

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais**



**Dissertação**

**ANÁLISE E MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO  
DE PELOTAS, RS**

**Samanta Tolentino Cecconello**

**Pelotas, 2019**

**Samanta Tolentino Cecconello**

**ANÁLISE E MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO  
DE PELOTAS, RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Diuliana Leandro

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

C387a Ceconello, Samanta Tolentino

Análise e mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas, RS / Samanta Tolentino Ceconello ; Diuliana Leandro, orientadora. — Pelotas, 2019.

157 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Análise multicritério. 2. Vulnerabilidade ambiental. 3. Atividades antrópicas. 4. Geoprocessamento. I. Leandro, Diuliana, orient. II. Título.

CDD : 550

Samanta Tolentino Cecconello

Análise e mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas, RS

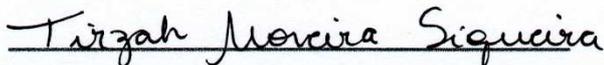
Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 29/03/2019

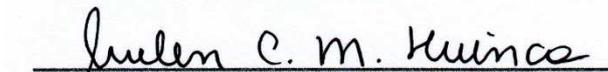
Banca Examinadora:



Profª. Dra. Diuliana Leandro (orientadora)  
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.



Profª. Dra. Tirzah Moreira Siqueira  
Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Profª. Dra. Suelen Cristina Movio Huinca  
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.

Dedico este trabalho à cidade de Pelotas e a todos que fizeram dela, seu lar.

## **Agradecimentos**

Eu acredito que tudo que nos acontece tem um propósito. Uma nova caminhada, um novo desafio, medos, insegurança, tudo faz parte de um plano maior e que nos permitirá evoluir de alguma forma. Então, agradeço à Deus por me permitir estar onde estou, por todas as oportunidades que me mostram o quanto sou pequena, o quanto ainda tenho que caminhar. Obrigada por me dar tudo o que preciso e por ter ao meu lado pessoas tão especiais que me auxiliam no caminho.

Agradeço à minha mãe Luciane por todas as palavras de incentivo e pela compreensão de sempre. À minha irmã Sâmara e minha sobrinha amada Júlia por me proporcionarem momentos de alegria e felicidade quando combinamos um mate espumadinho com um bolinho. Ao meu “paidrasto” Jorge pelas jantadas nas sextas-feiras, momentos de estar junto de vocês. Minha irmã Maria Eduarda por ser tão parecida e tão diferente de mim. Amo vocês.

Agradeço imensamente a minha amiga Luana pela compreensão, amizade, pelos estudos na madrugada e pela sua eterna paciência. Amo você sua “insuportável”. Não poderia deixar de agradecer aos meus quatro filhos de quatro patas: Sophia, Lara, Kiara e Hórus pelo amor incondicional e companheirismo. São meu maior tesouro.

À minha querida amiga e orientadora Diuliana. Agradeço por todo o aprendizado, carinho, atenção, paciência e por acreditar no meu trabalho. Sem os seus ensinamentos eu não teria chegado até aqui. Muito obrigada.

Agradeço a professora Tirzah por participar de mais este momento na minha trajetória e por estar sempre disposta a me ajudar e contribuir com minha formação. Tenho um carinho muito especial por você.

À prof.<sup>a</sup> Suelen por aceitar de imediato o convite. Tenho certeza que fará valiosas contribuições. Obrigada. À professora Andréa pela amizade.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Pelotas e a defesa Civil pelas informações e pelos dados concedidos para a realização deste trabalho.

Aos amigos Gisele, Bruno e Nantyara por participarem e aceitarem meus planos mirabolantes. Por fim, agradeço a todos que de alguma forma me auxiliaram ou contribuíram comigo nesta caminhada.

**MUITO OBRIGADA**

## Epígrafe

*Um mapa é o maior de todos os poemas épicos.  
Suas linhas e cores mostram a realização de grandes sonhos.*

*Gilbert H. Grosvenor.*

## Resumo

CECCONELLO, Samanta Tolentino. **Análise e mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas, RS.** 2019. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Este trabalho consiste no mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas, RS, partindo de adaptações nas metodologias de Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Leandro (2013). Para tal, foram utilizados dez elementos ambientais que compuseram o modelo de fragilidade ambiental. Para a fragilidade potencial foram utilizados os elementos: litologia, tipos de solos, declividade, pluviosidade, águas subterrâneas. Para a fragilidade emergente foram utilizados: uso e ocupação da terra, suscetibilidade à erosão e inundação, APP e saneamento. A fragilidade ambiental foi obtida com a soma das fragilidades potencial e emergente. Utilizou-se a Análise Hierárquica de Processos para ponderação dos elementos no modelo. A fragilidade potencial de classe baixa e média se encontra em 89,26% da área total. Já a fragilidade emergente de classe alta e muito alta, se encontra em 99,7% da área do município. Conclui-se que a fragilidade ambiental para o município de Pelotas se apresentou em equilíbrio, apresentando um pouco mais de 50% de áreas consideradas de classe alta e muito alta fragilidade, sendo, portanto, a fragilidade emergente a que intensifica o grau de fragilidade na região estudada.

**Palavras-Chaves:** Análise multicritério; Vulnerabilidade Ambiental; Atividades Antrópicas; Geoprocessamento.

## Abstract

CECCONELLO, Samanta Tolentino. **Analysis and mapping of the environmental fragility of the city of Pelotas, RS. 2019.** 157f. Dissertation (Masters in Environmental Sciences) - Graduate Program in Environmental Sciences, Engineering Center, Faculty of Environmental and Sanitary Engineering, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

This work consists of mapping the environmental fragility of the municipality of Pelotas, RS, based on adaptations in the methodologies of Ross (1994), Crepani et al. (2001) and Leandro (2013). Ten environmental elements were used to compose the environmental fragility model. For the potential fragility were used the elements: lithology, soil types, slope, rainfall, groundwater. For the emergent fragility were used: land use and occupation, susceptibility to erosion and flood, APP and sanitation. Environmental fragility was obtained with the potential and emerging fragilities. A hierarchical process analysis was used to weight the elements in the model. The potential fragility of low and middle class is found in 89.26% of the total area. On the other hand, the emerging fragility of the upper and very high class is found in 99.7% of the area of the municipality. It is concluded that the environmental fragility for the municipality of Pelotas presented in balance, presenting a little more than 50% of areas considered of high class and very high fragility, being, therefore, the emerging fragility that intensifies the degree of fragility in the region studied.

**Keywords:** Multicriteria analysis; Environmental Vulnerability; Anthropic activities; Geoprocessing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do processo de tomada de decisão. ....	37
Figura 2: Representação gráfica da metodologia AHP. ....	40
Figura 3: Localização do município de Pelotas/RS. ....	41
Figura 4: Elementos ambientais que compõe o modelo de fragilidade ambiental para o município de Pelotas/RS. ....	45
Figura 5: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero segundo o método de Foster et al. (2006). ....	60
Figura 6: Mapa hipsométrico do município de Pelotas/RS e o perfil topográfico. ....	72
Figura 7: Mapa clinográfico do município de Pelotas/RS. ....	74
Figura 8: Distribuição espacial das estações pluviométricas da Bacia Atlântico, trecho Sudeste. ....	76
Figura 9: Interpolação dos dados de precipitação média anual para a região estudada.....	79
Figura 10: Mapeamento da fragilidade quanto ao elemento pluviosidade para o município de Pelotas. ....	81
Figura 11: Mapa de solos do município de Pelotas.....	83
Figura 12: Mapa da classificação da fragilidade quanto ao tipo de solo. ....	86
Figura 13: Unidades geológicas do município de Pelotas. ....	87
Figura 14: Mapa da fragilidade quanto ao elemento litologia para o município de Pelotas .....	88
Figura 15: Uso e ocupação da terra para o município de Pelotas para o ano de 2015. ....	89
Figura 16: Mapa da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra para o município de Pelotas. ....	91
Figura 17: Classes definidas para as APPs. ....	92
Figura 18: mapa da fragilidade das APPs para Pelotas. ....	93
Figura 19: Mapeamento da fragilidade quanto à presença de redes de abastecimento de água. ....	95
Figura 20: Mapeamento da fragilidade quanto à existência de rede coletora de esgotos sanitários no município de Pelotas. ....	97

Figura 21: Mapeamento da fragilidade quanto à existência de coleta dos resíduos sólidos urbanos. ....	98
Figura 22: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento saneamento. ....	99
Figura 23: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.....	100
Figura 24: Mapeamento da fragilidade relativo ao elemento Saneamento para o município de Pelotas. ....	101
Figura 25: Distribuição espacial dos poços cadastrados e utilizados neste estudo. ....	102
Figura 26: Semivariograma experimental com definição de patamar e modelo para a determinação da fragilidade à contaminação natural do aquífero.....	103
Figura 27: Mapa da fragilidade à contaminação das águas subterrâneas. ....	104
Figura 28: Mapa de fragilidade quanto à declividade para inundação. ....	105
Figura 29: Mapa de fragilidade quanto à altitude para inundação.....	107
Figura 30: Mapa de fragilidade quanto ao tipo de solo para inundação. ....	108
Figura 31: Mapeamento da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra para inundação.....	110
Figura 32: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento inundação.	111
Figura 33: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.....	112
Figura 34: Mapa de fragilidade à inundação para Pelotas. ....	113
Figura 35: Elementos que compuseram o modelo de fragilidade à erosão....	116
Figura 36: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento erosão. ....	117
Figura 37: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.....	118
Figura 38: Mapa de fragilidade à erosão para Pelotas.....	119
Figura 39: Ambiente online da calculadora AHP para a Fragilidade Potencial. ....	122
Figura 40: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.....	123
Figura 41: Mapa de Fragilidade Potencial.....	124

Figura 42: Ambiente online da calculadora AHP para a Fragilidade Emergente .....	126
Figura 43: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.....	127
Figura 44: Mapa de Fragilidade Emergente. ....	128
Figura 45: Mapeamento da fragilidade ambiental para o município de Pelotas. ....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Elementos ambientais considerados em cada modelo de Fragilidade Ambiental proposto por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Leandro (2013).	33
Tabela 2: Escala proposta por Saaty (1977) para hierarquização dos critérios. .....	38
Tabela 3: Valores do Índice Randômico para matrizes quadradas de ordem n. .....	39
Tabela 4: Fonte de dados alfanuméricos e vetoriais utilizados neste estudo...	43
Tabela 5: Classificação quanto ao grau de fragilidade proposta por Ross (1994). .....	46
Tabela 6: Classificação da altitude e cores utilizadas no mapa hipsométrico para o município de Pelotas .....	47
Tabela 7: Classes para o critério declividade do terreno.....	48
Tabela 8: Classificação das fragilidades relacionadas com as características pluviométricas .....	50
Tabela 9: Classificação do grau de fragilidade quanto aos tipos de solos. ....	51
Tabela 10: Classificação do grau de fragilidade quanto à litologia.....	52
Tabela 11: Classificação do grau de fragilidade quanto ao uso e cobertura do solo.....	53
Tabela 12: Delimitações das áreas de preservação permanente.....	54
Tabela 13: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência das APPs. ....	56
Tabela 14: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência de rede de abastecimento de água. ....	57
Tabela 15: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência de rede de coleta de esgotos. ....	57
Tabela 16: Classificação do grau de fragilidade relacionado as áreas abrangidas pelo sistema domiciliar de coleta de resíduos sólidos.....	58
Tabela 17: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério tipo de solo. ....	63
Tabela 18: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério uso e ocupação da terra. ....	64

Tabela 19: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério declividade.....	64
Tabela 20: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério altitude.....	64
Tabela 21: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério tipo de solo.....	66
Tabela 22: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério uso e ocupação da terra.....	67
Tabela 23: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério declividade.....	67
Tabela 24: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério litologia.....	68
Tabela 25: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério pluviosidade.....	69
Tabela 26: Áreas de declividade e percentual de área ocupada pelas classes de declividade para o município de Pelotas.....	74
Tabela 27: Estações pluviométricas e suas características como: código, nome, coordenadas, série histórica de dados e altimetria.....	77
Tabela 28: Médias mensais de precipitação e precipitação média anual para cada estação pluviométrica de acordo com a sua série histórica.....	78
Tabela 29: classificação dos solos quanto ao grau de fragilidade.....	85
Tabela 30: classificação quanto ao grau de fragilidade da litologia encontrada no município de Pelotas.....	88
Tabela 31: Classificação da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra. ..	90
Tabela 32: Quantificação das fragilidades quanto às APPs.....	94
Tabela 33: Áreas de declividade e percentual de área ocupada pelas classes de declividade para compor o elemento inundação para o município de Pelotas.....	106
Tabela 34: Áreas de altitude e percentual de área ocupada pelas classes de altitude para compor o elemento inundação para o município de Pelotas. ....	106
Tabela 35: Áreas dos tipos de solos e percentual de área ocupada pelas classes de tipos de solos para compor o elemento inundação para o município de Pelotas.....	108

Tabela 36: Classificação da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra. ....	109
Tabela 37: Características e classificação dos critérios que irão compor o mapa de fragilidade à erosão para Pelotas.....	115
Tabela 38: Quantitativo das áreas das classes de fragilidade potencial. ....	125
Tabela 38: Quantitativo das áreas das classes de fragilidade emergente. ....	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANA	Agência Nacional de Águas
AMC	Análise Multicritério
APP	Área de Preservação Permanente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FUNASA	Fundação Nacional da Saúde
GOD	G- <i>groundwater hydraulic confinement</i> ; O - <i>overlying strata</i> ; D - <i>depth to groundwater table</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
IDW	Inverse Distance Weighting
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MUB	Mapa Urbano de Pelotas
PMP	Prefeitura Municipal de Pelotas
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
RC	Razão de Consistência
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SANEP	Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIN	Rede Triangular Irregular
UTM	Universal Transversa de Mercator
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico
WGS	<i>World Geodetic System</i>

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
2 OBJETIVOS E HIPÓTESES .....	22
2.1 Objetivo Geral .....	22
2.2 Objetivos Específicos .....	22
2.3 Hipóteses .....	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1 Análise integrada do ambiente.....	23
3.2 Planejamento territorial e ambiental.....	24
3.3 Geotecnologias como ferramenta para análise integrada do ambiente .	27
3.4 Conceitos de vulnerabilidade ambiental e fragilidade ambiental.....	29
3.4.1 Vulnerabilidade ambiental.....	29
3.4.2 Fragilidade ambiental.....	30
3.5 Modelos de fragilidade ambiental.....	31
3.6 Análise multicritério (AMC) como ferramenta de tomada de decisão.....	36
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 Área de estudo.....	41
4.2 Fonte e tratamento dos dados .....	42
4.3 Etapa de geoprocessamento para mapeamento da fragilidade ambiental	
.....	44
4.3.1 Seleção dos elementos ambientais que irão compor o modelo de	
fragilidade ambiental para o município de Pelotas.....	44
4.3.2 Mapeamento e análise dos elementos ambientais .....	45
4.3.2.1 Mapa de altitude .....	46
4.3.2.2 Mapa de declividade .....	47
4.3.2.3 Mapas de pluviosidade .....	48
4.3.2.4 Mapa do tipo de solos.....	50
4.3.2.5 Mapa da litologia.....	51
4.3.2.6 Mapa de uso e cobertura da terra.....	52
4.3.2.7 Mapa das Áreas de Preservação Permanente .....	54
4.3.2.8 Mapa de saneamento .....	56

4.3.2.9 Mapa de fragilidade natural à contaminação de aquíferos.....	59
4.3.2.10 Mapa da fragilidade à inundação .....	62
4.3.2.11 Mapa de erosão .....	65
4.3.3 Aplicação da AHP para determinação da fragilidade ambiental ou global.....	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
5.1 Mapeamento e caracterização dos elementos ambientais .....	71
5.1.1 Mapeamento da fragilidade quanto à altitude .....	71
5.1.2 Mapeamento da fragilidade quanto à declividade.....	73
5.1.3 Mapeamento da fragilidade quanto à pluviosidade.....	75
5.1.4 Mapeamento da fragilidade quanto aos tipos de solos.....	81
5.1.5 Mapeamento da fragilidade quanto à litologia .....	86
5.1.6 Mapeamento da fragilidade quanto ao uso e cobertura da terra ..	89
5.1.7 Mapeamento da fragilidade quanto às áreas de preservação permanente .....	91
5.1.8 Mapeamento da fragilidade quanto ao saneamento: água, esgoto e resíduos sólidos .....	94
5.1.9 Mapeamento da fragilidade quanto à contaminação de aquíferos .....	101
5.1.10 Mapeamento da fragilidade quanto à inundação .....	105
5.1.11 Mapeamento da fragilidade à erosão.....	114
5.2. Mapeamento das fragilidades: potencial e emergente.....	120
5.2.1 Mapeamento da fragilidade potencial ou natural .....	121
5.2.2 Mapeamento da fragilidade emergente ou antrópica.....	125
5.2.3 Mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas.	130
6 CONCLUSÃO.....	134
REFERÊNCIAS.....	135
APÊNDICES.....	145

## **1 INTRODUÇÃO**

A partir do uso e apropriação dos recursos naturais pelo Homem, diversos impactos ambientais surgiram, devido a necessidade de utilizar esses recursos para a subsistência e progresso da sociedade, intensificando desta forma os impactos ao meio natural.

Deste modo, a natureza que estava em equilíbrio dinâmico, passou a ser modificada e degradada, provocando desequilíbrios que afetam drasticamente a vida da sociedade, como as inundações, movimentações de massas, degradação da qualidade das águas, dentre outros.

As modificações no ambiente não se dão apenas nas áreas urbanas, mas também nas áreas rurais. A mudança na cobertura vegetal atrelada às características naturais dos solos, podem causar processos erosivos, promovendo uma perda de solo, que por sua vez pode sedimentar no leito dos rios e estes podem vir a transbordar em períodos de grande precipitação, provocando inundações (TUCCI, 2007).

Torna-se importante a análise integrada do ambiente, de modo que possam ser planejadas as intervenções antrópicas com o objetivo de reduzir os impactos sob os recursos naturais. Neste contexto, tem-se o estudo das fragilidades ambientais, que permite relacionar os diferentes componentes do ambiente com às ações antrópicas. A fragilidade ambiental considera, portanto, a fragilidade potencial e a fragilidade emergente. A fragilidade potencial é dada pelas características naturais dos ambientes e a fragilidade emergente considera as alterações sobre o ambiente natural, provocada pelas atividades antrópicas (MEGIATO, 2011; ROSS, 1994).

Através de modelos matemáticos, é possível simular as inter-relações dos diferentes processos ambientais e, como resultado desta modelagem, obter o mapa ou carta de fragilidade ambiental. Com o mapeamento da fragilidade

ambiental é possível realizar uma análise conjunta dos atributos antrópicos, físicos e bióticos em função de seus níveis de fragilidade, estimando também as potencialidades do meio ambiente; indicando assim as áreas favoráveis, bem como as desfavoráveis à sua ocupação (CARMO et al., 2011; KAWAKUBO et al., 2005; FUSHITA et al., 2010; VITTE; MELLO, 2013).

Desta forma, conhecendo as fragilidades e potencialidades de cada estado, município, bacia hidrográfica ou qualquer outra unidade, é possível realizar o planejamento do uso e ocupação do solo e a consequente tomada de decisão, favorecendo a compreensão das dinâmicas da relação homem-natureza (SPÖRL, 2001).

Tendo ciência de que o município de Pelotas, objeto de estudo, vem sofrendo intensas modificações por interferências antrópicas, decorrentes de ações que visam o desenvolvimento econômico, e que ocasionam alterações nas suas condições naturais, provocadas pelas diversas coberturas e uso da terra, principalmente em Áreas de Preservação Permanente (APP) (CECCONELLO, 2017), torna-se essencial o planejamento territorial e ambiental. Vale ressaltar que a agricultura, pecuária, extração de areia, pesca e lazer são outras atividades antrópicas que potencializam a degradação ambiental no município de Pelotas.

Ademais, inexistem estudos de fragilidade ambiental para o município de Pelotas que contemple diferentes elementos antrópicos e não apenas os elementos naturais, como o considerado por exemplo no Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE). Este ZEE está sendo elaborado para o Rio Grande do Sul pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado (SEMA/RS) e leva em consideração apenas as características intrínsecas do município para assim determinar suas fragilidades, deste modo, este trabalho busca fornecer subsídios para uma análise integrada do ambiente através do cruzamento de diferentes planos de informação sobre o ambiente antrópico e natural do município.

No entanto, no Brasil, muitos estudos têm sido realizados, utilizando adaptações dos modelos consagrados de Ross (1994) e Crepani et al. (2001), como por exemplo, os estudos de Corte et al. (2015), Cruz et al. (2017), Macedo et al. (2018), Manfré et al. (2012). Outros têm criado novos índices de fragilidade ambiental utilizando um número grande de componentes ambientais como os trabalhos de Nguyen et al. (2016), Sahoo, Dhar e Kar (2016), Liou, Nguyen e Li

(2017). Portanto, não há um limite para o número de variáveis a serem utilizadas nos modelos para determinação da fragilidade ambiental, porém, sabe-se que quanto mais elementos interagirem entre si, melhor será o resultado do mapeamento das fragilidades na região estudada.

Embora o número de elementos não seja fixado, há necessidade de se determinar a ponderação que cada elemento irá receber no modelo. Para isso, muitas técnicas multicritério têm surgido para definir os pesos dos elementos para o mapeamento das fragilidades, como a lógica Fuzzy (LIU et al, 2017), a Análise Hierárquica de Processos (CORTE et al., 2015; NGUYEN et al., 2016; PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012; SAHOO; DHAR; KAR, 2016), análise de componentes principais (ZOU; YOSHINO, 2017; NANDY et al., 2015), dentre outros. A Análise Hierárquica de Processos (AHP) se baseia na comparação pareada, por importância relativa (pesos), probabilidade ou preferências entre dois critérios e foi proposta por Saaty (1977).

Frente ao exposto, este estudo objetivou mapear a fragilidade ambiental do município de Pelotas/RS utilizando a Análise Hierárquica de Processos.

## **2 OBJETIVOS E HIPÓTESES**

### **2.1 Objetivo Geral**

Mapear a fragilidade ambiental do município de Pelotas/RS, utilizando a análise hierárquica de processos (AHP) para ponderação dos elementos ambientais.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar o levantamento das características físicas relativas à litologia, declividade, tipos de solos, contaminação das águas subterrâneas e pluviosidade do município de Pelotas/RS;

- Elaborar o mapa de fragilidade emergente do município de Pelotas/RS considerando os aspectos: uso e cobertura da terra, as áreas de preservação permanente, as condições de saneamento, inundação e erosão;

- Ponderar cada um dos elementos ambientais que irá compor o modelo para determinar a fragilidade ambiental do município de Pelotas/RS através da Análise Multicritério.

### **2.3 Hipóteses**

O município de Pelotas apresenta áreas de alta fragilidade ambiental, de modo que, estas devem ser mapeadas para auxiliar o poder público na tomada de decisão.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Análise integrada do ambiente**

O meio ambiente é compreendido como um sistema aberto de fluxo constante de matéria e energia, que permite a combinação dinâmica dos diferentes elementos naturais e antrópicos (CUNHA; BACANI; AYACH, 2013; ROSS, 1994; TRICART, 1977).

Todavia, seu equilíbrio ambiental, segundo Spörl (2001), é facilmente alterado pelas diversas atividades antrópicas sob os diferentes componentes da natureza, promovendo um estado de desequilíbrio que pode ser classificado como temporário ou permanente (TRICART, 1977).

Pode-se dizer que até o início da Revolução Industrial, a natureza permanecia em equilíbrio dinâmico, onde as alterações ambientais ocorriam de maneira gradativa, sendo decorrentes apenas dos processos naturais como a precipitação e a erosão, mantendo-o assim estável (CECCONELLO, 2017).

A partir da Revolução Industrial houve um aumento na extração dos recursos naturais, intensificando a degradação ambiental, de modo que o equilíbrio dinâmico do ambiente fosse rompido. Esse momento histórico também provocou uma migração da população rural para as cidades. A população rural buscava novas oportunidades de vida, promovendo então o êxodo rural e este, conseqüentemente deu origem ao processo de urbanização.

À medida em que a população se tornava urbana, iniciaram-se também os problemas decorrentes das ocupações de áreas mais afastadas dos centros urbanos, as chamadas “periferias”. E estas áreas eram, geralmente, caracterizadas pelas péssimas condições sanitárias, sem nenhuma infraestrutura para habitação. Desta forma, os processos de ocupação de áreas irregulares se iniciaram nas cidades da Europa e à medida que os demais países do globo passaram a se desenvolver,

também experimentavam problemas de ocupação de áreas de risco ou impróprias.

É pertinente salientar que o crescimento urbano favorece a ocupação de áreas de risco, ou seja, próximas às encostas de morros, planícies de inundação, dentre outros (TUCCI; BERTONI, 2003).

Outra questão a se considerar é que a urbanização provoca um aumento nas áreas de impermeabilização do solo decorrentes da pavimentação das vias públicas (TUCCI, 2012; POLETO, 2014), além de aumentar a geração de esgotos domésticos e de resíduos sólidos que acabam muitas vezes sendo destinados de modo inadequado, e se depositando nas redes de drenagem das cidades. Esta disposição final inadequada favorece o acúmulo destes resíduos nas tubulações de esgoto e de águas pluviais, que com a precipitação são carregados para pontos mais baixos da rede de drenagem, entupindo as mesmas, provocando enchentes e com elas a transmissão de doenças de veiculação hídrica (TUCCI, 2012; SILVA et al., 2014).

Portanto, torna-se necessária a análise integrada do ambiente, pois qualquer alteração realizada em um componente ambiental, afeta os demais componentes, resultando em um desequilíbrio ambiental. Sendo assim, é possível inferir de acordo com Delamare (2017), que os estudos ambientais embasados na integração dos componentes do ambiente, permitem que sejam analisados os impactos ambientais, potencialidades e fragilidades dos recursos naturais.

Desta forma, para a análise do ambiente de forma integrada faz-se uso de ferramentas capazes de representar e inter-relacionar os diferentes componentes do ambiente, de forma a auxiliar na compreensão da realidade e para, a partir desta, minimizar os impactos ambientais.

### **3.2 Planejamento territorial e ambiental**

O crescimento urbano trouxe sérios problemas às cidades, principalmente os relacionados ao saneamento básico, poluição, intensificação e ocupação de áreas de interesse ambiental, falta de moradia e favelização, aumento das áreas de risco, além do desemprego e economia informal que trouxeram consigo a necessidade de instrumentos jurídicos de controle mais restritivos na questão do uso e ocupação da terra (CECCONELLO, 2017). Esses são alguns dos motivos pelos quais se torna fundamental o planejamento e a gestão do território, evitando o crescimento

desordenado das cidades e os impactos negativos na esfera social e ambiental (ALBANO, 2013).

Os impactos ambientais decorrentes da interação entre natureza e sociedade evidenciam a importância de se realizar o planejamento dos múltiplos usos e ocupações do espaço, pois a partir da compreensão dos impactos aos recursos naturais causados pelas atividades humanas, torna-se possível propor medidas de utilização dos recursos naturais, considerando as potencialidades e as fragilidades do ambiente.

De acordo com Franco (2010) para o entendimento dos processos dinâmicos que ocorrem entre o ambiente natural e as atividades humanas, se faz necessária a realização de estudos ambientais envolvendo os diferentes componentes do ambiente (aspectos físicos, químicos e biológicos), bem como a interação destes aspectos naturais com os de interação antrópica.

Sendo assim, o planejamento territorial tem o objetivo de simular os efeitos das ações antrópicas sobre o território ao longo do tempo e do espaço, utilizando-se de conhecimentos aprofundados sobre as características do meio ambiente, com o propósito de identificar as áreas mais próprias para ocupação (SILVA, 2007).

Para Vitte (2015) o planejamento territorial como ferramenta de apoio a gestão ambiental busca equilibrar os efeitos da expansão do território e do crescimento populacional sobre os recursos naturais.

De acordo com Nogueira (2015) a proposta do planejamento territorial e ambiental é proporcionar uma ordenação adequada da região, município ou estado, buscando a equidade social, garantindo a preservação dos recursos naturais e promovendo a melhoria na qualidade de vida da população. Ou seja, o planejamento territorial e ambiental determinam os modelos de ocupação e utilização do espaço físico, por isso, se faz necessário que cada município e região conheçam suas fragilidades e potencialidades, de modo que estabeleçam de maneira racional e equilibrada as condições ideais para o seu desenvolvimento, preservando o meio ambiente e garantindo a qualidade de vida às futuras gerações (ALBANO, 2013).

Os estudos de planejamento territorial e ambiental vêm sendo largamente utilizados em diversas esferas, tanto nas esferas das unidades estaduais, distritais e municipais, bem como em escala de bacias hidrográficas (SANTOS, 2007).

Independentemente da unidade de estudo, o planejamento territorial e

ambiental servem para compreender os diferentes aspectos dinâmicos que ocorrem no ambiente natural relacionando e interligando-os à ação antrópica (CUNHA; BACANI; AYACH, 2013).

Conforme Ignácio et al. (2016), o Governo Federal conjuntamente com os estados e municípios devem elaborar as políticas de planejamento e gestão do território respeitando as especificidades de cada região, bem como estimulando a integração das ações de modo a diminuir as desigualdades do país.

Cabe destacar que, no ano de 1979, foi proposta a Lei Federal nº 6.766 (BRASIL, 1979) que dispõe sobre o parcelamento do solo e dá outras providências. Esta surgiu da necessidade de organizar o território brasileiro diante do caos em que estavam as cidades, devido ao crescente processo de urbanização e, conseqüentemente, do crescimento urbano em que consistia o país na década de 70.

Esta lei, no seu Art. 3º, parágrafo único, define as áreas em que é proibido o parcelamento do solo para fins urbanos, de modo a garantir a preservação dos recursos naturais. Portanto, em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas; em terrenos que tenham sido aterrados com material nocivo à saúde pública, sem que sejam previamente saneados; em áreas de preservação ecológica ou naquelas onde a poluição impeça condições sanitárias suportáveis, até a sua correção, não devem ser ocupados.

Porém, devido à crescente expansão urbana que o Brasil vivenciava na época, estas áreas estavam sendo ocupadas de maneira inadequada, propiciando a formação das periferias.

Tendo em vista a necessidade assim de garantir a preservação do meio ambiente, diante do acelerado crescimento urbano e do conseqüente desordenamento territorial do país, foi criada a Lei Federal nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), que dispõem sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências.

A Lei Federal nº 6.938/1981 definiu em seu Art. 9º o zoneamento ambiental como instrumento da PNMA. O zoneamento deve realizar a análise integrada do ambiente, favorecendo o entendimento das causas e efeitos das inter-relações dos componentes ambientais. Sendo assim, o zoneamento ambiental é uma ferramenta

que favorece o planejamento das atividades antrópicas sobre os recursos naturais, reduzindo os impactos ao meio ambiente.

O zoneamento ambiental definido pela Lei Federal nº 6.938/1981 (BRASIL, 1981), e que vem sendo mais utilizado no Brasil, é o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) regulamentado pelo Decreto nº 4.297/2002 (BRASIL, 2002). Sendo que o principal objetivo do ZEE é organizar, de forma vinculada, as ações e decisões de todos os que utilizam dos recursos naturais, assegurando a plena manutenção do capital e dos serviços ambientais dos ecossistemas (BRASIL, 2002).

No processo de divisão espacial das atividades econômicas, o ZEE leva em consideração a importância ecológica, fragilidades e potencialidades das diferentes regiões do Brasil, estabelecendo vedações, restrições e alternativas de uso e ocupação do território, determinando, em alguns casos que as atividades incompatíveis com o local sejam realocadas (MMA, 2017).

Assim sendo, o zoneamento ambiental serve como um instrumento de defesa ambiental, que acompanhado do planejamento territorial, através do plano diretor, assume importante papel na promoção da qualidade de vida da população (SILVA, 2007).

Para se determinar as zonas mais indicadas ou menos indicadas, o zoneamento ambiental faz uso de técnicas cartográficas, como a modelagem espacial e o sensoriamento remoto que auxiliam na identificação e compreensão dos diversos componentes ambientais em determinada região, através da confecção de mapeamentos temáticos, como por exemplo, o mapeamento das fragilidades ambientais.

A partir do cruzamento de informações como as de hidrologia, litologia, usos e cobertura da terra, precipitação, etc., pode-se criar produtos cartográficos que permitirão a análise das inter-relações, de modo que seja possível se estabelecer um uso mais sustentável para o ambiente (DELAMARE, 2017).

### **3.3 Geotecnologias como ferramenta para análise integrada do ambiente**

É possível obter um estudo integrado da paisagem à medida que compreendemos como ocorrem as dinâmicas entre os elementos da natureza,

considerando nula a ação do homem e de como estas ações alteram o sistema natural (MEGIATO, 2011; POLETO, 2014).

Desta forma, o planejamento territorial não deve ser um planejamento único, deve levar em consideração todas as atividades existentes no território, considerando os diferentes enfoques de cada atividade como: social, econômico, cultural e ambiental, respeitando as características locais (SILVA, 2007).

Sendo assim, o planejamento territorial e ambiental são processos complexos, exigindo ferramentas capazes de realizar a junção de todas as informações e dados referentes à área de estudo (SHUKLA; KHIRE; GEDAM, 2014; XU; MIN, 2013).

Neste contexto, pode-se fazer uso das geotecnologias uma vez que estas permitem o manuseio dos diferentes dados relativos as características naturais e antrópicas, de modo prático, agregando várias camadas de informações em um único projeto (FITZ, 2008; JENSEN, 2011; MIRANDA, 2015).

As técnicas de Geoprocessamento, como por exemplo os Sistemas de Informações Geográficas - SIG's, são exemplos de Geotecnologias aplicada aos estudos ambientais, sendo importantes ferramentas para subsidiar as análises e ações relativas ao planejamento ambiental (CENTENO, 2009; JAYALAKSHMI; VELAPPAN, 2015; SHUKLA; KHIRE; GEDAM, 2014).

O SIG torna possível a descrição de determinados fenômenos e/ou ambientes, de modo que permite apontar os locais mais vulneráveis e/ou frágeis destes ambientes, pois eles são capazes de trabalhar matematicamente as informações alfanuméricas e espaciais relacionadas às diferentes áreas, onde é possível coletar, armazenar, recuperar, transformar e apresentar os dados espaciais de interesse, contribuindo para a tomada de decisão (WRUBLACK, 2012).

As ferramentas de estatística auxiliam na integração dos diferentes atributos naturais e antrópicos existentes na paisagem. Essas ferramentas utilizadas através de um SIG, permitem realizar análises complexas, assim como integrar dados de diversas fontes e além disso tornam possível associar outros dados, não espaciais, para aumentar a capacidade de análise, permitindo a geração de informações de alta qualidade e precisão, possibilitando a criação de um banco de dados espaciais, onde pode-se armazenar, consultar, exibir, alterar e excluir informações georreferenciadas a qualquer momento (CUNHA; BACANI; AYACH, 2013; DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2005; GOUVEIA et al., 2015). Sendo assim, para o mapeamento das

potencialidades e fragilidades do ambiente torna-se indispensável o uso das geotecnologias.

### **3.4 Conceitos de vulnerabilidade ambiental e fragilidade ambiental**

No meio científico muitos trabalhos têm considerado o conceito de fragilidade ambiental e vulnerabilidade ambiental como sinônimos (MILANEZI; PEREIRA, 2016), pois não há um consenso científico sobre os conceitos de vulnerabilidade e fragilidade ambiental. Todavia os próximos dois tópicos discorrerão sobre estas definições.

#### **3.4.1 Vulnerabilidade ambiental**

A vulnerabilidade ambiental, pode ser compreendida como uma condição intrínseca de cada região, sendo necessário considerar a persistência (o quanto um sistema que sofre uma perturbação, se afasta do equilíbrio) e da resiliência (capacidade que um sistema tem em retornar ao equilíbrio após a perturbação) (SANTOS, 2007).

Lourenço et al. (2013), reafirmam esta definição, ao relatar que a vulnerabilidade ambiental pode ser entendida como a capacidade ou a incapacidade do meio natural em resistir e/ou em recuperar-se, após sofrer uma perturbação decorrente de ações antrópicas.

Já Liu et al. (2017), entendem a vulnerabilidade como sendo o grau em que um sistema, subsistema ou componente do sistema provavelmente sofrerá devido à exposição a um perigo, ou a uma perturbação decorrente das atividades antrópicas.

Zang et al. (2017) vai além ao conceituar a vulnerabilidade ambiental como função do grau em que o sistema ecológico está exposto às ameaças antrópicas, sua sensibilidade e capacidade adaptativa. 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 a longo prazo. A capacidade adaptativa é a habilidade do sistema de se ajustar após um dano ocorrido.

Em suma, a vulnerabilidade ambiental está atrelada a interação entre a magnitude, o tipo do evento que é induzido pelas atividades antrópicas e as características intrínsecas dos componentes naturais.

### **3.4.2 Fragilidade ambiental**

Quando um ambiente é explorado além de sua capacidade, um desequilíbrio estrutural é iniciado e vários tipos de danos começam a aparecer, como deslizamentos de terra, inundações, erosão, entre outros.

Estas explorações promovidas pela sociedade, causam as mudanças no ambiente natural, resultando em profundas transformações na estrutura e funcionamento dos sistemas ambientais. Segundo Rodrigues et al. (2018) as alterações no ambiente ocorrem conforme o grau de desenvolvimento da sociedade, desencadeando adaptações nos sistemas ambientais para que esses possam se adequar a essas mudanças.

Segundo Gimenes e Filho (2013) a fragilidade de um ambiente pode ser entendida como a desestabilização de um equilíbrio dinâmico preexistente. Ross (1994) declara que a fragilidade do ambiente é uma proposta de investigação cujo princípio básico é definir os diferentes níveis de fragilidade dos ambientes naturais, modificados ou não pelas atividades antropogênicas.

Frente ao exposto, a fragilidade ambiental pode ser então compreendida como sendo a susceptibilidade do sistema em sofrer alterações, associando suas características intrínsecas (tipo de solo, declividade, litologia, etc.) às características extrínsecas, (ações antrópicas e uso do solo) (FUSHITA et al., 2010; LEANDRO, 2013; OLIVEIRA et al., 2012; SPÖRL, 2007).

O estudo da fragilidade ambiental deve, portanto, levar em consideração tanto a fragilidade potencial como a fragilidade emergente. A fragilidade potencial é dada pelas características naturais dos ambientes, através da geomorfologia, declividade do terreno, tipos de solo, hidrografia, de modo que o ambiente seja considerado como se não sofresse nenhuma interferência humana. Já a fragilidade emergente considera as alterações sobre o ambiente natural, provocada pelas atividades antrópicas (MEGIATO, 2011; ROSS, 1994).

A fragilidade global ou fragilidade ambiental considera as inter-relações entre as fragilidades potenciais e emergentes. Deste modo, a fragilidade ambiental tem a mesma conotação de vulnerabilidade ambiental, sendo uma definição muito utilizada em estudo ambientais.

Neste estudo, adotou-se o conceito de fragilidade ambiental como sendo à capacidade do ambiente em absorver impactos, principalmente relacionados as atividades antrópicas, considerando a inter-relação dos aspectos físicos e naturais das paisagens com os aspectos antrópicos, como os usos da terra.

### **3.5 Modelos de fragilidade ambiental**

O primeiro modelo de fragilidade ambiental proposto para o Brasil, foi elaborado em 1977 por Tricart. Para o autor, a natureza é considerada como sendo um sistema aberto que permanece em equilíbrio dinâmico até ser desestabilizado permanentemente ou temporariamente pelas ações antrópicas.

Deste modo, Tricart propôs um modelo de análise do ambiente natural através da classificação da paisagem em Unidades Ecodinâmicas, baseadas no balanço entre a morfogênese e a pedogênese. Estes podem estar em equilíbrio dinâmico e serem consideradas estáveis ou estar em desequilíbrio dinâmico e serem consideradas instáveis (CREPANI et al., 2001; RIBEIRO et al., 2016; ROSS, 1994).

Ross (1991), utilizando a concepção das unidades Ecodinâmicas de Tricart, classificou em cinco classes a fragilidade ambiental, a saber: muito fraca, fraca, média, forte e muito forte. Além disso, as fragilidades decorrentes das características naturais do ambiente passaram a ser chamadas de fragilidades potenciais e as decorrentes das características antrópicas, passaram a ser chamadas de fragilidades emergentes. Ross (1992) utilizou como variáveis a declividade, tipos de solos e o clima, portanto, modificou o modelo proposto inicialmente por Tricart (1977), incorporando um componente, o clima (FRANCO, 2010; LEANDRO, 2013; SPÖRL, 2007).

Em 1994 o autor supracitado propôs uma modificação do modelo anterior ao incorporar a variável uso e ocupação da terra, sendo este induzido por atividades antrópicas. Deste modo, a análise da fragilidade ambiental proposta por Ross buscava realizar o estudo integrado de atributos como: a declividade, o tipo de solo, o clima e o uso e ocupação da terra que permitiram obter cartas temáticas, que diante dos

diferentes estados de equilíbrio e desequilíbrio que o ambiente está submetido, Ross (1994) sistematizou em uma hierarquia nominal de fragilidade representadas por códigos: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5) (CARMO et al., 2011; LEANDRO, 2013; OLIVEIRA et al., 2012; SPÖRL, 2007).

Já Crepani et al. (2001) em seus estudos sobre fragilidade ambiental, consideravam as Unidades Territoriais Básicas, estas como sendo entidades geográficas que contém atributos ambientais que permitem diferenciá-la de suas vizinhas, podendo ser divididas em duas categorias, “unidades de paisagem natural” e “unidades de ação antrópica” (SPÖR, 2007). As variáveis utilizadas no modelo proposto por Crepani et al. (2001) foram: declividade, tipo de solos, uso e ocupação da terra, clima e litologia.

Segundo o modelo supracitado, cada unidade básica recebe uma pontuação de fragilidade, que, varia de 1 a 3, sendo que as unidades mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 1 e as mais vulneráveis ou frágeis estarão próximas de 3 (SPÖR, 2007). Porém, considera-se que todas as variáveis neste modelo apresentam a mesma importância, pois para todas é dado o mesmo peso para definir o grau de fragilidade global.

A metodologia proposta por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) utilizam as mesmas variáveis, porém no modelo de Crepani et al. (2001) foi inserido o elemento litologia. As ponderações entre os modelos foram distintas para a obtenção da fragilidade ambiental. Na metodologia de Ross (1994), a variável relevo apresenta maior significância, enquanto que para Crepani et al. (2001) todas as variáveis apresentavam a mesma ponderação.

Os estudos realizados por Spör no ano de 2007, buscaram comparar os modelos propostos por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) propondo a substituição da ponderação empírica dos elementos ou variáveis, através das Redes Neurais.

Para o treinamento das Redes Neurais, a autora criou um banco de dados com a opinião de vários especialistas de diferentes áreas do conhecimento, visando obter um padrão de avaliação de cada especialista quanto à fragilidade ambiental. Os resultados encontrados pela autora, indicam que é possível modelar o padrão de avaliação dos especialistas através das redes neurais, que conferem ao modelo menor subjetividade na ponderação dos elementos ambientais.

Em 2013, Leandro propôs uma nova metodologia para a determinação do índice de fragilidade ambiental inserindo ao modelo proposto por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) duas novas variáveis: existência de Áreas de Preservação Permanente e Ocupação Humana. Para ponderar os elementos ambientais do modelo proposto, a autora realizou uma série de testes com variações nos pesos e posterior visualização dos resultados obtidos nos mapas de fragilidade ambiental, considerando a capacidade do modelo em identificar as áreas conhecidas de fragilidade ambiental para a Bacia do Rio Iraí.

Na Tabela 1 pode-se observar as variáveis utilizadas nos modelos de Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Leandro (2013).

Tabela 1. Elementos ambientais considerados em cada modelo de Fragilidade Ambiental proposto por Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Leandro (2013)

Elementos Ambientais	Modelos de Fragilidade Ambiental		
	Ross (1994)	Crepani et al. (2001)	Leandro (2013)
Declividade	X	X	X
Tipo de solos	X	X	X
Cobertura e Uso da terra	X	X	X
Clima	X	X	X
Litologia		X	X
Áreas de preservação Permanente			X
Ocupação humana			X

As ponderações para cada elemento ambiental, bem como os modelos de Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Leandro (2013) podem ser visualizados nas Equações 1, 2 e 3.

$$GFA_{ROSS} = 125*(C1-1) + 25*(C2-1) + 5*(C3-1) + 1*(C4-1) \quad (1)$$

$$GFA_{CREPANI} = 0,2*C1 + 0,2*C2 + 0,2*C3 + 0,2*C4 + 0,2*C5 \quad (2)$$

$$GFA_{LEANDRO} = 7*C1 + 1*C2 + 6*C3 + 1*C4 + 1*C5 + 5*C6 + 6*C7 \quad (3)$$

Onde:

GFA = grau de fragilidade ambiental

C1 = grau de fragilidade relativo à declividade do terreno

C2 = grau de fragilidade relativo ao tipo de solo

C3 = grau de fragilidade relativo à cobertura vegetal e uso do solo

C4 = grau de fragilidade relativo ao clima

C5 = grau de fragilidade relativo a litologia

C6 = grau de fragilidade relativo à ocupação humana

C7 = grau de fragilidade relativo à existência de mata ciliar.

Com relação aos modelos propostos e suas ponderações para os elementos ambientais, pode-se observar que no modelo proposto por Ross (1994) a ponderação dos elementos foi baseada no critério de que a variável declividade apresentava maior importância sobre as demais, deste modo, o autor definiu seu maior peso. Ross adotou o critério da fatorial de base cinco para determinar a ponderação dos elementos do modelo. Crepani et al. (2001) por outro lado, utilizaram o critério de que todas as variáveis apresentavam a mesma importância dentro do modelo, e para ponderar os elementos, considerou os cinco elementos como 100%, dando um peso de 20% a cada elemento que constitui o modelo.

Já Leandro (2013) considerou que a variável declividade era de maior importância dado que os modelos anteriores também a consideravam como a mais importante, seguido pelos elementos cobertura vegetal e uso do solo, existência de mata ciliar em segundo, a ocupação humana em terceiro e em quarto grau de importância, as variáveis tipo de solo, litologia e clima, porém, para ponderação dos elementos a autora utilizou uma escala de 1 a 7, dando peso 7 ao elemento de maior importância no modelo e 1 ao de menor. Segundo Leandro (2013) a ponderação dos componentes ambientais se deu após uma série de testes com variações nos pesos e visualização dos mapas de fragilidade gerados, considerando capacidade do modelo demarcar ou não de áreas conhecidas de risco ambiental dentro da Bacia do Rio Iraí.

O modelo proposto por Leandro (2013), permitiu identificar áreas mais detalhadas que apresentavam um maior índice de fragilidade ambiental que a metodologia de Ross (1994) e Crepani et al. (2001), pois estes modelos são mais generalistas e também consideram apenas um elemento antrópico, de modo que o

modelo proposto por Leandro (2013) se mostra mais adequado para o planejamento e gestão territorial e ambiental da região estudada, provavelmente por apresentar uma inter-relação maior entre os componentes ambientais decorrente do número maior de variáveis analisadas.

No Brasil, muitos estudos têm sido realizados, utilizando adaptações dos modelos de Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Spörl (2007) como nos trabalhos de Corte et al. (2015), Cruz et al. (2017) e Manfré et al. (2012), na qual os autores modificaram um dos componentes ambientais que integram os modelos anteriores.

Outros estudos têm criado novos índices de fragilidade ambiental utilizando um número grande de componentes ambientais. Nos estudos de Nguyen et al. (2016) e Nguyen e Liou (2019) os autores criaram um índice de fragilidade utilizando dezesseis componentes ambientais para um rio na Província de Thua Thien Hue no Vietnã utilizando a metodologia AHP para ponderação dos elementos ambientais. Já nos estudos de Liou, Nguyen e Li (2017) foram utilizados doze componentes para a mesma região.

Liu et al. (2017) utilizaram dezessete componentes para determinar a fragilidade ambiental da Região de Sanjiangyuan na China utilizando a lógica Fuzzy. Por conseguinte, Sahoo, Dhar e Kar (2016) utilizaram treze componentes para criar um índice de fragilidade para a região de Odisha na Índia utilizando a metodologia AHP.

Zoua e Yoshinoba (2016) criaram um índice de fragilidade para a região de Daxing'anling na China utilizando também treze componentes ambientais, porém, utilizaram a Análise de Componentes Principais (ACP) para ponderação dos componentes.

Já Macedo et al. (2018) utilizaram oito componentes para estudar a fragilidade ambiental em duas bacias hidrográficas no Brasil através da metodologia AHP. Nandy et al. (2015) utilizaram cinco componentes para criar um índice de fragilidade para o parque nacional do Himalaia, na Índia, utilizando a AHP.

Portanto, não há regras gerais para selecionar o número de variáveis que são necessárias para avaliar a fragilidade ambiental. Porém, já há um consenso científico de que quanto maior o número de variáveis a serem consideradas nos modelos, melhor será a análise das inter-relações entre os diferentes componentes ambientais.

É preciso ainda utilizar ou desenvolver uma maneira confiável de realizar as ponderações de cada elemento/componente que integram os modelos, para que se possa tentar representar os diferentes cenários de forma mais realista possível.

Sendo assim, a Análise Multicritério (AMC) tem sido muito utilizada como ferramenta para auxiliar à tomada de decisão quanto à importância que uma variável ou elemento têm sobre o outro e com isso, permite obter a ponderação dos elementos de forma mais clara, objetiva e confiável.

### **3.6 Análise multicritério (AMC) como ferramenta de tomada de decisão**

A tomada de decisão está presente diariamente em nossas vidas, seja para decidir com que roupa vamos sair para o trabalho, qual o meio de transporte que utilizaremos para chegar até a escola, qual a melhor ração para os animais de estimação, dentre tantas outras decisões simples e rotineiras. Sem perceber acabamos por analisar as diversas alternativas e compará-las entre si, com o objetivo de encontrar a melhor solução para nossas atividades.

A Análise Multicritério pode ser compreendida, segundo Chakhar e Mousseau (2007), como um conjunto de métodos matemáticos que possibilitam a comparação entre alternativas divergentes através de múltiplos critérios. Segundo Briozo e Musetti (2016), a utilização da metodologia de Análise Multicritério apresenta-se como uma alternativa viável para a tomada de decisão, pois não há decisões que sejam totalmente perfeitas sob os critérios analisados, portanto, é necessário que cada pesquisador escolha a melhor alternativa possível.

De acordo com Valadares (2017), pode-se medir, avaliar e adotar critérios para a tomada de decisão, após submetê-los a uma análise multicritério, sendo que estes devem estar inter-relacionados ao problema a ser solucionado, ao passo que é estipulado um peso para cada critério com o propósito de quantificar sua importância.

Atualmente há possibilidade de se combinar as técnicas de multicritério aos Sistemas de Informações Geográficas, pois a tentativa de se compreender as inter-relações entre os diferentes elementos ambientais, nada mais é do que tentar representar o mundo real de maneira mais simples, através da escolha dos aspectos mais importantes quando se busca responder como ocorrem estas correlações (GOMES, 2015).

Deste modo, podemos compreender a integração entre a análise multicritério e SIGs como dependente de três fatores: a tecnologia disponível (hardware e software), critérios, parâmetros que estão envolvidos no evento a ser modelado e o que queremos de fato modelar.

Segundo estudos de Moreira, Câmara e Almeida Filho (2001) a tomada de decisão é realizada buscando sempre a racionalidade, baseada em critérios objetivos para o julgamento das alternativas existentes para obter a resposta ao problema inicial. Sendo assim, cinco etapas devem ser seguidas para que seja possível escolher a melhor alternativa baseada na metodologia de Tomada de Decisão.

A primeira etapa é definir qual é o problema que se deseja solucionar; a segunda etapa é a coleta de dados, nesta etapa busca-se realizar um diagnóstico e análise da situação e descobrir em que contexto o problema identificado está inserido; a terceira etapa é escolher as possíveis alternativas para solucionar o problema e conseqüentemente o critério que será utilizado para a escolha da melhor alternativa; na quarta etapa é necessário traçar diferentes cenários para cada alternativa como forma de prever o resultado e deve-se colocar as alternativas em ordem de prioridade e na quinta etapa busca-se avaliar as alternativas entre si, para que seja possível escolher qual delas é a ideal (GOMES, 2015; MOREIRA; CÂMARA; ALMEIDA FILHO, 2001; VALADARES, 2017). A Figura 1 exemplifica as etapas para tomada de decisão.

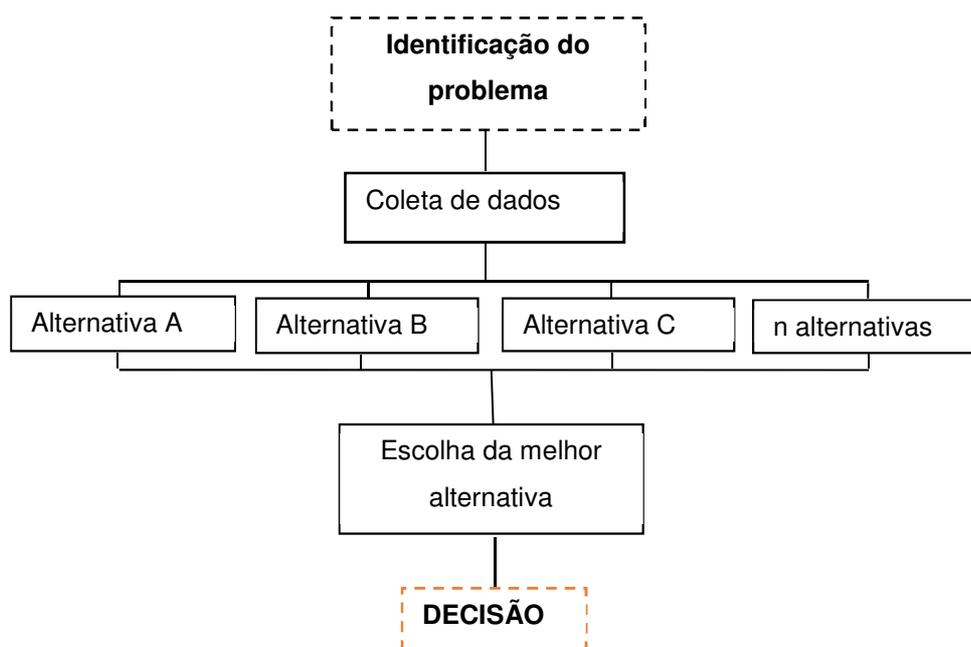


Figura 1: Etapas do processo de tomada de decisão.

Dentre os métodos multicritérios utilizados para os estudos de fragilidade ambiental, a Análise Hierárquica de Processos também conhecida como Processo Analítico Hierárquico (AHP) é um dos métodos que têm se mostrado adequado para auxiliar na tomada de decisão e que melhor tem definido os pesos ou a ponderação dos critérios adotados (ANH et al., 2014; GOMES, 2015, NEVES; CAMANHOS, 2015; LIOU, NGUYEN, LI, 2017).

De acordo com estudos de Musakwa et al. (2014), a AHP foi proposta por Saaty em 1977, sendo um modelo linear ponderado (modelo que permite a aplicação de notas aos fatores), no qual baseia-se na comparação pareada, por importância relativa (pesos), probabilidade ou preferências entre dois critérios.

Para construir a Matriz de Comparação Pareada, utiliza-se dos pesos estabelecidos por Saaty (1977), seguindo a ordem de importância apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Escala proposta por Saaty (1977) para hierarquização dos critérios.

Intensidade de Importância	Definição
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Mesma importância
3	Importância moderada
5	Importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância extremamente forte
2,4,6,8	Valores intermediários

Neste processo de comparações pareadas, um problema complexo, como o caso da determinação das fragilidades ambientais, pode tornar-se simples ao se avaliar pequenas partes e posteriormente integrá-las à solução do problema inicial (REZENDE; MARQUES; OLIVEIRA, 2017).

A AHP, ao realizar a comparação pareada entre os componentes ambientais, considera as diferentes influências que cada componente exerce sobre todo o ambiente. Deste modo, o método apresenta grande vantagem de agrupar em uma

única análise, um grande número de elementos ambientais (PINESE JÚNIOR; RODRIGUES, 2012).

Após construída a matriz de comparação e realizada a comparação entre os elementos deve-se verificar a consistência dos resultados obtidos. Para a verificação do resultado final da matriz é realizado o cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC).

Para o cálculo do IC é necessário verificar se o valor máximo ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) do autovalor  $\lambda$  está próximo do número de elementos ( $n$ ) utilizado para o cálculo, conforme a Equação 4.

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{w_i} \quad (4)$$

Onde:

[ $A_w$ ] é a matriz resultante do produto de comparação pareada pela matriz dos pesos a serem processados ( $w_i$ ).

Uma boa estimativa dos coeficientes da matriz implica um  $\lambda_{\text{máx}}$  mais próximo de  $n$ . Esse desvio de consistência é medido pelo índice de Consistência (IC) conforme a Equação 5.

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Após os cálculos dos pesos de cada fator, é necessário avaliar a aceitabilidade ou a Razão de Consistência (RC). Para isso, é preciso usar o valor do Índice Randômico (IR), que é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem “ $n$ ” estabelecida pelo *Oak Ridge National Laboratory*, EUA, fornecido de acordo com o número de indicadores utilizados para o cálculo AHP (Tabela 3).

Tabela 3: Valores do Índice Randômico para matrizes quadradas de ordem  $n$ .

Nº de variáveis	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Índice Randômico	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1977)

Depois de calculado o IR, pode ser calculado o RC. A consistência da matriz é calculada através da Razão de Consistência (RC) que varia de 0 (zero) a 1 (um), sendo que valores mais próximos de 0 indicam consistência e próximos a 1, inconsistência no processo de julgamento dos critérios. Segundo Saaty (1977), a RC deve apresentar valor menor que 0,1 (10%) e pode ser calculada conforme a Equação 6.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (6)$$

Resumindo a metodologia AHP pode ser dividida em seis etapas conforme demonstra a Figura 2.

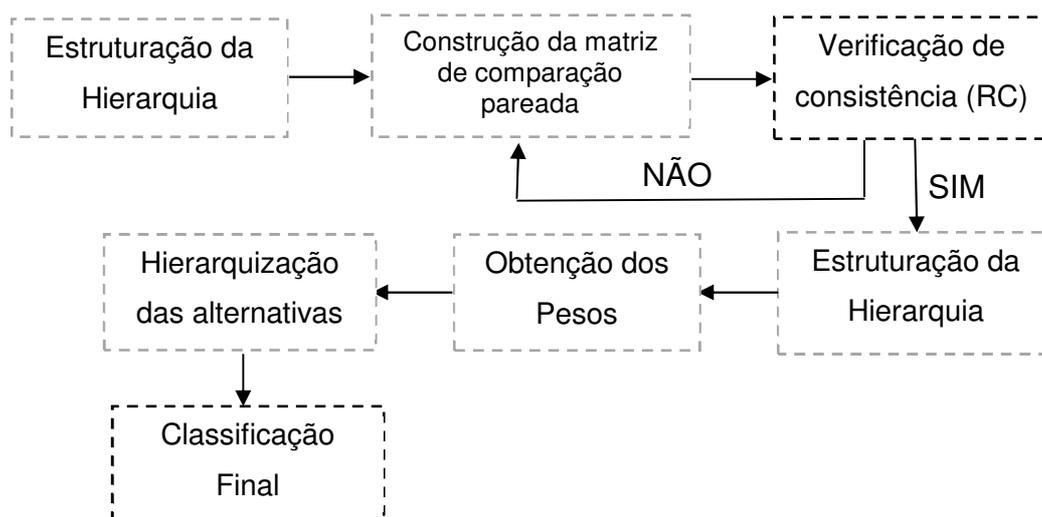


Figura 2: Representação gráfica da metodologia AHP.  
Fonte: Adaptação de Pinese Júnior e Rodrigues (2012)

Na etapa da verificação das consistências é verificada a qualidade da atribuição de pesos pelo pesquisador, e se esta etapa não for satisfeita o processo deve retornar à etapa anterior até que se alcance a consistência necessária ao processamento.

Neste contexto, visando a obtenção do grau de fragilidade ambiental do município de Pelotas, utilizou-se as Geotecnologias através dos Sistemas de Informações Geográficas e da técnica de Análise Hierárquica de Processos.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

O município de Pelotas faz fronteira com os municípios de Turuçu ao Norte; Canguçu e Morro Redondo a Oeste; a Laguna dos Patos a Leste; e com o município de Rio Grande e Capão do Leão ao Sul; como pode ser observado na Figura 3.

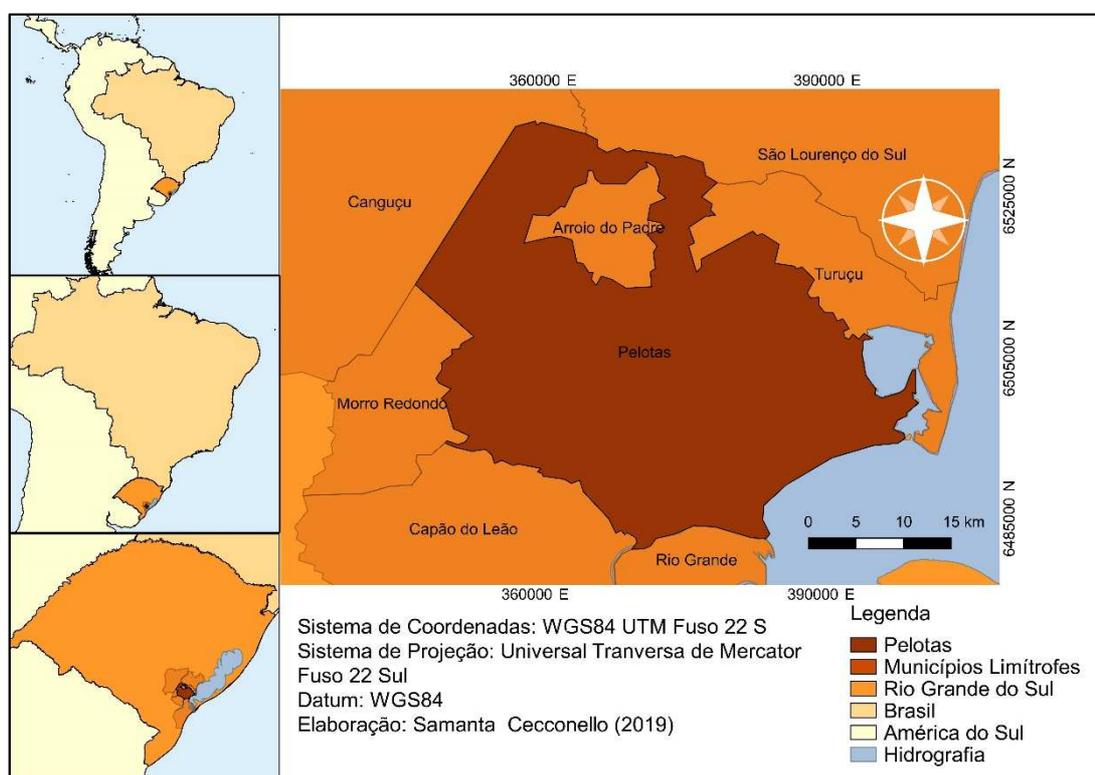


Figura 3: Localização do município de Pelotas/RS.

A cidade de Pelotas está situada sobre a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, rodeada pela Laguna dos Patos e o Canal São Gonçalo. O município apresenta uma área territorial de 1.610,09 Km<sup>2</sup> e a população no ano de 2016 foi estimada em 343.651 habitantes (IBGE, 2017).

Como o município de Pelotas está rodeado por importantes recursos hídricos, a presença de praia lacustre e de áreas arenosas são outras características litorâneas do município, que está situado entre as coordenadas 31°46'19" de latitude Sul e 52° 20'19" de longitude Oeste. Portanto, a grande quantidade de recursos hídricos no município interfere no clima da região e na probabilidade de sofrer inundações.

De acordo com a classificação climática de Köppen, Pelotas é classificada como subtropical, com temperatura média anual de 17,8°C e umidade relativa do ar em torno de 84% (PELOTAS, 2013).

Segundo a Prefeitura Municipal de Pelotas, o município apresenta sua economia baseada na produção Agrícola Familiar onde os principais produtos são tomate, batata-doce, fumo e pêssego. O município ainda apresenta grandes áreas de cultivo de arroz irrigado, soja e criação de gado. As indústrias presentes no município são de beneficiamento de arroz, fabricação de conservas de frutas, abatedouros e produção de ração animal (PELOTAS, 2013).

Outra característica de Pelotas é a grande concentração de Instituições Ensino que contribuem em média com 28 mil estudantes matriculados, movimentando a economia da cidade (CECCONELLO, 2017).

Deste modo, o município apresenta elevada dinâmica entre os diferentes elementos ambientais que compõem o município, necessitando de estudos que integrem estes diferentes elementos.

## **4.2 Fonte e tratamento dos dados**

Neste trabalho foram utilizados dados com estrutura vetorial e matricial, assim como, dados alfanuméricos. As estruturas vetoriais são as feições do terreno ou fenômenos representados através de pontos, linhas ou polígonos associados a coordenadas geodésicas que as identificam no espaço.

Esses dados, além das características de localização, ainda possuem características e relacionamentos topológicos (proximidades, contiguidades e ligações viárias). Já os dados matriciais ou raster, utilizam células (pixels), que são distribuídos ordenadamente em linhas e colunas com um atributo de interesse associado ao pixel.

Os dados alfanuméricos utilizados neste estudo foram oriundos de informações obtidas em planilhas eletrônicas, dos quais posteriormente foram convertidas em arquivos vetoriais e matriciais. Os documentos cartográficos utilizados estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Fonte de dados alfanuméricos e vetoriais utilizados neste estudo.

<b>Dados</b>	<b>Escala</b>	<b>Fonte</b>
Dados altimétricos (curvas de nível e pontos cotados)	1:50.000	Hasenack e Weber (2010)
Dados altimétricos (curvas de nível e pontos cotados)	1:2.000	Mapa Urbano (MUB) da Prefeitura Municipal de Pelotas – Planimetria (2016)
Tipos de solos	1:50.000	Cunha, Silveira e Severo (2006)
Uso e cobertura da terra	1:50.000	Cecconello (2017)
Dados de hidrografia	1:50.000	Hasenack e Weber (2010)
Litologia	1:250.000	IBGE (2018)
Áreas de Preservação Permanente (APPs)	1:50.000	Cecconello (2017)
Saneamento (água, esgoto e resíduos sólidos)	1:2.000	Prefeitura Municipal de Pelotas (2018a, b, c)
Pluviosidade	-----	Agência Nacional das Águas (2018)
Água subterrânea	-----	Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (2017)

Como os dados utilizados nessa pesquisa foram oriundos de diversas fontes; que possuem escalas, resoluções espaciais e estruturas diferentes, foi necessário transformá-los e padronizá-los. Deste modo, foi possível associar dados quantitativos e qualitativos. Sendo assim, a escala de trabalho adotada para este estudo foi de 1:50.000 com uma resolução espacial de 30m, devido à classificação do uso e cobertura da terra ter sido realizada por Cecconello (2017) com imagens Landsat 7 e pela maioria dos dados utilizados neste estudo, apresentarem a escala 1:50.000.

Todos os dados, independente do sistema de referência inicial, foram alocados no banco de dados em um sistema de referência único. Empregou-se o *Datum WGS-84 (World Geodetic System)*, e os dados foram projetados no Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 22 Sul, pois este é um sistema de coordenadas cartesianas que permite a análise quantitativa, uma vez

que essa projeção cartográfica, através de transformações baseadas em funções matemáticas, permite definir um relacionamento matemático entre posições referidas à superfície terrestre e posições referidas ao mapa de forma única. E além disso, a opção pela projeção UTM deve-se a todo o mapeamento sistemático do Brasil ser elaborado nesse sistema de projeção.

O software utilizado para o tratamento dos dados e modelagem dos componentes ambientais foi o ArcGis 10.6 Licença Estudantil, software de SIG, desenvolvido pela ESRI.

### **4.3 Etapa de geoprocessamento para mapeamento da fragilidade ambiental**

O procedimento teórico-operacional, descrito neste item, baseia-se na adaptação de metodologias propostas por Ross (1994); Creprani et al. (2001) e Leandro (2013) que, por sua vez, estão fundamentadas no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977).

Na seção 4.3.1 são apresentados os elementos ambientais que foram utilizados na determinação da fragilidade ambiental. Sequencialmente na seção 4.3.2 é apresentada a forma que os mapas temáticos de cada elemento ambiental foram elaborados. Na seção 4.3.3 dispõem-se da ponderação dos elementos ambientais através da metodologia AHP para determinação da fragilidade ambiental.

#### **4.3.1 Seleção dos elementos ambientais que irão compor o modelo de fragilidade ambiental para o município de Pelotas**

Para compor o modelo que irá determinar a fragilidade ambiental para o município de Pelotas, foram adotados os componentes ambientais: declividade do terreno, litologia, tipos de solo, pluviosidade, uso e cobertura da terra, áreas de preservação permanente, saneamento (água, esgoto e resíduos sólidos), inundação, erosão e águas subterrâneas.

Portanto, considerou-se os elementos: litologia, tipo de solo, declividade do terreno, águas subterrâneas e pluviosidade como sendo componentes que independem das atividades antrópicas, que representam a fragilidade potencial.

Já os elementos: uso e cobertura da terra, APPs, inundação, erosão e saneamento como elementos de características extrínsecas que integram a fragilidade emergente.

Cabe destacar que a escolha por estes elementos se deu em virtude da disponibilidade dos dados, bem como, do levantamento bibliográfico sobre o tema. A Figura 4 demonstra o fluxograma para a determinação da fragilidade ambiental baseada nos dez componentes ambientais utilizados neste estudo.

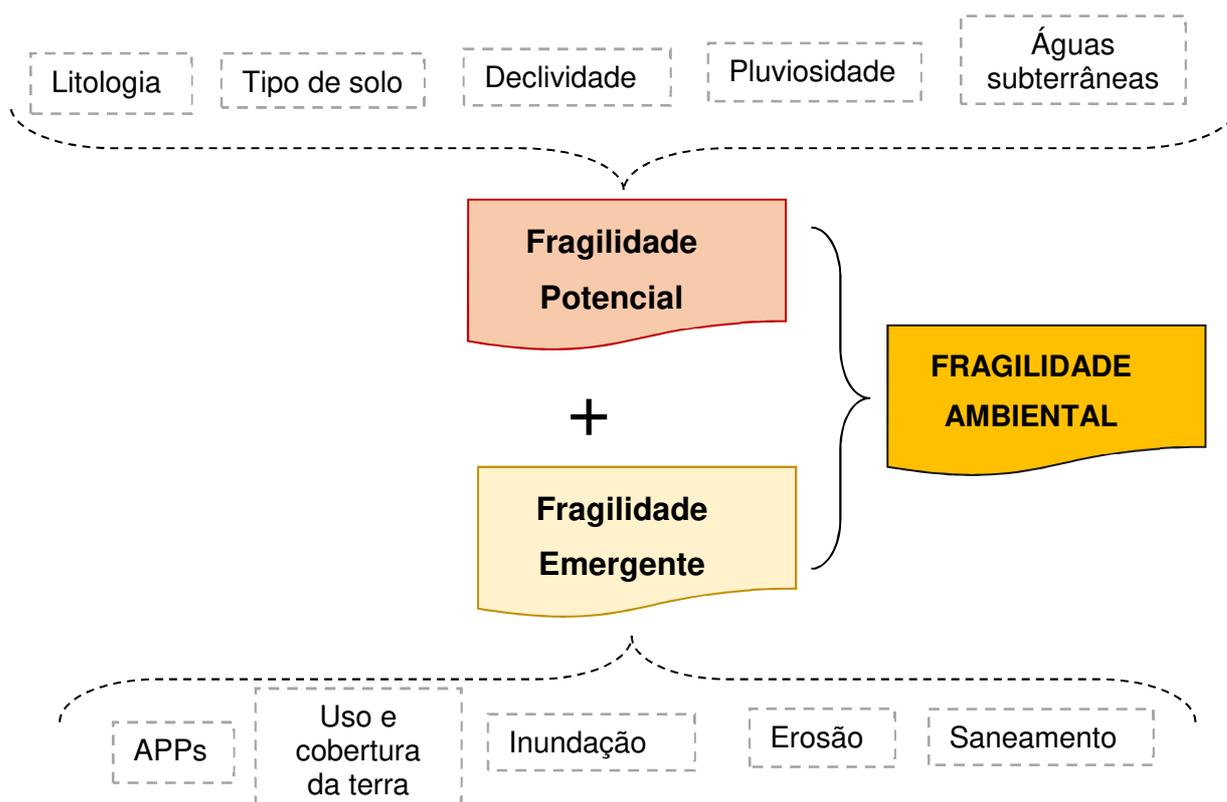


Figura 4: Elementos ambientais que compõe o modelo de fragilidade ambiental para o município de Pelotas/RS.

#### 4.3.2 Mapeamento e análise dos elementos ambientais

Foram inicialmente elaborados os mapas temáticos para os componentes ambientais supracitados, tendo como base suas respectivas metodologias. Cada componente ambiental teve suas características classificadas quanto à escala de fragilidade de 1 a 5, conforme foi proposto por Ross (1994), onde 5 representa o valor de maior influência quanto à fragilidade e 1, o menor valor, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Classificação quanto ao grau de fragilidade proposta por Ross (1994).

Valor	Fragilidade
1	Muito baixa
2	Baixa
3	Média
4	Alta
5	Muito alta

A metodologia utilizada para o mapeamento dos elementos ambientais que constituíram o modelo de fragilidade ambiental para o município de Pelotas, assim como sua classificação será apresentada a seguir.

#### 4.3.2.1 Mapa de altitude

O mapa de altitude ou hipsométrico consiste na representação da elevação de um terreno através de cores. As cores utilizadas possuem uma equivalência com a elevação do terreno, por isso costuma-se utilizar de um sistema de graduação onde as cores frias (ex.: verde) representam uma baixa altitude e as cores quentes (ex.: laranja, vermelho) representam uma alta altitude do relevo (SANTOS; LOUZADA; EUGÊNIO, 2010).

Para a elaboração do mapa hipsométrico foram utilizadas informações das curvas de nível e pontos cotados adquiridos da Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul, escala 1:50.000 (HASENACK; WEBER, 2010) e do levantamento planialtimétrico para o município de Pelotas em escala 1:2.000 (PELOTAS, 2016). As curvas de nível apresentaram espaçamento de 20m nos dados de 1:50.000 e de 1m na escala 1:2.000.

Estes dados foram interpolados a partir de uma Rede Triangular Irregular (TIN)<sup>1</sup>, na qual a superfície é convertida em triângulos conectados pelos dados de altimetria, produzindo assim um mapa em três dimensões da área. Através deste foi confeccionado um Modelo Digital de Elevação (MDE)<sup>2</sup>. Após a geração do MDE foi utilizada a ferramenta Fill<sup>3</sup> para remover as depressões espúrias, gerando o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente - MDEHC.

<sup>1</sup> *Toolboxes: 3D Analyst → Create/Modify TIN → Create TIN From Features.*

<sup>2</sup> *Toolboxes: 3D Analyst → Convert → TIN to Raster.*

<sup>3</sup> *Toolboxes: Spatial Analyst Tools → Hydrology → Fill*

Com o MDEHC gerado, utilizou-se a ferramenta Reclassify<sup>4</sup> para reclassificar a altitude em cinco classes, pois são as classes de fragilidade proposta por Ross (1994). Utilizou-se o critério de intervalos iguais para definir os valores de altitude que corresponderiam a cada classe de fragilidade. Esta técnica baseia-se no fatiamento da série de dados da variável em classes de valores com larguras iguais. A largura de cada classe é medida em unidades de valores da própria variável (FERREIRA, 2014). Como foram escolhidas cinco classes, a amplitude dos dados foi dividida pelo número de classes definida, resultando em intervalos de 80 metros como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação da altitude e cores utilizadas no mapa hipsométrico para o município de Pelotas

Intervalos de Altitude	Valor	RGB <sup>5</sup>
0m a 80m	1	56/168/0
81m a 160m	2	139/209/0
161m a 240m	3	255/255/0
241m a 320m	4	255/128/0
321m a 400m	5	255/0/0

#### 4.3.2.2 Mapa de declividade

O mapa clinográfico consiste na interpretação gráfica do relevo de uma região e é expressa como a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância entre os mesmos. Para a elaboração do mapa de declividade foi utilizado o MDEHC gerado para o mapa hipsométrico. Na sequência, o MDEHC deu origem a declividade<sup>6</sup> e este, posteriormente foi reclassificado<sup>7</sup> utilizando-se os intervalos de classes propostos por Ross (1994) que podem ser verificados na Tabela 7, bem como as respectivas cores adotadas para cada intervalo de declividade.

<sup>4</sup> *Toolboxes*: Spatial Analyst → Reclass → Reclassify

<sup>5</sup> Sigla do sistema de cores aditivas formado pelas iniciais das cores em inglês *Red*, *Green* e *Blue* que é usado nos objetos que emitem luz como, por exemplo, os monitores de computador e televisão, as câmeras digitais, o *scanner*, entre outros.

<sup>6</sup> *Toolboxes*: Spatial Analyst → Surface Analysis → Slope.

<sup>7</sup> *Toolboxes*: Spatial Analyst → Reclass → Reclassify

Tabela 7: Classes para o critério declividade do terreno.

Intervalos de declividade	Forma de Relevo	Valor Fragilidade	Índice de Fragilidade Ambiental	RGB
0 a 3%	Plano	1	Muito Baixo	56/168/0
3 a 8%	Suavemente ondulado	2	Baixo	139/209/0
8 a 20%	Ondulado	3	Médio	255/255/0
20 a 45%	Fortemente ondulado	4	Alta	255/128/0
Acima de 45%	Montanhoso	5	Muito Alto	255/0/0

Adaptado de Ross (1994).

As ferramentas de reclassificação raster são utilizadas para reclassificar ou alterar os valores das células para valores alternativos usando diferentes métodos. Pode-se reclassificar um valor de cada vez ou grupos de valores de uma vez com base em critérios, tais como intervalos específicos (por exemplo, agrupar os valores em intervalos de 20); ou por área (por exemplo, o grupo de valores em 20 grupos que contêm o mesmo número de células). A ferramenta é projetada para permitir que sejam alterados facilmente valores em um raster de entrada para os valores desejados de saída (SANTOS; LOUZADA; EUGÊNIO, 2010).

Por fim, realizou-se o recorte do Mapa de Declividade apenas para a área do município de Pelotas, utilizando a camada vetorial do município como máscara.

#### 4.3.2.3 Mapas de pluviosidade

Os dados de pluviosidade foram obtidos através das informações fornecidas pelo portal Hidroweb que é mantido pela Agência Nacional de Águas - ANA (ANA, 2018).

Foram utilizadas as estações pluviométricas cadastradas na Bacia Atlântico Sudeste e suas sub-bacias Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim e que apresentavam séries históricas de precipitação com no mínimo 20 anos, conforme sugerido por Lee e Heo (2011). Utilizando este critério, utilizou-se dados de 19 Estações Pluviométricas. Estas estações foram selecionadas de modo que fosse possível realizar a interpolação dos dados de precipitação média anual para Pelotas, pois o município apresenta apenas três estações pluviométricas de monitoramento, não sendo possível realizar a interpolação dos dados de precipitação de forma adequada.

Após a obtenção e compilação dos dados pluviométricos no portal da ANA, realizou-se a média mensal e anual de cada estação pluviométrica. A planilha eletrônica foi convertida<sup>8</sup> em arquivo vetorial (shapefile) para que fosse possível realizar a interpolação dos dados de precipitação.

Para realizar a interpolação do arquivo shapefile de pontos utilizou-se o método *Inverse Distance Weighting* (IDW)<sup>9</sup>, na qual realiza a estimativa da pluviosidade através da média da distância entre os pontos vizinhos, partindo da premissa que quanto maior a proximidade entre os pontos, mais parecidos eles são. Quando comparado aos pontos mais distantes, ou seja, para estimar valores dentro de uma determinada área de abrangência o IDW usará os valores amostrados, e à medida que ocorre um distanciamento entre os pontos e a área a ser estimada, a média decrescerá (JACOB; YOUNG, 2006).

Para a elaboração do mapa de fragilidade referente à pluviosidade, reclassificou-se<sup>10</sup> o arquivo interpolado conforme a metodologia de Ross (1994). Porém, de acordo com a metodologia proposta por Ross (1994), o mapa de fragilidade potencial da pluviosidade é denominado de mapa da fragilidade do clima, sendo este, determinado através da distribuição das precipitações ao longo do ano. Neste estudo, adotou-se a denominação de mapa de fragilidade de pluviosidade, porém a classificação seguiu a metodologia de Ross (1994). A Tabela 8 traz a classificação adotada para a obtenção do mapa referente a fragilidade.

---

<sup>8</sup> *Toolboxes*: Data Management Tool → Projections and Transformations → Convert Coordinate Notation.

<sup>9</sup> *Toolboxes* : Spacial Analyst Tool → Interpolation IDW → z-value field: media.

<sup>10</sup> *Toolboxes*: *Spatial Analyst Tool* → *Reclass* → *Reclassify*

Tabela 8: Classificação das fragilidades relacionadas com as características pluviométricas

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

Adaptado de ROSS (1994).

#### 4.3.2.4 Mapa do tipo de solos

Para o mapeamento dos tipos de solo, utilizou-se dados vetoriais disponibilizados pela EMBRAPA e gerados por Cunha, Silveira e Severo (2006), publicados no documento Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras, no mesmo ano. Este dado vetorial apresentava-se em uma escala 1:50.000. Primeiramente necessitou-se realizar a preparação dos dados vetoriais. Modificou-se a tabela de atributos do dado vetorial e acrescentou-se uma coluna de campo numérico com os valores das respectivas fragilidades de acordo com a metodologia de Ross (1994) e Leandro (2013) que pode ser visualizada na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação do grau de fragilidade quanto aos tipos de solos.

Tipo de Solos	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Latossolo Bruno, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e vermelho amarelo textura argilosa	1	Muito Baixo
Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa, Planossolos.	2	Baixo
Latossolo Vermelho amarelo, Argissolos, Alissolos textura média/argilosa	3	Médio
Cambissolos, Argissolos textura média/arenosa, Espodossolos	4	Alta
Neossolos, Gleissolos, Organossolos	5	Muito Alto

Adaptado de Ross (1994) e Leandro (2013)

Após esta etapa, procedeu-se a conversão do campo de valor da fragilidade no arquivo vetorial em arquivo raster<sup>11</sup>. Modificou-se o tamanho da célula do arquivo raster gerado para 30m.

#### 4.3.2.5 Mapa da litologia

Para o mapeamento da litologia, utilizou-se os dados vetoriais do levantamento hidrogeológico para o Brasil disponibilizados pelo IBGE (2018) em uma escala de 1:250.000. Primeiramente necessitou-se realizar a preparação dos dados, na qual foi modificada a tabela de atributos do dado vetorial e posteriormente este foi transformado em arquivo raster.

Para o processo de modificação da tabela de atributos, acrescentou-se uma coluna de campo numérico e classificou-se o campo litologia de acordo com a metodologia de Crepani et al. (2001) e Leandro (2013). Na Tabela 10 está apresentada a classificação da litologia baseado na metodologia de Crepani (2001) e Leandro (2013).

<sup>11</sup> *Toolboxes: System Toolboxes → Conversion Tools → To Raster → Feature to raster*

Tabela 10: Classificação do grau de fragilidade quanto à litologia.

Tipos de Rochas	Litologias	Valor	Classificação de Fragilidade
Metamórficas	Quartzitos ou mataquartzitos	1	Muito baixa
Ígneas	Riólito, Granito, Dacito		
Ígneas Intrusivas	Granodiorito, Granulitos		
Metamórficas	Migmatitos, Gnaisses		
Ígneas Intrusivas	Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	2	Baixa
Ígneas	Andesito, Diorito e Basalto		
Ígneas Intrusivas	Anortosito, Gabro, Peridotito		
Metamórficas	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita-xisto, Clorita xisto		
Ígneas e Metamórficas	Piroxenito, anfíbolito kimberlito, Dunito	3	Média
Metamórficas	Estaurolita xisto, Xistos granatíferos		
Ígneas	Homblenda, Tremolita, Actinolita xisto		
Metamórficas	Filito, Metassilito		
Metamórficas	Ardósia, Metargilito	4	Alta
Metamórficas	Mármore		
Sedimentares	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos		
Sedimentares	Conglomerados, Subgrauvacas		
Sedimentares	Grauvacas, Arcózios	5	Muito alta
Sedimentares	Siltitos, Argilitos		
Sedimentares	Folhetos		
Sedimentares	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos		
Sedimentares	Sedimentos inconsolidados: Aluviões, Colúvios, etc.		

Adaptado de Crepani et al. (2001) e Leandro (2013)

Após esta etapa, procedeu-se a conversão do arquivo vetorial em arquivo raster, conforme procedimento descrito para tipos de solo, com tamanho do pixel de 30m.

#### 4.3.2.6 Mapa de uso e cobertura da terra

O mapa de uso e cobertura da terra para o município de Pelotas utilizado neste estudo foi elaborado por Ceconello (2017) em uma escala 1:50.000 com base nas diferentes classes de uso e cobertura da terra, identificadas para o município no ano de 2015. Os valores de fragilidade relacionados às classes de uso e cobertura da terra (Tabela 11) foram atribuídos de acordo com os graus de proteção aos solos pela cobertura natural e cultivada, organizados por Ross

(1994), obedecendo deste modo às ordens decrescentes da capacidade de proteção.

Tabela 11: Classificação do grau de fragilidade quanto ao uso e cobertura do solo.

Uso e Ocupação da terra	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Floresta/ Matas naturais, Florestas com biodiversidade.	1	Muito baixa
Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagem cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivo de ciclo longo como o cacau	2	Baixa
Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sob-bosques de nativas	3	Média
Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre as ruas, culturas de ciclo curto (arroz, feijão, trigo, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento	4	Alta
Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas, áreas alagadas e corpos de água superficiais.	5	Muito alta

Adaptado de Ross (1994)

As classes definidas por Ceconello (2017) foram baseadas nas informações prévias da área de estudo, de modo que esta optou por escolher as principais coberturas e usos da terra para o município de Pelotas para o ano de 2015. Sendo elas:

a) Classe Área Antropizada/Área Urbana: englobou as coberturas referentes às áreas abertas construídas, complexos industriais, edificações e estradas, o que representa a expansão urbana (IBGE, 2013).

b) Classe Agricultura/Pastagem: foi caracterizada pelas áreas de uso para a produção de alimentos, fibras ou outras matérias-primas que podem ser

empregadas na indústria, sendo incluídas nesta categoria as lavouras temporárias, lavouras permanentes e pastagens.

c) Classe Vegetação Arbórea/Mata Nativa: congregam todas as formas de vegetação, tanto as de porte arbustivo e herbáceo como as florestais, incluindo-se aqui a silvicultura.

d) Classe Solo Exposto/Areia: incluem as “áreas descobertas”, referindo-se a afloramentos rochosos, praias, dunas e solo desnudo.

e) Classe Massa d` água: é representada pelos corpos hídricos, como lagos, lagoas, lagoas, canais, rios e reservatórios superficiais.

f) Classe Banhados/Áreas Alagadas: incluem as áreas de várzea, áreas encharcadas, ou seja, áreas que são cobertas por água em determinados períodos.

Primeiramente necessitou-se realizar a preparação dos dados, na qual foi modificada a tabela de atributos do dado vetorial e posteriormente este foi transformado em arquivo raster.

Após a obtenção do mapa em formato vetorial, procedeu-se à modificação da tabela de atributos, acrescentou-se uma coluna de campo numérico e classificou-se o campo dos usos e ocupações da terra de acordo com a metodologia de Ross (1994). Após esta etapa, procedeu-se à conversão<sup>12</sup> do arquivo vetorial em arquivo raster com célula de 30m.

#### **4.3.2.7 Mapa das Áreas de Preservação Permanente**

Para este estudo foi adotado o mapeamento das APPs realizada por Ceconello (2017) baseado nos critérios estabelecidos pelo novo Código Florestal Brasileiro - Lei Federal nº 12.651/2012 que dispõe a respeito das normas gerais sobre a proteção da vegetação, Áreas de Preservação Permanente (APPs). Foram mapeadas, áreas de APPs ao longo dos cursos d`água superficiais, em banhados e nascentes, conforme pode-se observar na Tabela 12.

Tabela 12: Delimitações das áreas de preservação permanente.

---

<sup>12</sup> *Toolboxes: System Toolboxes → Conversion Tools → To Raster → Feature to raster*

Área de Preservação Permanente	Critério para a delimitação/localização	Extensão da APP
	Largura do curso d'água (m)	Largura da faixa marginal de APP (m)
Ao longo dos cursos d'água	Até < 10	30
	10 a 50	50
	50 a 200	100
	200 a 600	200
	> 600	500
Nascentes ou olhos d'água	Área circular ao redor da nascente	Raio da circunferência mínimo 50 m
Banhados	-	largura mínima de 50 (cinquenta) metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado
Lagos e lagoas naturais	Área urbana	30
	Área rural com corpo d'água < 20 ha de Superfície	50
	Área rural com corpo d'água > 20 ha de Superfície	100

Fonte: Adaptado da Lei Federal nº 12.651/2012, Cecconello (2017).

As áreas de APPs são consideradas frágeis naturalmente, pois qualquer perturbação nestes locais, reflete negativamente sobre o ambiente, causando assim, mais impactos que em outras áreas.

No mapa de APPs em formato vetorial, foi modificada a tabela de atributos para inclusão dos valores das fragilidades para cada classe, conforme a metodologia proposta por Leandro (2013) (Tabela 13).

Tabela 13: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência das APPs.

Existência de Área de Preservação Permanente	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Áreas de APPs	5	Muito alta
Áreas que se distanciam até 250 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	4	Alta
Áreas que se distanciam até 300 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	3	Média
Áreas que se distanciam até 500 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	2	Baixa
Áreas que se distanciam acima de 500 metros das Áreas de Preservação Permanente	1	Muito baixa

Fonte: Adaptado de Leandro (2013).

Para definir os critérios de fragilidade ambiental para as APPs, considerou-se que as mesmas estão em áreas não consolidadas, considerando-se desta forma, mais protetiva.

Foram escolhidas as distâncias baseadas na máxima distância para a APP existente no município, que no caso é a APP do Canal São Gonçalo que apresenta uma distância de 200m.

Após a modificação da tabela de atributos e consequente inserção dos valores de fragilidade para cada dado, realizou-se a conversão do arquivo para o formato raster com 30m de tamanho de célula.

#### 4.3.2.8 Mapa de saneamento

Os mapas da fragilidade emergente relacionada ao saneamento foram gerados a partir da soma dos subcritérios: existência de rede de abastecimento de água; existência de rede coletora de esgotos e área abrangida pelo sistema domiciliar de coleta de resíduos sólidos urbanos - RSU. Entretanto para determinar os subcritérios água e esgotos, foi utilizada a base de dados do Mapeamento Urbano Básico do município de Pelotas, disponibilizado no formato shapefile pelo site da Prefeitura Municipal de Pelotas (PELOTAS, 2018a,b). Nele

estão contidos os lotes do município de Pelotas com dados das redes de água e esgoto.

Após a obtenção dos dados vetoriais contendo a rede de abastecimento de água e de esgoto, realizou-se a união das redes de água e de esgoto com o perímetro do município, de modo que, pudesse ser realizada a classificação da fragilidade através da inclusão de uma coluna de campo numérico na tabela de atributos dos respectivos arquivos vetoriais.

A classificação adotada para determinar o grau de fragilidade destes subcritérios pode ser observado nas Tabelas 14 e 15, respectivamente.

Tabela 14: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência de rede de abastecimento de água.

Redes de abastecimento de água	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Áreas onde existe rede pública de abastecimento de água	2	Baixa
Áreas onde não existe rede pública de abastecimento de água	5	Muito alta

Em áreas onde há rede de abastecimento de água, o valor de fragilidade ambiental foi considerado de peso 2, pois mesmo nas áreas onde há abastecimento de água, a mesma sofre interrupções na distribuição, o que provoca alteração na qualidade e quantidade de água fornecida à população, portanto, a fragilidade não poderia ser considerada muito baixa.

Tabela 15: Classificação do grau de fragilidade relacionado a existência de rede de coleta de esgotos.

Redes de coleta de esgotos	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Áreas onde existe rede pública de coleta de esgoto	2	Baixa
Áreas onde não existe rede pública de coleta de esgotos	5	Muito alta

Em áreas onde há rede coletora de esgotos, o valor de fragilidade ambiental foi definido com peso 2, pois mesmo nas áreas onde há rede coletora de esgotos, o mesmo apresenta baixa taxa de tratamento, o que impede que a fragilidade seja considerada como sendo muito baixa.

Para a determinação do subcritério coleta de resíduos sólidos, foi utilizado os dados vetoriais cedidos pelo Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas – SANEP (PELOTAS, 2018c) que indica que toda a área urbana e parte da zona

rural do município (estradas rurais) contam com a coleta domiciliar de resíduos sólidos.

Para este subcritério realizou-se um *buffer* de 30m nas estradas rurais, pois deste modo, a área atingida pela coleta domiciliar rural poderia ser calculada adequadamente, tendo em vista que o caminhão passa apenas nas estradas municipais rurais principais. Após a criação do *buffer*, foi realizada a união das estradas rurais com a área urbana do município. Posteriormente, realizou-se a classificação de acordo com a Tabela 16, na qual descreve a classificação do grau de fragilidade emergente para o subcritério área abrangida pelo sistema domiciliar de coleta de RSU.

Tabela 16: Classificação do grau de fragilidade relacionado as áreas abrangidas pelo sistema domiciliar de coleta de resíduos sólidos.

Redes de abastecimento de água	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Áreas onde existe coleta domiciliar de resíduos sólidos	2	Baixa
Áreas onde não existe coleta domiciliar de resíduos sólidos	5	Muito alta

Em áreas onde há coleta de resíduos sólidos, foi considerada fragilidade baixa (peso 2), pois a frequência de coleta não é diária, desta forma, pode haver acúmulo de resíduos em vias públicas, favorecendo a contaminação do solo e proliferação de vetores.

Após a classificação dos três subcritérios, realizou-se a conversão dos três arquivos vetoriais para o formato raster<sup>13</sup>. Para a geração do mapa de fragilidade relativo ao saneamento, utilizou-se a metodologia AHP para determinação dos pesos de cada critério (água, esgoto e resíduos sólidos). Utilizou-se o website AHP-OS (GOEPEL, 2018) para aplicação da análise multicritério que será detalhada posteriormente.

Após esta etapa utilizou-se a calculadora raster<sup>14</sup> para fazer a álgebra dos mapas, gerando o mapa de fragilidade relativo ao saneamento.

<sup>13</sup> Toolboxes: System Toolboxes → Conversion Tools → To Raster → Feature to raster

<sup>14</sup> Toolboxes: Spatial Analyst Tool → Raster Calculator

#### 4.3.2.9 Mapa de fragilidade natural à contaminação de aquíferos

A estimativa do índice de fragilidade natural à contaminação das águas subterrâneas do município de Pelotas/RS, foi realizada através da metodologia GOD (G - grau de confinamento; O – estratos de cobertura da zona saturada; D – profundidade do lençol freático, proposta por Foster et al. (2006). Para aplicação da metodologia GOD foi necessário obter informações referentes aos poços localizados na área de estudo tais como: o grau de confinamento do poço, o perfil litológico e a profundidade do nível estático. Dessa forma, estes dados foram obtidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) Serviço Geológico do Brasil para o município de Pelotas. Os dados foram compilados do site do SIAGAS e logo em seguida aplicou-se a metodologia GOD.

Cabe destacar que de acordo com as informações disponibilizadas no sítio do SIAGAS (2017), o Município de Pelotas apresenta 152 captações por poços tubulares cadastrados, porém, foram utilizados 100 poços, pois apresentavam todas as informações necessárias para aplicação do método GOD.

O primeiro parâmetro da metodologia GOD, “G” - Grau de confinamento, leva em consideração o tipo de aquífero, sendo atribuídos valores que variam entre 0 a 1,0.

O segundo parâmetro, “O” - Ocorrência de estratos de cobertura, classifica os estratos ou camadas acima da zona saturada do aquífero, em termos do grau de consolidação e caráter litológico, e são atribuídos valores que variam em uma escala de 0,4 a 1,0. Já o último parâmetro, “D” - Distância até o lençol freático representa o nível freático, isto é, a distância entre a boca do poço e o nível da água subterrânea, variando a escala deste parâmetro entre 0,6 a 1,0.

O índice de fragilidade do aquífero à contaminação é determinado pelo produto dos valores obtidos para cada um dos parâmetros, variando de 0,0 (fragilidade insignificante) até 1,0 (fragilidade extrema), conforme pode ser observado na Figura 5.

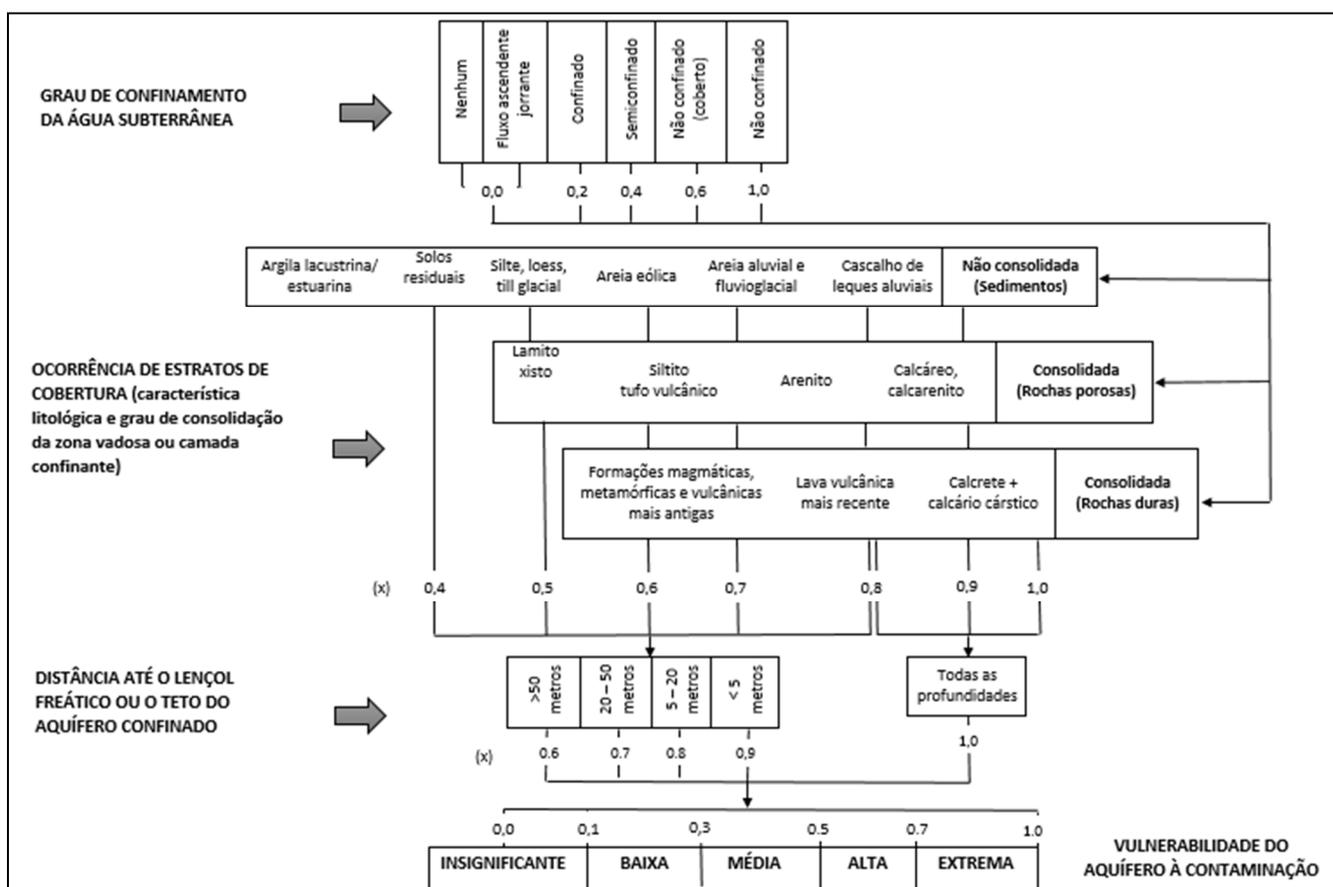


Figura 5: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero segundo o método de Foster et al. (2006).

De acordo com os dados obtidos, identificou-se os valores que corresponderiam a cada parâmetro. Para o grau de confinamento hidráulico do aquífero, atribuiu-se um valor de 0,6 para aquíferos não confinados coberto e valor 1,0 para aquíferos livres. Nota-se que quanto maior o valor atribuído ao dado, maior é a fragilidade.

Em seguida, foram especificadas as características do substrato que recobre a zona saturada do aquífero em termos de: (a) grau de consolidação e (b) litologia, assinalando um índice a estes parâmetros em uma escala de 0,4 a 0,9. Na área estudada foram encontrados granito, sianogranulitos, areia e argilas e areia aluvial, sendo que os pesos dados à litologia foram 0,6 para granito e sianogranulitos, 0,4 para areia e argila e 0,7 para areia aluvial. Já para a

profundidade do nível da água (nível estático) foi determinado um índice a este parâmetro em uma escala de 0,7 a 0,9, pois a profundidade variou de 0,1 a 50 metros.

Foi utilizada a krigagem ordinária como interpolador para prever o valor da variável fragilidade em um ponto não amostrado, conforme Yamamoto e Landim (2013).

Para realizar esta interpolação foi utilizada a extensão *Geoestatistical Analyst Tools* do software ArcGis 10.6, onde foram gerados os parâmetros patamar, alcance, efeito pepita, o modelo semivariográfico, o mapa de predição da vulnerabilidade e a validação cruzada realizada através do erro médio, do erro médio padronizado, do erro quadrático médio e do erro quadrático médio padronizado.

Cabe destacar que o Erro Médio (EM) é obtido através da Equação 7:

$$EM = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - y_i)}{N} \quad (7)$$

Onde:

$x_i$  = os valores observados para a  $i$ ésima amostra;

$y_i$  = os valores estimados através da krigagem ordinária para a  $i$ ésima amostra, e;

$N$  = número de observações.

Por conseguinte, o Erro Médio Padronizado (EMP) é descrito através da Equação 8:

$$EMP = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

Em que:

$S_i$  = Desvio-Padrão para a  $i$ ésima amostra, e;

$N$  = Número de Amostras.

Já o Erro Quadrático Médio (EQM) pode ser distinguido por meio da Equação 9:

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N} \quad (9)$$

Sendo que:

$x_i$  = os valores observados para a  $i$ ésima amostra;

$y_i$  = os valores estimados através da krigagem ordinária para a  $i$ ésima amostra, e;

$N$  = número de observações.

Por fim o Erro Quadrático Médio Padronizado através da Equação 10:

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (10)$$

Onde:

$x_i$  = os valores observados para a  $i$ ésima amostra;

$y_i$  = os valores estimados através da krigagem ordinária para a  $i$ ésima amostra, e;

$N$  = número de observações.

#### **4.3.2.10 Mapa da fragilidade à inundação**

O mapeamento da fragilidade à inundação, foi realizado selecionando-se os seguintes componentes ambientais: tipos de solo, uso e ocupação da terra, altitude e declividade. Estes componentes foram selecionados conforme metodologia proposta por Ladwig et al. (2017), Rezende, Marques e Oliveira (2017) e Santos, Louzada e Eugênio (2010). Sendo as justificativas para uso dos dados para compor o mapeamento da inundação:

- a) Altitude: quanto maior a altitude, menor a probabilidade de inundação para uma determinada região, devido à ação da gravidade que direciona a água para as regiões mais baixas.

b) Declividade: a declividade do terreno influencia diretamente no acúmulo de água. Áreas planas apresentam maiores probabilidades de sofrer inundação do que áreas escarpadas.

c) Uso e Ocupação da Terra: a forma de ocupação da terra influencia na infiltração e escoamento superficial da água. As áreas com maior impermeabilidade tendem a acumular mais água do que em solos com cobertura florestal.

d) Tipos de Solo: o tipo de solo reflete a capacidade de infiltração e escoamento superficial da água.

Os dados utilizados para determinação da fragilidade à inundação são os mesmos componentes obtidos nos critérios anteriores, porém os pesos destinados aos critérios altitude e declividade foram diferentes, conforme poderá ser observado nas Tabela 17, 18, 19 e 20.

Tabela 17: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério tipo de solo.

Tipo de Solos	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Latosolo Bruno, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e vermelho amarelo textura argilosa	1	Muito baixa
Latosolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa, Planossolos.	2	Baixa
Latosolo Vermelho amarelo, Argissolos, Alissolos textura média/argilosa	3	Média
Cambissolos, Argissolos textura média/arenosa, Espodossolos	4	Alta
Neossolos, Gleissolos, Organossolos	5	Muito alta

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 18: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério uso e ocupação da terra.

Uso e Ocupação da terra	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Floresta/ Matas naturais, Florestas com biodiversidade.	1	Muito baixa
Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagem cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivo de ciclo longo como o cacau	2	Baixa
Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sob-bosques de nativas	3	Média
Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre as ruas, culturas de ciclo curto (arroz, feijão, trigo, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento	4	Alta
Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas, áreas alagadas e corpos de água superficiais.	5	Muito alta

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 19: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério declividade.

Intervalos de declividade	Forma de Relevo	Valor Fragilidade	Índice de Fragilidade Ambiental	RGB
0 a 3%	Plano	5	Muito alta	255/0/0
3 a 8%	Suavemente ondulado	4	Alta	255/128/0
8 a 20%	Ondulado	3	Média	255/255/0
20 a 45%	Fortemente ondulado	2	Baixa	139/209/0
Acima de 45%	Montanhoso	1	Muito baixa	56/168/0

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 20: Classificação do grau de fragilidade à inundação relacionado ao critério altitude.

Intervalos de Altitude	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental	RGB
0m a 80m	5	Muito alta	255/0/0
81m a 160m	4	Alta	255/128/0
161m a 240	3	Média	255/255/0
241m a 320m	2	Baixa	139/209/0
Acima de 321m	1	Muito baixa	56/168/0

Os dados em formato raster de cada componente ambiental foram reclassificados<sup>15</sup> conforme os valores descritos nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

Para determinação dos pesos do modelo de fragilidade à inundação, utilizou-se da metodologia AHP aplicada através do website AHP-OS (GOEPEL, 2018). Após a definição da hierarquia de importância das variáveis, verificou-se o Razão de Consistência (RC), devendo ficar abaixo de 0,1.

De posse dos pesos para cada componente que integrará o modelo de inundação, realizou-se através da calculadora de campo<sup>16</sup>, a álgebra de mapas.

#### **4.3.2.11 Mapa de erosão**

A erosão é um processo natural causado pelas ações do intemperismo, nas quais provoca desagregação, transporte e deposição dos materiais, sejam eles constituídos por rochas ou solo (BONNA, 2011).

A estimativa da fragilidade à erosão para o município de Pelotas, foi adaptada à metodologia proposta por Silva e Machado (2014). Onde foram adotados os componentes ambientais: tipos de solo, uso e ocupação da terra, declividade, litologia e pluviosidade.

Sendo que as justificativas para a escolha dos elementos ambientais utilizados para compor o mapeamento da erosão de acordo com Flach (2017), encontram-se descritas nos itens abaixo.

a) Litologia: a natureza física e química das rochas interfere no intemperismo e conseqüentemente no processo de desagregação das partículas que irão se movimentar pelas encostas.

b) Declividade: característica importante para determinação do transporte dos sedimentos.

c) Tipos de solo: as características físicas como textura, permeabilidade e densidade dos diferentes tipos de solos, interferem na desagregação e no transporte de sedimentos.

---

<sup>15</sup> Toolboxes: Spatial Analyst Tool → Reclass → Reclassify

<sup>16</sup> Toolboxes: Spatial Analyst Tool → Raster Calculator

d) Uso e ocupação da terra: a cobertura vegetal é um fator determinante na manutenção das vertentes, de modo que controla o escoamento superficial e a infiltração de água. Ao remover a cobertura vegetal, favorece o desequilíbrio na dinâmica do relevo, favorecendo a desagregação e transporte de sedimentos.

e) Pluviosidade: é responsável por provocar a saturação do solo ou rocha, aumentando a desagregação de partículas e favorecendo a desestabilidade das encostas e aumento no transporte de sedimentos.

Portanto, os dados utilizados para determinação da fragilidade à erosão são os mesmos componentes obtidos nos critérios anteriores, utilizando os critérios de Ross (1994), Crepani et al (2001) e Leandro (2013) conforme poderá ser observado nas Tabela 21, 22, 23, 24 e 25.

Tabela 21: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério tipo de solo.

Tipo de Solos	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Latossolo Bruno, Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e vermelho amarelo textura argilosa	1	Muito baixa
Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa, Planossolos.	2	Baixo
Latossolo Vermelho amarelo, Argissolos, Alissolos textura média/argilosa	3	Médio
Cambissolos, Argissolos textura média/arenosa, Espodossolos	4	Alta
Neossolos, Gleissolos, Organossolos	5	Muito alta

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 22: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério uso e ocupação da terra

Uso e Ocupação da terra	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Floresta/ Matas naturais, Florestas com biodiversidade.	1	Muito baixa
Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagem cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivo de ciclo longo como o cacau	2	Baixa
Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/ terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sob-bosques de nativas	3	Média
Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre as ruas, culturas de ciclo curto (arroz, feijão, trigo, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento	4	Alta
Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas, áreas alagadas e corpos de água superficiais.	5	Muito alta

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 23: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério declividade.

Intervalos de declividade	Forma de Relevo	Valor Fragilidade	Índice de Fragilidade Ambiental	RGB
0 a 3%	Plano	1	Muito baixa	56/168/0
3 a 8%	Suavemente ondulado	2	Baixa	139/209/0
8 a 20%	Ondulado	3	Média	255/255/0
20 a 45%	Fortemente ondulado	4	Alta	255/128/0
Acima de 45%	Montanhoso	5	Muito Alta	255/0/0

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Tabela 24: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério litologia.

Tipos de Rochas	Litologias	Valor	Classificação de Fragilidade
Metamórficas Ígneas Ígneas Intrusivas Metamórficas	Quartzitos ou mataquartzitos Riólito, Granito, Dacito Granodiorito, Granulitos Migmatitos, Gnaisses	1	Muito baixa
Ígneas Intrusivas Ígneas Ígneas Intrusivas Metamórficas	Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito Andesito, Diorito e Basalto Anortosito, Gabro, Peridotito Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita-xisto, Clorita xisto	2	Baixa
Ígneas e Metamórficas Metamórficas Ígneas Metamórficas Metamórficas	Piroxenito, anfíbolito kimberlito, Dunito Estaurolita xisto, Xistos granatíferos Homblenda, Tremolita, Actinolita xisto Filito, Metassilito Ardósia, Metargilito	3	Média
Metamórficas Sedimentares Sedimentares Sedimentares	Mármore Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos Conglomerados, Subgrauvacas Grauvacas, Arcózios	4	Alta
Sedimentares Sedimentares Sedimentares Sedimentares	Siltitos, Argilitos Folhetos Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos Sedimentos inconsolidados: Aluviões, Colúvios, etc.	5	Muito alta

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001) e Leandro (2013).

Tabela 25: Classificação do grau de fragilidade à erosão relacionado ao critério pluviosidade.

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

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

Para determinação dos pesos estatísticos do modelo de fragilidade à erosão, utilizou-se da metodologia AHP aplicada através do website AHP-OS (GOEPEL, 2018). Após a definição da hierarquia de importância das variáveis, verificou-se o Razão de Consistência (RC), devendo ficar abaixo de 0,1.

De posse dos pesos para cada componente que integrará o modelo de erosão, realizou-se através da calculadora de campo<sup>17</sup>, a álgebra de mapas.

#### 4.3.3 Aplicação da AHP para determinação da fragilidade ambiental ou global

O mapa da fragilidade ambiental ou global foi o produto da sobreposição dos mapas de fragilidade potencial e emergente, obtidos por meio do cruzamento

<sup>17</sup> Toolboxes: Spatial Analyst Tool → Raster Calculator

espacial dos 10 (dez) elementos ambientais que compuseram o modelo, conforme a Figura 4.

Os elementos ambientais utilizados para compor a fragilidade ambiental do município de Pelotas foram preparados anteriormente, deste modo, já estavam em formato matricial. Sendo necessário apenas realizar o cruzamento das fragilidades potencial e emergente.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Com base nos procedimentos metodológicos descritos e aplicados para o desenvolvimento desta pesquisa, obteve-se mapas temáticos para cada um dos elementos ambientais que representam os aspectos físicos e antrópicos do município de Pelotas/RS.

Para o mapeamento e análise da fragilidade ambiental de Pelotas foi realizada a análise integrada do ambiente através da sobreposição dos diferentes aspectos físicos-antrópicos.

### **5.1 Mapeamento e caracterização dos elementos ambientais**

#### **5.1.1 Mapeamento da fragilidade quanto à altitude**

O município de Pelotas apresenta uma altitude que varia de 0,93 a 397 metros, apresentando maiores elevações na direção oeste e noroeste, região da Serra do Sudeste e menores elevações na direção leste e sudeste localizada na Planície Costeira. A altitude do município de Pelotas aumenta na direção do município de Canguçu e diminui na direção da Laguna dos Patos.

A zona urbana do município apresenta cota máxima de 29,3 metros localizada no bairro Três Vendas e no bairro Laranjal cota mínima de 0,93 metros, conforme dados do MUB de Pelotas (PELOTAS, 2016). A Figura 6 mostra o perfil topográfico no sentido noroeste-sudeste e o mapa hipsométrico para o município de Pelotas.

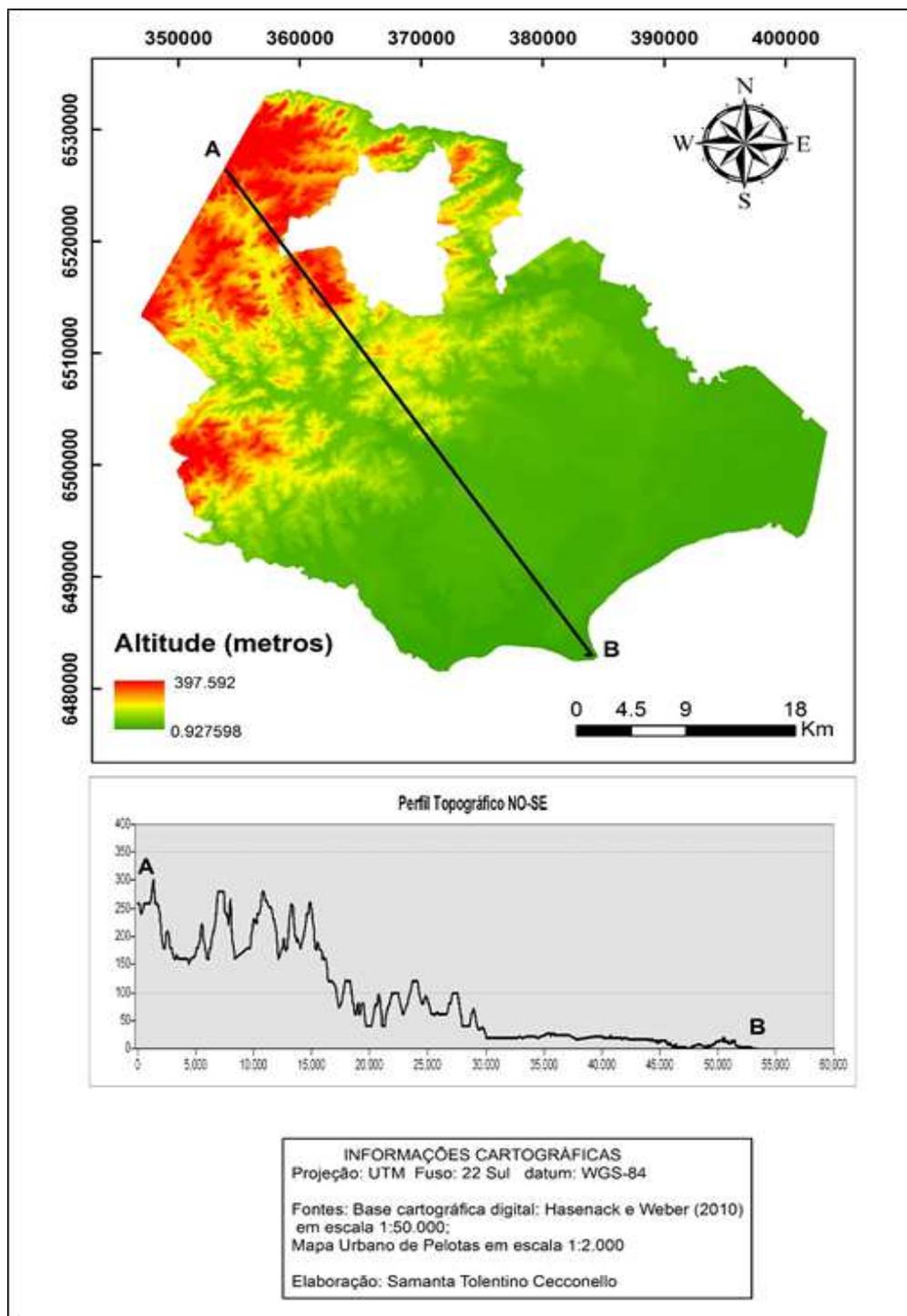


Figura 6: Mapa hipsométrico do município de Pelotas/RS e o perfil topográfico.

Como pode ser observado na Figura 6, o município apresenta extensa área com baixas altitudes. A altitude é um elemento importante da paisagem que deve ser levado em consideração para estudos de suscetibilidade à inundação e erosão, pois influenciam no transporte e acúmulo de sedimentos e água pela superfície (FLACH, 2017). Deste modo, a altitude é um elemento que pode influenciar a fragilidade à inundação no município de Pelotas, até mesmo porque,

a zona urbana da cidade se encontra em áreas de baixa altitude e próximas à mananciais superficiais.

### **5.1.2 Mapeamento da fragilidade quanto à declividade**

De acordo com o mapa clinográfico (Figura 7) é possível identificar uma área extensa de relevo plano, e áreas com declividade fortemente ondulada e montanhosa na parte noroeste do município, próximo à divisa com o município de Canguçu. As áreas de maior declividade apresentam-se próximas de nascentes de cursos d'água, o que pode influenciar negativamente na velocidade do escoamento superficial em períodos de precipitação intensa, pois favorece aos processos de desagregação e transporte de sedimentos, favorecendo deste modo, a deposição dos sedimentos em áreas planas (SILVA, 2009).

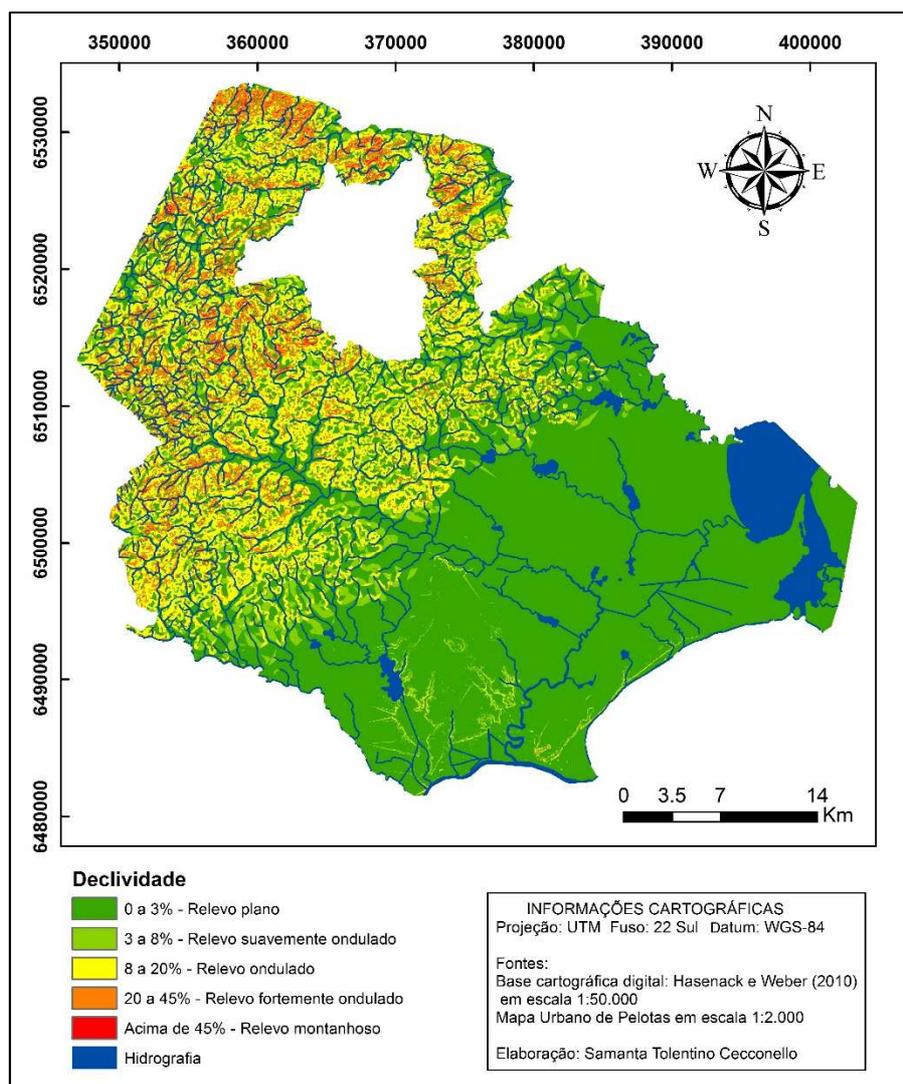


Figura 7: Mapa clinográfico do município de Pelotas/RS.

A seguir, a Tabela 26 mostra as áreas de declividade e os valores de área de cada intervalo de classe na área estudada.

Tabela 26: Áreas de declividade e percentual de área ocupada pelas classes de declividade para o município de Pelotas.

Intervalos de declividade	Forma de Relevo	Área ocupada	
		(Km <sup>2</sup> )	(%)
0 a 3%	Plano	1043.90	64.83
3 a 8%	Suavemente ondulado	116.43	7.23
8 a 20%	Ondulado	315.82	19.62
20 a 45%	Fortemente ondulado	123.62	7.68
Acima de 45%	Montanhoso	10.31	0.64
Área total de Pelotas		1610.09	100.00

De acordo com a Tabela 26, mais da metade do município apresenta relevo plano, apresentando grande probabilidade de sofrer inundação. Esta probabilidade ainda pode ser intensificada pela presença de cursos d'água superficiais e de ser uma área de depósito de sedimentos, o que eleva as chances destes sofrerem assoreamento, vindo a causar inundações.

Observa-se, portanto, que a declividade é um elemento ambiental inerente às características naturais e que pode favorecer os processos naturais de inundação e erosão, e estes por sua vez podem ser intensificados pelas ações antrópicas (VIEIRA, 2018).

### **5.1.3 Mapeamento da fragilidade quanto à pluviosidade**

Nos estudos de fragilidade ambiental o elemento clima (ROSS, 1994), leva principalmente em consideração as temperaturas e as precipitações. Porém, na metodologia proposta por Ross (1994) o clima é analisado sob o regime pluviométrico, deste modo, adotou-se o elemento pluviosidade.

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas para a interpolação e obtenção da precipitação para o município de Pelotas.

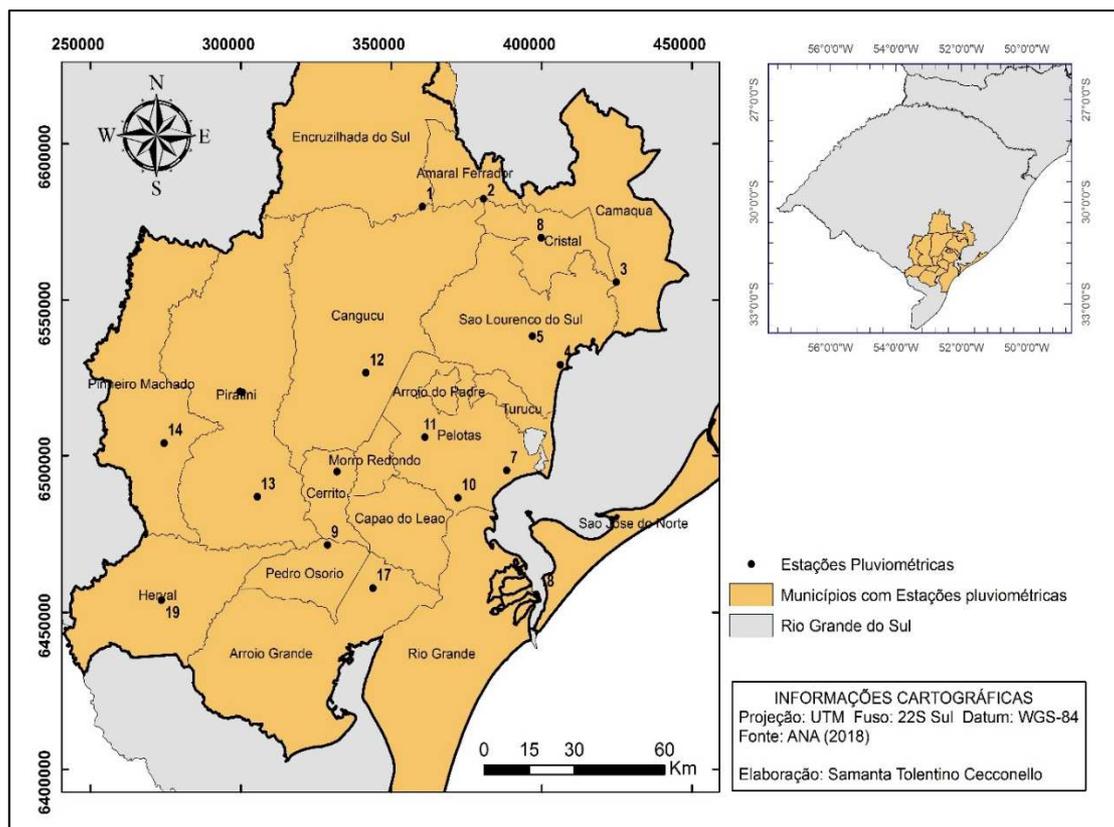


Figura 8: Distribuição espacial das estações pluviométricas da Bacia Atlântico, trecho Sudeste.

Na Tabela 27 estão apresentadas as características das estações pluviométricas utilizadas para esta pesquisa.

Tabela 27: Estações pluviométricas e suas características como: código, nome, coordenadas, série histórica de dados e altimetria

Estação	Cód. ANA	Período de dados	Anos	Municípios	Altitude (m)	Latitude S	Longitude W
1	3052007	1944-2018	74	Passo da Guarda	60	30°54'23"	52°27'43"
2	3052009	1944-2018	74	Passo São Jose	50	30°53'11"	52°14'55"
3	3151002	1977-2018	41	Pacheca	5	31°7'49"	51°47'19"
4	3151003	1944-2018	74	S. Lourenço do Sul	2	31°22'3"	51°59'12"
5	3152002	1966-2018	52	Boqueirão	120	31°17'2"	52°4'59"
6	3152005	1976-2018	42	Vila Freire	250	31°40'10"	52°46'22"
7	3152008	1966-2018	52	Granja São Pedro	3	31°40'22"	52°10'40"
8	3152011	1944-2018	74	P. do Mendonça	40	31°0'2"	52°2'57"
9	3152013	1977-2018	41	Pedro Osório	27	31°52'47"	52°48'37"
10	3152014	1944-1998	24	Pelotas	13	31°45'0"	52°21'0"
11	3152016	1964-2018	54	P.C. Farias	40	31°34'26"	52°27'47"
12	3152021	1944-2016	59	Canguçu	390	31°23'0"	52°40'0"
13	3153004	1976-2018	42	Ferraria	200	31°44'15"	53°3'14"
14	3153008	1966-2018	52	Pinheiro Machado	440	31°34'39"	53°22'37"
15	3153009	1944-1970	26	Piratini	345	31°26'0"	53°6'0"
16	3153021	1980-2018	38	Est. Exp. Piratini	340	31°25'51"	53°6'28"
17	3252005	1966-2018	52	G. Cel. P. Osório	20	32°0'22"	52°39'10"
18	3252024	1986-2018	33	R. G. Regatas	5	32°1'48"	52°4'45"
19	3253004	1966-2018	52	Herval	260	32°1'43"	53°23'52"

Os dados obtidos na plataforma Hidroweb (ANA, 2018) e tabelados em planilhas eletrônicas registraram dados recentes (2018) em quase todas as estações, com exceção das estações Pelotas (E10), Canguçu (E12) e Piratini (E15) e os registros mais antigos datam de 1944 em sete das dezenove estações.

Observa-se que mesmo as estações que não apresentaram dados mais atuais, contam com uma série histórica de períodos superiores a 20 anos, sendo que a E10 (3152014) foi a que apresentou menor série histórica (24 anos), seguida da E15 (3153009) com 26 anos.

Na Tabela 28 estão apresentados os dados de precipitação ao longo da série temporal disponível para cada estação pluviométrica. Foi realizada a média mensal e a precipitação média anual para cada ponto.

Tabela 28: Médias mensais de precipitação e precipitação média anual para cada estação pluviométrica de acordo com a sua série histórica.

Estação	Cód. ANA	Precipitação média mensal (mm)											Anual PA (mm)	
		Janeiro	Fevereiro	Marco	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro		Dezembro
1	3052007	111,55	106,40	114,94	106,33	105,00	121,72	129,59	118,26	133,51	118,77	95,01	96,73	1357,82
2	3052009	117,34	95,07	103,61	100,81	95,52	112,66	124,05	106,07	124,56	108,58	86,27	87,45	1261,97
3	3151002	105,61	133,77	118,59	113,71	119,27	125,19	145,04	119,49	304,37	248,66	99,83	112,55	1746,08
4	3151003	120,20	136,72	123,54	104,28	117,30	125,70	149,22	116,48	135,15	127,38	102,76	103,40	1462,14
5	3152002	129,32	158,87	133,93	117,74	123,61	124,73	163,01	132,19	148,85	136,95	114,52	120,59	1604,30
6	3152005	125,07	149,09	115,88	146,32	119,56	126,18	144,61	114,79	148,82	120,54	125,36	95,30	1531,52
7	3152008	105,86	125,93	111,18	103,25	86,20	106,14	136,84	108,40	125,27	107,69	97,64	91,53	1305,92
8	3152011	126,66	133,30	118,38	101,45	105,21	129,31	138,08	110,65	134,63	128,30	99,27	101,52	1426,76
9	3152013	109,73	134,84	107,63	105,75	107,91	110,46	130,40	106,21	122,52	126,75	108,23	83,95	1354,40
10	3152014	123,07	148,48	130,94	82,28	79,76	121,81	122,30	131,72	140,01	118,96	76,33	83,52	1359,17
11	3152016	117,96	148,80	130,42	107,93	109,67	117,99	142,70	117,23	136,56	123,73	100,62	111,76	1465,37
12	3152021	149,10	144,80	124,90	117,20	124,82	169,50	132,50	160,28	139,40	119,80	115,80	127,90	1626,00
13	3153004	137,71	147,29	119,46	144,29	124,89	125,55	137,11	125,05	141,22	129,11	134,25	112,40	1578,33
14	3153008	124,12	128,85	121,84	134,89	119,91	125,01	147,35	120,95	135,38	134,75	107,35	104,50	1504,92
15	3153009	123,18	108,52	144,50	103,96	104,66	119,53	118,81	122,01	154,69	129,17	80,11	97,53	1406,67
16	3153021	138,25	134,20	94,74	137,28	123,85	133,15	135,95	96,20	150,21	131,66	108,66	82,95	1467,10
17	3252005	118,67	130,93	110,37	101,40	105,36	113,22	135,47	113,63	129,02	109,26	109,26	101,45	1378,03
18	3252024	89,38	102,71	99,62	103,39	93,71	97,78	112,61	101,37	126,19	104,27	84,33	84,78	1200,13
19	3253004	128,00	123,51	116,69	123,47	129,70	127,57	144,73	124,76	128,90	140,01	115,70	104,13	1507,17
<b>Média</b>	<b>-----</b>	<b>121,09</b>	<b>131,16</b>	<b>117,96</b>	<b>113,46</b>	<b>110,31</b>	<b>122,80</b>	<b>136,34</b>	<b>118,20</b>	<b>145,22</b>	<b>129,70</b>	<b>103,23</b>	<b>100,21</b>	<b>1449,67</b>

Observa-se que a estação pluviométrica que apresentou maiores médias anuais de precipitação foi a E03 (Pacheca) com precipitação média anual de 1746,08mm situada no município de Camaquã e a que apresentou menor média anual foi a Rio Grande Regatas com 1200,13mm. Com relação aos meses do ano, novembro e dezembro foram os que apresentaram menores médias mensais de precipitação, e os meses de julho e setembro as maiores, caracterizando períodos de maiores pluviosidades na estação inverno e menores no verão. A Figura 9 apresenta o resultado da interpolação dos dados anuais de precipitação para a região estudada.

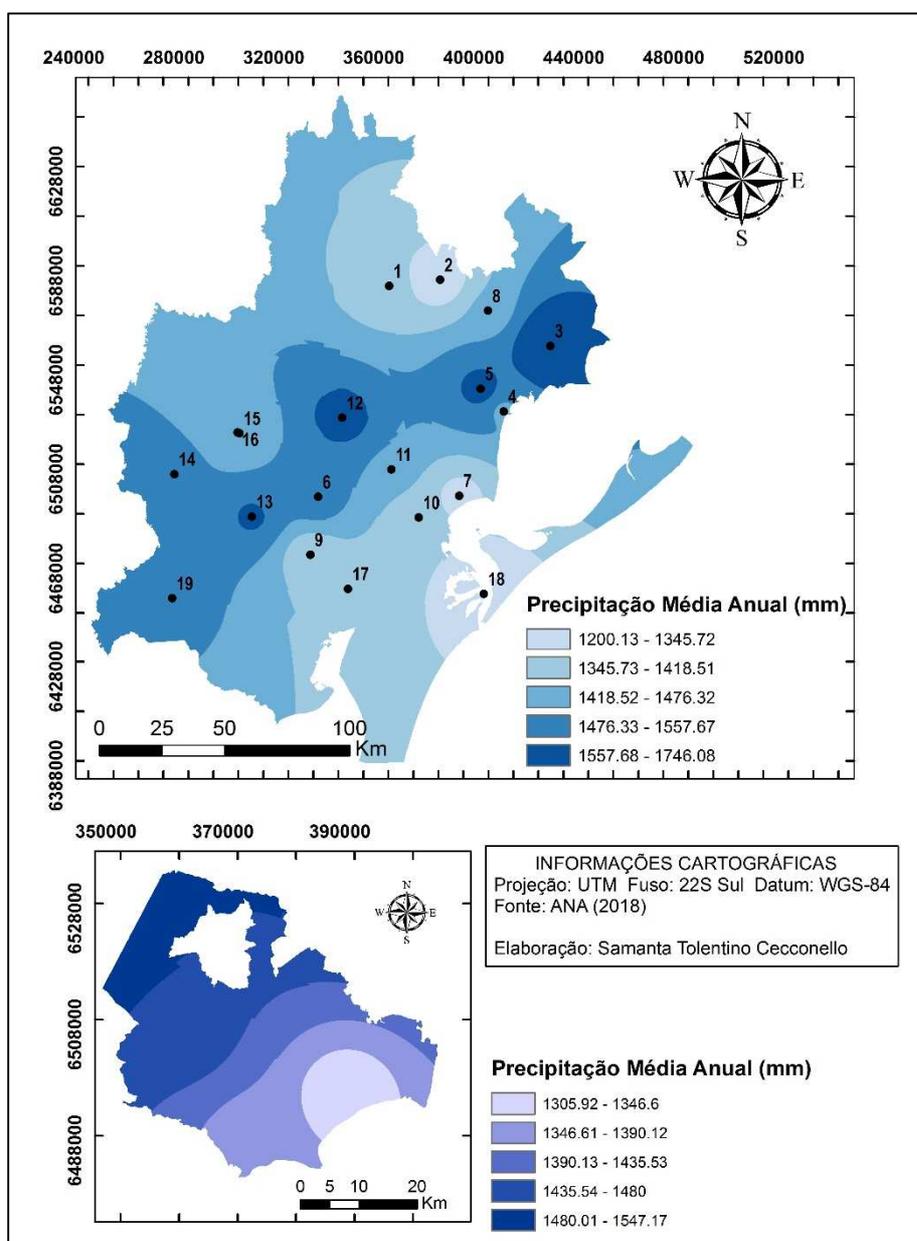


Figura 9: Interpolação dos dados de precipitação média anual para a região estudada.

Observa-se na Figura 9 que as maiores precipitações médias anuais ocorrem nas estações pluviométricas com maiores altitudes, com exceção da estação da Pacheca em Camaquã que apresenta 5m de altitude. Provavelmente este ponto mesmo estando em uma região plana, pode sofrer influência do relevo montanhoso característico da região.

Já o município de Pelotas, por estar localizado às margens do canal São Gonçalo e Laguna dos Patos, apresentou precipitação média anual variando de 1305,92 a 1547,17mm sendo que os valores mais altos de precipitação se encontram na parte mais elevada do município, fator já esperado pelo fato que as áreas mais altas chocam-se com as massas de ar carregadas de vapores de água, facilitando a precipitação.

No estudo de Megiato (2011) a autora constatou que a pluviosidade média anual para a região de Pelotas não ultrapassou 1350mm e que os ventos característicos sopram na direção leste, sendo influenciados pela massa Polar Atlântica e massa Tropical Marítima. Deste modo, o mapeamento da pluviosidade para Pelotas considerando a metodologia de Ross (1994), apresentou uma fragilidade pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000mm/ano, sendo, portanto, considerada de baixa fragilidade, conforme a Figura 10.

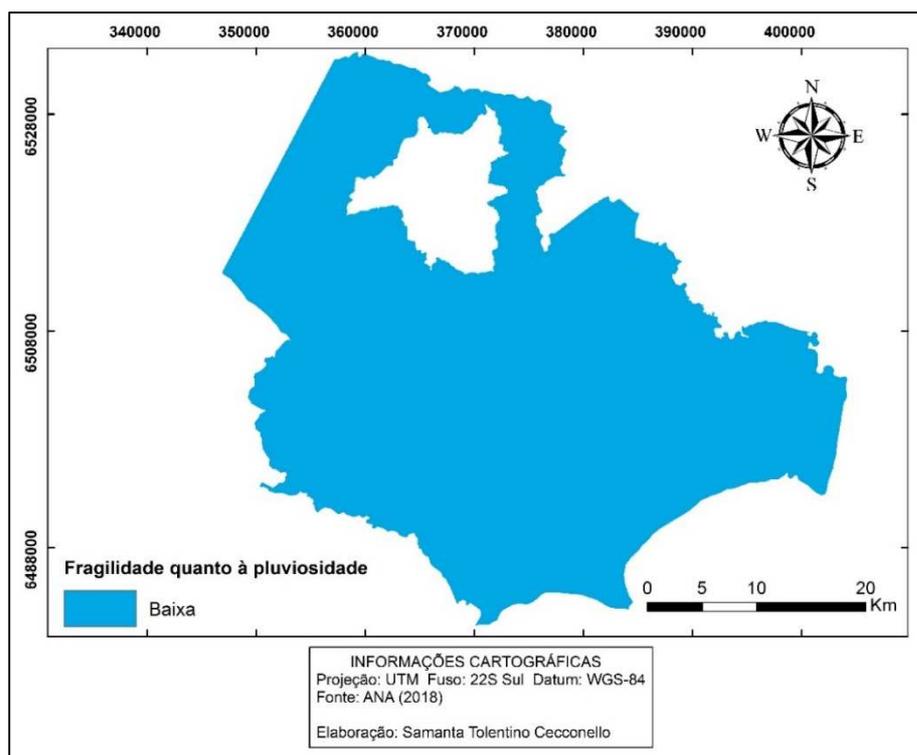


Figura 10: Mapeamento da fragilidade quanto ao elemento pluviosidade para o município de Pelotas.

#### 5.1.4 Mapeamento da fragilidade quanto aos tipos de solos

Incorporar no modelo os tipos de solo é pertinente, uma vez que este é o resultado das variações de temperatura e da intensidade de chuva somadas a ação de microrganismos que alteram as rochas e sedimentos, sendo constituídos por materiais minerais e orgânicos, contendo organismos vivos e que apresentam potencial para o desenvolvimento de diversas espécies da flora e fauna (STRECK et al, 2008).

Deste modo, o solo é formado lentamente o que torna necessário, ações de conservação deste recurso natural, pois as atividades antrópicas alteram a dinâmica de formação dos solos. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2012) o solo “se estraga” principalmente por ações antrópicas que modificam as propriedades estruturais das partículas, fazendo com que ocorra perda de matéria orgânica e nutrientes. Geralmente estas modificações na qualidade do solo estão associadas aos processos erosivos, irrigação mal executada, pelas inundações e pelos diferentes usos da terra.

Para a análise integrada da paisagem com a finalidade de identificar as fragilidades ambientais, o conhecimento sobre as características dos solos se torna necessário.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2012) há uma série de características dos solos que influenciam nos graus de fragilidade natural dos mesmos, como textura, cor, permeabilidade, porosidade e estrutura.

Solos com características mais arenosas absorvem maiores quantidades de água, porém, apresentam pouca estrutura, podendo ser carreados pela água em eventos de intensa precipitação. Já os solos com características argilosas, apresentam pouca permeabilidade, mas alta resistência à erosão.

Nesse aspecto, o município de Pelotas abrange sete tipos de solos: Argissolos, Espodossolos, Cambissolos, Gleissolos, Organossolos, Planossolos e Neossolos (Figura 11).

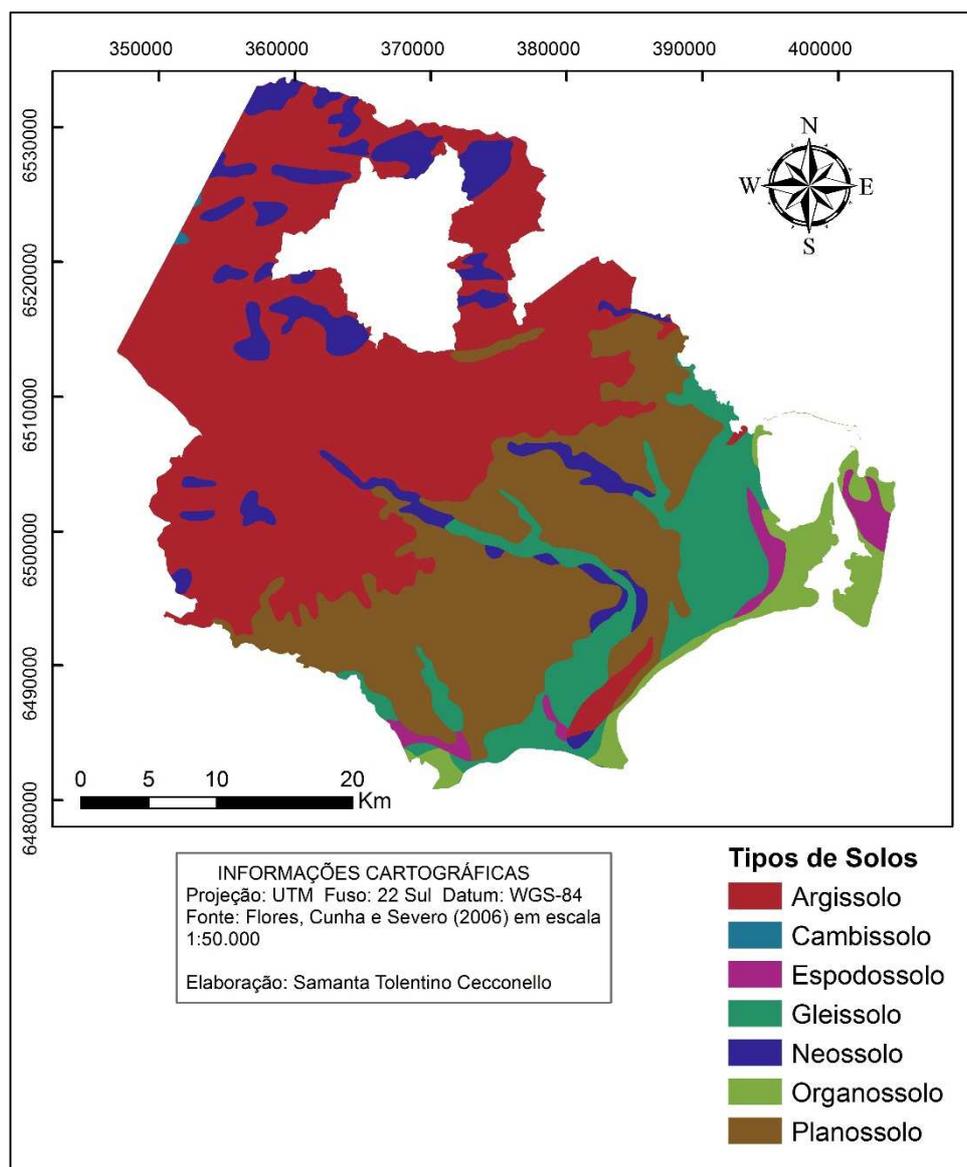


Figura 11: Mapa de solos do município de Pelotas.

Observa-se na Figura 11 que os Argissolos e Planossolos se encontram em maior parte do território do município.

Os Argissolos têm como características a presença de um horizonte subsuperficial argiloso, variando de solos profundos a muito profundos, de bem drenados a imperfeitamente drenados. São geralmente oriundos de rochas como basalto, granito, arenito, argilito e siltito, porém em Pelotas este solo origina-se do granito.

De acordo com Megiato (2011), os Argissolos estão associados a relevo ondulado e fortemente ondulado e apresentam fertilidade variando de baixa a média. Apresentam suscetibilidade moderada à erosão (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006).

Os Planossolos são caracterizados como imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em relevos planos. A textura característica é mais arenosa, por este motivo apresentam condições favoráveis à drenagem da camada superficial, acelerando os processos de decomposição de matéria orgânica. São solos que apresentam suscetibilidade fraca à erosão devido a presença de material orgânico (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006) e originados dos granitos.

Os Cambissolos são solos rasos a profundos, apresentando características de drenagem de bem drenados a imperfeitamente drenados. Eles são encontrados em ambiente de alta pluviosidade e baixas temperaturas, facilitando a acumulação de matéria orgânica. Na área estudada são encontrados em relevo Fortemente Ondulado a Montanhoso, apresentando textura média. Este tipo de solo, por se encontrar em declividades superiores a 25%, precisam de práticas para controle da erosão.

Os Gleissolos estão presentes em áreas alagadiças, sendo pouco profundos e muito mal drenados, apresentam textura média-argilosa. Estão presentes em áreas de declividade inferior a 3%, porém são solos que apresentam elevada suscetibilidade à inundação, devido a sua textura são solos mais frágeis (STRECK et al., 2008).

Segundo Streck et al. (2008), os Neossolos são solos pouco desenvolvidos ou rasos, geralmente presentes em regiões de relevo Fortemente Ondulado. Por apresentarem pouca profundidade com pedregosidade e afloramentos rochosos, devem ser mantidos sob preservação, não sendo recomendado nenhuma prática agrícola, pois estão expostos a perda de solo por erosão hídrica.

Os Organossolos, como o próprio nome indica, são solos orgânicos em diferentes graus de decomposição que se acumulam em ambientes alagadiços. São solos mal drenados, pois possuem alta capacidade de armazenar água. Estes solos quando drenados e cultivados sofrem alterações significativas nas suas características, não sendo recomendado o uso agrícola. Os Organossolos são importantes agentes no controle dos fluxos de água subterrâneas e superficiais, necessitando de critérios rigorosos no seu manejo.

De acordo com Cunha, Silveira e Severo (2006) os Espodossolos são solos de textura arenosa, presente em relevos planos, mal drenado. São

oriundos de sedimentos recentes arenosos e apresentam moderada suscetibilidade à erosão hídrica.

Conforme proposto por Ross (1994) e Leandro (2013) a classificação da fragilidade quanto ao tipo de solo se dá de acordo com as características do solo que definem sua maior ou menor susceptibilidade aos processos erosivos e inundação, e pode ser observada na Tabela 29.

Tabela 29: classificação dos solos quanto ao grau de fragilidade.

Tipo de Solos	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Planossolos	2	Muito Baixa
Argissolos	3	Média
Cambissolos, Espodossolos	4	Alta
Neossolos, Gleissolos, Organossolos	5	Muito Alta

Nas áreas onde ocorrem solos estáveis foi atribuído o valor de fragilidade igual a 2 (Tabela 29). Esta classe de fragilidade é representada pelos Planossolos, os quais são solos que apresentam fraca suscetibilidade à erosão (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006). Já os Argissolos, atribuiu-se valor 3 pois apresentam leve a moderada suscetibilidade à erosão devido ao fato de se localizarem em áreas de elevada altitude.

Aos Cambissolos e Espodossolos atribuiu-se valor 4, pois apresentam moderada a alta suscetibilidade à erosão (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006). Para os Gleissolos, Neossolos e Organossolos atribuiu-se valor 5, pois são solos muito frágeis e fortemente suscetíveis à erosão e inundação (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006).

O mapa de fragilidade quanto aos tipos de solos pode ser observado na Figura 12.

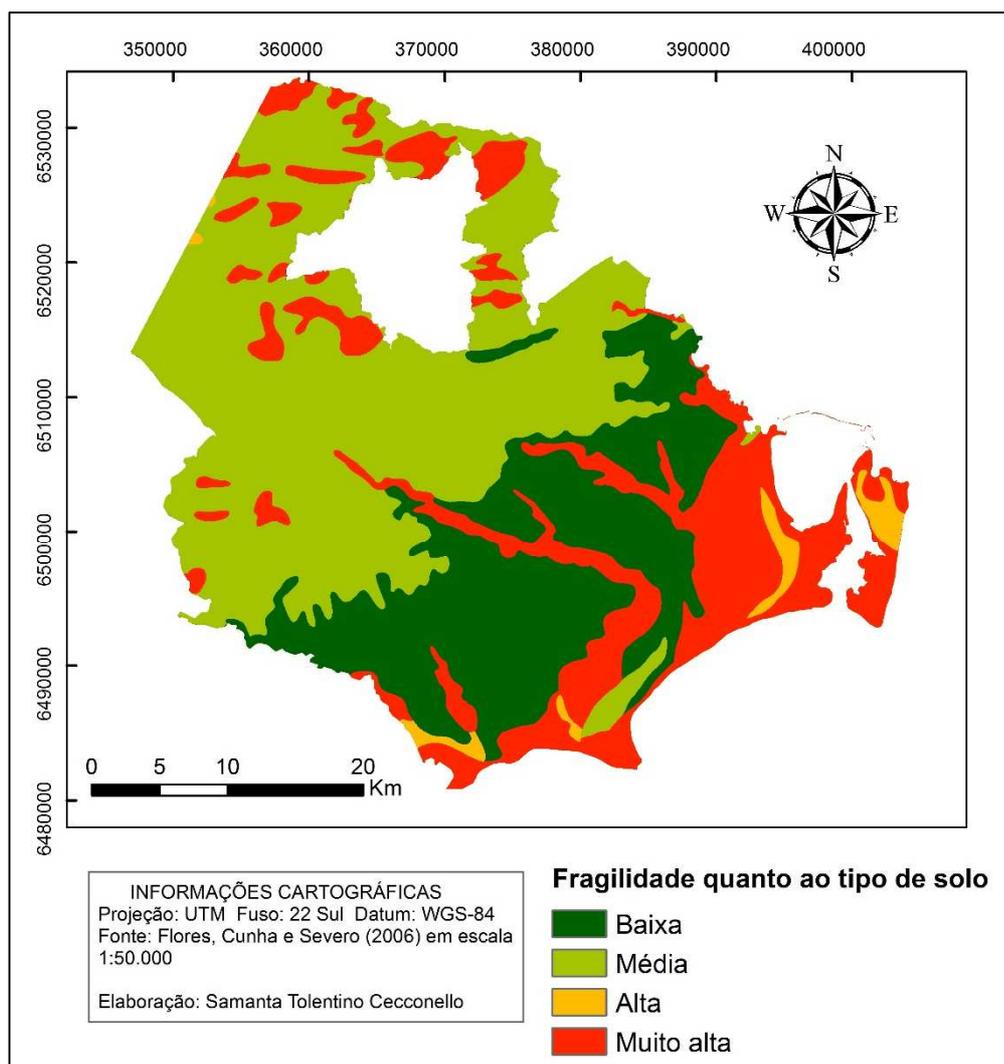


Figura 12: Mapa da classificação da fragilidade quanto ao tipo de solo.

### 5.1.5 Mapeamento da fragilidade quanto à litologia

A natureza física e química das rochas interfere no intemperismo e consequentemente no processo de desagregação das partículas que irão se movimentar pelas encostas, por este motivo são importantes elementos ambientais que devem ser mapeados para compor a análise integrada da paisagem. No município de Pelotas são encontradas duas unidades geomorfológicas presentes no Rio Grande do Sul, o Escudo Sul-Rio-grandense e a Planície Costeira.

De acordo com Megiato (2011) no Escudo Sul-rio-grande há quatro unidades geológicas: Complexo Granito-Gnaíssico Pinheiro Machado, mais

conhecida como Suíte intrusiva Pinheiro Machado, Suíte Intrusiva Dom Feliciano, Granito Arroio Moinho e Domínio Dom Feliciano – Herval. Já na Planície Costeira, há os depósitos colúvio-aluvionais, que são formados por sedimentos depositados pela ação do intemperismo.

De acordo com o mapeamento realizado pelo IBGE (2018), o município apresenta três unidades geológicas do Escudo Sul-rio-grandense, estando em áreas com declividade entre 8 e 45%. A Figura 13 mostra as unidades geológicas encontradas para o município de Pelotas.

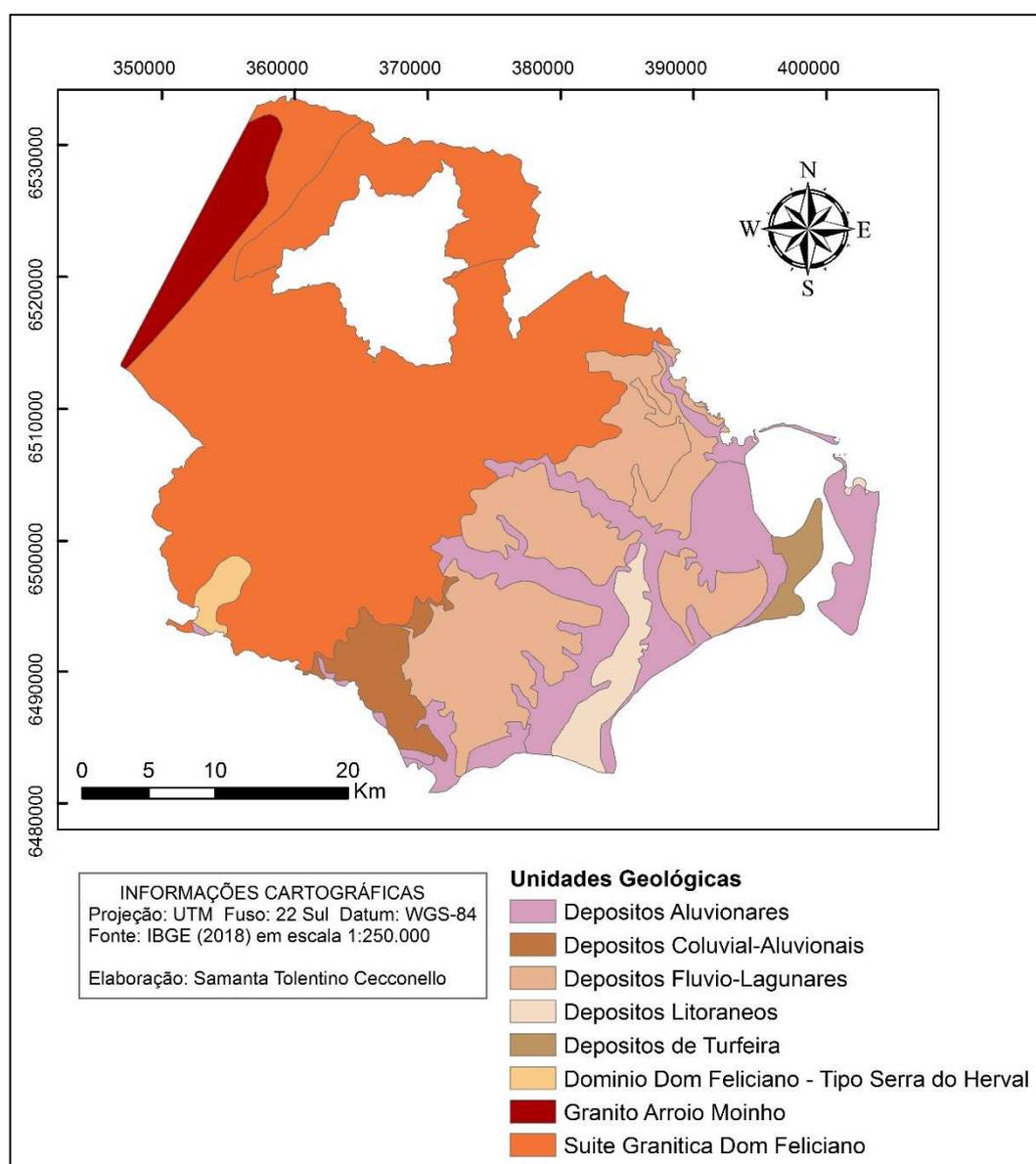


Figura 13: Unidades geológicas do município de Pelotas.

Foram encontradas areias, argilas e turfas na Planície Costeira e granito e sianogranulitos no Escudo Sul-rio-grandense. Apresentando fragilidades muito

baixa e muito alta conforme a proposta de Crepani et al. (2001) e Leandro (2013), (Tabela 30).

Tabela 30: classificação quanto ao grau de fragilidade da litologia encontrada no município de Pelotas.

Tipos de Rochas	Litologias	Valor	Classificação de Fragilidade
Ígneas	Granito e Sianogranulitos	1	Muito baixa
Sedimentares	Areias, Argilas e Turfas	5	Muito alta

A Figura 14 apresenta o mapa de fragilidade quanto à litologia para a área de estudo.

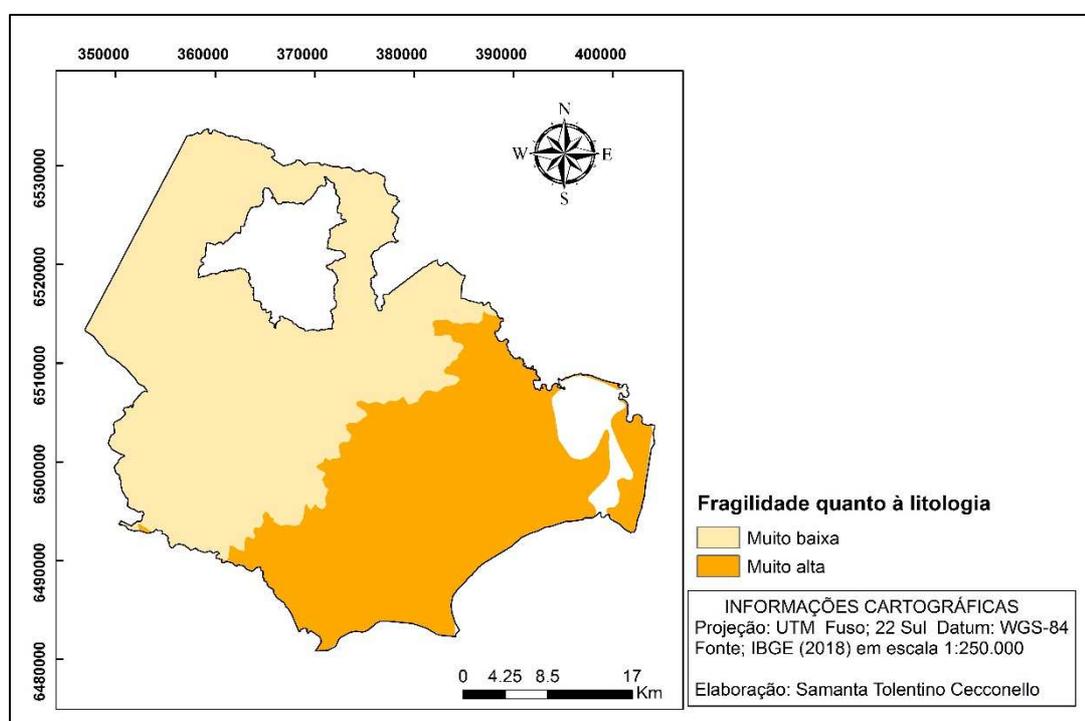


Figura 14: Mapa da fragilidade quanto ao elemento litologia para o município de Pelotas

O granito é uma rocha Ígnea (formada pelo resfriamento de magma derretido) apresentando uma alta dureza, pois na sua composição há presença de minerais como o Quartzo, Feldspato e Mica. Por este fato o granito também é mais impermeável e nos processos de erosão, apresenta baixa reação ao intemperismo. O Sianogranulito, apresenta as mesmas características do granito, porém a diferença é que apresenta granulação mais fina (PRESS et al., 2006). As areias, argilas e turfas são sedimentos que acabam se depositando na

Planície Costeira, estes sedimentos apresentam elevada fragilidade, pois são facilmente carregados pela precipitação e pelo ar. Deste modo, favorecem a perda de solo e os processos de inundação.

### 5.1.6 Mapeamento da fragilidade quanto ao uso e cobertura da terra

O mapeamento da fragilidade quanto ao critério de uso e cobertura da terra para Pelotas obtido por Ceconello (2017), apresenta cinco classes. O mapa de uso e cobertura da terra utilizado neste estudo pode ser observado na Figura 15.

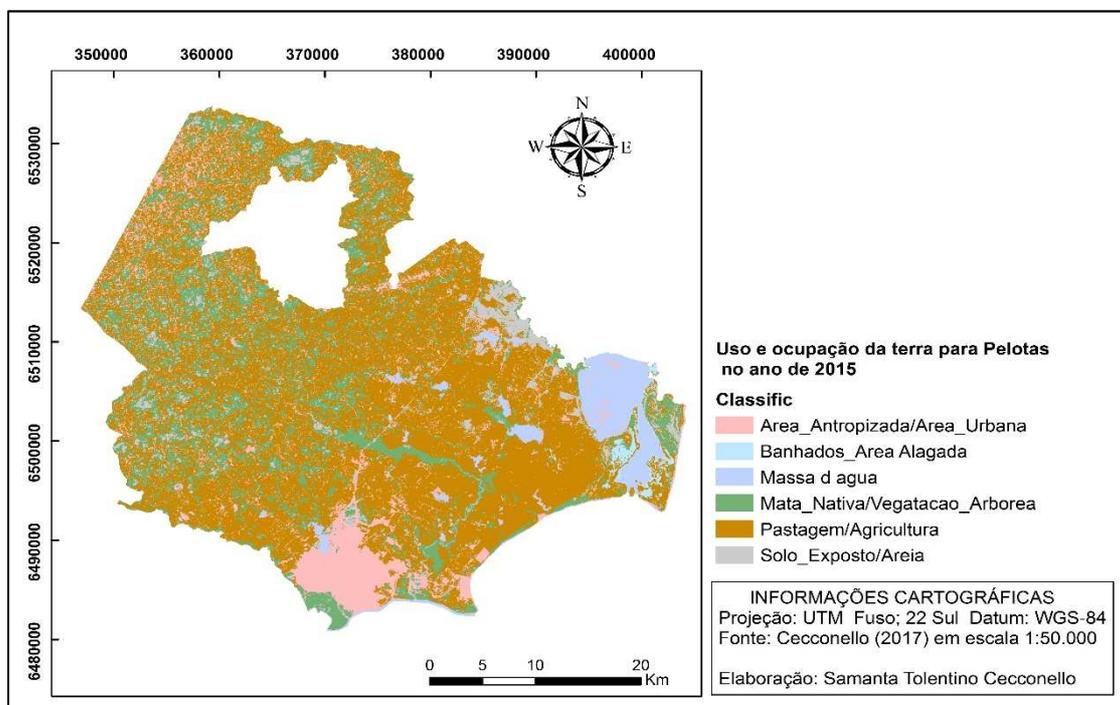


Figura 15: Uso e ocupação da terra para o município de Pelotas para o ano de 2015.  
Fonte: Ceconello (2017)

A autora supracitada em seu estudo identificou uma área de 278,98 km<sup>2</sup> da classe ocupação urbana, 820,74 Km<sup>2</sup> da classe de pastagem e agricultura, 249,58 Km<sup>2</sup> de solo exposto, 114,79 Km<sup>2</sup> de área com mata nativa ou vegetação arbórea e 146 km<sup>2</sup> com áreas alagadas e massa d'água. Portanto, pode-se observar que o município de Pelotas apresenta elevada influência antrópica, decorrente de um total de 68,30% de área com atividades urbana e agropecuárias.

Baseado na metodologia de Ross (1994) a classificação para o município de Pelotas apresentou valor de 1 para a classe mata nativa, pois entende-se que estas áreas estão preservadas. Para a classe solo exposto ou areia, área urbana e área de banhados ou massa d'água apresentam elevada fragilidade, pois são classes que sofrem uma interferência humana muito intensa, desta forma atribuiu-se valor 5. Para as áreas de pastagem e agricultura atribuiu-se valor 4, não havendo distinção entre os tipos de cultivares. A Tabela 31 apresenta os valores e as classes para o elemento uso e ocupação da terra para Pelotas.

Tabela 31: Classificação da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra.

Uso e Ocupação da terra	Valor	Índice de Fragilidade Ambiental
Mata nativa/Vegetação arbórea	1	Muito baixa
Pastagem/Agricultura	4	Alta
Área antropizada, Solo exposto/areia, Banhados e massa d'água	5	Muito alta

Na Figura 16 pode-se observar o mapeamento da fragilidade quanto ao uso e cobertura para Pelotas.

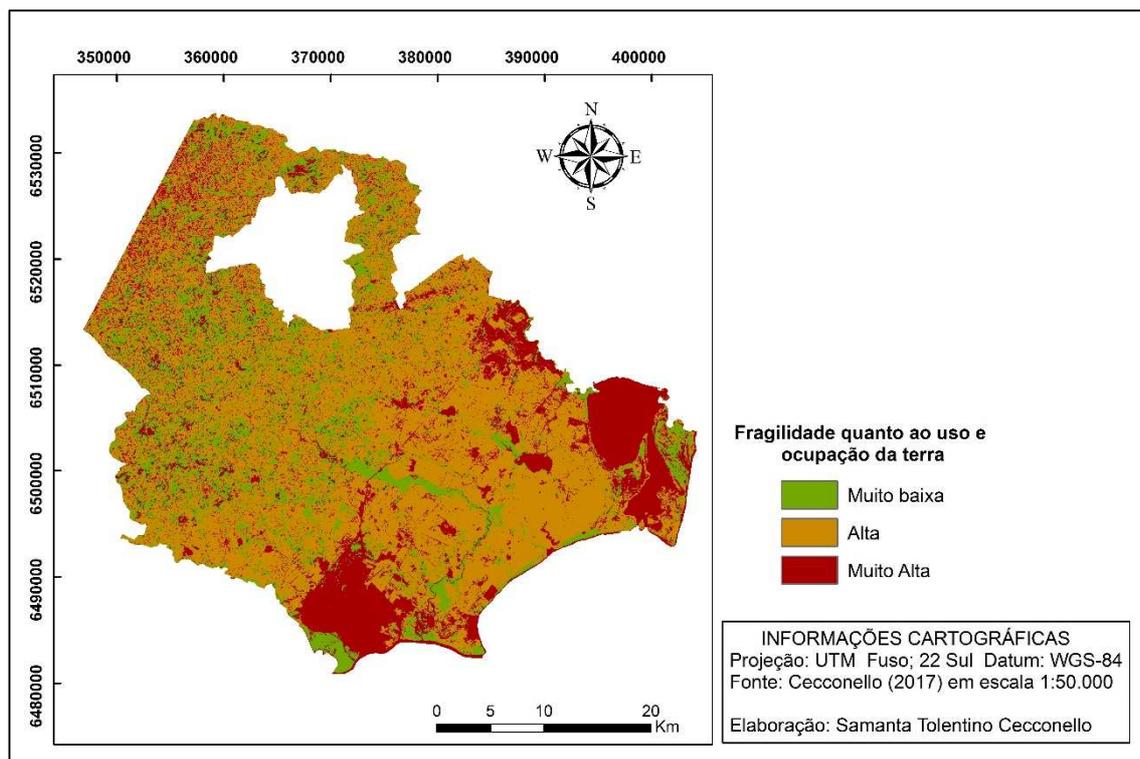


Figura 16: Mapa da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra para o município de Pelotas.

O mapa de fragilidade para uso e cobertura da terra não apresentou classe média e nem baixa. A fragilidade alta representa uma área de 820,74 Km<sup>2</sup> perfazendo 50,97% da área total do município. A classe muito alta, totaliza 41,90% e a muito baixa 7,13%. Deste modo, percebe-se que as classes muito alta e alta estão presentes em 92,87% do município. Segundo Manfré et al. (2013), as áreas de fragilidade quanto ao uso e cobertura da terra na maior parte das vezes, apresenta poucas áreas consideradas como de baixa ou média fragilidade, tendo em vista que as ações antrópicas contribuem negativamente para a desestabilização do equilíbrio dinâmico.

### 5.1.7 Mapeamento da fragilidade quanto às áreas de preservação permanente

Para o mapeamento das Áreas de Preservação Permanente utilizou-se como descrito anteriormente da delimitação realizada por Cecconello (2017) para as APPs do município de Pelotas.

As APPs são protegidas pela Lei Federal nº 12.651/2012 e tem o objetivo de preservar a paisagem, os recursos hídricos, garantir a preservação da

biodiversidade da fauna e flora, proteção do solo e assegurar o bem-estar da população (BRASIL, 2012). Portanto, este elemento é importante para que possamos compreender as fragilidades de um ambiente e tomar as melhores decisões sobre o planejamento territorial e ambiental de uma região.

Neste estudo considerou-se as áreas que deveriam ser destinadas à preservação de acordo com o Código Florestal Brasileiro. Porém, não se levou em consideração as ocupações já consolidadas em áreas de APP e nem a inexistência destas. Deste modo, as áreas de APP são as que receberam valor 5 para a fragilidade, pois são naturalmente mais suscetíveis às alterações pelas atividades antrópicas, sendo assim, a medida que se distanciam destas áreas a suscetibilidade diminui.

Os intervalos das classes de fragilidade das APPs foram definidos de acordo com as larguras definidas como APPs e encontradas no município.

A primeira classe representa as próprias APPs recebendo o maior valor de fragilidade. Como existe uma APP que apresenta 200 metros de largura (Canal São Gonçalo) a segunda classe foi definida como sendo de 250 metros, pois assim não haveria conflito entre a primeira e a segunda classe. Definiu-se que o limite máximo da segunda classe seria 250 metros pois a maior parte das APPs apresentam larguras de 50 metros. Assim, a terceira classe apresentaria como limite inferior 251 metros e limite superior 300 metros, recebendo um valor de 3 para a fragilidade. Para a quarta classe, adotou-se o dobro da segunda classe e para a quinta classe os valores acima de 501 metros, conforme a Figura 17.

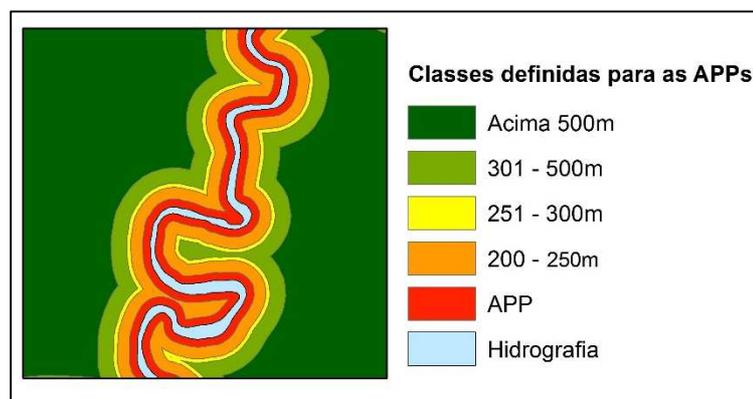


Figura 17: Classes definidas para as APPs.

Portanto, à medida que aumentam as distâncias das áreas definidas como de preservação, diminui a fragilidade do ambiente.

A Figura 18 apresenta o mapa da fragilidade das Áreas de preservação Permanente para o município de Pelotas.

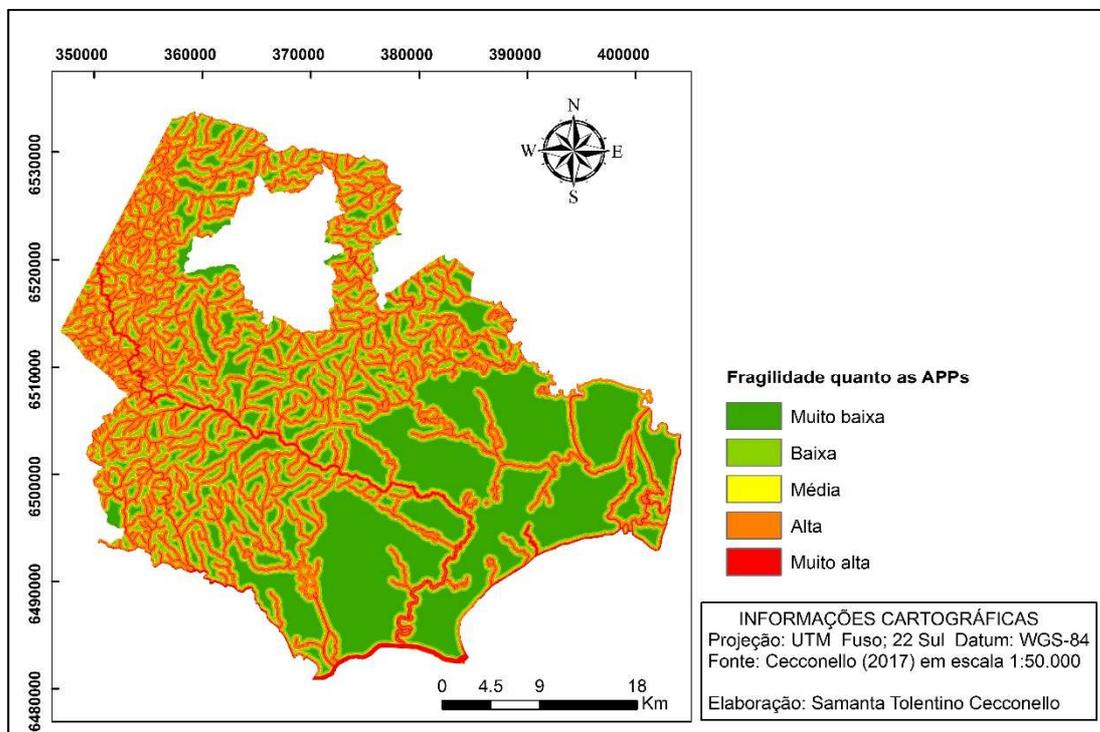


Figura 18: mapa da fragilidade das APPs para Pelotas.

Através do mapeamento e da quantificação das áreas de fragilidade para as APP verifica-se que o município apresentou 504,48 Km<sup>2</sup> de área com alta fragilidade, sendo que, as áreas de fragilidade média foram as que apresentaram menor área, como pode ser observado na Tabela 32.

Tabela 32: Quantificação das fragilidades quanto às APPs.

Existência de Área de Preservação Permanente	Índice de Fragilidade Ambiental	Área Km <sup>2</sup>	% Área Total
Áreas que se distanciam acima de 500 metros das Áreas de Preservação Permanente	Muito baixa	462,35	28,71
Áreas que se distanciam até 500 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	Baixa	343,39	21,33
Áreas que se distanciam até 300 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	Média	122,51	7,61
Áreas que se distanciam até 250 metros de Áreas de Preservação e de corpos de água superficiais	Alta	504,48	31,33
Áreas de APPs	Muito alta	177,36	11,02
<b>Total</b>		<b>1610,09</b>	<b>100</b>

Deste modo, 42,35% da área total do município apresenta fragilidade variando de alta a muito alta e 50,04% variando de baixa a muito baixa. Sendo possível inferir que aproximadamente metade da área do município apresenta regiões com maiores suscetibilidades às alterações antrópicas. Porém, nas demais áreas, deve-se pensar na ocupação do espaço geográfico de forma racional, pois as APPs apresentam grande importância ambiental, seja pela preservação dos mananciais ou pelas características ecológicas que apresentam para manter o equilíbrio dinâmico do sistema.

#### **5.1.8 Mapeamento da fragilidade quanto ao saneamento: água, esgoto e resíduos sólidos**

Através dos dados obtidos junto ao Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas sobre a existência de rede de abastecimento de água e esgotamento sanitário, e das áreas em que há coleta de resíduos sólidos no território do município, foi possível mapear a fragilidade para o elemento saneamento, cruzando os três planos de informações: água, esgoto e resíduos sólidos.

O mapeamento do saneamento se torna importante, pois a qualidade de vida da população pode ser mensurada pelos índices de atendimento aos

serviços de saneamento (HELLER; PÁDUA, 2010). Assim como, através dos serviços de saneamento pode-se inferir sobre as condições do ambiente. Segundo a Fundação Nacional da Saúde - FUNASA (2004) saneamento ambiental pode ser entendido como sendo todas as ações estruturais ou não estruturais que visam a salubridade ambiental, através de quatro eixos básicos: água potável, esgotamento sanitário, resíduos sólidos e drenagem das águas pluviais.

O mapeamento dos três elementos: água, esgoto e resíduos sólidos, seguiram o critério de que se há presença de rede de abastecimento de água, rede de coleta de esgoto sanitário e coleta de resíduos sólidos, a suscetibilidade às doenças e à contaminação do ambiente são reduzidas, sendo consideradas como áreas de baixa fragilidade.

Já em áreas onde não são oferecidos os serviços de abastecimento de água, coleta de resíduos e rede de esgoto sanitário, apresentam elevada suscetibilidade à contaminação tanto da população como do ambiente. Na Figura 19 é apresentado o mapeamento para o abastecimento de água.

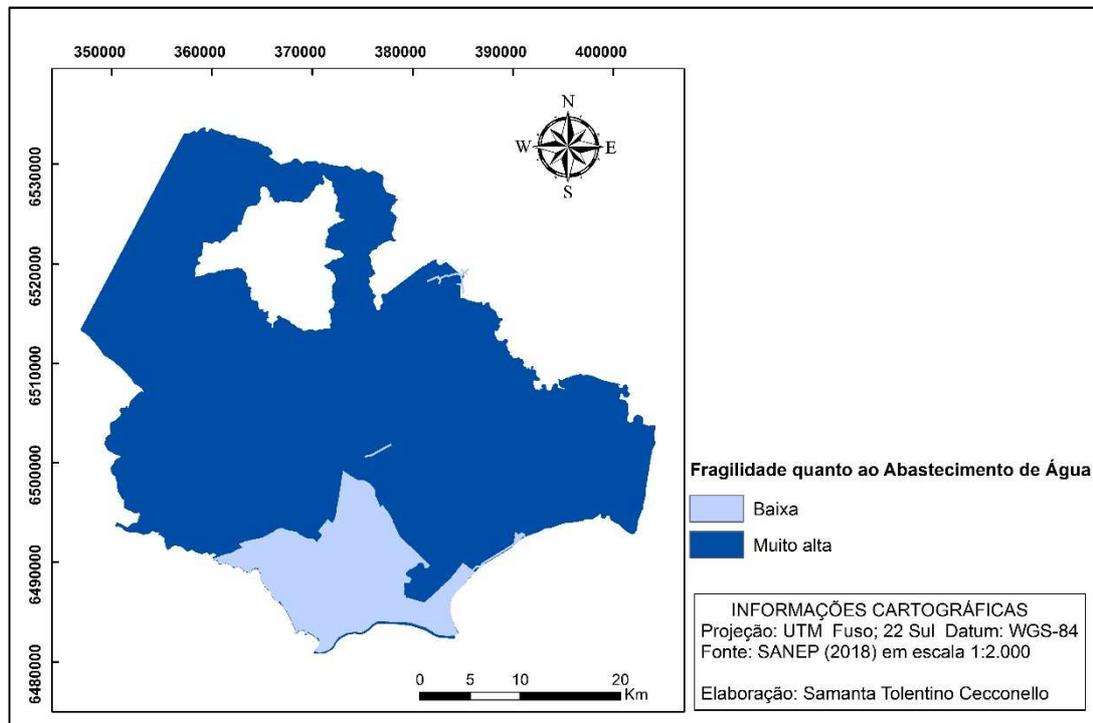


Figura 19: Mapeamento da fragilidade quanto à presença de redes de abastecimento de água.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2018), o município de Pelotas apresenta 96,76% da população atendida com rede de abastecimento de água, sendo que 99,80% desta população está localizada na zona urbana. Na zona rural de Pelotas há rede de abastecimento de água na região do Quilombo e no Posto Branco, nas demais regiões o abastecimento é realizado pelo próprio proprietário através de poços freáticos. Nestas áreas rurais não há tratamento de água, portanto existe uma maior probabilidade de ocorrências de doenças de veiculação hídrica (HELLER; PÁDUA, 2010).

Deste modo, o mapeamento da fragilidade quanto à existência de redes de abastecimento de água, apresentou baixa fragilidade na área urbana e nas duas regiões rurais em que a prefeitura garante o abastecimento, e nas demais regiões a fragilidade foi considerada muito alta.

Com relação ao mapeamento da fragilidade quanto à existência de rede de coleta de esgoto sanitário, a situação do município é delicada. Segundo as informações do SNIS (2018), a população urbana contemplada com rede coletora de esgotos no município é de apenas 59,03%, sendo que apenas 19,20% deste esgoto coletado é tratado. Um dos problemas enfrentados pelo município é que não há rede coletora de esgotos em toda a parte urbana, fazendo com que as Estações de Tratamento de Esgotos – ETE existentes na cidade, funcionem com vazões reduzidas, influenciando na eficiência de tratamento.

O município ainda apresenta em grande parte do seu território o sistema de fossa séptica e sumidouro, o que acaba por aumentar a suscetibilidade a doenças e a contaminação do solo e águas subterrâneas tendo em vista que a característica do lençol freático estar bem próximo da superfície.

Considerou-se no mapeamento da fragilidade quanto à existência de rede coletora de esgotos no município as áreas em que há rede coletora com suscetibilidade baixa e em áreas onde não há rede, como sendo de muito alta suscetibilidade à contaminação e proliferação de doenças, conforme pode ser observado na Figura 20.

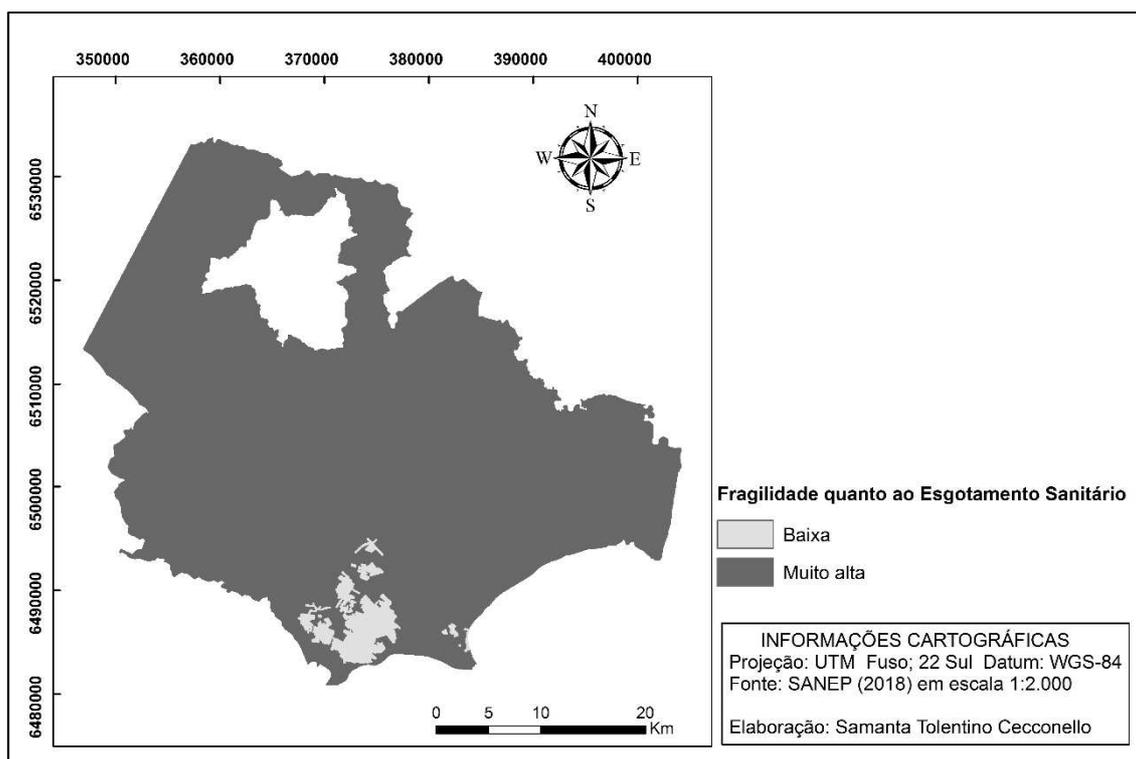


Figura 20: Mapeamento da fragilidade quanto à existência de rede coletora de esgotos sanitários no município de Pelotas.

Com relação aos resíduos sólidos, Pelotas apresenta segundo informações do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos de Pelotas (PELOTAS, 2014), 100% da população urbana com coleta convencional de resíduos sólidos urbanos – RSU, apresentando uma frequência regular de coleta. Para a zona urbana, a Prefeitura de Pelotas (2014) estima que são geradas 481 gramas de RSU por habitante dia.

Na zona rural, há coleta apenas uma vez por semana e contempla os distritos da Cascata, Monte Bonito, Corrientes e Vila Nova. Há uma rota estabelecida nas principais estradas municipais que dão acesso a estas regiões. Deste modo, para este estudo, definiu-se que a uma distância de 30 metros para cada lado da estrada onde o caminhão passa para coletar os RSU na zona rural, sendo considerada nesta área a fragilidade baixa e nas demais áreas a fragilidade é considerada muito alta.

Em toda a zona urbana do município, atribuiu-se baixa fragilidade à ocorrência de doenças e contaminação do ambiente em decorrência da existência de coleta de RSU. A Figura 21 mostra o mapeamento da fragilidade quanto à existência de coleta de RSU no município.

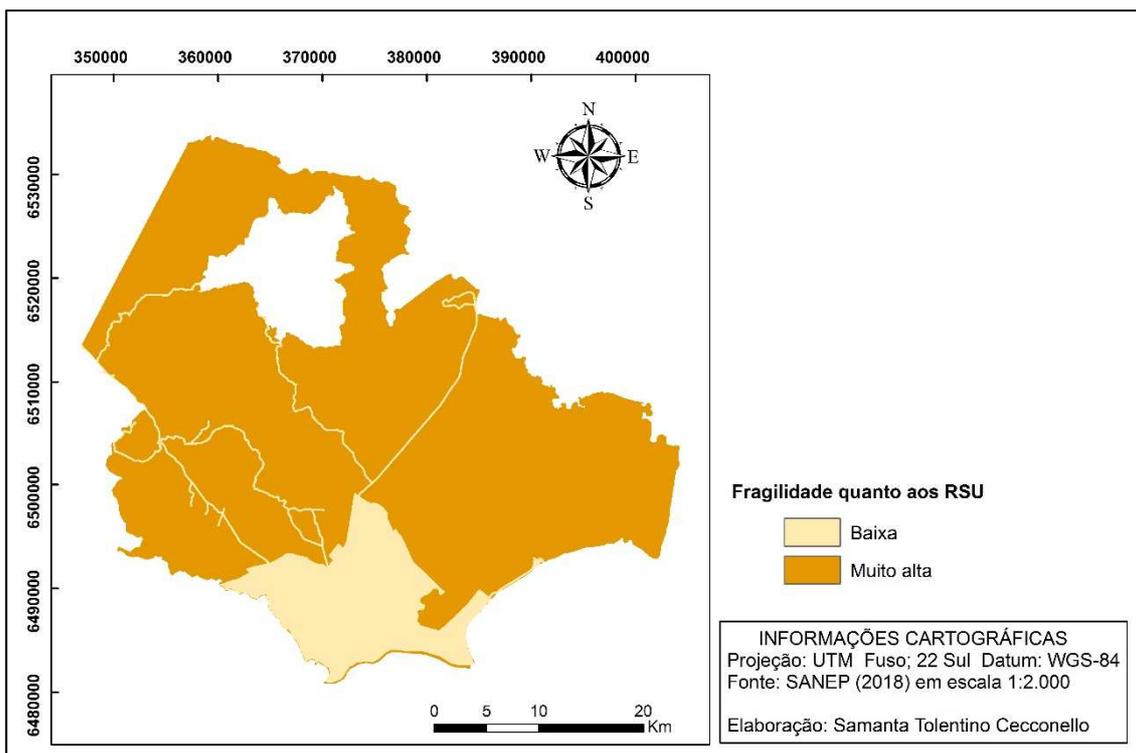


Figura 21: Mapeamento da fragilidade quanto à existência de coleta dos resíduos sólidos urbanos.

O mapa de fragilidade do elemento saneamento utilizou o cruzamento dos três elementos ambientais: água, esgoto e RSU através da análise hierárquica de processos. Para tal, foi utilizada a calculadora AHP através do website AHP-OS (GOEPEL, 2018). A Figura 22 apresenta o ambiente online da calculadora AHP.

### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 3

### Pairwise Comparison AHP priorities

3 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to AHP priorities is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Esgoto or <input type="radio"/> Agua	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input checked="" type="radio"/> Esgoto or <input type="radio"/> RSU	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input type="radio"/> Agua or <input checked="" type="radio"/> RSU	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 3% OK

dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Figura 22: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento saneamento.

No ambiente online, foi definido o nome dos elementos que irão fazer parte da matriz de comparação pareada, neste caso, esgoto, RSU e água. Após, foi realizada a comparação entre os elementos de dois a dois, onde foram dadas as notas de acordo com os critérios de Saaty (1977).

Como resultado se obteve a matriz de comparação e no mesmo ambiente já é calculada a razão de Consistência (RC). Percebe-se que o valor da raiz de consistência foi de 0,03, sendo desta forma inferior à 0,1, conforme determina Saaty (1977), desta forma pode-se dizer que os pesos obtidos através da hierarquização dos elementos ambientais são confiáveis.

Os pesos de cada elemento também são fornecidos diretamente pela calculadora AHP em ambiente online, como pode ser observado na Figura 23.

1	Esgoto	48.1%	1
2	Agua	11.4%	3
3	RSU	40.5%	2

Number of comparisons = 3  
Consistency Ratio CR = 3.0%

Figura 23: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.

No apêndice 1 pode ser observada todas informações obtidas através da calculadora AHP em ambiente online para o mapeamento da fragilidade quanto ao elemento saneamento.

De posse dos pesos, realizou-se a modelagem da fragilidade para o elemento saneamento no software ArcGis utilizando a Equação 11 e o resultado obtido pode ser visualizado na Figura 24.

$$FS_{\text{saneamento}} = 0,481 * ES + 0,405 * RSU + 0,114 * AG \quad (11)$$

Onde:

$FS_{\text{saneamento}}$ : Grau de fragilidade relativo ao elemento Saneamento

ES: Grau de fragilidade relativo ao critério Esgoto

RSU: Grau de fragilidade relativo ao critério Resíduos Sólidos

AG: grau de fragilidade relativo ao critério Abastecimento de água

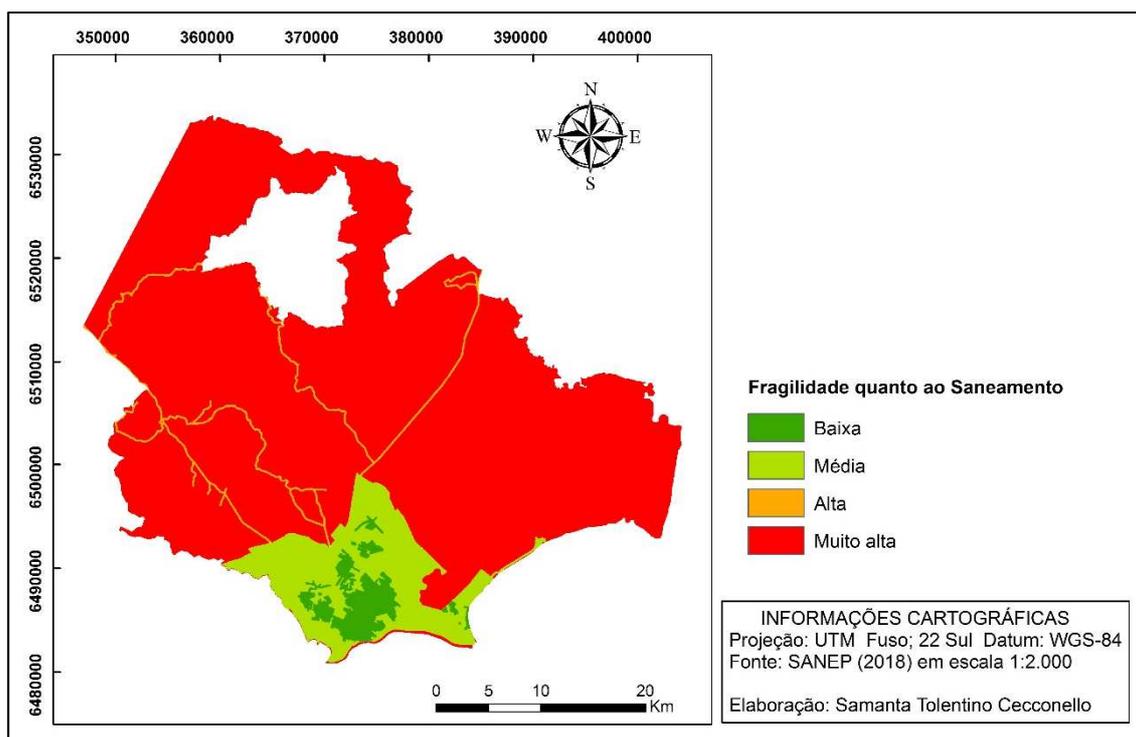


Figura 24: Mapeamento da fragilidade relativo ao elemento Saneamento para o município de Pelotas.

A fragilidade para o elemento Saneamento variou de baixa a muito alta (Figura 24). A área mapeada como sendo de baixa fragilidade corresponde a área urbana do município em que são atendidas todas as condições: existência de rede de abastecimento de água, rede de esgotamento sanitário e coleta de resíduos sólidos. Na área de fragilidade média, são atendidos os requisitos de abastecimento de água e coleta de resíduos, porém, não há rede de esgoto sanitário, como este elemento é o de maior prioridade, há uma fragilidade maior nestas áreas.

Na área de alta fragilidade não há abastecimento de água e nem esgotamento sanitário e por sua vez, nas áreas de muito alta fragilidade não há nenhum serviço de saneamento apresentando uma área de 1385,86 Km<sup>2</sup> (86,07%) altamente suscetível a doenças e impactando o ambiente.

### 5.1.9 Mapeamento da fragilidade quanto à contaminação de aquíferos

Para o mapeamento da fragilidade natural à contaminação das águas subterrâneas, utilizou-se a metodologia proposta por Foster et al. (2006), que

conforme a metodologia descrita no item 4.3.2.9 utiliza três parâmetros: G- grau de confinamento dos aquíferos, O- litologia e D- distância da superfície até o aquífero. A Figura 25 mostra a distribuição dos poços no município de Pelotas.

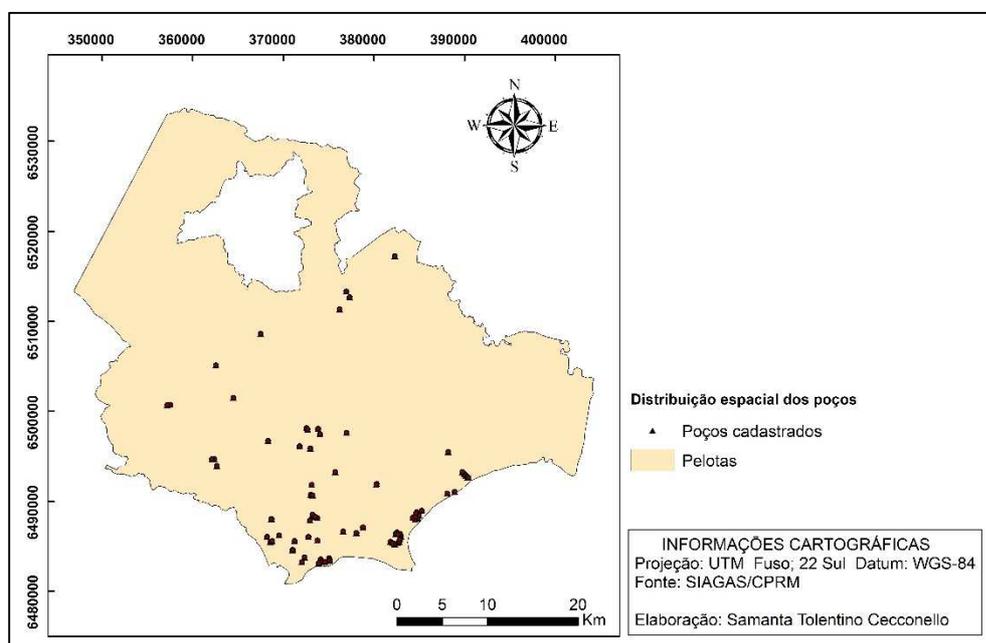


Figura 25: Distribuição espacial dos poços cadastrados e utilizados neste estudo.

Observa-se que a distribuição dos pontos se concentra na sua grande parte na região sudeste, sul e central do município.

No apêndice 2 estão apresentadas as características de cada poço, bem como as notas para os critérios do GOD.

O índice da vulnerabilidade final baseado no método GOD foi obtido pelo produto dos valores obtidos para cada um dos parâmetros, variando de 0,0 (vulnerabilidade insignificante) até 1,0 (vulnerabilidade extrema). Os valores de fragilidade obtidos pela multiplicação dos três parâmetros resultaram em fragilidades variando de 0,252 (baixa) a 0,63 (alta).

Para a interpolação dos dados para o município, utilizou-se a krigagem ordinária através da ferramenta *Geostatistical Analyst* do ArcGis 10.6. Sendo assim, através da geração do semivariograma experimental foi detectada a existência de dependência espacial nos dados analisados. Dos principais modelos teóricos existentes, foram testados os modelos exponencial, esférico e gaussiano (YAMAMOTO; LANDIN, 2013). Sendo que o modelo que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o gaussiano compostos pelos seguintes parâmetros: alcance máximo de 13115m, efeito pepita de 0,002696 e

patamar de 0,015. Cabe destacar que a variância dos dados originais do GOD foram de 0,0108, mostrando assim, inferior ao patamar, o que deixa evidente que o semivariograma ajustado conseguiu capturar a variância dos dados. O semivariograma experimental com definição do patamar pode ser observado na Figura 26.

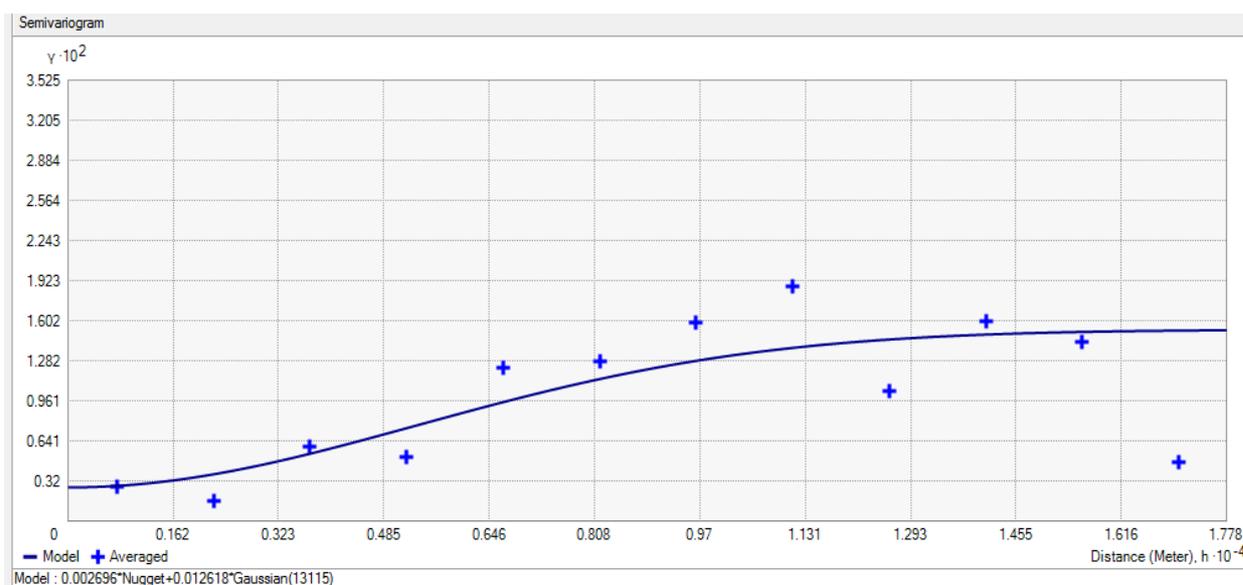


Figura 26: Semivariograma experimental com definição de patamar e modelo para a determinação da fragilidade à contaminação natural do aquífero.

A validação do mapa interpolado foi realizada por validação cruzada, onde se obteve os erros das estimativas. Sendo assim, a krigagem da vulnerabilidade resultou em um erro quadrático médio de 0,041, erro médio de 0,009, erro quadrático médio padronizado de 0,745 e erro médio padronizado de 0,060. Cabe destacar que de acordo com Jakob e Young (2006), para que o mapa de predição encontrado apresente valores estimados de qualidade, deseja-se que o erro médio padronizado dos valores estimados seja próximo de 0, que o erro quadrático médio seja o mais baixo possível, que o erro médio seja próximo do erro quadrático médio, e que o erro quadrático médio padronizado seja próximo de 1. Desta maneira, pode-se assumir que o mapa de predição da vulnerabilidade encontra-se adequado.

A Figura 27 mostra o mapa interpolado para o município de Pelotas quanto ao elemento de fragilidade natural à contaminação das águas subterrâneas.

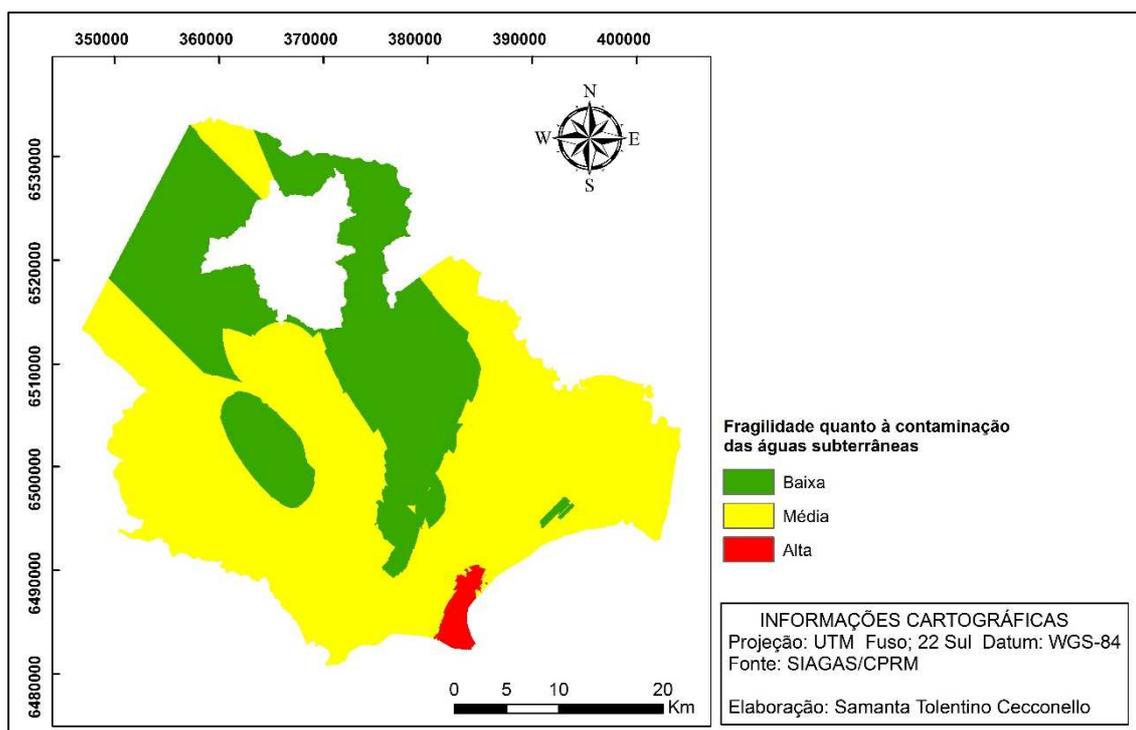


Figura 27: Mapa da fragilidade à contaminação das águas subterrâneas.

Observa-se que a área de alta fragilidade à contaminação das águas subterrâneas está situada na área urbana, mais precisamente no bairro Laranjal. Sendo que grande parte do município apresenta média fragilidade natural à contaminação dos aquíferos.

Nos estudos de Borba et al. (2015), ao avaliarem vulnerabilidade do aquífero à contaminação do município de Seberi/RS, encontraram vulnerabilidades similares a este estudo, variando de baixa a alta. Terra, Löbler e Silva (2013) estudando o município de Santiago/RS descreve que este apresentou áreas de vulnerabilidade insignificante a baixa, porém os autores ressaltam a importância em considerar o estudo para um planejamento de uso e ocupação do solo adequado, visando à proteção das águas subterrâneas.

Portanto, os resultados de vulnerabilidade natural à contaminação para o município de Pelotas, apontaram uma área sensível naturalmente, devendo atentar-se para as atividades potencialmente poluidoras que estão inseridas nas áreas de média e alta vulnerabilidade.

### 5.1.10 Mapeamento da fragilidade quanto à inundação

Existem quatro fatores que independem da precipitação e que influenciam diretamente na elevação temporária do nível d'água normal da drenagem, devido ao acréscimo de vazão, são eles: altitude, declividade, uso da terra e tipo de solo (SANTOS; LOUZADA; EUGÊNIO, 2010).

As inundações são o resultado da precipitação intensa e do escoamento superficial que simultaneamente chegam a um corpo d'água sendo superior à capacidade de drenagem do mesmo, fazendo com que as águas extravasem para as áreas marginais, inicialmente não ocupadas pela água (TUCCI, 2007).

O mapa de fragilidade quanto à declividade para a inundação pode ser observado na Figura 28.

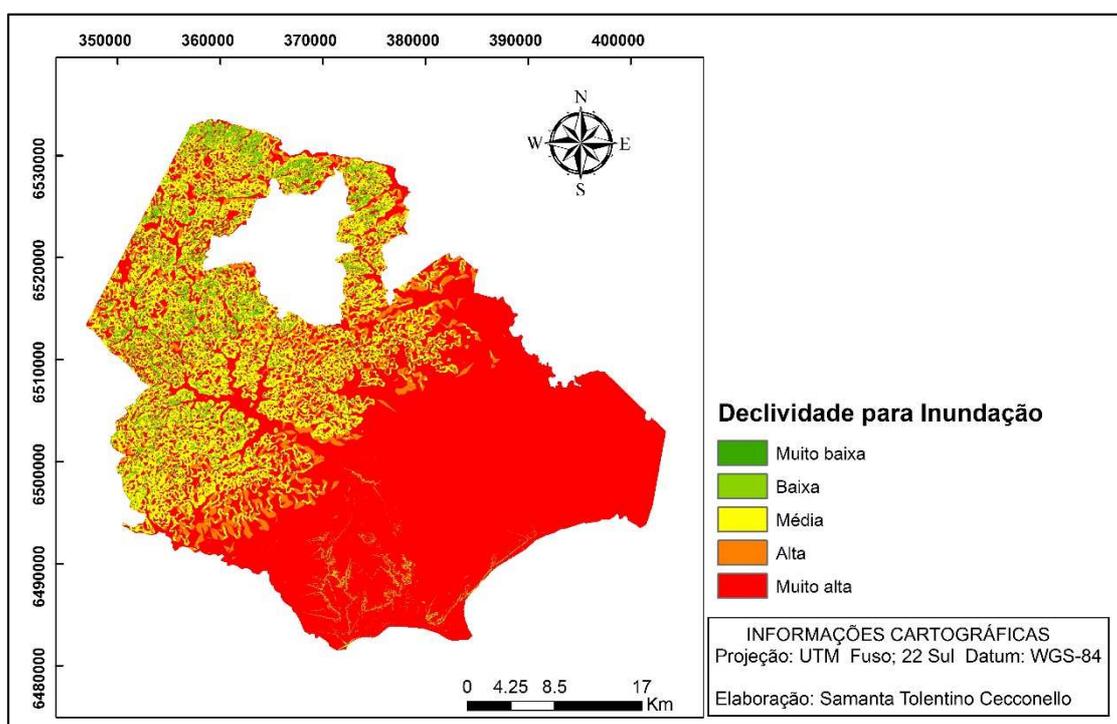


Figura 28: Mapa de fragilidade quanto à declividade para inundação.

Observa-se que a área com declividade inferior a 3% é a área que apresenta classificação muito alta para fragilidade, pois quanto menor for a declividade, maior será a probabilidade de acumular água. Esta área representa 64,83% da área total do município, o que somadas às classes média e alta, representam uma área total de 91,68% (Tabela 33).

Tabela 33: Áreas de declividade e percentual de área ocupada pelas classes de declividade para compor o elemento inundação para o município de Pelotas.

Intervalos de declividade	Forma de Relevo	Área ocupada		Fragilidade
		(Km <sup>2</sup> )	(%)	
0 a 3%	Plano	1043.90	64.83	Muito alta
3 a 8%	Suavemente ondulado	116.43	7.23	Alta
8 a 20%	Ondulado	315.82	19.62	Média
20 a 45%	Fortemente ondulado	123.62	7.68	Baixa
Acima de 45%	Montanhoso	10.31	0.64	Muito baixa
Área total de Pelotas		1610.09	100.00	

Portanto, o parâmetro declividade apresenta elevada representatividade para compor o modelo do elemento inundação.

Com relação ao mapa de fragilidade quanto à altitude para a inundação, observa-se que o município de Pelotas apresenta 96,09% da área total do município com fragilidade variando entre média a muito alta, conforme se observa na Tabela 34. Isso demonstra que a água tende a ser direcionada para os pontos mais baixos do terreno, devido a ação da gravidade e topografia do terreno.

Tabela 34: Áreas de altitude e percentual de área ocupada pelas classes de altitude para compor o elemento inundação para o município de Pelotas.

Intervalos de declividade	Área ocupada		Fragilidade
	(Km <sup>2</sup> )	(%)	
0 a 80m	1116,18	69,32	Muito alta
81 a 160m	176,61	10,97	Alta
161 a 240m	254,34	15,80	Média
241 a 320m	59,84	3,72	Baixa
321 a 400m	3,12	0,19	Muito baixa
Área total de Pelotas	1610.09	100.00	

Na Figura 29 está apresentado o mapa de fragilidade quanto à altitude para compor o elemento inundação. Pode-se desta forma, inferir que a altitude se apresenta como um parâmetro importante para ser ponderado no modelo de inundação, porém entre a declividade e altitude, a declividade para a inundação

se mostra mais relevante, pois está diretamente relacionada à acumulação de água sobre a superfície.

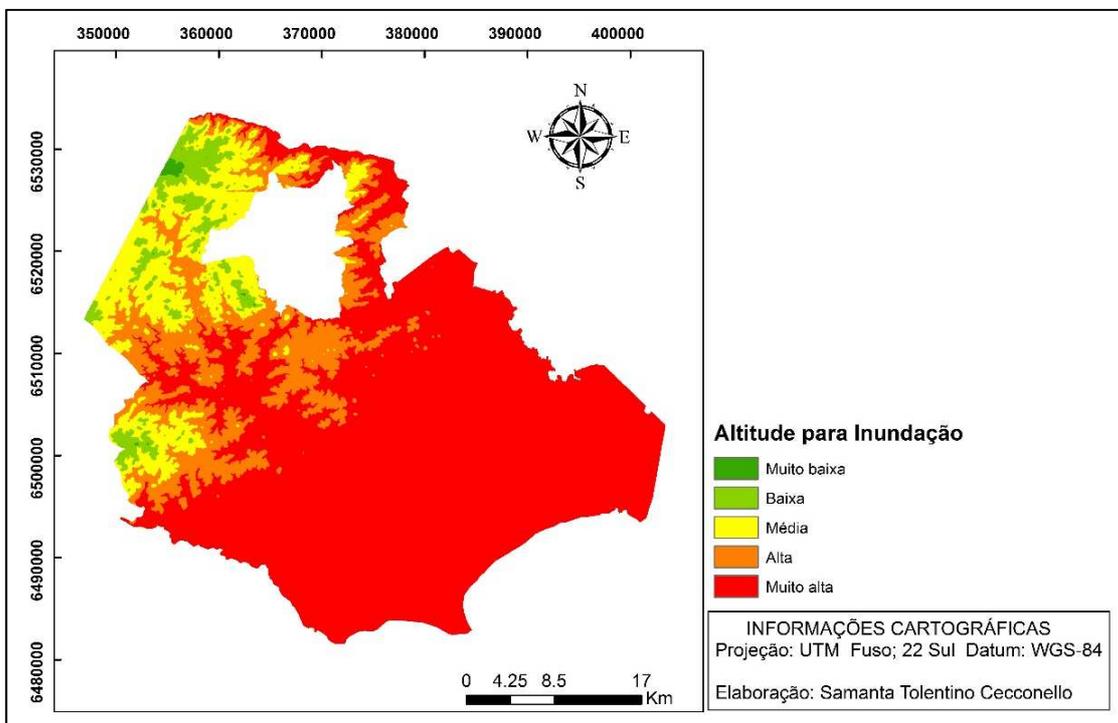


Figura 29: Mapa de fragilidade quanto à altitude para inundação.

O mapa do tipo de solo que irá compor o modelo de inundação, assim como o de uso e ocupação da terra são os mesmos descritos anteriormente. A fragilidade baixa no mapa de tipos de solos pode ser relacionada às características dos Planossolos, que apresentam textura arenosa o que facilita a infiltração da água no solo, lentamente (CUNHA; SILVEIRA; SEVERO, 2006). A fragilidade baixa representa uma área total de 26,12%. A fragilidade muito alta apresenta características de solos muito mal drenados, de textura média a argilosa e de solos orgânicos, além de apresentar afloramentos rochosos em áreas mais elevadas. Como pode-se observar na Figura 30, a área de maior fragilidade quanto ao tipo de solo, abrange toda a costa da Laguna dos Patos e boa parte da área urbana de Pelotas.

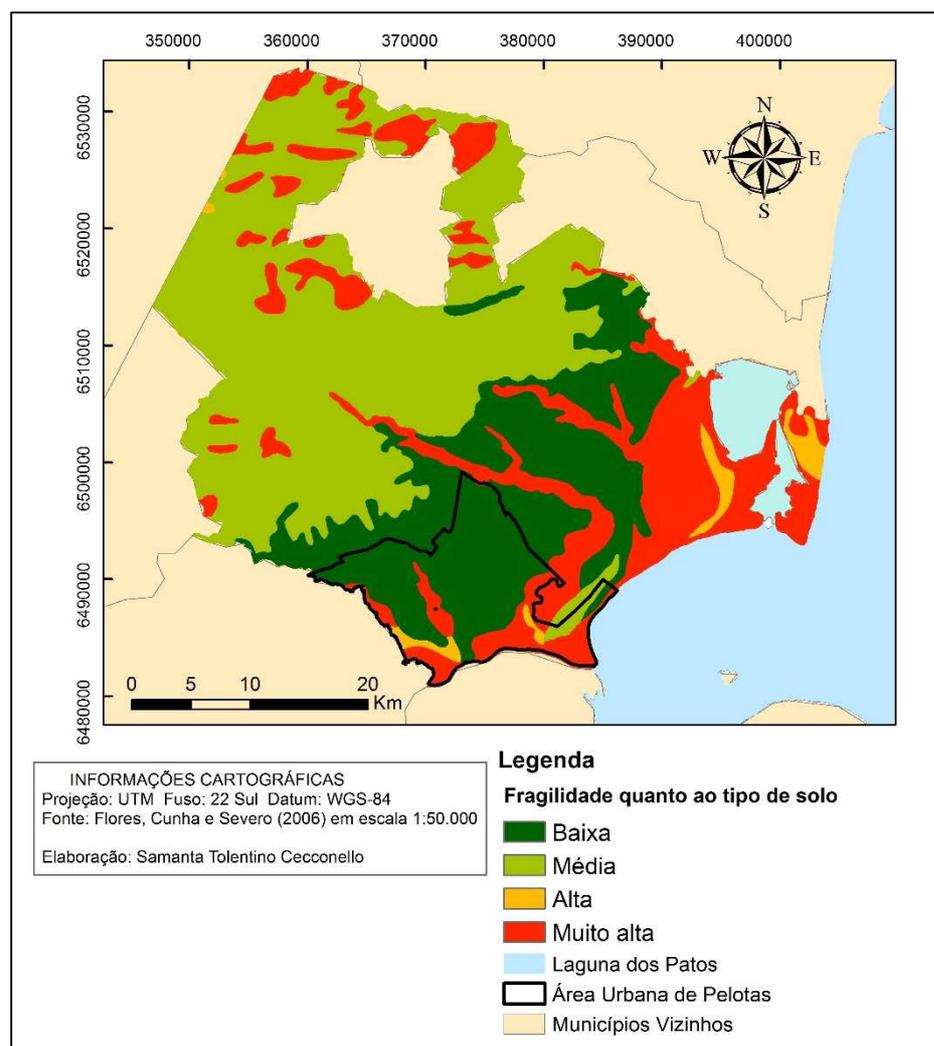


Figura 30: Mapa de fragilidade quanto ao tipo de solo para inundação.

A Tabela 35 apresenta os percentuais das áreas em cada classe de fragilidade quanto ao tipo de solo.

Tabela 35: Áreas dos tipos de solos e percentual de área ocupada pelas classes de tipos de solos para compor o elemento inundação para o município de Pelotas.

Tipo de Solos	Área		Índice de Fragilidade Ambiental
	Km <sup>2</sup>	%	
Planossolos.	420,61	26,12	Baixa
Argissolos	760,42	47,23	Média
Cambissolos, Espodossolos	69,06	4,29	Alta
Neossolos, Gleissolos, Organossolos	360,0	22,36	Muito alta
<b>Total</b>	<b>1610,09</b>	<b>100</b>	

O somatório das classes de fragilidade quanto ao tipo de solo média, alta e muito alta resultam em 73,88% da área total do município, o que indica que estes solos apresentam baixa capacidade de infiltração de água, favorecendo que a mesma acumule sobre a superfície. Os tipos de solos apresentaram-se como um critério de menor importância comparado à declividade e altitude.

Com relação ao uso e ocupação da terra como elemento para compor o modelo de fragilidade do elemento inundação, percebe-se que a fragilidade apresentou classe muito baixa, alta e muito alta, onde as áreas ocupadas por cada classe podem ser observadas na Tabela 36.

Tabela 36: Classificação da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra.

Classes de Uso e ocupação da terra	Área		Índice de Fragilidade Ambiental
	Km <sup>2</sup>	%	
Mata nativa/Vegetação arbórea	114,79	7,13	Muito baixa
Pastagem/Agricultura	820,74	50,97	Alta
Área antropizada, Solo exposto/areia, Banhados e massa d'água	674,56	41,90	Muito alta
<b>Total</b>	<b>1610,09</b>	<b>100</b>	

Como o uso e ocupação da terra apresentou 92,87% da área total do município com alta e muito alta fragilidade, foi considerada de importância menor que a declividade e altitude, porém maior que os tipos de solos. O uso e ocupação da terra mesmo apresentando áreas maiores que a declividade e altitude, foi classificada de menor importância, pois as áreas de massa d'água e banhado foram consideradas como de alta fragilidade, o que aumenta o percentual da área de classe alta, além do mais, a literatura indica que a declividade e altitude sejam as de maior importância na dinâmica dos processos de inundação. Portanto, o mapeamento da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra para ser incorporado ao modelo de inundação pode ser observado na Figura 31.

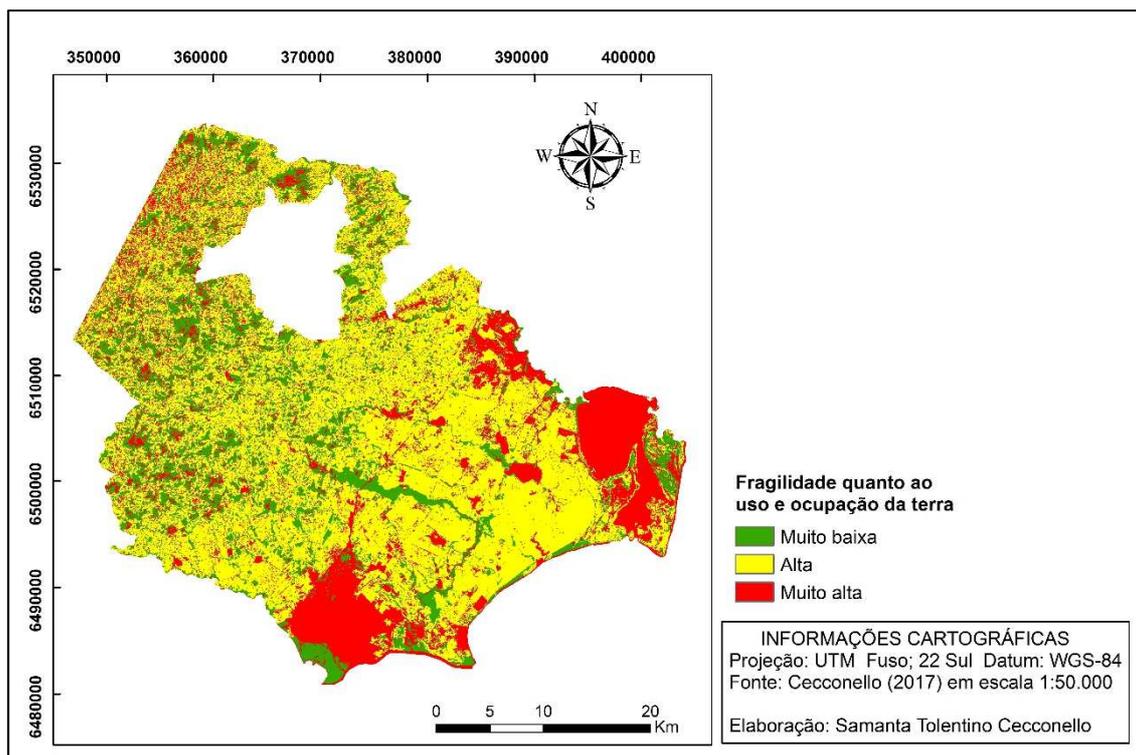


Figura 31: Mapeamento da fragilidade quanto ao uso e ocupação da terra para inundação.

O mapa de inundação foi obtido pelo cruzamento dos quatro planos de informação, na qual foram ponderados de acordo com a metodologia de análise hierárquica de processos, conforme determina Saaty (1977). A importância entre os elementos foi testada na calculadora AHP através do website AHP-OS (GOEPEL, 2018), de modo que fosse obtido uma RC menor que 10%. A Figura 32 apresenta o ambiente online da calculadora AHP.

### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 4

### Pairwise Comparison AHP priorities

6 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Altitude	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo or <input checked="" type="radio"/> Altitude	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input type="radio"/> Altitude or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 4.3% OK

dec. comma

Figura 32: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento inundação.

No ambiente online, foi definido o nome dos elementos que ir o fazer parte da matriz de compara o pareada, neste caso, altitude, declividade, uso e ocupa o da terra e tipos de solos. Após, foi realizada a compara o entre os elementos de dois a dois, onde foram dadas as notas de acordo com os critérios de Saaty (1977), baseada na importância que os elementos apresentaram quanto ao percentual de área com maiores fragilidades. Como resultado se obteve a matriz de compara o apresentada na Figura 32 e no mesmo ambiente já   calculada a razão de Consistência (RC). Os pesos de cada elemento também são fornecidos diretamente pela calculadora AHP em ambiente online, como pode ser observado na Figura 33.

Category	Priority	Rank
1 Tipos de Solos	5.5%	4
2 Uso e Ocupação do Solo	11.8%	3
3 Altitude	26.2%	2
4 Declividade	56.5%	1

Number of comparisons = 6  
Consistency Ratio CR = 4.3%

Figura 33: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.

No apêndice 3 pode ser observada todas informações obtidas através da calculadora AHP em ambiente online para o mapeamento da fragilidade quanto ao elemento inundação.

Percebe-se que o valor da raiz de consistência foi de 0,043, sendo desta forma inferior à 0,1, conforme determina Saaty (1977), portanto, pode-se dizer que os pesos obtidos através da hierarquização dos elementos ambientais são confiáveis.

Após a definição dos pesos, realizou-se a modelagem da fragilidade para o elemento inundação no software ArcGis através da álgebra de mapas, utilizando a Equação 12 e o resultado obtido pode ser visualizado na Figura 34.

$$F_{\text{inundação}} = 0,565 * DEC + 0,262 * ALT + 0,118 * UC + 0,055 * TS \quad (12)$$

Onde:

$F_{\text{inundação}}$ : Grau de fragilidade relativo ao elemento Inundação

DEC: Grau de fragilidade relativo ao critério Declividade

ALT: Grau de fragilidade relativo ao critério Altitude

UC: Grau de fragilidade relativo ao critério Uso e ocupação da terra

TS: Grau de fragilidade relativo ao critério Tipo de solo

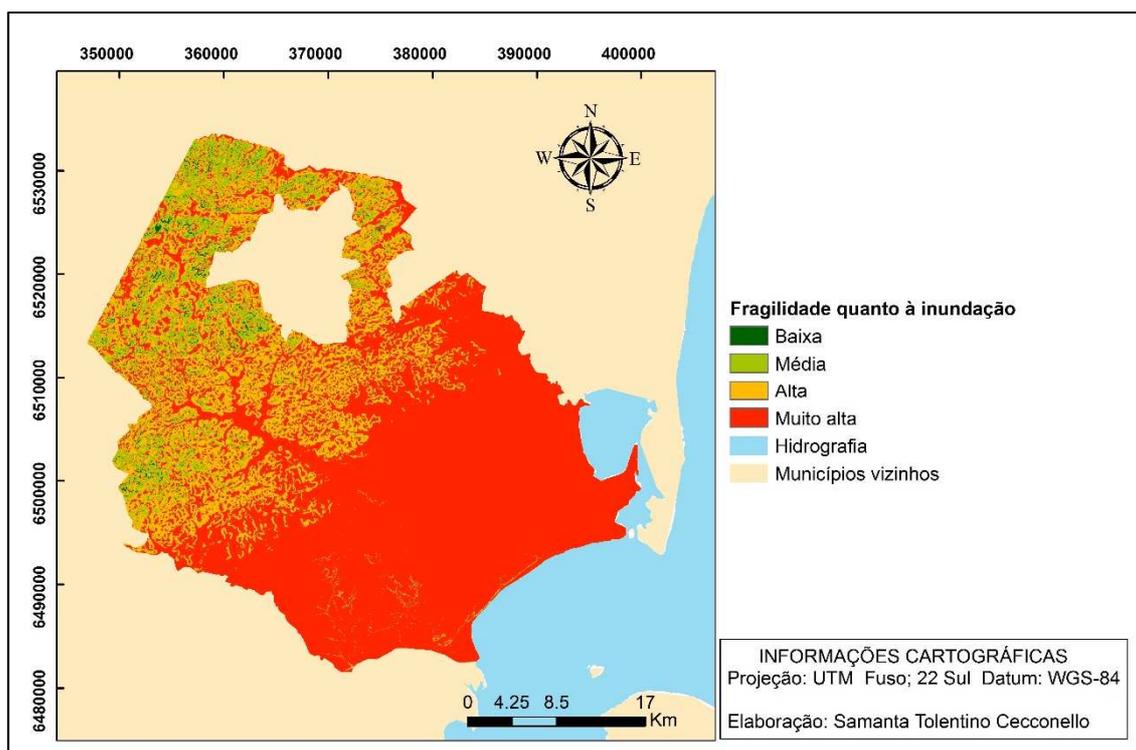


Figura 34: Mapa de fragilidade à inundação para Pelotas.

As áreas mais propensas à inundação sendo classificadas como muito alta, ocupam uma área de 996,56 Km<sup>2</sup> o que totaliza 61,89% da área total do município, seguida pela classe de alta fragilidade (27,89%) representadas pelas cores vermelho e laranja respectivamente. As demais classes representam pequenas áreas do município 9,63% de média fragilidade e 0,58% de baixa fragilidade, estando presente nas partes mais elevadas do município. Enquanto as de maior fragilidade nas partes em que a altitude é inferior a 80 metros e declividade inferior a 3%.

Percebe-se também que as áreas consideradas de maior fragilidade estão concentradas próximas dos principais mananciais do município, Canal São Gonçalo e Laguna dos Patos, que acabam escoando toda a água da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

Nestas áreas também se concentram edificações que acabam por dificultar a infiltração da água de chuva no solo, aumentando o escoamento superficial e pelo fato de estarem inseridas em áreas, onde os solos são caracterizados como mal drenados, o que conjuntamente com a declividade aumentam a suscetibilidade à inundação.

Segundo estudos de Rezende, Marques e Oliveira (2017) e Ladwig et al. (2017), as áreas urbanas são as mais afetadas pela inundação e intensificam o processo, pois contribuem muito com a impermeabilização do solo, dificultando a infiltração da água da chuva.

Vale destacar a importância de se realizar o planejamento urbano, de modo a considerar as áreas com maiores probabilidades de sofrerem processos de inundação e com isso, buscar medidas que visem à redução dos danos à sociedade que pode ser afetada diretamente pela inundação.

#### **5.1.11 Mapeamento da fragilidade à erosão**

O conhecimento das características físicas do ambiente se torna importante para se identificar a suscetibilidade à erosão, para que seja possível um planejamento das atividades antrópicas sob o território, visando reduzir as perdas de solo.

O mapeamento da fragilidade à erosão considerou cinco critérios já descritos e discutidos nesta pesquisa. Visando objetivar este item, resumiu-se a importância e as características destes parâmetros na Tabela 37.

Tabela 37: Características e classificação dos critérios que irão compor o mapa de fragilidade à erosão para Pelotas.

Elemento	Formas encontradas	Característica	Valor de fragilidade
Litologia	Areia/ Argila/ Turfa	Sedimentos facilmente transportados que favorecem a perda de solo	5
	Granito/ Sianogranulito	Rochas duras que apresentam baixa fragilidade, pois são resistentes ao processo de intemperismo	1
Declividade	0 -3%	A medida que aumenta a declividade, os processos de intemperismo são favorecidos, aumentando os processos de desagregação e transporte de sedimentos.	1
	3 – 8%		2
	8 – 20%		3
	20 – 45%		4
	Acima de 45%		5
Tipos de solos	Planossolos	Solos que apresentam fraca suscetibilidade à erosão	2
	Argissolos	Solos que apresentam moderada suscetibilidade à erosão, porém apresentam textura argilosa	3
	Espodossolo e Cambissolos	Solos que apresentam moderada suscetibilidade à erosão, porém apresentam textura arenosa	4
	Neossolos, Organossolos e Gleissolos	Solos extremamente frágeis devido às características de drenagem e textura	5
Uso e cobertura da terra	Mata Nativa	A cobertura vegetal é um fator determinante na manutenção das vertentes, de modo que, controla o escoamento superficial e a infiltração de água. Apresenta baixa fragilidade à erosão.	1
	Pastagem/ Agricultura	O cultivo e as práticas agrícolas desagregam as partículas do solo, favorecendo os processos erosivos	4
	Área Antropizada	São áreas que modificam a dinâmica do ambiente, favorecendo os processos erosivos.	5
	Solo exposto	Não há cobertura que proteja o solo, intensificando os processos erosivos	5
Pluviosidade	Massa d`água	Áreas naturalmente frágeis em que os sedimentos se depositam	5
	1305,92mm a 1547,17 mm	É um fator responsável por provocar a saturação do solo ou rocha, aumentando a desagregação de partículas e favorecendo a desestabilidade das encostas e aumento no transporte de sedimentos.	2

A compilação contida na Figura 35 apresenta os cinco critérios que compuseram o mapeamento da fragilidade à erosão.

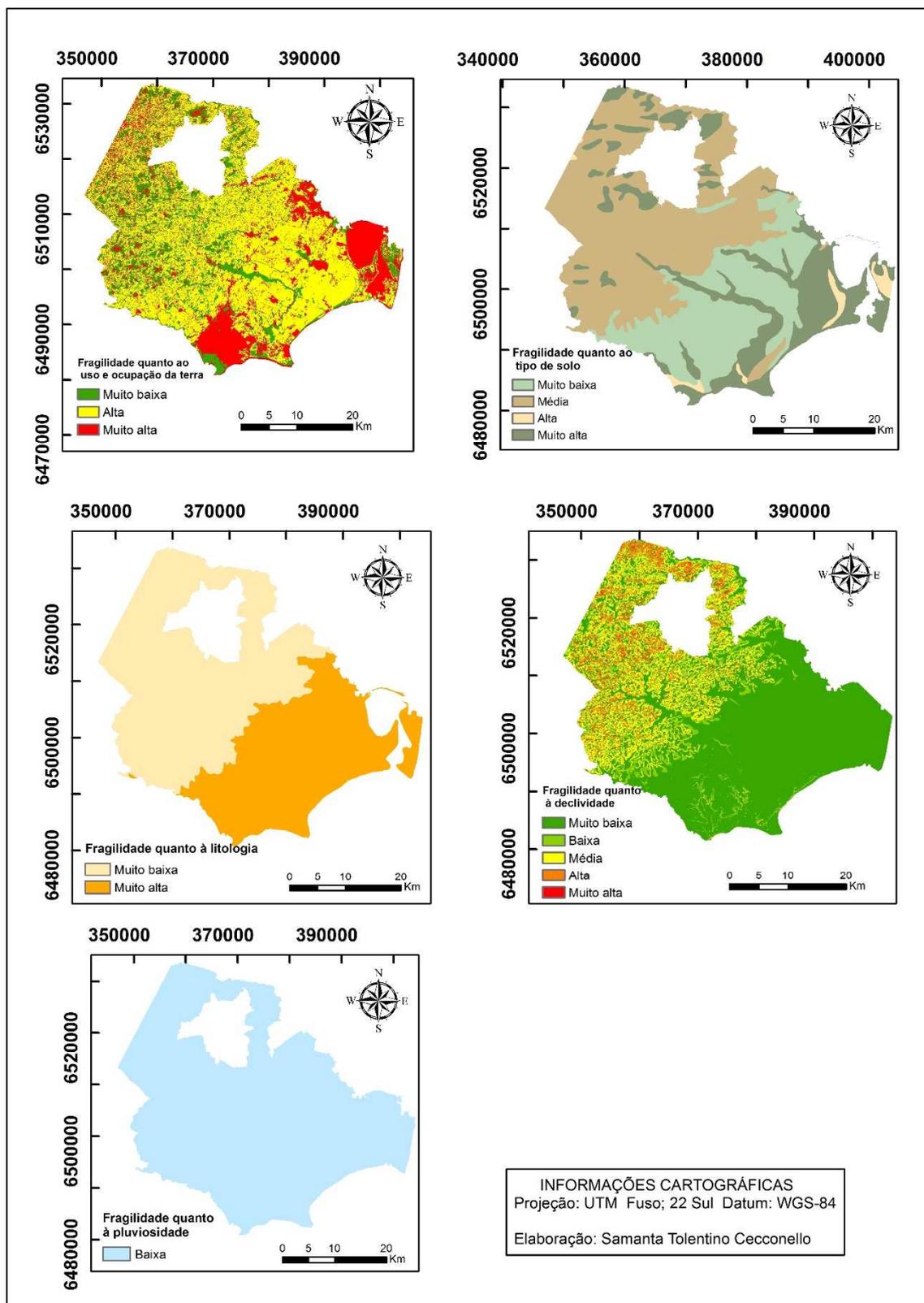


Figura 35: Elementos que compuseram o modelo de fragilidade à erosão.

O mapa de fragilidade à erosão foi obtido pelo cruzamento dos cinco planos de informação, na qual foram ponderados de acordo com a metodologia da análise hierárquica de processos, conforme determina Saaty (1977).

### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20)

### Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Litologia	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input checked="" type="radio"/> 9	
2	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Uso do Solo	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
3	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> tipos de solos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
4	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> pluviosidade	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
5	<input type="radio"/> Litologia or <input checked="" type="radio"/> Uso do Solo	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
6	<input type="radio"/> Litologia or <input checked="" type="radio"/> tipos de solos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
7	<input checked="" type="radio"/> Litologia or <input type="radio"/> pluviosidade	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
8	<input checked="" type="radio"/> Uso do Solo or <input type="radio"/> tipos de solos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
9	<input checked="" type="radio"/> Uso do Solo or <input type="radio"/> pluviosidade	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
10	<input checked="" type="radio"/> tipos de solos or <input type="radio"/> pluviosidade	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	

CR = 6.8% OK

dec. comma

Figura 36: Ambiente online da calculadora AHP para o elemento erosão.

O valor 2 adotado para a comparação entre declividade e uso e cobertura da terra, corresponde a importância intermediária que o elemento declividade apresenta quando comparada ao uso e cobertura, pois para a pesquisadora, ele não é igual e nem imediatamente superior ao uso e cobertura da terra, pois ambos os elementos são importantes nos processos erosivos. A declividade ainda se apresenta como o fator mais importante para os processos erosivos,

seguido do uso e cobertura da terra, pois em áreas de elevada declividade há maior velocidade de fluxo de água, favorecendo a desagregação das partículas. Este fator é ainda mais relevante quando não há cobertura vegetal para reter o fluxo de água e de arraste de sedimentos.

No ambiente online, foi definido o nome dos elementos que fizeram parte da matriz de comparação pareada, neste caso, declividade, uso e ocupação da terra, litologia, pluviosidade e tipos de solos. Após, foi realizada a comparação entre os elementos de dois a dois, onde foram dadas as notas de acordo com os critérios de Saaty (1977). No mesmo ambiente já foi calculada a razão de Consistência (RC). Os pesos de cada elemento também são fornecidos diretamente pela calculadora AHP em ambiente online, como pode ser observado na Figura 37.

Category	Priority	Rank
1 Declividade	42.0%	1
2 Litologia	4.3%	4
3 Uso do Solo	35.2%	2
4 tipos de solos	14.5%	3
5 pluviosidade	4.0%	5

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 6.8%

Figura 37: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.

No apêndice 4 pode ser observada todas informações obtidas através da calculadora AHP em ambiente online para o mapeamento da fragilidade quanto ao elemento erosão.

Percebe-se que o valor da raiz de consistência foi de 0,068, sendo desta forma inferior à 0,1, conforme determina Saaty (1977), desta forma pode-se dizer que os pesos obtidos através da hierarquização dos elementos ambientais são confiáveis e coerentes.

Após a obtenção dos pesos, realizou-se a modelagem da fragilidade para o elemento erosão, utilizando a Equação 13 e o resultado pode ser verificado na Figura 38.

$$FE_{\text{erosão}} = 0,42 \cdot DEC + 0,352 \cdot UC + 0,145 \cdot TS + 0,043 \cdot LIT + 0,04 \cdot PLU \quad (13)$$

Onde:

$FE_{\text{erosão}}$ : Grau de fragilidade relativo ao elemento Erosão

DEC: Grau de fragilidade relativo ao critério Declividade

UC: Grau de fragilidade relativo ao critério Uso e ocupação da terra

TS: Grau de fragilidade relativo ao critério Tipo de solo

LIT: Grau de fragilidade relativo ao critério Litologia

PLU: Grau de fragilidade relativo ao critério Pluviosidade

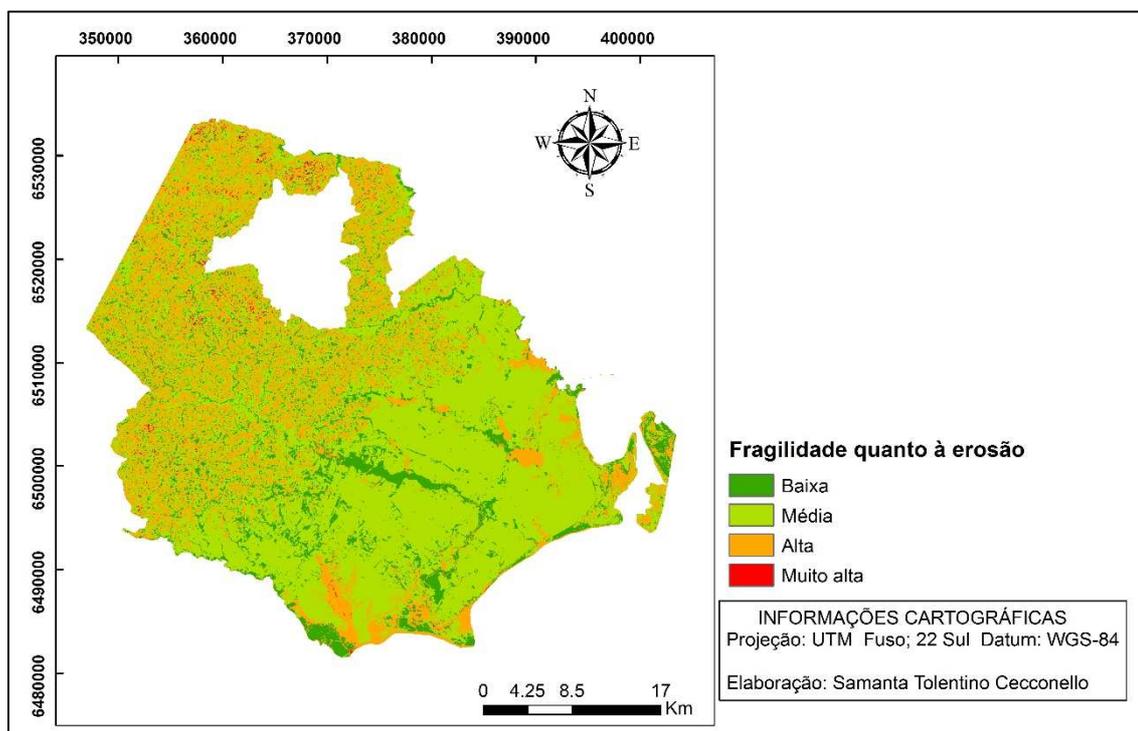


Figura 38: Mapa de fragilidade à erosão para Pelotas.

As áreas mais propensas à erosão apresentam fragilidade considerada como muito alta, o que totaliza 0,52% da área total do município, seguida pela

classe de alta fragilidade (24,28%) representadas pelas cores vermelho e laranja respectivamente. Porém, a classe que representa a maior área é a de média fragilidade, ocupando o correspondente a 64,46% da área total. A classe de menor fragilidade à erosão é a classe baixa com 10,75% de área.

Observa-se que as áreas de maior fragilidade estão situadas na parte mais elevada, porém destaca-se o fato de que em áreas de menor declividade houveram áreas com alta fragilidade. Este fato pode ser explicado, pois há no município extensa área agrícola, o que contribui com a desagregação de partículas, assim como, nas áreas de baixa declividade em que há presença de solo exposto (CECCONELLO, 2017).

Percebe-se também que as áreas consideradas de menor fragilidade estão concentradas próximas dos principais recursos hídricos, corroborando com a justificativa de que as áreas de mata ciliar, fazem a proteção contra a erosão (SILVA, MACHADO, 2014). Os banhados também se apresentaram como áreas importantes no controle da erosão, apresentando baixa fragilidade. Segundo Silva e Machado (2014) em regiões onde há cobertura vegetal, estas funcionam como “defesa natural de um terreno contra a erosão”, sugerindo que a simples presença de cobertura vegetal já ameniza os processos erosivos.

A área urbana do município contribui também para a elevada fragilidade à erosão, pois nestas áreas há atuação antrópica, principalmente, devido à retirada de cobertura vegetal e realização de terraplanagem, além da ocupação de áreas de várzea.

## **5.2. Mapeamento das fragilidades: potencial e emergente**

Neste item será discutido o mapeamento dos elementos intrínsecos ao ambiente, ou seja, as características naturais que independem da ação humana. Em um segundo momento, os elementos ambientais que são intensificados pelas ações antrópicas, denominada de fragilidade emergente. Por fim, será analisado o mapeamento da fragilidade ambiental para o município de Pelotas através da junção das fragilidades potenciais e emergentes.

### 5.2.1 Mapeamento da fragilidade potencial ou natural

O cruzamento dos cinco elementos inerentes ao ambiente natural e que apresentam fragilidades que independem das ações antrópicas resultou no mapa de fragilidade potencial. Os elementos aqui incluídos foram: declividade, tipos de solo, litologia, águas subterrâneas e pluviosidade.

O mapa de fragilidade potencial foi obtido pelo cruzamento dos cinco planos de informação, na qual foram ponderados de acordo com a metodologia da análise hierárquica de processos, conforme determina Saaty (1977).

A importância dada ao elemento declividade se deu em decorrência do mesmo ter sido classificado como de maior peso em dois elementos: inundação e erosão. O tipo de solos foi o que apresentou o segundo maior peso, pois apresentou 73,88% de áreas com média-alta fragilidade. Já as águas subterrâneas apresentaram classes de fragilidade variando de baixa a alta ficando em terceira no grau de importância, enquanto que a litologia apresentou-se em equilíbrio com as classes muito alta e muito baixa. A pluviosidade por sua vez apresentou classificação baixa. Desta forma os critérios de importância seriam, na ordem decrescente: declividade, tipos de solo, águas subterrâneas, litologia e pluviosidade. A matriz de comparação pareada pode ser observada na Figura 39.

Input number and names (2 - 20) 5

## Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Tipos de Solos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Aguas Subterrâneas	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input checked="" type="radio"/> Declividade or <input type="radio"/> Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input type="radio"/> Aguas Subterrâneas	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input type="radio"/> Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input type="radio"/> Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	<input checked="" type="radio"/> Aguas Subterrâneas or <input type="radio"/> Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	<input checked="" type="radio"/> Aguas Subterrâneas or <input type="radio"/> Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	<input checked="" type="radio"/> Litologia or <input type="radio"/> Pluviosidade	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
CR = 5,3% OK			
<input type="button" value="Check Consistency"/>		<input type="button" value="Download (.csv)"/> <input type="checkbox"/> dec. comma	

Figura 39: Ambiente online da calculadora AHP para a Fragilidade Potencial.

Após, foi realizada a comparação entre os elementos de dois a dois, obteve-se os pesos de cada elemento, como pode ser observado na Figura 40.

Category	Priority	Rank
1 Declividade	48.3%	1
2 Tipos de Solos	26.9%	2
3 Aguas Subterrâneas	12.8%	3
4 Litologia	6.0%	4
5 Pluviosidade	6.0%	4

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 5.3%

Figura 40: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.

No apêndice 5 pode ser observada todas informações obtidas através da calculadora AHP em ambiente online para o mapeamento da fragilidade potencial.

Percebe-se que o valor da raiz de consistência foi de 0,053, sendo desta forma inferior à 0,1, conforme determina Saaty (1977), desta forma pode-se dizer que os pesos obtidos através da hierarquização dos elementos ambientais pela pesquisadora foram confiáveis e coerentes.

De posse dos pesos, procedeu-se a modelagem da fragilidade potencial software ArcGis através da álgebra de mapas, utilizando a Equação 14.

$$FP_{\text{potencial}} = 0,483*DEC + 0,269*TS + 0,128*AS + 0,06*LIT + 0,06*PLU \quad (14)$$

Onde:

$FP_{\text{potencial}}$ : Grau de fragilidade potencial

DEC: Grau de fragilidade relativo ao critério Declividade

TS: Grau de fragilidade relativo ao critério Tipo de solo

AS: Grau de fragilidade relativo ao critério águas Subterrâneas

LIT: Grau de fragilidade relativo ao critério Litologia

PLU: Grau de fragilidade relativo ao critério Pluviosidade

Como resultado deste modelo, obteve-se o mapeamento da fragilidade potencial conforme a Figura 41.

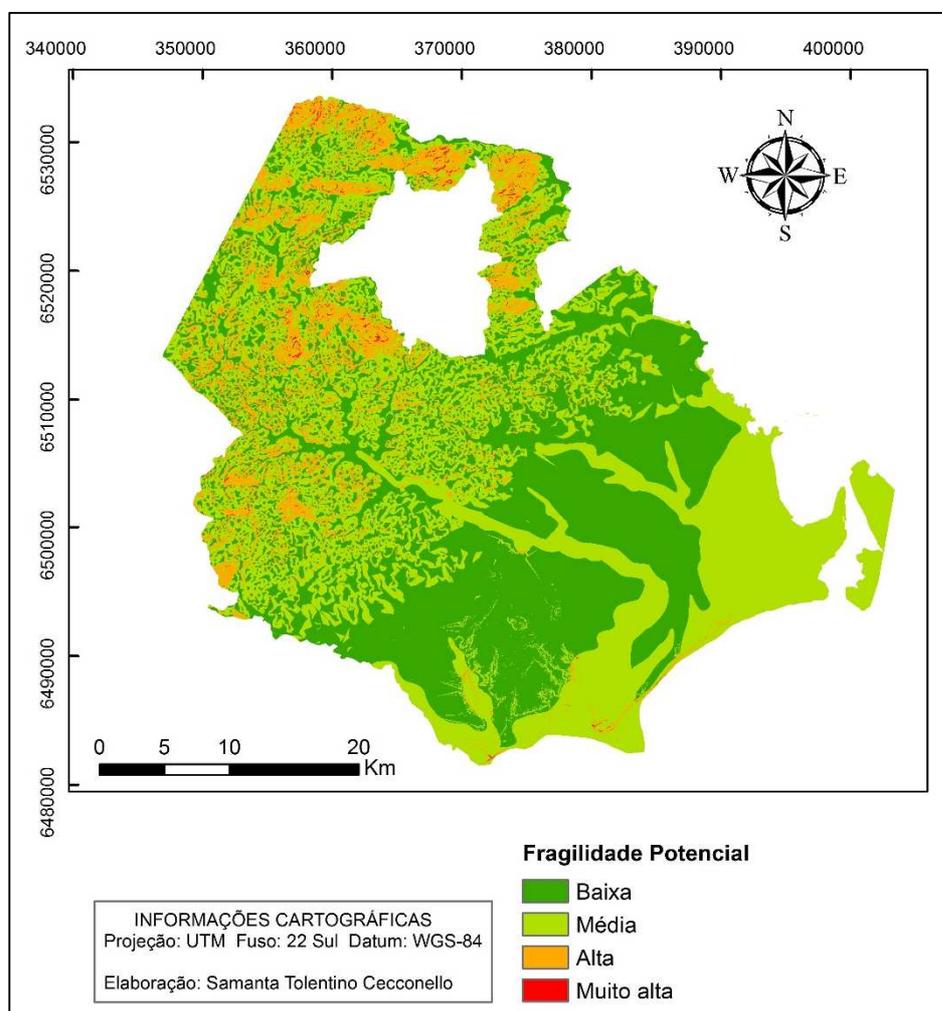


Figura 41: Mapa de Fragilidade Potencial.

O mapeamento da fragilidade potencial apresentou fragilidades variando de baixa a muito alta. As áreas de maior fragilidade se encontram em altas altitudes e declividades, porém na área urbana também aparecem altas fragilidades. Estas áreas localizam na parte leste, próximas a Laguna dos Patos e Canal São Gonçalo, provavelmente o elemento que pesou nestas áreas tenha sido os Organossos presentes nestas áreas.

A maior parte do território municipal apresentou fragilidade natural entre as classes baixa e média, o que corresponde a 89,26%. A Tabela 38 apresenta o quantitativo das áreas e suas respectivas classes de fragilidade potencial.

Tabela 38: Quantitativo das áreas das classes de fragilidade potencial.

Índice de Fragilidade Ambiental	Área	
	Km <sup>2</sup>	%
Baixa	663,65	41,22
Média	773,49	48,04
Alta	169,20	10,51
Muito alta	3,746	0,23
Total	1610,09	100

Deste modo, pode-se perceber que pelas características naturais do ambiente, o município de Pelotas apresenta apenas 10,74% de área com altas fragilidades, necessitando de maiores cuidados.

### 5.2.2 Mapeamento da fragilidade emergente ou antrópica

O cruzamento dos cinco elementos inerentes ao ambiente antrópico resultou no mapa de fragilidade emergente. Os elementos aqui incluídos foram: inundação, saneamento, áreas de preservação permanente, uso e ocupação do solo e erosão.

O mapa de fragilidade emergente foi obtido pelo cruzamento dos cinco planos de informação, na qual foram ponderados de acordo com a metodologia da análise hierárquica de processos, conforme determina Saaty (1977). Os critérios para a escolha da importância dos elementos se basearam no percentual de área de maior fragilidade de cada elemento. A inundação foi o elemento que apresentou maior percentual de área com altas fragilidades (89,78%), seguida do saneamento com 86,07% de área de altas fragilidades. O uso e ocupação apresentou-se como o terceiro elemento com 92,87%, embora apresente maior área, o percentual conta com massa d'água. A classe massa d'água sofre com as ações antrópicas, porém se comparada com o saneamento e a inundação quanto aos efeitos negativos que pode causar ao ambiente natural, apresenta-se moderadamente menos importante, recebendo na matriz nota 1/3. Como a fragilidade das APPs foi a que apresentou 42,35% de área considerada de fragilidade alta- muito alta, ficou no quarto grau de importância, ficando por último o elemento erosão, pois apresentou 24,8% de fragilidade alta – muito alta. A Figura 42 apresenta o ambiente online da calculadora AHP após a definição da importância dos elementos.

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 5

### Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to AHP priorities is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Inundação or <input type="radio"/> Saneamento	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
2	<input checked="" type="radio"/> Inundação or <input type="radio"/> APP	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
3	<input checked="" type="radio"/> Inundação or <input type="radio"/> uso e cobertura	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
4	<input checked="" type="radio"/> Inundação or <input type="radio"/> Erosão	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
5	<input checked="" type="radio"/> Saneamento or <input type="radio"/> APP	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
6	<input checked="" type="radio"/> Saneamento or <input type="radio"/> uso e cobertura	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
7	<input checked="" type="radio"/> Saneamento or <input type="radio"/> Erosão	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
8	<input checked="" type="radio"/> APP or <input type="radio"/> uso e cobertura	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
9	<input checked="" type="radio"/> APP or <input type="radio"/> Erosão	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	
10	<input checked="" type="radio"/> uso e cobertura or <input type="radio"/> Erosão	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9	

Figura 42: Ambiente online da calculadora AHP para a Fragilidade Emergente

Os pesos de cada elemento podem ser observados na Figura 43, assim como a RC para a matriz de comparação.

Priorities			
These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons			
Category		Priority	Rank
1	Inundação	42.4%	1
2	Saneamento	29.9%	2
3	APP	10.9%	4
4	uso e cobertura	11.7%	3
5	Erosão	5.1%	5

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 7.0%

Figura 43: Pesos estabelecidos para os elementos que irão compor o modelo após comparação pareada.

No apêndice 6 pode ser observada todas informações obtidas através da calculadora AHP em ambiente online para o mapeamento da fragilidade emergente.

Percebe-se que o valor da raiz de consistência foi de 0,07, sendo desta forma inferior à 0,1, conforme determina Saaty (1977), desta forma pode-se dizer que os pesos obtidos através da hierarquização dos elementos ambientais pela pesquisadora são confiáveis. A modelagem da fragilidade emergente foi gerada utilizando a Equação 15, e como resultado da modelagem foi obtida a Figura 44.

$$FE_{\text{emergente}} = 0,424*I + 0,299*S + 0,117*UC + 0,109*APP + 0,051*E \quad (15)$$

Onde:

$FE_{\text{emergente}}$ : Grau de fragilidade emergente

I: Grau de fragilidade relativo ao critério Inundação

S: Grau de fragilidade relativo ao critério Saneamento

UC: Grau de fragilidade relativo ao critério Uso e ocupação da terra

APP: Grau de fragilidade relativo ao critério Áreas de preservação

Permanente

E: Grau de fragilidade relativo ao critério Erosão

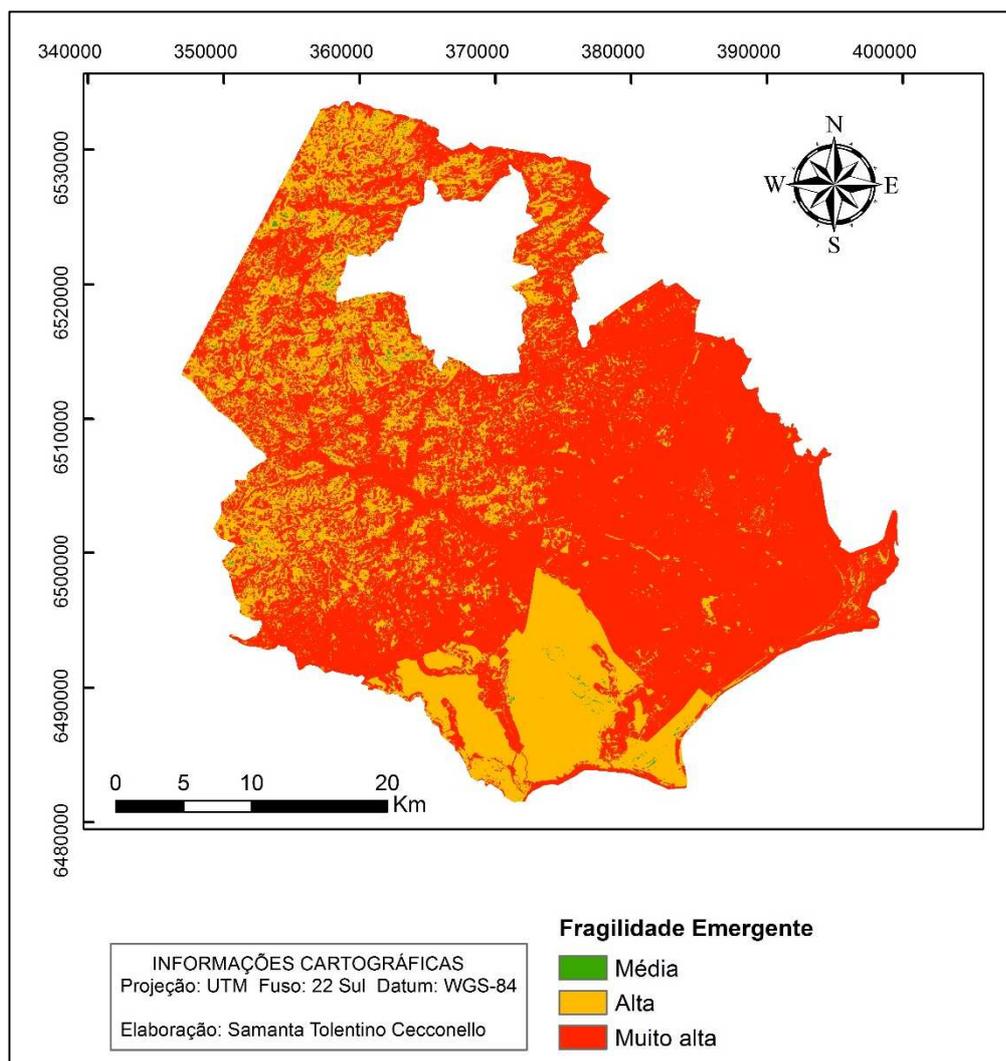


Figura 44: Mapa de Fragilidade Emergente.

O mapeamento da fragilidade emergente apresentou fragilidades variando de média a muito alta. As áreas de menor fragilidade se encontram em altas altitudes e em pequenos fragmentos na área urbana, porém na área urbana o que prevalece é a fragilidade classificada como alta. Na área rural do município o grau de fragilidade foi muito alto, fator que pode ser explicado pelo fato da zona rural não apresentar saneamento adequado, apresentar extensas áreas de solo exposto e de solos agriculturáveis e por não apresentar áreas de mata ciliar conforme determina a legislação ambiental e por apresentar elevadas áreas de relevo plano.

A área urbana mesmo possuindo condições adequadas de saneamento, e apresentando média fragilidade com relação à erosão, apresenta uma área

impermeável e que, atrelado aos processos de urbanização, contribuem para áreas de inundação, sendo este parâmetro o de maior peso, e que influenciou a alta fragilidade nesta área do município.

A Tabela 39 apresenta o quantitativo das áreas e suas respectivas classes de fragilidade emergente.

Tabela 38: Quantitativo das áreas das classes de fragilidade emergente.

Índice de Fragilidade Ambiental	Área	
	Km <sup>2</sup>	%
Média	4,80	0,30
Alta	549,98	34,16
Muito alta	1055,3	65,54
<b>Total</b>	<b>1610,09</b>	<b>100</b>

Deste modo, pode-se perceber que pelas características do ambiente intensificadas pela ação antrópica, o município de Pelotas apresenta 99,7% de área com altas fragilidades.

Comparando-se os mapas de fragilidade potencial (Figura 41) e emergente (Figura 44), observam-se diferenças significativas. Com exceção da classe de fragilidade baixa que não existe no mapa de fragilidade emergente, as outras classes abrangem extensões maiores do município no mapa de fragilidade emergente; incluindo-se a classe muito alta (5), a qual não tem representatividade na fragilidade natural; a fragilidade média decresceu em 47,74%, enquanto que a classe fragilidade alta (4) teve um acréscimo de 23,65%.

Ainda pode-se verificar que o elemento inundação é influenciado pelo uso e cobertura da terra, o que favorece a sua maior ponderação no modelo de fragilidade emergente. Fica claro que as atividades antrópicas interferem na dinâmica do ambiente de modo a desestabilizá-lo. Deste modo, a fragilidade emergente (Figura 44) do município de Pelotas quanto a inserção e expansão dos diversos usos da terra, requer maior controle com medidas protetivas, que visam a exploração antrópica associada às práticas conservacionistas do solo, buscando reduzir os impactos antrópicos sob o ambiente.

### 5.2.3 Mapeamento da fragilidade ambiental do município de Pelotas

A integralização dos elementos ambientais foi realizada após o mapeamento dos elementos supracitados, resultando no mapeamento final da fragilidade ambiental para Pelotas. Sendo assim, a Figura 45 mostra a integração das fragilidades potencial e emergente.

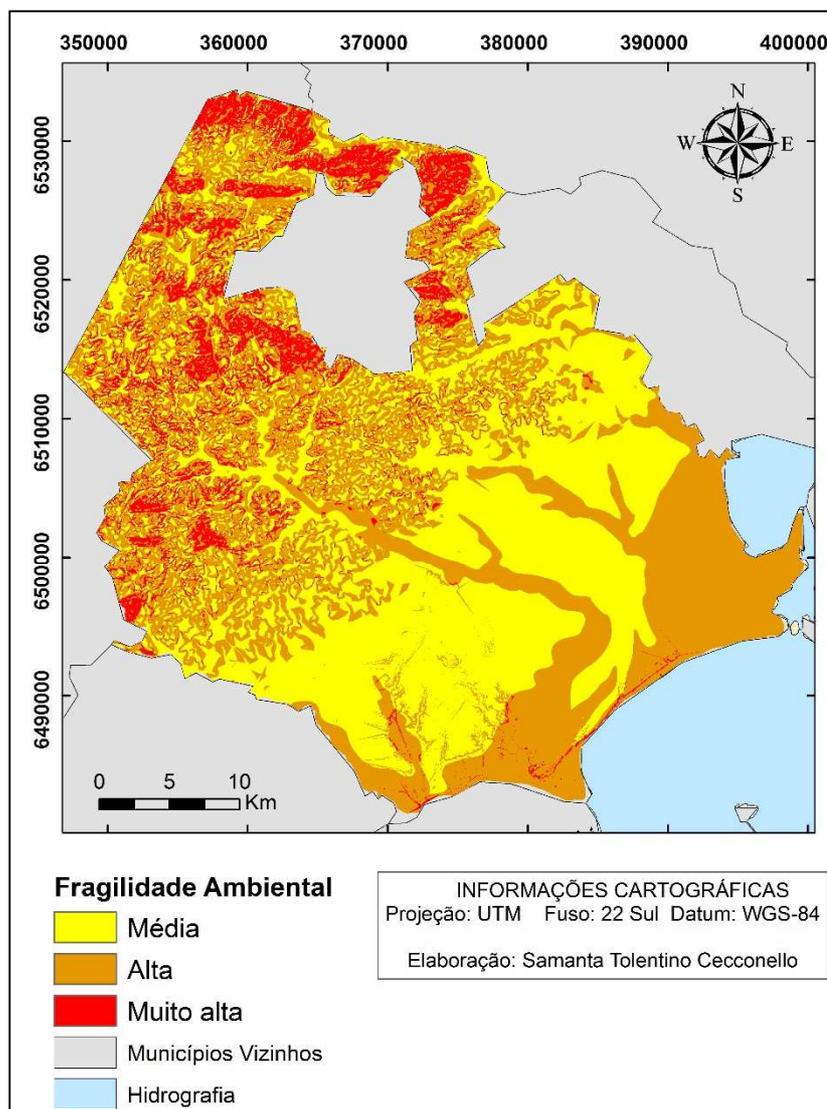


Figura 45: Mapeamento da fragilidade ambiental para o município de Pelotas.

O mapa de fragilidade ambiental demonstra que a fragilidade variou de média a muito alta, sendo que, as classes de maior representatividade são a média e alta, como pode ser verificado na Tabela 39.

Tabela 39: Quantitativo das áreas de fragilidade ambiental em cada classe.

Índice de Fragilidade Ambiental	Área	
	Km <sup>2</sup>	%
Média	794,98	49,37
Alta	553,11	34,36
Muito alta	262,00	16,27
<b>Total</b>	<b>1610,09</b>	<b>100</b>

A classe expressa como fragilidade ambiental média é composta por uma área de 794,98Km<sup>2</sup>, representando 49,37% do total. Suas declividades variam de 0 a valores que ultrapassam 20% e abrangem os Planossolos e Argissolos. A cobertura e uso preponderante nessa classe são a agricultura e pastagem. Como já foi discutido anteriormente, os Planossolos apresentam fraca suscetibilidade à erosão e permitem que a água infiltre no solo, devido a sua textura arenosa. Fator este que, colabora para que estas áreas sejam de média fragilidade ambiental.

As frações de fragilidade ambiental alta compreendem uma área de 553,11Km<sup>2</sup>, equivalendo a 34,36% do total da área de estudo. Predominam cinco tipos de solos, os Organossolos, Espodossolos, Neossolos, Gleissolos e Argilossolos, sendo considerados solos de alta e muito alta fragilidade. Predominam áreas com APP, pastagem, agricultura e a parte urbana próxima à Laguna dos Patos, assim como, há predominância de fragilidade nas classes alta quanto à contaminação dos aquíferos. Com relação as classificações quanto à inundação e a erosão, nestas áreas também prevalecem altas fragilidades.

Já na classe de fragilidade ambiental muito alta, prevalecem na área as seguintes características: solo exposto, a agricultura e pastagem, Argissolos, relevo ondulado a montanhoso, alta suscetibilidade erosiva. Cabe destacar que os Argissolos, apresentam moderada susceptibilidade a desagregação das partículas, porém, isto dificulta a penetração da água no solo, favorecendo processos de transporte de sedimentos para áreas mais baixas.

O que podemos perceber é que em áreas de fragilidade potencial baixa há predominância de fragilidades ambientais médias, porém em áreas onde ocorrem fragilidades potenciais médias, altas e muito altas, predominam as fragilidades ambientais classificadas como alta e muito alta.

Em contrapartida, em áreas de fragilidade emergente alta ou muito alta, ocorrem fragilidades ambientais variando de média a alta. O que pode ser explicado pelo fato de, ao integrar as fragilidades potencial e emergente, há uma tentativa de equilibrar as fragilidades ambientais. Como por exemplo, na Figura 45 na área urbana a fragilidade emergente estava caracterizada como de fragilidade alta e ao cruzar com a fragilidade potencial caracterizada como sendo de baixa fragilidade, resulta em uma fragilidade ambiental média.

Segundo o estudo de Shaoo, Dhar e Kar (2016) e Liuo, Nguyen e Li (2017) ao realizar o cruzamento das fragilidades potencial e emergente há uma tendência ao equilíbrio das fragilidades ambientais, porém, a fragilidade emergente é a que influencia negativamente, pois leva em consideração apenas as ações antrópicas.

Em contrapartida no estudo de Corte et al. (2015), os autores encontraram resultados inversos a este estudo, onde a fragilidade potencial para a bacia hidrográfica do Rio Iguaçu no Paraná apresentou grandes áreas com fragilidades variando de alta a muito alta enquanto que a fragilidade emergente apresentou grandes áreas de classes baixa e média. Quando estas fragilidades foram integradas houve uma redução no percentual de áreas de classe alta e muito alta. Segundo os autores, a elevada fragilidade potencial é inerente ao ambiente, porém, a fragilidade emergente apresenta resultados positivos quanto à fragilidade, pois há uma gestão adequada na Bacia do Rio Iguaçu, onde são preservadas as nascentes e mata ciliar, valorizando o potencial turístico da região.

Vieira (2018), deixa claro em seu estudo que, em estudos de fragilidade ambiental, o fator humano tem peso maior, uma vez que as intervenções antrópicas alteram o meio natural e podem acarretar consequências negativas para a sociedade.

No caso de Pelotas, esse aspecto foi considerado no mapa de fragilidade emergente elaborado. Porém, verificou-se que os fatores naturais: tipo de solo e declividade provocam uma redução nos graus de fragilidade, quando integradas com a fragilidade emergente. Observa-se ainda que as APPs também tiveram influência sobre a área, pois apresentavam-se como sendo de alta fragilidade no mapa de fragilidade emergente e quando cruzado com uma área de fragilidade natural, resulta em uma área considerada alta e muito alta.

Portanto, mesmo nas áreas em que a fragilidade potencial é média/moderada, poderá apresentar altos níveis de fragilidade emergente, resultando em áreas de elevada fragilidade ambiental, devido ao uso inadequado da terra associado com a presença humana (CORTE et al., 2015).

Deste modo, estas áreas podem ser utilizadas para as atividades socioeconômicas, porém seus usos devem ser mais restritivos, precisam respeitar as APPs ou que sejam incorporadas a estas atividades, um manejo adequado do solo. Estas áreas ainda podem ser exploradas através do seu potencial turístico, incentivando as práticas orgânicas e sustentáveis.

Cabe destacar que o município de Pelotas não apresenta fragilidades ambientais consideradas muito baixas e baixas, sendo preciso assim, repensar a forma com que o crescimento urbano está ocorrendo, bem como as mudanças no uso e cobertura da terra.

Neste intuito, as ações que buscam a ampliação e universalização do saneamento básico nas cidades devem ser incentivadas pelo governo, servindo assim como medidas de proteção para os aquíferos da região (FUNASA, 2007).

Ademais, o mapeamento das fragilidades ambientais de Pelotas pode contribuir como um instrumento de planejamento e gestão do território, pois a partir destes dados espacializados, pode-se buscar o uso racional de áreas com menor fragilidade, com o intuito de garantir o equilíbrio dinâmico do ambiente no município. Isto pode auxiliar ou até mesmo complementar estudos desenvolvidos pelos órgãos de gestão estadual e municipal, buscando uma análise integrada e sustentável do ambiente. É importante frisar que os dados e levantamentos de fragilidade ambiental devem ser atualizados e revisados de tempos em tempos, pois como o ambiente é dinâmico, está em constantes transformações.

Em suma, os estudos de fragilidade ambiental são primordiais para planejar e gerir o ambiente de forma adequada, com as características e limitações que ele apresenta.

## **6 CONCLUSÃO**

Diante deste estudo pode-se concluir que a fragilidade ambiental para o município se apresentou em equilíbrio, apresentando um pouco mais de 50% de áreas consideradas de alta e muito alta fragilidade, sendo, portanto, a fragilidade emergente a que intensifica o grau de fragilidade na região estudada.

A fragilidade potencial encontrada em grande parte da área territorial de Pelotas apresentou bom estado de conservação, sendo que o elemento declividade foi o de maior relevância no modelo, já a fragilidade emergente conteve áreas de alta e muito alta fragilidade, demonstrando que o município necessita de maiores cuidados com relação aos impactos que pode causar no meio ambiente natural.

O uso da Análise Hierárquica de Processos permitiu o mapeamento das fragilidades ambientais dos elementos que compõem o município de Pelotas de forma confiável, facilitando o processo decisório quanto à ponderação dos elementos ambientais analisados. Deste modo, as áreas de fragilidade ambiental consideradas "muito alta e alta" devem ser uma prioridade para a gestão municipal, procurando suavizar os impactos existentes.

Contudo, destaca-se que a aplicação do modelo de fragilidade ambiental de Pelotas deve ser utilizada apenas na fase de planejamento territorial e ambiental, pois pode não representar a realidade de campo e por isso não substitui as verificações de campo quando forem tomadas as decisões de forma pontual, mostrando, portanto, as áreas que merecem atenção especial.

Por fim, cabe salientar que este estudo pretende ainda realizar testes a partir da elaboração de mapas de fragilidade ambiental, estipulando pesos diferentes aos que aqui foram dados para analisar os resultados comparando com os aqui expostos. Assim como, pretende-se realizar pesquisa a campo para validação dos resultados obtidos neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALBANO, M. P.. A importância do planejamento urbano ambiental: habitação social e a expansão urbana em Presidente Prudente, SP. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de PPG em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, 2013.

ANA. Agência Nacional de Águas. Dados de precipitação da zona sul do RS. **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Aquisição dos dados: Agosto de 2018.

ANH, N.K et al. Environmental hazard mapping using GIS and AHP - A case study of Dong Trieu District in Quang Ninh Province, Vietnam. **Earth and Environmental Science**, v. 18, n 2, p 1 – 7, 2014.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo. Ícone. 2012.

BONNA, J. L. Mapeamento Pedológico e de Suscetibilidade Erosiva no Alto Córrego Prata (Ouro Preto-MG). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

BORBA, W, F, de et al, Vulnerabilidade do aquífero à contaminação no município de Seberi/RS, Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas, Santa Maria, v, 14, n, 11, p,2960-2966, fev, 2015.

BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Brasília-DF, 1979. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6766.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.html)>. Acesso em 20 de abril de 2017.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília-DF, 1981. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.html)>. Acesso em 20 de abril de 2017.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002**. Regulamenta o art. 9º, inciso II, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/d4297.html](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4297.html)>. Acesso em 20 de abril de 2017.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 12.651, de 25 de Maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF.

BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento – UPA 24 h. **Gestão & Produção**, S.l, v. 22, n. 04, p.805-819, dez. 2015.

CARMO, J. P. et al. Análise da fragilidade ambiental em áreas urbanas. O caso do município de Londrina - PR. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.0855**, p. 855–862, 2011.

CECCONELLO, S. T. **Análise ambiental dos processos dinâmicos do uso e cobertura da terra sobre as áreas de preservação permanente no município de Pelotas entre os anos de 1985 e 2015**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processos de Imagens Digitais**. Curitiba: UFPR, 2009. 219 p.

CHAKHAR, S.; MOUSSEAU, V.. An algebra for multicriteria spatial modeling. **Computers, Environment And Urban Systems**, [s.l.], v. 31, n. 5, p.572-596, set. 2007.

CORTE, Ana Paula dalla et al. Environmental fragility of Iguaçu river watershed, Paraná, Brazil. **Bosque (valdivia)**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.287-297, 2015. SciELO Comision Nacional de Investigacion Cientifica Y Tecnologica (CONICYT). <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002015000200014>.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado ao Zoneamento Ecológico Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CRUZ, B. B. et al. Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 76, n. 12, p.441-454, jun. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-017-6778-3>.

CUNHA, N.G da; SILVEIRA, R.J.C.S; SEVERO, C.R.S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 44p. ISSN 1516-8832. 2006.

CUNHA, E. R.; BACANI, V. M.; AYACH, L. R. Geoprocessamento aplicado à análise da fragilidade ambiental. **Revista da ANPEGE**, n. 3, p. 89–105, 2013. Acesso em: 12 out. 2015.

DELAMARE, T. O.. **Zoneamento Geoambiental da Colônia Z3 – 2º Distrito - Pelotas (RS)**. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017.

- DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. D. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2005.
- FERREIRA, Marcos César. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Unesp, 2014.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.
- FLACH, C. W.. **Zoneamento da susceptibilidade a movimentos de massa em Arroio do Padre/RS**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Ciências Humanas, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.
- FOSTER, S., et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Edição brasileira: SERVMAR – Serviços Técnicos Ambientais Ltda. São Paulo, 2006.
- FRANCO, G. B. **Fragilidade Ambiental e qualidade da água do rio Almada**., 2010. 360 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.
- FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Brasília: FUNASA, 3 ed, 2004.
- FUSHITA, Â. T. et al. Erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu Superior (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 477–488, 2010.
- GIMENES, F. B. Q.; FILHO, O. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013.
- GOPEL, K.D. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487, <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>.
- GOMES, R. C. **Integração dos métodos AHP e SIG como instrumento de análise do nível de qualidade ambiental em bacias hidrográficas: estudo de caso bacia do Rio Melchior – DF**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- GOUVEIA, R. et al. Análise da fragilidade ambiental na bacia do rio Queima-Pé Tangará da Serra, MT. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 131–140, 2015.

HASENACK, H.; WEBER, E. Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3).

HELLER, L. PÁDUA. V.L. Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: UFMG, V. 1, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico de uso da terra. 3 ed. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**, 2017. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=431440&idtema=90&search=rio-grande-do-sul|pelotas|censo-demografico-2010:-resultados-da-amostra-caracteristicas-da-populacao->>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Arquivo vetorial sobre a hidrogeologia do Brasil, região Sul em escala 1:250.000**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/geologia/15824-hidrogeologia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

IGNÁCIO, R. et al. Planejamento e ordenamento territorial do estado de Roraima: utopia ou realidade?. **Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**, [s.l.], n. 8, p.137-152, 15 fev. 2016.

JAKOB, A. A.; YOUNG, A. F.. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas, In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 15., 2006, Caxambu, ABEP 2006 388, Caxambu: Unicamp, 2006, p, 1 - 22.

JAYALAKSHMI, S., VELAPPAN, E. Assessment of water quality index in the St. Thomas Mount Block using GIS and remote sensing. *Pol. J. Environ. Stud.* 24, (4), 1611, 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 672 p.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 2203–2210, 2005.

LADWIG, N. I. et al. Mapeamento da vulnerabilidade à inundação e ao deslizamento na bacia hidrográfica do Rio Urussanga, utilizando o método de análise hierárquica – AHP. In: LADWIG, Nilzo Ivo; SCHWALM, Hugo (Org.). Planejamento e gestão territorial: gestão integrada do território. Criciúma: UNESC, 2017. p.142-160. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/plan11>. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/5165>>.

LEANDRO, D. **Modelagem de fragilidade ambiental usando índices baseados em dados especiais e com suporte de sistema especialista**, 2013. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

LEE, J.-H.; HEO, J.-H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 1-2, p. 30-48, 2011.

LIOU, Y.; NGUYEN, A.; LI, M.. Assessing spatiotemporal eco-environmental vulnerability by Landsat data. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 80, p.52-65, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.055>.

LOURENÇO, J. C. et al. Identificação de fatores de vulnerabilidade ambiental na floresta do louzeiro em Campina Grande-PB. **POLÊMICA**, v. 12, n.2, p.274-283, abr/jun. 2013.

MACEDO, D. R. et al. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 635, p.1267-1279, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.216>.

MANFRÉ, L. A. et al. Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 69, n. 3, p.947-957, 2 out. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1979-2>.

MEGIATO, É. I. **Análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas, RS**, 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

MILANEZI, C. H.; PEREIRA, J. G. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental na Microbacia Do Córrego Azul, Ivinhema–MS. **Geografia (Londrina)**, v. 25, n. 1, p. 43-63, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gestão Territorial. Zoneamento Ecológico-Econômico. 2017 Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 4. ed. Brasília: EMBRAPA, 2015. 399 p.

MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. **Técnicas de Suporte a Decisão para Modelagem Geográfica por Álgebra de Mapas**. São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, 2001. 121 p.

MUSAKWA, W. et al. Developing a decision support system to identify strategically located land for land reform in South Africa. **Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [s.l.], v. -2, n. 2, p.197-203, 11 nov. 2014.

- NANDY, S. et al. Environmental vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 57, p.182-195, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.024>.
- NGUYEN, A. K. et al. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 69, p.100-117, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.026>.
- NGUYEN, K.; LIOU, Y.. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 664, p.995-1004, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.407>.
- NOGUEIRA, A.C.R.M.. Planejamento e Gestão territorial: Uma Análise Sobre as Estratégias de Desenvolvimento Urbano e Ambiental do Município de Maricá/RJ. 2015. 166 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- NEVES, A. J. S.; CAMANHO, R. The Use of AHP for IT Project Priorization – A Case Study for Oil & Gas Company. **Procedia Computer Science**, [s.l.], v. 55, p.1097-1105, abr. 2015.
- OLIVEIRA, R. et al. Análise da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego São João-MS utilizando geoprocessamento. **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 15–24, 2012.
- PELOTAS. P. M. Prefeitura Municipal de Pelotas. **Mapa Urbano de Pelotas em escala 1:2.000**. 2016. Disponível em: < <http://www.pelotas.com.br/portal-de-dados>>. Acesso em: 30 nov. 2018.
- PELOTAS. Prefeitura Municipal de Pelotas. **Mapa Urbano de Pelotas: Mapa das redes de abastecimento de água em escala 1:2000**. 2018. Disponível em: <<http://www.pelotas.com.br/portal-de-dados/abastecimentodeagua/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- PELOTAS. Prefeitura Municipal de Pelotas. **Mapa Urbano de Pelotas: Mapa das redes coletoras de esgotos em escala 1:2000**. 2018. Disponível em: <<http://www.pelotas.com.br/portal-de-dados/redecoletoradeesgotos/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- PELOTAS. Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas. Prefeitura Municipal de Pelotas. **Coleta domiciliar de resíduos sólidos**. 2018. Disponível em: <<http://server.pelotas.com.br/sanep/lixo/coleta/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.
- PELOTAS, P. M.. **Plano Ambiental de Pelotas**. 2013. Disponível em: < <http://server.pelotas.com.br/sanep/planoambiental.pdf>>. Acesso em: 20 jan, 2019.

- PELOTAS, P. M.. **Plano municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Pelotas**. 2014. Disponível em: <<http://server.pelotas.com.br/sanep/plano-de-residuos/arquivos/PMGIRS-Pelotas-08-2014.pdf>>. Acesso em: 20 jan, 2019
- PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C.. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade (MG). **Geography Department, University Of São Paulo**, [s.l.], p.4-26, 2012. Geography Department, University of Sao Paulo. <http://dx.doi.org/10.7154/rdg.2012.0023.0001>.
- POLETO, C. **Bacias Hidrográficas e Recursos Hídricos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2014. 272 p.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. Para entender a Terra. 4. ed. Bookman. Porto Alegre: , 2006.
- REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. de. Construção de modelo e utilização do método de processo analítico hierárquico – AHP para mapeamento de risco a inundação em área urbana. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 18, n. 61, p.1-18, mar. 2017.
- RIBEIRO, A. S. et al. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, S.l, v. 9, n. 01, p.016-031, fev. 2016.
- RODRIGUES, J. M. et al. Análise da fragilidade ambiental da bacia da barragem Camará, Areia/ PB. **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 4, p.231-241, mar. 2018.
- ROSS, J.L.S. **O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo**. In: Revista Dep. Geografia, São Paulo, nº 6, FFLCH-USP, 1992.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Geography Department, University of Sao Paulo**, v. 8, p. 63–74, 1994. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327>>. Acesso em: 20 ago. 2015.
- SAATY, T.H. A scaling method form priorities in hierarquical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v.15, n. 3, p. 234-281, 1977.
- SAHOO, Satiprasad; DHAR, Anirban; KAR, Amlanjyoti. Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. **Environmental Impact Assessment Review**, [s.l.], v. 56, p.145-154, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2015.10.002>.
- SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007. 192 p.

- SANTOS, A.R; LOUZADA, F.L.R.O; EUGÊNIO, F.C. ARCGIS 9.3 total : aplicações para dados espaciais. Alegre – ES, 2010. 185p.
- SHUKLA, S.; KHIRE, M. V.; GEDAM, S. S.. Monitoring Land Use/Land Cover Changes in a River Basin due to Urbanization using Remote Sensing and GIS Approach. **The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, Hyderabad, v. -8, p.949-953, 28 nov. 2014.
- SIAGAS. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Dados de poços cadastrados no município de Pelotas. Disponível em: <[http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa\\_complexa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php)>. Acesso em: 20 de agosto de 2017.
- SILVA, C. S. D. **Inundações em Pelotas/RS: o uso de geoprocessamento no planejamento paisagístico e ambiental**. 2007. 196 f. Mestrado (Dissertação) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- SILVA, R. C. da. Análise das áreas suscetíveis à erosão na bacia do Arroio Pelotas (RS), com auxílio do geoprocessamento. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.
- SILVA, J. A. B. et al. Á urbanização no mundo contemporâneo e os problemas ambientais. **Caderno de Graduação - Ciências Humanas e Sociais**, v. 2, n.2, p. 197-207, 2014.
- SILVA, V. C. B.; MACHADO, P. S.. SIG na análise ambiental: Susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima-Minas Gerais. **Revista de Geografia**, Recife, v. 31, n. 2, p.66-87, out. 2014.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018.
- SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. 185 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.
- SPÖRL, C. **Análise da fragilidade ambiental relevo-solo com aplicação de três modelos alternativos nas altas bacias do rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata**. 2001. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- STRECK, Edemar Valdir et al. **Solos do rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Emater/rs, 2008. 222 p.
- TERRA, L. G; LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. Estimativa da vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Santiago-

RS. Revista Eletrônica em Gestão. Educação e Tecnologia Ambiental. [s.l.], v, 10, n, 10, p,2208-2218, 7 abr, 2013.

TUCCI, C. E. .; BERTONI, J. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

TUCCI, C. M. Inundações urbanas –Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: 2007. 393p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012. 943 p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 91 p. 1977.

VALADARES, A. A. **Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vulnerabilidade ambiental em área do Distrito Federal**. 2017. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

VIEIRA, P.H.. **Adaptação da metodologia de fragilidade ambiental para atividades de mineração de argila: um estudo de caso visando o planejamento territorial**. 2018. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio verde, região nordeste do estado de São Paulo, Brasil. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, , n. 35, p. 192–222, 2013. São Paulo.

VITTE, C. C. S.; O planejamento territorial e a dimensão espacial do desenvolvimento: algumas das experiências recentes no Brasil, 06/2015, **Revista Política e Planejamento Regional (Online)**, Vol. 1, pp.1-18, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015

XU, Xinliang; MIN, Xibi. Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in China using remote sensing data. **Cities**, [s.l.], v. 35, p.104-113, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2013.05.002>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275113000565>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

WRUBLACK, S. C. **Caracterização do uso e ocupação do solo e qualidade da água com utilização das técnicas de geoprocessamento**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Cascavel, 2012.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina do Livro, 2013. 215 p.

ZANG, Z. et al.. Impact of landscape patterns on ecological vulnerability and ecosystem service values: an empirical analysis of Yancheng Nature Reserve in China. **Ecol. Indic.** 72, 142–152,2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.019>.

ZOU, T.; YOSHINO, K.. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, [s.l.], v. 78, p.405-415, jul. 2017. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.039>.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE 1: Dados relativos ao ambiente AHP-OS para o elemento saneamento.

AHP calculator - AHP-OS https://bpmisg.com/academico/ahp\_calc.php?m=3&t=AHP+priorities&c...

[AHP-OS Home](#)
[Latest News](#)


[\(forgot?\)](#)
[Register](#)

## AHP Priority Calculator

Try my free AHP online software [AHP-OS](#)

Select number of criteria and start pairwise comparisons to calculate priorities using the Analytic Hierarchy Process.

### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20)

### Pairwise Comparison AHP priorities

3 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Esgoto or <input type="radio"/> Agua	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input checked="" type="radio"/> Esgoto or <input type="radio"/> RSU	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input type="radio"/> Agua or <input checked="" type="radio"/> RSU	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 3% OK

dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

#### Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

Category	Priority	Rank

#### Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

	1	2	3

1 of 2 25/01/2019 11:39

AHP calculator - AHP-05

[https://bpmsg.com/academico/ahp\\_calc.php?n=3&i=AHP+priorities&c...](https://bpmsg.com/academico/ahp_calc.php?n=3&i=AHP+priorities&c...)

1	Esgoto	48.1%	1
2	Agua	11.4%	3
3	RSU	40.5%	2

1	1	5.00	1.00
2	0.20	1	0.33
3	1.00	3.00	1

Number of comparisons = 3  
 Consistency Ratio CR = 3.0%

Principal eigen value = 3.029  
 Eigenvector solution: 4 iterations, delta  
 = 1.0E-9

AHP-05 author: Klaus D. Goepel, BPMSG, [contact](#), last update: Sep 4, 2017

**APÊNDICE 2: Tabela com dados dos poços cadastrados no SIAGAS.**

ID	Longitude	Latitude	Condição	Litologia	Nível Estático	G	O	D	Índice Fragilidade
1	388100	6490850	LIVRE	Areias argilas	2,4	1	0,4	0,9	0,36
2	390000	6493034	LIVRE	Areias argilas	7,4	1	0,4	0,8	0,32
3	389977	6493053	LIVRE	Areias argilas	6,4	1	0,4	0,8	0,32
4	389998	6493029	LIVRE	Areias argilas	7,5	1	0,4	0,8	0,32
5	389777	6493258	LIVRE	Areias argilas	7,5	1	0,4	0,8	0,32
6	390160	6492868	LIVRE	Areias argilas	18,4	1	0,4	0,8	0,32
7	388917	6491051	LIVRE	Areias argilas	2,4	1	0,4	0,9	0,36
8	384697	6488243	LIVRE	Areia aluvial	24,6	1	0,7	0,7	0,49
9	384861	6488118	LIVRE	Areia aluvial	28,5	1	0,4	0,7	0,28
10	384536	6487969	LIVRE	Areia aluvial	20	1	0,7	0,7	0,49
11	384944	6488484	LIVRE	Granito	13,7	1	0,6	0,8	0,48
12	384945	6488484	LIVRE	Granito	24,5	1	0,6	0,7	0,42
13	384720	6488700	LIVRE	Areia aluvial	7,4	1	0,7	0,8	0,56
14	384748	6488792	LIVRE	Areia aluvial	2,5	1	0,7	0,9	0,63
15	384627	6488642	LIVRE	Areia aluvial	3	1	0,7	0,9	0,63
16	384308	6488181	LIVRE	Areia aluvial	9,7	1	0,7	0,8	0,56
17	384624	6488209	LIVRE	Areia aluvial	11,6	1	0,7	0,8	0,56
18	384608	6488213	LIVRE	Areia aluvial	17,2	1	0,7	0,8	0,56
19	382571	6486531	LIVRE	Areia aluvial	19,9	1	0,7	0,8	0,56
20	382431	6486361	LIVRE	Areia aluvial	18,4	1	0,7	0,8	0,56
21	382912	6486355	LIVRE	Areia aluvial	11,5	1	0,7	0,8	0,56
22	382989	6486076	LIVRE	Areia aluvial	18,9	1	0,7	0,8	0,56
23	382872	6485922	LIVRE	Areia aluvial	7,5	1	0,7	0,8	0,56
24	382651	6485380	LIVRE	Areia aluvial	6,3	1	0,7	0,8	0,56
25	382271	6485245	LIVRE	Areia aluvial	9,8	1	0,7	0,8	0,56
26	382288	6485224	LIVRE	Areia aluvial	17,6	1	0,7	0,8	0,56
27	369535	6486212	LIVRE	Areias argilas	25,5	1	0,4	0,7	0,28
28	373850	6498035	LIVRE	Areias argilas	15,6	1	0,4	0,8	0,32
29	374048	6497478	LIVRE	Areias argilas	13,9	1	0,4	0,8	0,32
30	381834	6485463	LIVRE	Areia aluvial	21,4	1	0,7	0,7	0,49
31	382052	6485346	LIVRE	Areia aluvial	10,2	1	0,7	0,8	0,56
32	382804	6485473	LIVRE	Areia aluvial	1,9	1	0,7	0,9	0,63
33	368620	6485455	LIVRE	Areias argilas	10	1	0,4	0,8	0,32
34	368613	6485431	LIVRE	Areias argilas	7	1	0,4	0,8	0,32
35	368594	6485465	LIVRE	Areias argilas	10	1	0,4	0,8	0,32
36	390344	6492671	LIVRE	Areias argilas	12	1	0,4	0,8	0,32
37	390436	6492617	LIVRE	Areias argilas	8	1	0,4	0,8	0,32
38	388197	6495460	LIVRE	Areias argilas	3	1	0,4	0,9	0,36
39	388196	6495471	LIVRE	Areias argilas	3,5	1	0,4	0,9	0,36
40	380311	6491929	LIVRE	Areias argilas	10,1	1	0,4	0,8	0,32
41	380253	6491840	LIVRE	Areias argilas	10	1	0,4	0,8	0,32
42	376984	6497627	LIVRE	Areias argilas	21,3	1	0,4	0,7	0,28
43	375724	6493252	LIVRE	Areias argilas	12	1	0,4	0,8	0,32
44	373774	6485632	LIVRE	Areias argilas	10	1	0,4	0,8	0,32
45	371253	6485587	LIVRE	Areias argilas	2	1	0,4	0,9	0,36
46	376215	6511354	Não confinado coberto	Granito	21	0,6	0,6	0,7	0,252

47	377325	6512692	Não confinado coberto	Sianogranulito	36	0,6	0,6	0,7	0,252
48	376958	6513315	Não confinado coberto	Granito	28	0,6	0,6	0,7	0,252
49	372557	6498127	LIVRE	Areias argilas	8,2	1	0,4	0,8	0,32
50	372683	6497981	LIVRE	Argilas	7,1	1	0,4	0,8	0,32
51	374118	6483536	LIVRE	Areias argilas	1,1	1	0,4	0,9	0,36
52	374165	6483234	LIVRE	Areias argilas	0,1	1	0,4	0,9	0,36
53	371024	6484602	LIVRE	Areias argilas	9,2	1	0,4	0,8	0,32
54	371014	6484595	LIVRE	Areias argilas	9,7	1	0,4	0,8	0,32
55	373911	6483097	LIVRE	Areias argilas	5	1	0,4	0,8	0,32
56	362676	6493921	Não confinado coberto	Granito	3,9	0,6	0,6	0,9	0,324
57	357526	6500727	Não confinado coberto	Sianogranulito	0,5	0,6	0,6	0,9	0,324
58	357190	6500704	Não confinado coberto	Sianogranulito	2	0,6	0,6	0,9	0,324
59	372988	6495876	LIVRE	Areias argilas	11	1	0,4	0,8	0,32
60	376619	6486630	LIVRE	Areias argilas	3	1	0,4	0,9	0,36
61	373214	6488440	LIVRE	Areias argilas	4	1	0,4	0,9	0,36
62	373252	6488502	LIVRE	Areias argilas	8	1	0,4	0,8	0,32
63	372782	6486032	LIVRE	Areias argilas	4	1	0,4	0,9	0,36
64	362404	6494680	Não confinado coberto	Granito	0	0,6	0,6	0,9	0,324
65	362130	6494695	Não confinado coberto	Granito	3,5	0,6	0,6	0,9	0,324
66	367501	6508613	Não confinado coberto	Granito	1,5	0,6	0,6	0,9	0,324
67	382851	6485725	LIVRE	Areia aluvial	7,8	1	0,7	0,8	0,56
68	382671	6486322	LIVRE	Areia aluvial	14,9	1	0,7	0,8	0,56
69	385284	6488942	LIVRE	Areia aluvial	6,5	1	0,7	0,8	0,56
70	368222	6486060	LIVRE	Areias argilas	9,9	1	0,4	0,8	0,32
71	368716	6488010	LIVRE	Areias argilas	17	1	0,4	0,8	0,32
72	368659	6487993	LIVRE	Areias argilas	12	1	0,4	0,8	0,32
73	372049	6483236	LIVRE	Areias argilas	4,1	1	0,4	0,9	0,36
74	375082	6483605	LIVRE	Areias argilas	25	1	0,4	0,7	0,28
75	375087	6483663	LIVRE	Areias argilas	6	1	0,4	0,8	0,32
76	375077	6483674	LIVRE	Areias argilas	8	1	0,4	0,8	0,32
77	375118	6483470	LIVRE	Areias argilas	20	1	0,4	0,7	0,28
78	378086	6486464	LIVRE	Areias argilas	8	1	0,4	0,8	0,32
79	378071	6486457	LIVRE	Areias argilas	12	1	0,4	0,8	0,32
80	378781	6487075	LIVRE	Areias argilas	5	1	0,4	0,8	0,32
81	378820	6487096	LIVRE	Areias argilas	6,1	1	0,4	0,8	0,32
82	368771	6485562	LIVRE	Areias argilas	12	1	0,4	0,8	0,32
83	373137	6491823	LIVRE	Areias argilas	16,2	1	0,4	0,8	0,32
84	371070	6484575	LIVRE	Areias argilas	7	1	0,4	0,8	0,32
85	373024	6490672	LIVRE	Areias argilas	10	1	0,4	0,8	0,32
86	373032	6490717	LIVRE	Areias argilas	13	1	0,4	0,8	0,32
87	373240	6490651	LIVRE	Areias argilas	14	1	0,4	0,8	0,32

88	375121	6483389	LIVRE	Areias argilas	1,5	1	0,4	0,9	0,36
89	374613	6483229	LIVRE	Areias argilas	3	1	0,4	0,9	0,36
90	368331	6496729	Não confinado coberto	Granito	6	0,6	0,6	0,8	0,288
91	362562	6505112	Não confinado coberto	Granito	6	0,6	0,6	0,8	0,288
92	364486	6501496	Não confinado coberto	Granito	7	0,6	0,6	0,8	0,288
93	371797	6496116	LIVRE	Areias argilas	15	1	0,4	0,8	0,32
94	373743	6488145	LIVRE	Areias argilas	50	1	0,4	0,7	0,28
95	373714	6488160	LIVRE	Areias argilas	14	1	0,4	0,8	0,32
96	373518	6488253	LIVRE	Areias argilas	1,6	1	0,4	0,9	0,36
97	372946	6487874	LIVRE	Areias argilas	14	1	0,4	0,8	0,32
98	372345	6483770	LIVRE	Areias argilas	2,1	1	0,4	0,9	0,36
99	371031	6484549	LIVRE	Areias argilas	9,7	1	0,4	0,8	0,32
100	382289	6517259	Não confinado coberto	Sianogranulito	0,6	0,6	0,6	0,9	0,324

---

## APÊNDICE 3: Dados relativos ao ambiente AHP-OS para o elemento inundação.

AHP calculator - AHP-OS https://bpmug.com/academico/ahp\_calc.php?m=4&t=AHP-priorities&c

[AHP-OS Home](#) [Latest News](#)   [\(forgot?\)](#) [Register](#)

### AHP Priority Calculator

Try my free AHP online software [AHP-OS](#)

Select number of criteria and start pairwise comparisons to calculate priorities using the Analytic Hierarchy Process.

#### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20)

#### Pairwise Comparison AHP priorities

6 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Altitude	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input checked="" type="radio"/> Tipos de Solos or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input checked="" type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo or <input checked="" type="radio"/> Altitude	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input checked="" type="radio"/> Uso e Ocupação do Solo or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input checked="" type="radio"/> Altitude or <input checked="" type="radio"/> Declividade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 4.3%

dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate Importance, 5- Strong importance, 7- Very strong Importance, 9- Extreme Importance (2,4,6,8 values in-between).

1 of 2 29/01/2019 17:06

AHP calculator - AHP-OS https://bpmg.com/academico/ahp\_calc.php?m=4&id=AHP-priorities&c

### Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

Category	Priority	Rank
1 Tipos de Solos	5.5%	4
2 Uso e Ocupação do Solo	11.8%	3
3 Altitude	26.2%	2
4 Declividade	56.5%	1

Number of comparisons = 6  
Consistency Ratio CR = 4.3%

### Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

	1	2	3	4
1	1	0.33	0.20	0.14
2	3.00	1	0.33	0.20
3	5.00	3.00	1	0.33
4	7.00	5.00	3.00	1

Principal eigen value = 4.117  
Eigenvector solution: 4 iterations, delta = 5.7E-8

AHP-OS author: Klaus D. Goepel, BPMG, [contact](#), last update: Sep 4, 2017

## APÊNDICE 4: Dados relativos ao ambiente AHP-OS para o elemento erosão.

AHP calculator - AHP-OS https://bpmg.com/academico/ahp\_calc.php?m=5&AHP=priorities&c

[AHP-OS Home](#) [Latest News](#) [Gestioneur de AHP publications](#)  [Log in](#) [\(forgot?\)](#) [Register](#)

### AHP Priority Calculator

Try my free AHP online software [AHP-OS](#)

Select number of criteria and start pairwise comparisons to calculate priorities using the Analytic Hierarchy Process.

#### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 5

#### Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	* Declividade or * Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	* Declividade or * Uso do Solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	* Declividade or * tipos de solos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	* Declividade or * pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	* Litologia or * Uso do Solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	* Litologia or * tipos de solos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	* Litologia or * pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	* Uso do Solo or * tipos de solos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	* Uso do Solo or * pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	* tipos de solos or * pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

CR = 6.8% OK

1 of 2 23/01/2019 16:19

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

### Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

Category	Priority	Rank
1 Declividade	42.0%	1
2 Litologia	4.3%	4
3 Uso do Solo	35.2%	2
4 tipos de solos	14.5%	3
5 pluviosidade	4.0%	5

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 6.8%

### Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

	1	2	3	4	5
1	1	9.00	2.00	3.00	7.00
2	0.11	1	0.14	0.33	1.00
3	0.50	7.00	1	5.00	7.00
4	0.33	3.00	0.20	1	7.00
5	0.14	1.00	0.14	0.14	1

Principal eigen value = 5.307  
Eigenvector solution: 6 iterations, delta = 4.6E-8

## APÊNDICE 5: Dados relativos ao ambiente AHP-OS para a fragilidade potencial.

AHP calculator - AHP-OS https://bpmg.com/academic/ahp\_calc.php?m=5&id=AHP+priorities&c...

[AHP-OS Home](#) [Latest News](#) 10/20/2019 23:06

### AHP Priority Calculator

Try my free AHP online software [AHP-OS](#)

Select number of criteria and start pairwise comparisons to calculate priorities using the Analytic Hierarchy Process.

#### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 5

#### Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - Importance - or B?		Equal	How much more?
1	* Declividade or = Tipos de Solos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	* Declividade or = Aguas Subterrâneas	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	* Declividade or = Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	* Declividade or = Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	* Tipos de Solos or = Aguas Subterrâneas	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	* Tipos de Solos or = Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	* Tipos de Solos or = Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	* Aguas Subterrâneas or = Litologia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	* Aguas Subterrâneas or = Pluviosidade	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

1 of 2 18/03/2019 23:06

AHP calculator - AHP-OS [https://bpmisg.com/academico/ahp\\_calc.php?n=5&AHP-priorities&c](https://bpmisg.com/academico/ahp_calc.php?n=5&AHP-priorities&c)

A - Importance - or B?	Equal	How much more?
10 <input checked="" type="radio"/> Litologia or <input type="radio"/> Pluviosidade <input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9		

CR = 5.3% OK

dec. comma

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

### Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

Category	Priority	Rank
1 Declividade	48.3%	1
2 Tipos de Solos	26.9%	2
3 Aguas Subterrâneas	12.8%	3
4 Litologia	6.0%	4
5 Pluviosidade	6.0%	4

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 5.3%

### Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

	1	2	3	4	5
1	1	3.00	5.00	5.00	5.00
2	0.33	1	3.00	5.00	5.00
3	0.20	0.33	1	3.00	3.00
4	0.20	0.20	0.33	1	1.00
5	0.20	0.20	0.33	1.00	1

Principal eigen value = 5.240  
Eigenvector solution: 6 iterations, delta = 1.0E-9

AHP OS - Copyright © 2004 - BPMISG - [www.bpmisg.com](http://www.bpmisg.com) - last updated: Feb 4, 2017

## APÊNDICE 6: Dados relativos ao ambiente AHP-OS para a fragilidade emergente.

AHP calculator - AHP-OS https://bpmg.com/academico/ahp\_calc.php?h=5&i=AHP-priorities&c

[AHP-OS Home](#) [Latest News](#)   [\(forgot?\)](#) [Register](#)

### AHP Priority Calculator

Try my free AHP online software [AHP-OS](#)

Select number of criteria and start pairwise comparisons to calculate priorities using the Analytic Hierarchy Process.

#### AHP Criteria

Select number of criteria:

Input number and names (2 - 20) 5

#### Pairwise Comparison AHP priorities

10 pairwise comparisons. Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

Which criterion with respect to *AHP priorities* is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

	A - Importance - or B?	Equal	How much more?
1	* Inundação or * Saneamento	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	* Inundação or * APP	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	* Inundação or * uso e cobertura	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	* Inundação or * Erosão	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	* Saneamento or * APP	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	* Saneamento or * uso e cobertura	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	* Saneamento or * Erosão	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	* APP or * uso e cobertura	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	* APP or * Erosão	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	* uso e cobertura or * Erosão	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

1 of 2 18/03/2019 23:33

A - Importance - or B?	Equal	How much more?
CR = 7% OK		
<input type="button" value="Check consistency"/>	<input type="button" value="Download (.csv)"/>	<input type="checkbox"/> dec. comma

AHP Scale: 1- Equal importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

### Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons

Category	Priority	Rank
1 Inundação	42.4%	1
2 Saneamento	29.9%	2
3 APP	10.9%	4
4 uso e cobertura	11.7%	3
5 Erosão	5.1%	5

Number of comparisons = 10  
Consistency Ratio CR = 7.0%

### Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix

	1	2	3	4	5
1	1	3.00	3.00	3.00	5.00
2	0.33	1	5.00	3.00	5.00
3	0.33	0.20	1	1.00	3.00
4	0.33	0.33	1.00	1	3.00
5	0.20	0.20	0.33	0.33	1

Principal eigen value = 5.315  
Eigenvector solution: 6 iterations, delta = 1.1E-8