UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANDRÉIA RUDNIAK

ANÁLISE MORFOMÉTRICA E ESPACIAL APLICADAS NA IDENTIFICAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A ENCHENTES EM BACIAS URBANAS DE IRATI-PR

IRATI
2017

ANDRÉIA RUDNIAK

ANÁLISE MORFOMÉTRICA E ESPACIAL APLICADAS NA IDENTIFICAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A ENCHENTES EM BACIAS URBANAS DE IRATI-PR

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, associação ampla entre Universidade Estadual do Centro-Oeste e Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de concentração Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho

IRATI
2017

Catalogação na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

R917a

RUDNIAK, Andréia.

Análise morfométrica e espacial aplicadas na identificação da suscetibilidade a enchentes em bacias urbanas de Irati-PR / Andréia Rudniak. – Irati, PR : [s.n], 2017.

86f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Área de concentração : Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR.

1. Engenharia Ambiental – dissertação. 2. Recursos hídricos – climatologia. 3. Lógica Fuzzy. 4. Processo analítico hierárquico. 5. Geoprocessamento. 6. Planejamento urbano. 7. Ecologia – meio ambiente. I. Oliveira Filho, Paulo Costa de. II. UNICENTRO. III. Título.

CDD 551.5

TERMO DE APROVAÇÃO

Andréia Rudniak

"Análise morfométrica e espacial aplicadas na identificação da suscetibilidade a enchentes em bacias urbanas de Irati-PR"

Dissertação aprovada em 31/03/2017, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador de Presidente da Banca Examinadora

Dra. Adelena Gonçalves Maria
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dra. Silvia Méri Carvalho
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Irati-PR, 31 de março de 2017.

Dedico ao meu Anjo da Guarda

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todos os dias vividos que me proporcionaram chegar até aqui.

Ao Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho, pela contribuição de seus conhecimentos e sugestões na orientação desta dissertação.

Aos meus pais, Rosa e Miguel, por todo o apoio e tempo dedicados a mim.

A minha madrinha Silvana, pelo incentivo constante.

A todos os professores que auxiliam na busca e na conquista de mais essa etapa.

Aos meus colegas de mestrado, e também da graduação, que tornaram as aulas mais leves e divertidas.

A CAPES, pela concessão da bolsa

A Prefeitura de Irati, pela cessão de dados essenciais para este estudo.

A todos e todas que de alguma forma me ajudaram e torceram por mim.

“Se você continua vivo é porque ainda não chegou aonde devia.”

Albert Einstein

RESUMO

As enchentes representam um dos fenômenos naturais mais atuantes em todo o mundo. As enchentes urbanas em geral estão associadas, entre outras, a duas causas principais: a elevada taxa de urbanização (impermeabilização) e a ocupação das áreas ribeirinhas. Assim, o conhecimento sobre o provável comportamento hidrológico no interior de uma bacia hidrográfica e a delimitação das áreas propensas à ocorrência de enchentes contribui para o planejamento urbano e para a minimização de eventuais efeitos gerados por esse fenômeno. Este trabalho mapeia as áreas suscetíveis a enchentes no perímetro urbano do município de Irati/PR, e também calcula e interpreta os índices morfométricos da bacia hidrográfica do principal rio urbano do município. Para as distintas etapas utilizou-se Sistema de Informações Geográficas (SIG), especificamente o *software* SPRING. No mapeamento de suscetibilidade o SIG foi associado a metodologias de lógica *fuzzy* e análise hierárquica (AHP), sendo a análise de dados realizada em linguagem de programação LEGAL; os critérios utilizados para a avaliação das áreas propensas a enchentes foram: a altitude, declividade, distância dos cursos d'água e grau de urbanização; as áreas que atenderam aos critérios propostos neste trabalho foram posteriormente classificadas e quantificadas. Na caracterização morfométrica obteve-se parâmetros como área de drenagem, perímetro, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, dentre outros; os parâmetros foram calculados para a bacia como um todo, bem como para as sub-bacias localizadas dentro do perímetro urbano. Os resultados mostraram que a área urbana do município de Irati/PR apresenta 3,645 km² com algum grau de suscetibilidade a enchentes, cerca de 13,8% da área de estudo. Os parâmetros morfométricos indicaram que apenas uma das seis sub-bacias apresenta tendência a forma arredondada, todavia quatro delas declinaram-se favoravelmente para um mesmo ponto e consequentemente para formação de um pico de vazão.

Palavras-chave: Lógica fuzzy, processo analítico hierárquico, geoprocessamento, planejamento urbano

ABSTRACT

The floods represent one of the most active natural phenomena around the world. Urban floods in general are associated to two main causes: the high rate of urbanization (waterproofing) and the occupation of the riparian areas. Therefore, knowledge about the probable hydrological behavior within a river basin and the marking of areas prone to flood occurrence contributes to urban planning and to the minimization of eventual effects generated by this phenomenon. This work maps the susceptible areas to flooding in the urban perimeter of the city of Irati, PR, and calculates and interprets the morphometric indexes of the hydrographic basin of the main urban river of the city. For the different stages was used the Geographic Information System (GIS), specifically the SPRING software. In the mapping of susceptibility, the GIS was associated with fuzzy logic and hierarchical analysis (AHP) methodologies with data analysis performed in a LEGAL programming language. The criteria used for the assessment of flood prone areas were: altitude, slope, distance of waterways and degree of urbanization; The areas that fulfilled the criteria proposed in this study were classified and quantified later. In the morphometric characterization were obtained parameters such as drainage area, perimeter, compactness coefficient, shape factor, circularity index, among others. The parameters were calculated for the basin as a whole, as well as for the sub-basin located within the urban perimeter. The results showed that 3,645 km² of the urban perimeter of the city of Irati, about 13.8% of the study area presents some degree of susceptibility to floods. The morphometric parameters indicated that only one of the six sub-basins presents a tendency to a rounded shape, however four of them declined favorably to the same point and consequently to the formation of a flow peak.

Key-words: Fuzzy logic, analytic hierarchy process, geoprocessing, urban planning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de leito e ocupação ribeirinha 21

Figura 2 – Associações *booleanas*..... 25

Figura 3 – Representação da declividade do terreno: (A) Lógica *booleana* e (B) Lógica *fuzzy* 28

Figura 4 – Localização da área em estudo..... 32

Figura 5 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para a obtenção do mapa de suscetibilidade a enchentes 40

Figura 6 – Ordenamento dos cursos d'água, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/ PR. ... 43

Figura 7 – Variação altimétrica, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR. 45

Figura 8 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR..... 46

Figura 9 – Visualização das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR. 47

Figura 10 – Mapa no formato numérico *fuzzy* da altitude, perímetro urbano de Irati/PR 51

Figura 11 – Mapa no formato numérico fuzzy da declividade, perímetro urbano de Irati/PR. 53

Figura 12 – Representação da faixa de gradação para o critério distância do curso d'água. ... 54

Figura 13 – Mapa no formato numérico *fuzzy* da distância dos cursos d'água, perímetro urbano de Irati/PR..... 55

Figura 14 – Mapa temático do grau de urbanização, perímetro urbano de Irati/PR..... 57

Figura 15 – Mapa no formato numérico *fuzzy* do grau de urbanização, perímetro urbano de Irati/PR..... 59

Figura 16 – Pesos de compensação dos critérios..... 61

Figura 17 – Mapa ponderado dos critérios (altitude, declividade, distância dos cursos d'água e grau de urbanização), perímetro urbano de Irati/PR..... 62

Figura 18 – Mapa de suscetibilidade a enchente segundo as classes qualificadoras, perímetro urbano de Irati/PR..... 64

Figura 19 – Junção do arroio Rio Bonito com o rio das Antas classificada como “alta suscetibilidade”.....66

Figura 20 – Área drenada pelo arroio dos Pereiras classificada como “alta suscetibilidade”..67

Figura 21 – Margem direita do rio das Antas classificada como “alta suscetibilidade” 68

Figura 22 – Áreas do bairro Nhapindazal classificada como “alta suscetibilidade”.....69

Figura 23 – Áreas do bairro DER (A) e Rio Bonito (B) classificadas como “média suscetibilidade”.....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de julgamento de importância da técnica AHP 29

Tabela 2 – Ocorrências das precipitações diárias maiores que 100 mm 33

Tabela 3 – Classificação da declividade segundo a Embrapa (1979)..... 35

Tabela 4 – Índices calculados para o estudo na bacia hidrográfica e sub-bacias hidrográficas36

Tabela 5 – Características morfométricas da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR 41

Tabela 6 – Características urbanas das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR..... 48

Tabela 7 – Características morfométricas das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR..... 48

Tabela 8 – Distribuição das classes de declividade para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR. 49

Tabela 9 – Pesos utilizados por faixa de altitude..... 50

Tabela 10 – Pesos utilizados por faixa de declividade 52

Tabela 11 – Peso utilizado na faixa de gradação referente à distância do curso d'água 54

Tabela 12 – Pesos utilizados por classe de urbanização..... 58

Tabela 13 – Matriz de comparação pareada entre os critérios 61

Tabela 14 – Intervalos para o fatiamento 63

Tabela 15 – Resultado das classes qualificadoras do mapa de suscetibilidade a enchente no perímetro urbano de Irati/PR em quilômetro quadrado e percentagem..... 65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Coeficiente de compacidade.....36

Equação 2 – Fator de forma.....36

Equação 3 – Índice de circularidade.....37

Equação 4 – Densidade de drenagem.....37

Equação 5 – Coeficiente de manutenção.....37

LISTA DE SIGLAS

AHP – *Analytical Hierarchy Process*

ANA – Agência Nacional das Águas

DSG – Diretoria do Serviço Geográfico do Exército

LEGAL – Linguaguem Espacial para Geoprocessamento Algébrico

MDT – Modelo Digital do Terreno

MF – Membro do Conjunto *fuzzy*

MNT – Modelo Numérico do Terreno

PI – Plano de Informação

RC – Razão de Consistência

SB – Sub-bacia

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SPRING – Sistema de Processamento de Infornações Georreferenciadas

TIN – *Triangulation Irregular Network*

UTM – Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1 Introdução 17

2 Revisão Bibliográfica 19

2.1 Bacia Hidrográfica, Urbanização e Enchentes Urbanas 19

2.1.1 Morfometria de bacias hidrográficas 22

2.2 Geoprocessamento e o Planejamento Urbano 23

2.2.1 Imagens orbitais 24

2.2.2 Análise espacial de dados geográficos 24

2.3 Exemplos de mapeamento de áreas inundáveis 30

3 Área de estudo 32

3.1 Aspectos históricos sobre a ocorrência de cheias no rio das Antas 33

4 Materiais e Métodos 34

4.1 Implementação dos dados em ambiente SIG 35

4.2 Morfometria da bacia e das sub-bacias hidrográficas 35

4.3 Mapeamento das áreas suscetíveis a enchentes 37

4.3.1 Lógica *fuzzy*: Padronização dos dados geográficos 38

4.3.2 Suporte a decisão: Ponderação dos critérios 39

5 Resultados e Discussão 41

5.1 Caracterização Morfométrica 41

5.1.1 Morfometria da bacia hidrográfica 41

5.1.2 Morfometria das sub-bacias hidrográficas 47

5.2 Mapeamento de áreas suscetíveis a enchentes 49

5.2.1 Padronização dos dados no formato numérico *fuzzy* 49

5.2.2 Suporte a decisão 60

5.3 Mapa de suscetibilidade a cheias no município de Irati/PR 63

6 Conclusões 71

7 Recomendações 72

Referências 73

Apêndice A – Base cartográfica, escala 1:2.000 80

Apêndice B - Programas LEGAL 81

1 Introdução

As enchentes representam um dos fenômenos naturais que ocorrem em todo o mundo e suas principais consequências podem ser resumidas em perdas econômicas e perdas de vidas humanas (ALEXAKIS et al., 2014). Segundo Campos (2011) as enchentes no Brasil causam perdas da ordem de US$ 2 bilhões por ano, e de acordo com dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, desastres hidrológicos causaram a morte de 13,4% dos afetados (CEPED/UFSC, 2013).

A frequência e a magnitude das enchentes ocorrem em função da intensidade e distribuição da precipitação, da taxa de infiltração de água no solo, do grau de saturação do solo e das características morfométricas da bacia de drenagem (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Nesse sentido, nota-se que a única característica controlável está atrelada ao desenvolvimento da malha urbana.

As enchentes urbanas caracterizam-se essencialmente pelo crescimento nem sempre planejado que acarreta a ocupação de áreas de risco, como os terrenos marginais aos cursos d' água, e pela alta taxa de impermeabilização do solo que provoca problemas como o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento superficial. Assim, áreas que satisfazem essas, entre outras condições, possuem maior probabilidade de concretização de uma enchente.

Nesse contexto, a cidade de Irati possui um histórico de ocorrência de cheias, que é caracterizado por uma sequência significativa de anos sem o evento (a última grande cheia ocorreu em 1983) e pela surpresa e despreparo dos habitantes nos anos de ocorrência. No último registro, em 2014, a cheia do rio das Antas e de seus afluentes deixaram 12 feridos, 100 desabrigados[1] e 1,5 mil desalojados[2] (DA SILVA, 2014).

Após esse evento, a problemática das cheias não ficou restrita apenas a população ribeirinha do rio das Antas que sofria frequentemente as consequências menos severas desse tipo de evento. O tema iniciou uma intensa discussão que resultou em obras de ordem estrutural no leito do rio que passou a responder de forma mais satisfatória às precipitações intensas.

---

[1] Pessoas cuja habitação foi afetada por dano ou ameaça de dano e que necessitam de abrigo provido pelo governo (CASTRO, 2012).

[2] Pessoas que foram obrigadas a abandonar temporária ou definitivamente sua habitação, em função de evacuações preventivas, destruição ou avaria grave, decorrentes do desastre, e que, não necessariamente, carece de abrigo provido pelo Sistema (CASTRO, 2012).

Na busca para compreender, mapear e propor alternativas para a problemática das cheias, inúmeros trabalhos vêm sendo desenvolvidos (HORA; GOMES, 2009; FERNÁNDEZ; LUTZ, 2010; CHEN; YEH e YU, 2011) em conjunto com técnicas de geoprocessamento, através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Segundo Santos (2001) os SIGs são técnicas empregadas na integração e análise de dados provenientes das mais diversas fontes, tais como imagens de satélites, mapas, censos, e outros.

Para mapear a potencialidade de áreas, diversas análises desenvolvidas em SIG são elaboradas com fundamentação em lógica binária, que muito se assemelha à sobreposição de mapas em formato analógico em uma mesa de luz (*overlay*). Para Druck et al. (2001) essa técnica, além de ignorar o potencial de processamento numérico do SIG, também gera descontinuidades inexistentes aos dados originais. Ainda para os mesmos autores, a análise espacial será muito melhor realizada com o uso de técnicas de classificação contínua, ou seja, com os conceitos fundamentos pela lógica *fuzzy*.

Sob esta ótica, Moreira (2001) salienta que um critério utilizado para analisar uma determinada questão assume uma importância relativa que pode ser completamente diferente se o mesmo for utilizado em outro problema. Essa importância relativa é definida em geoprocessamento, e em diversos outros campos, por meio da definição de pesos. Dentre as técnicas existentes destaca-se a *Analytical Hierarchy Process* (AHP), um método multicritério de apoio à decisão que fornece a ordenação e o desempenho global das alternativas em função da totalidade dos critérios considerados.

Diante do exposto, infere-se que o conhecimento da localização das áreas de risco, bem como o potencial risco a que a população está submetida, facilita a gestão de uma bacia hidrográfica urbana, no que diz respeito à implantação de infraestrutura adequada e no controle de ocupação da terra visando um desenvolvimento urbano cada vez mais seguro.

Desta forma, esse trabalho possui como objetivo geral: Identificar e mapear as áreas suscetíveis a enchentes na área urbana de Irati, tendo como objetivos específicos: i) caracterizar morfometricamente a bacia hidrográfica do rio das Antas e as sub-bacias que compõem a área urbana deIrati; ii) correlacionar os índices morfométricos com as enchentes; iii) identificar as sub-bacias com maior influência na ocorrência de enchentes na área urbana de Irati.

2 Revisão Bibliográfica

A Revisão Bibliográfica buscou contextualizar o conceito de enchente e as principais causas para a sua formação, com especial atenção sobre as áreas urbanas. Buscou-se também exemplificar os métodos de integração de dados utilizados em geoprocessamento para identificar as áreas propensas aos efeitos desse fenômeno. Por fim, são apresentados trabalhos que foram desenvolvidos em ambiente SIG e possuem a temática enchente.

2.1 Bacia Hidrográfica, Urbanização e Enchentes Urbanas

Segundo Guerra e Guerra (2005), uma bacia hidrográfica compreende o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, essa noção obriga naturalmente a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores d'água, cursos d'água principais, afluentes, entre outros. Os autores ainda afirmam que em toda bacia hidrográfica deve existir uma hierarquização na rede, e a água se escoa normalmente dos pontos mais altos para os mais baixos.

De acordo com Christofoletti (1974), a quantidade de água que atinge os cursos fluviais está relacionada com o tamanho da área ocupada pela bacia, do regime de precipitação e das perdas devidas à evapotranspiração e à infiltração, ou seja, o comportamento hidrológico de uma bacia é fortemente influenciado por suas características físicas e pelo tipo de cobertura que nela se faz presente.

Uma bacia urbana é aquela que sofreu intervenções humanas, que na maioria das vezes afetam de forma prejudicial às etapas do ciclo hidrológico. Tucci (2007) explica de forma clara e objetiva como o ciclo hidrológico é afetado:

> Com o desenvolvimento urbano, ocorre a impermeabilização do solo através de telhados, ruas calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a parcela da água que infiltrava passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções.

A urbanização de bacias hidrográficas é algo recorrente na história da civilização, pois de acordo com Baptista e Cardoso (2013) os rios, desde a Idade Média, viabilizaram o surgimento das cidades. No Brasil não foi diferente e muitas das cidades, que tiveram as margens dos seus rios ocupadas há décadas de forma espontânea pela população, têm nos seus rios um fator de vitalidade e atração turística, como por exemplo, Penedo em Alagoas, Piracicaba em São Paulo e Blumenau em Santa Catarina (ASSAD, 2013).

Entretanto, o contexto histórico da expansão urbana brasileira mostra que a ocupação de margens, muitas vezes, não se concretizou por motivos como a necessidade da água para

consumo ou pela facilidade de comunicação e comércio que os rios proporcionam no passado as pequenas aglomerações urbanas, e sim se concretizou por motivos menos nobres. O primeiro deles está atrelado ao aumento da população e a elevada concentração de pessoas que migraram para as cidades em meados do século XX. A consequência da rápida formação de núcleos populacionais foi o crescimento insustentável e desordenado, ou seja, as margens foram sendo progressivamente ocupadas por falta de planejamento urbano e, de uma forma geral, pelas classes menos favorecidas (BAPTISTA; CARDOSO, 2002). Segundo Alexakis et al. (2014) esse tipo de crescimento acarreta a contínua destruição da qualidade de vida e do meio ambiente.

O segundo motivo está atrelado à tradição brasileira de se procurar por terras de baixo preço (ALVES et al., 2010). É importante salientar que como forma de minimizar os efeitos da má gestão urbana, a Lei nº 6.766/79 (BRASIL, 1979), trouxe nos incisos do parágrafo único do seu art. 3º, os casos de proibição do parcelamento urbano, destaca-se o seguinte inciso: “I – em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;”. Alves et al., (2010) salientam que terras de baixo preço incluem loteamentos irregulares localizados em áreas sem infraestrutura e com risco de desastre iminente.

Uma área de risco é aquela que apresenta probabilidade de que um evento danoso se concretize e o grau de risco expressa a magnitude provável dos danos resultantes (LIMA, 2010). As áreas de várzea são consideras áreas de risco, pois estão expostas a um comportamento hidrológico que como frisou Christofoletti (1974) depende de vários fatores. Por vezes, um rio tem sua capacidade de escoamento extrapolada, o que caracteriza um dos eventos naturais (ou desastre com consequências danosas) mais comuns, as enchentes.

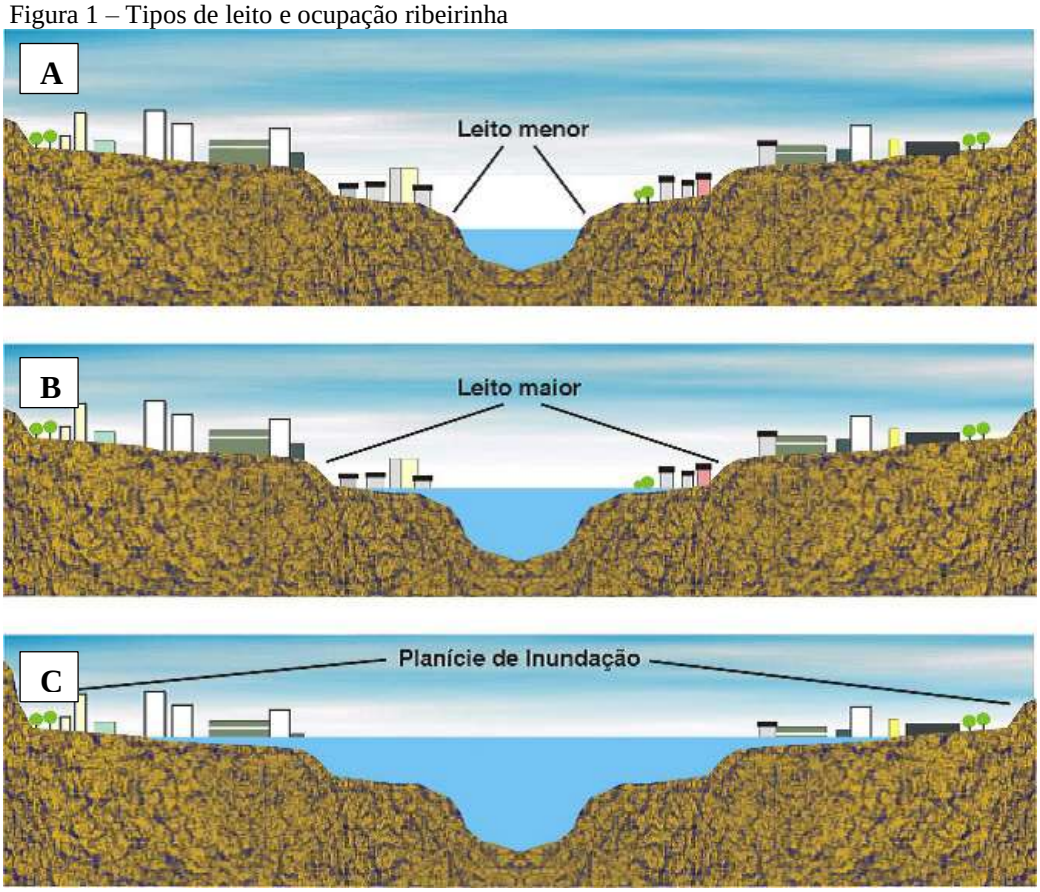
Neste ponto é preciso esclarecer uma questão conceitual, visto que frequentemente o termo enchente e inundação são usados como sinônimos, entretanto do ponto de vista hidrológico esses eventos possuem significados distintos.

Para Tucci (2007) os rios, de uma forma geral, possuem dois leitos, sendo um menor (Figura 1-A) responsável pelo escoamento hídrico na maior parte do tempo, e o maior (Figura 1-B), morfologicamente definido como a altura máxima que a água pode chegar num período com eventos chuvosos extremos, períodos de cheia.

O mesmo autor salienta que enchentes ocorrem periodicamente, em média possuem tempo de retorno superior a dois anos, e são decorrentes de um processo natural, onde o rio ocupa seu leito maior, ao passo que as inundações ocorrem quando a água transborda de seu leito maior e atinge sua várzea (Figura 1-C), que são áreas não habitualmente submersas.

Destaca-se aqui o conceito de alagamento, que não deve ser confundido com as definições apresentadas anteriormente, visto que este consiste em um acúmulo de água formado por fortes precipitações em uma área distante ao leito do rio, devido a problemas no sistema de drenagem (CASTRO, 2012).

Figura 1 – Tipos de leito e ocupação ribeirinha



Fonte: Alves (2016)

Assim, para Tucci (2007) as enchentes urbanas são consequências da combinação de dois processos: (a) da ocupação irregular do leito maior e (b) da intensificação das intervenções humanas sobre a terra. Porém, além desses processos é necessário que a área apresente suscetibilidade, por exemplo, Lisbôa (2013) diz que a várzea de um rio é mais extensa nos seus cursos médio e baixo, onde a declividade se reduz e aumenta a incidência de áreas planas, as quais são mais propicias à ocupação e mais suscetíveis a inundação.

Suscetibilidade define-se como “qualidade de suscetível” (SACCONI, 2001), ou seja, que admite, é passível, é propenso. Quando aplicado ao estudo de áreas, o uso do termo indica predisposições naturais à ocorrência de desastres, ou seja, quando um ou mais atributos físicos que determinada área possui a torna potencialmente sujeita aos efeitos relacionados, neste caso, do comportamento hídrico (LIMA, 2010).

2.1.1 Morfometria de bacias hidrográficas

As primeiras interpretações descritivas referentes ao sistema de drenagem de um bacia hidrográfica datam do início do século XIX. Depois disso, autores como Horton (1945), Strahler (1957) e Schumm (1956) definiram sistemas de classificação para os canais e índices utilizados até os dias atuais (COLLARES, 2000).

Segundo Angillieri (2012) as medidas morfométricas permitem predizer o comportamento da bacia na presença de eventos pluviométricos extremos. Para Rodrigues e Mendiondo (2013) a caracterização morfométrica de bacia promove a descrição quantitativa de sistemas hídricos, identificam correlações entre propriedades geomorfológicas e respostas hidrológicas, além possibilitar a comparação entre bacias distintas.

Gregory e Walling (1973 apud PAIVA; PAIVA, 2003) indicam que para o perfeito detalhamento da bacia é fundamental o levantamento das seguintes características:

- Área e forma: grande parte das características da bacia está correlacionada com a área, que deve ser delimitada da forma mais precisa possível, principalmente em bacias pequenas. A forma pode ser decisiva quanto à tendência de respostas mais rápidas ou mais lentas do sistema.
- Densidade da rede de drenagem: é um parâmetro de grande sensibilidade, visto que auxilia na ligação entre os atributos de forma da bacia e os processos que agem sobre o curso d'água. A extensão e densidade da rede de drenagem têm influência direta nas vazões afluentes.
- Comprimento da bacia e do canal principal: o caminho que a água percorre dentro da bacia, até atingir seu exutório determina o tempo de resposta da bacia.
- Declividade: esse parâmetro tem influência direta na velocidade do fluxo. Por vezes é representada pela declividade média do seu curso d'água principal.

Nos estudos mais recentes sobre caracterização de uma bacia é habitual utilizar mais de dez parâmetros morfológicos, Farias et al. (2015), Vieceli et al. (2014) e Angillieri (2012) utilizaram respectivamente quinze, onze e vinte e um parâmetros morfológicos. Vale lembrar que esses parâmetros informam características quanto: a forma, o relevo e a rede de drenagem da bacia hidrográfica.

Quanto à forma, sabe-se que bacias circulares tendem a converter o escoamento superficial para um trecho pequeno do rio principal de maneira mais rápida e por isso apresentam potencial a formação de enchentes. Em bacias alongadas esse potencial diminui,

pois a resposta ocorre de maneira mais lenta, além disso, Oliveira et al. (2010) lembra que é menor a possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo, simultaneamente, todo o perímetro da bacia.

O padrão de drenagem além de predizer o comportamento do escoamento superficial também releva algumas propriedades sobre a infiltração e litologia (TONELLO, 2005). “Nas rochas onde a infiltração encontra maior dificuldade há condições melhores para o escoamento superficial, gerando possibilidades para a esculturação de canais” (CHRISTOFOLETTI, 1974).

Quanto às características de relevo, já foi dito que declividade influencia a velocidade com que o escoamento atinge as áreas mais planas, ou seja, a associação de uma bacia com alta declividade e uma cobertura impermeável/solo com baixa taxa de infiltração pronunciam picos de vazão e potencializam as enchentes.

2.2 Geoprocessamento e o Planejamento Urbano

O armazenamento e a representação de informações do “mundo real” que antes só eram realizados por meio da cartografia, passaram a ser realizados em ambiente computacional, abrindo espaço para o surgimento do geoprocessamento. Câmara e Davis (2004) definem geoprocessamento como uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica.

Entre as áreas que vêm sendo fortemente influenciadas por esta ciência, encontra-se o planejamento urbano e regional. Medeiros e Câmara (2004) ressaltam que a moderna gestão do território deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente, abrangendo as interações do meio físico-biótico-social. Os resultados almejados dessas interações são possíveis por meio do uso das ferramentas computacionais do geoprocessamento, conhecidas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), onde são realizadas análises complexas por meio da integração de dados de diferentes fontes em um banco de dados geo-referenciado.

Um banco de dados é organizado em torno de diversos planos de informação (PI), Casanova et al. (2005) dizem que um PI representa uma estrutura de agregação de um conjunto de informações espaciais que são localizadas sobre uma região geográfica e compartilham um conjunto de atributos, ou seja, agrega coisas semelhantes. Vale ressaltar que PI são inseridos no banco de dados através da importação de arquivos de dados geográficos em formatos de intercâmbio como *shapefiles* (ponto, linha, polígono) ou *geotiff* (imagem), mas também podem ser gerados a partir de processamentos executados sobre outros PI já armazenados no banco.

2.2.1 Imagens orbitais

Uma imagem orbital é o resultado da conversão de energia eletromagnética proveniente dos objetos da superfície terrestre, e segundo Iwai (2003) as imagens provenientes de sensores remotos apresentam-se na forma adequada para se extrair informações que por vezes fornecem subsídios para a tomada de decisão no planejamento urbano.

Uma das formas mais habituais de extrair informações das imagens orbitais é através da interpretação visual. Conforme Novo (2010, p. 326) a interpretação visual de imagens "pode ser definida como o ato de examinar uma imagem com o propósito de identificar objetos e estabelecer julgamentos sobre suas propriedades". O processo de interpretação dos objetos terrestres é facilitado pela associação desses com vários elementos de reconhecimento, tais como: tonalidade, cor, tamanho, forma, textura, padrão e sombreamento.

O padrão refere-se ao arranjo espacial dos objetos e juntamente com o tamanho constituem-se em fatores de grande importância na identificação. A tonalidade corresponde à quantidade de energia refletida ou da radiação emitida registrada pelo sensor, varia em uma escala de cinza (do branco ao preto), já a textura é formada pela agregação de objetos muito pequenos, difíceis de serem identificados individualmente, que passam a ser analisados em conjunto. A cor, que é mais sensível ao olho humano, permite aquisição de maior quantidade de informação e é obtida pela combinação das bandas espectrais (IWAI, 2003). De acordo com Florenzano (2008) uma área urbana construída é facilmente identificada pela cor e pela textura.

Assim, imagens orbitais de alta resolução assumem uma grande importância nos estudos que as utilizam, pois apresentam detalhes sobre as diferentes superfícies, incluindo o tecido urbano e, portanto agregam muita informação sobre o grau de impermeabilização do solo (que influi diretamente no processo de infiltração e escoamento da água) e no padrão habitacional que se instala nas margens dos cursos d'água.

2.2.2 Análise espacial de dados geográficos

A ideia central da análise espacial é extrair informação adicional a partir de dados geográficos conhecidos. Grande parte desses dados é proveniente de amostras pontuais dentro do espaço geográfico, muitas vezes essa não é a representação adequada para o inicio de uma análise. Quando é preciso que o fenômeno seja representado de forma contínua, torna-se necessário utilizar técnicas de interpolação (STOLLE, 2008), e o resultado denomina-se Modelo Numérico do Terreno (MNT) ou Modelo Digital do Terreno (MDT).

Segundo Moreira et al. (2004), quando se tem o conhecimento das relações que ocorrem entre os dados geográficos é possível fazer previsões através de modelos baseados em conhecimento, e assim, fornecer apoio aos especialistas em futuras tomadas de decisão.

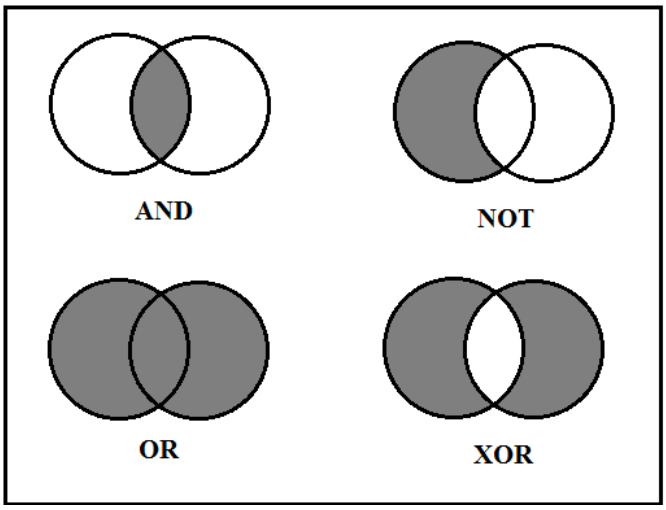
Para a produção de novos mapas a partir de dados já existentes é preciso realizar operações sequenciais que recebem o nome de "álgebra de mapas", segundo Tomlin (1990 apud BARBOSA, 1997) essas operações podem ser usadas para classificar tematicamente um atributo em função do seu valor em cada posição, ou combinar atributos diferentes com o objetivo de encontrar alguma correlação espacial entre eles.

A álgebra de mapas quando associada a métodos de integração de dados (MOREIRA, 2001) transforma-se em uma análise eficiente para identificar áreas com determinado potencial, isto é, áreas que satisfazem um conjunto de critérios. Dentre os métodos de integração destacam-se o método *Booleano*, a média ponderada e *Fuzzy*.

2.2.2.1 Lógica Booleana

Baseia-se na combinação lógica de mapas binários, sendo que cada mapa contém uma determinada evidência (MEIRELLES; MOREIRA E CAMARA, 2007). As regras de associação *booleanas* são baseadas na teoria dos conjuntos e conforme Burrough e McDonnell (1998) podem ser resumidas pelas operações: (1) elementos contidos na intersecção entre A e B (A and B); (2) elementos contidos exclusivamente em A (A not B); (3) elementos contidos tanto em A como em B (A or B); e (4) elementos contidos em A e B, mas não incluídos na intersecção entre A e B (A xor B). A Figura 2 estrutura as operações com lógica *booleana*.

Figura 2 – Associações *booleanas*



Fonte: Meirelles; Moreira; Camara, 2007

Com base na Figura 2, observa-se que a principal característica da lógica *booleana*, além de sua simplicidade, é a tendência bivalente de um objeto pertencer a um conjunto. Ou seja, existem apenas duas possibilidades: “sim (pertence, há risco)” ou “não (não pertence, não há risco)”. Neste método não há espaço para uma condição intermediária como o “talvez” e é análoga à sobreposição física de mapas em uma mesa de luz (MOREIRA, 2001).

Meirelles; Moreira e Camara (2007) diz que na prática, a combinação booleana é normalmente inapropriada, pois considera que todos os critérios utilizados na modelagem possuem o mesmo grau de importância. Enquanto que para Ruhoff (2004) é a representação dos fenômenos naturais que fica comprometida, visto que os limites rígidos e nítidos da combinação *booleana* nem sempre os representam corretamente.

Recentemente, Zaidi et al. (2015), Shahabi et al. (2014) e Dashtpagerdi et al. (2013) utilizaram em seus estudos a combinação da lógica booleana e SIG, onde procuraram, respectivamente, áreas potenciais para recarga de água subterrânea, implantação de aterro sanitário e áreas inundáveis.

2.2.2.2 Média ponderada

Segundo Meirelles; Moreira e Camara (2007, p. 117) a utilização deste método permite que “as faltas de algumas propriedades sejam compensadas pelo excesso de outras”, visto que cada evidência representada por meio de um mapa receberá uma peso relativo à sua importância para a hipótese considerada (MOREIRA, 2001).

Sobre esse conceito a atribuição de pesos é baseada em duas situações. A primeira considera que os mapas sejam binários, ou seja, cada mapa é simplesmente multiplicado por seu fator de peso. A segunda situação considera que os mapas possuem multiclasses, neste caso, serão atribuídos valores distintos em cada classe considerando sua importância no fenômeno estudado, assim como em cada mapa.

A utilização da média ponderada permite maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método *booleano*. Porém, considerar o peso como constante ao longo de todo o mapa é tido por Meirelles; Moreira e Camara (2007) como uma limitação deste método, pois a linearidade atribuída a evidência muitas vezes não existe quando se considera o ambiente de forma integrada.

2.2.2.3 Lógica Fuzzy

A modelagem baseada em lógica *fuzzy* (também conhecida como lógica nebulosa ou lógica difusa) traz um melhoramento em relação à média ponderada e a lógica booleana, pois

permite flexibilizar os valores dos pesos por região, ao mesmo tempo em que elimina os limites rígidos impostos pelas classes de uma evidência (MEIRELLES; MOREIRA; CAMARA, 2007; NASCIMENTO, 2008).

A utilização desse método de acordo com Bourrough e McDonnell (1998) sempre será indicada quando for necessário lidar com ambiguidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos.

Foi Zadeh (1965) que introduziu a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Matematicamente, Moreira (2001, p. 26) define conjunto *fuzzy* como:

> Se *Z* denota um espaço de objetos, então o conjunto *fuzzy A* em *Z* é o conjunto expresso pelo par ordenado: $A = (z, MF_A(z))$ para todo $z \in Z$, onde a função $MF_A(z)$ é conhecida como uma "graduação" mapeável do membro *z* em *A*. Normalmente $MF_A(z)$ é um número que varia de "0" a "1", com o "1" representando o membro que se encaixa completamente ao conjunto e o "0" como o membro que não pertence ao conjunto.

Moreira (2001) completa que o valor da função MFA(z) de um objeto z em A pode ser interpretado como um grau de compatibilidade de um predicado associado ao conjunto A e ao objeto z. A função *fuzzy*, ou função de pertinência, deve assegurar que o valor do membro no centro do conjunto é "1", e que este decai de maneira lógica através da fronteira *fuzzy* (zona de transição) para as regiões fora do conjunto onde o valor deve ser "0". Em alguns casos, o ponto onde o valor do membro é igual a 0,5 é denominado de "ponto de cruzamento" e ele deve coincidir com os contatos rígidos dos modelos *booleanos*.

Segundo Burrough e McDonnell (1998) as mais comuns e utilizadas funções para determinar os valores dos membros *fuzzy* são as lineares e as quadráticas, porém de acordo com Meirelles; Moreira e Camara (2007) as funções podem assumir qualquer formato analítico ou arbitrário apropriado ao problema modelado.

Para conjuntos precisos, a associação da função de pertinência ocorre da seguinte forma:

$$MF_A(z) = 0 \qquad \text{para } z < b_1;$$
$$MF_A(z) = 1 \qquad \text{para } b_1 \leq z \leq b_2;$$
$$MF_A(z) = 0 \qquad \text{para } z > b_2;$$

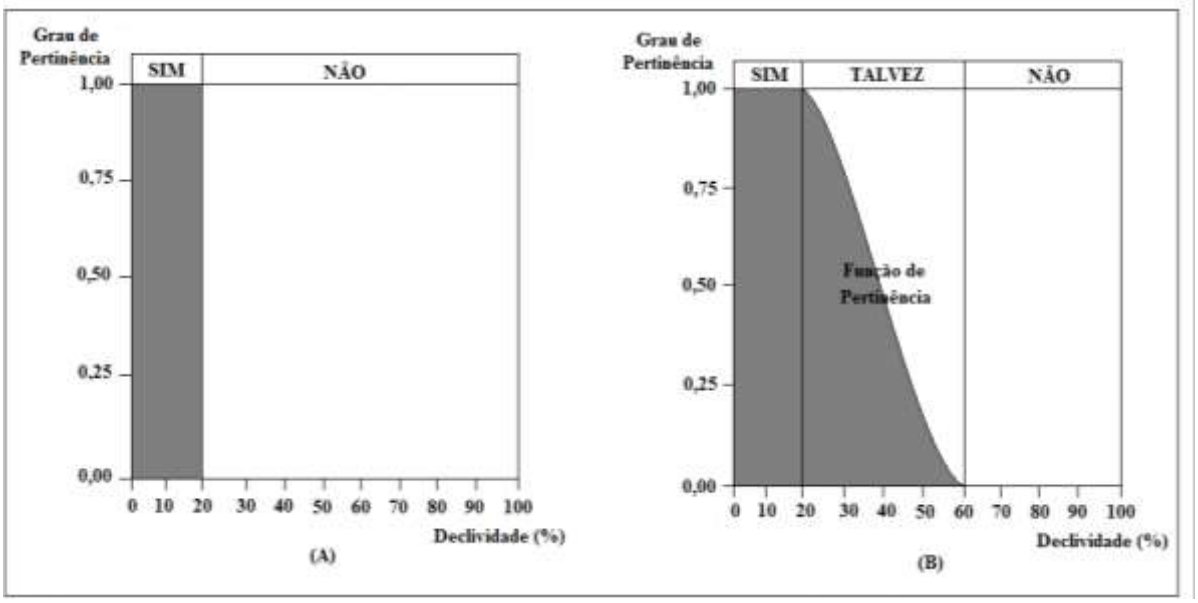
onde b1 e b2 são as condições que representam, respectivamente, os limites precisos superior e inferior do conjunto.

Mendes e Cirilo (2013) exemplificam a associação da função de pertinência ao mesmo tempo que distinguem a lógica *booleana* da *fuzzy*. A evidência utilizada foi a declividade do terreno, um dado relevante em diversas situações. No exemplo os autores dizem que a declividade pode ser considerada como "adequada" com valores ≤ 20% e "inadequada"

quando maior que 20%, isso caracteriza a lógica *booleana* e divide uma propriedade contínua no espaço geográfico em um degrau, como mostra a Figura 3-A. Investigando-se melhor o problema notou que a divisão anterior não é adequada e que a declividade realmente inadequada apresenta valores > 60% e que entre 20% e 60% tem-se um zona de transição que será representada por uma função de pertinência, conforme Figura 3-B.

A combinação de diferentes conjuntos *fuzzy*, ou seja, a união de todos os critérios em um único plano/mapa é realizada por meio de operadores *fuzzy*. Os operados mais utilizados são *fuzzy* mínimo, máximo, média, ponderada e gama. Nesse sentido, o *fuzzy* ponderado traz consigo as vantagens da lógica fuzzy e da média ponderada, pois modela os dados espaciais de forma que é possível avaliar um fenômeno de forma escalonada, e não apenas a sua presença ou ausência.

Figura 3 – Representação da declividade do terreno: (A) Lógica *booleana* e (B) Lógica *fuzzy*



Fonte: Mendes e Cirilo (2013)

A lógica *fuzzy* vem sendo aplicada em diversos campos de estudos, e nos últimos anos a combinação com os SIG's está bastante usual. Feizizadeh et al., (2014) utilizou o *fuzzy* ponderado e o SIG para mapear áreas suscetíveis ao deslizamento de terra a partir de nove critérios. Com metodologia semelhante o mesmo tema foi abordado por Bortoloti et al. (2015) por meio de seis critérios condicionantes.

Radmehr e Araghinejad (2015) aplicaram o conceito de lógica fuzzy para analisar a vulnerabilidade de inundações. Andres et al. (2013) avaliou o risco de inundação a fim de se planejar a expansão urbana de uma bacia hidrográfica. A avalição de áreas para ocupação

urbana em uma cidade foi estudada por Nascimento; Lima e Santos (2009), que utilizaram uma combinação das lógicas *fuzzy* e *booleana*. Ainda Paula (2008) utilizou a lógica *fuzzy* como técnica de apoio ao zoneamento ambiental. A utilização do conceito da lógica fuzzy é também encontrada em temas relacionados a áreas de aptidão para construção de aterros sanitários e pesquisa mineral (SAMIZAVA et al, 2008; MOREIRA, 2001).

A diversidade de temas que a lógica *fuzzy* abrange demonstra a eficiência da técnica, que é caracterizada pela maior flexibilidade na modelagem dos dados, e por isso apresenta uma maior proximidade aos dados reais observados em campo (STOLLE, 2008).

2.2.2.4 Suporte à decisão: Processo Analítico Hierárquico (AHP)

Em geoprocessamento o suporte à decisão se resume a classificar o espaço em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade (GOTTARDO, 2003). Existe uma variedade de técnicas para se determinar a contribuição relativa dos critérios que se encontram nessas áreas. Muitos autores (FERNÁNDEZ; LUTZ, 2010; CHEN; YEH; YU, 2011; STEFANIDIS; STATHIS, 2013) consideram a técnica AHP bastante promissora no processo de tomada de decisão, visto que esse método além de organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios, também mede a consistência dos julgamentos.

A técnica AHP baseia-se na lógica de comparação pareada, ou seja, os critérios são comparados, dois a dois, utilizando como referência uma escala pré-definida conforme pode ser visualizado na Tabela 1. A escolha do valor na escala leva em consideração o conhecimento empírico dos critérios e a importância relativa entre eles.

Tabela 1 – Escala de julgamento de importância da técnica AHP

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação à outra
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação à outra
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação à outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	A evidência favorece uma alternativa em relação à outra, com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições

Fonte: Saaty (1990)

O conhecimento dos autovetores e autovalores da matriz permite calcular a razão de consistência (RC). Essa medida matemática analisa o grau de proporcionalidade e

transitividade dos julgados. Segundo Saaty (1990) um julgamento coerente e aceitável apresenta valores de RC menores ou iguais a 0,10, um valor acima disso demostra que o julgamento foi inconsistente e que sua aplicação pode ser considerada incoerente. Neste caso, o mesmo autor recomenda que a matriz de comparação seja revisada e que os valores de comparação entre os critérios sejam alterados.

2.3 Exemplos de mapeamento de áreas inundáveis

Fernández e Lutz (2010), com o auxílio de SIG e da análise de decisão multicritério desenvolveram um estudo para zonear o perigo de inundação urbana na província de Tucumán, Argentina. Os autores concluíram que a metodologia escolhida gerou um mapa de risco com um bom grau de precisão, devido a isto os autores sugerem que o mapa tem a capacidade de se tornar uma nova ferramenta para as cidades estudadas, no sentido de que pode ajudar os planejadores a avaliar as áreas que necessitam de revisão de infraestrutura para reduzir a vulnerabilidade da população a eventos de cheia. Concluíram ainda que as áreas mais suscetíveis são caracterizadas pela confluência de vários canais, uma topografia de planície e um declive suave.

Lima (2010) sintetizou mapas quanto a geologia, solos, ocupação e uso do solo, geomorfologia, drenagem, declividade e hipsometria na bacia hidrográfica do arroio do Salso em Porto Alegre/RS, e concluiu que a bacia apresenta características naturais que a tornam muito suscetível à inundação e que isto é potencializado pela ação humana que resulta em grandes alterações na dinâmica hídrica. O autor identificou as áreas com maior risco associando principalmente as áreas de baixas declividades com solos de pequena capacidade de drenagem.

Chen; Yeh e Yu (2011) utilizaram a integração entre SIG e o processo de análise hierárquica em uma área urbana e uma área semi-rural no centro de Taiwan. A conclusão foi que para ambos os critérios utilizados a área urbana apresentou maior potencial de inundação, além disso, os autores salientam que a metodologia adotada fornece informações úteis e bastante detalhadas para a gestão de riscos a enchentes e que pode ser facilmente aplicada em outras áreas daquele país.

Hora e Gomes (2009) realizou seu trabalho em um trecho do rio Cachoeira no município de Itabuna/BA, e com auxílio de SIG elaborou um mapa de riscos com manchas de inundação para vários períodos de retorno. Concluiu que as áreas com maiores problemas são

aquelas que apresentam alta vulnerabilidade habitacional (maioria das habitações é constituída por barracos) e ocupação desordenada.

Weiss (2012) diagnosticou as áreas de fragilidade ambiental quanto a enchentes e desmoronamentos no perímetro urbano de Santa Maria/RS utilizando uma metodologia que emprega álgebra de mapas. Com os zoneamentos a autora concluiu que é possível definir quais áreas necessitam de metas preventivas, seguridade pública, intervenção, reestruturação, recuperação ambiental e expansão urbana.

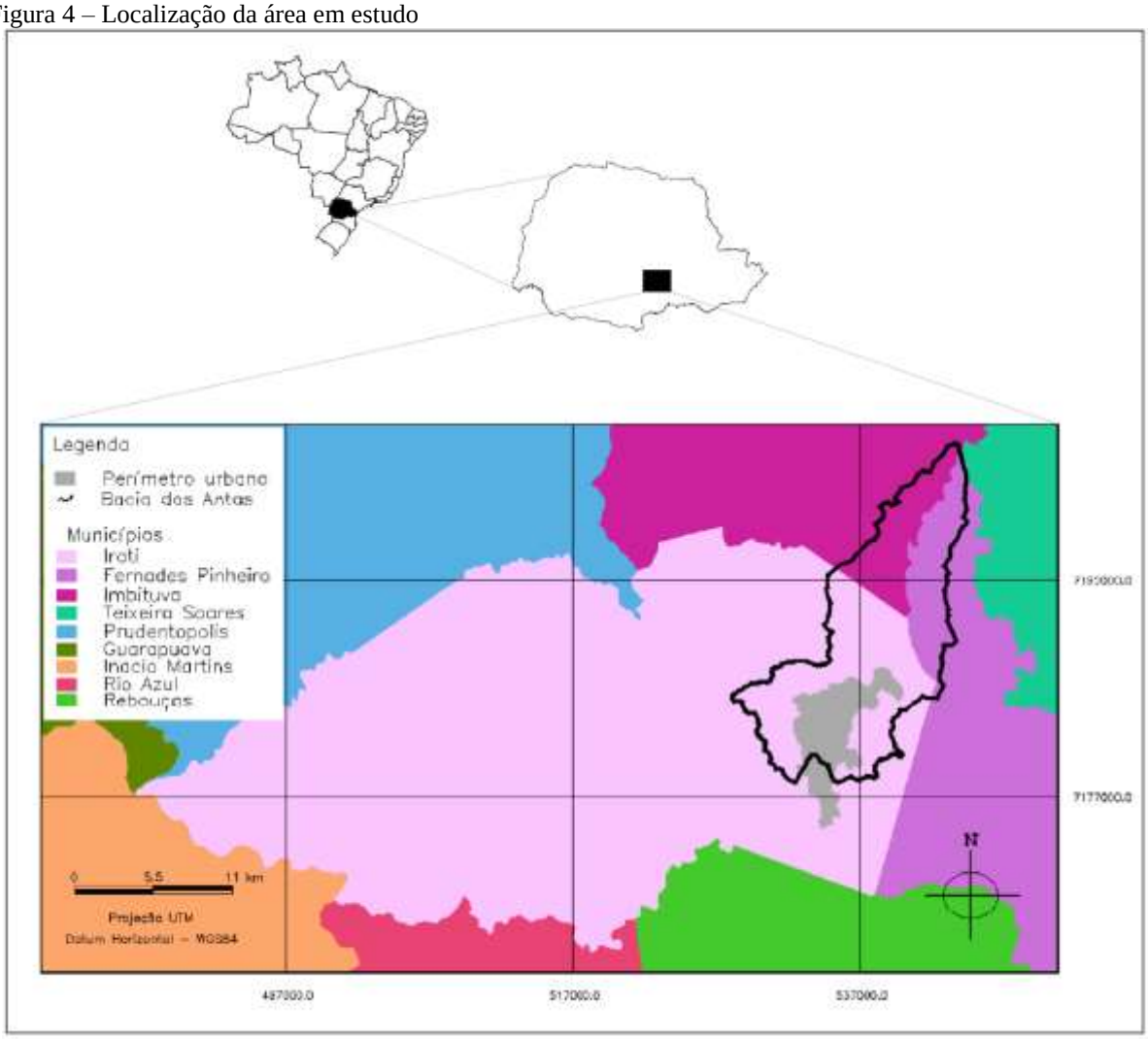
Andrade; Ferreira e Silva (2014) elaboram um mapa de risco de inundação mediante o cruzamento de informações hipsométricas, de declividade e de uso e ocupação do solo, onde cada variável recebeu pesos diferenciados. Os resultados demonstraram os aspectos positivos da metodologia, onde os autores concluíram que o mapa de risco elaborado pode ser útil para as estratégias de enfrentamento dos problemas ocorridos na bacia do córrego São Pedro, em Uberlândia/MG.

Bathrellos et al. (2016) analisaram os rios Kifisos e Ilisos, localizados na planície de Atenas, Grécia. Os fatores utilizados foram a declividade, a altitude a distância dos cursos, hidrolitologia e cobertura da terra. Para a avaliação das variáveis utilizou-se o processo analítico hierárquico integrado a um SIG. Os resultados mostraram que as áreas caracterizadas como alto risco de inundação são caracterizadas pelo relevo de planície e pela expansão e urbanização intensa.

3 Área de estudo

Esse item possui como finalidade caracterizar a área de estudo quanto aos aspectos demográficos e físicos, além de abordar um breve histórico quanto as enchentes ocorridas no município.

Figura 4 – Localização da área em estudo



Org: A autora

Geologicamente, a região de Irati formou-se no Permiano Carbonífero, com topografia marcada por encostas suaves a intermediárias, encostas íngremes, vertentes retilíneas e topos planos. Os solos são acinzentados/vermelhos ao norte e castanhos ao sul (PREFEITURA MUNICIPAL DE IRATI, 2016).

Quanto à hidrografia, o município constitui-se o divisor de água de três principais bacias hidrográficas do Paraná: Iguaçu, Ivaí e Tibagi. Desta última, o curso de água mais importante é o rio das Antas, visto que este rio juntamente com cinco afluentes (arroio da

Cascata, arroio da Lagoa, arroio dos Pereiras, arroio Nhapindazal e arroio Rio Bonito) permeiam 80% do perímetro urbano.

O clima do município segundo a classificação climática de Köppen é o Cfb (temperado úmido mesotérmico), caracterizado por verões frescos, geadas severas e frequentes e sem estação seca. A média anual de precipitação pluviométrica no município, durante o período de 1963 a 2010, foi de 1586 mm, com cerca de 136 dias de chuva por ano (ICMBio, 2013).

3.1 Aspectos históricos sobre a ocorrência de cheias no rio das Antas

Minikowski e Maia (2008) investigaram a ocorrência de cheias no Município de Irati com base nas observações da série histórica de precipitação diária e em entrevistas com moradores e comerciantes da região central da cidade. Os dados de precipitação foram obtidos online no Sistema de Informações Hidrológicas da ANA (Agência Nacional das Águas), a estação em questão foi a de código 2550007 e os dados estudados compreendem o período de outubro de 1966 a fevereiro de 2004.

Os autores identificaram onze datas cuja precipitação foi superior a 100 mm (Tabela 2), essas informações cruzadas com os resultados das entrevistas apontaram que as piores enchentes sofridas no município foram as dos anos de 1983 (dois eventos no mesmo ano), 1987 e 1992.

Tabela 2 – Ocorrências das precipitações diárias maiores que 100 mm

Classe (mm)	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160
Data de ocorrência	19/02/1972	24/01/1989	18/12/1986	-	-	08/05/1987
	20/05/1983	17/11/1990	-	-	-	29/05/1992
	09/07/1983	01/05/1993	-	-	-	-
	23/04/1998	-	-	-	-	-
	04/01/2003	-	-	-	-	-

Fonte: Minikowski e Maia (2008)

Apesar da precipitação diária das enchentes que ocorreram em 1983 serem inferiores as dos anos de 1987 e 1992, o estudo revelou que a precipitação acumulada dos dias anteriores teve fundamental relevância para o ano de 1983 ser facilmente lembrado como o ano da enchente de maior magnitude no município.

Posteriormente ao período que abrange a série histórica, houve um evento de precipitação (e enchente) que superou o ano de 1983. Em junho de 2014, o acumulado de precipitação em dois dias foi 195 mm.

4 Materiais e Métodos

A criação do banco de dados para a realização desse trabalho utilizou-se do *software* SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, versão 5.4.2 (CÂMARA et al., 1996).

A base cartográfica engloba uma imagem orbital que abrange toda a área urbana do município, essa imagem foi gerada pelo satélite *Geoeye* no ano de 2013 e disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Irati. Vale destacar que o satélite *Geoeye* é um dos mais atuais satélites de observação da Terra capaz de adquirir imagens de alta resolução espacial da superfície da Terra, foi lançado no dia 06 de setembro de 2008 pela empresa Digital Globe. Opera a 684 km de altitude e é capaz de coletar dados com 0,50 centímetros verdadeiros de resolução espacial no modo pancromático e 2,00 m no modo multiespectral. A resolução radiométrica das imagens é de 11 bits (2048 níveis de cinza) (GLOBALGEO, 2016).

Foram também utilizados os seguintes materiais de apoio: a) uma carta da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), folha Irati MI-2834/4, na escala 1:50.000. Esta base contém informações altimétricas (curvas de nível com equidistância de 20 metros) e hidrográficas que abrangem toda a área da bacia hidrográfica do rio das Antas; b) base cartográfica cedida pela administração municipal na escala 1:2.000, com informações altimétricas (curvas de nível com equidistância de 5 m) e hidrográficas que abrangem o perímetro urbano do município de Irati (Apêndice A).

Quanto às análises espaciais é necessário destacar a ferramenta Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL). Essa ferramenta foi desenvolvida com base no modelo de dados do sistema SPRING. A linguagem LEGAL possibilita a realização das análises através de álgebra de mapas, e também permite simular os fenômenos do mundo real sobre atributos espaciais e não espaciais armazenados na base de dados.

Um programa LEGAL é formado a partir de uma lista de sentenças[3] que descrevem um conjunto de ações sobre dados espaciais. Estas sentenças são estruturadas em quatro grupos: (1) Declarações das Variáveis, (2) Instanciações das Variáveis, (3) Operações de Álgebra de Mapas e (4) Comandos de Controle.

As declarações definem variáveis que serão associadas aos dados fornecidos ou produzidos no programa. Na instanciação, as variáveis são efetivamente associadas aos planos de informação, ou seja, correspondem à uma operação de recuperação de dados já existentes

[3] Cada sentença em LEGAL pode envolver símbolos (por exemplo,'{', '(', ';', ',');' operadores (por exemplo, '+','*', '&&', '||', '<', '<=', '!='); palavras reservadas (Novo, Tematico, Nome, Atribua, etc); nomes de variáveis; nomes de itens de um banco de dados Spring (planos de informação, geoclasses, etc).

no banco de dados, ou a criação de um novo dado representado em algum plano de informação. As operações são descritas por expressões algébricas segundo regras gramaticais definidas, e são aplicadas sobre as variáveis declaradas e instanciadas previamente. Os comandos de controle permitem o controle do fluxo de processamento do programa (INPE, 2016). A utilização da linguagem de programação LEGAL no cruzamento de variáveis explicativas foi usada por autores como Gottardo (2003), Silva (2005) e Nascimento (2008).

4.1 Implementação dos dados em ambiente SIG

Um banco de dados espacial foi implementado no sistema de projeção UTM 22S e datum horizontal WGS84. Foram gerados planos de informação (PI) em formato raster e vetorial a partir da importação das bandas de imagem de satélite em formato *geotiff* e dos arquivos vetoriais em formato *shapefile* das curvas de nível e hidrografia.

Com as amostras das curvas de nível da carta topográfica foi gerada a Grade Triangular, conhecida como TIN (*Triangulation Irregular Network*), utilizando a interpolação matemática de *delaunay*. A partir do TIN foi gerada uma grade retangular altimétrica com valores de resolução de 10 m, bem como uma grade de declividade com valores em porcentagem. O mesmo foi realizado com as amostras das curvas de nível do perímetro urbano, entretanto foi utilizada a resolução de 2,5 m para a grade retangular. As grades com resolução de 10 m foram utilizadas para a caracterização morfométrica, ao passo que as com resolução de 2,5 m foram utilizadas na análise de suscetibilidade a enchentes.

Para a criação de mapas temáticos foi utilizada a ferramenta “Fatiamento...”. O MNT altimétrico foi dividido em classes de 50 em 50 metros. O MNT clinométrico foi dividido em seis intervalos de relevo (Tabela 3) conforme sugerido pela Embrapa (1979).

Tabela 3 – Classificação da declividade segundo a Embrapa (1979)

Declividade (%)	Discriminação
0-3	Relevo plano
3-8	Relevo suave ondulado
8-20	Relevo ondulado
20-45	Relevo forte ondulado
45-75	Relevo montanhoso
>75	Relevo forte montanhoso

4.2 Morfometria da bacia e das sub-bacias hidrográficas

As características e índices utilizados na análise morfométrica da bacia e das sub-bacias estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Índices calculados para o estudo na bacia hidrográfica e sub-bacias hidrográficas

Parâmetros Básicos	Parâmetros Derivados
Área total	Coeficiente de compacidade (Kc)
Perímetro total	Fator de forma (F)
Declividade (mínima, média, máxima)	Índice de circularidade (IC)
Altitude (mínima, média, máxima)	Densidade de drenagem (Dd)
Declividade média do curso d'água principal	Coeficiente de manutenção (Cm)
Comprimento do curso d'água principal	
Comprimento total dos cursos d'água	
Ordem dos cursos de água	

Fonte: Adaptado Tonello (2005) e Angillieri (2012)

Alguns dos parâmetros básicos (área, perímetro, comprimento dos cursos d'água) foram obtidos através de leitura direta no SIG. As informações pontuais de altitude e declividade foram obtidas através de leitura direta sobre os respectivos modelos numéricos. A ordem dos cursos d' água foi encontrada de acordo com o sistema proposto por Strahler (1957).

Os parâmetros derivados foram calculados pelo método convencional, ou seja, por meio de equações. As equações e definições dos índices apresentados neste trabalho condiz com Cardoso et al. (2006).

O coeficiente de compacidade (Kc) (Equação 1) relaciona a forma da bacia com um círculo. É um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente de seu tamanho. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade, assim bacia circulares apresentam o Kc mais próximo da unidade, ou seja, mais próximos do valor 1. Bacias arredondadas proporcionam uma rápida conversão do escoamento superficial, o que a tornam mais suscetíveis a enchentes.

$$Kc = 0{,}28\ \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

sendo: P o perímetro (m) e A a área de drenagem (m²)

O fator de forma (Equação 2) relaciona a forma da bacia com a de um retângulo. Bacias que apresentam forma mais alongada, F baixo, não são tão suscetíveis a enchentes quando em comparação a bacias de mesma área, mais com F maior.

$$F = \frac{A}{L^2} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

sendo: A a área de drenagem (m²) e L comprimento do eixo da bacia (m)

O índice de circularidade (IC) (Equação 3), simultaneamente ao Kc, tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada.

$$IC = \frac{12{,}57.A}{P^2} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

sendo: A a área de drenagem (m²) e P o perímetro (m)

A densidade de drenagem (Dd) (Equação 4) indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem e a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

sendo: Dd a densidade de drenagem (km/km²), Lt o comprimento total de todos os canais (km) e A a área de drenagem (km²)

O coeficiente de manutenção (Cm) (Equação 5) fornece a área mínima necessária para a manutenção de um quilômetro de canal de escoamento. Segundo Schumm (1956) É um valor numérico bastante importante para a caracterização do sistema de drenagem.

$$Cm = \frac{1}{Dd} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

sendo: Cm o coeficiente de manutenção (km²/km) e Dd a densidade de drenagem (km/km²)

4.3 Mapeamento das áreas suscetíveis a enchentes

A escolha dos critérios para a análise de suscetibilidade a cheias no município de Irati foi adaptado de Fernández e Lutz (2010). Foram considerados os seguintes critérios: altitude, declividade, distância do curso d'água e grau de urbanização.

1. Altitude – quanto maior a altitude, menor a chance de inundação para uma determinada região, visto que a lei da gravidade direciona a água para as regiões mais baixas.
2. Declividade – influencia diretamente no acúmulo de água no terreno, visto que áreas planas apresentam maiores chances de sofrer inundações.
3. Distância do curso d'água – as áreas mais afetadas durante eventos de cheias são aquelas mais próximas dos rios, como consequência do extravasamento.
4. Grau de urbanização – a ocupação da terra influencia as etapas do ciclo hidrológico, principalmente a infiltração e no escoamento superficial da água. As áreas com maior impermeabilidade tendem a acumular mais água em superfície.

Vale ressaltar que a obtenção dos dados do quarto critério (grau de urbanização) foi a partir da interpretação visual da imagem do satélite *Geoeye*, onde vetorizou-se as classes de

impermeabilidade de acordo com o grau de urbanização do perímetro urbano do município de Irati, a divisão dessas classes foi adaptado de Genovez (2003).

4.3.1 Lógica *fuzzy*: Padronização dos dados geográficos

A primeira etapa da análise espacial para o mapeamento de suscetibilidade é a aplicação da lógica *fuzzy*. O objetivo desta etapa é eliminar os limites rígidos que foram impostos pelas classes temáticas, além de padronizar o MNT de cada critério para valores que variam de 0 a 1. Segundo De Paula (2008) a padronização é necessária para garantir a uniformidade das variáveis, ou seja, para que elas sejam apresentadas de uma forma contínua, visto que suas unidades temáticas são distintas.

Quando enumerada, esta etapa abrange a ordem apresentada a seguir:

1- Estabelecimento das faixas de transição por meio de equações lineares;
2- Elaboração e execução de programas utilizando rotinas de processamento em linguagem de programação LEGAL no SPRING para espacialização numérica contínua. Nesses programas serão atribuídos os valores de acordo com a importância que exercem no processo de enchentes, sendo o valor 1 (um) atribuído ao membro do conjunto *fuzzy* (MF) que exerce alta suscetibilidade e 0 (zero) ao critério que exerce baixa suscetibilidade. Conforme operações abaixo:

$MF_{100\%\ suscetível}$ = Valor 1

$MF_{suscetibilidade\ gradativa}$ = Função linear *fuzzy*

$MF_{0\%\ suscetível}$ = Valor 0

A padronização dos dados de MNT gerados a partir de um mapa temático (caso do critério grau de urbanização) envolve uma sequência distinta:

1- Criação de um mapa de distância em formato numérico para cada classe temática;
2- Elaboração e execução de programas utilizando rotinas de processamento em linguagem de programação LEGAL no SPRING conforme operações abaixo:

$MF_{contado\ interno}$ = SE (distância > limite = Valor 1); SE (distância < limite = Função linear *fuzzy*)

$MF_{contado\ externo}$ = SE (distância > limite = Valor 0); SE (distância < limite = Função linear *fuzzy*)

3- Utilização da soma ponderada para integração dos planos de informação e aplicação dos valores de acordo com a importância que cada classe assume.

A caracterização das faixas de transições foi estruturada de acordo com a técnica *map unit approach* (abordagem por unidade de mapa), que considera um único tipo de contato ao longo do perímetro das classes (NASCIMENTO, 2008).

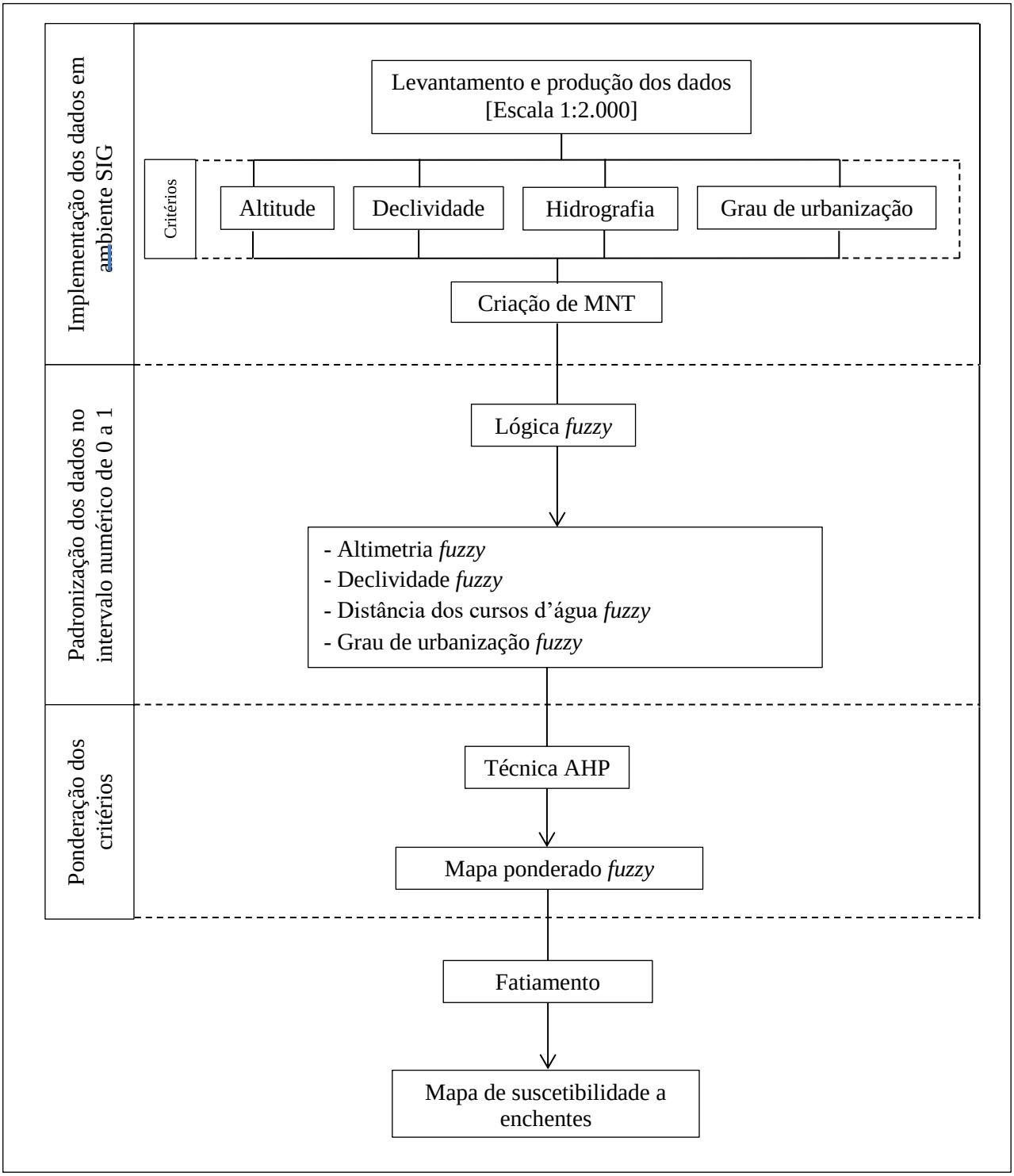
4.3.2 Suporte a decisão: Ponderação dos critérios

A segunda etapa da análise espacial tem por objetivo atribuir pesos para cada critério, segundo o grau de importância que assumem no processo.

O suporte para a realização desta análise é encontrado no próprio SPRING, na ferramenta "Suporte à decisão (AHP)...". Os dados de entrada usados para esta ponderação são os planos de informação padronizados pela lógica *fuzzy* que foram criados na etapa de anterior.

O posterior fatiamento da grade numérica gerada após esta etapa resultou no mapa de suscetibilidade a enchentes no município de Irati/PR. A Figura 5 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas para obtenção do mapa de suscetibilidade.

Figura 5 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para a obtenção do mapa de suscetibilidade a enchentes



Org: A autora

5 Resultados e Discussão

Nesse item são apresentados os resultados da caracterização morfométrica da Bacia do rio das Antas e de sete de suas sub-bacias. Além disso, são apresentados os resultados, sob forma de grades numéricas e mapas, das análises realizadas para a identificação das áreas suscetíveis a enchentes.

5.1 Caracterização Morfométrica

5.1.1 Morfometria da bacia hidrográfica

A Tabela 5 mostra os valores obtidos na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio das Antas.

Tabela 5 – Características morfométricas da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR

Características Morfométricas	Valores e Unidade
Área de drenagem	172,860 km²
Perímetro	75,864 km
Coeficiente de compacidade (Kc)	1,616
Fator de forma (F)	0,256
Índice de circularidade (IC)	0,378
Declividade mínima	0,0 %
Declividade média	7,9 %
Declividade máxima	103,2 %
Altitude mínima	800 m
Altitude média	855 m
Altitude máxima	1017 m
Declividade média do maior curso d'água	3,119 m/m
Comprimento total dos canais (Lt)	247,751 km
Comprimento do canal principal	38,472 km
Ordem da bacia	4
Densidade de drenagem (Dd)	1,433 km/km²
Coeficiente de manutenção (Cm)	0,698 km²/km

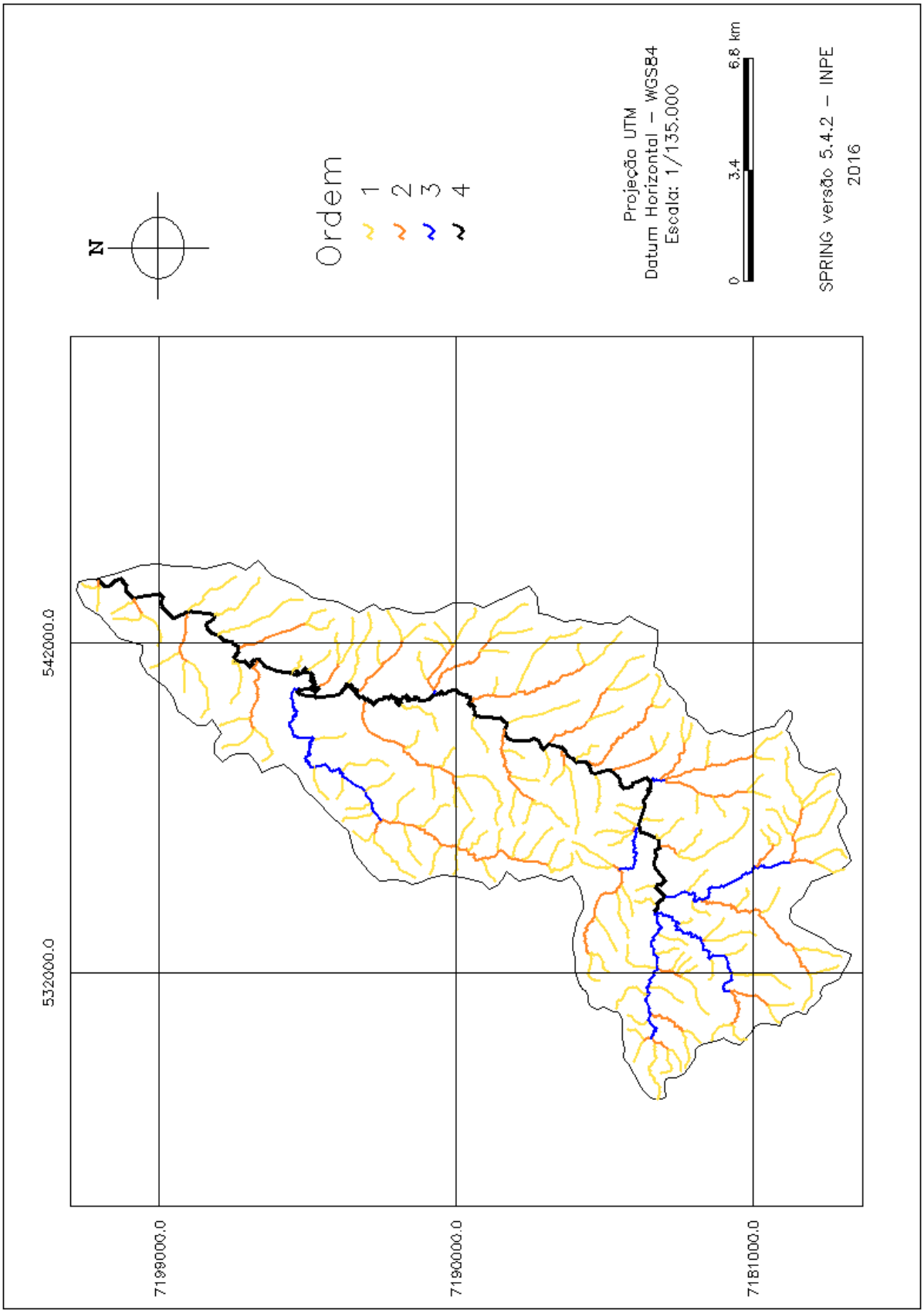
A bacia hidrográfica, objeto deste estudo, apresentou uma área de drenagem de 172,860 km², sendo que 18,7% dessa área encontram-se no território de Imbituva, 19,9% em Fernandes Pinheiro e 61, 4% nos limites de Irati.

A forma da bacia é bastante irregular e alongada, conforme pode ser interpretado pelo afastamento da unidade do coeficiente de compacidade (1,616) e pelo baixo valor do fator de forma (0,256). Tal tendência pode ser ainda comprovada pelo baixo índice de circularidade encontrado, cujo valor é de 0,378. Quando analisada por esses parâmetros, infere-se que a bacia hidrográfica do rio das Antas apresenta poucas possibilidades de enchentes nas condições normais de precipitação.

Valores semelhantes foram encontrados por Cardoso et al. (2006) para a bacia hidrográfica do rio Debossan, em Nova Friburgo (Brasil) e Magesh et al. (2013) para a bacia do rio Bharathapuzha, em Kerala (Índia). O primeiro autor obteve os valores de 1,584 para o coeficiente de compacidade, 0,329 para o fator de forma e 0,399 para o índice de circularidade. Já o segundo autor encontrou 0,25 para o fator de forma e 0,23 para o índice de circularidade. Ambos os autores concluíram que as bacias têm um forte controle estrutural da drenagem por sua forma mais alongada.

A densidade de drenagem encontrada para a bacia do rio das Antas foi de 1,433 km/km², este valor, conforme Christofoletti, 1974 caracteriza uma drenagem regular e indica a presença de material rochoso relativamente permeável. O ordenamento dos canais pode ser visualizado na Figura 6, onde segundo a hierarquia fluvial de Strahler, a bacia apresenta grau de ramificação de quarta ordem. Além disso, nota-se que o padrão formado pelos cursos d'água classifica-se como dendrítico. Ainda na Figura 6 observa-se que a direção de escoamento do rio principal, que mede aproximadamente 38,5 km e apresenta uma declividade média de 3,119 m/m, indicando um escoamento lento, se dá de Sudoeste a Nordeste. O coeficiente de manutenção indica que a Bacia do rio das Antas precisaria de 0,698 km² de área de contribuição para manter um canal linear de 1 km de comprimento.

Figura 6 – Ordenamento dos cursos d'água, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/ PR.



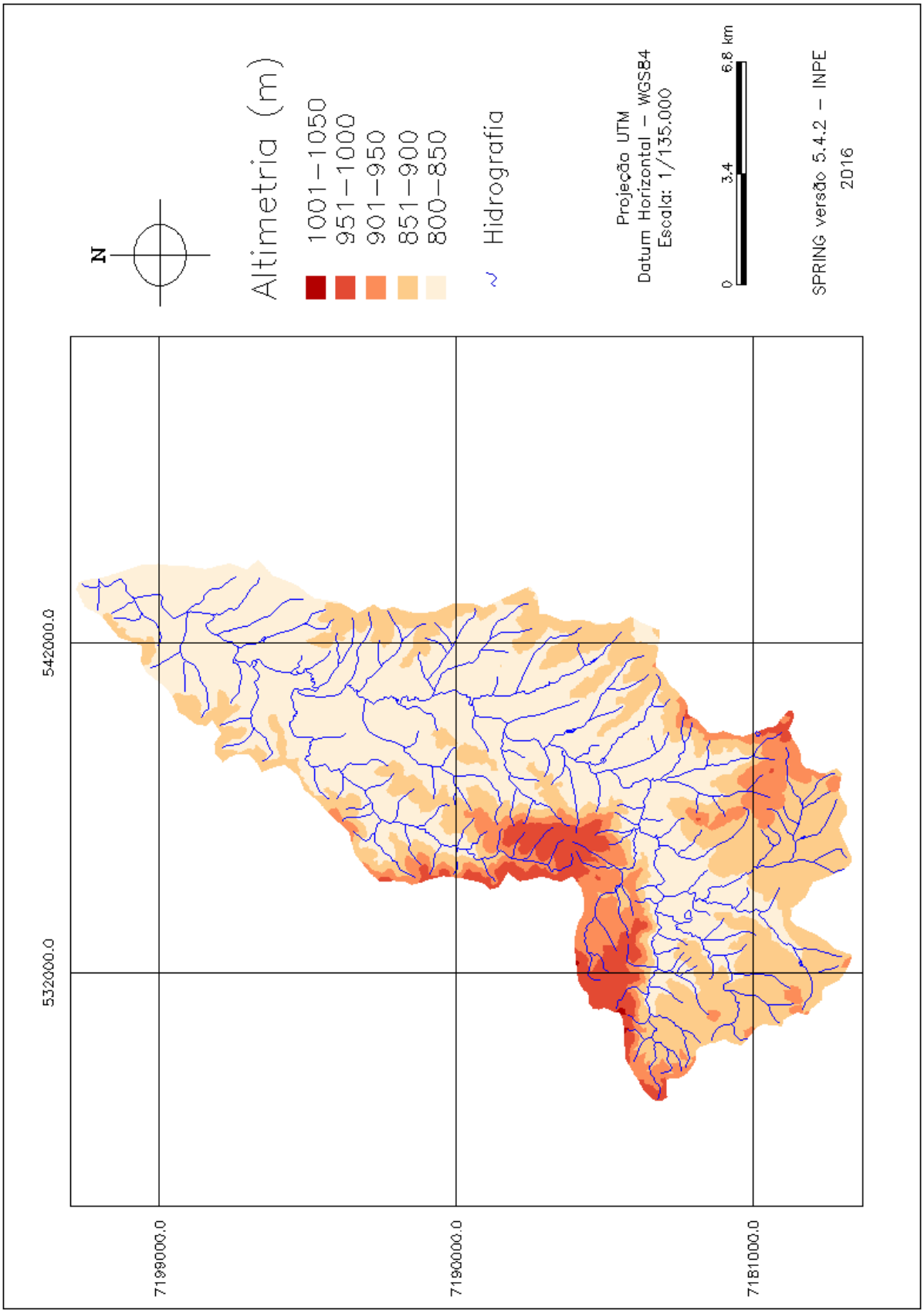
Org: A autora

Gajbhiye; Mishra e Pandey (2014) encontraram para uma das sub-bacias (cuja área de drenagem é de 161,73km²) da bacia hidrográfica do rio Manot, um valor de índice de circularidade semelhante ao da bacia do rio das Antas, todavia o valor de densidade de drenagem foi superior (3,111 km²/km), mostrando que a sub-bacia sete de seu estudo apresenta uma excelente capacidade de drenagem. O mesmo autor esclarece que, em geral, valores elevados de densidade de drenagem indicam que a bacia irá produzir um escoamento superficial maior, o que poderá causar inundações, que o material rochoso é impermeável, que existe uma cobertura vegetal escassa e ainda que o relevo é montanhoso.

Quanto às características de relevo, a Figura 7 apresenta a variação altimétrica de 50 em 50 metros para toda a Bacia do rio das Antas. As duas classes mais baixas (cotas 800-850 e 850-900) constituem 85,6% (148,016 km²) da área total da bacia. A altitude está diretamente relacionada com a radiação solar que uma bacia recebe e consequentemente na temperatura e evapotranspiração da mesma (TONELLO, 2005).

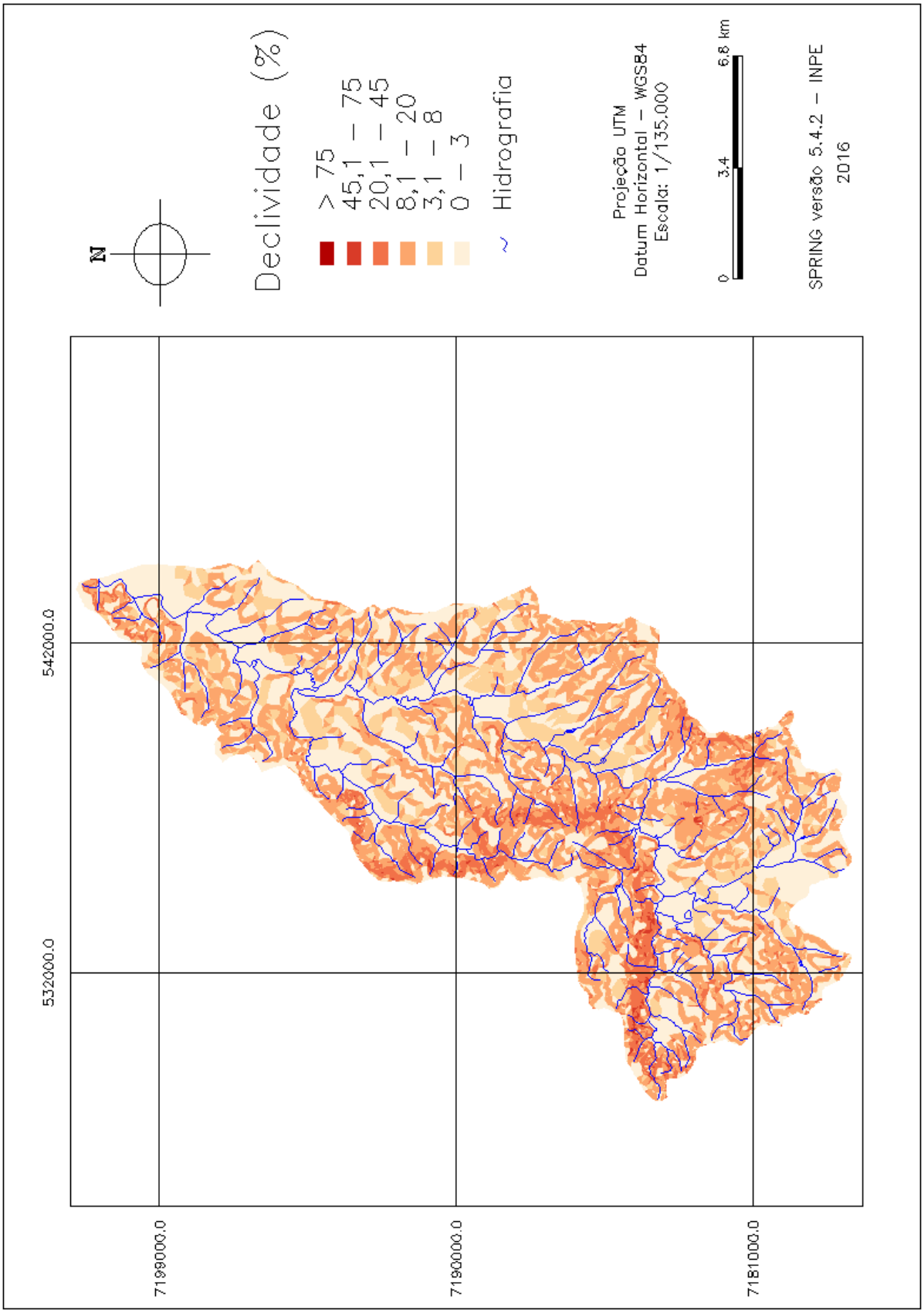
As características de declividade do terreno são apresentadas na Figura 8, a maior parte da área da bacia, ou seja, 38,5% (66,6 km²) é classificada como plana. Outras classes que se destacam são o suave ondulado e ondulado que representam respectivamente, 15,6% (27,6 km²) e 37,6% (64,9 km²) da área total da bacia do rio das Antas. Uma alta declividade, associada a outros fatores (como tipo de cobertura vegetal, tipo de solo, intensidade da precipitação) conduzirá o escoamento superficial a uma velocidade maior para as regiões mais planas, resultando em enchentes mais pronunciadas, além de sujeitar a bacia à degradação, visto que o risco de erosão também se torna mais pronunciado.

Figura 7 – Variação altimétrica, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR.



Org: A autora

Figura 8 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR



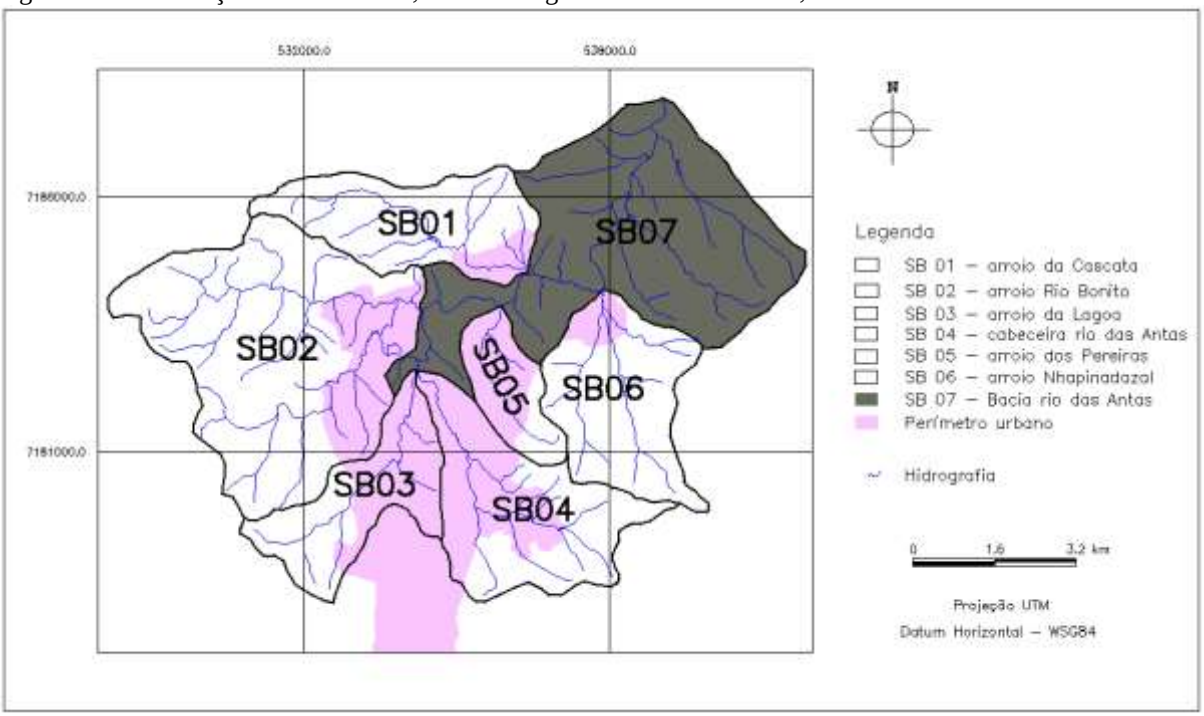
Org: A autora

5.1.2 Morfometria das sub-bacias hidrográficas

A divisão de uma bacia hidrográfica em unidades menores é corriqueira e depende da problemática a ser abordada. Autores como Farias et al. (2015), Vieceli et al. (2014) e Stefanidis; Stathis (2013) utilizaram a divisão da bacia em seus estudos.

A fim de se obter resultados mais detalhados, foi realizada a caracterização morfométrica das seis sub-bacias que interagem com o perímetro urbano do munícipio de Irati, como mostra a Figura 9. Algumas características das sub-bacias estão apresentadas na Tabela 6, enquanto os valores da caracterização morfométrica podem ser observados na Tabela 7.

Figura 9 – Visualização das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR.



Org: A autora

A SB02 é a que apresenta a maior área de drenagem (21,4 km²), ao passo que a SB05 apresenta a menor área de drenagem (3,5 km²), entretanto esta última é a sub-bacia com o maior percentual urbanizado dentro do seu perímetro, 71,4%.

Quanto à forma, as SB03 E SB04 apresentam forma alongada, o que pode ser comprovado pelos valores obtidos para o coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de circularidade. A SB01, SB02, SB05 e SB06 apresentam coeficiente de compacidade e índice de circularidade semelhantes e tendem à forma arredondada. Porém, quando

interpretado o valor de fator de forma apenas SB02 comprova-se como uma bacia de forma arredondada e as demais tendem a serem mais alongadas.

Tabela 6 – Características urbanas das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR.

Sub-bacia	Nome	Bairros*	% Área urbana
SB01	arroio da Cascata	Colina Nossa Senhora das Graças e Vila Nova	12,6
SB02	arroio Rio Bonito	Alto da Lagoa, Colina Nossa Senhora das Graças, DER, Camacuã e Rio Bonito	20,8
SB03	arroio da Lagoa	Alto da Lagoa, Fósforo, Jardim Virgínia, Jardim Aeroporto, Lagoa, Rio Bonito e Vila Raquel.	57,2
SB04	Cabeceira rio da Antas	Fósforo, Jardim Aeroporto, Jardim Virginia, Stroparo e Vila São João.	51,8
SB05	arroio dos Pereiras	Alto da Glória, Centro, Jardim Califórnia e Stroparo	71,4
SB06	arroio Nhapindazal	Alto da Gloria, Canisianas e Nhapindazal	10,0
SB07	Bacia rio das Antas	Alto da Glória, Canisianas, Centro, Colina Nossa senhora das Graças, DER, Fósforo, Nhapindazal, Rio Bonito, Vila Nova	39,4

Nota:
* Nomenclatura realizada de acordo com os dados alfanuméricos dos arquivos vetoriais em formato *shapefile*

Tabela 7 – Características morfométricas das sub-bacias, bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR.

Características Morfométricas	SB01	SB02	SB03	SB04	SB05	SB06	SB07
Área de drenagem (km²)	8,337	21,360	6,868	10,413	3,499	8,876	21,113
Perímetro (km)	14,228	20,698	14,925	16,937	8,301	13,454	28,394
Kc	1,380	1,254	1,595	1,470	1,243	1,264	1,730
F	0,264	0,565	0,293	0,323	0,322	0,391	0,340
IC	0,518	0,627	0,388	0,456	0,638	0,616	0,329
Declividade mínima (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Declividade média (%)	10,4	10,9	6,4	5,3	8,4	11,6	7,9
Declividade máxima (%)	58,3	90,0	38,5	47,6	62,6	73,1	65,7
Altitude mínima (m)	820	820	820	820	820	800	800
Altitude média (m)	930	880	862	879	867	876	839
Altitude máxima (m)	1005	1017	924	972	967	985	980
Declividade média do maior curso d'água (m/m)	26,6	19,1	13,8	14,1	21,3	35,0	2,7
Ordem dos cursos d'água	3	4	2	3	2	3	4
Dd (km/km²)	1,938	1,915	1,466	1,821	1,399	1,638	1,781
Cm (km²/km)	0,516	0,522	0,682	0,549	0,715	0,613	0,561

Segundo Vieceli et al. (2014), quando se trabalha com bacias pequenas, a tendência a cheias é bastante afetada por outros fatores, como por exemplo, o tipo de cobertura, tipo do solo, a declividade do terreno e a intensidade e duração da precipitação.

De acordo com a densidade de drenagem, todas as sub-bacias apresentaram uma drenagem regular. No ordenamento dos cursos d'água apenas SB02 e a SB07 são de quarta ordem, as demais apresentam grau de ramificação de terceira e segunda ordem. Todos os coeficientes de manutenção calculados podem ser considerados altos, mas o que se destaca é o

da SB05, que precisaria de 0,715 km² de área de contribuição para manter um canal linear de 1 km de comprimento.

Quanto à declividade, os valores médios variam de 5,3% a 11,6% caracterizando o relevo de suave ondulado a ondulado. A SB02 foi quem apresentou o maior valor de declividade (90,0%). Na Tabela 8 é apresentada a distribuição das classes de declividade em cada sub-bacia.

Tabela 8 – Distribuição das classes de declividade para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio das Antas, Irati/PR.

Classes de declividade (%)	**Área (%)**						
	SB01	**SB02**	**SB03**	**SB04**	**SB05**	**SB06**	**SB07**
0 – 3	29,17	36,82	43,82	44,76	28,29	25,36	30,92
3 – 8	11,55	9,01	15,68	21,84	16,13	6,20	22,00
8 – 20	45,85	36,16	37,29	31,49	51,30	52,51	39,23
20 – 45	12,61	16,09	3,55	1,22	3,89	15,67	7,69
45 -75	0,33	1,73	0,00	0,02	0,33	0,24	0,15
> 75	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

As declividades médias do principal curso d'água da SB01 (26,6 m/m), SB05 (21,3 m/m), SB06 (35,0 m/m) são acentuadas, com isso entende-se que há um menor tempo de permanência da água no perímetro da área de drenagem, Tonello (2005) sugere que bacias com essa característica devem receber um manejo de água e solo mais intensivo. Em contra partida, o valor da declividade média do curso da SB07 (2,7 m/m) implica na baixa velocidade de escoamento desta área que recebe a contribuição de todas as outras sub-bacias. Isso favorece a formação de picos de vazão na SB07, considerando uma precipitação capaz de atingir a área de drenagem apresentada a Figura 9.

5.2 Mapeamento de áreas suscetíveis a enchentes

O mapeamento das áreas suscetíveis a enchentes foi realizado especificamente no perímetro urbano do município de Irati que pertence à bacia hidrográfica do rio das Antas.

5.2.1 Padronização dos dados no formato numérico *fuzzy*

5.2.1.1 Mapa de altimetria

O mapa de altimetria no formato numérico *fuzzy* foi obtido a partir da execução do programa LEGAL (Apêndice B - 01) sobre a grade retangular. A atribuição dos pesos (Tabela 9) considerou que áreas baixas, ou seja, áreas que apresentam cotas iguais ou próximas aos dos cursos d'água são mais suscetíveis em eventos de cheias e por isso apresentam um maior

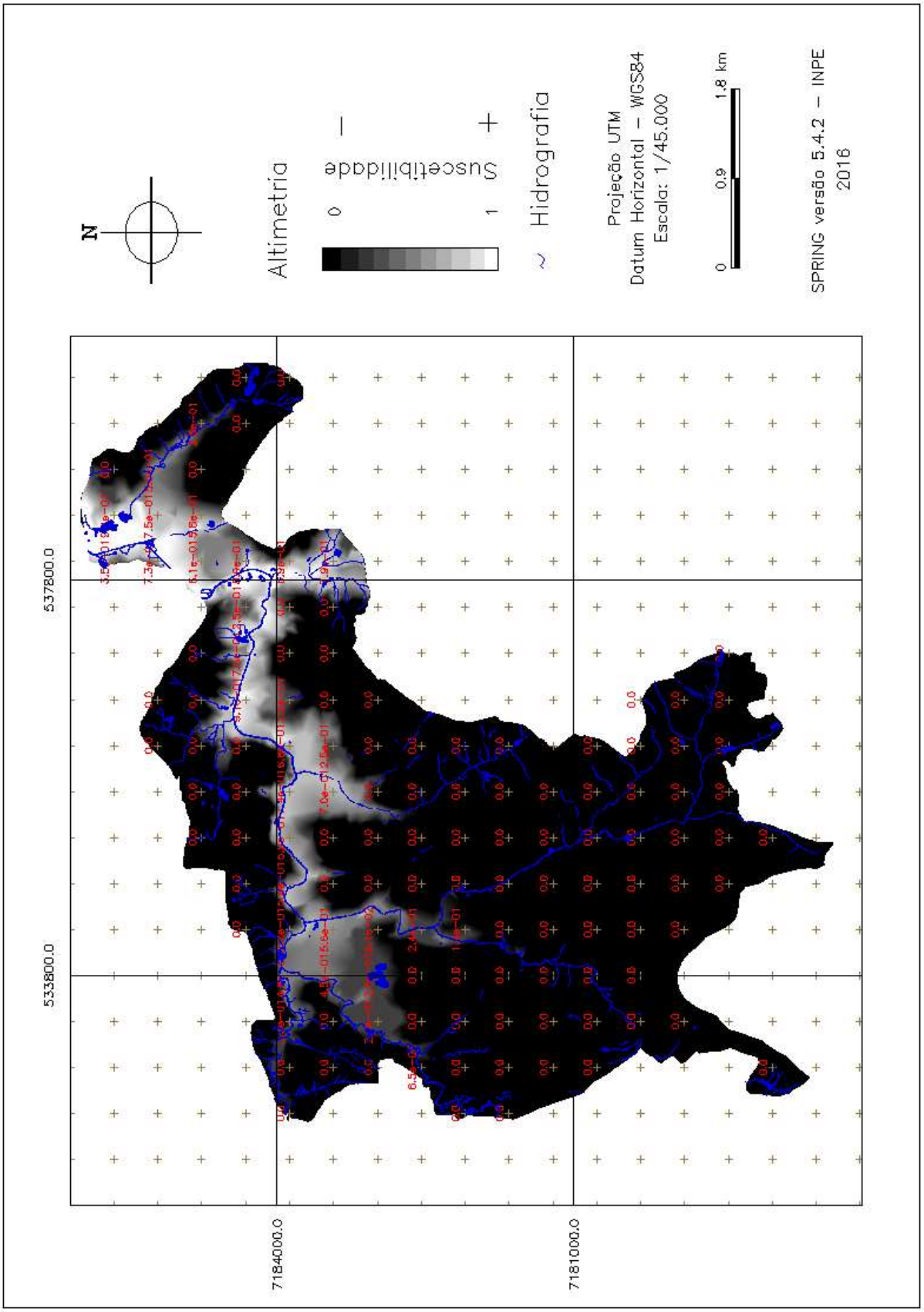
grau de importância na escala. Historicamente tem-se registro de cheias que aconteceram em pontos localizados na cota de 810 m. Para se conseguir uma faixa de transição que represente a realidade da melhor maneira possível utilizou-se como referência a cota de valor 820 m.

Tabela 9 – Pesos utilizados por faixa de altitude

Altimetria (m)	**Peso (0-1)**
<800	1
800 - 820	1→0
>820	0

Para o intervalo altimétrico de 800-820 m foi elaborada a função linear decrescente *fuzzy* $f(x)$, onde $f(x) = -0{,}05x + 41$, sendo x o valor da altitude. Essa equação permitiu a gradação da altimetria variando entre 0 e 1. A Figura 10 mostra o mapa no formato numérico *fuzzy* com as altitudes espacializadas de acordo com os pesos adotados. Observa-se uma superfície contínua com tons de cinza indicando as áreas não suscetíveis a cheias e representadas pela cor preta (valor 0), bem como as áreas que se tornam cada vez mais suscetíveis, representadas por tons cada vez mais claros até a cor branca (valor 1).

Figura 10 – Mapa no formato numérico *fuzzy* da altitude, perímetro urbano de Irati/PR



Org: A autora

5.2.1.2 Mapa de declividade

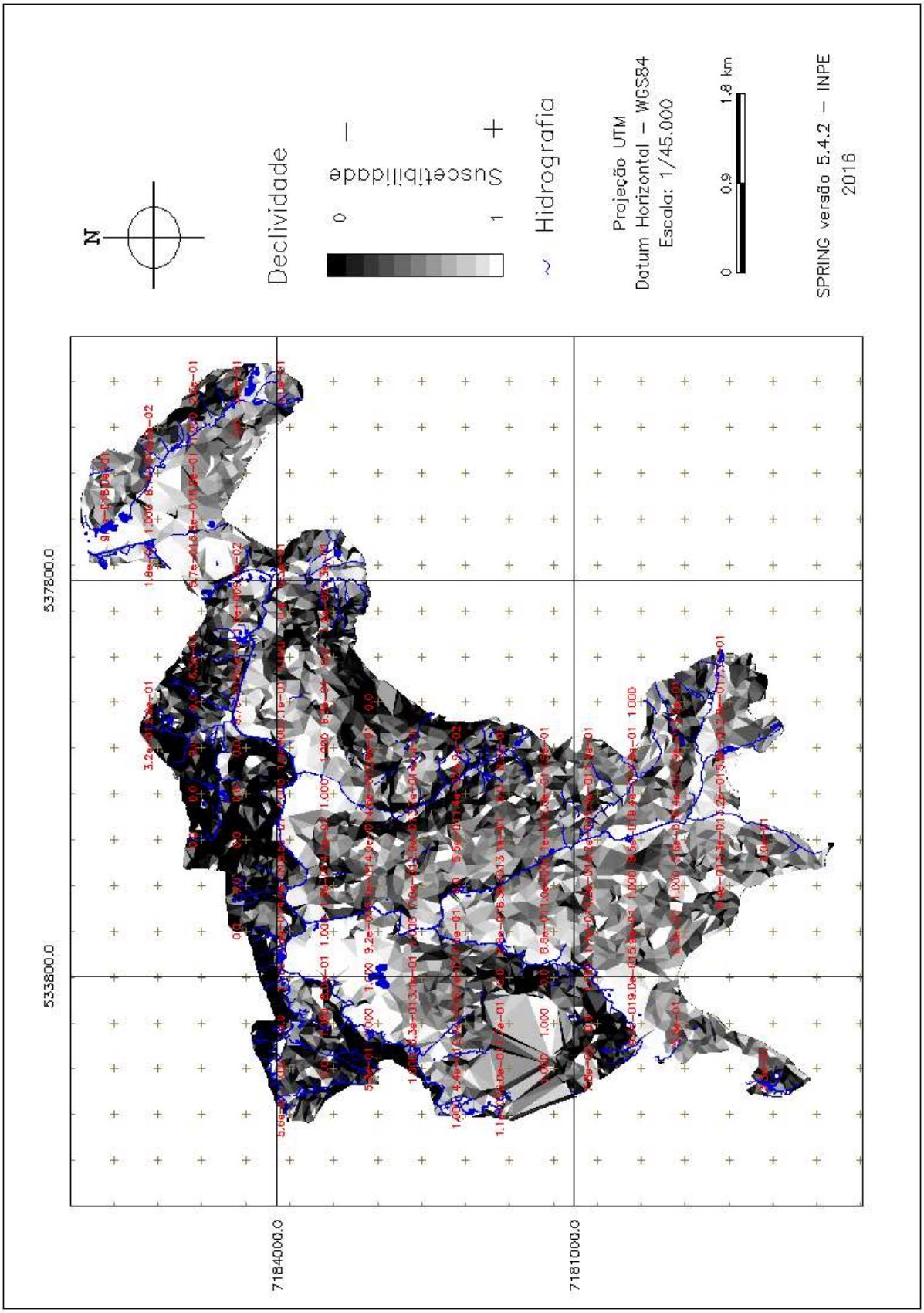
De forma semelhante ao mapa de altimetria, o mapa de declividade no formato numérico *fuzzy* foi obtido a partir da execução do programa LEGAL (Apêndice B – 02) sobre a grade de declividade. A escolha dos pesos (Tabela 10) baseou-se no trabalho de Galvão (2014), a autora define que áreas com valor de declividade inferior a 2% apresentam alto grau de suscetibilidade a cheias. Declividades superiores a 2% e inferiores a 15% apresentam um grau de suscetibilidade que vai do médio ao baixo, sendo pouco prováveis as cheias em declividades superiores a 15%.

Tabela 10 – Pesos utilizados por faixa de declividade

Declividade (%)	**Peso (0-1)**
<2%	1
2 - 15%	1→0
>15%	0

Ao intervalo clinométrico de 2-15%, foi aplicada a função linear decrescente *fuzzy* $f(x)$, onde $f(x) = -0{,}07695x + 1{,}1538$, sendo x o valor da declividade. A Figura 11 mostra o mapa de declividade no formato numérico *fuzzy* cuja grade varia entre os valores de 0 a 1.

Figura 11 – Mapa no formato numérico fuzzy da declividade, perímetro urbano de Irati/PR



Org: A autora

5.2.1.3 Mapa de distância dos cursos d'água

Para obtenção do mapa de distância dos cursos d'água no formato numérico *fuzzy* considerou-se uma faixa de gradação de 150 m para cada margem (Tabela 11), essa faixa é representada pela equação linear decrescente *fuzzy* $f(x)$, onde $f(x) = -0{,}0067x + 1$, sendo x o valor da distância. A equação foi aplicada sobre a grade mapa de distâncias (obtida através dos dados temáticos de hidrografia) por meio da execução do programa LEGAL (Apêndice B – 03).

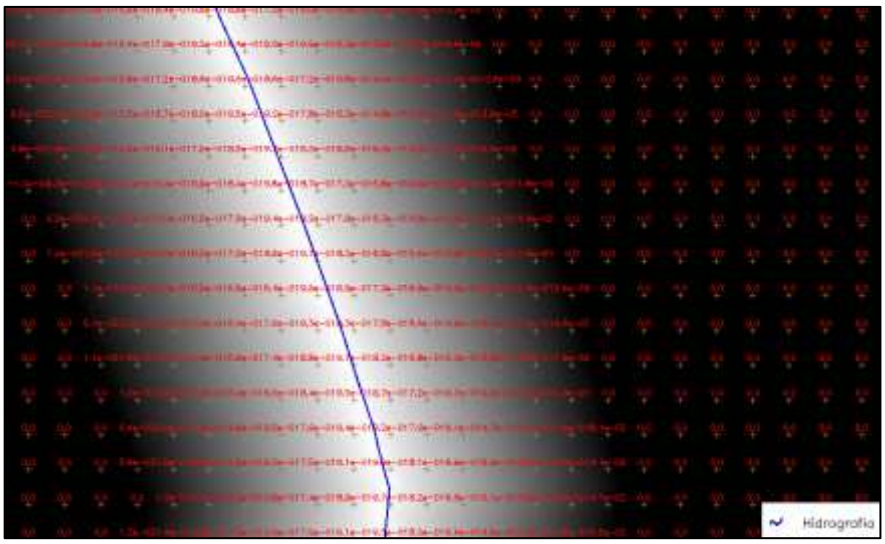
Tabela 11 – Peso utilizado na faixa de gradação referente à distância do curso d'água

Distância (m)	Peso (0-1)
0 - 150	1→0

A escolha do tamanho da faixa de gradação para essa variável é bastante peculiar. Fernández e Lutz (2010) consideraram que distâncias acima de 1000 m ainda representariam algum tipo de relevância em sua área de estudo. Bathrellos (2016) considerou que distâncias superiores a 300 m para um canal de terceira ordem não eram relevantes em sua área de estudo. No município de Irati constatou-se por meio da análise de uma imagem de satélite, que a maioria dos locais atingidos pela última enchente, em 2014, está dentro da faixa de gradação escolhida.

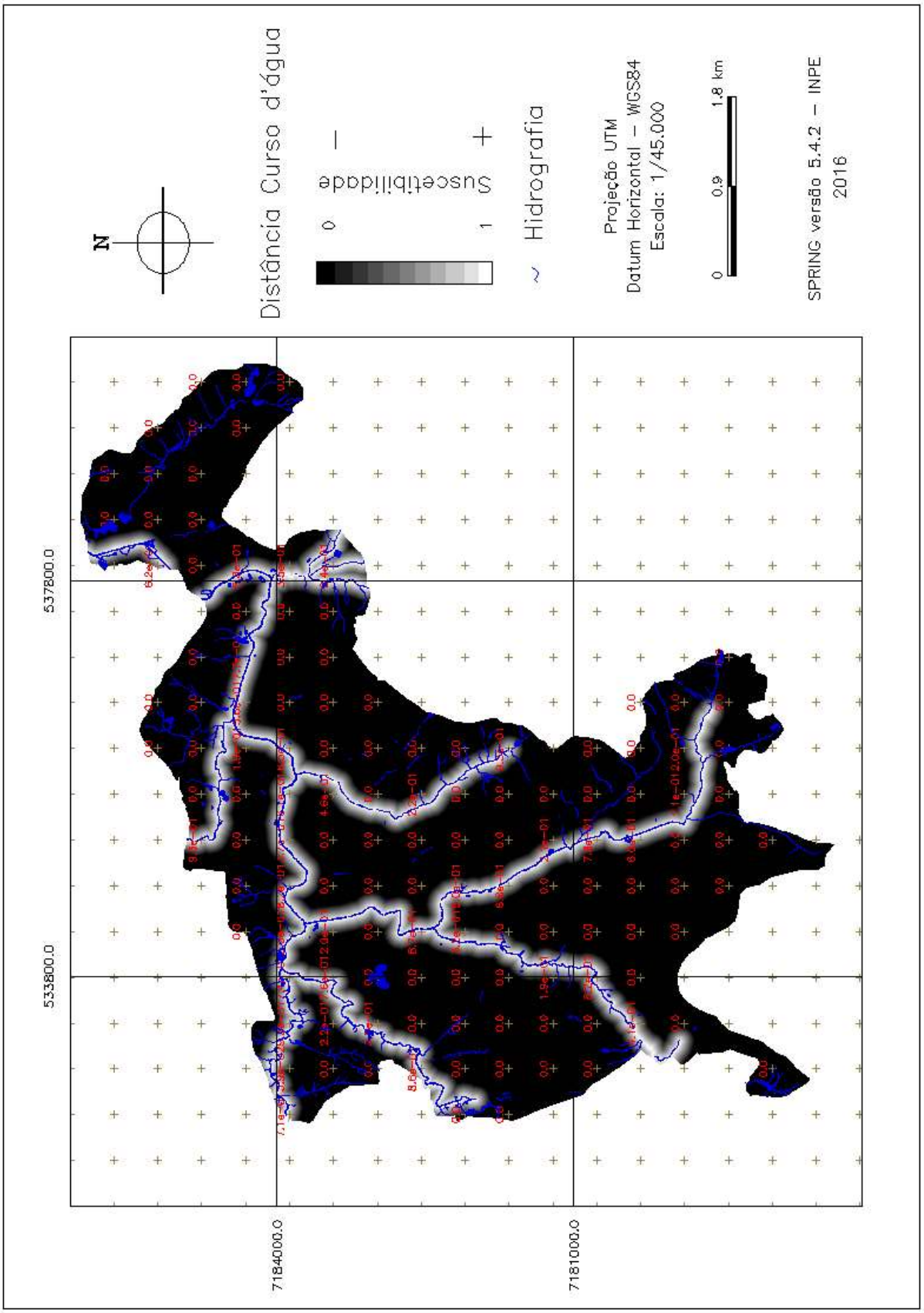
A Figura 12 ilustra a faixa de gradação de 150m e a Figura 13 mostra o mapa de distância dos cursos d'água no formato numérico *fuzzy*, em ambas as figuras a grade varia entre os valores de 0 a 1.

Figura 12 – Representação da faixa de gradação para o critério distância do curso d'água.



Org: A autora

Figura 13 – Mapa no formato numérico *fuzzy* da distância dos cursos d'água, perímetro urbano de Irati/PR.



Org: A autora

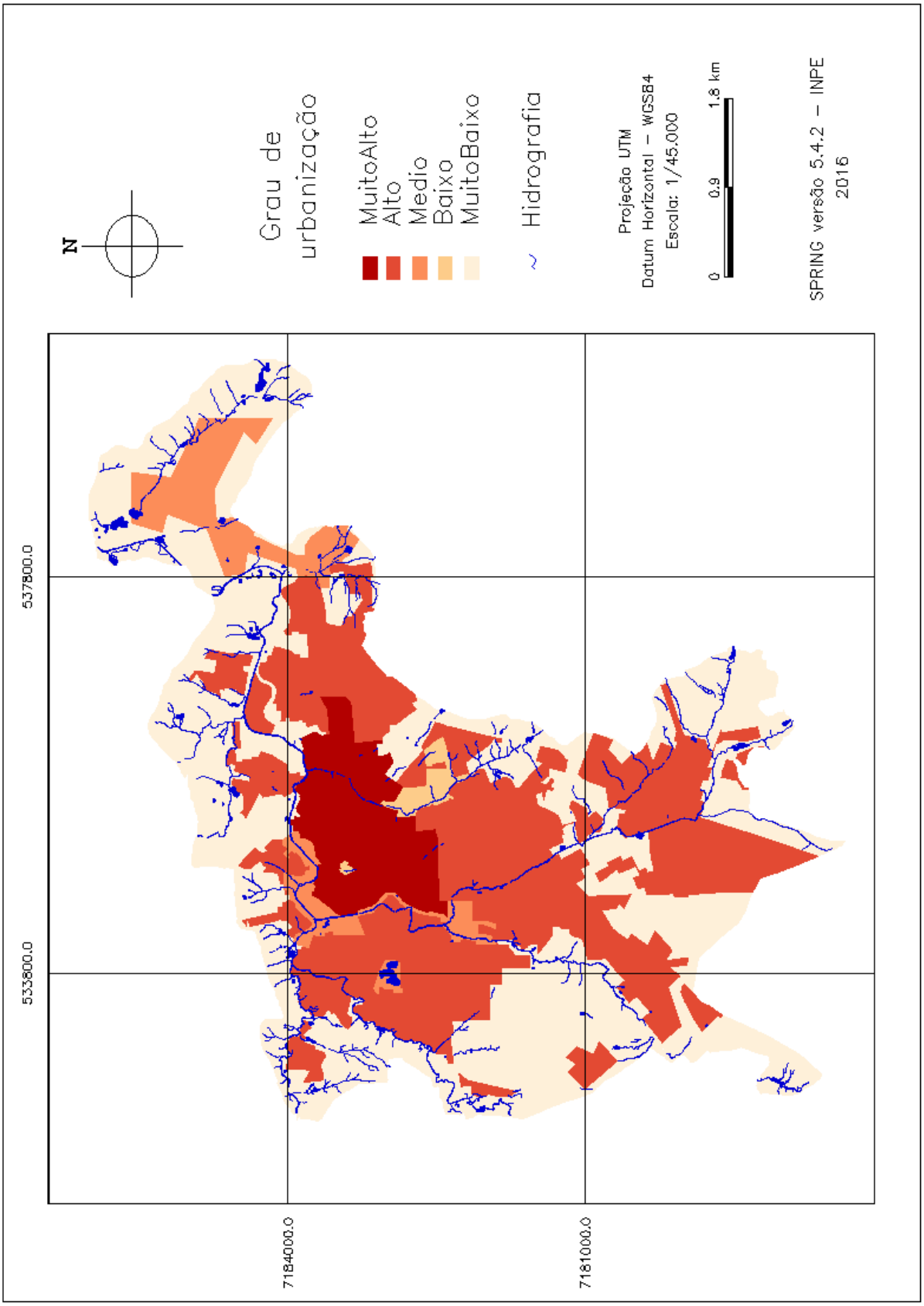
5.2.1.4 Mapa do grau de urbanização

A primeira etapa para a obtenção do mapa de uso da terra no formato numérico fuzzy foi a elaboração do mapa no formato temático, através da interpretação visual da imagem de satélite. A área urbana foi dividida em cinco classes quanto ao grau de urbanização (GENOVEZ, 2003), como mostra a Figura 14.

Posteriormente, foi estabelecida que a faixa de transição entre as classes seria de 100 m, assim foram elaboradas as equações lineares crescente e decrescente *fuzzy* $f(x)$, representadas respectivamente por $f(x) = 0{,}005x + 0{,}5$ e $f(x) = -0{,}005x + 0{,}5$, onde x é a distância do limite de determinada classe. As equações foram aplicadas sobre a grade mapa de distâncias de cada classe do mapa temático por meio da execução dos programas LEGAL (Apêndice B – 04 a 08).

A integração das grades e a atribuição dos pesos dentro do intervalo de 0 a 1, considerando sua maior ou menor influência (Tabela 12) foi feita por uma soma ponderada através da execução do programa LEGAL (Apêndice B – 09).

Figura 14 – Mapa temático do grau de urbanização, perímetro urbano de Irati/PR



Org: A autora

Tabela 12 – Pesos utilizados por classe de urbanização

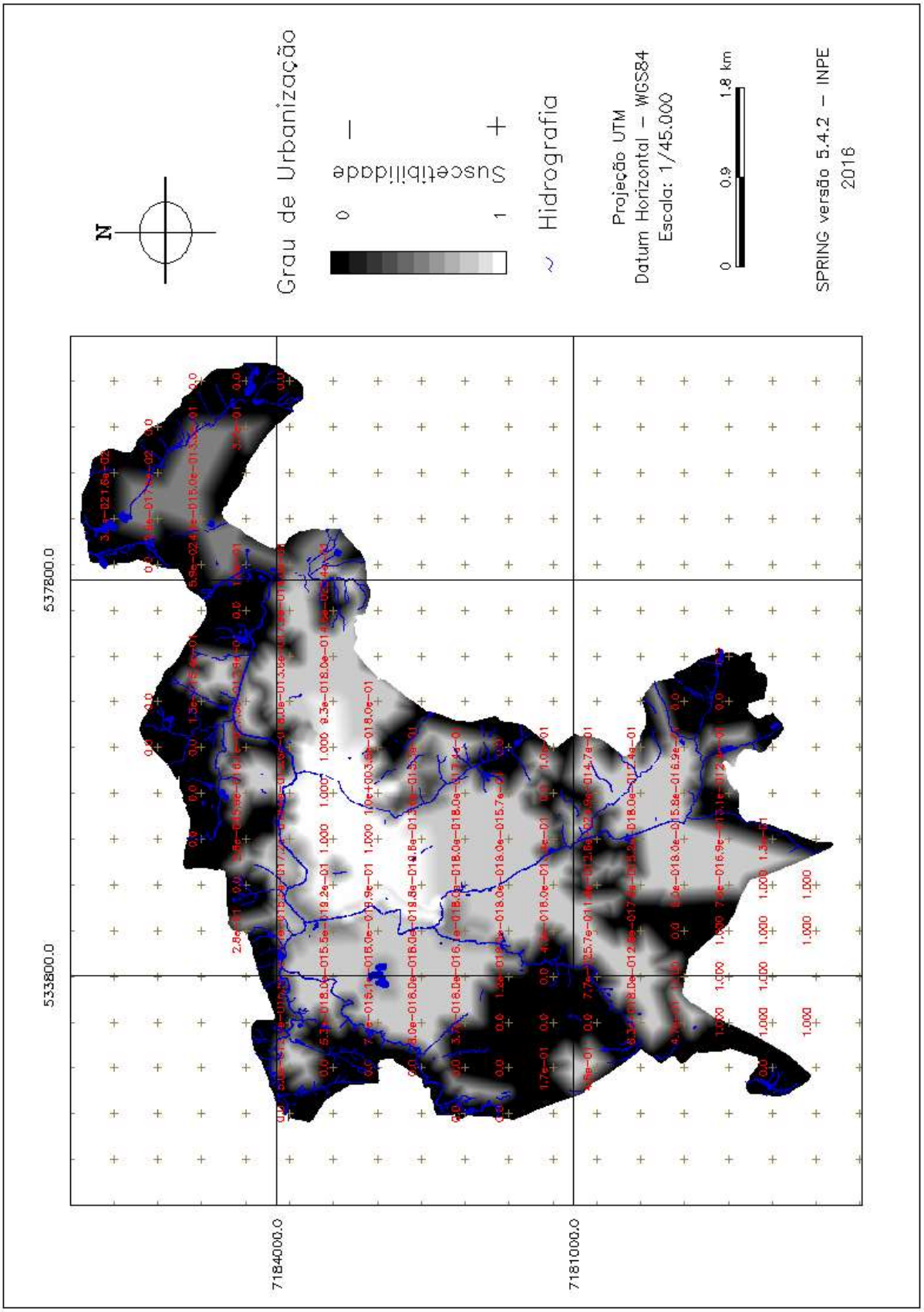
Grau de urbanização	Peso (0-1)	Comentário
Muito Alto	1	Áreas bastante impermeabilizadas, com lotes não amplos
Alto	0,8	Áreas impermeabilizadas localizadas nos bairros e loteamentos com lotes amplos
Médio	0,5	Parque, área industrial e de mata ciliar, localizadas nas proximidades de áreas com média impermeabilização
Baixo	0,3	Floresta urbana localizada nas proximidades de áreas com média impermeabilização
Muito Baixo	0	Áreas não urbanizadas e/ou agrícolas

Fonte: Adaptado de Genovez (2003)

Conforme salienta Nascimento (2008), a grade que se obtém da integralização apresenta algumas regiões com valores superiores ao limite máximo 1. Segunda a autora essas áreas geralmente ocorrem onde as faixas de transição se sobrepõem. Nesta situação é preciso que seja feita uma correção na grade, a fim de que seu valor máximo retorne a ser 1. A correção foi feita por meio do programa LEGAL (Apêndice B – 10).

A Figura 15 apresenta o grau de urbanização no formato numérico *fuzzy*, corrigido, cujos valores de grade variam de 0 a 1.

Figura 15 – Mapa no formato numérico *fuzzy* do grau de urbanização, perímetro urbano de Irati/PR



Org:: A autora

5.2.2 Suporte a decisão

A técnica AHP exige o cálculo de pesos para cada variável utilizada no estudo, neste caso, a altitude, declividade, distância dos cursos d'água e grau de urbanização. Para tanto buscou-se na literatura quais dessas variáveis é considerada a mais relevante, no que diz respeito ao processo de formação de cheias.

Autores como Radmehr e Araghinejad (2015) e Fernández e Lutz (2010) consideraram que a altitude e a declividade contribuem igualmente para o processo. Já Khosravi et al. (2016), consideram que a altitude é uma variável mais importante que a declividade nos processos de formação de cheias, ao passo que Bathrellos (2016) inverte a importância das variáveis e considera a declividade mais relevante.

A distância dos cursos d'água, em geral, assume alta importância nos estudos de cheias, atingindo relevâncias 20 a 40% (CHEN et al., 2015; RADMEHR;ARAGHINEJAD, 2015; FERNÁNDEZ;LUTZ, 2010). Muito variáveis são os pesos aplicados sobre o tipo de cobertura do solo, em alguns estudos assumem relevâncias bem baixas, 6%, 7% (FERNÁNDEZ;LUTZ, 2010; KHOSRAVI, 2016) enquanto em outros assume relevância de 28% (BATHRELLOS et al, 2016).

Desta forma observa-se que as variáveis podem assumir diferentes relações de pesos. Com base nas referências citadas acima, assumiu-se para este estudo que a altitude deve ser considerada a variável de maior importância e o grau de urbanização a menor importância. As relações consideradas no Spring encontram-se na Figura 16. Na Tabela 13 consta a matriz de comparação pareada entre os critérios.

Figura 16 – Pesos de compensação dos critérios

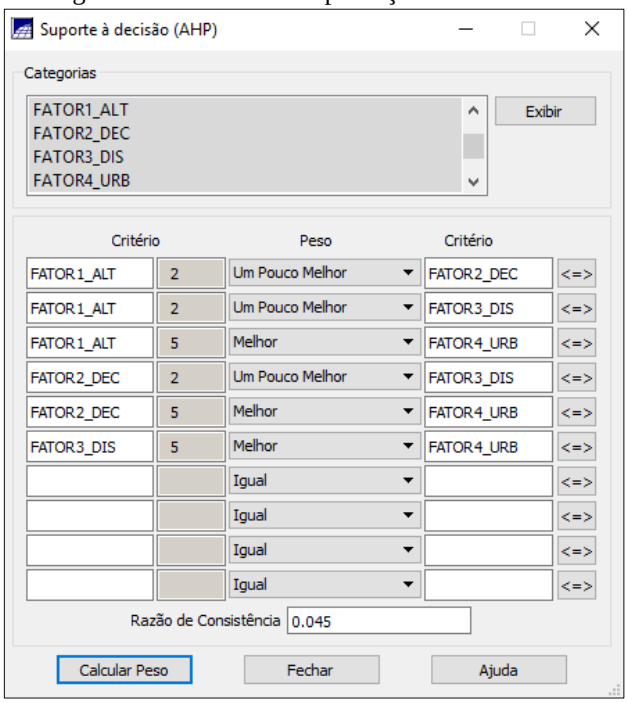


Tabela 13 – Matriz de comparação pareada entre os critérios

	F1	**F2**	**F3**	**F4**	**Pesos**
F1	1	2	2	5	0,426
F2	1/2	1	2	5	0,301
F3	1/2	1/2	1	5	0,213
F4	1/5	1/5	1/5	1	0,060

RC = 0,045
F1 = Altitude, F2 = Declividade, F3 = Distância, F4 = Grau de urbanização

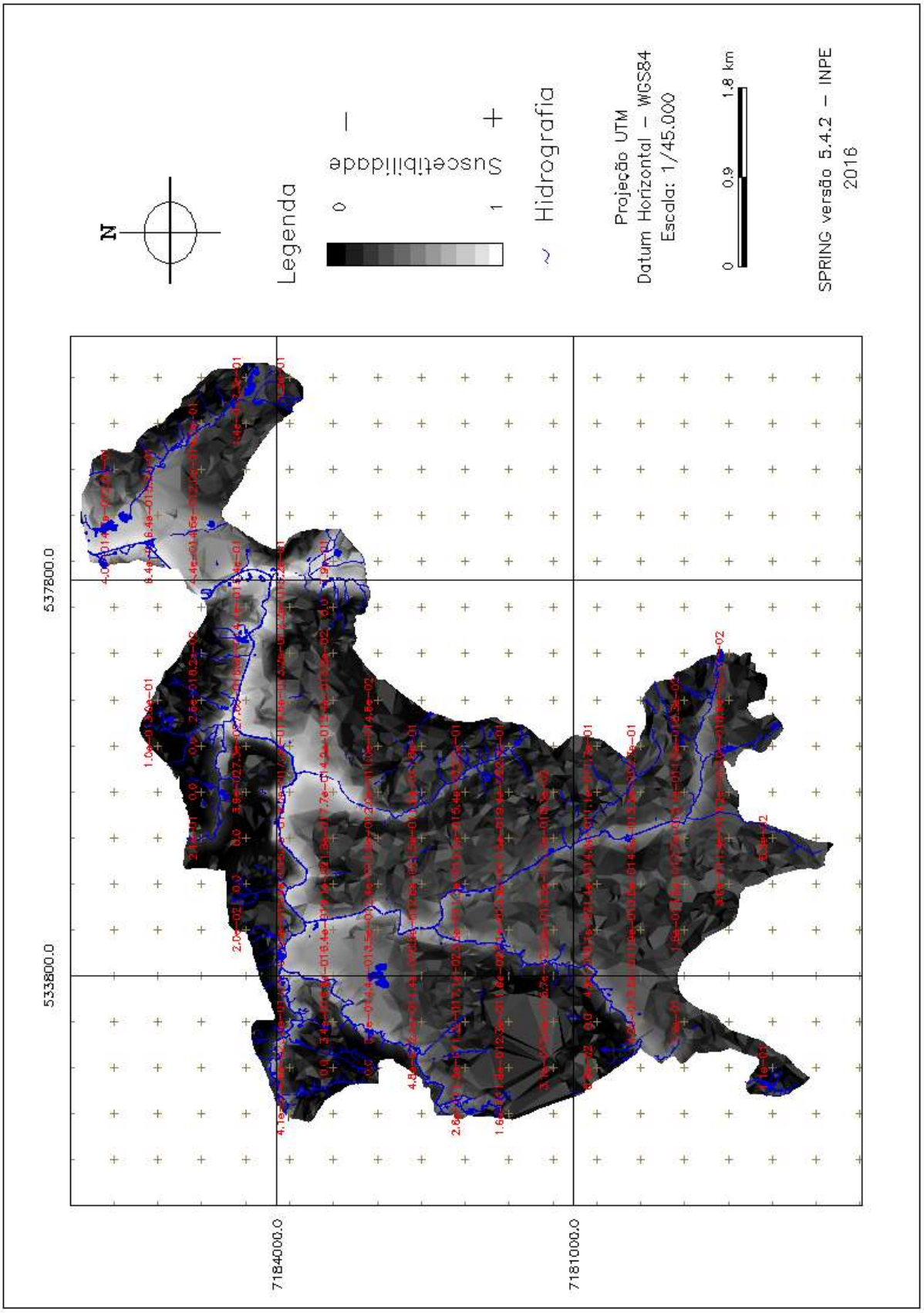
A razão de consistência obtida foi igual a 0,045, demonstrando que o julgamento foi feito de forma adequada. Conforme observado na Tabela 13, as variáveis altitude e declividade ficaram como os valores mais altos, e juntas totalizam um pouco mais de 72% da soma dos pesos.

Após a definição dos pesos, os critérios foram combinados através da soma ponderada usando o programa LEGAL (Apêndice B – 11) segundo a expressão:

$$FuzzyPonderado = 0{,}426 \times AltimetriaFuzzy \ + \ 0{,}301 \times DeclividadeFuzzy \ + \ 0{,}213 \times DistânciaFuzzy \ + \ 0{,}060 \times UrbanizaçãoFuzzy$$

A grade numérica resultante desta operação (Figura 17) contém informações na forma de superfície contínua com os graus de suscetibilidade a enchentes na área urbana do município de Irati, as áreas mais claras são aquelas que merecem a maior atenção.

Figura 17 – Mapa ponderado dos critérios (altitude, declividade, distância dos cursos d'água e grau de urbanização), perímetro urbano de Irati/PR



Org: A autora

5.3 Mapa de suscetibilidade a cheias no município de Irati/PR

A transformação da grade numérica *fuzzy* ponderada para o modelo temático facilita a compreensão dos resultados obtidos. É consenso entre os autores que valores acima de 0,8 na grade numérica representam resultados expressivos e integram a classe de 'alta' ou 'muito alta' suscetibilidade, vulnerabilidade ou risco (ANDRES et al., 2013; RODRIGUES, 2013), enquanto os outros níveis apresentam intervalos variados. Meirelles; Moreira e Camara (2007) salientam que os indivíduos que recebem um valor de pertinência menor que 0,5 podem ser tranquilamente rejeitados.

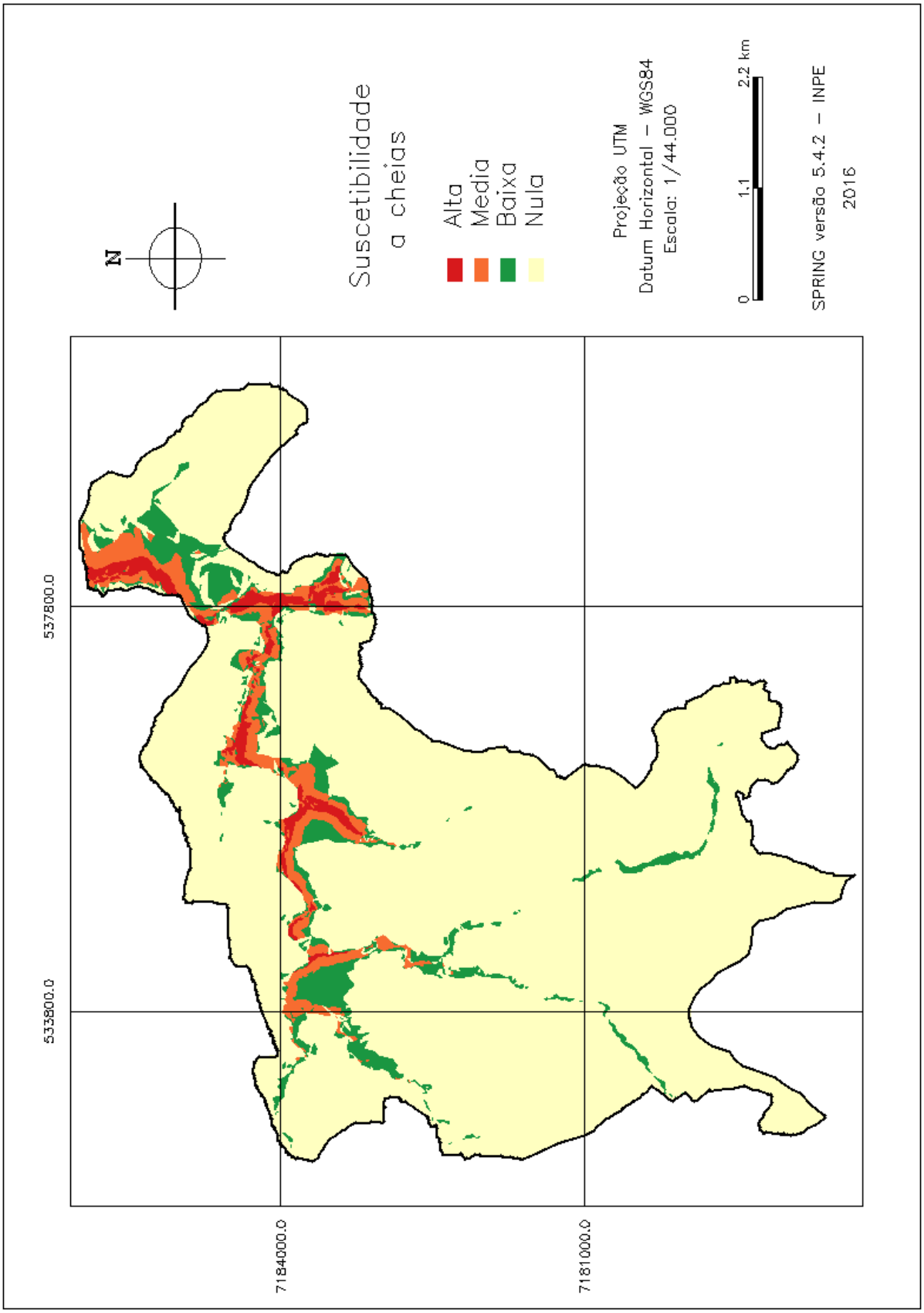
A Tabela 14 mostra os intervalos definidos para o fatiamento da grade apresentada na Figura 17.

Tabela 14 – Intervalos para o fatiamento

Classe de suscetibilidade	Intervalos para o fatiamento
Nula	0 – 0,50
Baixa	0,50 – 0,65
Média	0,65 – 0,80
Alta	0,80 – 1

A Figura 18 mostra o mapa com as classes de suscetibilidade após o fatiamento e a Tabela 15 apresenta os resultados de cada classe.

Figura 18 – Mapa de suscetibilidade a enchente segundo as classes qualificadoras, perímetro urbano de Irati/PR.



Org: A autora

Tabela 15 – Resultado das classes qualificadoras do mapa de suscetibilidade a enchente no perímetro urbano de Irati/PR em quilômetro quadrado e percentagem.

Classe de suscetibilidade	Área (km²)	Área (%)
Alta	0,450	1,7
Média	1,224	4,6
Baixa	1,971	7,5
Nula	22,728	86,2
TOTAL	26,373	100,0

Os resultados mostraram que de um total de 26,373 km² referentes à área urbana do município que pertence à bacia do rio das Antas, 22,728 km² (86,2%) foram classificados como "nula suscetibilidade" às cheias, 1,971 km² (7,5%) foram classificados como "baixa suscetibilidade", 1,224 km² (4,6%) foram classificados como "média suscetibilidade" e 0,450 km² (1,7%) foram classificados como "alta suscetibilidade".

Considerando apenas as áreas com algum grau de suscetibilidade tem-se que 3,645 km² (13,8%) da área de estudo necessitam de maior atenção no que diz respeito à ocupação da terra e na infraestrutura relacionada à drenagem urbana.

As áreas consideradas de "alta suscetibilidade" iniciam-se na junção do arroio Rio Bonito com o rio das Antas (Figura 19), esta classe apresenta pontos de suscetibilidade até a junção do rio com o arroio dos Pereiras, compreendendo basicamente o limite do bairro Colina Nossa Senhora das Graças com o bairro Centro. Segundo a interpretação visual da imagem de satélite esse trecho apresenta uma faixa bastante variável de mata ciliar e poucas moradias nas proximidades de suas margens, todavia, na margem direita observa-se a presença de prédios públicos construídos e em construção.

Figura 19 – Junção do arroio Rio Bonito com o rio das Antas classificada como “alta suscetibilidade”

Fonte: Satélite *Geoeye*, 2013
Org: A autora

Ainda nesta classe de “alta suscetibilidade” vale destacar as áreas próximas ao baixo curso do arroio dos Pereiras (Figura 20). A área compreendida pela classe é notável e está totalmente inserida no bairro Centro. Neste trecho o arroio encontra-se canalizado em alguns pontos e consequentemente as construções (moradias e comércio) estão próximas das suas margens.

Figura 20 – Área drenada pelo arroio dos Pereiras classificada como “alta suscetibilidade”

Fonte: Satélite *Geoeye*, 2013
Org: A autora

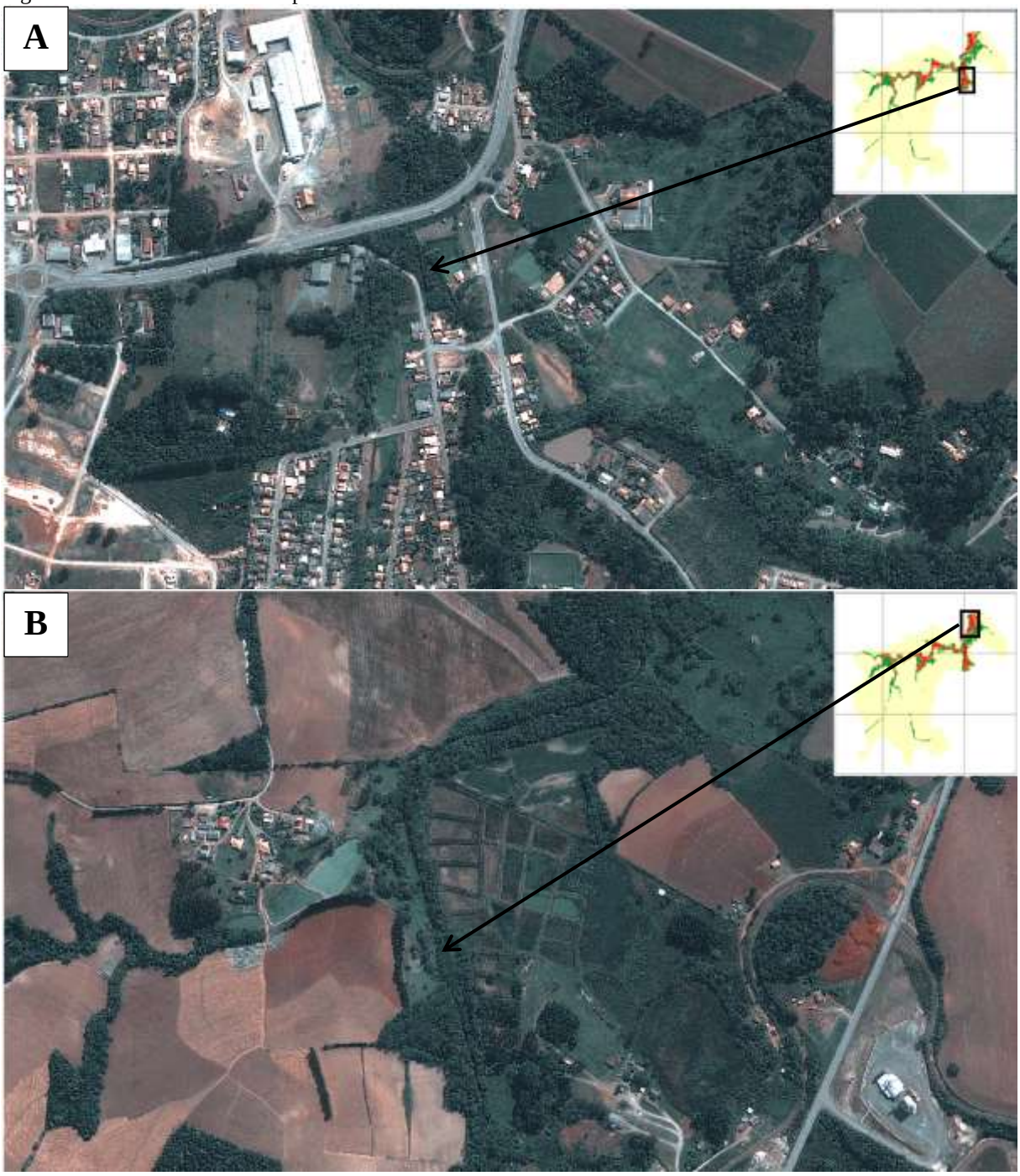
Outro ponto crítico da classe de “alta suscetibilidade” localiza-se a noroeste do bairro Canesianas (Figura 21), onde uma extensa área do lado direito da margem do rio das Antas apresenta potencial para atingir pontos que se distanciam do rio em até 95 m. Nesta mesma área, porém na margem esquerda do rio, locais próximos à junção do rio das Antas com o arroio da Cascata também foram contabilizados nesta classe de suscetibilidade. Esta área possui a maior concentração de moradias nas proximidades das margens e muitas delas apresentam um baixo padrão construtivo.

Figura 21 – Margem direita do rio das Antas classificada como “alta suscetibilidade”

Fonte: Satélite *Geoeye*, 2013
Org: A autora

Ao longo da divisa dos bairros Canesianas e Vila Nova existem pontos de “alta suscetibilidade”, todavia a densidade demográfica diminui gradativamente até o encontro do rio das Antas com o arroio Nhapindazal. O bairro de mesmo nome deste arroio merece atenção nas áreas localizadas ao sul (Figura 22-A), onde dois afluentes que se ligam ao arroio principal nas proximidades da principal via de saída do município, antes da junção, os três canais percorrem os loteamentos ali instalados. As áreas localizadas ao norte do bairro Nhapindazal (Figura 22-B) contabilizam o último ponto enquadrado na classe de “alta suscetibilidade”, esta região apesar de estar localizada no perímetro urbano do munícipio, caracteriza-se por uma zona residencial rarefeita com a presença de vegetação nativa e áreas agrícolas.

Figura 22 – Áreas do bairro Nhapindazal classificada como “alta suscetibilidade”



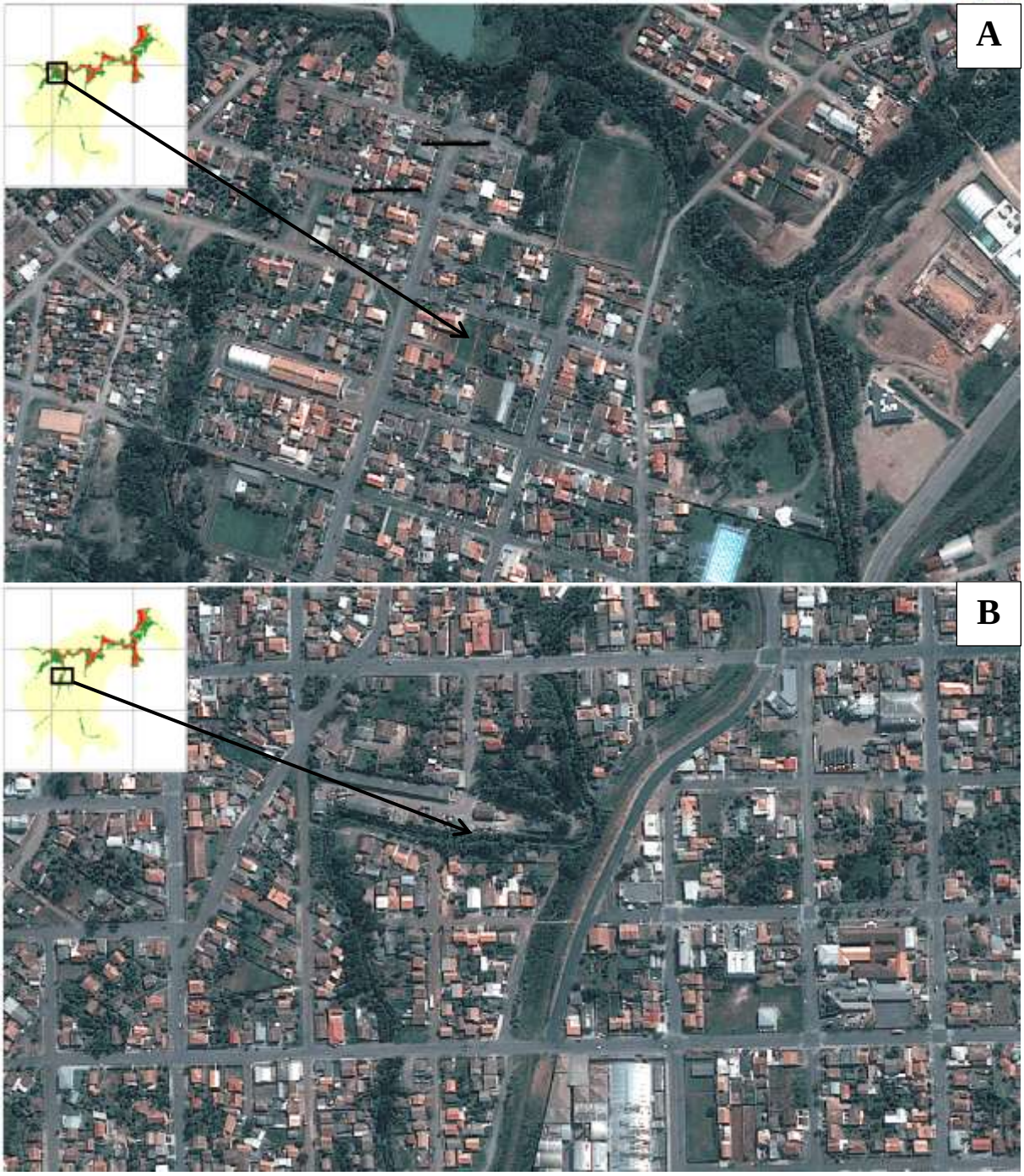
Fonte: Satélite *Geoeye*, 2013
Org: A autora

A classe de “média suscetibilidade” acompanha paralelamente os trechos classificados e apresentados anteriormente como “alta suscetibilidade”. A faixa paralela varia em 77 m na área 1 (Figura 19), 108 m na área 3 (Figura 21) e 282 m na área 5 (Figura 22-B), ambas localizadas do lado direito da margem do rio das Antas.

Destacam-se ainda duas regiões para a classe de “média suscetibilidade”, a primeira localiza-se a leste do bairro DER, compreendendo o baixo curso do arroio Rio Bonito, bem

como o baixo curso de seu afluente (Figura 23-A), a faixa contabilizada nesta classe varia em média 80 m. A segunda região localiza-se a leste do bairro Rio Bonito (Figura 23-B), logo após a junção do rio das Antas com o arroio da Lagoa.

Figura 23 – Áreas do bairro DER (A) e Rio Bonito (B) classificadas como "média suscetibilidade"



Fonte: Satélite *Geoeye*, 2013
Org: A autora

A classe denominada “baixa suscetibilidade” indica as áreas passíveis de serem inundadas, ou seja, aquelas não habitualmente submersas. Todos os canais utilizados no estudo apresentaram áreas contabilizadas nessa classe, incluindo regiões próximas à cabeceira do rio das Antas. As áreas que se destacam nesta classe correspondem a região adjacente dos pontos representados nas Figuras 22-B e 23, ainda áreas localizadas em ambas as margens do baixo curso do arroio dos Pereiras (Figura 20).

A semelhança entre as áreas apresentadas, com exceção da Figura 22-B, é presença de áreas urbanas consolidadas. As áreas classificadas como alta e média suscetibilidade apresentam construções apropriadas para estes graus, como campos de futebol e clubes, porém, também apresentam construções inapropriadas como o prédio da nova prefeitura do município e uma escola municipal. Destaca-se ainda que áreas suscetíveis à erosão e não suscetíveis a enchentes, ou seja, aquelas com alta declividade, não estão ocupados pela população. Por último destaca-se que os canais de drenagem dentro do perímetro urbano do município de Irati pertencentes à bacia hidrográfica do rio das Antas possuem, de um modo geral, faixas de proteção (formada em alguns trechos por vegetação arbórea e em outros por vegetação rasteira) que minimizam as consequências das cheias menos intensas.

6 Conclusões

Os resultados obtidos a partir da interpretação dos dados da caracterização morfométrica da bacia do rio das Antas permitem concluir que essa bacia possui forma alongada (F=0,256) e que em condições normais de precipitação tende a apresentar poucas possibilidades de enchentes. Todavia os registros históricos do munícipio comprovam o contrário, e dessa forma pode-se afirmar que outros fatores, tais como, o crescimento do perímetro urbano na cabeceira da bacia afetou de forma negativa o comportamento hidrológico de algumas áreas, visto que os resultados da caracterização morfométrica das sub-bacias indicaram que apenas uma delas (SB02) apresenta tendência à forma arredondada.

Outro ponto que se destaca na caracterização das sub-bacias é que três delas (SB01, SB05 e SB06) apresentam forma e declividade média semelhantes, ou seja, o escoamento de tais bacias, juntamente com a contribuição efluente da SB02 (a maior das sub-bacias), tendem a formar um pico de vazão na SB07.

Quanto às análises espaciais, os resultados indicaram que no interior da bacia do rio das Antas existem áreas que apresentam condições propicias à formação de enchentes. No perímetro urbano, 3,645 km² (13,8%) apresentam algum grau de suscetibilidade. Analisando

as áreas classificadas como alta e média suscetibilidade a enchentes, tem-se que a maior parte delas (2,15 km²) está inserida na SB07, que por sua vez apresenta baixas cotas altimétricas e a menor declividade do principal curso d'água e, portanto menor velocidade de escoamento.

Perante a divisão política do perímetro urbano, os bairros que apresentam áreas suscetíveis a enchentes são o DER, Centro, Canesianas e Nhapindazal, o que sugere uma gestão adequada nas sub-bacias SB02, SB05 e SB07.

Por fim conclui-se que o mapeamento das áreas suscetíveis é uma importante ferramenta para os gestores de um dado local, entretanto esse mapeamento só será eficiente se a escala dos dados estiver em concordância com a escala do problema.

7 Recomendações

- Para futuros trabalhos:

Como sugestões para futuros trabalhos têm-se a inclusão de novos critérios, como por exemplo, valores do "nível do lençol freático", estudos adicionais podem aumentar a espacialização das classes de suscetibilidade, bem como modificar sua localização.

- Para a gestão da Bacia do rio das Antas:

O mapeamento, bem como o zoneamento das classes qualificadoras de suscetibilidade enquadram-se como medida não-estrutural para o planejamento urbano do munícipio de Irati. Ainda nesse grupo de medidas, sugere-se o uso de seguro em grupos, visto que diversos pontos classificados como suscetíveis são constituídos por área urbana consolidada.

Quanto as medidas estruturais, vale destacar que a conclusão da obra de dragagem do leito do rio das Antas melhorou sua vazão e consequentemente atenuou os efeitos mais críticos das cheias. Porém, outras medidas podem ser adotadas para a gestão das áreas suscetíveis a enchentes, entre elas: a implantação de dispositivos de retenção nas áreas próximas do ponto de interseção entre a SB02 e a SB07. A obrigatoriedade de não se impermeabilizar uma portagem dos lotes urbanos, bem como a construção de trincheiras ou a utilização de pavimentos semipermeáveis favoreceria a etapa de infiltração da água e consequentemente diminuiria o volume de água escoado em áreas como o bairro Centro.

A última recomendação refere-se a intensificação das faixas de proteção presentes em diferentes pontos das na cidade.

Referências

ALEXAKIS, D.D; GRILLAKIS, M. G.; KOUTROULIS, A. G. AGAPIOU, A. THEMISTOCLEOUS, K.; TSANIS, I. K.; MICHAELIDES, S.; PASHIARDIS, S.; DEMETRIOU, C.; ARISTEIDOU, K.; RETALIS, A.; TYMVIOS, F.; HADJIMITSIS, D. G. GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, n. 2, p. 413-426, 2014.

ALVES, H. P. da F.; ALVES, C. D.; PEREIRA, M. N.; MONTEIRO, A. M. V. Dinâmicas de urbanização na hiperperiferia da metrópole de São Paulo: Análise dos processos de expansão urbana e das situações de vulnerabilidade socioambiental em escala intraurbana. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 27, n. 1, p. 141-159, 2010.

ALVES, J. **Alagamento, Enchente ou inundação?.** Disponível em:< http://aengenharianosensina.blogspot.com.br/2014/01/foi-alagamento-enchente-ou-inundacao.html. Acesso em: 20 maio de 2016.

ANDRADE, S. L.; FERREIRA, V. O.; SILVA, M. M. Elaboração de um mapa de risco de inundações da bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG. Caderno de Geografia, v. 24, n. 41, p. 1-16, jan./jun. 2014.

ANDRES, J.; MENDES, J.; ANDRADE, S.; CANEPARO, S. C. Risco de enchentes e lógica fuzzy no planejamento da expansão urbana na microbacia hidrográfica do Arroio Lonqueador (SW/PR). In: SIMPÓRIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: INPE, 2013. P. 4578-4585.

ANGILLIERI, M. Y. E. Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina. **Quaternary International**, v. 253, p. 74–79, 2012.

ASSAD, L. Cidades nascem abraçadas a seus rios, mas lhes viram as costas no crescimento**. Ciência Cultura,** v. 65, n. 2, p. 06-09, abr./jun. 2013.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 29-49, jan./mar. 2002.

BAPTISTA, M. B.; CARDOSO, A. Rios e Cidades: uma longa e sinuosa história. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 124-153, 2013.

BARBOSA, C. C. F**. Álgebra de mapas e suas aplicações em sensorimento remoto e geoprocessamento.** 1997. 161 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

BATHRELLOS, G. D.; KARYMBALIS, E.; SKILODIMOU, H. D.; GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; BALTAS, E. A. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. **Environmental Earth Sciences,** v. 75, p. 319, 2016.

BORTOLOTI, F. D.; CASTRO JUNIOR, R. M.; ARAÚJO, L. C.; MORAIS, M. G. B. Preliminary landslide susceptibility zonation using GIS-based fuzzy logic in Vitória, Brazil. **Environmental Earth Sciences,** v. 74, p. 2125-2141, 2015.

.

BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento do solo e dá outras providências**. Diário Oficial da União**, Brasília, 20 dez. 1979. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 23 jan. 2016.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographic information systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998. 333p.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.; FREITAS, U.; GARRIDO, J. Spring: integrating remote sensing and gis by object- oriented data modelling. **Computers & graphics**, v. 2, n. 3, p. 395–403, 1996.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Por que Geoprocessamento?. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V.(Orgs). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004.

CAMPOS, P. C. **Enchentes no brasil causam perdas de até US$ 2 bilhões por ano**. Correio do Brasil, 2011. Disponível em:<http://correiodobrasil.blogoosfero.cc/enchentes-no-brasil-causam-perdas-de-ate-us-2-bilhoes-por-ano-3/>. Acesso em: 20 set. 2016.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241–248, 2006.

CASANOVA, M.; CÂMARA, G.; DAVIS, C.; VINHAS, L.; DE QUEIROZ, G. R. **Bancos de Dados Geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres**. 5 ed. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2012.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais**, 2. Ed. Florianópolis: Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres/UFSC, 2013

CHEN, H.; ITO, Y.; SAWAMUKAI, M.; TOKUNAGA, T. Flood hazard assessment in the Kujukuri Plain of Chiba Prefecture, Japan, based on GIS and multicriteria decision analysis. **Natural Hazards**, v. 78, n. 1, p. 105-120, ago. 2015.

CHEN, Y. R.; YEH, C. H.; YU, B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. **Natural Hazards**, v. 59, n. 3, p. 1261–1276, dez. 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 149 p.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alteraçãoes em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrografica do rio Capivari-SP**. 2000. 194 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DASHTPAGERDI, M. M.; NOHEGAR, A.; VAGHARFARD, H.; HONARBAKHSH, A.; MAHMOODINEJAD, V.; NOROOZI, A.; GHONCHEHPOOR, D. Application of Spatial Analysis Techniques to Slect the Most Suitable Areas for Flood Spreading. **Water Resour Manage**, v. 27, p. 3071-3084, 2013.

DA SILVA, M. G. Castigada pelas chuvas, Irati assina plano de contingência. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/castigada-pelas-chuvas-irati-assina-plano-de-contingencia-edsid7oibc69eovdlxl34w8jy>. Acesso em: 13 ago. 2016.

DE PAULA, E. M. S. **Geotecnologia aplicada à compartimentação ambiental da bacia do rio Ceará-CE.** 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2008.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (Org.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: < http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 20 jan. 2016.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979.

FARIAS, R. N.; PEDROZO, C. S.; MACHADO, N. A. F.; RODRIGUEZ, M. T. R. Análise morfométrica e de usos do solo da bacia hidrográfica do Arroio Candiota, RS, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 159-172, maio./ago. 2015.

FEIZIZADEH, B.; ROODPOSHTI, M. S.; JANKOWSKI, P.; BLASCHKE, T. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. **Computers & Geosciences**, v. 73, p. 208-221, 2014.

FERNÁNDEZ, D. S.; LUTZ, M. A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, v. 111, n. 1-4, p. 90–98, 2010.

FLORENZANO, T. G. **Satélites e suas aplicações**. São José dos Campos-SP: SindCT, 2008.

GAJBHIYE, S.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A. Prioritizing erosion-prone área through morphometric analysis: na RS and GIS perspective. **Applied Water Science**, v. 4, p. 51-61, 2014.

GALVÃO, M. I. S. **Zoneamento de risco à inundação da área urbana de Porto Xavier/RS.** 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GENOVEZ, A. M. Vazões Máximas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Orgs.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 33-108.

GLOBALGEO. **Imagens de Satélite: GeoEye-1**. Disponível em:< http://www.globalgeo.com.br/satelite/geoeye-1>. Acesso em 23 fev. 2016.

GOTTARDO, E. **Geoprocessamento e integração de dados geológicos e aerogeofísicos para avaliação de favorabilidade mineral de depósitos auríficos em veios na região de porto nacional (TO)**. 2003. 545 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metarlúgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

GUERRA, A. T.; GUERRA A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

HORA, S. B.; GOMES, R. L.; Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana noMunicípio de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2, p. 57-75, ago. 2009.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the geological Society of America**, v. 56, p. 275-370, 1945.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Cidades@**. Censo 2010. Disponível em < http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Acesso em 03 fev. 2016.

ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade). **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Irati**. Fernandes Pinheiro, 2013.

IWAI, O. K. **Mapeamento do uso do solo urbano no município de São Bernardo do Campo, através de imagens de satélite**. 2003. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **LEGAL**. Disponível em: < file:///C:/Program%20Files%20(x86)/Spring542_Portugues_x86/helpport/legal.htm#diagrama > . Acessado em 23 fev. 2016.

KHOSRAVI, K.; NOHANI, E.; MAROUFINIA, E.; POURGHASEMI, H. R. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. **Natural Hazards**, v. 83, n. 2, p. 947-987, set. 2016.

LIMA, L. M. M. **Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do arroio do salso, Porto Alegre-RS**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LISBÔA, T. F. P. **Vulnerabilidade e capacidade de resposta à ameaça de inundação na bacia hidrográfica do rio Paracuri, Belém-PA**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

MAGESH, N. S.; JITHESHLAL, K. V.; CHANDRASEKAR, N.; JINI, K. V. Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. **Applied Water Science**, v. 3, p. 467-477, 2013.

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V.(Orgs). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004.

MEIRELLES; M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CAMARA, G. Técnicas de Inferência Espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA,G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Informação Tecnológica, 2007. p. 107-189.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação.** Porto Alegre: ABRH, 2013. 576 p.

MINIKOWSKI, M.; MAIA, A. G. Estudo da Ocorrência de Enchentes em Irati (PR) através da Análise de Série Histórica de Precipitação. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2. Irati. **Anais...**Irati: PROIC/UNICENTRO, 2008.

MOREIRA, F. R. S**. Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas**. 2001. 164 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; CÂMARA, G.; FILHO, R. A.. Inferência geográfica e suporte à decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V.(Orgs). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004.

NASCIMENTO, V. M. L. C. **Cartografia das áreas favoráveis à ocupação urbana no município de João Pessoa/PB utilizando sistema de informações geográficas**. 2008, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

NASCIMENTO, V. M. L. C.; LIMA, E. R. V.; SANTOS, C. A. G. SIG na avaliação de áreas para ocupação urbana de João Pessoa, PB. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 107-123, jan./mar. 2009.

NOVO, E. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. Sao Paulo: Blucher, 2010. 387p.

OLIVEIRA, P. T. S.; ALVES SOBRINHO, T.; STEFFEN, J. L.; RODRIGUES, D. B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 819-825, 2010.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IRATI. **Histórico**. Disponível em:< http://irati.pr.gov.br/pagina/78_Historico.html>. Acesso em: 03 mar. 2016.

RADMEHR, A.; ARAGHINEJAD, S. Flood Vulnerability Analysis by Fuzzy Spatial Multi Criteria Decision Making. **Water Resour Manage**, v. 29, p. 4427-4445, 2015.

RODRIGUES, C. S. **Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo-RJ por meio de inferência fuzzy e elaboração de cenários de alerta com uso do Terrama2**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

RODRIGUES, D. B. B.; MENDIONDO, E. M. Bacias Hidrográficas: Caracterização e Manejo Sutentável. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: conceitos tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. cap 3. p. 47-74.

RUHOFF, A. R. **Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: Modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas.** 2004. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SACCONI, L. A. **Dicionário essencial da língua portuguesa**. São Paulo: Atual, 2001.

SAMIZAVA, T. M.; KAIDA, R. H.; IMAI, N. N.; NUNES, J. O. R. SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente – SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, n. 1, p. 43-55, abr. 2008.

SANTOS, A. R. **Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrológica do rio Turvo Sujo, microrregião de Viçosa, MG**. 2001, 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SAATY, T. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SHAHABI, H.; KEIHANFARD, S.; AHMAD, B. B.; AMIRI, M. J. T. Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, p. 4221-4233, 2014.

SILVA, S. F. **Zoneamento geoambiental com auxílio de lógica fuzzy e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da bacia do rio do Peixe**. 2005. 441 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SCHUMM, S. A. Evolution of rainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Bulletin of the geological Society of America**, v. 67, p. 597-646, 1956.

STEFANIDIS, S.; STATHIS, D. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). **Natural Hazards**, v. 68, n. 2, p. 569–585, set. 2013.

STOLLE, L. **Simulação e espacialização da fragilidade ambiental em relação às atividades florestais.** 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed Geomorphology. **Transaction of the American Geophysical Union**, v.38, n.6, p. 913-920, 1957.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R (Org.). **Desastres naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG.** 2005. 69 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2007. 352 p.

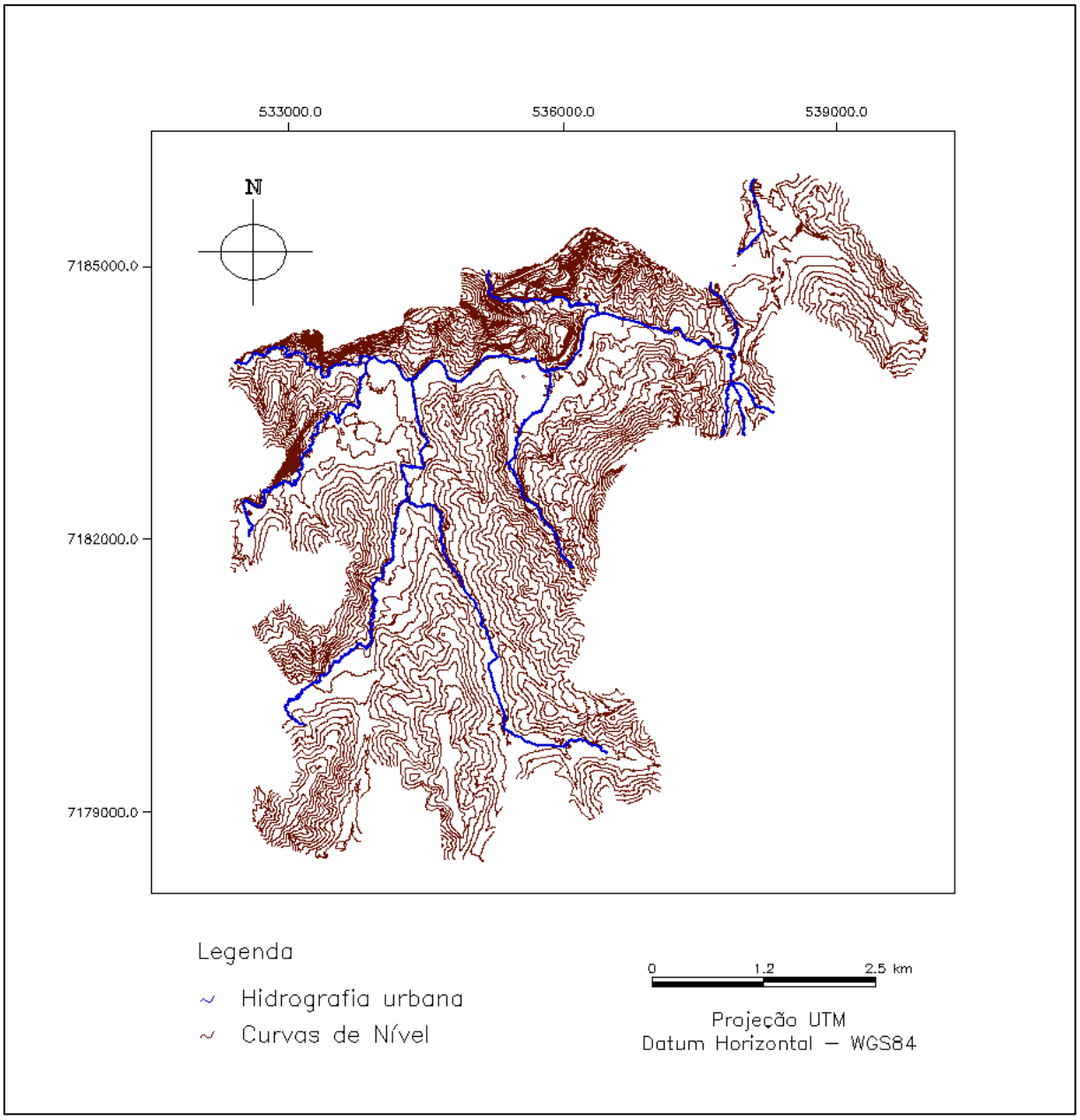
VIECELI, N.; BORTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; BACARIM, G.; CAMIN, G. SCHNEIDER, V. E. Morphometric evaluation of watersheds in Caxias do Sul City, Brazil, using SRTM (DEM) data and GIS. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 9, p. 5677-5685, maio 2014.

WEISS, R. **Identificação da fragilidade ambiental quanto a enchentes e desmoramentos no perímetro urbano de Santa Maria-RS por geotecnologias.** 2012. 118 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

Zadeh, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, v.8, p. 338-353, 1965.

ZAIDI, E. K.; NAZZAL, Y.; AHMED, I.; NAEEM, M.; JAFRI, M. K. Identification of potential artificial groundwater recharge zones in northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. **Journal of African Earth Sciences**, v. 111, p. 156-169, 2015

Apêndice A – Base cartográfica, escala 1:2.000



Fonte: Prefeitura Municipal de Irati, 2015
Org: A autora

Apêndice B - Programas LEGAL

01: Programa LEGAL de espacialização da altitude para valores de 0 a 1

```
{//Programa de espacialização da altimetria

//Declaração
Numerico alt ("ALTIMETRIA_MNT");
Numerico result ("FATOR1_ALT");

//Instanciação
alt = Recupere(Nome="GradeRETANGULAR");
result = Novo(Nome="FUZZY_Altimetria", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result =((alt<=800)?Digital(1):
        (alt>800&&alt<=820)?(alt*-0.05)+41:
        (alt>820)?Digital(0):
        Digital(0));
}
```

02: Programa LEGAL de espacialização da declividade para valores de 0 a 1

```
{//Programa de espacialização da declividade

//Declaração
Numerico dec ("DECLIVIDADE_MNT");
Numerico result ("FATOR2_DEC");

//Instanciação
dec=Recupere(Nome="TINDeclividade");
result=Novo(Nome="FUZZY_Declividade", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0,Max=1);

//Operação
result= ((dec<=2)?Digital(1):
        (dec>2&&dec<=15)?(dec*-0.0769)+1.1538:
        (dec>15)?Digital(0):
        Digital(0));

}
```

03: Programa LEGAL de espacialização da distância dos cursos d'água para valores de 0 a 1.

```
{//Programa de espacialização contínua da distância dos corpos d'água

//Declaração
Numerico dist ("DISTANCIAS_MNT");
Numerico result ("FATOR3_DIS");

//Instanciação
dist=Recupere(Nome="Map_dist_hidrografia");
result=Novo(Nome="FUZZY_Distancia", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0,Max=1);

//Operação
result= ((dist<=0)?Digital(1):
        (dist>0&&dist<=150)?(dist*-0.0067)+(1):
        (dist>150)? Digital(0):
        Digital(0));

}
```

04: Programa LEGAL de espacialização da classe de urbanização – Muito Alto para valores de 0 a 1.

```
{//Programa de espacialização da classe de urbanização – Muito Alto

//Declaração
Tematico uso ("GRAU_URBANIZACAO");
Numerico dist ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");
Numerico result ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");

//Instanciação
uso = Recupere(Nome="Mapa_uso_impermeabilidade");
dist=Recupere(Nome="MuitoAlto");
result=Novo(Nome="FUZZY_MuitoAlto", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result= ((dist<100&&uso.Classe=="Alto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Medio")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Baixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoAlto")?(dist*0.005)+0.5:
        (dist>=100&&uso.Classe=="Alto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Medio")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Baixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoAlto")? Digital(1):
        Digital(1));
}
```

05: Programa LEGAL de espacialização da classe de urbanização – Alto para valores de 0 a 1.

```
{// Programa de espacialização da classe de urbanização – Alto

//Declaração
Tematico uso ("GRAU_URBANIZACAO");
Numerico dist ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");
Numerico result ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");

//Instanciação
uso = Recupere(Nome="Mapa_uso_impermeabilidade");
dist=Recupere(Nome="Alto");
result=Novo(Nome="FUZZY_Alto", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result= ((dist<100&&uso.Classe=="MuitoAlto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Medio")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Baixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Alto")?(dist*0.005)+0.5:
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoAlto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Medio")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Baixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Alto")? Digital(1):
        Digital(1));
}
```

06: Programa LEGAL de espacialização da classe de urbanização – Médio para valores de 0 a 1.

```
{// Programa de espacialização da classe de urbanização – Médio

//Declaração
Tematico uso ("GRAU_URBANIZACAO");
Numerico dist ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");
Numerico result ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");

//Instanciação
uso = Recupere(Nome="Mapa_uso_impermeabilidade");
dist=Recupere(Nome="Medio");
result=Novo(Nome="FUZZY_Medio", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result= ((dist<100&&uso.Classe=="MuitoAlto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Alto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Baixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Medio")?(dist*0.005)+0.5:
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoAlto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Alto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Baixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")? Digital(0):
```

```
        (dist>=100&&uso.Classe=="Medio")? Digital(1):
        Digital(1));
}
```

07: Programa LEGAL de espacialização da classe de urbanização – Baixo para valores de 0 a 1.

```
{// Programa de espacialização da classe de urbanização – Baixo

//Declaração
Tematico uso ("GRAU_URBANIZACAO");
Numerico dist ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");
Numerico result ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");

//Instanciação
uso = Recupere(Nome="Mapa_uso_impermeabilidade");
dist=Recupere(Nome="Baixo");
result=Novo(Nome="FUZZY_Baixo", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result= ((dist<100&&uso.Classe=="MuitoAlto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Alto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Medio")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Baixo")?(dist*0.005)+0.5:
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoAlto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Alto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Medio")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Baixo")? Digital(1):
        Digital(1));
}
```

08: Programa LEGAL de espacialização da classe de urbanização – Muito Baixo para valores de 0 a 1.

```
{//Programa de espacialização da classe de urbanização – Muito Baixo

//Declaração
Tematico uso ("GRAU_URBANIZACAO");
Numerico dist ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");
Numerico result ("GRAU_ URBANIZACAO _MNT");

//Instanciação
uso = Recupere(Nome="Mapa_uso_impermeabilidade");
dist=Recupere(Nome="MuitoBaixo");
result=Novo(Nome="FUZZYMuitoBaixo", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result= ((dist<100&&uso.Classe=="MuitoAlto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Alto")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Medio")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="Baixo")?(dist*-0.005)+0.5:
        (dist<100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")?(dist*0.005)+0.5:
```

```
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoAlto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Alto")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Medio")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="Baixo")? Digital(0):
        (dist>=100&&uso.Classe=="MuitoBaixo")? Digital(1):
        Digital(1));
}
```

09: Programa LEGAL de integralização e ponderação das classes de urbanização

```
{//Programa de integralização e ponderação: grau de urbanização

//Declaração
Numerico ma, a, m, b, mb, result ("GRAU_URBANIZACAO_MNT");

//Instanciação
ma=Recupere(Nome="FUZZY_MuitoAlto");
a=Recupere(Nome="FUZZY_Alto");
m=Recupere(Nome="FUZZY_Medio");
b=Recupere(Nome="FUZZY_Baixo");
mb=Recupere(Nome="FUZZY_MuitoBaixo");
result=Novo(Nome="Integracao", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result=((1*ma)+(0.8*a)+(0.5*m)+(0.3*b));

}
```

10: Programa LEGAL de correção da grade de integralização e ponderação das classes de urbanização para valores de 0 a 1.

```
{//Programa para corrigir o valor máximo: grau de urbanização

//Declaração
Numerico  pond ("GRAU_URBANIZACAO_MNT");
Numerico result (“FATOR4_URB”);

//Instanciação
pond=Recupere(Nome="Integracao");
result=Novo(Nome="FUZZY_Urbanizacao", ResX=3, ResY=3, Escala=50000, Min=0, Max=1);

//Operação
result=((pond>1)?Digital(1):
        (pond<=1)?(pond*1):Digital(0));
}
```

11: Programa LEGAL para aplicação dos pesos e geração da grade numérica *fuzzy* ponderada para valores de 0 a 1.

```
{
// Pesos a ser aplicados
// FATOR1_ALT = 0.426
// FATOR2_DEC = 0.301
// FATOR3_DIS = 0.213
// FATOR4_USO = 0.060

// Razao de consistência
// CR = 0.045


// Definicao dos dados de entrada

Numerico  var1  ("FATOR1_ALT");
Numerico  var2  ("FATOR2_DEC");
Numerico  var3  ("FATOR3_DIS");
Numerico  var4  ("FATOR4_URB");

// Definicao do dado de saida

Numerico  var5  ("FUZZY_PONDERADO");

// Recuperacao dos dados de entrada

var1 = Recupere (Nome="FUZZY_Altimetria");
var2 = Recupere (Nome="FUZZY_Declividade");
var3 = Recupere (Nome="FUZZY_Distancia");
var4 = Recupere (Nome="FUZZY_Urbanizacao");

// Criacao do dado de saida

var5  =  Novo (Nome="GradeFuzzyPond", ResX=3, ResY=3, Escala=50000,
        Min=0, Max=1);

// Geracao da media ponderada

var5 = 0.426*var1 + 0.301*var2+ 0.213*var3+ 0.060*var4;
}
```