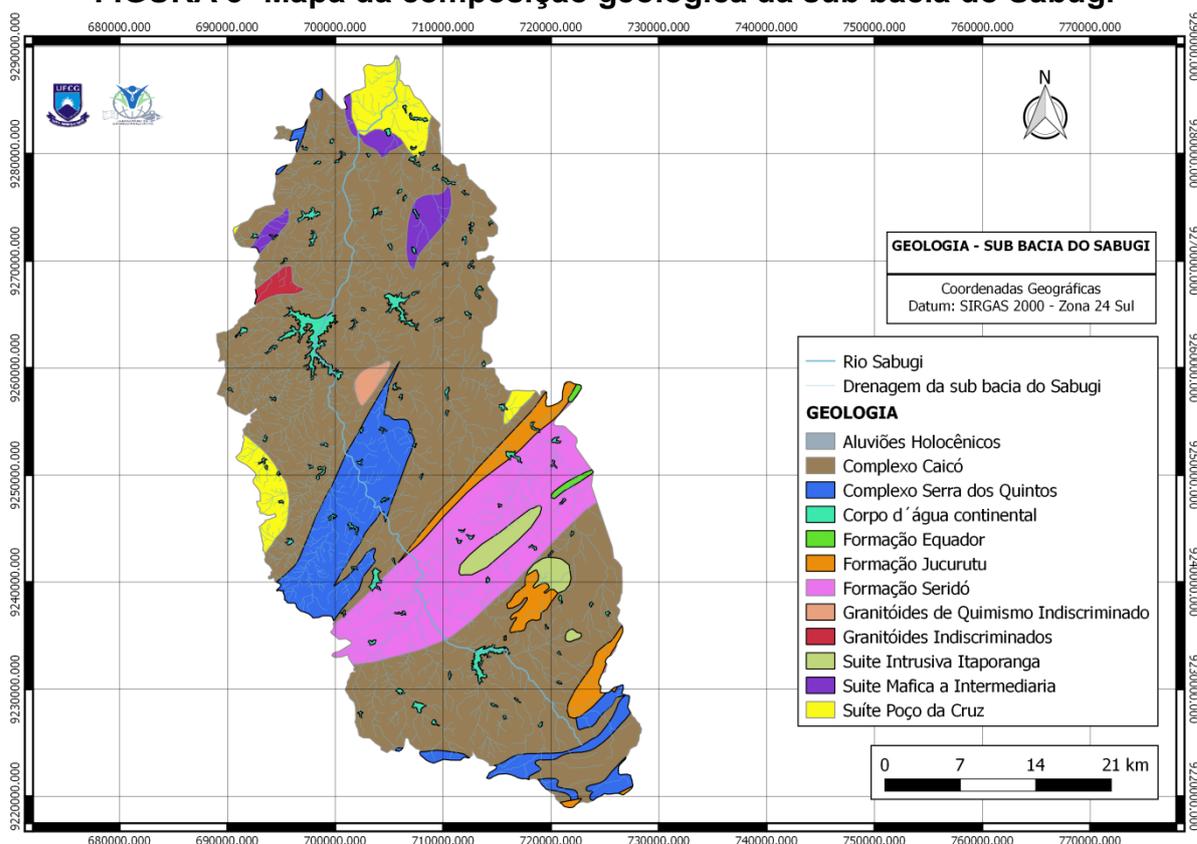
O mapa de vulnerabilidade ambiental da sub bacia do Sabugi, foi elaborado por meio do cruzamento das informações relativas à: Geologia, Geomorfologia, Pedologia (solos), Clima e Uso e ocupação do solo.

### **GEOLOGIA**

Para o estudo da vulnerabilidade ambiental no tocante ao elemento Geologia, levou-se em consideração a Vulnerabilidade à desnudação (intemperismo e erosão) das Rochas utilizada por Crepani et al (2011). Vale salientar que a taxa de intemperismo de um mineral depende de vários outros fatores que vão além de sua estrutura e composição química, mas considerando apenas a sua característica química, foi estabelecida a vulnerabilidade à desnudação das rochas segundo a metodologia adotada.

Diante das informações geradas na Figura 3, é possível visualizar por meio de trechos com diferentes cores, a distribuição espacial das ocorrências geológicas na sub bacia do Sabugi, permitindo a uniformização das informações que possibilita a análise e posterior interpretação das características geológicas da área de estudo, de modo a gerar dados voltados ao monitoramento, preservação e mitigação da sub bacia do Sabugi, uma vez que, a geologia é um dos parâmetros utilizados no estudo da vulnerabilidade ambiental, se enquadrando portanto, como um dos fatores fundamentais na manutenção da harmonia socioambiental de ambientes com influência significativa de atividades antrópicas.

**FIGURA 3- Mapa da composição geológica da sub bacia do Sabugi**



Fonte: Autoria própria, 2018

Para as ocorrências geológicas identificadas na Figura 3, a Tabela 1 apresenta o grau de risco à perda de solo de cada classe.

**TABELA 1- Propensão ao risco à perda de solo para o tema geologia**

Classe	Grau de risco à perda de solo	Área (hectare)	Porcentagem (%)
Aluviões holocênicos	3,0	780,90	0,46%
Complexo Caicó	3,0	737,00	0,44%
Complexo serra dos quintos	3,0	3136,67	1,85%
Formação equador	3,0	8129	4,80%
Formação Jucurutu	3,0	100159,00	59,16%
Formação Seridó	3,0	21192,80	12,52%
Granitóides de quimismo indiscriminado	1,2	329,10	0,19%
Granitóides indiscriminados	1,2	5117,90	3,02%
Suite intrusiva Itaporanga	3,0	6472,90	3,82%
Suite mafica e intermediária	3,0	14674,60	8,66%
Suite poço da cruz	3,0	2498,70	1,48%
Corpos d' água continental	0	6061,20	3,58%

Fonte: Adaptado de Crepani., (2001)

De acordo com o mapa geológico gerado, o complexo Caicó (CC) é a ocorrência predominante na área de estudo, portanto apresentando uma escala de vulnerabilidade de 3,0 de acordo com o quadro 1, tendo em algumas áreas obtido o valor de 1,2, levando em consideração as características químicas da composição das rochas. A concepção do Complexo Caicó remonta aos trabalhos de Meunier (1964) e Ferreira e Albuquerque (1969) e caracteriza-se por ortognaisses equigranulares ou augen, anfibolitos, rochas metavulcânicas e metassedimentares (Jardim de Sá, 1994). A formação Equador compõe-se de quartzito (predominante), metacglomerado e paragnaisse.

Em menor ocorrência destacam-se as unidades geológicas: Aluviões Holocênico, Granitóides de Quimismo Indiscriminado, Granitóides Indiscriminados e a Suite Máfica a Intermediária, como pode ser observada na Tabela 1. De uma forma geral, o mapeamento geológico da sub bacia do Sabugi gerou novas informações que contribuíram para o conhecimento e também para uma atualização do cenário geológico local.

## **GEOMORFOLOGIA**

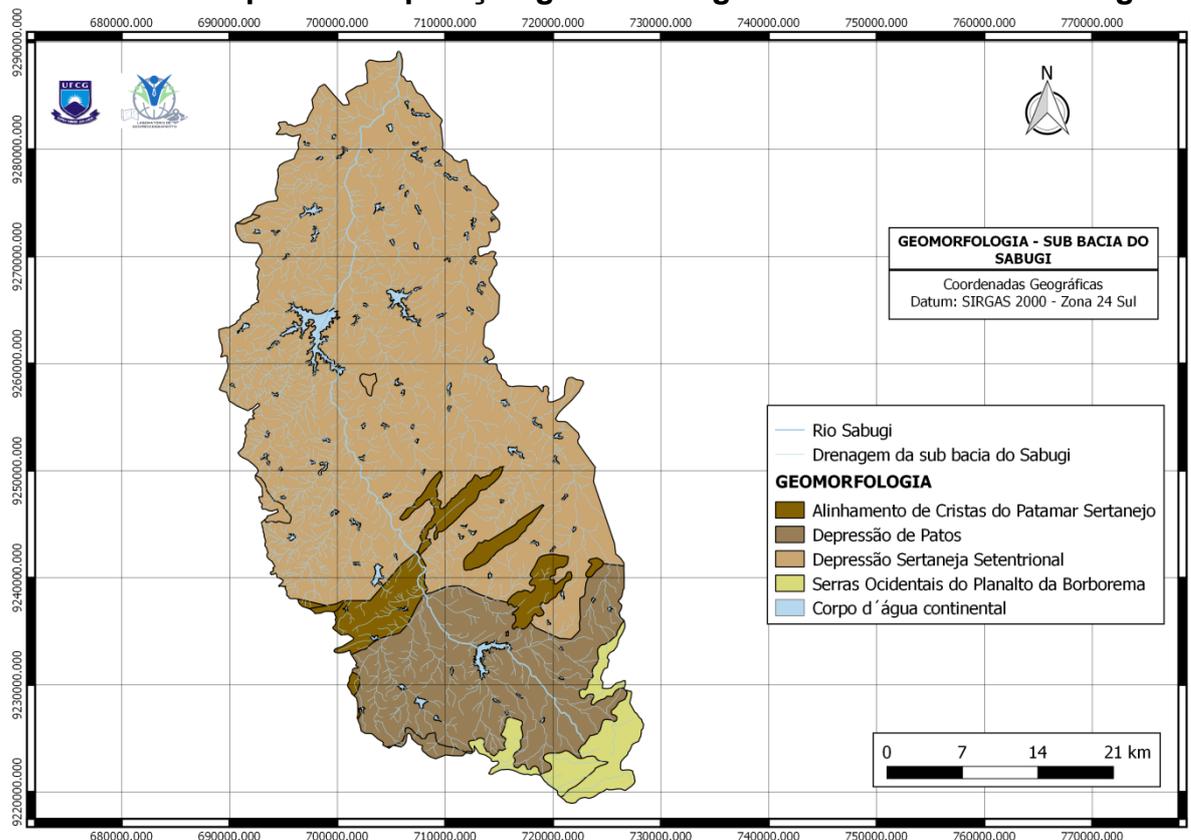
A observação do mapa geomorfológico gerado foi o ponto de partida para evidenciar a predominância da depressão sertaneja setentrional na sub bacia do Sabugi, com a presença ainda de outras unidades geomorfológicas: Depressão de Patos, Serra Ocidental do Planalto da Borborema, além do Alinhamento de Cristais do Patamar Sertanejo.

A caracterização geomorfológica apresentada (Figura 4), foi obtida mediante dados obtidos de cartas topográficas (IBGE), destacando-se como objeto principal o grau de dissecação do relevo, orientada pela distância dos interflúvios e o aprofundamento da drenagem (Crepani et al., 2001), nesta perspectiva estabeleceu-se o grau de vulnerabilidade da paisagem, quanto aos processos erosivos com base nas formas do relevo e nos índices adotados, considerando que os relevos planos e suavemente ondulados recebem valores que variam de 1 a 1.6, os medianamente dissecados são identificados por valores que variam de 1.7 a 2.3, e para os fortemente dissecados os valores variam de 2.4 a 3.

A vulnerabilidade geomorfológica fundamentou-se na combinação de valores determinados para cada um dos índices morfométricos do relevo, resultando desta

forma, na compartimentação de se constitui em referência na compreensão da paisagem.

**FIGURA 4- Mapa da composição geomorfológica da sub bacia do Sabugi**



Fonte: Autoria própria, 2018

Para as ocorrências geomorfológicas identificadas na Figura 4, a Tabela 2 apresenta a distribuição territorial de cada uma das classes apresentadas.

**TABELA 2- Porcentagem das áreas para o tema geomorfologia na sub bacia do Sabugi**

Classe	Área (hectare)	Porcentagem
Alinhamento de cristais do patamar	9345,19	5,76%
Depressão de patos	17851,4	11,01%
Depressão sertaneja setentrional	119574,00	73,75%
Serras ocidentais do planalto	6795,11	4,19%
Corpos d'água	8564,98	5,28%

Fonte: Autoria própria, 2018

A depressão sertaneja constitui-se de uma superfície de erosão (sedimentar) desenvolvida a partir de fatores exógenos tais como: clima, e é mais comumente

encontrado em fundos de vales abertos e/ou em colinas rasas, sendo ainda essa superfície constituída por inselbergs, esses últimos são resultantes de levantamentos antigos, mostrando cristais ou maciços rejuvenescidos e possuindo altitudes inferiores a 100m (ROSS, 2003).

O planalto da Borborema por sua vez, está compreendido em segmentos dos dobramentos das rochas pré-cambrianas soergidas em forma de abóbodas (ROSS, 2003). A depressão sertaneja da região contorna o Planalto da Borborema nas suas partes mais baixas, formando vales. Segundo STORANI e PEREZ FILHO (2015), o arranjo estrutural do planalto e o acamamento sub-horizontal da depressão favoreceu a formação de patamares ou superfícies aplanadas levemente inclinadas ou horizontalizadas e um modelado de tipos amplos e planos ou suavemente convexizados.

### HIPSOMETRIA

A aquisição da distribuição hipsométrica faz parte dos aspectos geomorfológicos necessários para elaboração do mapeamento de risco a propensão à perda de solo.

**TABELA 3- Propensão ao risco à perda de solo para amplitude altimétrica**

Amplitude altimétrica	Grau de risco à perda de solo	Área (hectare)
151 – 160,5	2,5	58,48
160,5 – 170	2,6	705,87
170 – 179,5	2,7	1853,94
179,5 – 189	2,8	3920,93
189 – 200	2,9	26146,5
>200	3,0	128483,00

Fonte: Adaptado de Crepani., (2001)

A tabela 3, mostra a amplitude altimétrica da sub bacia do Sabugi, isto é, a altitude mínima e máxima existente na bacia, extraídas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, onde, pode-se observar que, o valor mínimo é de 20m e o máximo é de 200 m. O grau de risco ficou entre 2,5 e 3,0 de acordo com o descrito por Crepani et al., (2001).

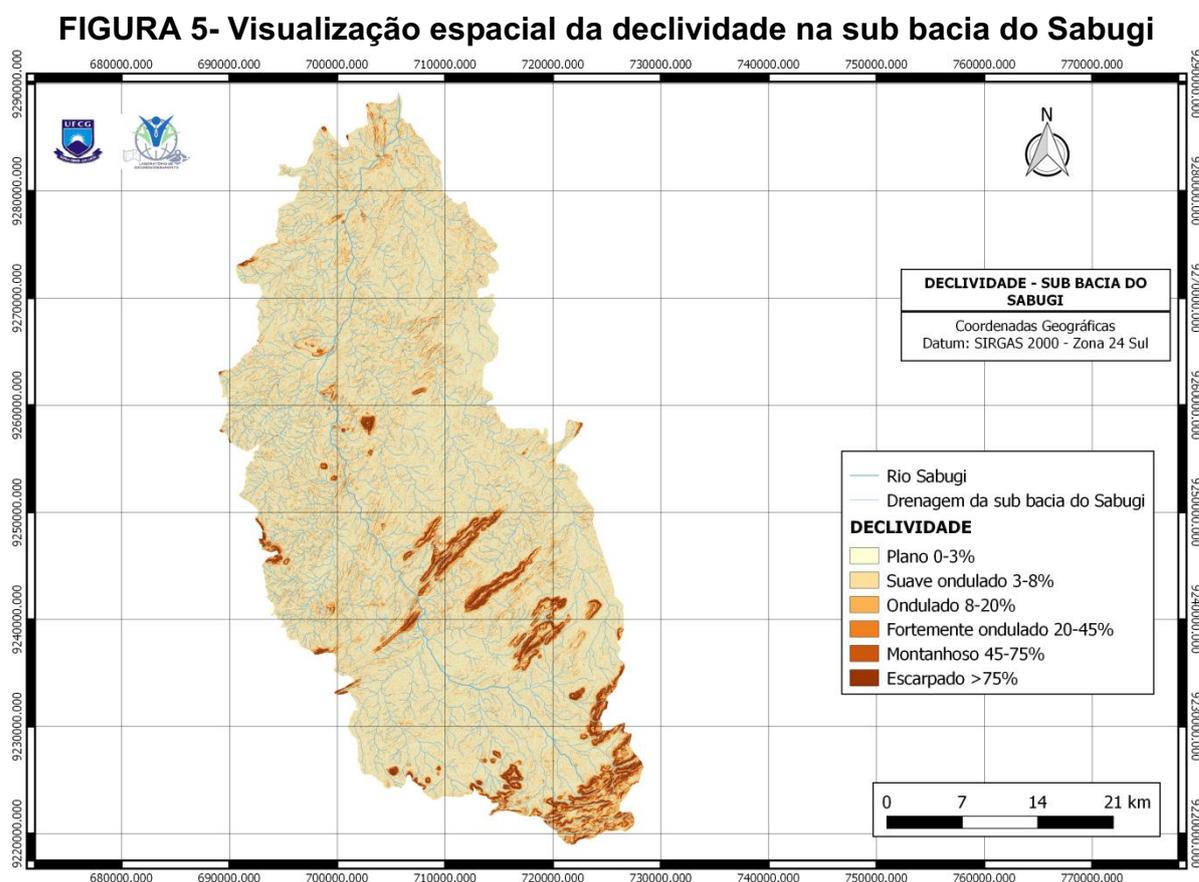
A amplitude altimétrica, que está diretamente relacionada com o aspecto dissecação, que relaciona a dimensão interflúvial da área (drenagem) e a profundidade dos talweges, caracterizando o indicador como um expoente da energia potencial local. A metodologia adotada neste estudo, diz que, quanto maior a amplitude altimétrica maior será a energia potencial, uma vez que, essa

característica facilita a obtenção de energia cinética por parte das águas precipitadas em direção as partes mais baixas do terreno, resultando deste modo, em uma maior capacidade erosiva ou de morfogênese.

Segundo Crepani et al., 2001 quanto mais próximos de 3,0 os valores obtidos maior será a situação de vulnerabilidade, e valores próximos a 1,0 traduzem situações de maior estabilidade das unidades de paisagem natural, onde prevalecem os processos pedogenéticos.

## DECLIVIDADE

Na Figura 5, é possível observar a distribuição espacial da declividade ao longo da sub bacia do Sabugi, de modo, a saber quais regiões apresentam as maiores inclinações.



Fonte: Autoria própria, 2018

A tabela 4, mostra os valores de declividade atribuídos para sub bacia do Sabugi.

**TABELA 4- Propensão ao risco à perda de solo para declividade**

Declividade (%)	Grau de risco a perda de solo	Area (hectare)
3,5 – 5,8	1,10	82502,90

5,8 – 8,2	1,20	29681,30
8,2 – 10,3	1,30	16823,50
12,9 – 15,1	1,50	15463,98
15,1 – 17,4	1,60	2190,80
17,4 – 19,8	1,70	2040,52
19,8 – 22,2	1,80	1065,42
22,2 – 24,5	1,90	1266,29
24,5 – 27,2	2,00	707,04
27,2 – 29,6	2,10	979,09
29,6 – 32,1	2,20	582,84
34,6 – 37,2	2,40	788,27
37,2 – 39,8	2,50	474,20
39,8 – 42,4	2,60	368,73
42,4 – 45,3	2,70	487,07
45,3 – 48,1	2,80	409,71
48,1 – 50	2,90	233,22
>50	3,00	1273,61

Fonte: Adaptado de Crepani., (2001)

Observou-se que o grau de risco correspondente a categoria de declividade variando entre 3,5 e 50% conforme descrito por Crepani et al., (2001), indicando um ambiente propenso a instabilidade. Utilizou-se ainda para a determinação geomorfológica, o cálculo da amplitude do interflúvio, que foi calculada como sendo o inverso da densidade de drenagem, segundo consta na metodologia adotada, e que foi determinada na etapa da caracterização fisiográfica da sub-bacia do Sabugi.

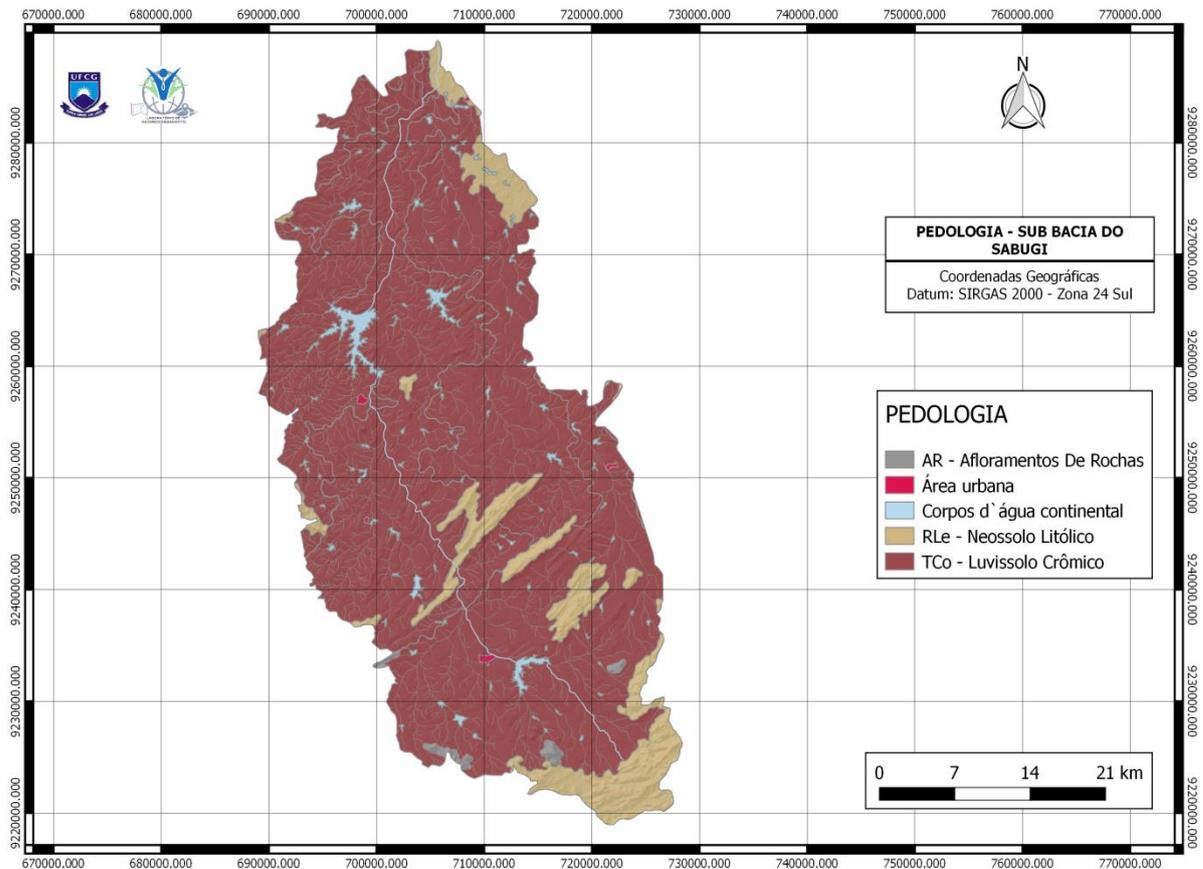
## **PEDOLOGIA**

As condições geomorfológicas presentes na área de estudo explicam as características do solo na região (Figura 6). O entendimento do perfil do solo, sua composição e formação é essencial para melhor utilizá-lo e evitar a exaustão deste recurso indispensável à sustentabilidade socioambiental da sub bacia do Sabugi.

Para a pedologia, o estudo das condições do solo deve ser feita desde as camadas mais superficiais até as mais profundas, e considera o solo como sendo um corpo natural e tridimensional o qual deve-se conhecer sua origem, composição, distribuição na paisagem e que fatores ambientais influenciam sua formação.

O conhecimento dos atributos referentes ao tema pedologia possibilitam saber seu arranjo estrutural e deste modo, sua vulnerabilidade frente às ações praticadas na área de estudo. As partículas que compõe o solo se estruturam de acordo com uma serie de fatores fisiográficos locais, e sua estabilidade ou instabilidade está diretamente ligada à situação geomorfológica do ambiente em questão.

**FIGURA 6- Mapa da composição pedológica da sub bacia do Sabugi**



Fonte: Autoria própria, 2018

A Tabela 5, apresenta as porcentagens das áreas para o tema pedologia da sub bacia do Sabugi, a partir dos dados gerados mediante utilização de dados vetoriais obtidos junto ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

**TABELA 5- Porcentagem das áreas para o tema pedologia da sub bacia do Sabugi**

Classe	Área (hectare)	Porcentagem
Afloramento de rochas	903,7	0,56%
Neossolo litólico	17141,6	10,64%
Luvissole crômico	139558,00	86,61%
Area urbana	213,20	0,13%
Corpos d'água	3323,40	2,06%

Fonte: Autoria Própria, 2018

Os Luvissoles Crômicos aparecem em maior porcentagem na área de estudo e ocorrem em regiões de elevada restrição hídrica, restringindo-se ao nordeste do Brasil, onde se distribuem principalmente na zona seminárida, geralmente em áreas de relevo suave ondulado, apresenta ondulações formando vales em “V” abertos, com suas vertentes medindo dezenas de metros, relacionando com relevo de

planalto, apresentando vales e inselbergs. São solos rasos, ou seja, raramente ultrapassam 1m de profundidade e apresentam usualmente mudança textural abrupta (EMBRAPA, 2018).

## **CLIMATOLOGIA**

As observações climatológicas para este tipo de estudo, fundamentam-se no papel que os fenômenos climáticos tem de elaborar paisagens, bem como sua influencia espacial sobre o meio, concentrando a avaliação na sua influencia na superfície do planeta, onde se dá a conexão com outros processos atmosféricos, geomorfológicos, hidrológicos e biológicos e onde o homem vivendo em sociedade, produz e organiza o espaço

Os dados que relacionam a intensidade pluviométrica de um local podem ser considerados representantes de valores de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética responsável pela erosividade da chuva, neste caso, podemos dizer que quanto maiores os valores de intensidade pluviométrica maior a erosividade da chuva e é possível criar uma escala de erosividade da chuva que represente a influencia do clima nos processos morfodinâmicos (CREPANI, et al., 2001).

No caso da sub-bacia do Sabugi, a pluviosidade anual variou entre 276 e 1114,6 mm em uma série histórica de 22 anos (1994-2016), de acordo com os resultados encontrados nos postos pluviométricos próximos a sub-bacia (postos de Patos, Santa Luzia, Várzea, Patos, Ipueira, Caicó e São João do Sabugi), como pode ser observado na Figura 6, bem como os respectivos graus de risco a perda de solo na Tabela 6.

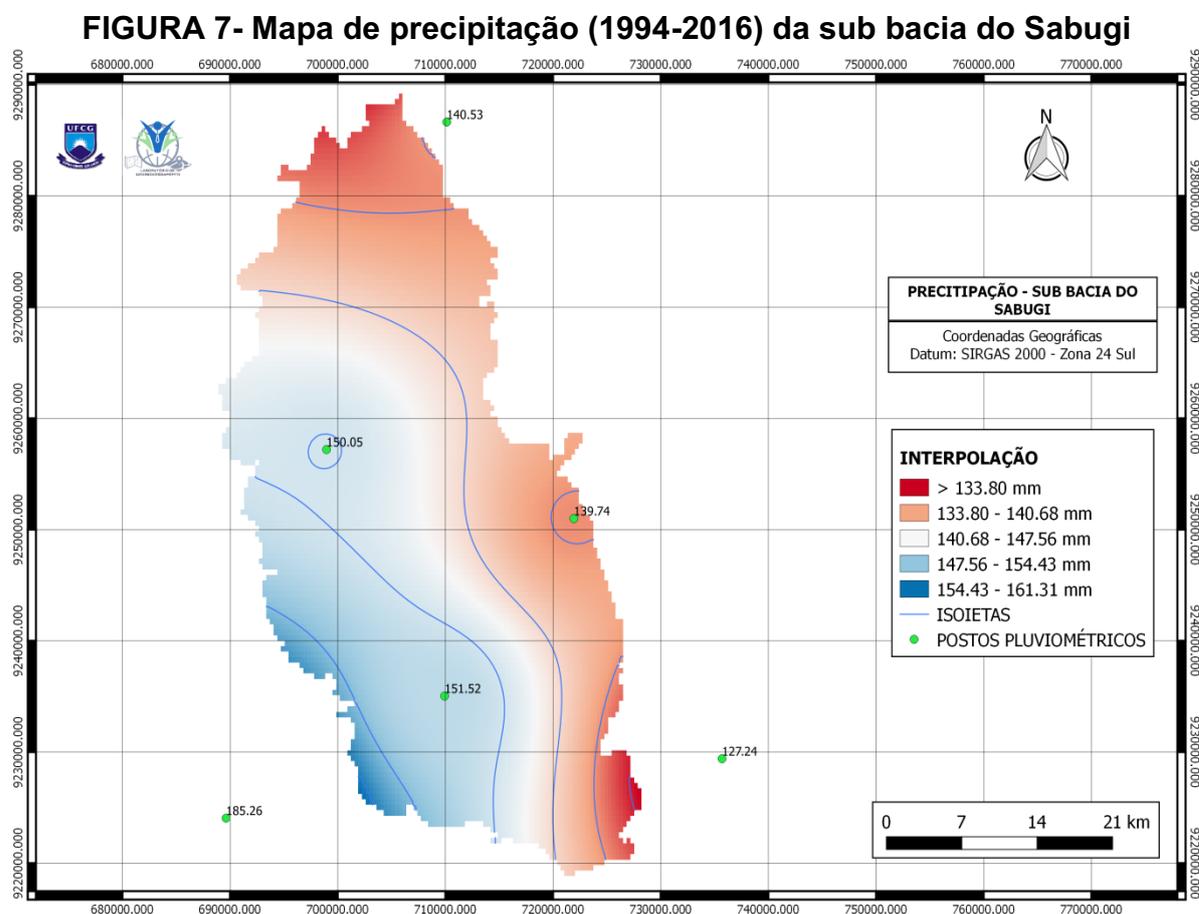
**TABELA 6- Propensão ao risco à perda de solo para o tema climatologia**

<b>Intensidade pluviométrica (mm/ano)</b>	<b>Grau de risco à perda de solo</b>
125 – 150	1,40
150 – 175	1,50

**Fonte: Adaptado de Crepani., (2001)**

A Figura 7 mostra a espacialização da intensidade pluviométrica da área, que se caracteriza pela quantidade de chuva por unidade de tempo, levando em consideração os postos pluviométricos que estão localizados em diferentes pontos da região que compõe a sub bacia do Sabugi, gerando portanto, uma situação

condizentes com a ocorrência pluviométrica local, possibilitando uma interpretação da realidade climática do território hídrico, ao longo dos últimos 22 anos.



Fonte: Aatoria própria, 2018

Ainda de acordo com Crepani et al., (2001), o grau de risco da sub bacia do Sabugi variou de 1,4 a 1,6, isto, em virtude da intensidade pluviométrica na área nos últimos 22 anos. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo BSh, semiárido, quente, seco e com longos períodos de estiagem, além de chuvas irregulares em quatro ou cinco meses do ano.

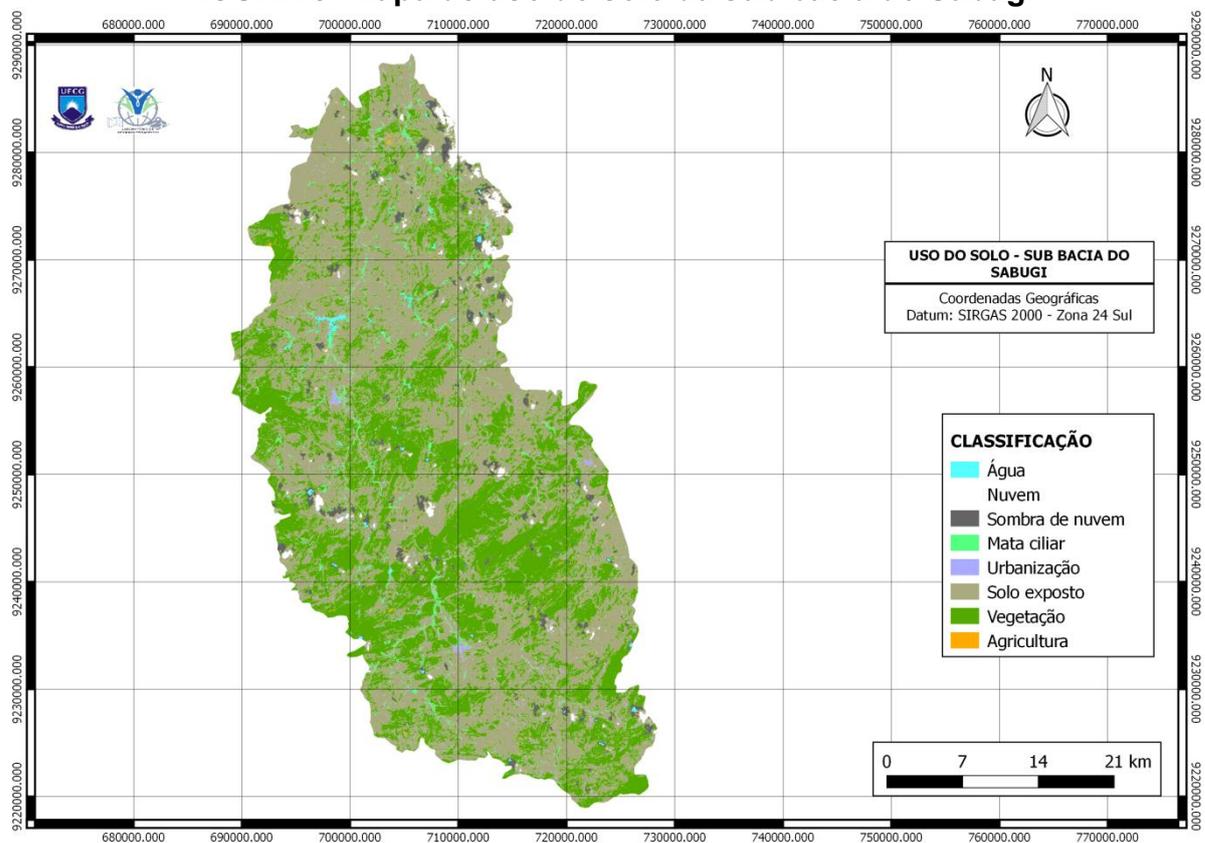
A variável climática possui uma grande relevância neste trabalho, uma vez que a área analisada está inserida em um contexto climatológico extremo, no sentido de irregularidades pluviométricas e pouca assistência sócio-ambiental com o intuito de mitigar os efeitos adversos causados pela instabilidade na precipitação, resultando, portanto, em degradantes condições de sobrevivência e produção, levando em consideração que grande parte da população que vive nessa região depende da agricultura de subsistência. Sendo assim, a caracterização dessa variável na área de estudo, abre caminho para o debates públicos voltados a

mitigação dos efeitos da estiagem nessa região, visto a necessidade de manter os meios de sobrevivência das comunidades inseridas nesse contexto de escassez.

## USO DO SOLO

No sentido de compreender a dinâmica de uso e ocupação do solo na sub bacia do Sabugi, realizou-se o mapeamento da área, classificando as atividades praticadas com o auxílio do *plugin* SCP. Para está análise utilizou-se imagem multiespectral do satélite Landsat 8, disponível gratuitamente na base de dados da USGS (United States Geological Survey – Levantamento Geológico dos Estados Unidos).

**FIGURA 8- Mapa de uso do solo da sub bacia do Sabugi**



Fonte: Autoria própria, 2018

Na Tabela 7 são apresentadas as áreas das classes de uso e ocupação do solo e suas respectivas porcentagens em relação à área total da bacia.

**TABELA 7- Classes de uso e ocupação do solo**

Alvo	Classe	Área hectare	Porcentagem (%)
1	Água	585,00	0,356
2	Nuvem	1545,00	0,969
3	Sombra de nuvem	4070,00	3

4	Mata ciliar	3246,00	2
5	Urbanização	1352,00	0,846
6	Solo exposto	78784,00	49
7	Vegetação	69438,30	43
8	Agricultura	806,00	0,5049

Fonte: Autoria Própria, 2018

A análise da imagem foi realizada através de interpretação visual. Este procedimento interpreta a imagem diretamente na tela do computador, utilizando elementos básicos de interpretação, como cor, textura, forma, tonalidade, tamanho, sombra, padrão, adjacências e localização geográfica (LOCH, 1993; TEMBA, 2000; GOMES, 2001; FLORENZANO, 2002; MOREIRA, 2003).

A sub bacia do Sabugi abrange uma área de 159825,00 Ha, analisando-se os resultados obtidos, nota-se claramente que grande parte da área é composta por solo exposto e vegetação. Somente as áreas com solo exposto ocupam 49% do local, isto se dá entre outros fatores pelo regime pluviométrico da região semi-árida e as atividades erosivas e/ou degradantes, naturais ou antrópicas que favorecem a ocorrência de solo desnudo. Seguida pela vegetação, predominantemente arbustiva que abrange 43% da sub bacia, é possível constatar que os maiores fragmentos de vegetação ocorrem nas regiões mais elevadas e próximas às margens dos recursos hídricos. Na região de análise tem-se somente 2% de mata ciliar, vegetação de fundamental importância na preservação e manutenção dos mananciais, apresenta distribuição irregular ao longo do curso do rio principal, córregos e rios, com algumas áreas aglomeradas ao longo de córregos com mais altitude. Observa-se ainda em menor ocorrência os elementos: curso d'água, urbanização e agricultura (com localização pontual).

**TABELA 8- Propensão ao risco à perda de solo para o tema uso e ocupação do solo**

Classe de uso e ocupação do solo	Grau de risco à perda de solo
Solo exposto	3,0
Vegetação	1,0
Mata ciliar	1,0
Urbanização	3,0
Agricultura	2,3
Água	1,0
Nuvem	0,0
Sombra de Nuvem	0,0

Fonte: Adaptado de Crepani., (2001)

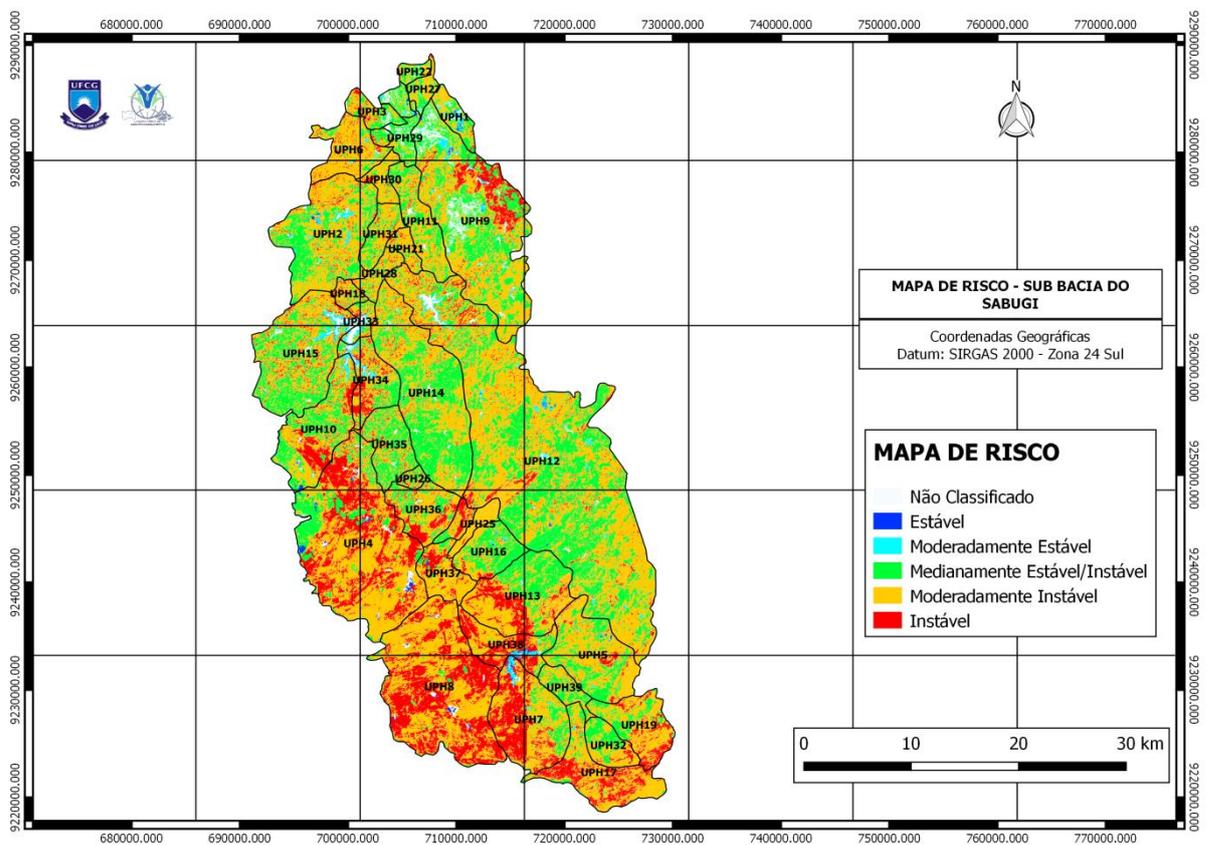
Segundo a metodologia adotada, a densidade de cobertura vegetal da unidade de paisagem natural (cobertura do terreno) é um fator de proteção da

unidade contra os processos morfogenéticos que se traduzem na forma de erosão, e consequentemente de vulnerabilidade ambiental da área, sendo portanto, um fator fundamental na preservação das características geomorfológicas.

## VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Cunha (2015) afirma que, uma articulação robusta da gestão da água e do território, com dinâmicas próprias e específicas de cada setor, é essencial para a proteção dos recursos hídricos e dos serviços dos ecossistemas associados, bem como para minimizar os riscos de uma ocupação inadequada do solo e para facilitar a adaptação às alterações climáticas (Figura 9).

**FIGURA 9- Mapa da vulnerabilidade ambiental da sub bacia do Sabugi**



Fonte: Autoria própria, 2018

Para uma melhor análise da Vulnerabilidade ambiental na sub bacia do Sabugi, dividiu-se a área em 39 Unidades de Planejamento Hídrico (UPH), e classificou-se o mapa de risco em 5 (cinco) classes: Não Classificado, Estável, Moderadamente Estável, Medianamente Estável/Instável e Moderadamente Instável em razão dos termos numéricos de cada componente conforme a metodologia de Crepani et al., (2001).

De acordo com o mapa de risco gerado da sub bacia do Sabugi, é possível observar que a área apresenta faixa de vulnerabilidade variando entre o Medianamente Estável/Instável e o Instável, no entanto, existe a predominância do risco Moderadamente Instável, que entre outros aspectos requer uma atenção especial com relação ao uso e ocupação do solo, visto que existe uma sazonalidade da produção agrícola e dinâmica urbana em função do regime pluviométrico característico da região, que em virtude das praticas de manejo inadequadas praticadas na região podem vir a aumentar o risco de vulnerabilidade da sub bacia hidrográfica. A Tabela 9 apresenta o risco predominante em cada UPH, bem como suas respectivas áreas em hectare, promovendo uma análise mais detalhada de como se encontra a susceptibilidade de cada região.

**TABELA 9- Áreas das UPHs estudadas e a propensão à perda de solo de acordo com a metodologia utilizada**

<b>CLASSE</b>	<b>AREA (HECTARE)</b>	<b>RISCO</b>
UPH1	1076,28	2,8
UPH2	7353,46	2,8
UPH3	1055,54	2,8
UPH4	14397,10	2,8
UPH5	4993,88	2,7
UPH6	2628,77	2,8
UPH7	5474,50	2,7
UPH8	12355,10	2,8
UPH9	12807,10	2,7
UPH10	4911,40	2,8
UPH11	2765,45	2,7
UPH12	32342,20	2,7
UPH13	5626,29	2,7
UPH14	9606,79	2,7
UPH15	7227,58	2,8
UPH16	2341,42	2,7
UPH17	4237,21	2,6
UPH18	577,58	2,8
UPH19	3079,36	2,5
UPH20	577,54	2,7
UPH21	700,55	2,8
UPH22	453,63	2,7
UPH23	273,45	2,8
UPH24	654,75	2,8
UPH25	713,34	2,6
UPH26	391,37	2,8
UPH27	700,85	2,7
UPH28	937,82	2,8
UPH29	918,70	2,7
UPH30	867,33	2,7
UPH31	1390,47	2,8
UPH32	1539,06	2,5
UPH33	736,59	2,7
UPH34	2609,00	2,8
UPH35	2566,79	2,8

UPH36	2639,06	2,7
UPH37	1891,37	2,8
UPH38	2580,85	2,7
UPH39	1115,56	2,7

Fonte: Adaptado de Pires (2015)

De acordo com a Tabela 9, o risco de cada UPH analisada varia entre 2,6 e 2,8 resultado uma média de 2,7. Considerando a escala difundida na metodologia adotada que vai de 1,0 a 3,0 é possível afirmar que, a sub-bacia do Sabugi requer uma atenção especial quanto a preservação da sua dinâmica regional, uma vez que a mesma apresenta pouca estabilidade quando considerados os quesitos analisados neste estudo, cujos resultados demonstram que, é uma região facilmente erodida pelas águas das chuvas, bem como pela ação do intemperismo, visto sua baixa estabilidade fisiográfica.

Além disso, é importante destacar que há uma significativa área Instável distribuída nas UPHs 4, 7, 8, 9, 13, 17, 19, 25, 38 com fragmentos da mesma classe se estendendo pelas UPHs 5, 12, 34, 32, essas unidades apresentam como característica comum considerável percentual de solo exposto, que facilita os processos de erosão e a conseqüente degradação do solo e das características fisiográficas, uma vez que altera a dinâmica natural do local. Essas áreas devem ser levadas em consideração pelos planos de gestão da sub bacia do Sabugi para que haja ações de mitigação direcionadas a reduzir a sua vulnerabilidade ambiental, de modo a garantir a preservação das condições da área tanto de caráter quantitativo como qualitativo, visto a grande contribuição da sub bacia para a harmonia socioambiental regional.

Para Adger (2006), a “vulnerabilidade” está relacionada a fatores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa ou de resposta ao sistema, de acordo com o qual, a exposição significa o grau em que um sistema pode absorver as pressões sem sofrer alterações a longo prazo. A capacidade adaptativa na mais é, do que a habilidade do sistema de se ajustar ao dano ocorrido, fazer uso de recursos ou oportunidades ou responder as mudanças ambientais que venham a ocorrer. Conforme se observou neste caso específico, a sub bacia do sabugi apresenta um grau de vulnerabilidade alto, segundo os critérios adotados, diante desta perspectiva é extremamente importante a geração de informações que subsidiem um melhor conhecimento espacial da área, bem como, uma melhor

alocação das atividades humanas, com o intuito de viabilizar o ordenamento territorial, diminuindo a pressão que a atual forma de ocupação impõe ao sistema.

As áreas menos vulneráveis correspondem as que apresentam maior estabilidade na sub-bacia. O equilíbrio dessas áreas se dá pelo predomínio da conservação dos atributos fisiográficos, bem como um uso e ocupação que não limita a recuperação das condições naturais do ambiente.

A classe medianamente estável/instável, compreende locais com maior índice de ocupação urbana e desenvolvimento de atividades agrícolas, além de exibir solo com fraco desenvolvimento estrutural e um relevo variando entre o plano e o ondulado. O uso econômico das áreas com essas características requer a implantação de técnicas de manejo que orientem uma atividade produtiva sustentável, a fim de evitar processos erosivos e outros processos morfodinâmicos negativos.

Nas regiões moderadamente instáveis, classe que se apresenta em maior percentual da área estudada, identificou-se pouco percentual de cobertura vegetal, bem como uma alta incidência de solo exposto. Observou-se ainda predominância de solos com textura arenosa, associados a um relevo mais acentuado e de maior concentração de escoamento superficial, como por exemplo, as redes de drenagem, que contribuem consideravelmente para os processos morfodinâmicos intensos, tornando desta maneira, a área mais suscetível aos processos erosivos mais intensos, facilitando os processos erosivos e conseqüentemente aumentando o grau de vulnerabilidade do local.

As partes instáveis da sub bacia do Sabugi se apresentam como resultado de uma serie de fatores de ordem natural e antrópica que contribuem significativamente para a degradação da UPH como um todo, essas áreas se situam em regiões com características fiográficas frágeis e que somadas a condições de ocupação urbana irregular, mal uso dos recursos hídricos, praticas agropecuárias ultrapassadas e ausência de politicas publicas voltadas a orientação de boas praticas manejo, facilitam a exposição ao risco e a sua conseqüente degradação ambiental.

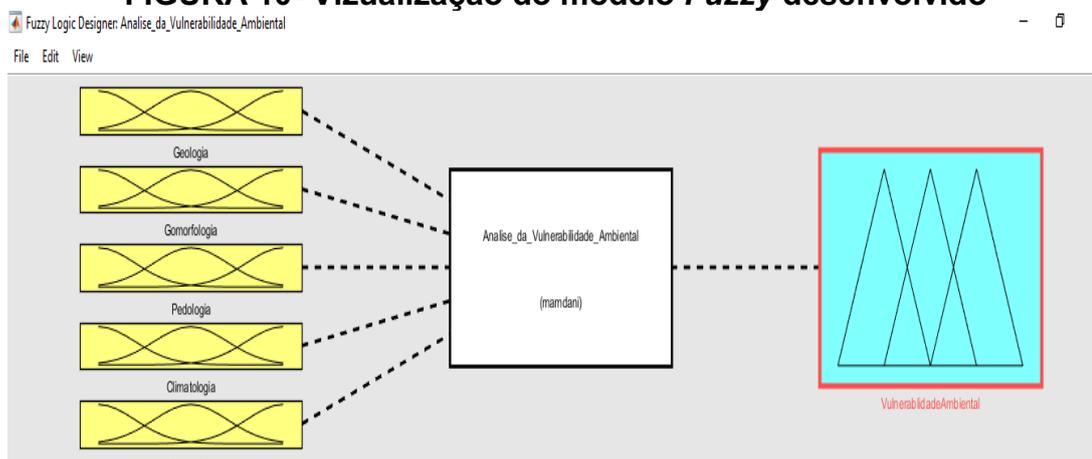
Segundo Padilha (2008), o gerenciamento ambiental em todo seu contexto, tanto a nível municipal quanto em nível de bacia hidrográfica, engloba questões muito mais complexas, devendo levar em conta aspectos socioeconômicos,

culturais e educacionais, considerando que estes aspectos apresentam relação direta com o ambiente natural e as formas como que este é utilizado.

## 4.2 Modelagem *Fuzzy*

O modelo desenvolvido neste estudo envolve o sistema *Fuzzy* aplicado à análise da vulnerabilidade ambiental da sub bacia do rio Sabugi, ordenando a verificação de acordo com as cinco classes discutidas ao longo deste trabalho: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Climatologia e Vegetação (Figura 10). Estes indicadores podem tomar formas discretas ou difusas e são agregados nos blocos de regras do modelo, por meio de operações básicas dos conjuntos *Fuzzy*.

**FIGURA 10- Visualização do modelo *Fuzzy* desenvolvido**



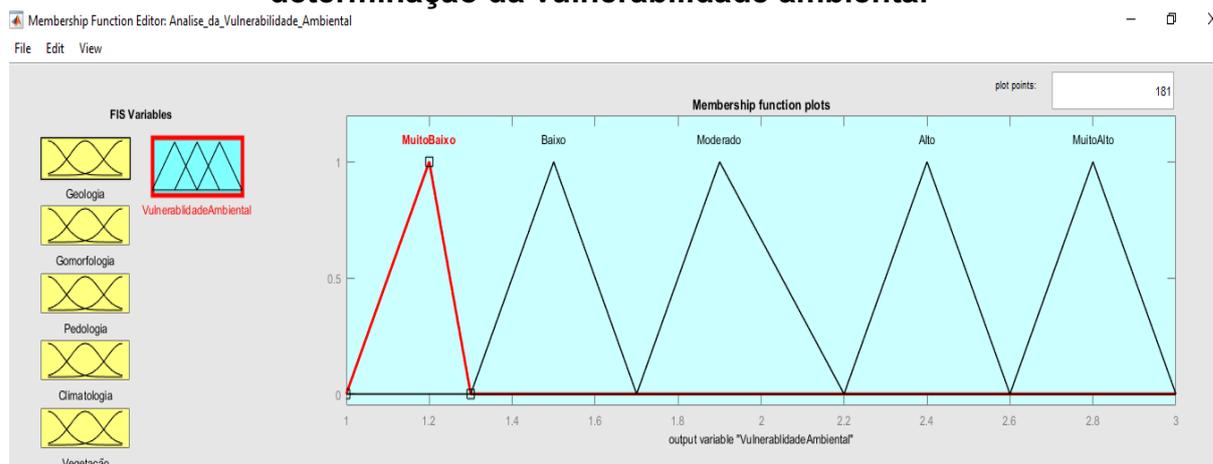
Fonte: Autoria própria, 2018

Neste caso específico, o sistema *Fuzzy* é estruturado inicialmente a partir do objetivo principal do estudo, a análise da vulnerabilidade ambiental da sub bacia do Sabugi, que neste caso particular é baseada nos critérios numéricos apresentados por Crepani, et al (2001). Deste modo, foram identificados a partir da metodologia adotada inicialmente, os indicadores e suas estruturas esquemática dentro de cada tema, obedecendo a variação numérica descrita e fazendo uma associação desta, a uma linguagem de fácil entendimento ligada a vulnerabilidade ambiental. A sequência desta montagem gera uma representação que vai sendo detalhada até que seus aspectos componentes possam ser caracterizados e medidos em unidades técnicas primárias.

Para a obtenção da vulnerabilidade ambiental, os indicadores de entrada são distribuídos em diferentes conjuntos de acordo com o padrão de análise descrito na

metodologia para cada classe, e em seguida é determinado um conjunto de regras através da inferência *Fuzzy* composta de uma agregação de entrada e outra de saída. Adotou-se neste caso, variáveis linguísticas atribuídas a cada classe de entrada, bem como, as classes de saída, como pode ser observado na Figura 11, a seguir.

**FIGURA 11- Visualização das variáveis linguísticas definidas para determinação da vulnerabilidade ambiental**

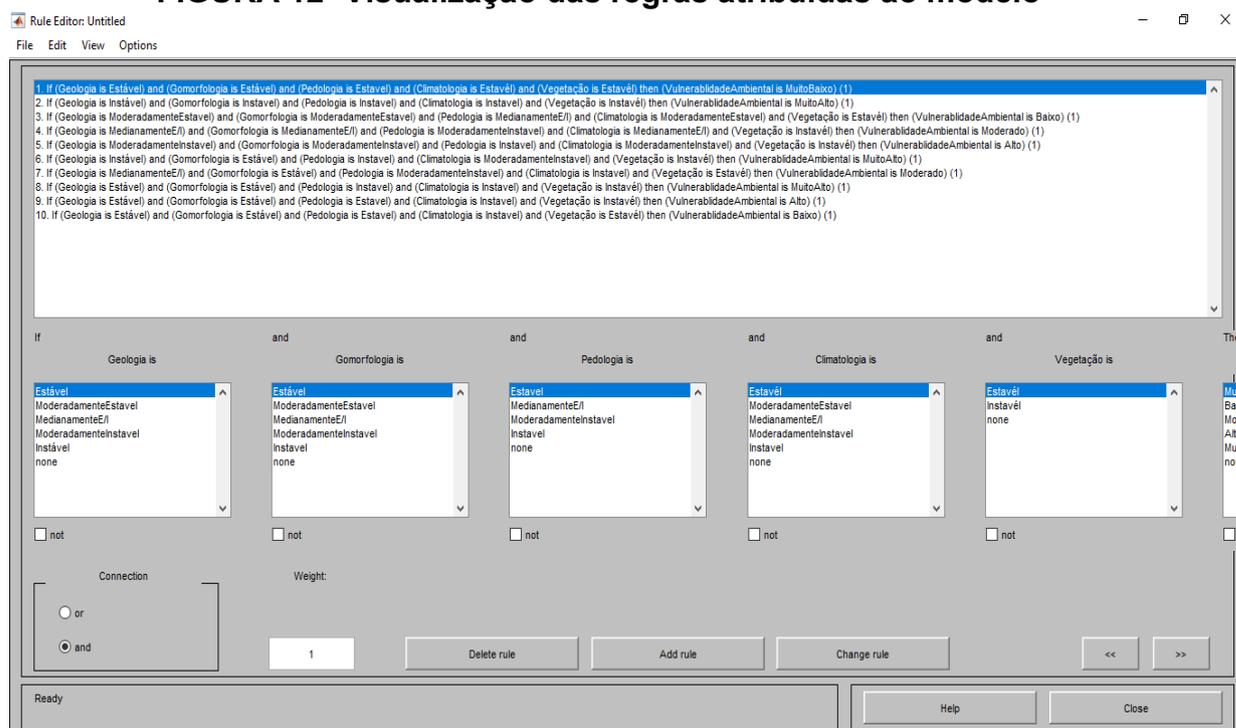


Fonte: Autoria própria, 2018.

As regras estabelecidas diante das entradas do sistema contêm o controle estratégico da lógica *Fuzzy*, cada bloco de regras adota situações para o mesmo contexto final, definido pelas mesmas regras para os indicadores de entrada e o de saída. Cada operação de composição de bloco de regras gera um conjunto de resultados de pertinências em campos pré-definidos, segundo a lógica *Fuzzy*. A sequência de combinações realizadas transforma e transporta valores de avaliações até a definição do indicador de saída, ou seja, as regras são os instrumentos atribuídos às classes para a determinação da vulnerabilidade ambiental. Para dar peso a cada uma das regras, é utilizado o “Grau de Suporte (DoS)”. Estes pesos são atribuídos segundo o entendimento de especialistas e decisores, a respeito da importância destas regras, podendo haver uma variação entre 0 (zero) e 1 (um). No caso específico do modelo desenvolvido os valores atribuídos aos graus de suporte de cada uma das regras, foram todos iguais a 1 (um), como pode ser visto na Figura 12, cujas regras englobam 10 (dez) combinações descritas a seguir.

- 1) Se (Geologia é Estável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Estável) e (Climatologia é Estável) e (Vegetação é Estável) então (Vulnerabilidade ambiental é Muito Baixa);
- 2) Se (Geologia é Instável) e (Geomorfologia é Instável) e (Pedologia é Instável) e (Climatologia é Instável) e (Vegetação é Instável) então (Vulnerabilidade ambiental é Muito Alta);
- 3) Se (Geologia é Moderadamente Estável) e (Geomorfologia é Moderadamente Estável) e (Pedologia é Medianamente Estável/Instável) e (Climatologia é Moderadamente Estável) e (Vegetação é Estável) então (Vulnerabilidade ambiental é Baixa);
- 4) Se (Geologia é Medianamente Estável/Instável) e (Geomorfologia é Medianamente Estável/Instável) e (Pedologia é Moderadamente Instável) e (Climatologia é Medianamente Estável/Instável) e (Vegetação é Instável) então (Vulnerabilidade ambiental é Alta);
- 5) Se (Geologia é Moderadamente Instável) e (Geomorfologia é Moderadamente Instável) e (Pedologia é Instável) e (Climatologia é Moderadamente Instável) e (Vegetação é Instável) então (Vulnerabilidade ambiental é Muito Alta);
- 6) Se (Geologia é Instável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Instável) e (Climatologia é Moderadamente Instável) e (Vegetação é Instável) então (Vulnerabilidade ambiental é Moderado);
- 7) Se (Geologia é Medianamente Estável/Instável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Moderadamente Instável) e (Climatologia é Instável) e (Vegetação é Estável) então (Vulnerabilidade ambiental é Alta);
- 8) Se (Geologia é Estável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Estável) e (Climatologia é Instável) e (Vegetação é Estável) então (Vulnerabilidade ambiental é Moderado);
- 9) Se (Geologia é Estável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Estável) e (Climatologia é Instável) e (Vegetação é Instável) então (Vulnerabilidade ambiental é Alto);
- 10) Se (Geologia é Estável) e (Geomorfologia é Estável) e (Pedologia é Estável) e (Climatologia é Instável) e (Vegetação é Estável) então (Vulnerabilidade ambiental é Baixo).

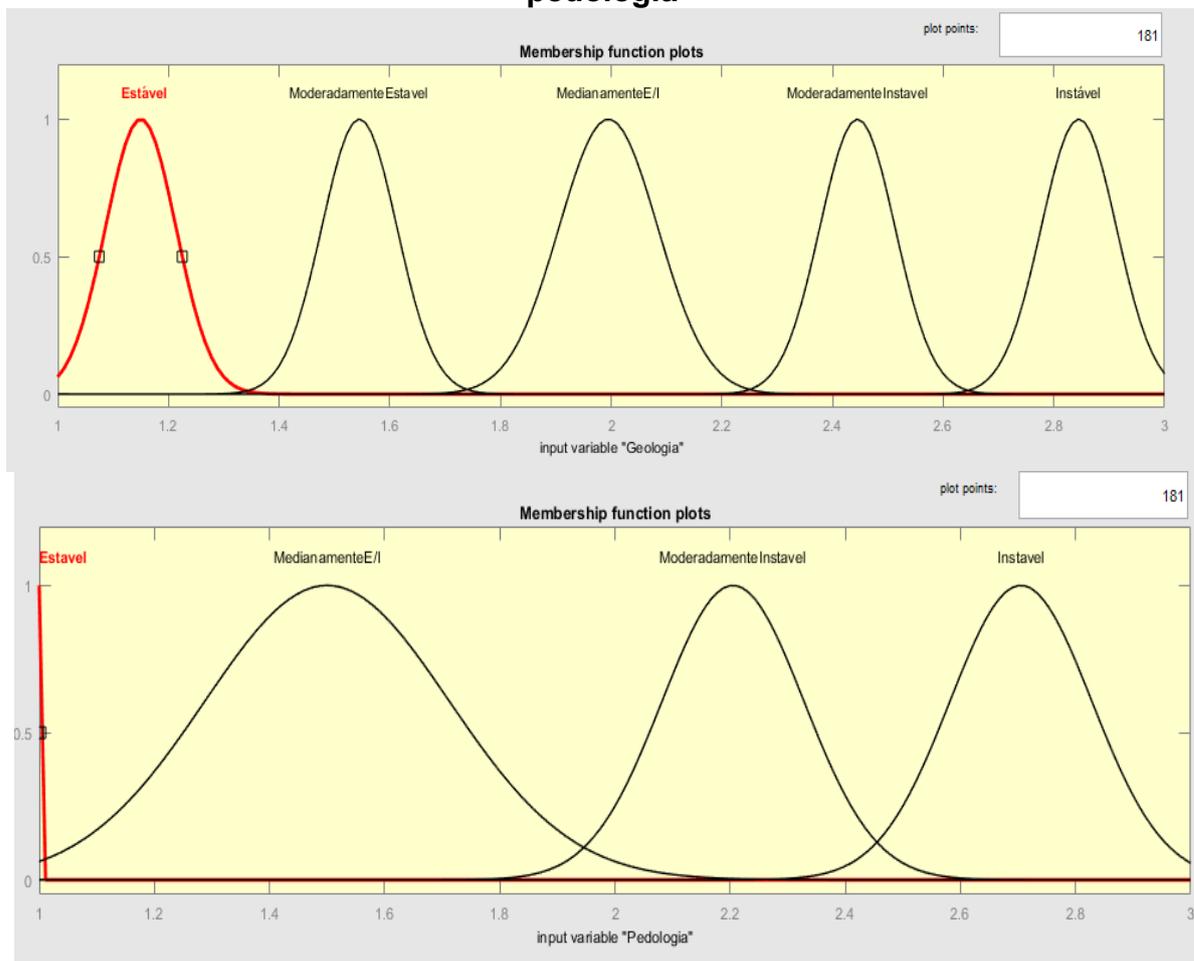
**FIGURA 12- Visualização das regras atribuídas ao modelo**



Fonte: Autoria própria, 2018

O modelo de inferência *Fuzzy* aqui utilizado é Modelo Mamdani, no qual as regras de produção possuem relações *Fuzzy*, tanto nas suas situações como nas suas ações. As regras semânticas para o processamento da inferência são chamadas de inferência MÁX-MIN que utiliza as operações de união e intersecção. O processo de *fuzzyficação*, ou conversão escalar, transforma informações quantitativas em informações qualitativas, ou seja, transforma uma variável discreta em uma variável *Fuzzy* com suas respectivas funções de pertinência. A Figura 13 mostra o processo de *fuzzyficação* do indicador geologia e pedologia, respectivamente, demonstrando o diagrama das funções de pertinência mencionadas, de acordo com a variação numérica descrita por Crepani et al., (2001).

**FIGURA 13- Diagrama das funções pertinências das variáveis geologia e pedologia**



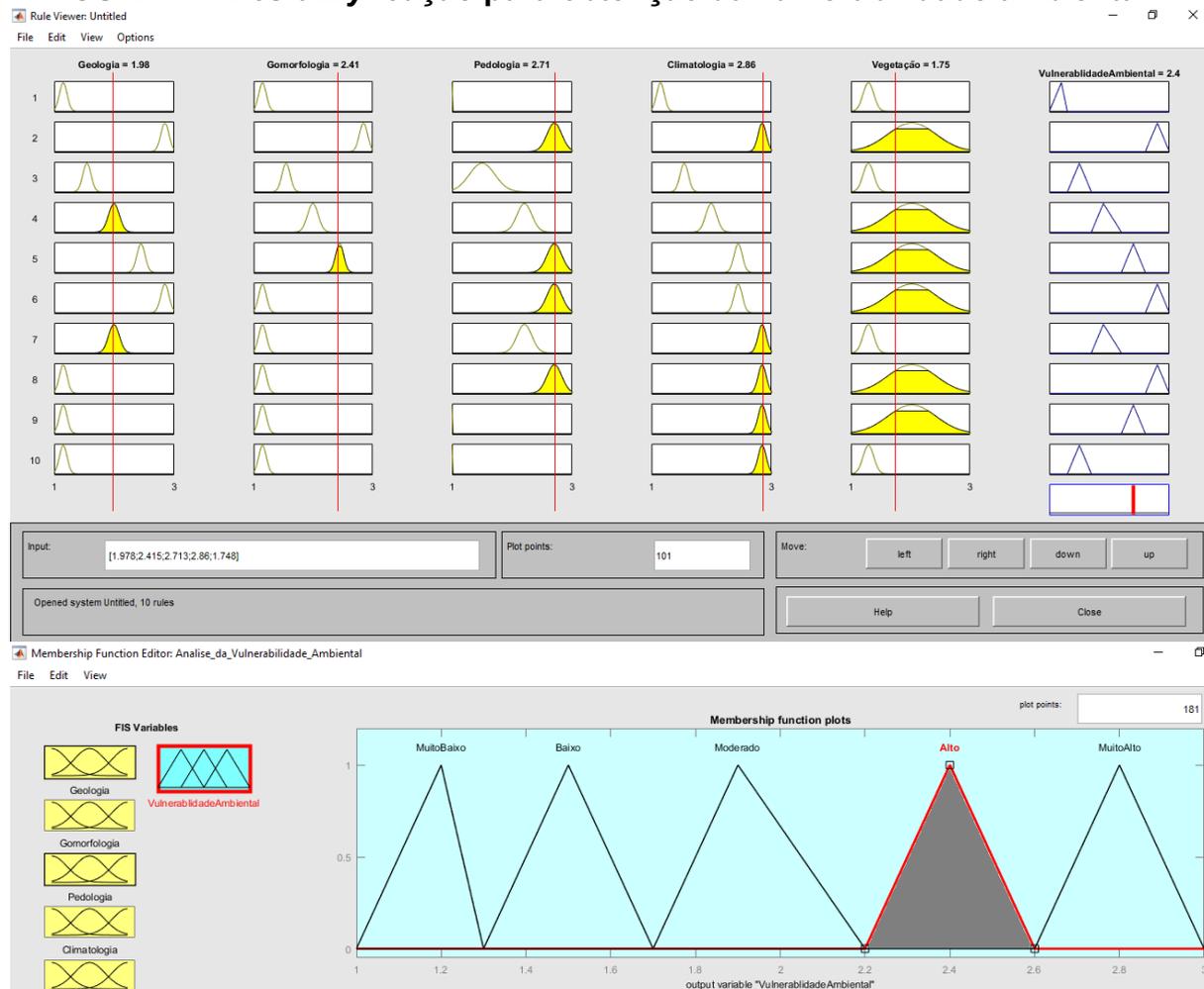
Fonte: Autoria própria, 2018

As classes utilizadas na construção deste modelo obedecem a dinâmica proposta por Crepani et al., (2001) que possibilitou em um primeiro momento, a determinação do risco ambiental da sub bacia do Sabugi, sendo assim, a variação numérica utilizada inicialmente foi associada a composição linguística desenvolvida para cada variável, sendo atribuídas as denominações: Estável, Moderadamente Estável, Medianamente Estável/Instável, Moderadamente Instável e Instável de acordo com a variação numérica que compreende o intervalo de 1 (um) à 3 (três).

O processo de *desfuzzyficação*, ou conversão consiste na transformação de uma informação qualitativa em uma informação quantitativa, no caso, a vulnerabilidade ambiental mostra a capacidade de suporte definida como: Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto. Com o sistema Fuzzy é possível simular alguns valores de entrada (*input*) e observar qual a saída (*output*) como pode ser visto na Figura 14, onde é caracterizada a *desfuzzyficação* de um indicador

temático com resultado “Alto” de acordo com as regras estabelecidas e o comando de entrada inserido no modelo desenvolvido.

**FIGURA 14- Desfuzzyficação para obtenção da vulnerabilidade ambiental**



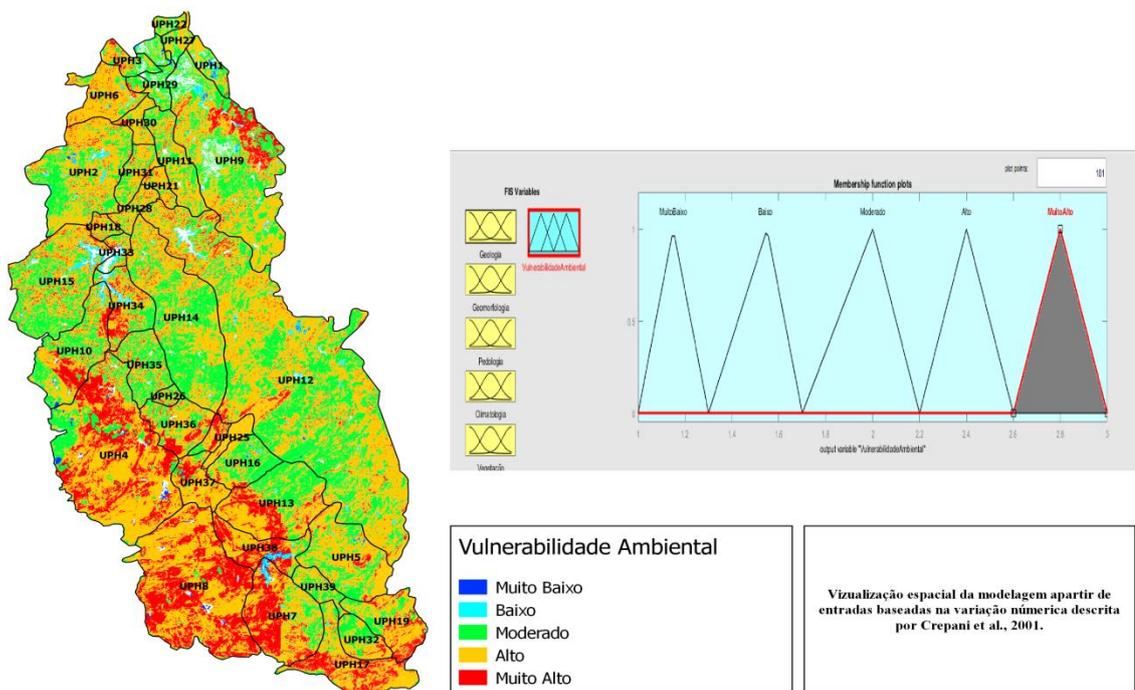
Fonte: Autoria própria, 2018.

A *Desfuzzyficação* busca traduzir o grau de vulnerabilidade ambiental da área por meio de uma variável linguística, que resulta da combinação de conjuntos com entradas também linguísticas e que uma vez modelados, geram resultados de fácil interpretação e que podem ser analisados por equipes técnicas na tomada de decisões sobre o grau de vulnerabilidade ambiental de uma área, bacia hidrográfica, município ou até mesmo empreendimento isolado. Deste modo, é possível afirmar que, o sistema *Fuzzy* é um importante integrador de dados, no sentido de auxiliar decisões satisfatórias, sendo possível simular o comportamento dos dados de entrada para que haja informações suficientes para uma análise consistente e que permita uma decisão acertada na mitigação dos problemas

gerados pelo grau de vulnerabilidade persistente na área, como demonstra: Malutta (2004), Silva (2005), Silva (2015), Valdetaro (2015), Ferreira; Piroli (2016).

Este tipo de modelagem permite que seja feita uma análise também no ambiente Qgis, possibilitando uma visualização espacial dos dados de acordo com o *input* de entrada estabelecidos pelo operador, permitindo a visualização das áreas que apresentam maior grau de vulnerabilidade ambiental e as que permanecem com a dinâmica ambiental satisfatória. Neste caso específico simulou-se no ambiente Qgis, uma situação que retrata a vulnerabilidade ambiental da área de estudo (Figura 15) considerando os resultados obtidos na primeira fase deste estudo e utilizando a modelagem construída a partir da metodologia descrita por Crepani et al., (2001).

**FIGURA 15- Visualização espacial da modelagem *Fuzzy* desenvolvida**



**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

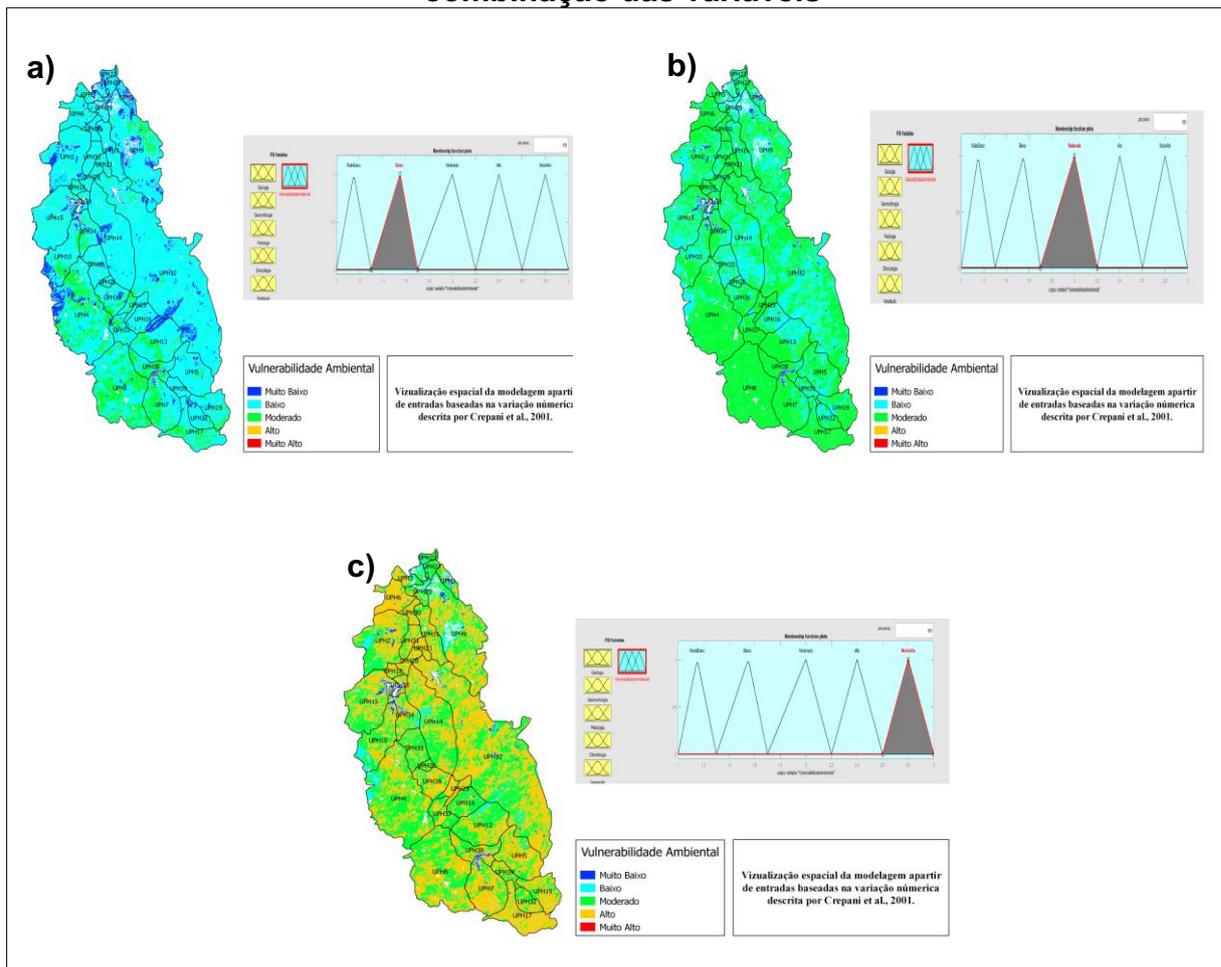
A espacialização do modelo desenvolvido permite uma visualização detalhada da abrangência do grau de vulnerabilidade ao longo da sub-bacia do Sabugi, mostrando-se como a modelagem matemática associada ao Qgis é útil na identificação pontual de problemas ambientais em áreas de grande dimensão, permitindo uma coordenada tomada de decisões, pois, pode-se observar que esse

tipo de sistema possui uma fácil interpretação da vulnerabilidade ambiental, uma vez que apresenta a descrição da situação atual da área mediante *input* das variáveis: geologia, geomorfologia, pedologia, climatologia e vegetação, e o *output* retrata a combinação das entradas, resultando como a área se encontra atualmente, além disso, esse tipo de sistema permite a inclusão de mais variáveis de entrada de acordo com o decorrer do estudo e com o que se pretende verificar especificamente.

A figura 16, apresenta 3 situações relacionadas as possibilidades de evolução do processo de degradação da sub bacia do Sabugi, gerados a partir da associação entre o Matlab (Matrix Laboratory) e o Qgis, abrangendo a modelagem e a espacialização dos dados respectivamente. Na figura 16.a visualiza-se a combinação das variáveis considerando uma situação em que elas se encontram estáveis e moderadamente estáveis, resultando portanto, e em uma vulnerabilidade baixa. Na figura 16.b é possível observar que, a combinação adotada para as variáveis se enquadra na faixa entre medianamente estável/instável e moderadamente instável, gerando uma vulnerabilidade ambiental da área moderada. Por fim, na Figura 16.c, adotou-se como combinação das variáveis as situações moderadamente instável e instável, especializando deste modo um grau de vulnerabilidade muito alto. Ou seja, o conjunto das regras definidas inicialmente e as variáveis adotadas na modelagem do sistema *Fuzzy* funcionou como ferramenta auxiliar na combinação de possíveis situações que possam vir a ocorrer na área de estudo.

Deste modo, podemos afirmar que, o Matlab é uma ferramenta que, quando associada a logica *Fuzzy* permite a combinação de varias variáveis na análise de um fator específico, neste estudo observou-se que, embora o Qgis gere arquivos de vulnerabilidade ao risco, não é possível a modelagem das situações no sentido de induzir “n” cenários que apresentam possibilidade de ocorrência, ou seja, a associação do Qgis com o Matlab permite uma completa visualização das ocorrências possíveis, que diante das regras desenvolvidas e das variáveis combinadas é capaz de direcionar decisões mais acertadas a cerca da mitigação dos problemas causados pela vulnerabilidade ambiental em uma área, como pode ser visto na Figura 16 abaixo e em anexos.

**FIGURA 16- Visualização espacial da modelagem *Fuzzy* para três situações de combinação das variáveis**



**Fonte: Autoria Própria, 2018.**

Esta análise possibilita a visualização dos resultados considerando dois fatores: a modelagem e a espacialização, de modo a obter dados mais consistentes sobre a real situação da área, bem como, a replicação em outras áreas com características fisiográficas semelhantes, e também em regiões diferentes com o intuito de verificar os diferentes resultados gerados pelo sistema *Fuzzy* associado ao Qgis, quando submetidos a outras realidades, verificando deste modo, a confiabilidade e a utilidade da metodologia para o setor de tomada decisões e auxílio no desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao setor ambiental.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises feitas, é possível avaliar que a metodologia utilizada concebeu um sistema de indicadores capazes de obter a caracterização da área referente à vulnerabilidade, e embora não tenha contemplado as características quantitativas e qualitativas da água da bacia, comportaram-se, como instrumento útil para a minimização dos riscos de uma ocupação inadequada do solo e a facilitação da adaptação as alterações climáticas.

Com base neste estudo é possível desenvolver um banco de dados em áreas com características semelhantes e adotando a metodologia descrita, que sirva como subsidio para implementação de um sistema de indicadores de vulnerabilidade ligado ao uso e propriedades do solo em bacias hidrográficas, que poderão ser utilizados como pontos de apoio na elaboração de políticas publicas, gestão integrada e o próprio planejamento do uso dos recursos hídricos, para que se minimizem os impactos das atividades antrópica sobre o meio geográfico, buscando preservar deste modo, as características fisiográficas da região com o intuito de manter o equilíbrio dos processos naturais essenciais para a manutenção da dinâmica local.

A utilização da Lógica *Fuzzy* neste estudo permitiu a obtenção de resultados satisfatórios na análise comportamental da região de escolhida, tais modelos trazem informações mais próximas das reais condições do objeto de estudo, o que possibilita uma diminuição na perda de informações, levando a uma análise detalhada da situação de uma área. Quanto à representação espacial desses dados, verificou-se que a técnica permite caracterizar e representar diferentes relações comportamentais das variáveis adotadas, demonstrando-se uma técnica eficiente na elaboração de modelos representativos da vulnerabilidade ambiental, favorecendo ao usuário uma noção do real comportamento dos aspectos adotados, uma vez que, o Qgis sozinho não é capaz de realizar a modelagem de modo a se obter as varias situações que podem ocorrer em uma área, desta forma o Matlab se coloca como uma ferramenta auxiliar no sentido de permitir gerar diferentes situações para as mesmas variáveis baseadas na criação de regras desenvolvidas pelo operador, cuja eficiência tem forte dependência da experiência do operador do modelo, sendo este o ponto negativo identificado para o sistema *Fuzzy*.

Como sugestão para trabalhos futuros, partindo da necessidade de obtenção de resultados mais precisos e satisfatórios, sugere-se a utilização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para a determinação da vulnerabilidade ambiental de áreas de bacia hidrográfica, os quais, de acordo com Ferreira et al. (2013), são uma ferramenta adequada para estudos de sensoriamento remoto voltados ao meio ambiente, e que quando considerados fatores como tempo, espaço e custo, se mostram como uma alternativa promissora, no sentido de alcançar resultados satisfatórios, com a maximização de tempo e minimização de custos orçamentários.

Recomenda-se ainda, a aplicação do sistema *Fuzzy* em diferentes ambientes, de modo a verificar a eficácia da técnica associada a sistemas de espacialização de dados, objetivando realizar uma análise da situação ambiental, com o intuito de propor ações ambientais de preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, bem como, o uso desta técnica e de outras semelhantes como instrumento de auxílio na implantação de políticas públicas.

Partindo da holística do que foi apresentado neste trabalho, conclui-se que, a utilização de elementos georreferenciados associados à modelagem matemática, tem uma enorme contribuição para o setor ambiental e para ciência de uma forma geral, visto a necessidade de acompanhar, prever e mitigar as situações de risco que podem ocorrer e dar condições de produtividade e permanência para as comunidades inseridas em contextos socioambientais adversos, com o intuito de preservar a dinâmica local da região permitindo um desenvolvimento vigoroso e contínuo da região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADGER, W. N. **Vulnerability**. *Global Environmental Change*, v. 16, n.3, p. 268-281. 2006
- ALVES, H. P. DA 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 de População*, v. 23, n. 1, p. 43–59, 2006.
- BERNARDI E. C. S. et al. **Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental**. *Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 159-168, 2013.
- BORDALLO, C. L. A **A Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos**. NUMA/UFPa. Belém. 1995.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, V. M. A. **Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação**. 1 ed. São José dos Campos. INPE. 2001.
- CAMPOS FILHO, P. **Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica fuzzy**. Florianópolis: UFSC, 2004. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- CAMPBELL, H. E.; KIM, Y.; ECKERD, A. Local zoning and environmental justice: na agente-based model analysis. **Urban Affairs Review**, v. 50, n.4, p. 521-552, 2014.
- CASTANHEIRA, E. G. et al. Environmental sustainability of biodiesel in Brasil. **Energy Policy**, v. 65, p.680-691, 2014.
- CREPANI, E. et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: MCT/INPE, 2001.
- COUTO, O. F. V. **Geração De Um Índice De Sustentabilidade Ambiental Para Bacias Hidrográficas Em Áreas Urbanas Através Do Emprego De Técnicas Integradas De Geoprocessamento**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Instituto de Geociências Programa de Pós-Graduação em Geografia. v. 34, n. 1, p. 268–269, 2016.

CUNHA, R. C. da et al. **Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos - SP.** Geociências, São Paulo, v. 30, n. 3, p.399-414, nov. 2011.

CRUZ, J. C. et al. **Avaliação ambiental integrada: construção metodológica de modelo para bloco do meio físico.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 18 n.1. 223-233–Jan/Mar. 2013.

FERREIRA, J. A. M.; ALBUQUERQUE, J. P. T. **Sinopse da geologia da Folha Seridó.** SUDENE, DRN/DG. Seridó Geologia Regional, Recife. n.18, p.52. 1969.

FERREIRA, C. C.; PIROLI, E. L. Zoneamento Ambiental Das Paisagens: Estudo De Caso Do Alto Curso Da Bacia Hidrográfica Do Rio Sucuriú, Mato Grosso Do Sul, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 2, p. 358, 2016.

FEYISA, G. L. et al. **Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery.** Remote Sensinf of Environment. Vol 140. 23-35. 2013.

FLAUZINO, F. S. et al. **Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba no Cerrado Mineiro.** Revista Sociedade & Natureza, n. 22, p. 75-91. abr. 2010.

GOVINT. Fórum para Governança Integrada. Workshop II – **Territórios vulneráveis.** 2014. Disponível em: <http://www.forumgovernacaointegrada.pt/index.php/conferencia/88-problemas-sociais-complexos/workshops/132-ws-ii-territorios-vulneraveis>.

GRECO, M. G. **Analisis socioambiental de espacios vulnerables sometidos a desastres, algunos estudios de caso em el norte de la republica Argetina.** In: XV ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA. Anais. Havana, Cuba. P. 183-195. 2015.

GRIGIO, A. M. **Aplicações do sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guaramé (RN): Simulação de risco às atividades petrolífera**. 2003. 230f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2003.

HAMMOND, A. et al. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. , Washington DC: World Resources Institute 1995.

JARDIM DE SÁ, E.F. **A faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu significado geodinâmico na cadeia brasileira/pan-africana**. p.804. (Tese-Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 1994.

LEAL, A.C. **Gestão das Águas no Pontal do Paranapanema - São Paulo**. Campinas, Tese (Doutorado em Geociências – Área de concentração em Administração e Política de Recursos Minerais) – Inst. de Geociências – UNICAMP, 2000.

LOPES, E. R. N.; LOURENÇO, R. W.; REUSS-STRENZEL, G. M. **Análise multicriterial aplicada a elaboração de zoneamento de unidade de conservação na zona costeira da Bahia, Brasil**. V. 37, p.65-90, 2016.

MAGALHÃES JR, A. P. **Indicadores ambientais e recursos hídricos: realidade e perspectiva para o Brasil a partir da experiência francesa**. Bertrand Brasil. 3ª Edição. Rio de Janeiro – RJ. 2011.

MALUTTA, C. **Método de apoio á tomada de decisões sobre a adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy**. 2004. 221p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis – SC, 2004.

MALTA, F. S. et al. **Análise Da Vulnerabilidade Social E Risco Ambiental No Município Do Rio De Janeiro / Analysis of Social Vulnerability and Environmental Risk in the Municipality of Rio De Janeiro**. Geo UERJ, v. 25, n. 12, 2017.

MORAES, O. B de. **Método de análise de dados para avaliação de áreas urbanas recuperadas: Uma abordagem utilizando a lógica fuzzy**. 2008. 302p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Cívica. São Paulo, 2008.

MEUNIER, V. R. **Sucession stratigraphique et passages lateraux dus au metamorphisme dans La Série Ceará, Antecambrien du Nord-Est brésilien**. C. R. Acad. Sci. Paris. n. 259, p.3769-3799. 1964.

PAULA, E.M.S.; SOUZA, M.J.N. **Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto de Pesquisas Espaciais / INPE. p. 2979-2984. 2007.

PEDRYCZ. W.; EKEL. P.; PARREIRAS. R. **Tomada de Decisão Multicriteria Fuzzy: Modelos, Métodos e Aplicações**. John Wiley & Sons, Chichester, 2011.

PIRES, A. L.; **Análise da vulnerabilidade ambiental de bacias hidrográficas do litoral sul paraibano. Dissertação de mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UFPB. João Pessoa – PB. 2015.

OLIVEIRA, F. B. de. **Utilização de lógica fuzzy na geração de zonas de manejo**. 2014. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

ONU. Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento – PNUD. **Sustentar o progresso humano: reduzir as vulnerabilidades e reforçar a resiliência**. Relatório de Desenvolvimento Humano. eISBN 978-92-1-056669-8. 1 UM Plaza, New York, NY 10017, USA. 2014.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria dos conjuntos fuzzy a problemas da biomedicina**. 2001. 198p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

ROSS, J.L.S. **Análises e sínteses na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental**. Revista do Departamento de Geografia. n. 9, p. 65-75. 1995.

RUHOFF, A.L. **Gerenciamento de recursos hídricos na bacia do Arroio Grande, RS: Zoneamento através de inferência Geográfica Fuzzy**. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2006, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática Agropecuária/Instituto de Pesquisas Espaciais. p. 136,144. 2006.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Math Modelling*, vol. 9, pp. 161–176. 1987.

SIQUEIRA, R. M. B.; SILVA G. H. **A bacia hidrográfica como unidade de estudo e o funcionamento dos ecossistemas fluviais**. *Boletim da Associação Brasileira de Limnologia* – 2011.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais artificiais** - Tese Doutorado - USP São Paulo 2007.

SILVA, F. N. DA. **Modelagem Fuzzy aplicada a Políticas Públicas**. Universidade Estadual Paulista - Unesp, 2015.

SILVA, S. F. DA. **Zoneamento geoambiental com auxílio de lógica Fuzzy e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da bacia do rio do peixe**. 2005. p. 441 Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

SILVA, G. A.; COSTA, R. A. **Paisagem e fragilidade ambiental natural da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Lourenço, Ituiutaba/Prata – MG**. *Caminhos de Geografia*, v. 12, n. 39, 2011.

SILVERT, W. **Fuzzy indices of environmental conditions**. *Ecological Modelling*, v.130, n. 1-3, p.111 –119.2000.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de textos, p.184. 2004.

SOUZA, D. S. et al. **Sistema de Informações Georreferenciadas no planejamento dos serviços de saúde**. *Momento e perspectivas em saúde*, v. 9, n. 2, p. 10-15. 1996.

SOUSA, J. N. de P. e. **Aplicação de lógica fuzzy em sistemas de controle de tráfego metropolitano em rodovias dotas de faixas exclusivas para ônibus**. 2005. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Rio de Janeiro, 2005.

STORANI, D. L.; PEREZ FILHO, A. **Novas informações sobre geocronologia em níveis de baixo terraço fluvial do rio Mogi Guaçu, SP, Brasil**. Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo, v.16, n.2, p.191- 199, 2015.

TAGLIANI, C. R. A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informação**. In: Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11. Belo Horizonte. São José dos Campos: INPE. p. 1657-1664. 2003.

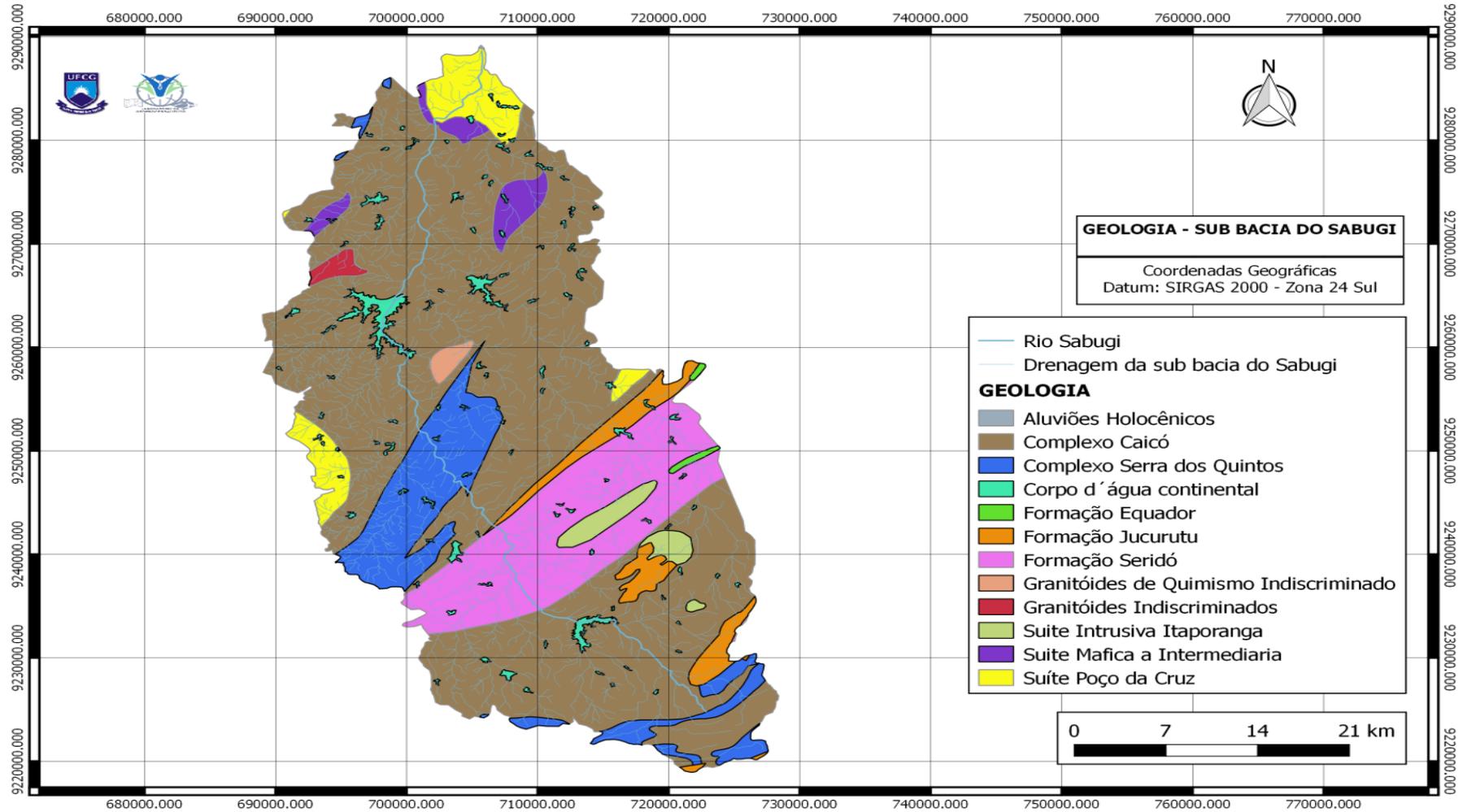
TUNDISI, J. **Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos**. Revista USP, n. 70, p. 24-35. 2006.

WINOGRAD, M. **Marco conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sustentabilidad para la toma de decisiones e Latinoamérica y el Caribe: position paper**. Proyecto CIAT/UNEP, Cali, Colombia.1995. <<http://www.ciat.cgiar.org/indicators/unepciat/paper.htm>>. (acessada em 9 de outubro de 2018).

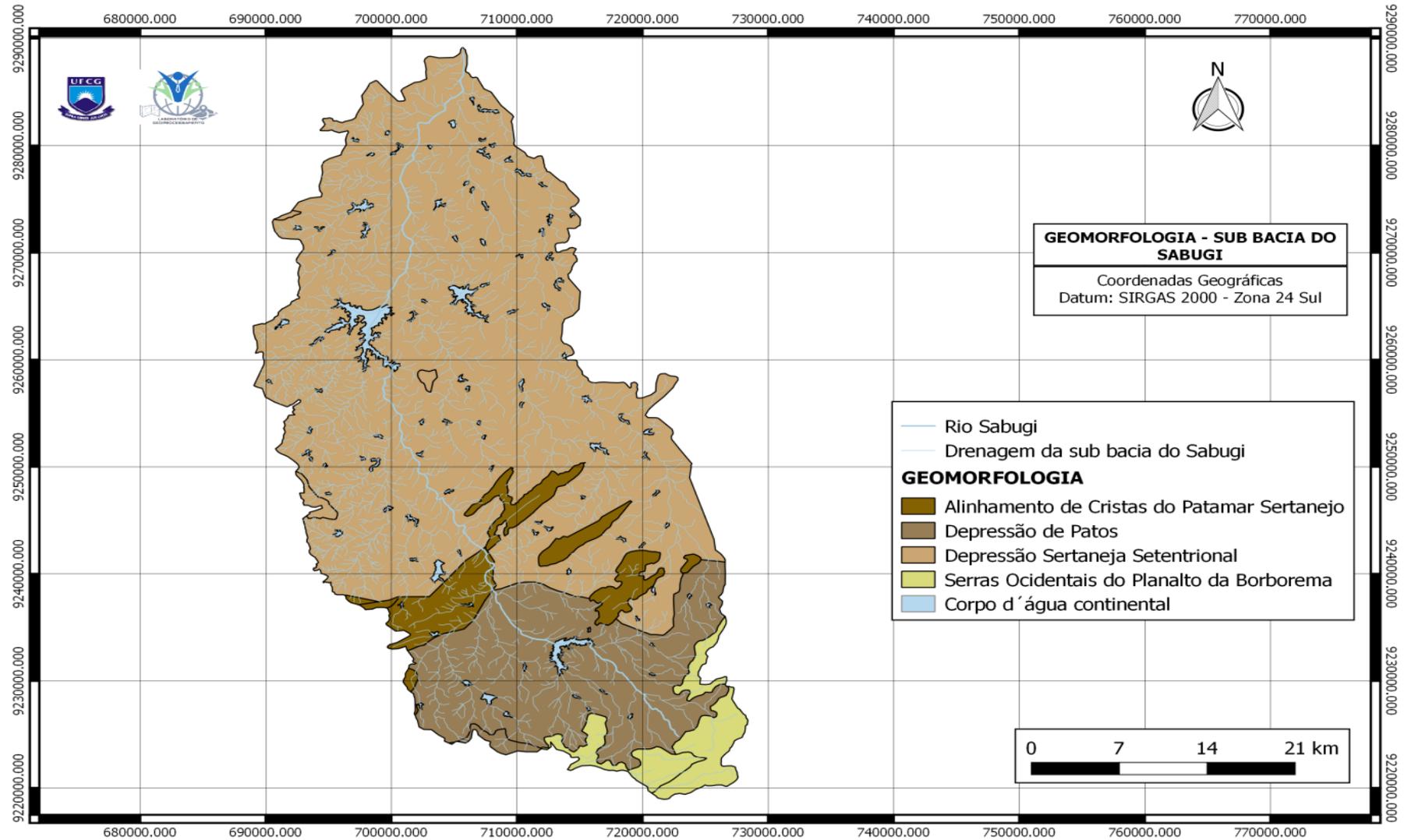
VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Rio de Janeiro: Editora FGV. p. 253. 2005.

# ANEXOS

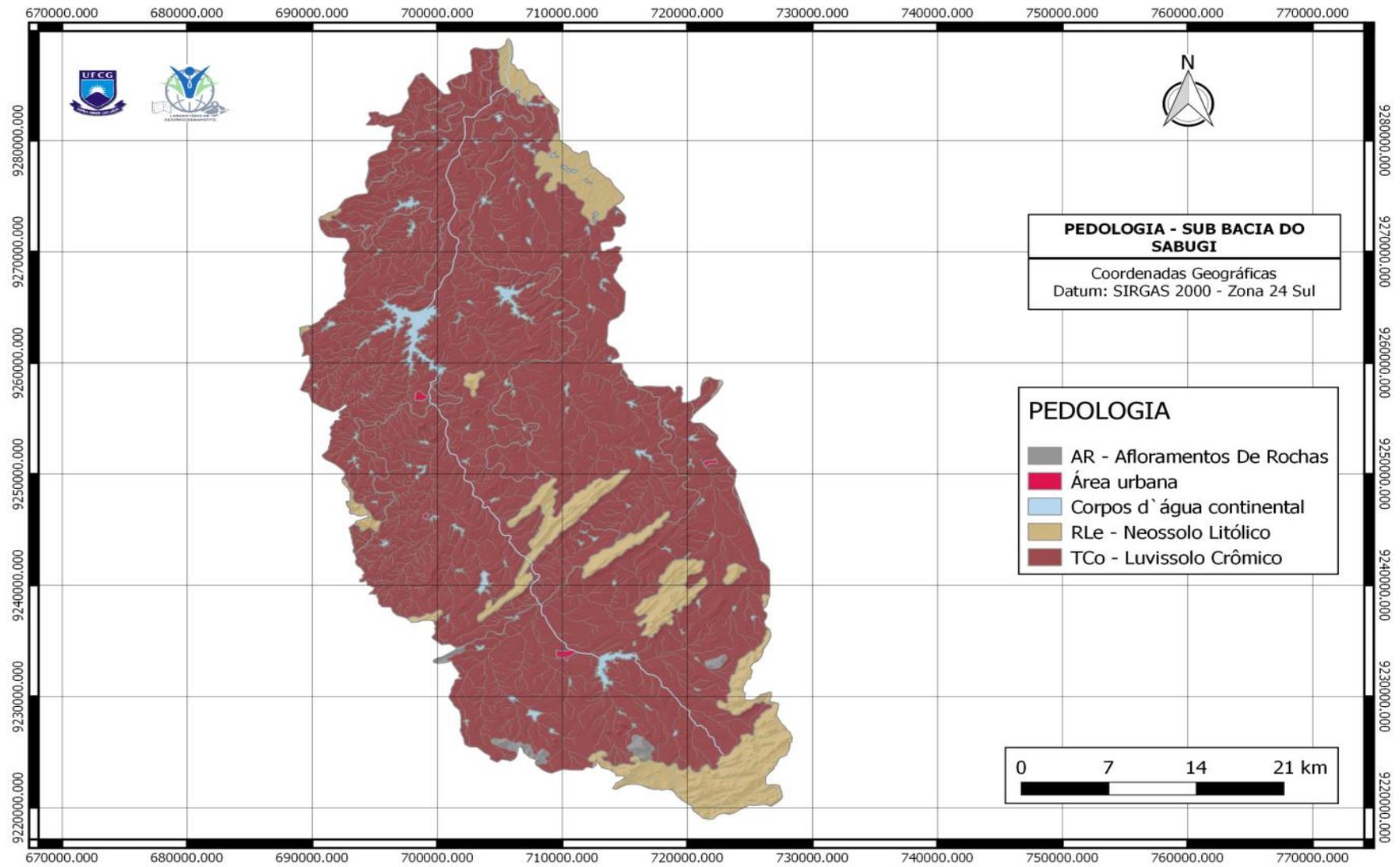
## Anexo A- Mapa da composição geológica da sub bacia do Sabugi



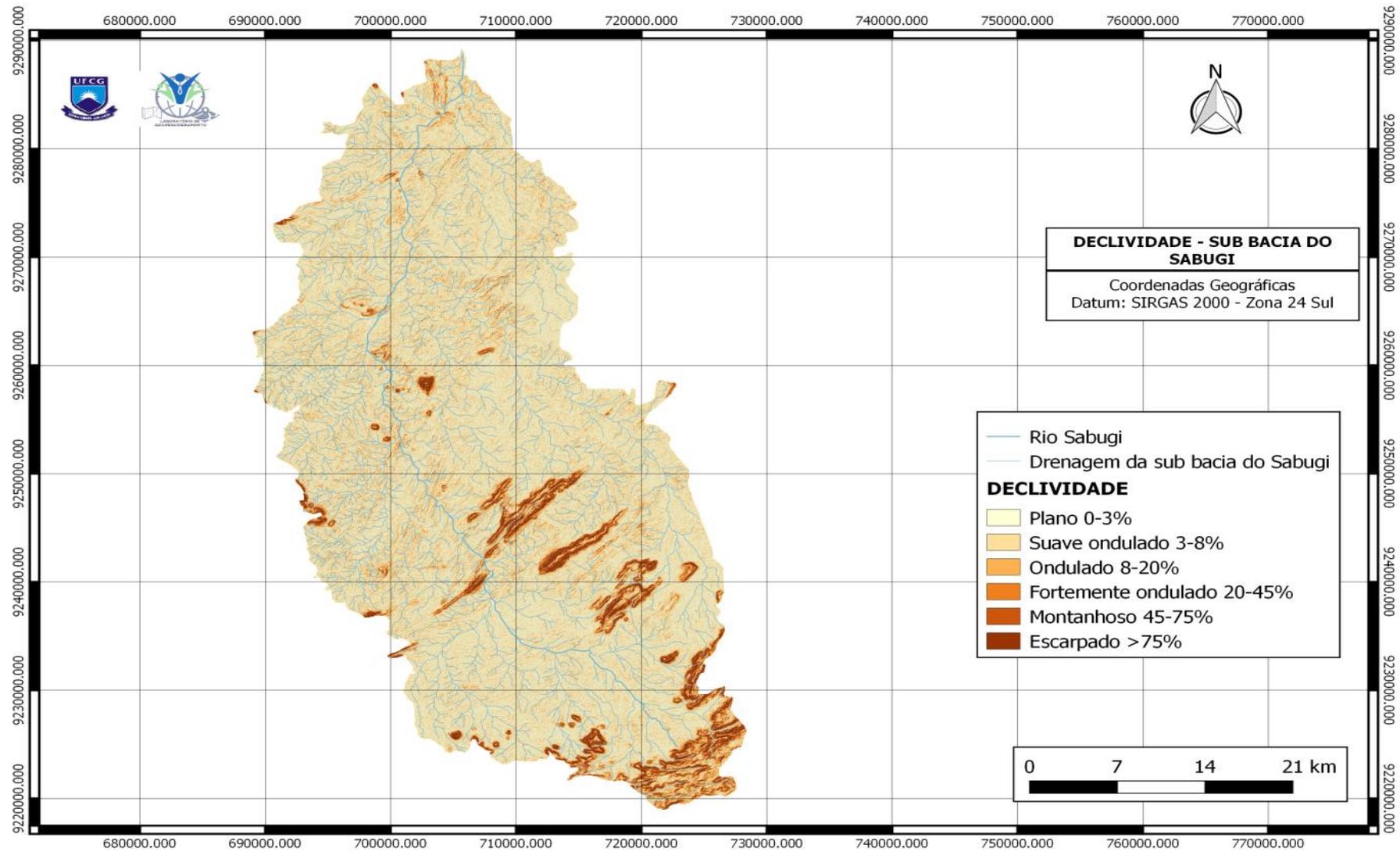
## Anexo B- Mapa da composição Geomorfológica da sub bacia do Sabugi



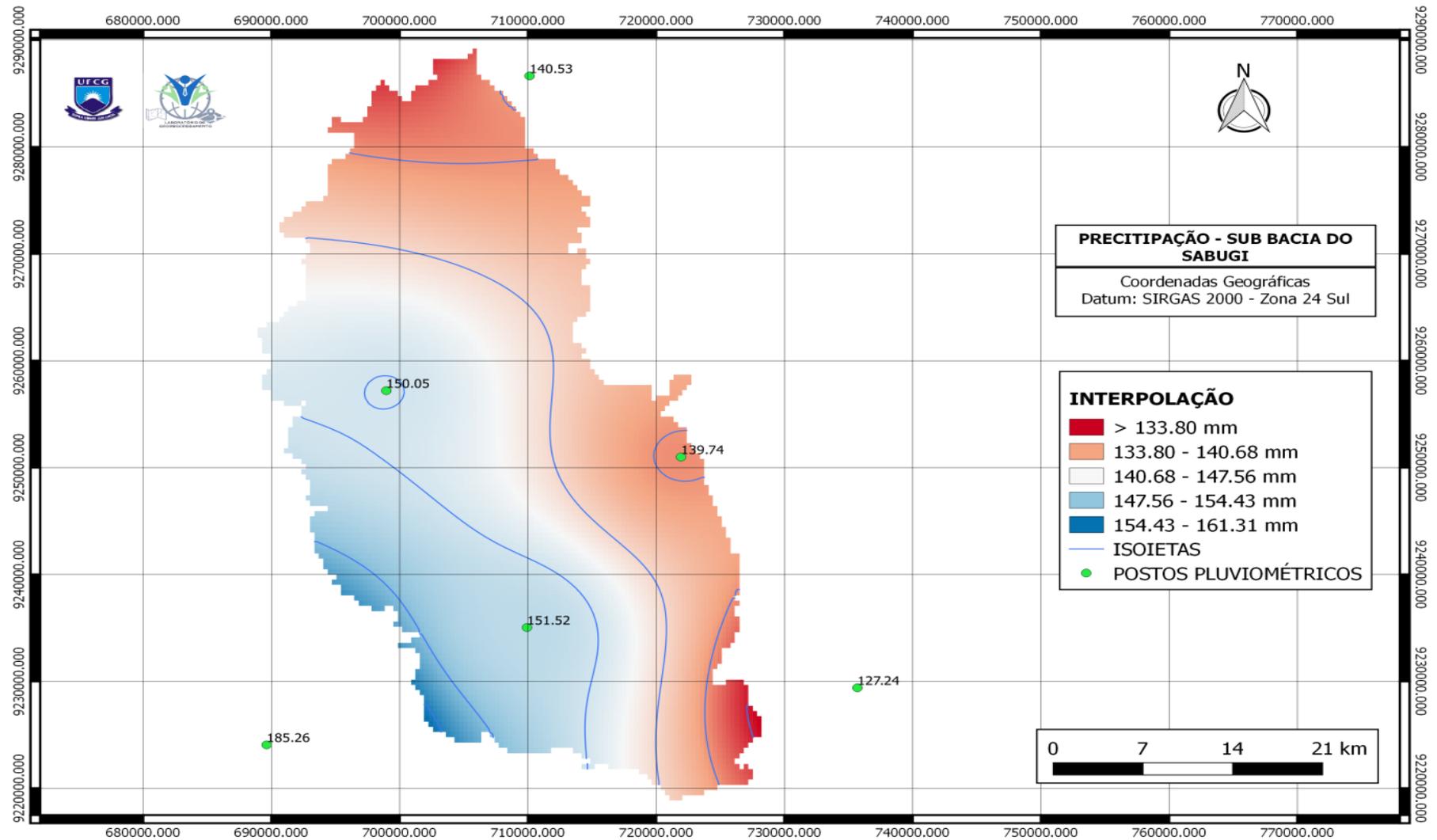
## Anexo C – Mapa da composição pedológica da sub bacia do Sabugi



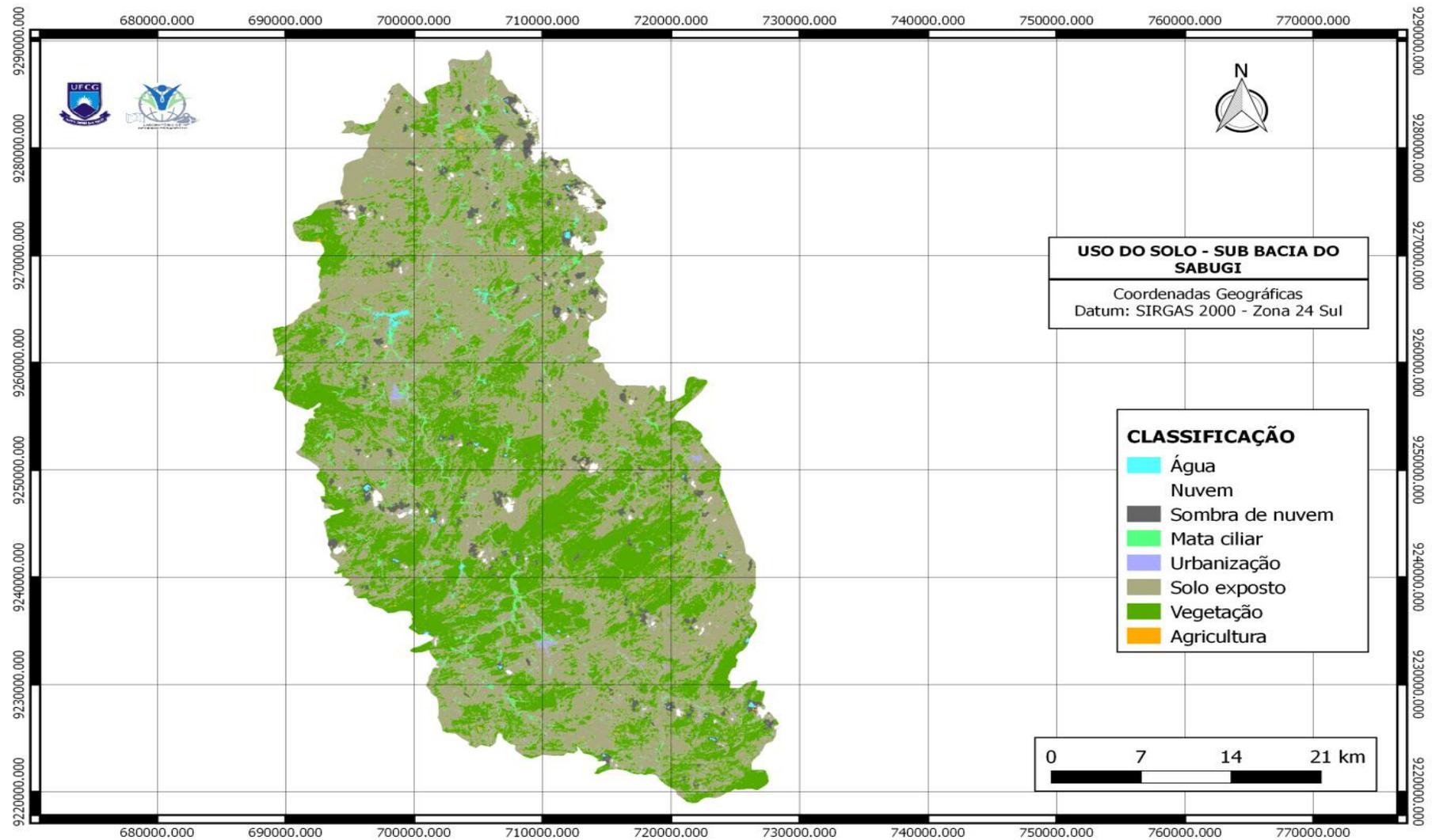
## Anexo D- Visualização da distribuição espacial da declividade na sub bacia do Sabugi



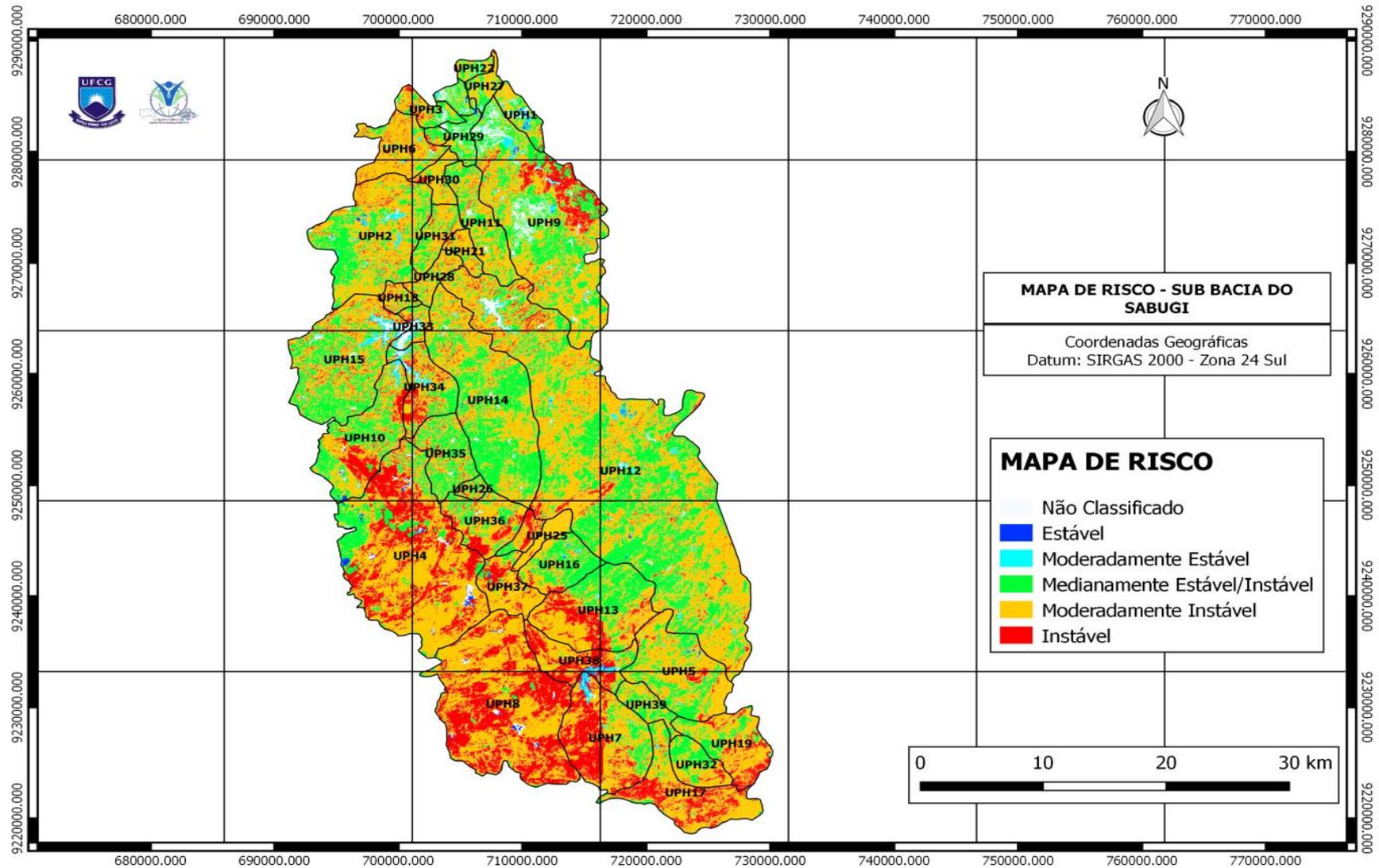
Anexo E- Mapa da composição climatológica da sub bacia do Sabugi (1994-2016).



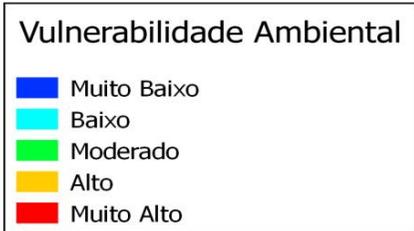
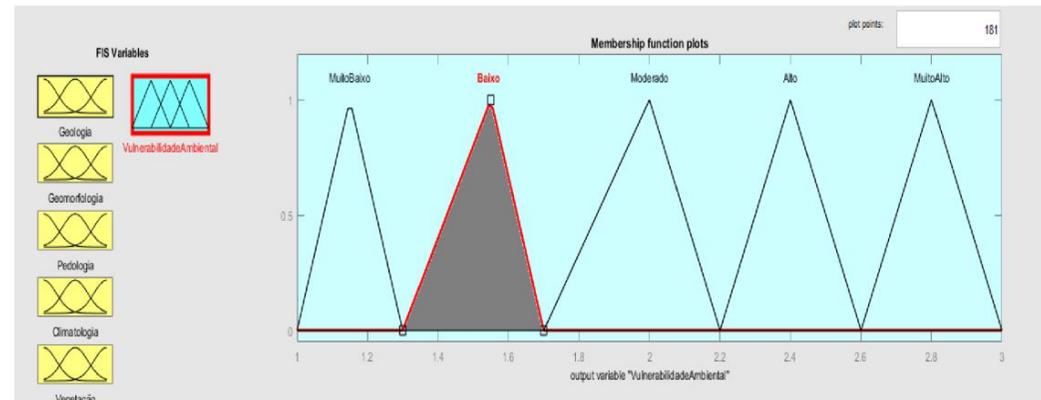
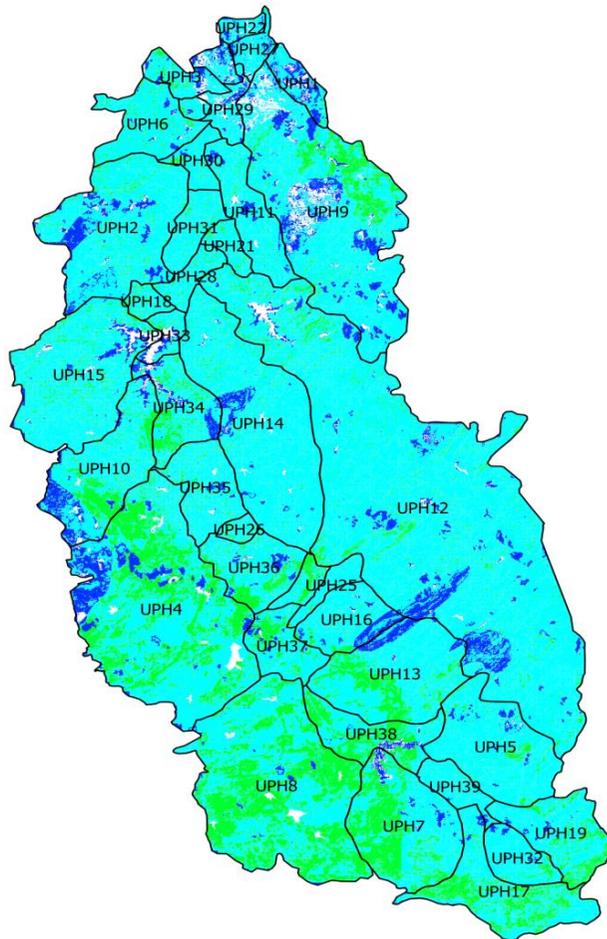
## Anexo F- Mapa do uso e ocupação do solo da sub bacia do Sabugi



### Anexo G- Visualização espacial do mapa de risco e da modelagem *Fuzzy* desenvolvida gerado inicialmente.

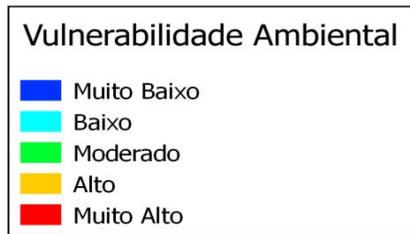
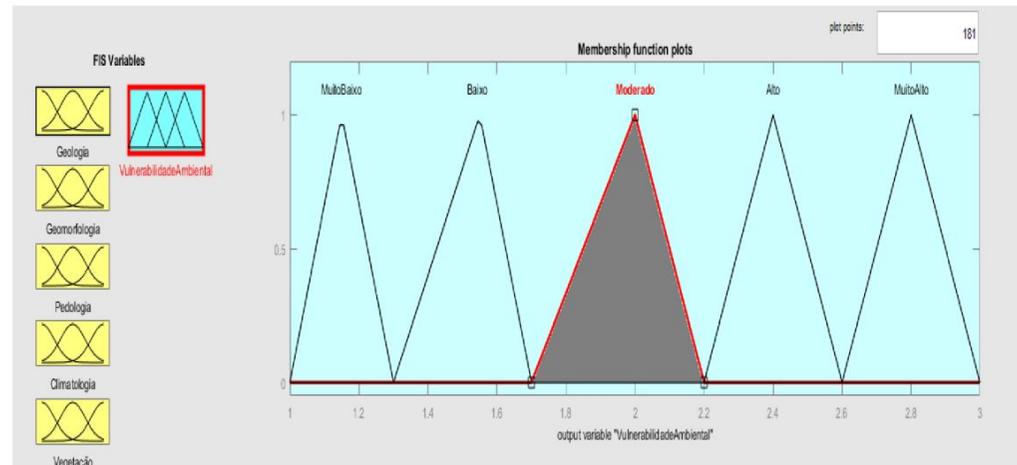
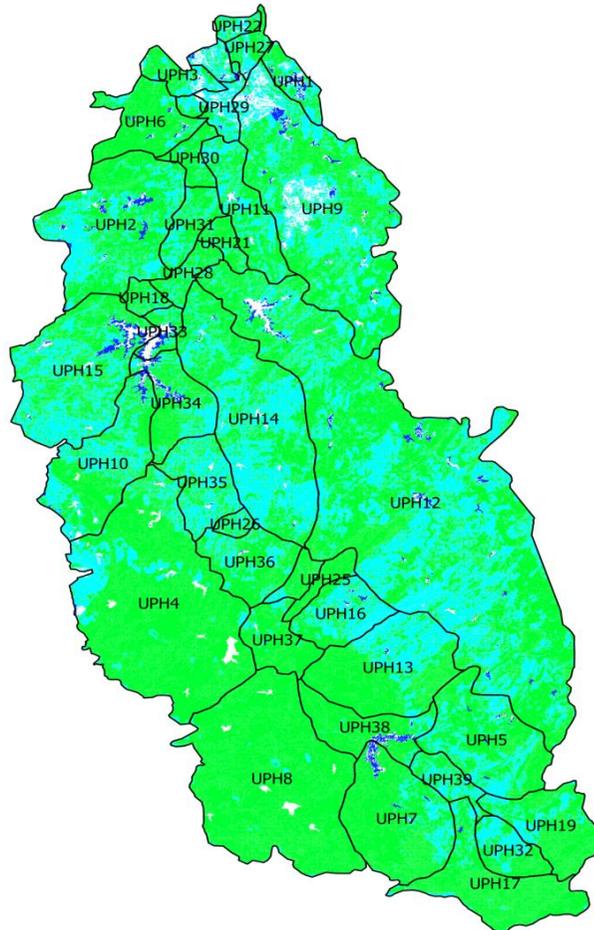


**Anexo H- Visualização espacial da modelagem Fuzzy, resultando uma Vulnerabilidade Ambiental Baixa.**



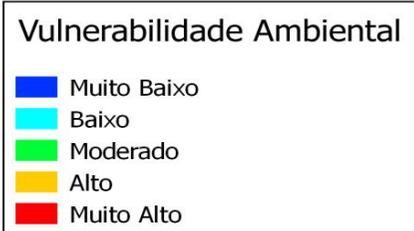
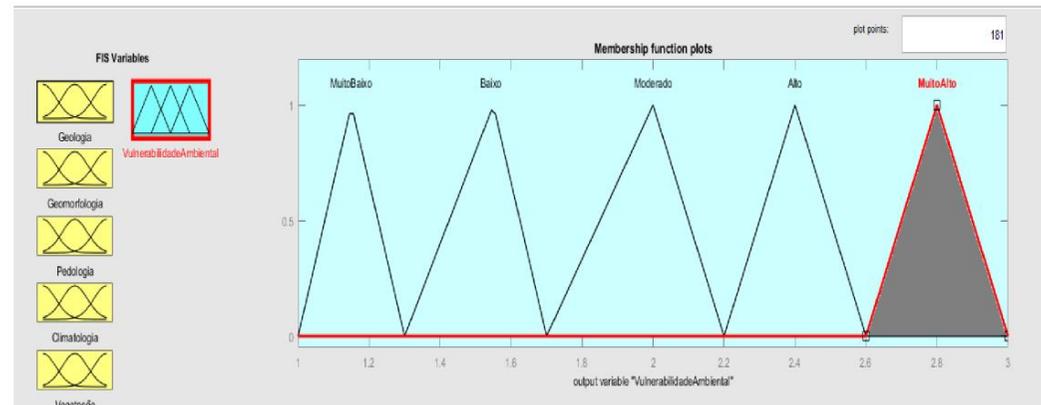
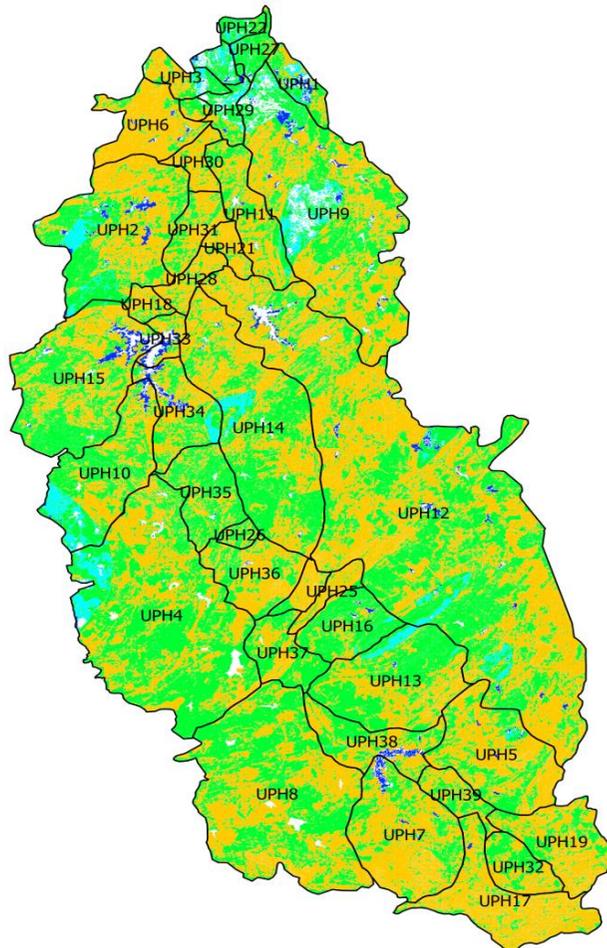
**Vizualização espacial da modelagem apartir de entradas baseadas na variação numérica descrita por Crepani et al., 2001.**

**Anexo I– Visualização espacial da modelagem *Fuzzy*, resultando uma Vulnerabilidade Ambiental Moderada.**



**Vizualização espacial da modelagem a partir de entradas baseadas na variação numérica descrita por Crepani et al., 2001.**

**Anexo J- Visualização espacial da modelagem *Fuzzy*, resultando uma Vulnerabilidade Ambiental Muito Alta.**



**Vizualização espacial da modelagem a partir de entradas baseadas na variação numérica descrita por Crepani et al., 2001.**