



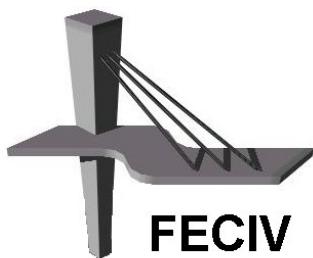
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DELIMITAÇÃO DE ÁREAS VARIÁVEIS DE
AFLUÊNCIA EM AMBIENTES DE
MICROBACIAS URBANAS ATRAVÉS DA
COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TauDEM E
HAND**

JACIANE XAVIER BRESSIANI

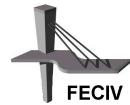
UBERLÂNDIA, 15 de Fevereiro de 2016



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Jaciane Xavier Bressiani

**DELIMITAÇÃO DE ÁREAS VARIÁVEIS DE
AFLUÊNCIA EM AMBIENTES DE MICROBACIAS
URBANAS ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO DOS
MÉTODOS TauDEM E HAND**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 15 de Fevereiro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B843d Bressiani, Jaciane Xavier, 1988-

2016 Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através da comparação dos métodos TauDEM e HAND / Jaciane Xavier Bressiani. - 2016.

92 f. : il.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Microbacias hidrográficas - Uberlândia (MG) - Teses. 3. Áreas de conservação de recursos naturais - Teses. 4. Recursos naturais - Legislação - Teses. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEc

ATA Nº: 151/2016

CANDIDATO: Jaclane Xavier Bressiani

Nº. Matrícula: 11312ECV002

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

TÍTULO: "Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através dos métodos do TauDEM e do modelo HAND".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento

DATA DA DEFESA: 15 de fevereiro de 2016

LOCAL: Sala de Projeções - FECIV, bloco 1Y. HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14h00 / 16h00

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEc, assim composta: Professores Doutores: José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU; Silvana Philippi Camboim – PPGCG/UFRN e Marcio Augusto Reolon Schmidt orientador da candidata. Ressalta-se que a Prof.^a Dr.^a Silvana Philippi Camboim participou da defesa por meio de video conferência desde a cidade de Curitiba (PR) e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata aprovada. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Jaclane Xavier Bressiani
Professor Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU

SP Camboim
Membro externo: Prof^a. Dr^a. Silvana Philippi Camboim – PPGCG /UFRN

José Eduardo Alamy Filho
Membro interno: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU

Uberlândia, 15 de fevereiro de 2016.

A GRADECIMENTOS

Por guiar meus passos e ser mentor da minha vida, a Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcio A. Reolon Schmidt por ter caminhado comigo para a concretização deste trabalho, com toda paciência, sabedoria, criticidade e humildade.

A minha família e minha base, Ulisses e Vicente, responsáveis pela minha motivação, a razão do meu viver.

Aos amigos que fiz para toda a vida, Emiliano e Patrícia, gratidão por tudo que significa a palavra amizade. Também à Patrícia, minha eterna gratidão pelo auxílio e generosidade com os programas de SIG, na geração dos resultados desta pesquisa.

À Aline Martins e Karen, pelas conversas, risadas e momentos de descontração pela UFU.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil por oportunizarem o meu crescimento e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES por subsidiar esta pesquisa.

À Prefeitura Municipal de Uberlândia por ceder as informações necessárias para o trabalho.

A todos os colegas e professores com quem compartilhei da mesma classe e com os quais muito aprendi.

RESUMO

Segundo o Código Florestal, lei 12.651/12, as Áreas de Preservação Permanente (APP) são faixas simétricas de vegetação, as quais têm os seus tamanhos estipulados conforme a largura da calha do leito regular do curso d'água. Portanto, ao atender exigências da legislação, a delimitação das APP segue regras bastante simples, que não considera aspectos físicos e a dinâmica do ecossistema ripário e não requer domínio de técnicas avançadas de modelagem hidrológica. Neste contexto, as áreas variáveis de afluência (AVA) são uma alternativa para a delimitação das zonas ripárias, garantindo as funções ambientais que as mesmas desempenham. As AVA são pequenas áreas na microbacia hidrográfica que sofrem expansão e contração com eventos de precipitação, nas quais ocorre saturação hídrica e que nem sempre estão localizadas nas faixas estabelecidas pela legislação brasileira vigente. São áreas relacionadas à qualidade dos recursos hídricos, uma vez que são fontes de escoamento superficial oriundo da saturação e, portanto, podem carrear sedimentos e poluentes para os cursos d'água. Assim sendo, o principal objetivo deste trabalho foi comparar modelos que definem os limites das AVA em ambientes de microbacias urbanas, através de parâmetros topográficos e de hidrologia. Os modelos utilizados foram os obtidos pelos programas *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM) e *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), tendo como áreas de estudo as microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre, no município de Uberlândia, Minas Gerais. Valores distintos foram encontrados em cada modelo, pois apesar de ambas modelagens utilizarem os dados topográficos do MDT, no TauDEM há correlação deste com a área de contribuição específica e, no HAND, com a altura em relação à rede de drenagem mais próxima. Constatou-se que as AVA englobam as APP ao longo dos rios, mas também se encontram distribuídas por toda a microbacia e, em termos quantitativos, ocupam mais áreas do que as definidas pelo Código Florestal. Com estas áreas espacializadas e com *buffers* das APP e mapas de uso e ocupação do solo gerados foi possível originar um mapa de susceptibilidade da bacia hidrográfica, o qual visa auxiliar a gestão da mesma para a manutenção e preservação das AVA que não são contempladas pela atual legislação como APP.

Palavras-chave: Áreas variáveis de afluência. Modelagem hidrológica. TauDEM. HAND.

ABSTRACT

According to the Brazilian Forest Code, law nº 12.651/12, the permanent preservation areas (PPA) are a symmetric range of vegetation that have their width specified proportionally to the water flow width. Therefore, to attend legislation demands, the PPA delimitation follows very simple rules which does not consider physical and dynamics aspects of the riparian ecosystem and does not require the knowledge in techniques for hydrologic modeling. In this context, the areas variable inflow (AVI) are an alternative for the delimitation of the riparian areas ensuring the environmental functions performed by them. The AVIs are little areas in the watershed that are expanded and contracted because of the precipitation events that saturate the soil and they are not always coincident with the PPAs. The AVIs are areas associated to the quality of the hydric resources, once they are a superficial source flow arising from saturation and so, the AVIs can transport sediments and pollutants to the water flows. Thus, the main goal of the research is to compare models that define the boundaries of AVIs located at urban watershed by means of topographic and hydrologic parameters. The models were obtained through 'Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) and Height Above the Nearest Drainage (HAND), having as the study areas the watersheds from Lagoinha and the Campo Alegre, in the city of Uberlândia, in Minas Gerais. Despite both models use the digital terrain model (DTM) from topographic data, TauDEM performs a correlation between it and its specific contribution area, and on HAND, there is a correlation with the nearest drainage network. It is found that the AVIs include PPAs as part of them, however, the first ones are distributed for the entire watershed, and quantitatively, they are spread over bigger areas than those defined by the Brazilian Forest Code. It was possible to make a map of susceptibility of the watershed using these specialized areas and buffers from the APPs and maps of land use. The map aims to help the management of the watershed for maintenance and preservation of the AVAs that are not contemplated by the present legislations as APP.

Keywords: Areas of Variable Inflow. Hydrologic Modeling. TauDEM. HAND.

SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

A_s Área de contribuição específica

β Declividade do terreno

P Profundidade do solo

χ^2 Teste Qui Quadrado

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

<i>AVA</i>	Áreas variáveis de afluência
<i>APP</i>	Área de preservação permanente
<i>IT</i>	Índice topográfico de umidade
<i>PMU</i>	Prefeitura Municipal de Uberlândia
<i>SIG</i>	Sistemas de informação geográfica

SIGLAS

<i>AGWA</i>	Automated Geospatial Watershed Assessment
<i>CDB</i>	Convenção sobre Diversidade Biológica
<i>CLASS</i>	Catchment Scale Multiple-Landuse Atmosphere Soil Water and Solute Transport Model
<i>CONAMA</i>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<i>D8</i>	Método das Oito Possíveis Direções de Fluxo
<i>D-Infinity</i>	Método da Direção de Fluxo Múltiplo
<i>Embrapa</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HAND</i>	Height Above the Nearest Drainage
<i>HEC-HMS</i>	Hydrologic Modeling System
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>INPA</i>	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>KINEROS2</i>	Kinematic Runoff and Erosion Model
<i>MMA</i>	Ministério do Meio Ambiente
<i>MATLAB</i>	Matrix Laboratory
<i>MDE</i>	Modelo Digital de Elevação
<i>MDT</i>	Modelo Digital do Terreno
<i>MDTHC</i>	Modelo Digital do Terreno Hidrológicamente Corrigido
<i>MNT</i>	Modelo Numérico do Terreno

<i>MAXVER</i>	Classificação Supervisionada Máxima Verossimilhança
<i>SMR</i>	Soil Moisture Routine
<i>SRTM</i>	Shuttle Radar Topography Mission
<i>SVAT-PROMET</i>	Process-Oriented Model for Evapo Transpiration
<i>SWAT</i>	Soil Water Assessment Tool
<i>SWATWB</i>	Soil and Water Assessment Tool – Water Balance
<i>TauDEM</i>	Terrain Analysis Using Digital Elevation Models
<i>TOPMODEL</i>	Topography Based Hydrological Model
<i>TOPOG</i>	Topography Model
<i>TWI</i>	Topographic Wetness Index
<i>UTM</i>	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Visão macroscópica e concentrada dos caminhos preferenciais na geração de escoamento numa vertente.....	17
Figura 2	Dinâmica das áreas variáveis de afluência em relação ao hidrograma.....	20
Figura 3	Mecanismos de geração de escoamento e condicionantes naturais.....	21
Figura 4	Ordem de uma rede de drenagem segundo classificação de Strahler.....	32
Figura 5	Método D8.....	33
Figura 6	Método D-Infinity proposto por Tarboton.....	34
Figura 7	MDE sombreado.....	39
Figura 8	MDE com as direções de fluxo da rede de drenagem.....	40
Figura 9	Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Corrigido.....	41
Figura 10	Mapa de localização do município de Uberlândia, MG.....	42
Figura 11	Mapa de localização da área de estudo na cidade de Uberlândia, MG.....	43
Figura 12	Mapa de localização das microbacias.....	44
Figura 13	Fluxograma com as etapas para obtenção do MDTHC.....	49
Figura 14	Fluxograma com as etapas para obtenção das AVA pelo TauDEM.....	50
Figura 15	Fluxograma com as etapas para obtenção das AVA pelo HAND.....	51
Figura 16	MDTs utilizados nos métodos TauDEM e HAND.....	53
Figura 17	Limiares para a obtenção da rede de drenagem das bacias hidrográficas pelo modelo HAND.....	55
Figura 18	Imagen dos mapas das AVA das microbacias do córrego da Lagoinha e córrego Campo Alegre pelo TauDEM.....	59
Figura 19	Imagen dos mapas das AVA da microbacia do córrego da Lagoinha e córrego Campo Alegre pelo HAND.....	62
Figura 20	Comparativo dos modelos TauDEM e HAND em ambas as microbacias.....	65
Figura 21	Imagen do mapa das APP do Córrego da Lagoinha.....	67
Figura 22	Imagen do mapa das APP do Córrego Campo Alegre.....	68
Figura 23	Imagen do mapa de uso e ocupação do solo da microbacia do córrego da Lagoinha.....	71
Figura 24	Imagen do mapa de uso e ocupação do solo da microbacia do córrego Campo Alegre.....	72
Figura 25	Imagen dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da lagoinha e do córrego Campo Alegre.....	75
Figura 26	Imagen dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre segundo modelo HAND.....	77
Gráfico 1	Distribuição das AVA nas microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Reclassificação das camadas.....	57
Tabela 2	Quantificação das AVA nas microbacias do córrego da Lagoinha e Campo Alegre.....	69
Tabela 3	Quantificação das classes de uso e ocupação do solo da microbacia córrego da Lagoinha.....	73
Tabela 4	Quantificação das classes de uso e ocupação do solo da microbacia córrego Campo Alegre.....	73
Tabela 5	Quantificação das áreas dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da Lagoinha e Campo Alegre.....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Áreas variáveis de afluência e mecanismos de geração de escoamento.....	17
2.2	A vegetação e o escoamento superficial.....	22
2.3	Modelagem hidrológica de sistemas ambientais.....	25
2.4	Índice topográfico.....	27
2.5	Modelo TauDEM.....	30
2.6	Modelo HAND.....	34
2.7	Ferramentas de geoprocessamento.....	36
2.7.1	<i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i>.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Área de estudo.....	42
3.2	Dados e metodologia.....	47
3.2.1	<i>Dados vetoriais e matriciais</i>.....	47
3.2.2	<i>Imagens de satélite</i>.....	47
3.2.3	<i>Modelagem dos dados</i>.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5	CONCLUSÕES.....	80
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Apesar de inúmeras leis ambientais brasileiras, a ocupação humana em áreas protegidas é crescente (SÁNCHEZ, 2003; JÚNIOR, 2003). Entre as leis brasileiras, destacam-se as leis federais 12.727 e 12.651, do ano de 2012, que atualizam o Código Florestal, e ainda a Resolução 302/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Nestas, as áreas declivosas e com cobertura vegetal ripária são consideradas especialmente vulneráveis. Segundo critérios de vulnerabilidade, podem enquadrar-se como Áreas de Preservação Permanente (APP).

Áreas vulneráveis compreendidas nos perímetros urbanos, nas regiões metropolitanas e nas aglomerações urbanas seguem os planos diretores de cada município, cuja exigência não deve ser menor do que a lei federal. São consideradas faixas de APP 30 metros de vegetação ripária desde a borda da calha do leito regular, para cada lado ao longo de cursos de água com menos de dez metros de largura, exceto para casos excepcionais definidos em lei. Segundo este critério, as APP são faixas simétricas, diferentemente do conceito de zona ripária.

Gregory et al. (1991) definem zona ripária como sendo a interface entre os ecossistemas terrestre e aquático, que se estende horizontalmente até o limite que a inundação alcança, e verticalmente até o topo da copa da vegetação ou, ainda, The Japan Society of Erosion Control Engineering (2000) define a zona ripária como sendo a zona próxima a rios, lagos, pântanos, que influencia fortemente a transferência de energia, nutrientes, sedimentos, entre os ecossistemas terrestre e aquático. Lima e Zakia (2006) definem como áreas de saturação da microbacia, temporárias ou perenes, situadas tanto ao longo dos cursos d'água e junto de nascentes, quanto em áreas mais elevadas da vertente. Segundo Hicon (2011), reunindo critérios técnicos e legais, a zona ripária poderia ser considerada como sendo a soma da largura do rio com as larguras das APP de ambas as margens.

O ecossistema ripário, incluindo a dinâmica da zona ripária, sua vegetação e suas interações, desempenha funções relacionadas à geração do escoamento direto em microbacias, à contribuição ao aumento da capacidade de armazenamento da água, à manutenção da qualidade da água nas microbacias através da filtragem superficial de sedimentos, e à retenção, pelo sistema radicular da mata ripária, de nutrientes liberados dos ecossistemas terrestres causando o efeito tampão, além de proporcionar estabilidade das margens, equilíbrio térmico da água e formação de corredores ecológicos. As florestas situadas em zonas ripárias são chamadas de matas ripárias (LIMA e ZAKIA, 2000).

A zona ripária bem conservada poderá proporcionar conectividade, além de manter as funções de estabilização dos fluxos das águas superficiais e sub-superficiais (recarga de aquíferos), habitats de vida silvestre e corredores de trânsito de fauna e flora, amortecimento de nutrientes e sedimentos, recreação humana e manutenção de paisagens culturais. A largura da vegetação ripária é variável e depende da ordem do canal fluvial (localização na bacia), da interferência humana nos fluxos de água e dos regimes de perturbação (FORMAN, 1995).

Nesse sentido, a utilização da rede fluvial para o desenvolvimento de corredores verdes é ideal, pois mantém não só as funções, os fluxos e os processos naturais, como cria condições para vias de transporte alternativo não poluente, também contribui para manter a saúde física e mental dos usuários, e propiciam contato cotidiano com a natureza, o que promove a educação ambiental (AHERN, 2003). Além disso, O Panorama da Biodiversidade Global (CDB, 2010) registra o reconhecimento crescente de que a restauração ou conservação das funções naturais dos sistemas de água doce pode ser uma alternativa mais rentável do que construir estrutura física para a defesa contra enchentes ou instalações caras para tratamento de água.

Conforme Attanasio (2004), mesmo diante do reconhecimento da importância da zona ripária e dos serviços ambientais que realiza, da constatação da degradação que nestas áreas da microbacia vem ocorrendo e dos conflitos nela estabelecidos, a delimitação e o manejo sustentável da zona ripária, considerando os processos hidrológicos não são, em

geral, relevantes no planejamento do uso da terra, mesmo nos chamados plano de manejo integrado de microbacias.

Ao atender exigências da legislação, a delimitação das áreas de preservação permanente segue regras bastante simples, que não requerem domínio de técnicas avançadas de modelagem hidrológica. Segundo Silva (2012), a vantagem dessas simplificações reside no fato das APPs serem facilmente implantadas e fiscalizadas, pois se resumem a faixas simétricas, com distâncias fixas, ao redor de cursos d'água e nascentes que não podem ter uso agropecuário e/ou antrópico, características estas necessárias a instrumentos legislativos que regulam as alterações no uso do solo.

Uma alternativa que considere aspectos físicos e a dinâmica dessas áreas são as áreas variáveis de afluência (AVA). O conceito de AVA foi estabelecido na década de 1960 e define pequenas áreas na microbacia hidrográfica que sofrem expansão e contração com eventos de precipitação, nas quais ocorre saturação hídrica e que nem sempre estão localizadas nas faixas estabelecidas pela legislação brasileira vigente (ATTANASIO JÚNIOR, ATTANASIO e TONIATO, 2011). São áreas relacionadas à qualidade dos recursos hídricos, uma vez que são fontes de escoamento superficial oriundo da saturação e, portanto, podem carrear sedimentos e poluentes para os cursos d'água.

Segundo Silva (2012) os projetos de restauração de formações ribeirinhas devem considerar as condições e frequência de saturação do solo para selecionar as espécies típicas desses ambientes, usando a microbacia como unidade fundamental de planejamento, e promovendo medidas não só nas áreas a serem restauradas, porém nas áreas a montante, onde estão os principais fatores de degradação. Além disso, esses projetos têm-se confundido com os planos de restauração de áreas de preservação permanente, conforme instituído no Código Florestal (Lei nº. 12.651/12), desconsiderando o mosaico de interações ecológicas e hidrológicas existentes, resultando em propostas sem efetivo sucesso na recomposição florestal (SILVA, 2012).

Atualmente, diversos estudos vêm comparando modelos hidrológicos. Dentre estes, citam-se Ludwig e Mauser (2000) que, para analisar a distribuição e evolução espaço-temporal de evapotranspiração e escoamento da bacia de Ammer, na Alemanha, compararam os

modelos SVAT-PROMET (*Process-Oriented Model for Evapo Transpiration*) e TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*); Miller et al. (2002) para a simulação do escoamento e erosão, utilizou os modelos KINEROS2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) e SWAT (*Soil Water Assessment Tool*), em interface com a ferramenta AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment*) em bacias hidrográficas dos Estados Unidos; e Bakir e Zhang (2008) testaram dois modelos, o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) e o Xinanjiang para a simulação de chuva-vazão na bacia do Wanjiabu, na China.

Neste contexto, esta pesquisa parte da hipótese de que as AVA em ambientes urbanos podem ser definidas a partir de dados espaciais e de hidrologia, estabelecidos através de critérios como declividade, rede de drenagem, pontos cotados no terreno. Para tanto, serão utilizadas ferramentas de geoprocessamento como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) associados com modelos hidrológicos como os métodos do TauDEM, utilizado no ArcGIS (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) e o HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) utilizado no TerraView, os quais se utilizam do índice topográfico de umidade para calcular as AVA.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetiva comparar métodos que definem os limites das áreas variáveis de afluência (AVA) em ambientes de microbacias urbanas, através de parâmetros topográficos e da bacia hidrográfica, tais como área de contribuição específica, rede de drenagem, fluxo acumulado.

1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar os conceitos de AVA na literatura para sua definição no escopo desta pesquisa;
- b) Avaliar os métodos computacionais existentes na literatura para a definição de AVA;

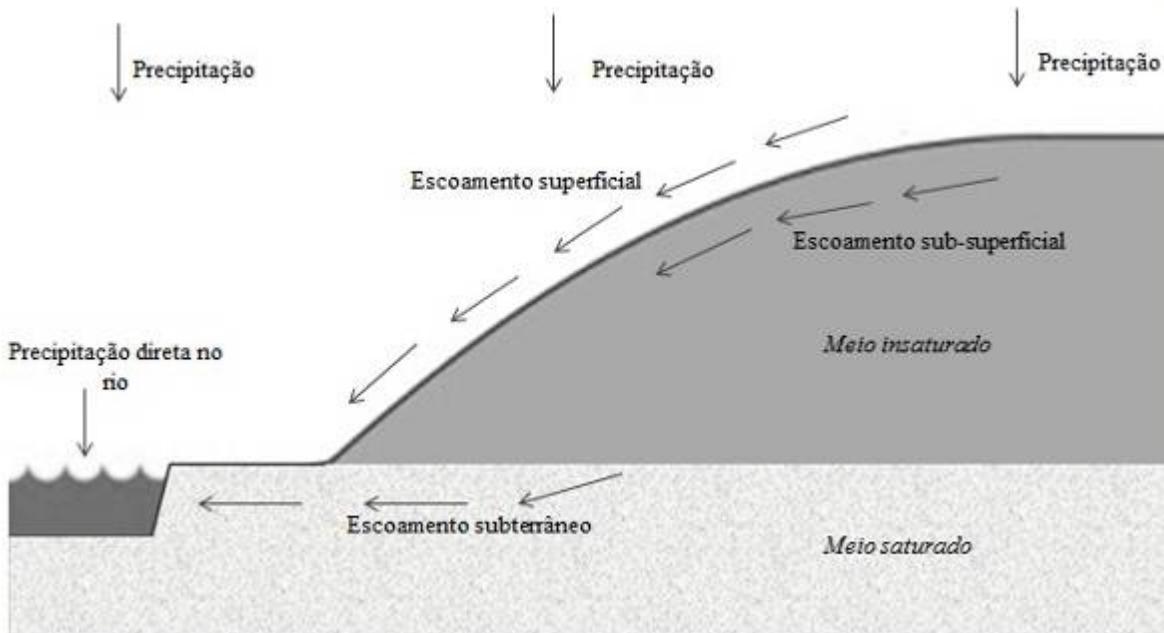
- c) Verificar as diferenças de respostas do TauDEM e do HAND em função de variações nos dados de entrada;
- d) Avaliar estatisticamente as diferenças na delimitação de AVA em áreas urbanas como forma de analisar a qualidade dos parâmetros e modelos envolvidos na definição de AVA.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Áreas variáveis de afluência e mecanismos de geração de escoamento

Como parte do ciclo hidrológico, ocorrem os processos de escoamento nas vertentes. Para descrevê-los, é necessário compreender que a água da chuva segue caminhos distintos na vertente e pode chegar ao curso d'água das seguintes formas: precipitação direta sobre o rio, escoamento superficial, escoamento sub-superficial próximo à superfície, e escoamento subterrâneo profundo, conforme Figura 1. No solo insaturado, a água da chuva pode chegar ao rio por escoamento superficial e sub-superficial e, no solo saturado, nas camadas mais profundas, através do escoamento subterrâneo.

Figura 1 – Visão macroscópica e concentrada dos caminhos preferenciais na geração de escoamento numa vertente



Fonte: A autora.

A teoria proposta por Horton na década de 1930, denominada infiltração-escoamento ou escoamento superficial hortoniano, divide a precipitação em duas partes: em infiltração, quando a água infiltra no terreno e alimenta o lençol freático pelo escoamento subterrâneo,

chegando até os rios; e em escoamento direto, produzido pela água da chuva que escoa diretamente sobre a superfície do terreno proveniente de todas as partes da bacia, ocorrendo toda vez que a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração do solo (MORAES et. al., 2003; WALTER et. al., 2003; ARAÚJO NETO, 2013).

O escoamento superficial hortoniano é considerado dominante em sistemas onde o uso do solo é mais intenso, alterado por ações antrópicas ou compactado por pisoteio de animais, em regiões áridas e semiáridas e, raramente, ocorre em superfícies com densa vegetação em regiões úmidas (CHOW et al., 1994; DE PAULA LIMA, 1996).

Estudos posteriores chegaram a um novo mecanismo de geração de escoamento, as Áreas Variáveis de Afluência (AVA). Nas AVA, a água da chuva infiltra, aumenta o teor de umidade local e retorna à superfície via saturação do perfil do solo, contribuindo para o escoamento superficial, influenciadas pelo fluxo sub-superficial, a precipitação e a umidade inicial do solo, propiciando expansão e contração da porção saturada e da rede de drenagem da bacia (CAPPUS, 1960; TSUKAMOTO, 1963; HEWLETT e HIBBERT, 1967; citados em SANTOS, 2009).

Em definições mais recentes, Lima (2003) e Zakia et al. (2006) afirmam que a área variável de afluência (AVA) corresponde à zona com saturação hídrica da microbacia que tem característica dinâmica devido à expansão e contração, dependendo da quantidade e intensidade das precipitações a qual está sujeita. Nas AVA prevalecem os processos de escoamento superficial de áreas saturadas durante a resposta hidrológica da microbacia a um evento de chuva. Em geral, encontram-se situadas ao longo dos cursos d'água e em suas cabeceiras, nas concavidades de terrenos para as quais convergem as linhas de fluxo e mesmo em porções de áreas saturadas encontradas em pontos elevados de encostas.

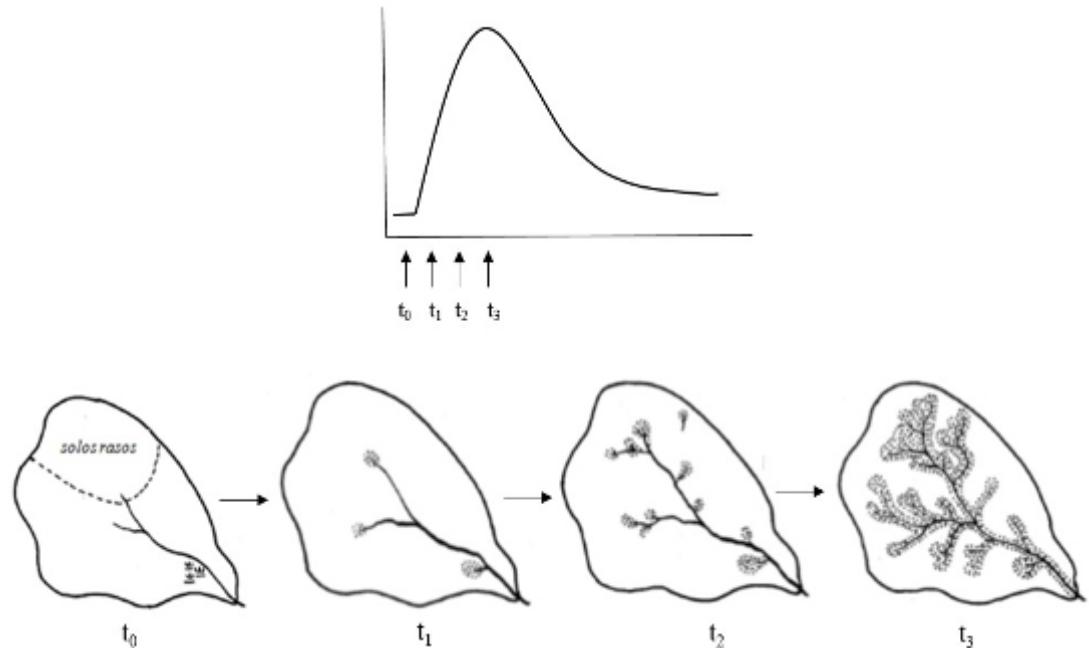
Pereira (2007) considerou as áreas onde há maior formação de fluxo de água superficial e saturação do solo após um evento de chuva em Áreas Variáveis de Afluência (AVA ou índice topográfico e também denominado *Topographic Wetness Index - TWI*). Esta informação representa um elemento importante na avaliação da vulnerabilidade ambiental de determinadas regiões.

A teoria das AVA considera que existem áreas mais propensas à geração de escoamento superficial por saturação, sendo variáveis no espaço-tempo e que tendem a expandir-se e contrair-se de forma sazonal configurando uma parcela de área da bacia com variação entre 1% e 50% da área total (DICKINSON e WHITELEY, 1970) dependendo da quantidade e da intensidade de precipitação. Por esta razão usa-se o termo área variável. Para Dunne (1979, citado em Guimarães, 2000), a extensão desta área estaria condicionada, ao total de precipitação de um evento, às condições antecedentes de umidade e à intensidade da chuva, além das características hidrológicas dos solos e da topografia, sendo que o seu tamanho pode variar entre 5 e 20% da área total da bacia.

Estas áreas da bacia hidrográfica localizam-se primordialmente em duas porções: (a) zonas saturadas que margeiam os rios e cabeceiras de drenagem, as quais se expandem durante os eventos e (b) concavidades do terreno, para as quais convergem as linhas de fluxo. Sendo a extensão e a distribuição das áreas saturadas relacionadas ao padrão espacial dos canais na bacia hidrográfica (ZAKIA, 1998).

Existe um retardo entre a variação das áreas saturadas em uma bacia hidrográfica e os diferentes tempos do hidrograma conforme a Figura 2. Em t_0 , há o início do evento na rede de drenagem perene da bacia; regiões próximas às cabeceiras de drenagem começam a atingir o estado de saturação do solo, em t_1 . Em t_2 , observa-se a formação de canais intermitentes em áreas contíguas aos canais perenes, notadamente nas áreas de planície. E, no momento de pico do hidrograma em t_3 , a bacia hipotética atinge o estado máximo de saturação que poderia ser a zona ripária, configurando uma nova rede de drenagem a partir do escoamento superficial oriundo das áreas saturadas, se o hidrograma correspondesse ao evento de chuva intensa que ocorre uma vez a cada 1 a 3 anos.

Figura 2 – Dinâmica das áreas variáveis de afluência em relação ao hidrograma



Fonte: Chorley (1978). Organizada pela autora.

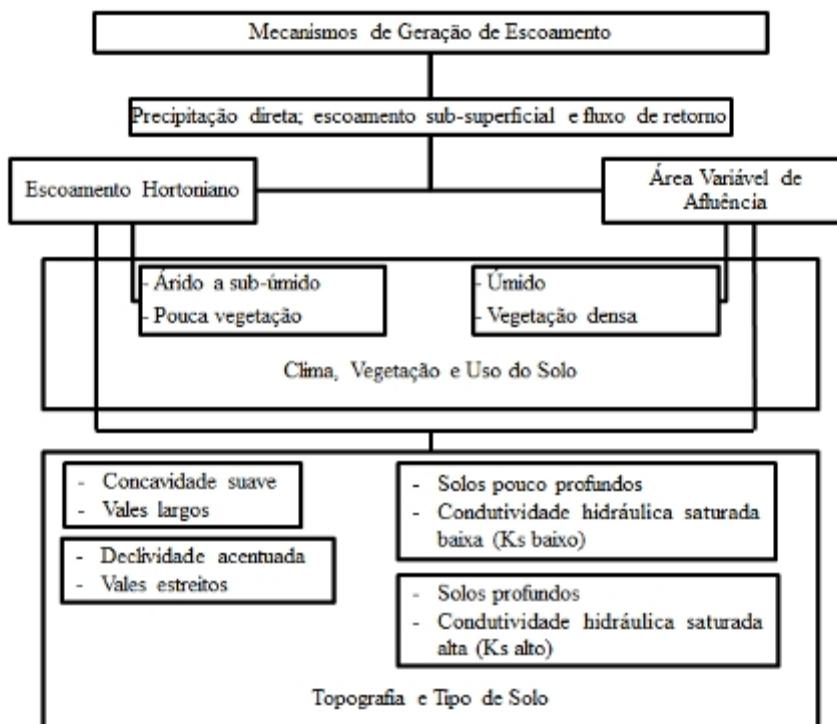
Complementar à teoria da AVA, surge a teoria do escoamento superficial por saturação ou escoamento dunniano, indicando que o escoamento superficial rápido via áreas saturadas é mantido pelo escoamento sub-superficial oriundo da vertente a montante (SANTOS, 2009). O escoamento por saturação é produzido pela precipitação direta sobre as áreas saturadas e também pela contribuição subterrânea do escoamento de retorno, resultante do afloramento da superfície freática (LUIZ, 2003).

O conhecimento dos mecanismos de geração de escoamento é complexo, pois varia no espaço-tempo e possui relação com três fatores que determinam o comportamento da água na paisagem: (a) clima, (b) solo e geologia, (c) vegetação, acrescentando-se ainda a topografia com um papel determinante na movimentação da água na paisagem e também na localização das áreas variáveis de afluência a partir do deslocamento da umidade na vertente no sentido de jusante. Desta forma, a combinação destes fatores irá determinar a dinâmica da umidade do solo, evapotranspiração e a geração de escoamento (BECKER, 2005; WAGENER et. al., 2010 citados em SIEFERT, 2012).

Para elucidar esta interação com os mecanismos de geração de escoamento, um modelo conceitual foi proposto por Dunne (1978), em que os últimos variam de acordo com a

topografia, as propriedades do solo e características das chuvas e, indiretamente, com clima, vegetação e uso da terra, sendo que mesmo o processo dominante que ocorre na bacia pode variar de acordo com as características da chuva. O escoamento hortoniano é mais comum em terras áridas e semiáridas, ou em áreas úmidas, onde a vegetação original e estrutura do solo foram removidas. A ocorrência espacial e temporal dos outros mecanismos de geração de escoamento ainda é menos compreendida, mas a Figura 3 indica esquematicamente a relação destes e os seus controles principais.

Figura 3 – Mecanismos de geração de escoamento e condicionantes naturais



Fonte: Dunne (1978). Organizada pela autora.

Porém, as abordagens distintas dos mecanismos de geração de escoamento desenvolvidas após 1980 são complementares e não substitutas às teorias propostas por Horton na década de 1930, Hewlett, nos anos de 1960 e Dunne, na década de 1970, sendo consideradas como uma mudança de escala na análise dos processos hidrológicos que irão determinar a produção de escoamento superficial em bacias hidrográficas.

Devido à importância dos conceitos de AVA e dos processos de escoamento superficial e sub-superficial, propostas de utilização das áreas saturadas como indicadores para a

delimitação de *buffers* de preservação em bacias hidrográficas estão sendo estudadas (QIU, 2003; AGNEW et al., 2006; GORSEVSKI et al., 2008; QIU, 2009; WALTER et al., 2009 citados em SIEFERT E SANTOS, 2012). Nesta mesma linha, no Brasil destacam-se as abordagens relacionando as áreas variáveis de afluência com a zona ripária e áreas de preservação permanente a partir de modelagem hidrológica (ZAKIA, 1998; SANTOS, 2001; ATTANASIO et al., 2006; SIEFERT e SANTOS, 2010; SIEFERT e SANTOS, 2012; SILVA, 2012; SANTOS, 2013).

2.2 A vegetação e o escoamento superficial

Nas AVA deveria ser priorizado o uso e ocupação do solo com manejo que atendesse a estas áreas, preferencialmente, com vegetação. A vegetação natural associada às margens de cursos d’água recebe diversas denominações. É tratada como floresta ciliar, entendida como sinônimo de mata ciliar; como floresta ou mata de galeria; vegetação ripária, floresta ripícola ou ciliar, floresta de condensação, mata aluvial, floresta paludosa ou de várzea, floresta de brejo, formação ribeirinha, dentre outras denominações (MEDEIROS, 2013).

Kobiyama (2003) conclui que o termo zona ripária é mais adequado para chamar esse espaço próximo a corpos d’água em bacias hidrográficas, definido com um espaço tridimensional contendo vegetação, solo e rio. Sua extensão horizontal é definida pelo alcance da inundação, e verticalmente do regolito (limite inferior) até o dossel da vegetação (limite superior).

A definição do termo ripário permite a abrangência, não apenas da vegetação relacionada ao corpo d’água, mas também daquela localizada nas suas margens. A expressão vegetação ripária seria mais adequada se aplicada a qualquer vegetação da margem (MEDEIROS, 2013). Este termo não abrange somente os corpos d’água naturais, mas também aqueles criados pelo homem, como as represas, por exemplo, incluindo qualquer tipo de vegetação (SOUZA, 1999). Por se entender que este conceito é mais amplamente difundido na literatura e de maior aceitação, nesta pesquisa, será adotado o termo vegetação ripária.

A zona ripária não é apenas constituída da largura de faixa, considerada APP, mas é todo um ecossistema chamado de ecossistema ripário. Porém, a legislação brasileira determina

que os locais de vegetação ripária estejam na largura que compreende a distância horizontal perpendicular ao rio, medida a partir da calha delimitada pela maior cheia sazonal (KOBAYAMA, MOTA e CORSEUIL, 2008) no antigo Código Florestal e, no atual (Lei 12.651/12) delimitada desde a borda da calha do leito regular. Desta forma, são desconsideradas as características hidrológicas (infiltração, escoamento superficial e sub-superficial, evapotranspiração, transporte e deposição de sedimentos), características topográficas e pedológicas, o uso e ocupação do solo, dentre outros fatores e processos que ocorrem na bacia hidrográfica.

A vegetação ripária deve estar localizada nas áreas mais sensíveis da bacia, como nas margens da rede hidrográfica, ao redor de nascentes e áreas saturadas, tanto diminuindo a ocorrência de escoamento superficial, que pode causar erosão, arraste de nutrientes e de sedimentos para os cursos d'água e enchentes, quanto desempenhando um efeito de filtragem superficial e sub-superficial da água que flui para os canais (KUNKLE, 1974).

Perante o exposto, deve-se incluir nos planos de manejo, além da largura de faixa, as AVA, garantindo a plena funcionalidade do ecossistema ripário, pois são áreas que não necessariamente coincidem com a zona ripária, mas devido à propensão de atingirem o estado de saturação hídrica do solo, o escoamento superficial é dominante. Por esta razão, é imprescindível que estas áreas estejam adequadamente protegidas com cobertura vegetal.

Quando presente, esta vegetação garante a preservação dos meandros nos rios, diminuindo a velocidade do escoamento e consequentemente, diminuindo a erosão, aumentando a infiltração da água no solo durante as inundações. Também, por infiltração, diminuem a quantidade de água que chega ao rio. Desta forma, a quantidade de água transbordada é menor (diminuição do pico de cheia) e em consequência, os danos causados (FRY, STEINER e GREEN, 1994 citado em GUIMARÃES, 2012). Entretanto, a ação protetora de cada espécie vegetativa diverge devido as suas características próprias, pois a densidade de vegetação sobre o solo e o tamanho da copa das árvores se altera em relação ao tipo de cobertura vegetal (MAFRA, 2012).

A serapilheira, camada de matéria orgânica que fica depositada na superfície sob as florestas e que garante a permeabilidade e umidade do solo, fundamental para a

manutenção das matas em boas condições ecológicas, juntamente com as folhas da vegetação e os troncos das árvores, têm papel primordial na interceptação e amortecimento do impacto das gotas das chuvas. Também, retêm os resíduos e possibilitam a percolação das águas, que assim irão recarregar as águas sub-superficial, manter a umidade e fertilidade do solo, pela presença de matéria orgânica, além de aumentar a sua porosidade e a permeabilidade, por meio da ação das raízes (HERZOG, 2008).

Dentre os danos causados pela inexistência da vegetação ripária, têm-se aqueles oriundos da urbanização, com suas edificações, pavimentação de ruas, calçadas e a consequente remoção da cobertura vegetal original do ambiente, gerando uma mudança na permeabilidade natural da bacia hidrográfica. Devido a esta impermeabilização, há uma redução na infiltração da água precipitada, acarretando em um aumento acentuado no escoamento superficial de águas pluviais. Segundo Silveira (2002), isso acarreta em maior volume de água para drenagem, acelerando os escoamentos, favorecendo o acúmulo de água em pontos de saturação, provocando inundações nestes locais.

Checchia (2003) afirma que a retirada da vegetação de zonas ripárias aumenta os danos do impacto de eventos de chuva na bacia hidrográfica. Após a precipitação, a água alcança o curso do rio com grande velocidade, pois não existem as regiões de armazenamento proporcionadas pela vegetação ripária. A água precipitada, que geralmente alcançava o curso do rio por escoamento subsuperficial, escoamento subterrâneo e escoamento superficial, passa a se deslocar predominantemente por escoamento superficial. Com o transbordo da calha do rio em áreas desflorestadas e, portanto, desprotegidas, ocorre a erosão laminar e perda de solo fértil, que será depositado no leito do curso d'água, reduzindo sua profundidade e aumentando a probabilidade de enchentes.

O escoamento superficial direto ocorre de forma concentrada em poucos pontos no espaço urbano, enquanto que na área rural é difuso. Nas cidades, isto se dá em função do direcionamento do fluxo de água para as galerias de águas pluviais, provocando assoreamento nos fundos de vale, depósito de lixo e esgoto, inundações, erosão das margens e queda de taludes (TUCCI, 2005a).

Neste sentido, a delimitação da vegetação ripária em áreas variáveis de afluência, considerando as características hidrológicas, topográficas, uso e ocupação do solo é uma proposta que serve como subsídio ao gerenciamento de microbacias urbanas no tocante à problemática das enchentes e preservação dos recursos hídricos.

2.3. Modelagem hidrológica de sistemas ambientais

Tucci (2005b) cita que a modelagem é uma ferramenta útil na ciência que permite, através da equacionalização dos processos: (a) representar, (b) entender e (c) simular o comportamento de uma bacia hidrográfica. De uma maneira geral, os modelos são extremamente úteis no sentido de proporcionarem o embasamento de evidências para suportar, rejeitar ou desafiar concepções estabelecidas sobre o funcionamento dos sistemas ambientais. Assim, demonstram um enorme potencial em estudos de sistemas ambientais visando compreender, em uma escala de detalhe, o funcionamento e evolução da natureza.

A utilização de modelagem hidrológica para determinação das AVA permite estimar o escoamento superficial dentre outros aspectos hidrológicos, auxiliando o monitoramento dos serviços ecossistêmicos prestados.

Alguns trabalhos utilizam os conceitos de áreas variáveis de afluência (ZAKIA, 1998; ZAKIA et al., 2006) e áreas hidrologicamente sensíveis (SIEFERT e SANTOS, 2010; SIEFERT e SANTOS, 2012; SIEFERT, 2012), entretanto não foram encontradas pesquisas que utilizem conceitos de modelagem hidrológica distribuída na determinação de AVA. A maioria dos trabalhos utiliza modelos hidrológicos empíricos e semidistribuídos, avaliando cenários de alteração de uso no solo (BALDISSERA, 2005; MELLO; LIMA e SILVA, 2007; LINO et al., 2009; VIANA e DORTZBACH, 2009, citados em SILVA, 2012), porém sem a espacialização dos processos hidrológicos.

Siefert (2012) cita diversos modelos amplamente utilizados no sentido de modelagem matemática da umidade no perfil do solo e da dinâmica do processo de área variável de afluência, como por exemplo: CLASS (*Catchment Scale Multiple-landuse Atmosphere Soil Water and Solute Transport Model*), SMR (*Soil Moisture Routine*), SWATWB (*Soil and Water Assessment Tool – Water Balance*), TOPOG (*Topography Model*), TOPMODEL

(*Topography Based Hydrological Model*) e versões modificadas do TOPMODEL como AVTOP, STOPMODEL e TOPSIMPL. Abaixo, segue uma sucinta descrição dos modelos:

- CLASS – O *Catchment Scale Multiple-landuse Atmosphere Soil Water and Solute Transport Model* é um modelo distribuído concebido para detectar os efeitos hidrológicos da mudança do uso do solo e da variabilidade climática, no movimento da água e dos solutos nas vertentes de bacias hidrográficas. No entanto, em escala de bacia hidrográfica requer uma abordagem de modelagem computacional exigente e também considerável habilidade para aplicar e interpretar os resultados do modelo (EWATER TOOLKIT, 2014).
- SMR – O *Soil Moisture Routine* é utilizado no cálculo do balanço hídrico, evapotranspiração e escoamentos superficial e sub-superficial. Diversos trabalhos utilizaram o SMR para a definição das áreas variáveis de afluência e planejamento integrado de microbacias (JOHNSON et al., 2003; MEHTA et al., 2004; AGNEW et. al, 2006; BROOKS; BOLL; McDANIEL, 2007, citados em SILVA, 2012). Porém, é um modelo restrito às bacias hidrográficas com solos rasos (ZOLLWEG, GBUREK e STEENHUIS, 1996), que apresentam resposta hidrológica de acordo com o modelo teórico proposto por Horton.
- SWATWB – O *Soil and Water Assessment Tool – Water Balance* é um modelo semidistribuído que agrupa os resultados nas unidades de resposta hidrológica (HRUs, do inglês *Hydrologic Response Units*), definidas pela combinação de tipo de solo e uso do solo, incluindo o fator topográfico, que considera a área de contribuição e declividade, sendo utilizado para verificar a dispersão de poluentes.
- TOPOG – O *Topography Model* é um modelo hidrológico distribuído que define regiões de fluxo, a partir de um conjunto de isolinhas, que representam altitude do relevo do terreno. Este sistema é voltado para processamento hidrológico e atributos topográficos, destinado a aplicações em áreas de até 10 Km². Outras dimensões, como hidrodinâmica e hidrografia não são consideradas (ROSIM, 2008).
- TOPMODEL – O *Topography Based Hydrological Model* (BEVEN e KIRKBY, 1979, citado em RENNÓ, 2003) é usado para previsão de vazão em chuvas de curta duração. É possível a utilização para explorar o efeito do tamanho da grade do mapa de terreno digitalizado. O modelo prediz a umidade do solo e a vazão com base na topografia da superfície e propriedades do solo. Uma hipótese crítica do

modelo é que localidades com topografia e propriedades do solo similares respondam identicamente à mesma chuva. Uso ideal para bacias pequenas com solos rasos e que não passem por longos períodos de estiagem.

Após as considerações acima, esta pesquisa selecionou o modelo TauDEM. Esse modelo é gratuito, e se destaca por extrair informações hidrológicas da topografia por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) e também possuir análises mais avançadas, como a identificação das áreas com maior propensão a gerar escoamento superficial, ou seja, as áreas variáveis de afluência. Além de não possuir restrições de uso para microbacias que passem por períodos de estiagem e que tenham solos profundos. E para comparação, o modelo HAND, desenvolvido no Brasil pelo INPA e pelo INPE, que inclui a variável profundidade do solo para o cálculo do índice topográfico de umidade.

2.4. Índice topográfico

O índice topográfico é um parâmetro hidrogeomorfológico, idealizado por Beven e Kirkby (1979, citado por MOTA, GRISON e KOBIYAMA, 2013) e inicialmente testado no modelo hidrológico TOPMODEL. Representa os efeitos do relevo na distribuição espacial e extensão das áreas com maior umidade potencial dentro da bacia hidrográfica, indicando onde pode ocorrer escoamento superficial por saturação (SCHULER et. al., 2000), tendo sido usado em trabalhos como a estimativa de profundidade de lençol freático (RENNÓ e SOARES, 2003; SANTOS, 2009). De acordo com Rennó e Soares (2003) os valores mais elevados do índice topográfico são encontrados na região de maior saturação da bacia, ou seja, local de maior concentração de água no solo.

Os índices topográficos são variáveis morfométricas, ou seja, variáveis que caracterizam numericamente as feições do relevo e são obtidas por meio de análise digital do terreno, podendo ser divididos em primários e secundários. Os índices topográficos primários (ITP) representam as características básicas, como, por exemplo, declividade, orientação da vertente e fluxo acumulado e são calculados diretamente do Modelo Digital de Terreno (MDT), enquanto os índices topográficos secundários (ITS) representam características mais complexas, como, por exemplo, umidade do solo ou potencial erosivo e são calculados por meio da combinação de dois ou mais índices primários (MOORE et al.,

1991). Eles são requeridos nos modelos ambientais, como TOPMODEL, SWATWB e TauDEM como informação necessária para inúmeros procedimentos de cálculo, por exemplo, o uso do aspecto para o cálculo do balanço de energia, ou para representar processos de difícil medição, por exemplo, o uso da declividade e área acumulada para determinar as zonas de saturação de água na paisagem (RICHERSON e LUN, 1980; QUINN, 1995; citados em MINELLA e MERTEN, 2012).

Os ITS têm sido utilizados na modelagem de processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos, para obter informações da discretização espacial de processos que são de difícil medição direta em áreas de grande extensão. Nesta pesquisa será utilizado o índice de umidade do terreno ou índice topográfico de umidade (IT), o qual possibilita a simulação das áreas de afluência variável (zonas saturadas) no relevo. A saturação da superfície do solo ocorre, em geral, nas áreas de convergência do relevo e próximas aos canais de drenagem. Essas zonas saturadas se expandem e se retraem em resposta à precipitação e ao movimento sub-superficial da água de montante.

O método do cálculo do IT reproduz o comportamento hidrológico da microbacia, em especial a dinâmica das áreas de contribuição. O índice topográfico representa o balanço entre a água recebida por uma posição do terreno e a água escoada para os seus vizinhos, possibilitando, em uma superfície contínua, a identificação das AVA. O método considera a influência da topografia do terreno na geração do escoamento superficial, relacionando o fluxo acumulado com a declividade em um determinado pixel (VARELLA e CAMPANA, 2000).

O índice topográfico de umidade (*IT*), apresentado na equação 1, é um atributo secundário, calculado com a área de contribuição específica (A_s) do pixel, dada em metros quadrados e, a declividade do terreno ($\tan\beta$), em graus radianos (QUINN, BEVEN e LAMB, 1995), sendo a expressão definida como:

$$IT = \ln (A_s / \tan \beta) \quad (1)$$

Como área de contribuição específica entende-se aquela associada ao volume de água que atinge o canal principal, quanto maior a área de contribuição específica, maior tente a ser a susceptibilidade a eventos como inundação.

O índice topográfico é considerado mais preciso na determinação de áreas potenciais para infiltração do que a declividade do terreno, pois estabelece uma relação com os pontos altimétricos adjacentes, ou seja, conecta um ponto com o outro de modo a “desenhar” as áreas preferenciais para infiltração enquanto que a declividade apenas determina a inclinação do terreno em relação a dois pontos altimétricos. Um alto valor de índice topográfico significa ser mais provável que o lençol freático esteja próximo da superfície do solo. Consequentemente, as zonas úmidas ocorrerem em áreas com altos valores de índice topográfico (ANDERSSON e NYBERG, 2009).

Outra derivação para o cálculo do índice topográfico de umidade (IT) foi a inclusão da variável profundidade do solo (P) por meio da utilização do modelo HAND (RENNÓ et al. 2008).

Rennó e Soares (2003) em estudo na bacia do rio Corumbataí obtiveram um resultado que demonstrou uma boa relação entre o índice topográfico e as áreas de maior saturação, que naturalmente encontram-se associadas aos canais de drenagem. Agnew et al. (2006) também utilizaram o índice topográfico para identificar as áreas da microbacia propícias a gerar escoamento superficial. Também De Castro (2012) utilizou o índice topográfico na identificação de áreas potenciais para recarga de aquífero na bacia do rio Bacanga, o qual mostrou-se uma ferramenta bastante eficaz, pois correlacionou as características do relevo com as condições de saturação do solo na área de estudo, concluindo que este parâmetro hidrogeomorfológico associado aos aspectos físico-naturais e ao padrão de uso e ocupação do solo é uma ferramenta de grande utilidade na caracterização dos processos hidrológicos e contribui para a elaboração de planejamento e gestão do espaço territorial em bacias hidrográficas.

2.5 O método TauDEM

O programa TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) é um conjunto de ferramentas para a extração e análise de informações hidrológicas da topografia, representada por um Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno, desenvolvido por Tarboton (2014) e instituições cooperadas. O programa é capaz de:

- Desenvolver o Modelo Digital de Elevação (MDE) hidrologicamente corrigido utilizando a abordagem inundações;
- Calcular as direções de fluxo e encostas;
- Calcular a área de contribuição usando métodos simples e múltiplo de direção de fluxo;
- Aplicar diversos métodos para a delimitação das redes de transmissão, incluindo métodos baseados nas formas topográficas sensíveis à densidade de drenagem espacialmente variável;
- Aplicar diversos métodos objetivos para determinação da delimitação da rede de canais com base no fluxo de queda;
- Delimitar as bacias hidrográficas e sub-bacias de drenagem para cada segmento do rio e a associação entre bacias hidrográficas e atributos de segmento para a criação de modelos hidrológicos.

Ainda, possui função especializada para a análise do terreno, incluindo:

- Cálculo da inclinação que é base para AVA ou índice topográfico ou também denominado *Topographic Wetness Index – TWI*;
- Calcula tanto as distâncias do cume e da base do córrego, ambas na horizontal, vertical, ao longo do declive e variações diretas;
- Mapas locais de curvas ascendentes em que as atividades têm efeito sobre a localização das curvas descendentes;
- Avalia a contribuição da curva ascendente sobre o declínio ou atenuação;
- Calcula a acumulação de fluxo onde a captação está sujeita a limitações de concentração;

- Calcula a acumulação de fluxo onde a captação está sujeita a limitações de transporte;
- Avalia a acumulação reversa;
- Avalia áreas potenciais de avalanche.

O TauDEM utiliza o índice topográfico de umidade (IT) que representa índices de similaridade hidrológica em uma bacia hidrográfica (XAVIER, 2007) e é representado pela fórmula:

$$IT = \ln(a/\text{tang}(\beta)) \quad (1)$$

onde: \ln é logaritmo natural de regressão linear, a área de contribuição específica e $\text{tang}(\beta)$ a declividade do terreno, para calcular a AVA na área de estudo.

Estas ferramentas de análise do Modelo Digital de Elevação (MDE) estão divididas em três menus que compõem o programa, são eles (SANTOS et al., 2008):

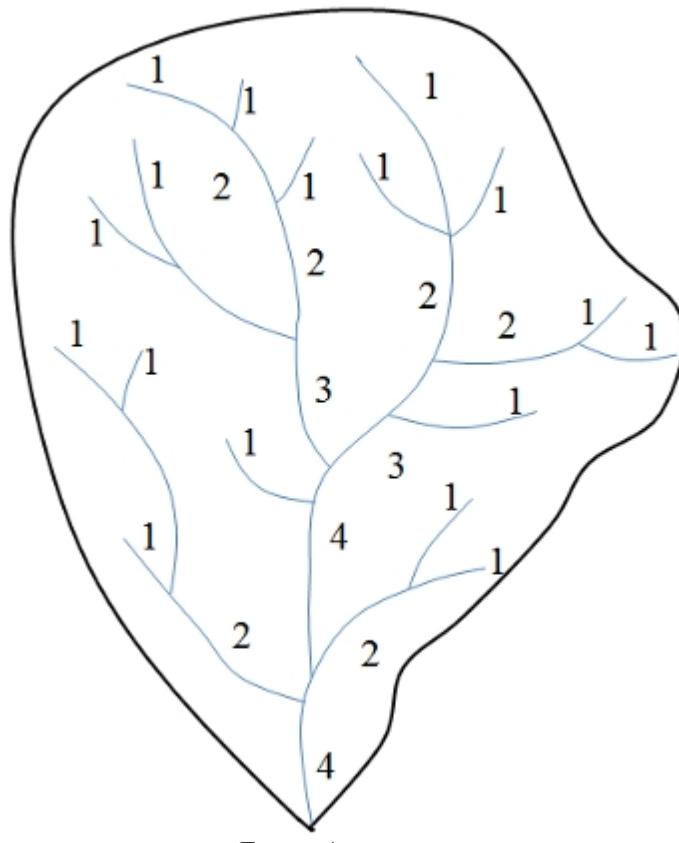
- *Basic Grid Analysis* – Realiza análises básicas da grade, gerando entrada para todas as outras funções, como a delimitação automática da rede de drenagem, através do algoritmo D8 ou D-Infinity;
- *Network Analysis* – Realiza a delimitação, estruturação e hierarquização das bacias e sub-bacias hidrográficas;
- *Specialized Grid* – Contém as análises mais avançadas, como o cálculo das AVA, principalmente aquelas relacionadas à acumulação de água.

Quinn et al. (1991) propõem o modelo hidrológico como fator para refletir a tendência da acumulação da água em pontos da bacia hidrográfica, sendo expressos pela área de contribuição específica (a) e mostrando as forças gravitacionais que movem a água morro abaixo.

Uma das vantagens encontradas na utilização do TauDEM está na possibilidade de delimitação de bacias e sub-bacias baseadas na classificação de Strahler (1952). Segundo este autor, a ordem dos cursos d'água pode ser determinada seguindo os seguintes critérios (Figura 4):

- os menores canais identificáveis são designados por ordem 1;
- onde dois canais de ordem 1 se unem, resulta em um canal de ordem 2 a jusante; em geral, onde dois canais de ordem i se unem, resulta em um canal de ordem $i+1$ a jusante;
- onde um canal de ordem menor se une a um canal de ordem maior, o canal a jusante mantém a maior das duas ordens a ordem da bacia hidrográfica (i) é designada como a ordem do rio que passa pelo exutório.

Figura 4 – Ordem de uma rede de drenagem segundo classificação de Strahler

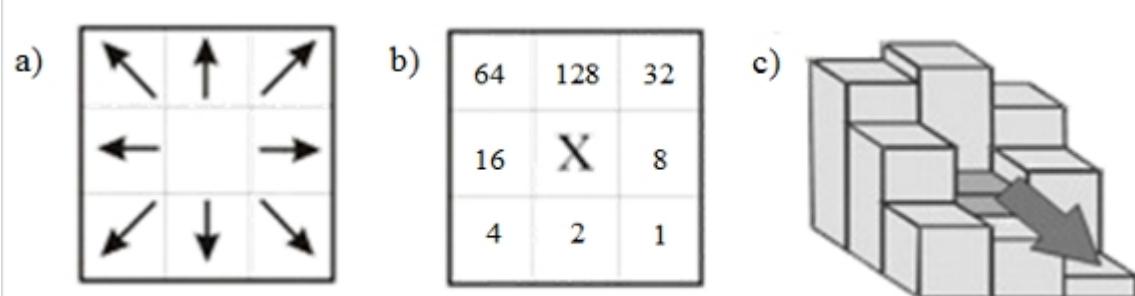


Fonte: A autora.

Já para a delimitação automática de curso d'água é conhecido e consolidado o método D8 (Método das Oito Possíveis Direções de Fluxo) apresentado por O'Callaghan e Mark (1984); porém Tarboton (1997) desenvolveu um outro algoritmo, chamado de D-Infinity (Método da Direção do Fluxo Múltiplo), que tem se mostrado um modelo mais acurado na determinação das drenagens de uma bacia hidrográfica. Ambos determinam a área de contribuição de uma célula a qual corresponde, numa matriz, ao total de área drenada de todas as células a montante, mais a sua contribuição (TEIXEIRA, 2012).

No modelo D8 (Figura 5), criado por O'Callaghan e Mark (1984), a obtenção da direção de fluxo em cada pixel pode ser realizada por procedimentos automatizados, o qual atribui o sentido do escoamento de um pixel para um de seus oito vizinhos com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles. Como resultado, a cada pixel é atribuído um número indicativo de uma das oito direções de fluxo possíveis. Esta metodologia mantém a conectividade do fluxo ao longo do canal estabelecendo uma relação unimodal da direção do fluxo ao longo da rede de drenagem. Essa característica é desejável para a rede de drenagem, cujo fluxo migra, necessariamente, para uma das oito direções, não se dissipando (MENKE et al., 2014).

Figura 5 - Método D8: (a) Direções possíveis de um pixel; (b) Código de direção atribuído para cada pixel ao redor da célula central; (c) Direção do escoamento para a célula com menor cota



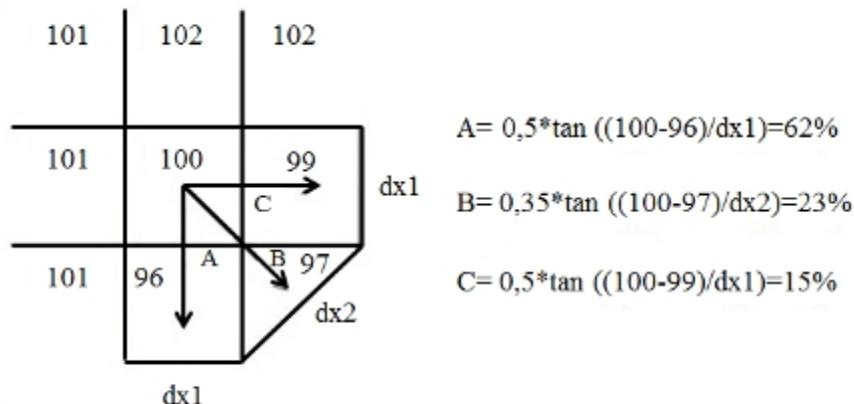
Fonte: Bosquilia et al.(2013), adaptado pela autora.

O método D8 está inserido no SIG, sendo que no programa ArcGIS é representado pelo algoritmo *Flow Direction*, fazendo parte do conjunto de ferramentas do *Hydrology*, do *Spatial Analyst Tools*. Para obter a direção de fluxo basta usar como dado de entrada o MDT em formato *raster*. No SIG, a partir da direção de fluxo, é possível obter o fluxo acumulado, a definição da rede de drenagem, a segmentação da drenagem e a delimitação das bacias. Primeiramente, é preciso encontrar os sumidouros, que nada mais são que depressões ou células com valores muito baixos, por meio da ferramenta *Sink* e, após utilizar a ferramenta *Fill* para preencher estas células. A ferramenta *Fill* também trata as discrepâncias de células com valores muito altos do MDT, os denominados picos. Ambos, sumidouros e picos, geralmente são erros do MDT e por isso necessitam ser corrigidos. Essa correção é realizada através do ajustamento de uma curva *Spline* e a subsequente

avaliação dos pontos fora dessa curva. A partir destas correções, pode-se obter o fluxo acumulado com a ferramenta *Flow Accumulation*, a rede de drenagem, com a ferramenta *Raster Calculator* e a delimitação da bacia, com a ferramenta *Basin*.

No modelo D-Infinity (Figura 6), produzido por Tarboton (1997), e disponível no TauDEM, o algoritmo obtém infinitas possibilidades de direção de fluxo, que supera a limitação do D8, já que este apenas considera uma possibilidade entre as oito vizinhas para a água escoar, ou seja, permite uma melhor simulação da realidade por ser multimodal.

Figura 6 - Método D-Infinity proposto por Tarboton



Fonte: Tarboton (1997)

O D-Infinity calcula as infinitas probabilidades de direções de fluxo da água a partir de facetas triangulares em uma janela de 3x3 pixels. Dessa forma, a distribuição do fluxo é proporcional entre os pixels subjacentes, de acordo com a declividade de cada faceta triangular.

2.6 O modelo HAND

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) foi desenvolvido com a colaboração de pesquisadores brasileiros do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) os quais estruturaram o conceito com base em dados topográficos e hidrológicos (NOBRE et al., 2011) e de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

(INPE) atuantes na modelagem de terrenos, responsáveis pela criação do programa computacional para representar o novo conceito (RENNÓ et al., 2008).

O modelo é capaz de extrair informações hidrologicamente consistentes de uma área, como predizer a profundidade do lençol freático por meio das informações topográficas do MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, da NASA) (RENNÓ et al., 2008; SILVA et al., 2011) consistindo em uma normalização topográfica que utiliza a rede de drenagem como referência para predizer a umidade do solo através de mapas topológicos. Nesse caso, todos os pontos ao longo da rede de drenagem, por serem pontos de referência final de altura, possuem cota zero. O HAND oferece dados topográficos (declividade, posição no relevo, entre outros) e hidrológicos (profundidade do lençol freático, distância para o curso d'água, entre outros), propiciando informações para a alocação de atividades na bacia hidrográfica, indicando os tipos de solos e as suas suscetibilidades ambientais e de uso.

As áreas adjacentes aos cursos d'água geralmente possuem lençol freático superficial, o qual se aprofunda à medida que aumenta o desnível relativo da superfície à drenagem mais próxima, desta forma, o modelo indiretamente descreve os terrenos de acordo com a profundidade do lençol freático. Embora o grid produzido pelo HAND tenda a perder a referência de altimetria ao nível do mar, ele aumenta significativas variações relativas locais de altura (PEREIRA DIAS, 2014), em outras palavras, a altura é determinada em relação ao ponto da rede de drenagem mais próximo, então cursos d'água e lagos possuem cota zero para facilitar a sua identificação.

A distância vertical à drenagem mais próxima está relacionada indiretamente com a profundidade do lençol freático, que por sua vez, indica a disponibilidade da água do solo. Valores pequenos de distância vertical (próximos a zero) indicam regiões cujo lençol está próximo a superfície e, portanto o solo se encontra em condições próximas à saturação, enquanto que valores altos de distância vertical identificam regiões com lençol freático profundo, ou seja, áreas bem drenadas (INPE, 2015).

O algoritmo HAND representa a distância vertical à drenagem mais próxima, a qual está relacionada à umidade presente no solo, devido ao lençol freático. Portanto, uma vez que

haja um relevo ondulado a fortemente ondulado, haverá a predominância de solos bem drenados.

Do contrário, em áreas muito planas, na qual a declividade do terreno não possua variações significativas de altitude, como é o caso da área do estudo onde o relevo apresenta-se plano a suavemente ondulado, áreas dentro da bacia que estão distantes do canal de drenagem também podem ser representadas como zonas de acúmulo de água.

Para o cálculo do índice topográfico de umidade (IT) o modelo HAND acrescentou a variável profundidade do solo (P), no qual a regressão linear da área de contribuição específica (A_s) do pixel, dada em metros quadrados e dividida pela multiplicação entre a declividade do terreno ($\tan\beta$), em graus radianos e a profundidade do solo (P), em metros, representa a AVA (Equação 2):

$$IT = \ln (A_s / \tan \beta \cdot P) \quad (2)$$

2.7 Ferramentas de geoprocessamento

O geoprocessamento é um termo dito guarda-chuva, sob o qual estão abrigadas diversas tecnologias de coleta de dados e análise. Dentre elas, destaca-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG), ferramenta computacional (*software*) criada para armazenamento e manipulação de dados e informações espacialmente distribuídas em um computador. Mais do que um sistema de apresentação e processamento de dados, ele possui módulos para a realização de operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações. Permite a associação de atributos e a realização de consultas, possibilitando a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídas (FERRAZ, 1996).

O que caracteriza um SIG é a integração, numa única base de dados, de informações espaciais provenientes de dados cartográficos, censitários, cadastrais, fotografias aéreas, imagens de satélite, redes e Modelo Digital de Elevações. Oferece mecanismos para combinar essas várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para

consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas temáticos (FROSINI et al. 1999).

Nos últimos anos vem crescendo a utilização dos sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica, em suas diversas vertentes, seja com o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE), para a caracterização de uso e ocupação de bacias ou no uso direto através da modelagem dinâmica (BURROUGH, 1998), permitindo espacializar as características hidrológicas e, ao mesmo tempo, associá-las a um banco de dados, reduzindo assim, significativamente o tempo de análise (SILVA e PRUSKI, 2005).

A aplicação de modelos hidrológicos ao nível de bacias hidrográficas com o auxílio dos SIG pode constituir um avanço quantitativo na caracterização dos parâmetros hidrológicos e no apoio à decisão no contexto da gestão eficiente da ocupação do solo e do uso dos recursos hídricos.

2.7.1 Modelo digital de elevação

O Modelo Digital de Elevações (MDE) é uma representação matemática da distribuição espacial das cotas altimétricas do terreno estudado. A sua geração é feita a partir da interpolação de pontos topográficos ou curvas de nível do terreno, utilizando-se para isso rotinas computacionais apropriadas do SIG (FROSINI et al. 1999).

Segundo Grohmann, Riccomini e Steiner (2008) os termos Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Numérico de Terreno (MNT) devem ser utilizados quando o modelo é produzido a partir de valores de altitude do nível do solo, obtidos, por exemplo, em mapas topográficos (curvas de nível), levantamentos por GPS ou por altimetria a laser (LiDAR). Já o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) deve ser empregado quando for obtido por meio de sinais refletidos e capturados por radar, como o dossel da vegetação e não pelo nível do terreno, como é o caso do SRTM.

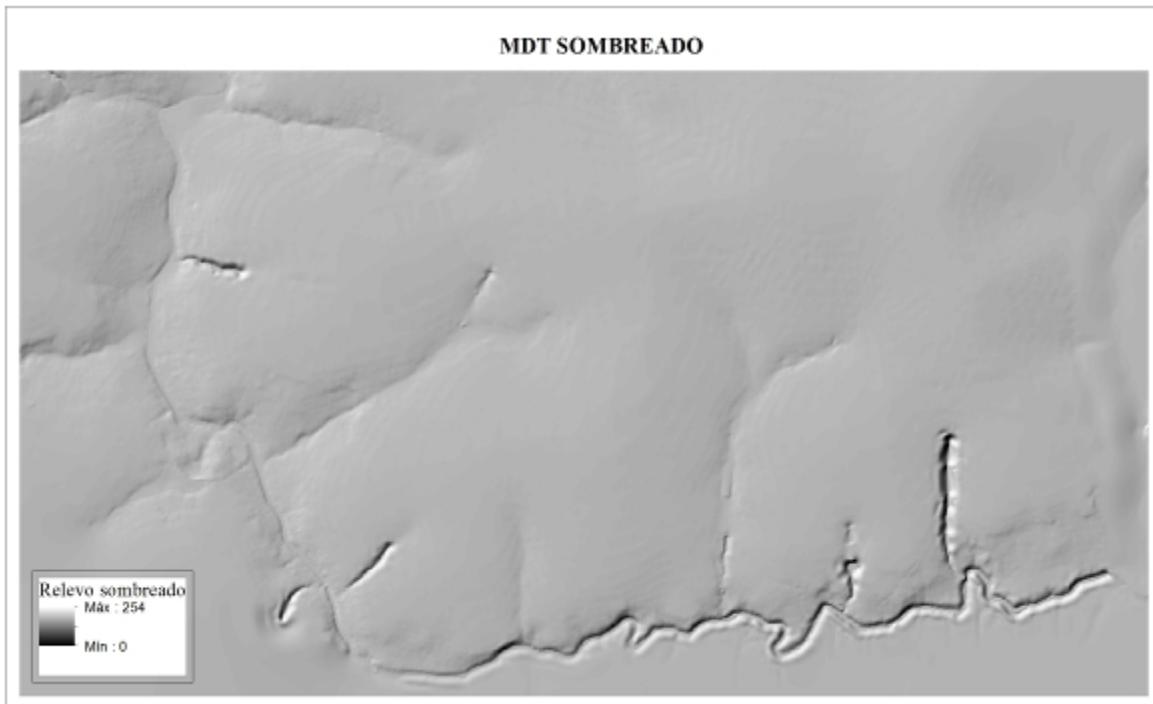
A superfície representada no MDE possibilita, além da visualização tridimensional, também extrair uma série de atributos do terreno importantes na análise das bacias hidrográficas, tais como: rede de drenagem, desniveis, inclinações, comprimento de canais,

orientação de vertentes, direções de fluxo e os limites das bacias e sub-bacias hidrográficas (DOORNKAMP e KING, 1971; MEIJERINK, 1988).

Sua visualização é feita gerando-se imagens em níveis de cinza, considerando o intervalo de espaço de cores entre 0 e 255. A visualização de um MDE em níveis de cinza consiste em distribuir os valores mínimos e máximos das cotas em níveis de cinza entre 0 e 255 linearmente. Assim, cada célula da grade corresponderá a um pixel na imagem de saída e os valores mínimos de cota serão representados por pixels escuros e os valores máximos, por pixels claros (FROSINI et al., 1999).

Segundo os mesmos autores, a geração de uma imagem com sombreamento simulado a partir de um MDE possibilita visualizar as diferenças de relevo no modelo. A imagem sombreada é gerada a partir de uma grade regular sobre a qual é aplicado um modelo de iluminação. O modelo de iluminação determina a intensidade de luz refletida em um ponto da superfície, considerando uma fonte de luz. Esse processo permite que se obtenha uma imagem com o aspecto aproximado que teria uma bacia de drenagem em dadas condições e a exposição ao sol a que ela está sujeita, dependendo da origem da fonte da luz, da reflexão da superfície e do seu ângulo de incidência. Na Figura 7 há a exemplificação de um MDE gerado com sombra.

Figura 7 – MDE sombreado

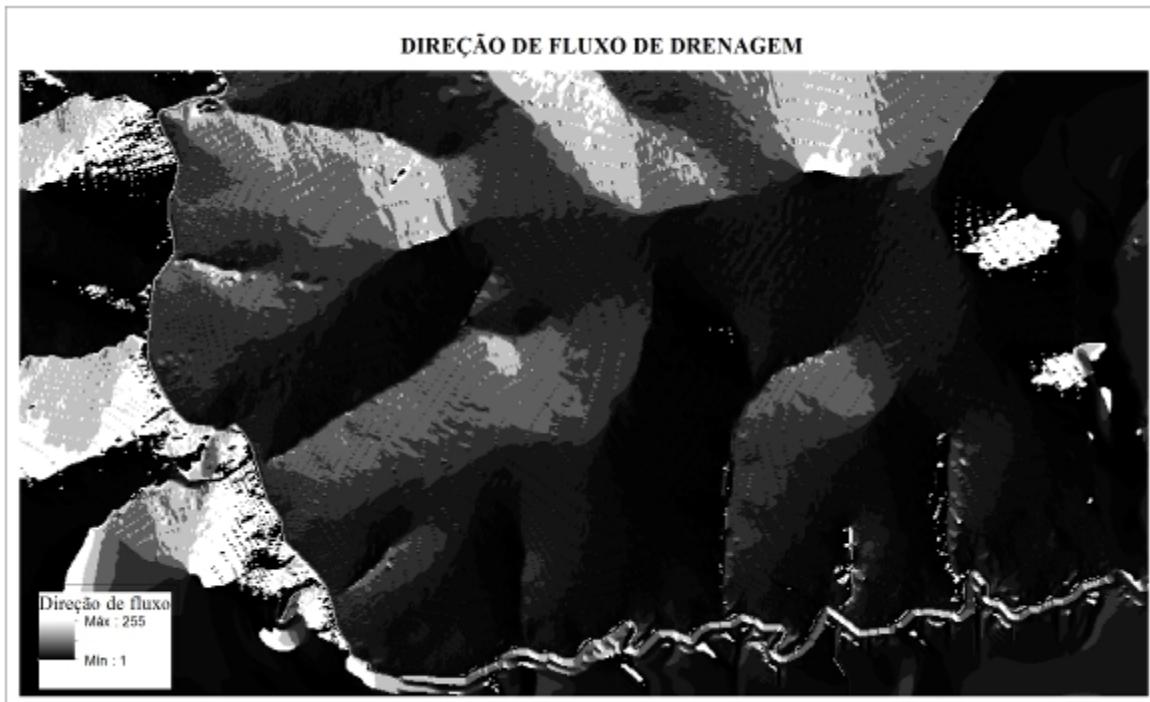


Fonte: A autora.

Para derivar informações de interesse hidrológico a partir do MDE é necessário, primeiramente, a definição de direções de escoamento, das quais pode-se partir para os cálculos de outros parâmetros ou variáveis de interesse hidrológico, como a área de drenagem a montante de cada célula, delimitação de sub-bacias, definição da rede de drenagem, determinação de comprimentos e declividades de trechos de rio, entre outros (BUARQUE et al., 2009).

O delineamento de bacias hidrográficas e sua rede de drenagem é feita a partir de um MDE com a utilização do modelo D8 ou D-Infinity, ambos já comentados. Assim, dado o MDE de uma área, é possível determinar-se para cada célula a direção de fluxo que a água assumirá, gerando-se uma imagem de direções de fluxo. Os canais são identificados como linhas de células, cuja acumulação de fluxo excede um número específico de células. Computando-se o número de células acima de uma célula qualquer na rede de drenagem, determina-se o fluxo acumulado naquela célula (FROSINI et al. 1999). A Figura 8 exemplifica as direções de fluxo de uma rede de drenagem extraída a partir do MDE.

Figura 8 – MDE com as direções de fluxo da rede de drenagem

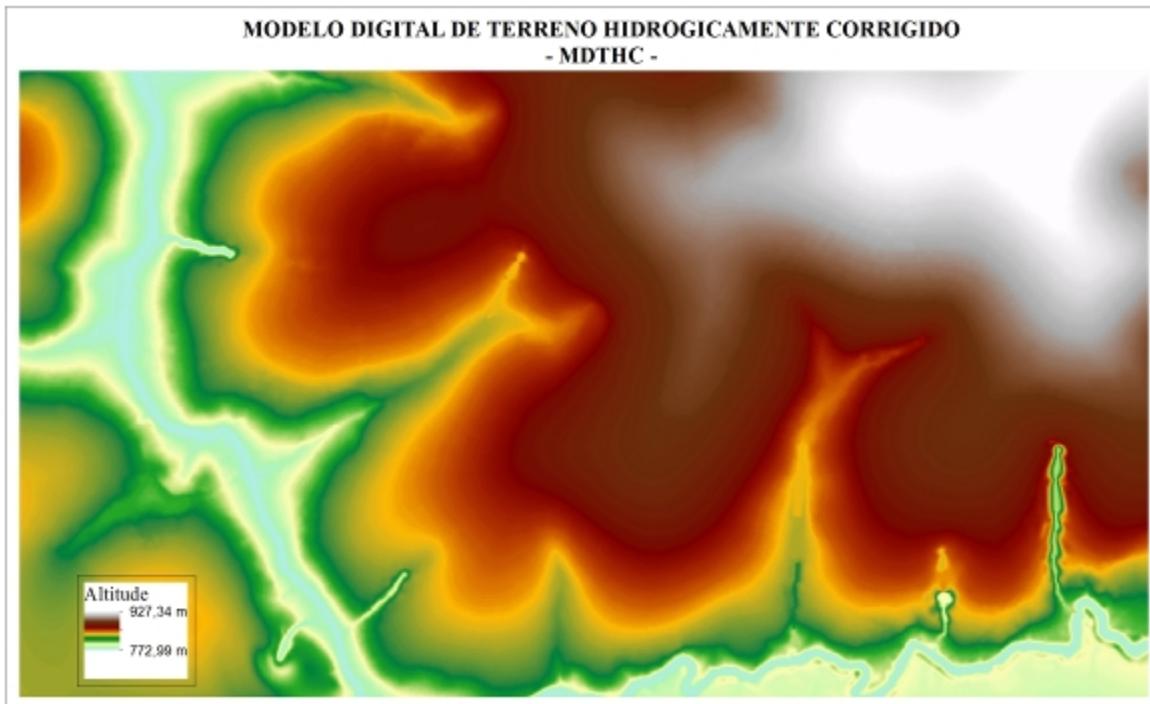


Fonte: A autora.

Para que um modelo apresente resultados satisfatórios sobre a realidade a ser modelada, há a necessidade de que haja um MDE com boa resolução de detalhes (RAMOS, et. al., 2003). Xavier (2007) recomenda que a qualidade de resolução mínima deva ser de 50 metros para cada célula.

Para estudos hidrológicos, foi proposto por Hutchinson (1989) o Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Corrigido (MDTHC), conforme exemplificado na Figura 9, sendo um algoritmo que, através de interpolação por diferenças finitas, além das curvas de nível e pontos cotados, utiliza as características da drenagem, as direções dos fluxos, elimina dados falsos de depressões ou elevações do terreno para gerar o MDE.

Figura 9 – Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Corrigido



Fonte: A autora.

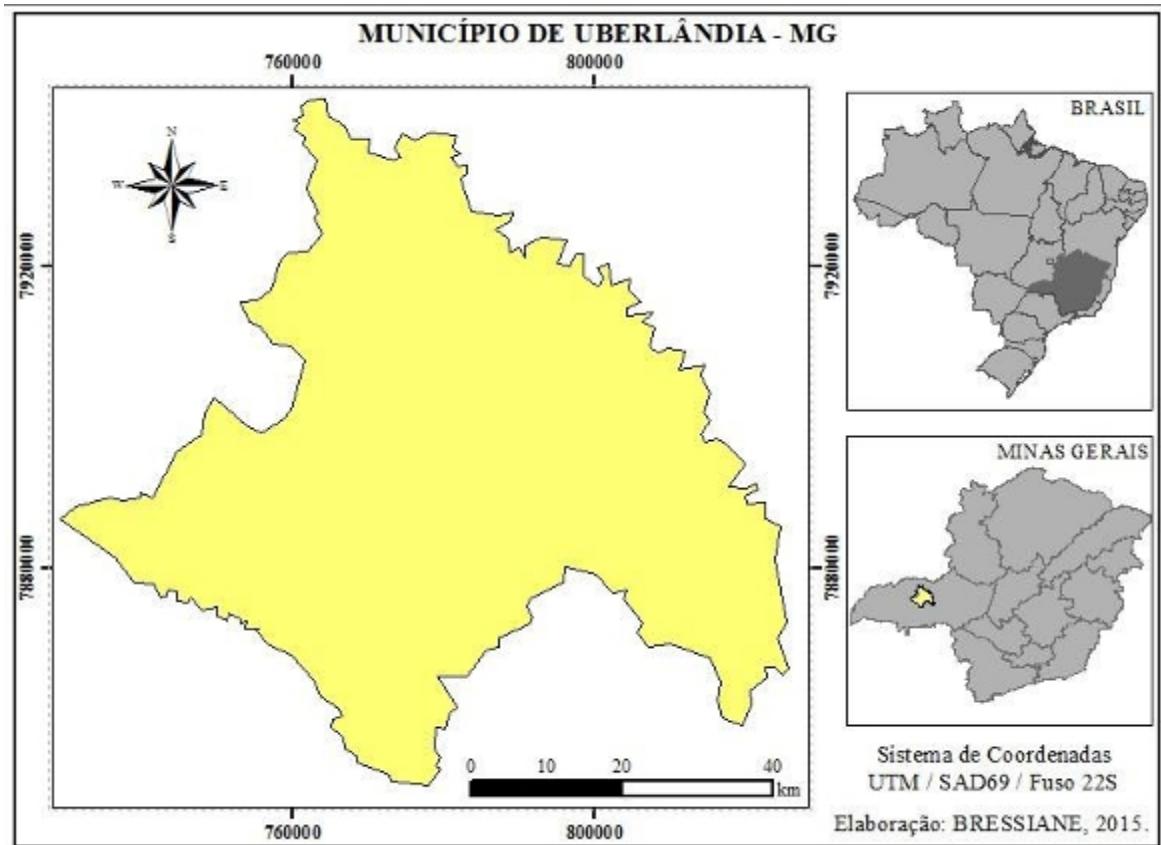
O SIG possui algoritmos para a obtenção do MDE e do MDTHC. Um destes algoritmos é a ferramente *Create TIN*, na caixa de ferramentas *3D Analyst Tools* do ArcGIS. O TIN, ou a Grade Irregular Triangular é obtida através de um conjunto de curvas de nível, que interpoladas formam uma rede de triângulos interconectados, tendo os nós como pontos originais, no qual cada célula da grade representa a altitude da superfície em um dado local com pontos de valores x, y e z. Para a obtenção do MDTHC no ArcGIS, utiliza-se a ferramenta *Topo to Raster*, pertencente à caixa de ferramentas *Spatial Analyst Tools*, em *Interpolation*, cujas entradas são dados vetoriais de curvas de nível, pontos cotados, cursos de rios e limites de bacias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O município de Uberlândia está localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, conforme Figura 10, compreendido pelas coordenadas geográficas $18^{\circ} 5'23''$ Sul e $48^{\circ} 17'19''$ Oeste, com $4.115,206\text{ km}^2$ de área de abrangência e estimativa de 654.681 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014). O município faz limites com os municípios de Araguari, Indianópolis, Monte Alegre de Minas, Prata, Tupaciguara, Uberaba e Veríssimo.

Figura 10 – Mapa de localização do município de Uberlândia, MG

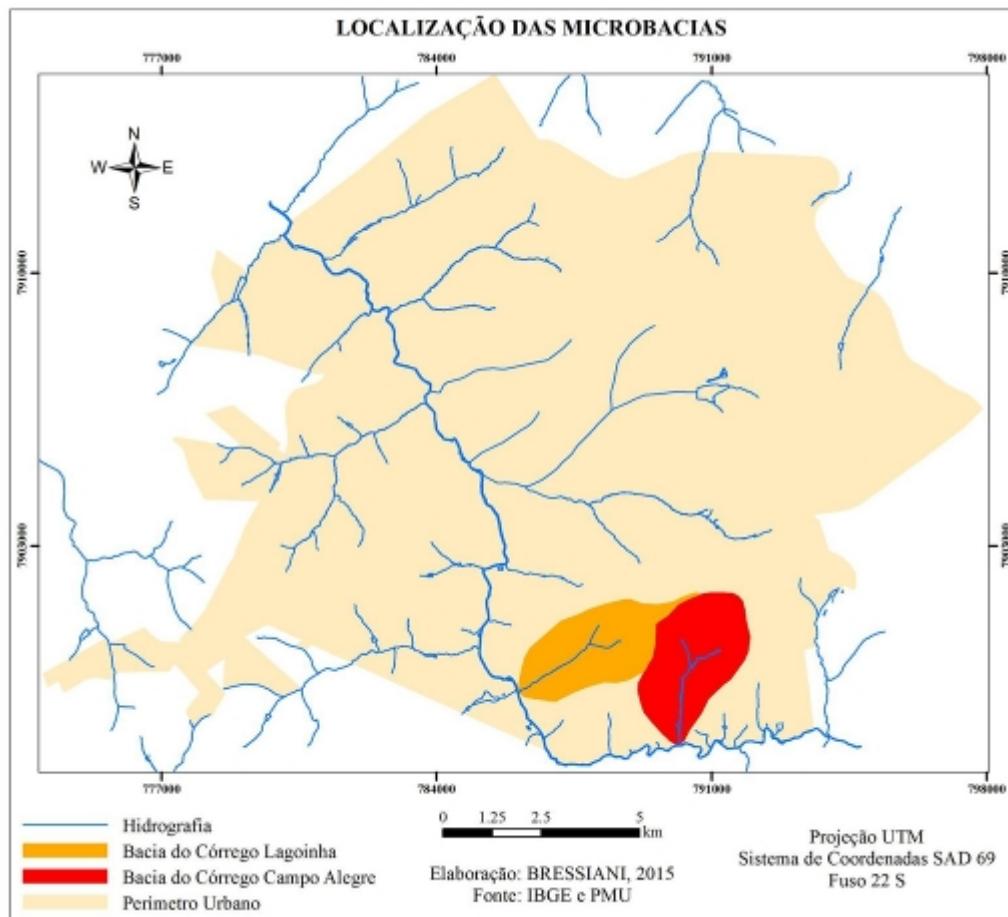


Fonte: A autora.

A área de estudo está situada na microbacia do Córrego da Lagoinha, o qual localiza-se no setor sul do perímetro urbano de Uberlândia, e contempla uma área de 608,4 ha, com

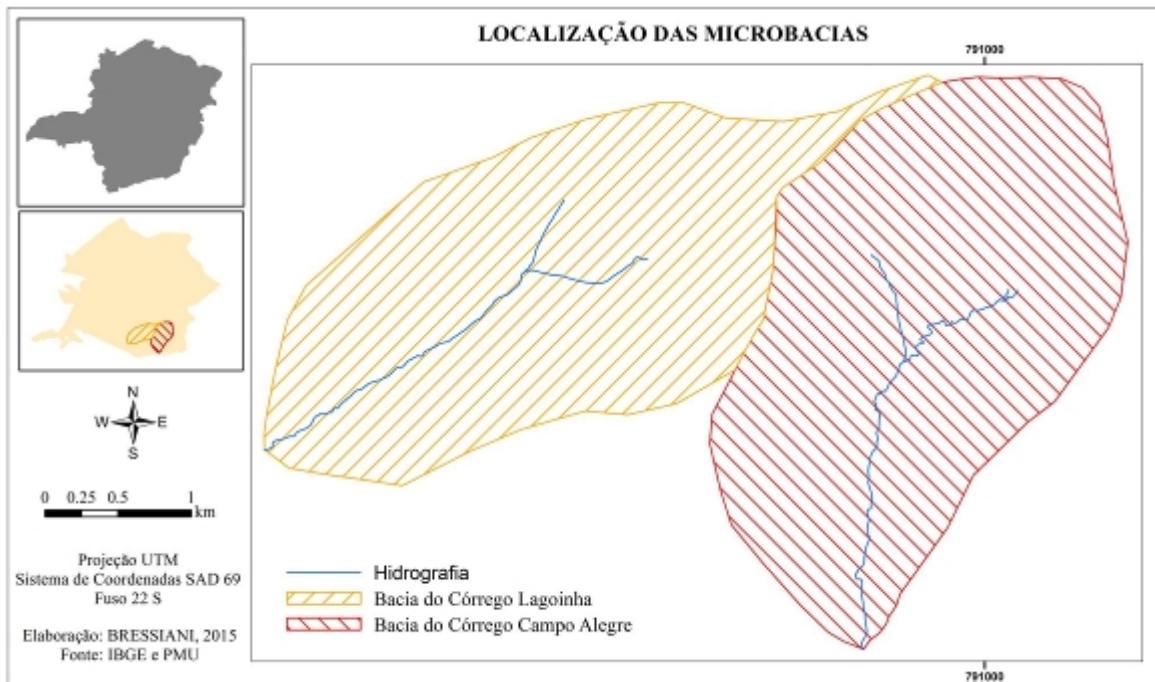
comprimento do canal de aproximadamente 3 Km, onde estão inseridos os bairros Shopping Park e Gávea Sul. A escolha da área foi devido a esta região do município possuir muitas nascentes e estar em processo de expansão, sendo o setor sul o que mais cresce na cidade e pelo fato da disponibilidade dos dados da bacia com relação a levantamento topográfico e imagens, imprescindíveis para a modelagem. Para verificação da sensibilidade dos modelos, outra microbacia foi selecionada, estando localizada no setor sul da cidade, com área de 765,5 ha e canal com aproximadamente 2,9 Km e denominada de área teste, com menor área impermeabilizada, visando a comparação dos resultados entre as diferentes microbacias, ao norte está localizado o bairro Laranjeiras. As Figuras 11 e 12 demonstram a localização da área de estudo no perímetro urbano de Uberlândia e com maior nível de detalhes das microbacias selecionadas, respectivamente.

Figura 11 – Mapa de localização da área de estudo na cidade de Uberlândia, MG



Fonte: A autora.

Figura 12 – Mapa de localização das microbacias



Fonte: A autora.

O relevo do município de Uberlândia, de acordo com Ab'Saber (1971), faz parte de um conjunto de formas denominado Domínio dos Chapadões Tropicais do Brasil Central. Baccaro (1994) ressalta, também, que os processos morfoclimáticos do Terciário e do Quaternário propiciaram extensas pediplanações, pedimentação, laterização e dissecação, constituindo as características de relevo atualmente apresentadas. Segundo a PMU (2009), as altitudes variam entre 650 e não chegam a 1.000 metros, sendo a altitude média do município de Uberlândia, fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 863m estando sustentada pelo basalto da Formação Serra Geral, formando patamares estruturais com rupturas de declive acentuadas. Baccaro (1989) definiu as seguintes unidades morfológicas para o município de Uberlândia: a) área de relevo dissecado; b) área de relevo intensamente dissecado; c) área de cimeira com topos planos e largos.

Em sua porção sul, a altitude varia de 700 a 900m e apresenta relevo típico de chapada (relevo suavemente ondulado sobre formações sedimentares, apresentando vales espaçados e raros). Os solos são ácidos e pouco férteis, tipo Latossolo Vermelho Amarelo, Argiloso-Arenoso.

Durante a década de 1980, segundo Baeninger (1992) ocorreu uma mudança no crescimento populacional brasileiro, em Uberlândia ocorreu um acréscimo de 52,19% na população, enquanto a população total do Brasil cresceu 22,81% (IBGE, 1980 e 1991). Segundo dados do IBGE, Uberlândia possui atualmente uma população estimada de 654.681 habitantes. Desse total, a maior parcela (97%) reside na área urbana. Se mantida a taxa de crescimento populacional de 3,59% ao ano, pode-se inferir que em 2025 o município terá uma população de mais de um milhão de habitantes (ALVES DA SILVA et al., 2013).

Segundo Da Silva e Ribeiro Filho (2012), em meio ao contexto de descentralização urbana da área central de Uberlândia, a zona Sul recebe uma parte da população que agrupa cerca de 14% da população da cidade (DA SILVA e RIBEIRO FILHO, 2012). De acordo com o último censo, a população chegou a 0,15 hab./km², com um déficit habitacional em torno de 15 mil residências. Atualmente, 76% da área do perímetro urbano está ocupada e, de acordo com a Secretaria Municipal de Planejamento, se o crescimento habitacional continuar no mesmo ritmo até 2023, serão necessárias adaptações na expansão das delimitações urbanísticas do município (ALVES DA SILVA et al, 2013). Ressalta-se que a expansão mais expressiva do perímetro urbano está ocorrendo em direção à porção sul.

A área do município, de acordo com Baccaro (1994), insere-se nas Chapadas Sedimentares da Região do Triângulo Mineiro, as quais foram esculturadas em rochas sedimentares, em especial, do Grupo Bauru, com destaque para os arenitos das Formações Marília, Adamantina e Uberaba, e da Formação Botucatu do Grupo São Bento. É importante destacar, ainda, que os entalhes mais profundos, como do Paranaíba e Araguari, atingem o embasamento Pré-cambriano, representado principalmente pelos xistos e serecita, xistos do Grupo Araxá.

A bacia do Rio Uberabinha se destaca na hidrografia de Uberlândia, sendo um dos mananciais de abastecimento de água para a população, agricultura e indústrias. Com aproximadamente, 145 km de extensão e área total da bacia de aproximadamente 1400 km², o Rio Uberabinha nasce em Uberaba e perpassa todo o município de Uberlândia, desaguando no Rio Araguari.

A vegetação de Uberlândia é predominante, de forma geral, no Domínio Natural dos Cerrados, com mata mesofítica (de galeria e de encosta) e mata xeromórfica (Cerradão), diversos tipos savânicos, como o campo cerrado e o campo sujo, além das Veredas. Cabe ressaltar a importância da vereda para a caracterização do cerrado. A vereda é a fitofisionomia com a palmeira arbórea *Mauritia flexuosa* emergente, em meio a agrupamentos mais ou menos densos de espécies arbustivo-herbáceas. As veredas são circundadas por campo limpo, geralmente úmido onde os buritis caracterizam-se por altura média de 12 a 15 metros e a cobertura varia de 5 a 10 %. As veredas são encontradas em solos hidromórficos, saturados durante a maior parte do ano. Nas cidades de forma geral e, especificamente em Uberlândia, as áreas de vereda são recorrentemente degradadas causando profundos desequilíbrios ambientais (SCHIAVINI e ARAÚJO, 1989).

Os latossolos vermelho-escuros álicos associados às áreas geológicas do Grupo Bauru (Formações Adamantina, Uberaba e Marília) predominam no Triângulo Mineiro e município de Uberlândia (EMBRAPA, 1982; BACCARO, 1990), coincidindo genericamente com a área de relevo dissecado. Outra grande porção é constituída pelo Latossolo vermelho-escuro distrófico, o qual ocupa uma grande área do médio curso da bacia do rio Uberabinha. Já o latossolo Vermelho-amarelo álico aparece principalmente nas porções mais altas do Município, ou seja, nas cabeceiras e topos interfluviais dos Rios Uberabinha e Bom jardim. O latossolo Roxo distrófico e eutrófico surgem nas vertentes e interflúvios do baixo curso do Rio Uberabinha e nas médias e altas bacias dos afluentes do Rio Araguari.

O clima predominante em Uberlândia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, megatérmico, com épocas sazonais bem definidas (BACCARO, 1994). Caracterizado pela alternância de duas estações, bem definidas: uma seca, com longo período de estiagem, que vai de março a outubro e outra chuvosa, que se estende de novembro a fevereiro. A precipitação atmosférica média de Uberlândia gira em torno de 1500 mm/ano, sendo que os meses mais chuvosos são dezembro e janeiro, representando cerca de 40% da precipitação média anual. Os meses menos chuvosos são junho e julho (DEL GROSSI, 1991).

A cidade é atingida por massas de ar oriundas do sul como a Frente Polar Antártica (FPA) e a Massa Polar (MP), leste (ondas de leste) e oeste (instabilidade tropical). Também sofre a influência das Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que são responsáveis pelas chuvas intensas e prolongadas. A FPA influencia a ZCAS canalizando a umidade da Amazônia para a Região Sudeste (MENDES, 2001).

A temperatura média anual é de 22°C, sendo que os meses mais quentes são fevereiro (23,5°C), outubro e novembro (23,4°C) e os meses mais frios junho e julho (18,8°C). A umidade relativa do ar é de 71,2%, sendo que há pouca variação durante o ano (ROSA et al., 1991).

3.2 Dados e metodologia

3.2.1 Dados vetoriais e matriciais

Os dados vetoriais foram obtidos junto à Prefeitura Municipal de Uberlândia (PMU), em agosto de 2014, contendo as curvas de nível, com equidistância vertical de 5 metros, pontos cotados, rede de drenagem e o perímetro urbano do município, com sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), no datum SAD-69. E no site da TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil foi adquirido o MDE do SRTM (*The Shuttle Radar Topography Mission*), com precisão horizontal de 1 segundo de arco, ou 30 metros. O MDE TOPODATA foi derivado dos dados do MDE SRTM, incluindo informações em áreas que anteriormente não se dispunha de dados. Estes passaram por um processamento computacional para refinamento no tamanho da célula de 90 m para 30 m.

3.2.2 Imagens de satélite

As imagens de satélite para a classificação do uso e ocupação do solo, bem como das áreas de preservação permanente (APP) também foram disponibilizadas pela PMU referentes às observações realizadas pelo satélite QuickBird QBCP, escala 1:2.000, de julho 2007. O QuickBird possui sensores multiespectrais e pancromáticos, resolução espacial de 0,6 m por pixel em cores naturais e falsas cores (pancromático).

Para a confecção do mapa de uso e ocupação do solo optou-se pela classificação manual, a qual depende do conhecimento do analista na utilização de parâmetros de cor, forma, textura e relações de vizinhança na classificação de imagens, utilizando o programa QGIS 2.8.3. Por meio do mosaico de imagens do satélite do QuickBird QBCP, com escala de 1:2.000, de julho 2007, em formato vetorial e com o *plug-in* do Google Earth a fim de comparação, foram delimitadas e identificadas as áreas de vegetação natural, vegetação cultivada, zona urbana e corpos d'água presentes na imagem como classes de ocupação do solo .

Para a geração do mapa de APP, foram utilizados os dados vetorizados da rede de drenagem e as imagens de satélite para a geração de *buffers* de APP segundo critérios do Código Florestal, lei 12.651/12, também no programa QGIS 2.8.3. O *buffer* consiste em uma área que abrange uma determinada distância fixa de um elemento com representação vetorial. A ferramenta é implementada em SIG e, neste caso, aplicada aos corpos d'água das bacias analisadas.

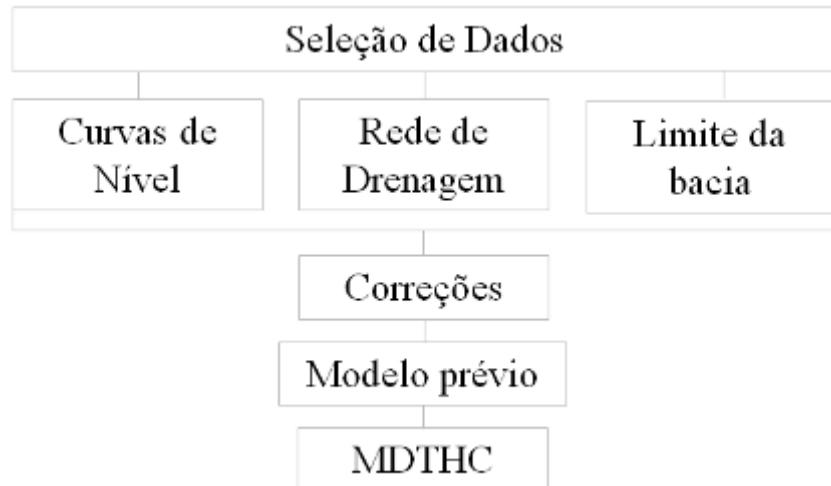
Para a criação do banco de dados da área de estudo e classificação e correção das imagens de satélite foi utilizado o programa QGIS, para a elaboração do cálculo do índice topográfico de umidade (IT) os programas TauDEM versão 5 e o HAND, o primeiro rodado no ArcGIS 10.3 e o último, no programa TerraViewHidro 0.4.1.

3.2.3. Modelagem dos dados

Para a confecção do modelo digital do terreno hidrológicamente corrigido (MDTHC) foram utilizados os vetores de curvas de nível, rede de drenagem e limite da bacia através do interpolador *Topo to Raster* do programa ArcGIS, o qual permite que dados vetoriais, como curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de bacias, sejam utilizados durante a interpolação. Desta forma, buscou-se minimizar os possíveis erros de interpolação, com o objetivo específico de convertê-los em modelos hidrológicos de elevação de terreno exatos. O método criou o MDT a partir de isolinhas de altimetria, através das curvas de nível com equidistância vertical de 5 em 5 metros, resultando em um MDTHC com uma malha

regular de pixels de 30 x 30 metros. Na Figura 13 está a representação para a obtenção do MDTHC.

Figura 13 – Fluxograma com as etapas para obtenção do MDTHC

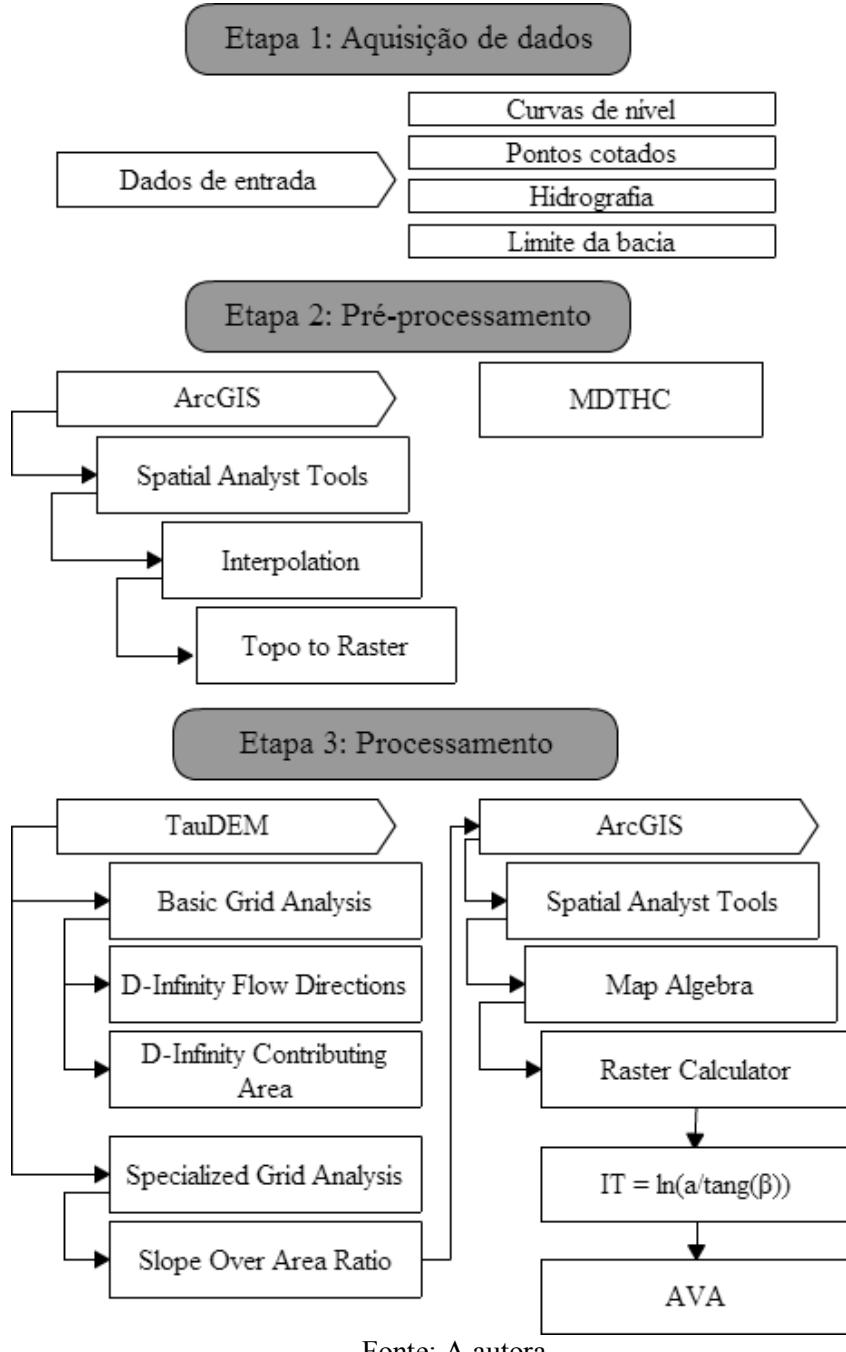


Fonte: A autora.

A correção dos dados consistiu em (a) alterar a representação de rios de margem dupla (formato poligonal) para rios de margem simples (formato de linha), realizar a conexão de segmentos de rios e indicação do sentido do fluxo; e (b) corrigir as descontinuidades nas curvas de nível e de valores de altitudes por meio da visualização de cotas de mesmo valor e observada a sua continuidade. Para tanto, foi utilizada a ferramenta de interpolação *Spline*, dentro da caixa de ferramentas *Interpolation*, a qual suaviza o relevo e remove pequenas imperfeições, além da perícia do observador ao atentar para a continuidade das curvas de nível.

Para a geração do índice topográfico de umidade (IT) foi utilizado o MDTHC inserido no programa TauDEM 5 obtido no site *Hidrology Research Group (URL 1)*. Na Figura 14 segue o processo para a sua obtenção.

Figura 14 – Fluxograma com as etapas para obtenção das AVA pelo TauDEM

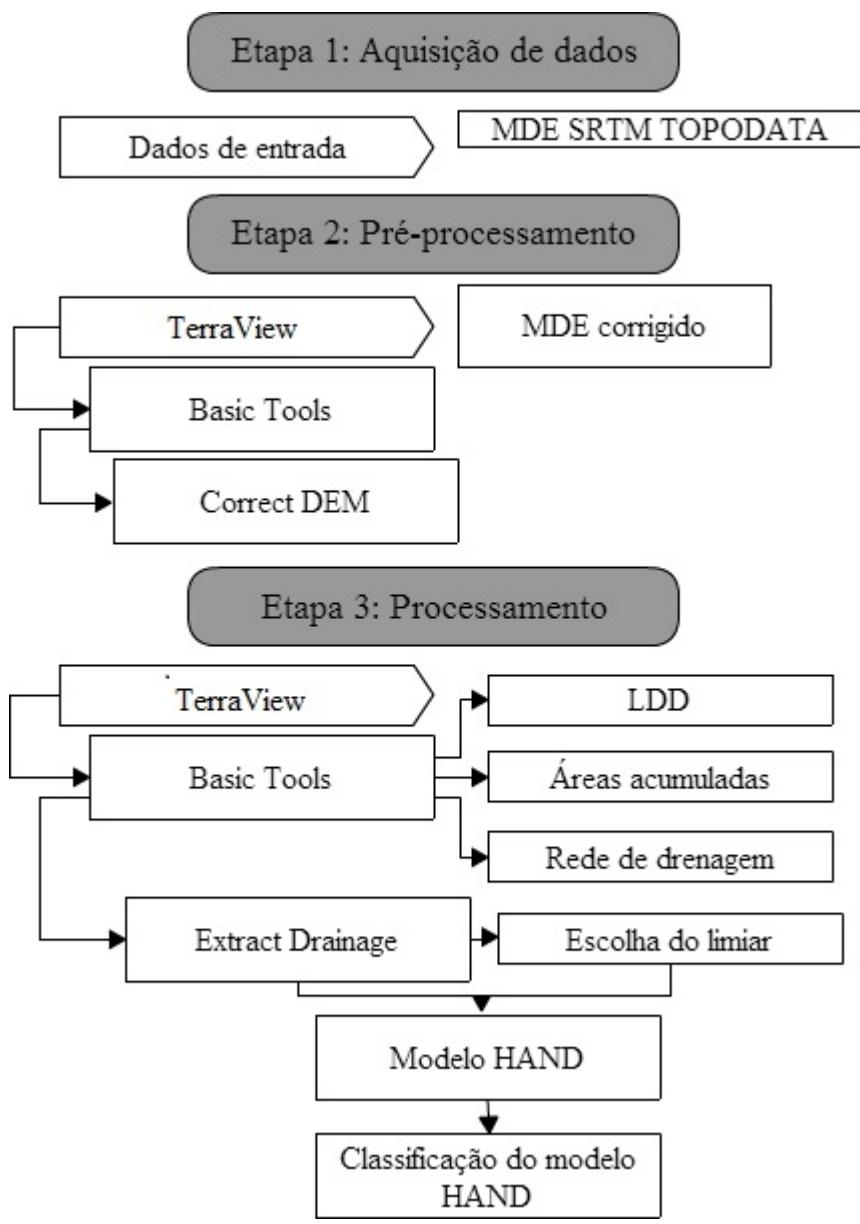


Fonte: A autora.

Primeiramente, foi gerado o MDTHC no ArcGIS conforme descrito anteriormente. Através das ferramentas *Basic Grid Analysis* e do método D-Infinity, foi obtida a direção do fluxo de drenagem e a área acumulada da bacia hidrográfica e, nas ferramentas *Specialized Grid Analysis* um arquivo que é o inverso das AVA, desta forma, no ArcGIS, através da ferramenta *Raster Calculator* foi obtido o modelo TauDEM das AVA.

E para cálculo do índice topográfico de umidade no programa HAND, o MDE do SRTM TOPODATA obtido no site TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, (URL 2) e da Divisão de Processamento de Imagens do INPE (URL 3), conforme as etapas representadas na figura 15. O MDE do SRTM representa diferentes altitudes capturadas pelo radar, portanto relacionando-se com a profundidade do lençol freático, diferentemente do MDTHC utilizado no modelo TauDEM, obtido através das curvas de nível do terreno e da rede de drenagem.

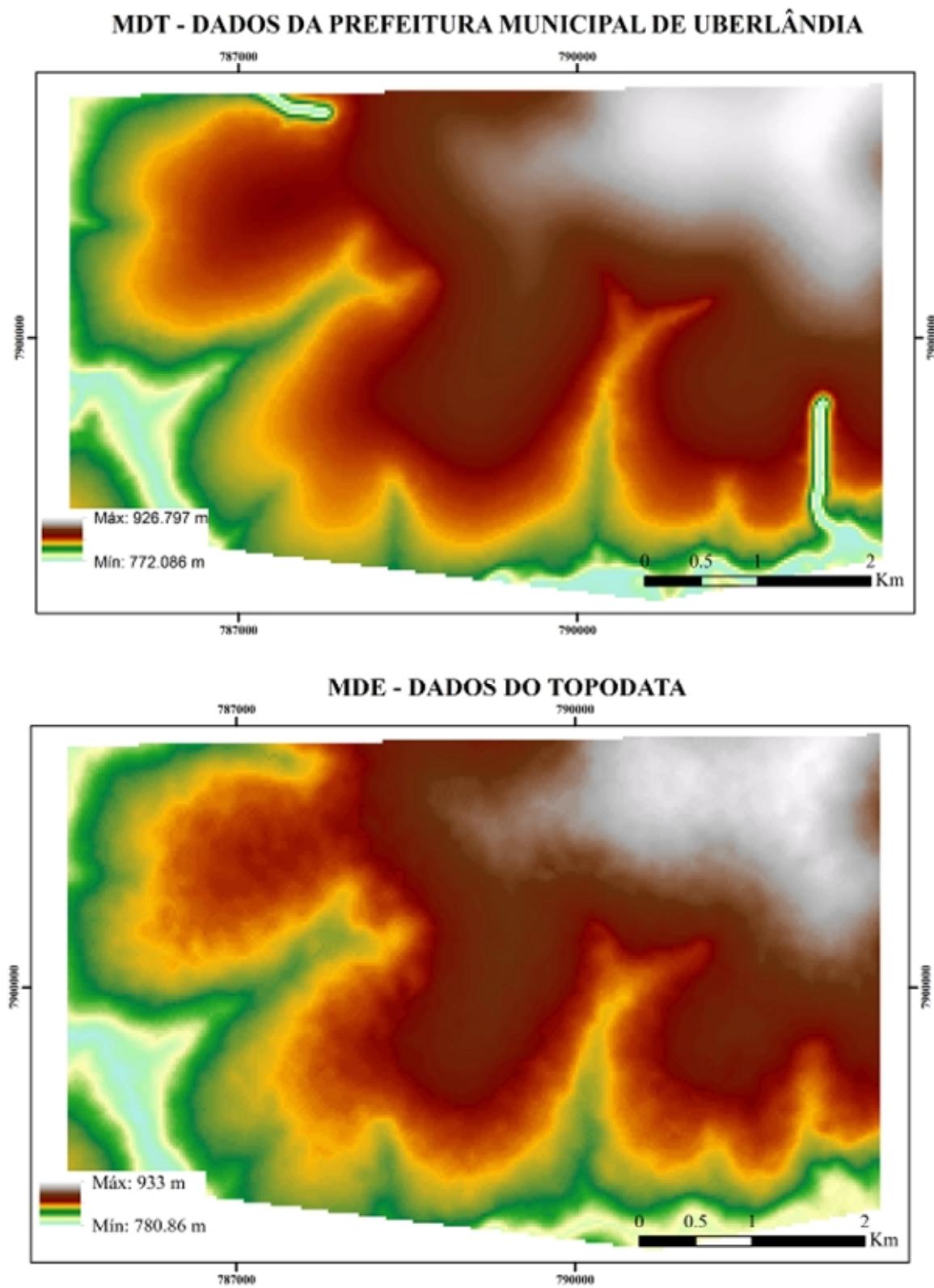
Figura 15 – Fluxograma com as etapas para obtenção das AVA pelo HAND



Fonte: A autora.

Visando uma melhor adequação da topografia na microbacia foi utilizado o MDE do SRTM do projeto TOPODATA, com resolução horizontal de 30 metros, pois de acordo com Rodrigues et al. (2011), o mapeamento HAND a partir de SRTM de 30 metros fornece melhor detalhamento das feições da paisagem. Dados TOPODATA são livres de ruídos encontrados no SRTM clássico que precisavam ser interpolados para não comprometer o trabalho final. Na Figura 16, é possível visualizar a diferença do MDT gerado com os dados da prefeitura e do obtido através do TOPODATA, o primeiro inserido no método HAND e o segundo no modelo HAND.

Figura 16 – MDTs utilizados nos métodos TauDEM e HAND



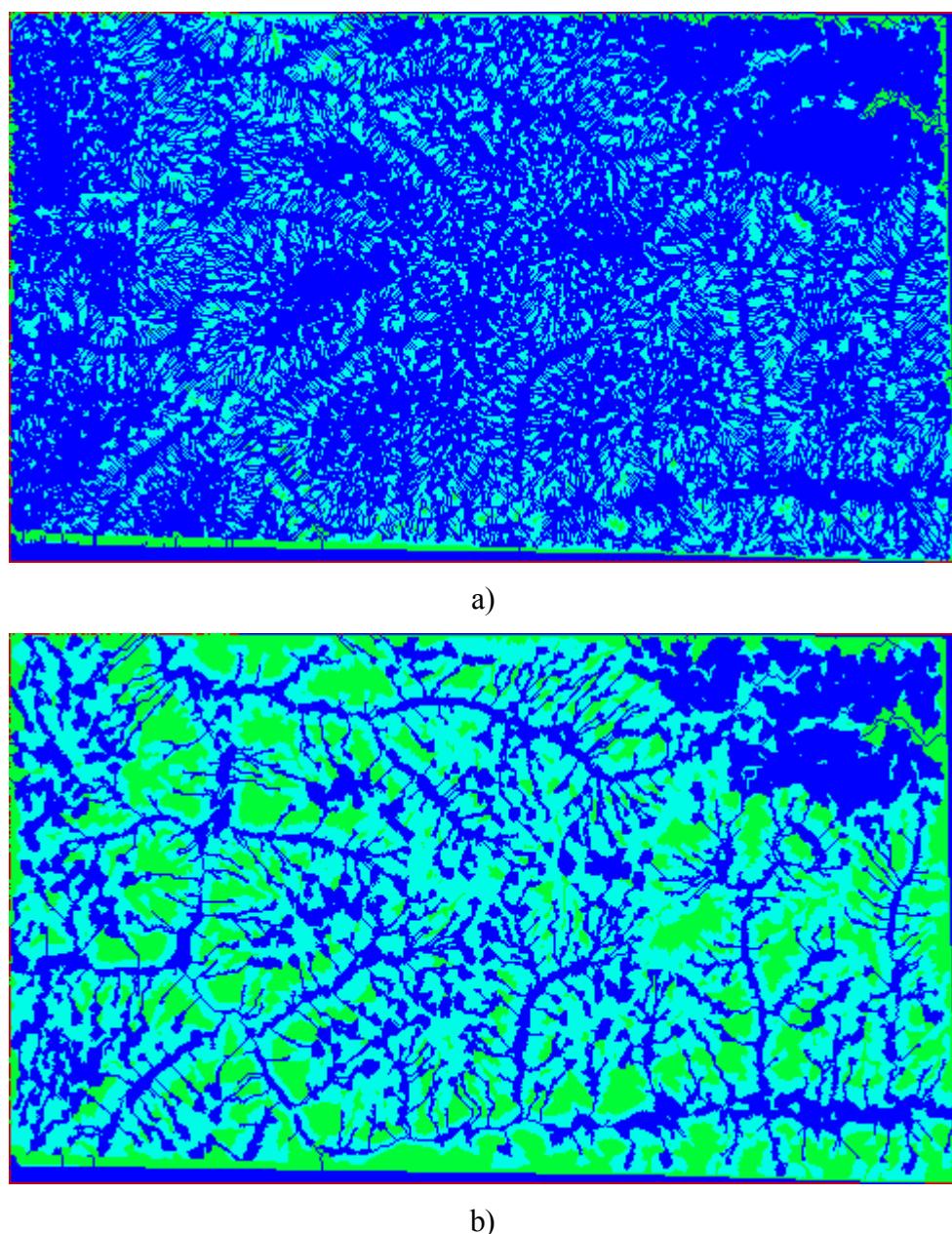
Fonte: A Autora.

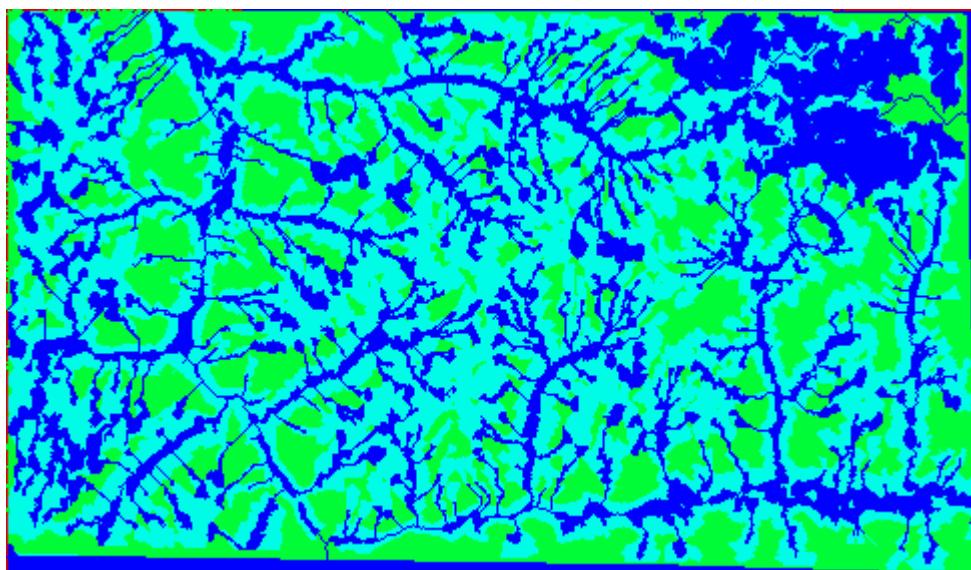
Para processar os dados SRTM e gerar o modelo HAND foi utilizado o programa TerraViewHidro 0.4.1, um programa desenvolvido pelo INPE, que possui *plug-ins* que permitem modelagens hidrológicas através da utilização de dados *raster*. A primeira etapa do processamento consistiu na geração da direção de fluxo (*Local Drain Direction* – LDD) e das áreas acumuladas de drenagem, geradas a partir da LDD, através da ferramenta *Basic Tools*. A geração destes dois arquivos em formato *raster*, ou seja, uma matriz de linhas e colunas com informações em cada ponto ou pixel deram origem à delimitação automática da rede de drenagem, da qual se escolheu um parâmetro limiar de área de contribuição mínima, para considerar uma célula do MDE como pertencente à rede de drenagem.

Esse limiar foi escolhido visando minimizar dois tipos de erro na representação da rede de drenagem: a não representação de trechos da drenagem real, devido à escolha de um limiar muito alto; ou criando trechos que não existissem na realidade, quando se opta por um limiar muito baixo. Para identificar qual valor de limiar permitisse a simulação das ordens de rio de interesse para este estudo, foi feita a comparação visual da rede de drenagem gerada pelo HAND com os dados da hidrografia disponibilizados pela PMU. Após a definição dos limiares, foi realizada a classificação do modelo HAND.

É importante ressaltar que o valor do limiar utilizado variou de acordo com as características locais do relevo, uma vez que este corresponde à quantidade de pixels de contribuição necessários para se considerar como corpo d'água. Por isso, foram realizados testes com limiares de 5, 50 e 75, respectivamente Figura 16a, 16b e 16c dos quais o limiar que melhor representou, ou seja, que corresponde à rede de drenagem real, foi o 50 e portanto, o utilizado no modelo HAND.

Figura 17 – Limiares para a obtenção da rede de drenagem das bacias hidrográficas pelo modelo HAND





c)

Fonte: A autora.

Para a classificação do modelo HAND gerado, foi utilizada proposta semelhante de Rennó et al. (2008), em que: classe 1) $\text{HAND} \leq 1$: baixios, onde o lençol freático está à superfície do solo ou muito próxima dela; classe 2) $1 < \text{HAND} \leq 11$: engloba os ambientes mais declivosos, as vertentes e os platôs, onde o lençol freático é mais profundo.

Com os resultados do HAND e TauDEM obtidos e vetorizados, no ArcGIS foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* para extrair as informações quantitativas das imagens, por meio de uma normalização dos valores obtidos em dados binários. Assim, tanto para o HAND quanto para o TauDEM, foi atribuído o valor 1 para os valores referentes as áreas consideradas AVA e 2 para os valores que compreendessem as demais áreas.

Devido aos dados de entrada dos modelos estarem em escalas distintas, os mesmos foram padronizados considerando o tamanho e localização dos pixels referentes ao MDE TOPODATA, em escala de 1:30.000, o que tornou possível a comparação dos resultados obtidos em ambos.

No ArcGIS, foram gerados mapas de susceptibilidade da microbacia, por meio da compilação das camadas com os *buffers* de APP, uso e ocupação do solo e das AVA obtidas em cada modelo. Deste modo, os mapas de susceptibilidade das microbacias

apontam as áreas que se encontram em baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade. Cada uma destas camadas foi reclassificada com atribuição de pesos que variaram de 1 a 4, respectivamente de mais baixo a mais alta relevância. Sendo assim, nos modelos de TauDEM e HAND: as áreas de não AVA atribui-se o valor de 1 e para as consideradas AVA atribui-se o valor de 4; na camada de uso e ocupação do solo: valor 1 para zona urbana, 2 para vegetação cultivada, 3 para vegetação nativa e 4 para a água; e na camada de APP, o valor de 1 para as áreas que não correspondem a APP e 4 para a APP, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Reclassificação das camadas

AVA	UOS	APP
1 Não AVA	1 Zona Urbana	1 Não APP
4 AVA	2 Vegetação Cultivada 3 Vegetação Nativa 4 Água	4 APP

Após a reclassificação, foi utilizada a *Raster Calculator*, na qual as camadas foram somadas, gerando o mapa de susceptibilidade com as áreas das microbacias que se encontram em baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade.

A fim de verificar a semelhança dos métodos utilizados na pesquisa, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos por meio da contagem de pixels em comum que representavam as AVA pelo método TauDEM e pelo modelo HAND. O programa utilizado foi o MATLAB (*Matrix Laboratory*), o qual possibilita cálculos numéricos e gráficos científicos, destacando-se por possibilitar a manipulação do usuário e cálculos matriciais.

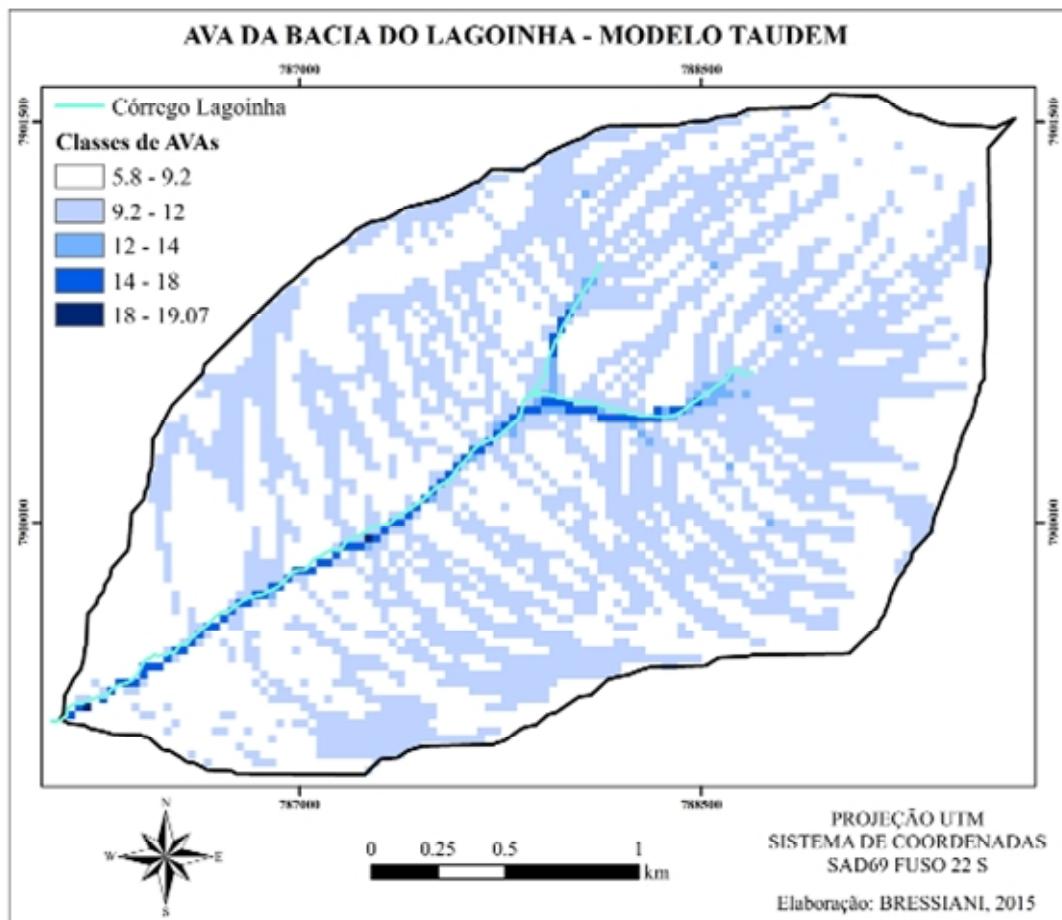
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado do TauDEM foi obtido seguindo as etapas descritas anteriormente no programa ArcGIS 10.3.

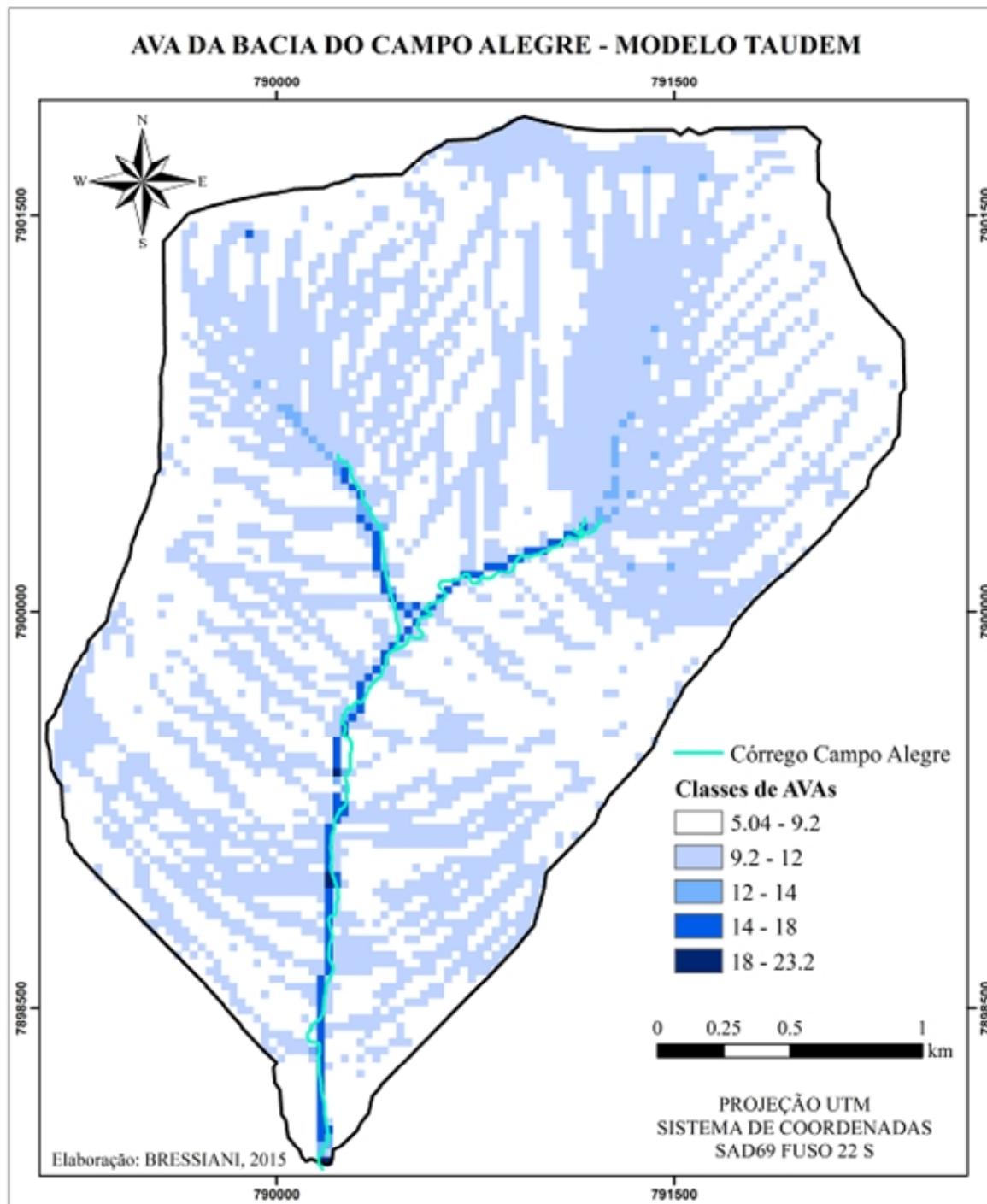
Na Figura 17, o modelo AVA segundo a modelagem TauDEM das duas microbacias. Os valores de índice topográfico de umidade (IT) obtidos para o córrego da Lagoinha variaram de 5,82 a 19,07 e para o córrego Campo Alegre, variaram de 5,04 a 23,2, com valores médios de IT de 12,4 e 14,1 para o córrego da Lagoinha e Campo Alegre, respectivamente. Estes valores foram classificados em cinco classes com os valores indicados na legenda das Figuras 18a e 18b.

Percebe-se que na Figura 18a, a AVA apresenta uma distribuição radial a partir da calha do rio na parte mais baixa e na parte alta da bacia uma distribuição perpendicular a ramificação e na Figura 18b, a AVA apresenta uma distribuição semelhante em relação ao curso do rio.

Figura 18 – Imagem dos mapas das AVA das microbacias do córrego da Lagoinha e córrego Campo Alegre pelo TauDEM



a)



b)

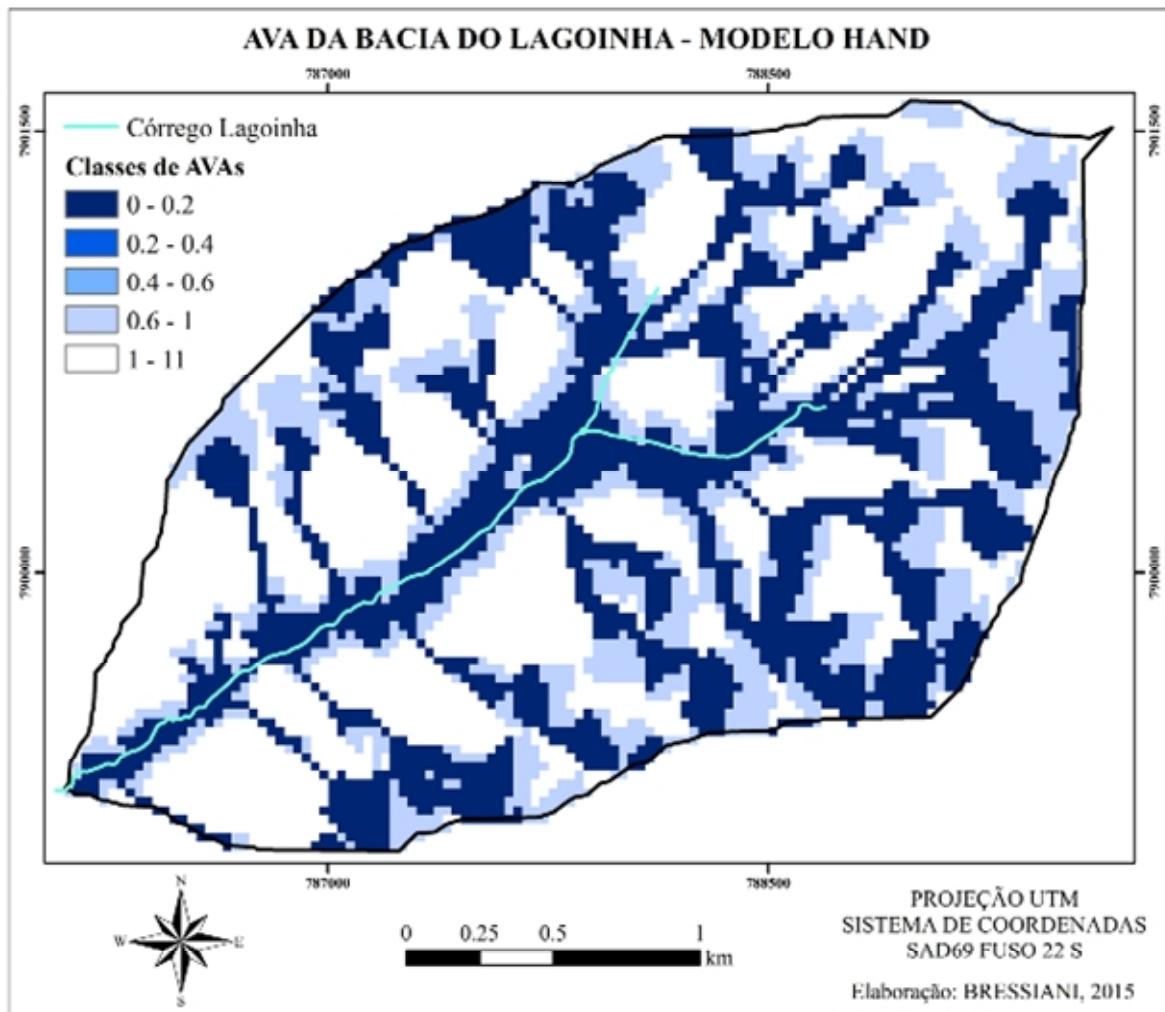
Fonte: A Autora.

Os valores encontrados de IT são superiores, considerando os limiares de Alves (2008) que afirma que para solos bem drenados os valores de IT devem variar entre 4 e 5, solos moderadamente drenados, entre 5 e 7 e, solos mal drenados o IT varia entre 7 e 12. Os valores de IT encontrados indicam que 44,29 % de área do córrego da Lagoinha e 46,16 %

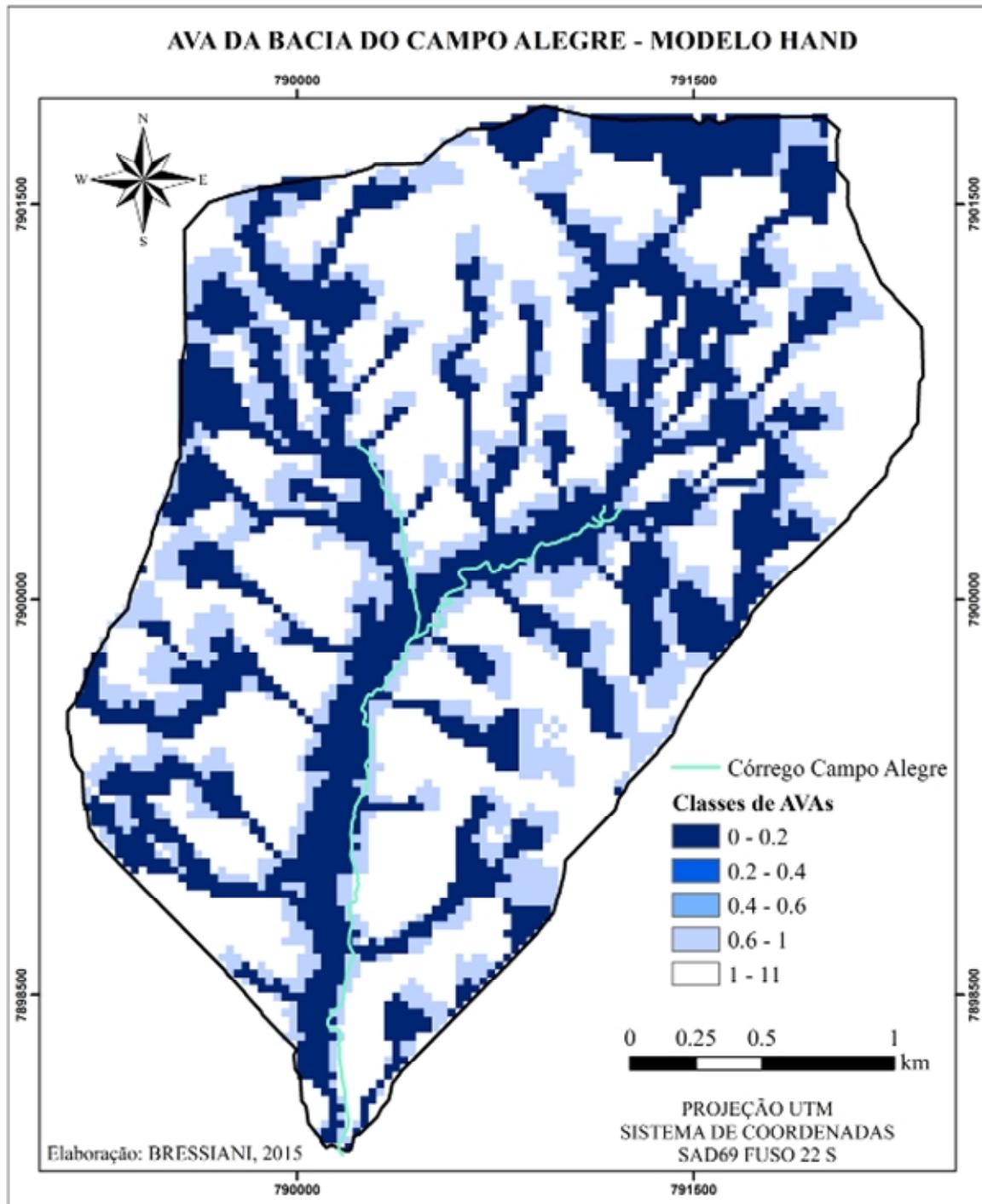
de área do córrego Campo Alegre são consideradas AVA. Segundo Prates et al. (2011), os valores de Alves são válidos para bacias com área superior a 400 ha. Os resultados sugerem que o modelo pode ser sensível em bacias com pequena área e com pequena variabilidade altimétrica, pois de acordo com Prates et al. (2011) os limiares de Alves (2008) seriam adequados para bacias com mais de 400 ha. Admitiu-se como AVA os valores de IT superiores iguais a 9,2, variando até 19,07 para o córrego da Lagoinha e 23,2 para o córrego Campo Alegre.

O modelo HAND foi obtido seguindo as etapas descritas anteriormente no programa TerraViewHidro 0.4.1, onde as etapas de pré-processamento para a geração do HAND consistem na correção de depressões e picos (pixels incoerentes), obtendo-se o MDTHC. No processo, é inserida uma grade regular como arquivo de entrada, utilizando-se os dados topográficos do MDE TOPODATA. Na Figura 19, o modelo AVA segundo a modelagem HAND das duas microbacias. Percebe-se que a distribuição das AVA são mais arredondadas no entorno das nascentes, Além disso, elas acompanham o curso de drenagem.

Figura 19 – Imagem dos mapas das AVA da microbacia do córrego da Lagoinha e córrego Campo Alegre pelo HAND



a)



Fonte: A autora.

Os valores de HAND encontrados para ambas as microbacias variaram de 0-11 e para a classificação deste modelo foi utilizada proposta semelhante de Rennó et al. (2008), em que: classe 1) $\text{HAND} \leq 1$: baixios, onde o lençol freático está à superfície do solo ou muito próxima dela; classe 2) $1 < \text{HAND} \leq 11$: engloba os ambientes mais declivosos, as vertentes e os platôs, onde o lençol freático é mais profundo.

A partir de testes, foi considerado que valores menores e iguais a 1 são AVA e valores maiores deste, representam as demais áreas.

Segundo o modelo HAND, 59,47 % da área total da microbacia do córrego da Lagoinha é considerada AVA e 55,51 % da microbacia do córrego Campo Alegre.

Relevo plano a suavemente ondulado conforme a área de estudo, favorecem a concentração do fluxo superficial e subsuperficial da água, constatado pelos valores elevados de IT obtidos para ambas bacias.

Ao correlacionar o IT com a distância vertical a drenagem mais próxima, obtida pelos resultados do HAND, observou-se que nem todas as áreas consideradas pelo TauDEM como regiões de acúmulo d'água o são, devido à distância em relação ao canal de drenagem ser elevada.

Ambos modelos permitiram a espacialização das AVA dentro da bacia hidrográfica, tendo como base o relevo, representada com o MDT. Porém, ao TauDEM está associada, além da declividade do terreno, a área de contribuição específica da bacia ou fluxo acumulado. Já ao HAND, a distância à rede de drenagem mais próxima.

Na observação dos resultados, o TauDEM gerou áreas mais fragmentadas, além de não ter classificado como AVA áreas próximas aos corpos d'água, imprescindíveis para a proteção e manutenção hídrica. Assim, a modelagem do HAND mostrou-se mais robusta, com resultados mais definidos que os gerados pelo TauDEM.

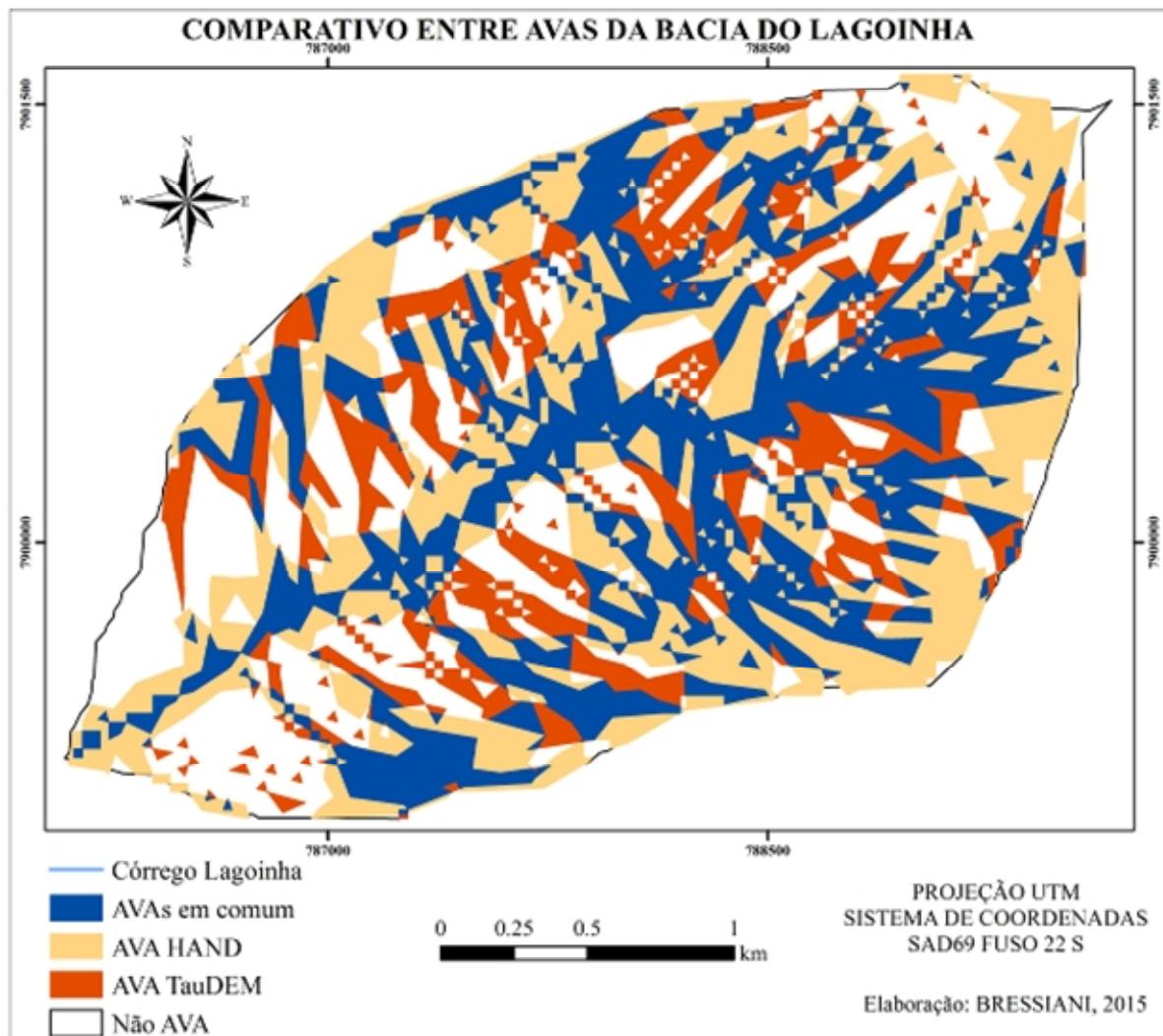
Dada a sua importância na proteção e manutenção dos recursos hídricos, as AVA podem e devem ser consideradas nos planos de manejo das microbacias como locais de preservação permanente.

Deste modo, com os modelos TauDEM e HAND obtidos, foi realizada a comparação dos mesmos para definir as áreas em comum a ambos consideradas AVA, por meio da *Raster Calculator* no ArcGIS foi realizada uma normalização dos valores de IT. A normalização consistiu em atribuir peso 1 para os valores que compreendessem as AVA e 2 para os

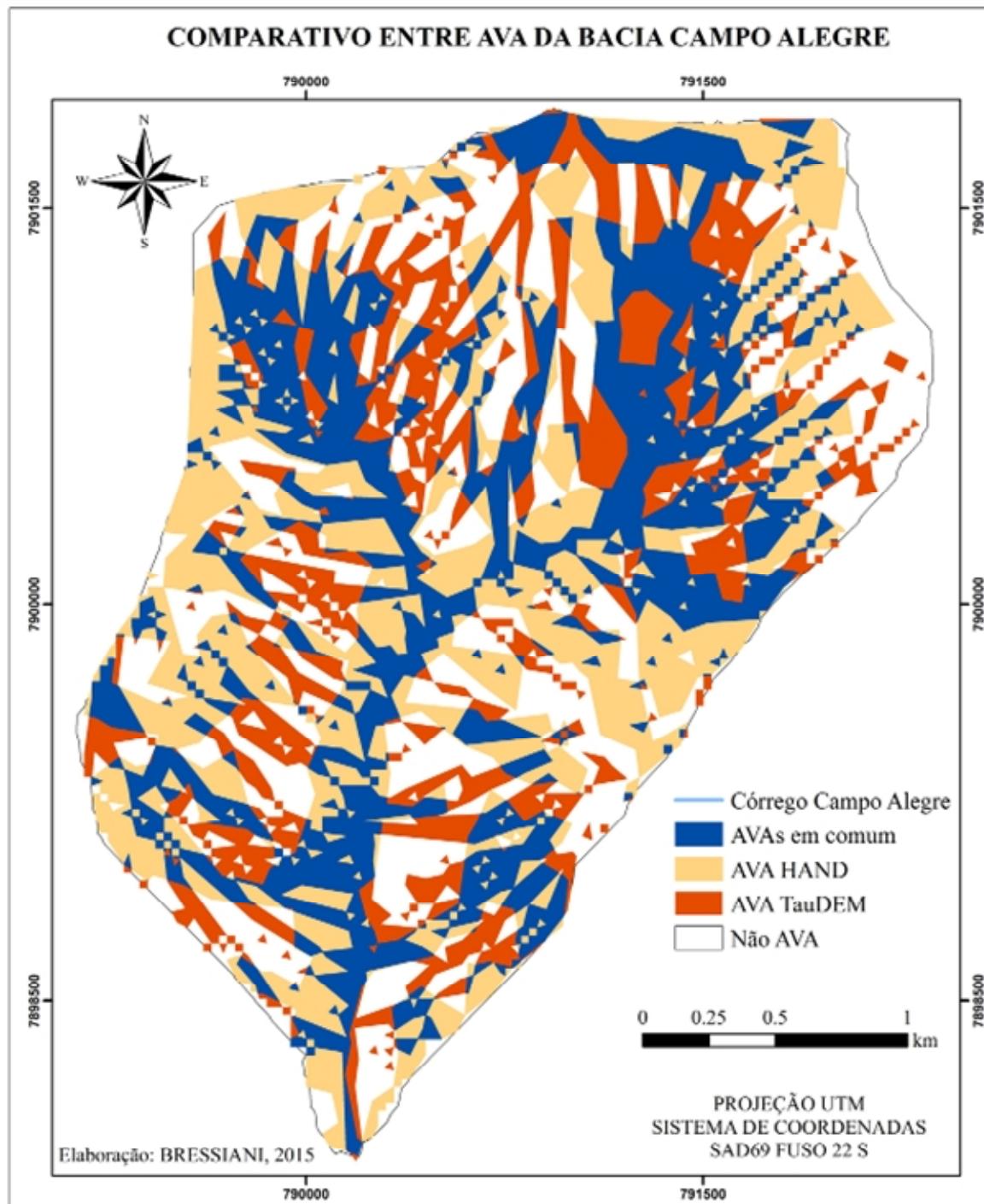
valores que compreendessem as demais áreas das microbacias, tanto para o TauDEM quanto para o HAND.

Na Figura 20, foi possível visualizar em azul as áreas que coincidiram tanto em um modelo quanto no outro como AVA, as áreas em vermelho são as AVA do modelo TauDEM e em amarelo as AVA do modelo HAND.

Figura 20 – Figura comparativa dos modelos TauDEM e HAND em ambas as microbacias



a)



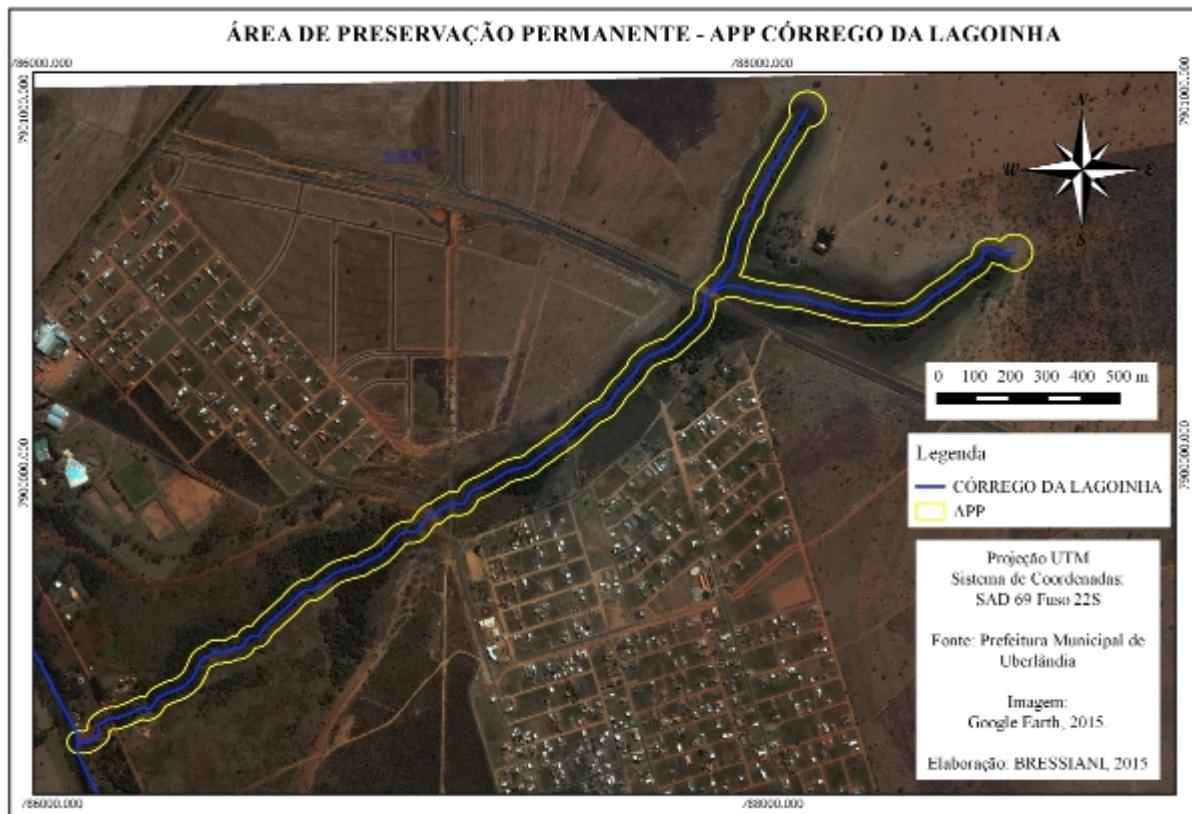
b)

Fonte: A Autora.

As imagens demonstraram que tanto na microbacia do córrego da Lagoinha quanto do Campo Alegre, o modelo HAND gerou AVA ao longo da rede de drenagem, o mesmo não ocorrendo que o modelo TauDEM, no qual as AVA nem sempre acompanharam o percurso do canal.

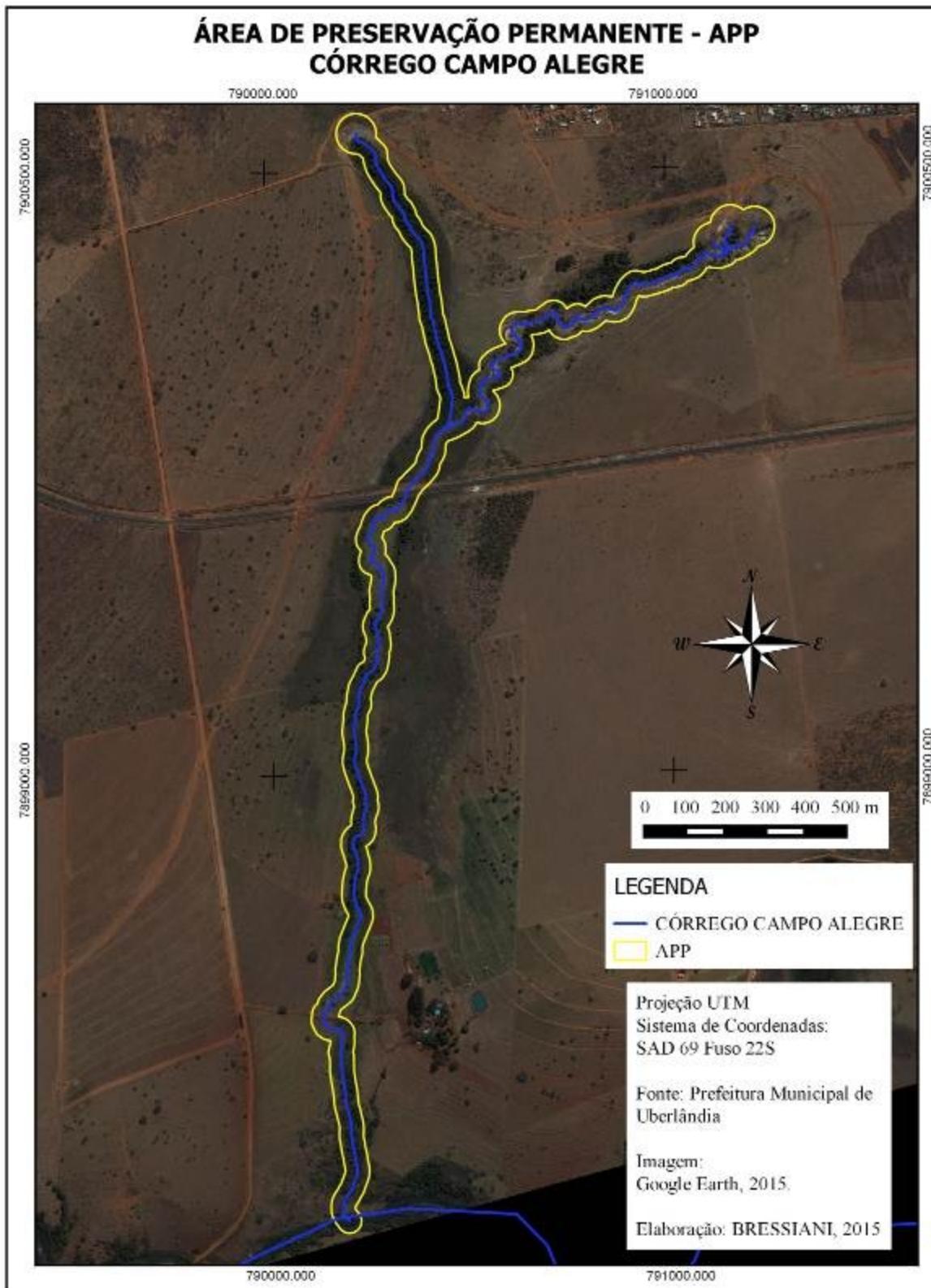
A fim de verificar as APP das microbacias e realizar a comparação com os resultados de AVA gerados, foram utilizados os dados vetorizados da rede de drenagem e as imagens de satélite para a geração de *buffers* segundo critérios do Código Florestal, lei 12.651/12, também no programa QGIS 2.8.3 para a obtenção das APP, conforme as Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Imagem do mapa das APP do Córrego da Lagoinha



Fonte: A autora.

Figura 22 – Imagem do mapa das APP do córrego Campo Alegre



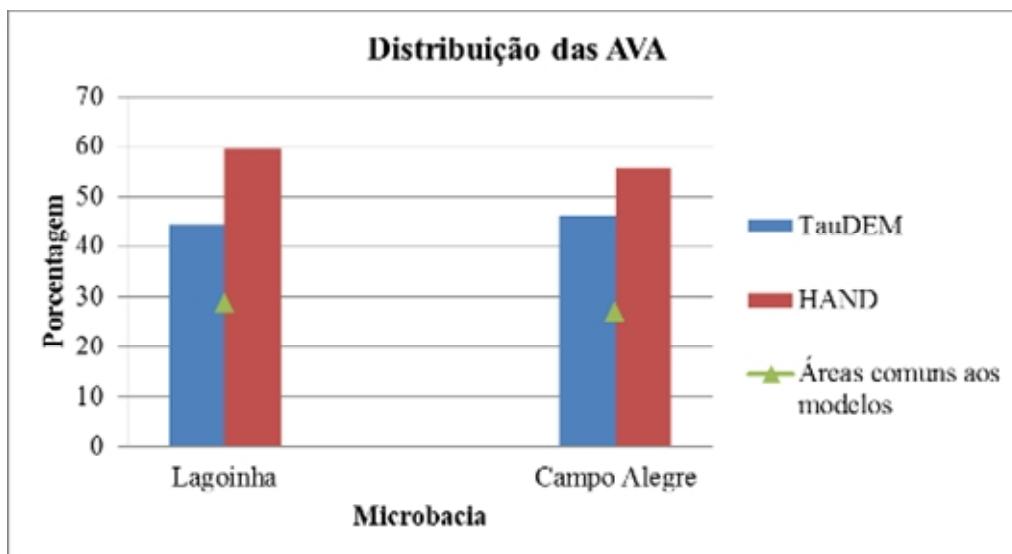
Fonte: A autora.

Tabela 2 – Quantificação das AVA nas microbacias do córrego da Lagoinha e Campo Alegre

Nome da Bacia	TauDEM		HAND		Áreas comuns aos modelos		Áreas comuns as APPs		HAND	
	Área AVA / Área total da bacia	hectare	Área AVA / Área total da bacia	hectare	%	TauDEM	hectare	%		
Lagoinha	269,34	44,29	361,73	59,47	174,32	28,65	18,36	3,02	22,02	3,62
Campo Alegre	353,29	46,16	424,87	55,51	205,66	26,87	20,58	2,69	23,31	3,05

No gráfico 1 foi possível visualizar a distribuição das AVA nas duas microbacias obtidas pelo TauDEM e pelo HAND. As áreas em comum em ambos modelos estão inseridas mais próximas do canal de drenagem, sendo que na microbacia do córrego Campo Alegre, sua maior parte encontra-se ao norte da mesma, onde a ocupação do solo se dá pela urbanização. Já no córrego da Lagoinha, as áreas em comum encontram-se em sua maior parte na metade norte da microbacia, a qual tem grande parte do solo ocupado por vegetação natural, seguido de vegetação cultivada e novos loteamentos destinados à urbanização que está em expansão neste local.

Gráfico 1 – Distribuição das AVA nas microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre



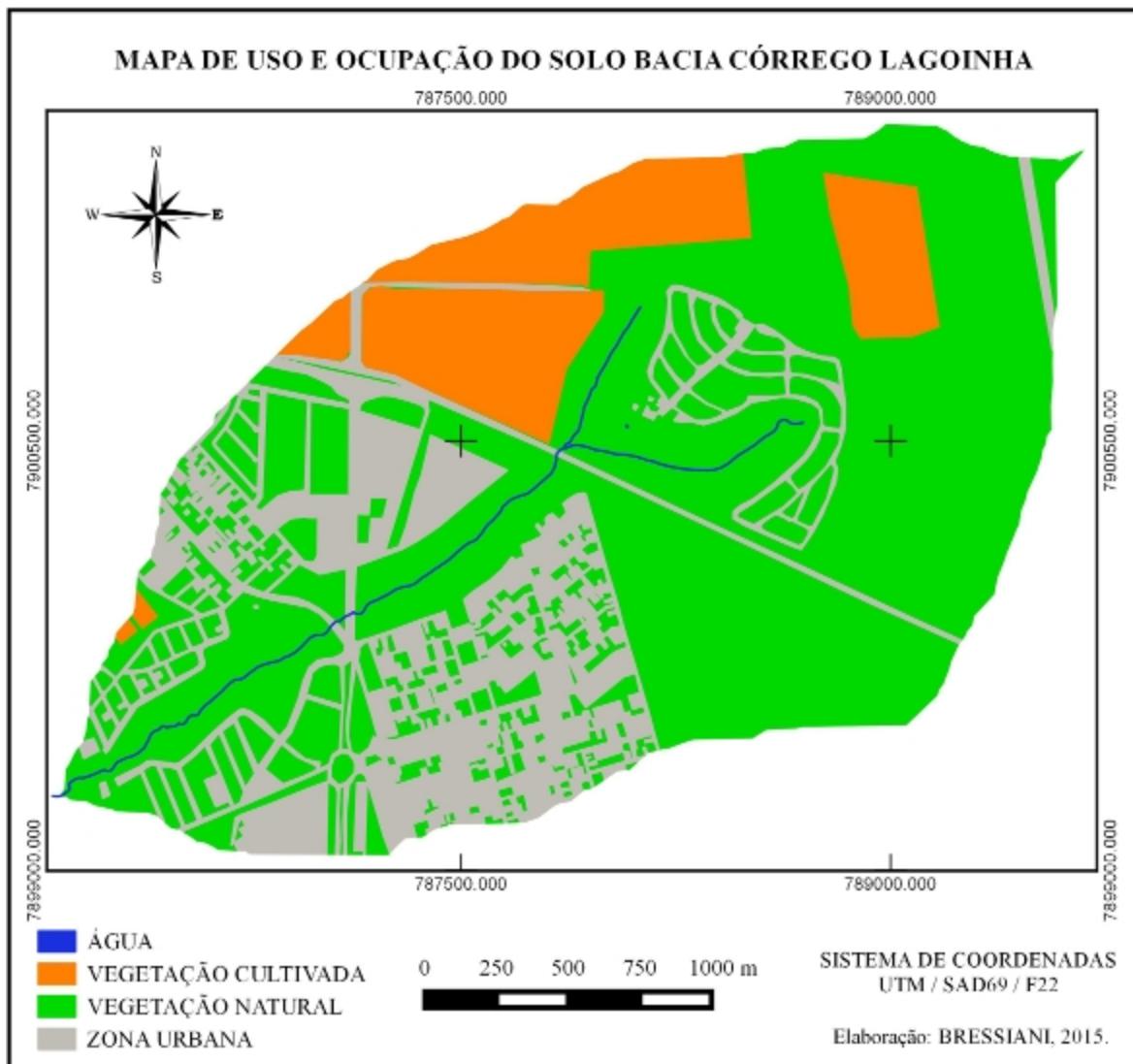
Fonte: A Autora.

A avaliação das APP em relação às AVA resultou que as áreas de preservação permanente ocupam uma área de 23,41ha, correspondendo a 3,85% da área total da microbacia do Córrego da Lagoinha, e uma área de 26,54ha, correspondendo a 3,47% da área total da microbacia do Córrego Campo Alegre.

Na observação, constatou-se que as AVA tanto do modelo TauDEM quanto do modelo HAND coincidem com as APP. Porém, as áreas consideradas zonas de saturação nos modelos se espalham por outras regiões das microbacias, onde a cobertura do solo é diferente da vegetação natural e, portanto, não permite a dinâmica de expansão e contração inerente a estas áreas, as quais também deveriam estar protegidas.

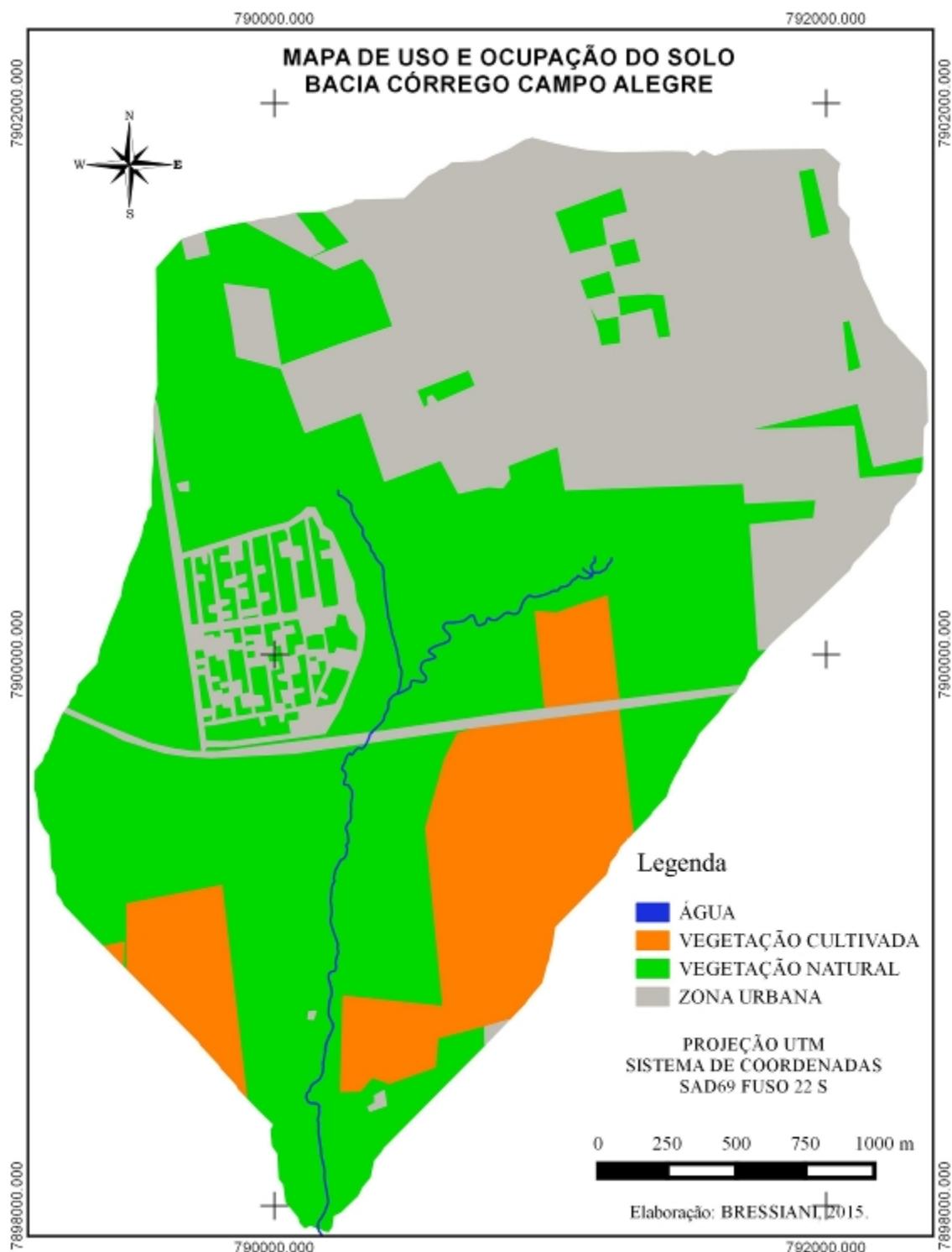
Assim, com intuito de analisar a atual ocupação e uso do solo das microbacias, por meio de classificação manual foram gerados os mapas nos quais foram identificadas pelas imagens de satélite as classes de vegetação natural, vegetação cultivada, zona urbana e corpos d'água, conforme as Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Imagem do mapa de uso e ocupação do solo da microbacia do córrego da Lagoinha



Fonte: A autora.

Figura 24 – Imagem do mapa de uso e ocupação do solo da microbacia do córrego Campo Alegre



Fonte: A autora.

Inúmeras são as classes ou categorias que podem ser escolhidas para a representação do mapeamento do uso e ocupação do solo. No presente trabalho, as classes vegetação natural,

vegetação cultivada, zona urbana e corpos d'água foram escolhidas para representar os tipos de uso e ocupação do solo, sendo possível correlacioná-las à intensidade de ocupação, ou seja, com o grau de impermeabilidade do solo. Também, optou-se pela classificação manual, pois ao realizar teste com classificação supervisionada as classes ficaram misturadas, devido à alta resolução das imagens utilizadas.

As classes de cobertura do solo foram quantificadas para cada microbacia, obtendo-se o percentual correspondente a cada classe, conforme as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Quantificação das classes de uso e ocupação do solo da microbacia córrego da Lagoinha

Uso e ocupação do solo	Área (ha)	Área em relação à microbacia (%)
Vegetação natural	394,73	64,88
Vegetação cultivada	83,62	13,75
Zona urbana	129,91	21,35
Corpos d'água	0,14	0,02
TOTAL	608,4	

Tabela 4 – Quantificação das classes de uso e ocupação do solo da microbacia do córrego Campo Alegre

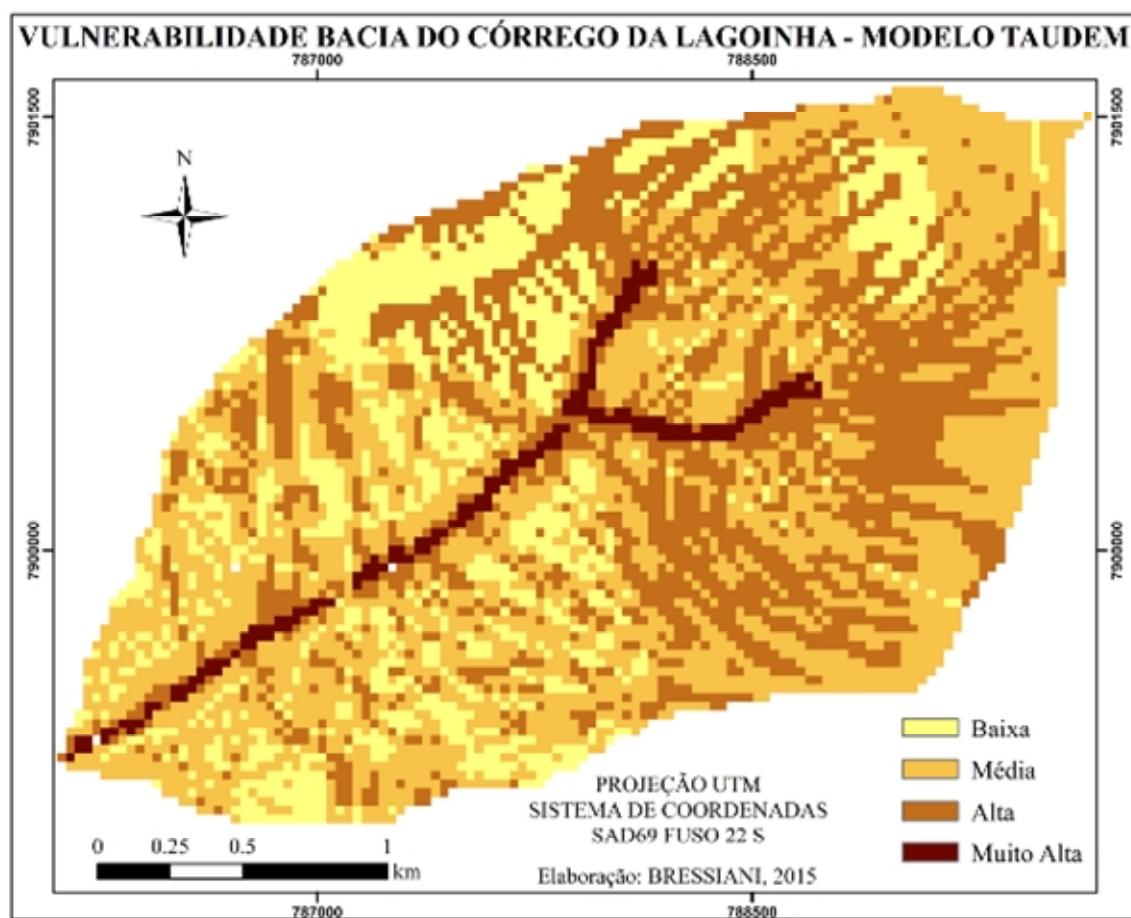
Uso e ocupação do solo	Área (ha)	Área em relação à microbacia(%)
Vegetação natural	392,58	51,28
Vegetação cultivada	102,01	13,33
Zona urbana	270,13	35,28
Corpos d'água	0,87	0,11
TOTAL	765,5	

Conforme as tabelas, a maior parte do solo está coberto com vegetação natural, a qual corresponde a 64,88 e 51,28% de área total das microbacias, respectivamente córrego da Lagoinha e córrego Campo Alegre. Em seguida, as áreas correspondentes à zona urbana, sendo 21,35% de ocupação desta classe no córrego da Lagoinha e 35,28% no córrego Campo Alegre.

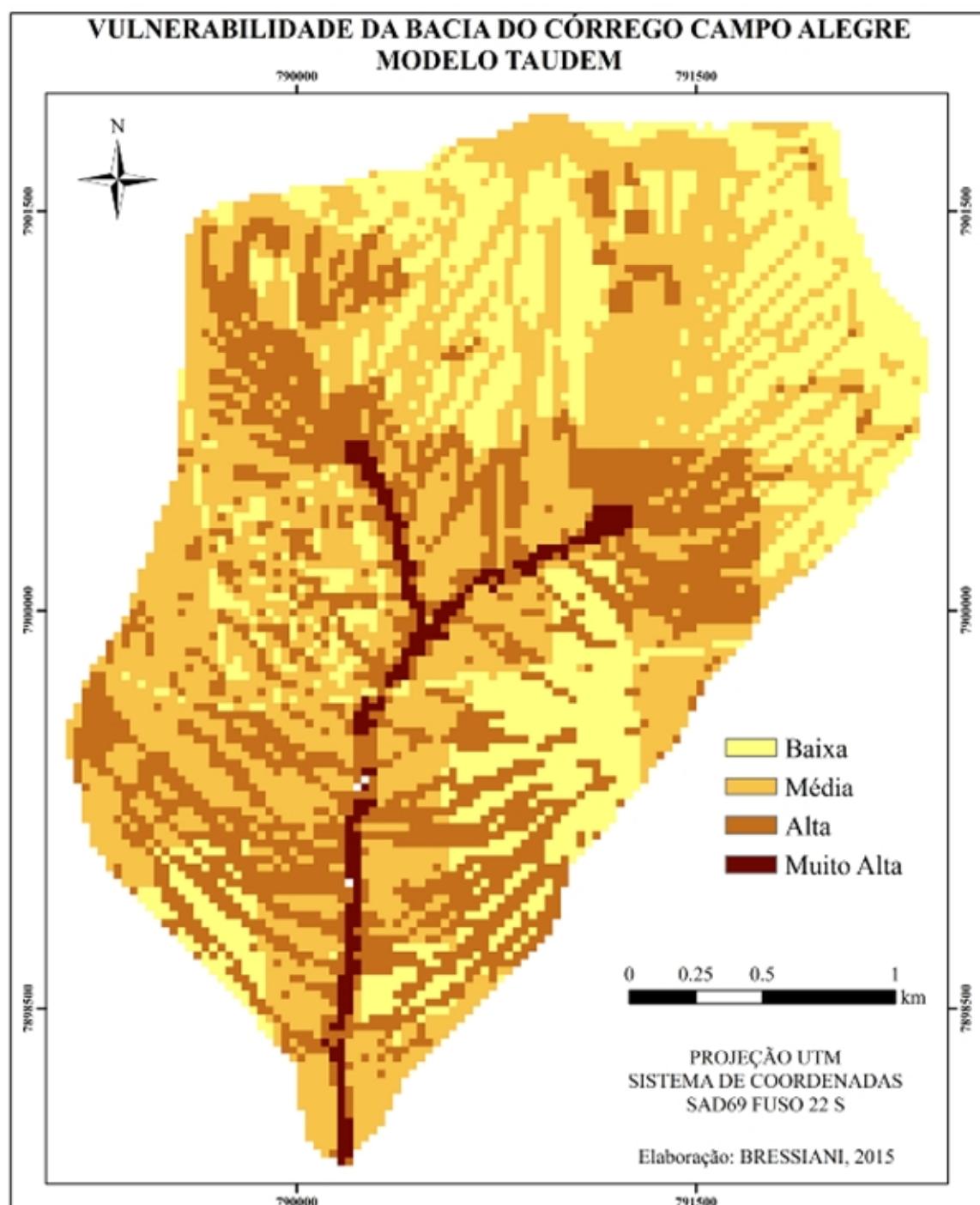
Ressalta-se que a expansão do perímetro urbano está ocorrendo em direção à zona sul do município de Uberlândia, portanto, localizar as AVA nesta região antes que o solo esteja em sua maioria impermeabilizado pelas construções e pavimentação é imprescindível para a proteção dos recursos hídricos, uma vez que estas áreas desempenham a manutenção da qualidade dos mesmos, ao absorverem parte do fluxo de água da precipitação até o limite de saturação e, somente após, darem origem ao escoamento superficial que pode carrear sedimentos e poluentes para os cursos d'água.

Visando auxiliar na delimitação de áreas que também devem ser consideradas de preservação, foram gerados mapas de susceptibilidade das microbacias, através da compilação das camadas de AVA geradas nos modelos, de uso e ocupação do solo e os *buffers* de APP. A geração destes mapas permitiu observar as áreas das microbacias que encontram-se em baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade. Nas Figuras 25 e 26, os mapas de susceptibilidade das microbacias.

Figura 25 – Imagem dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre segundo modelo TauDEM



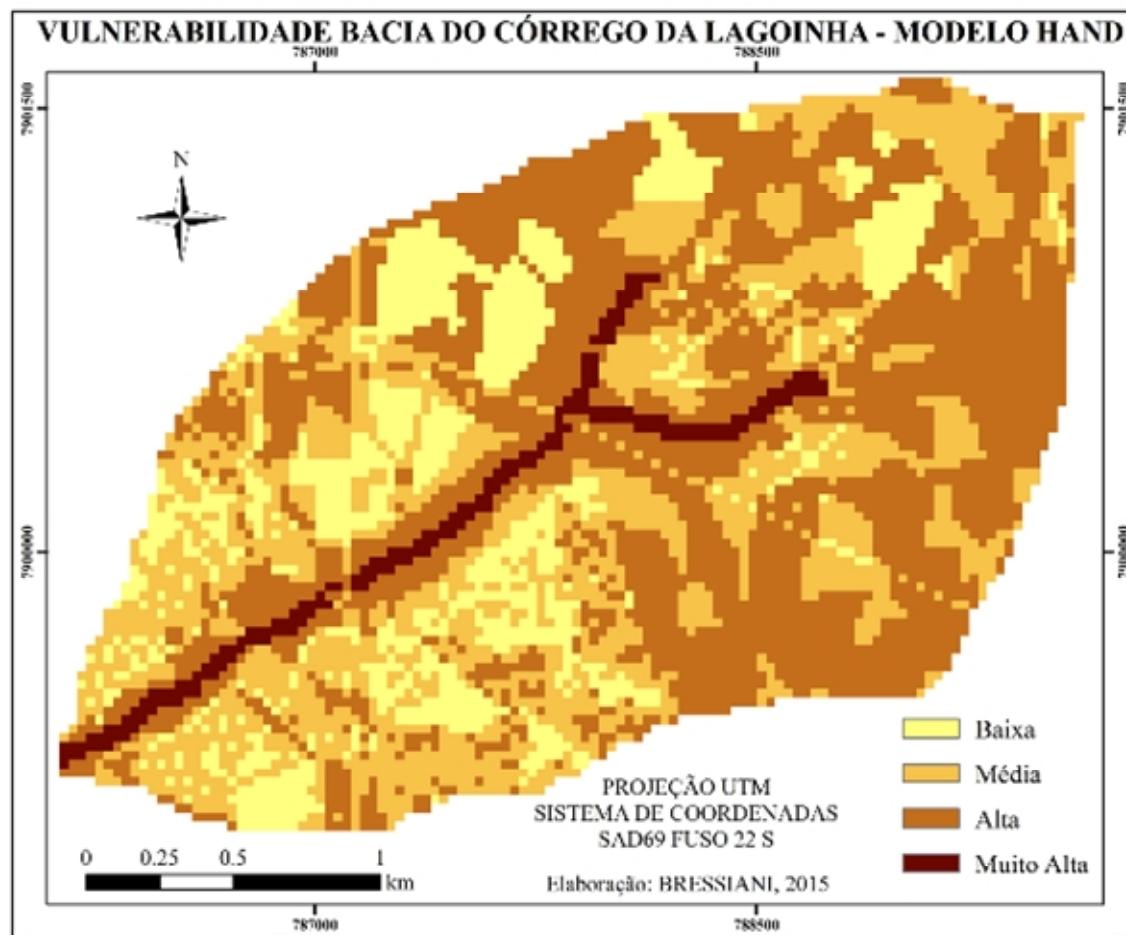
a)



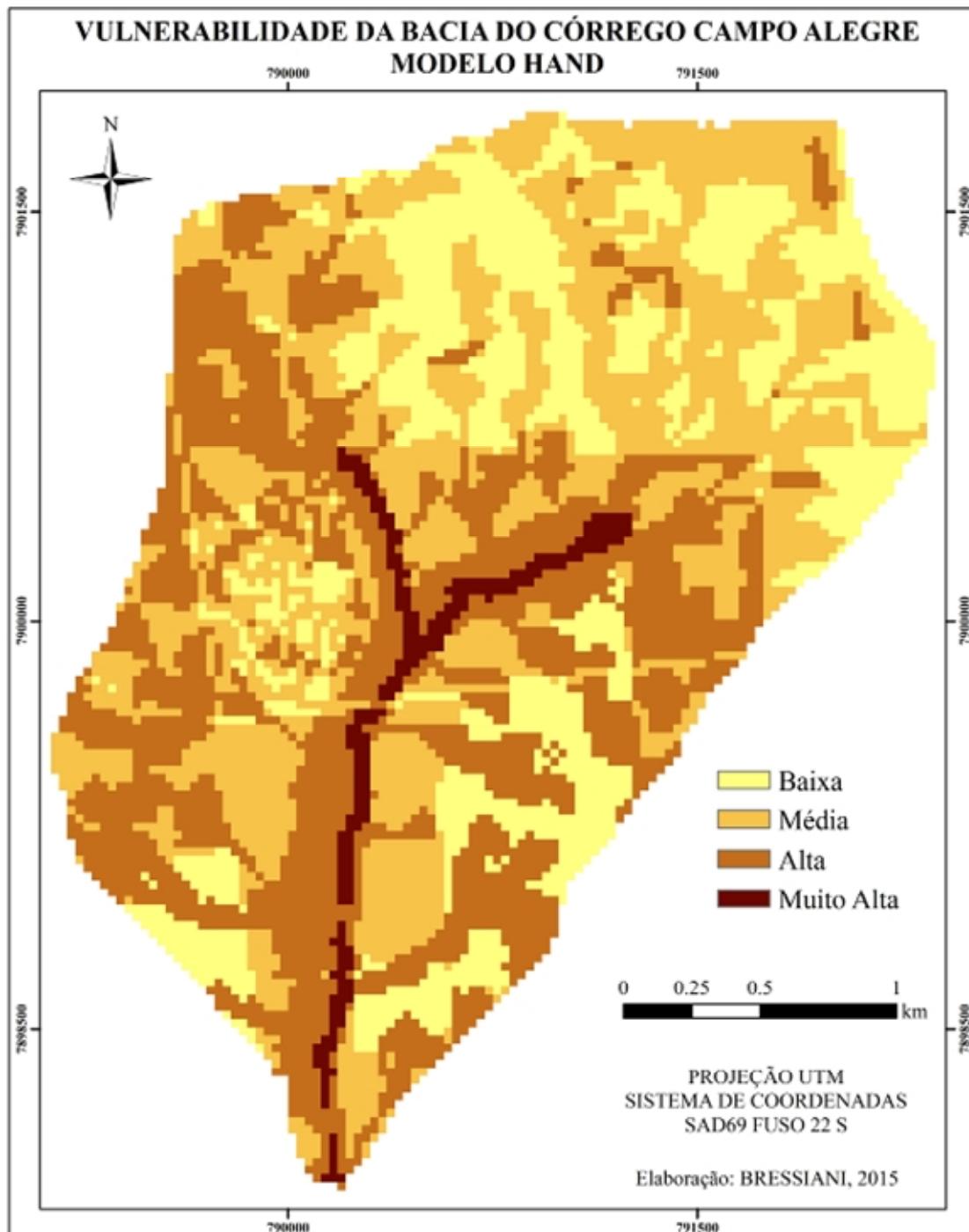
b)

Fonte: A autora.

Figura 26 – Imagem dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre segundo modelo HAND



a)



b)

Fonte: A autora.

Foi possível observar que as áreas classificadas em alta vulnerabilidade estão associadas aos canais de drenagem e que para ambos os modelos, nas duas microbacias, as áreas de alta vulnerabilidade encontram-se em regiões onde o solo ainda é permeável, ou seja, nas áreas de vegetação natural ou cultivada.

Já as áreas de baixa e média vulnerabilidade estão localizadas, principalmente, em regiões onde ocorre a urbanização, ou seja, onde as AVA perderam as suas características devido à impermeabilização do solo.

Na Tabela 5, o percentual e área equivalentes a cada uma das regiões consideradas de baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade nas microbacias do córrego da Lagoinha e do córrego Campo Alegre, respectivamente.

Tabela 5 – Quantificação das áreas dos mapas de susceptibilidade das microbacias do córrego da Lagoinha e Campo Alegre

		Modelo TauDEM				Modelo HAND			
Vulnerabilidade	Nome da Bacia				Nome da Bacia				
	Lagoinha		Campo Alegre		Lagoinha		Campo Alegre		
	hectare	%	hectare	%	hectare	%	hectare	%	
Baixa	118,75	19,5	201,00	26,3	105,50	17,3	187,86	24,5	
Média	270,45	44,4	333,00	43,5	201,90	33,2	283,08	37,0	
Alta	200,95	33,1	212,06	27,7	279,06	45,9	270,84	35,4	
Muito Alta	18,25	3,0	19,44	2,5	21,94	3,6	23,72	3,1	

Segundo o modelo TauDEM e o modelo HAND, nas microbacia do córrego da Lagoinha e Campo Alegre, as áreas consideradas de alta à muito alta vulnerabilidade estão localizadas em regiões onde atualmente predomina a vegetação natural e o curso de drenagem, sendo que a primeira por não estar apenas em APP tende a dar lugar para a urbanização.

Por fim, a análise estatística realizada com o programa MATLAB que comparou os dois métodos utilizados, TauDEM e HAND, constatou que os resultados de 49,49% de pixels em comum para o córrego da Lagoinha e 46,75% de pixels em comum para o córrego Campo Alegre não são homogêneos. Considerando 5% de significância as distribuições dos pixels comuns em relação aos pixels totais, os métodos não podem ser considerados equivalentes na determinação da AVA.

5 CONCLUSÕES

Os modelos são sensíveis em áreas pequenas e que não possuam variações significativas de altitude, verificado na comparação com estudos realizados por Prates et. al (2011) e Alves (2012).

Por serem modelos distintos e cada um utilizar um algoritmo diferente, valores distintos foram encontrados, apesar de ambos terem correlação com as zonas úmidas e estarem baseados na topografia do terreno para espacializar estas regiões na bacia hidrográfica.

A modelagem do HAND mostrou-se mais robusta, com resultados mais definidos que os gerados pelo TauDEM, pois este último apresentou áreas fragmentadas e que não contemplavam regiões próximas aos canais de drenagem.

Assim, para definir o que são AVA nas microbacias foi realizada a correlação de ambos os modelos, devido que áreas de maior saturação, naturalmente encontram-se associadas aos canais de drenagem, assim, ao correlacionar o IT com a distância vertical a drenagem mais próxima, obtida pelo modelo HAND, chegou-se às AVA.

Constatou-se que as AVA coincidem com as APP, porém as primeiras encontram-se distribuídas por toda a microbacia, inclusive onde a atual ocupação é de construções e pavimentação, tornando o solo impermeabilizado portanto, não permitindo a dinâmica de expansão e contração inerente a estas áreas, as quais também deveriam estar protegidas, porém não são estipuladas pelo Código Florestal Brasileiro como de preservação permanente.

Ressalta-se que a expansão do perímetro urbano está ocorrendo em direção à zona sul do município de Uberlândia, portanto, localizar as AVA nesta região antes que o solo esteja em sua maioria impermeabilizado pelas construções e pavimentação é imprescindível para a proteção dos recursos hídricos, uma vez que estas áreas desempenham a manutenção da qualidade dos mesmos, ao absorverem parte do fluxo de água da precipitação até o limite

de saturação e, somente após, darem origem ao escoamento superficial que pode carrear sedimentos e poluentes para os cursos d'água.

Sendo assim, as AVA podem servir de instrumentos de proteção de recursos hídricos mais eficazes que as APP, pois as mesmas necessitam de modelagem hidrológica para serem obtidas, logo modelos que levam em consideração os aspectos físicos e a dinâmica destas áreas e que não se resumem a faixas simétricas de vegetação com tamanho estipulado pela calha regular do leito do curso d'água como determinado pela atual legislação brasileira.

Visando auxiliar a gestão das bacias hidrográficas, foram gerados a partir dos *buffers* das APP, dos mapas de uso e ocupação do solo e das AVA localizadas pelos modelos, os mapas de susceptibilidade das microbacias, os quais possibilitam indicar as áreas prioritárias a um manejo que vise a preservação das zonas úmidas e que não são contempladas pela atual legislação como APP.

As AVA nem sempre coincidem com a zona ripária, mas são áreas mais sensíveis da bacia que desempenham funções diminuindo a ocorrência de escoamento superficial, que pode causar erosão, arraste de nutrientes e de sedimentos para os cursos d'água e, principalmente as enchentes em ambientes urbanos, portanto devem ser incluídas nos planos de manejo de bacias hidrográficas em conjunto com o que a legislação brasileira estipula como APP, garantindo assim, a plena funcionalidade do ecossistema ripário.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. Contribuição à Geomorfologia da área dos Cerrados, Simpósio sobre o cerrado. São Paulo, EDUSP: 97-103, 1971.
- AGNEW, L.J. et al. Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application. **Journal of Environmental Management**, London, v. 78, p. 63-76, 2006.
- AHERN, J. Greenways in the USA: theory, trends and prospects. In: **Ecological Networks and Greenways: Concept, design, implementation**. JONGMAN, R. & PUNGETTI, G. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- ALVES, M.R. Múltiplas técnicas no mapeamento digital de solos. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2008, 160 p. Tese (Doutorado em Agronomia).
- ALVES DA SILVA, M. R.; MACIEL, L. S. C.; MOREIRA, M. F. Zoneamento ambiental—um estudo de caso do processo de uso e ocupação do solo no município de Uberlândia. **Geografia em Atos (Online)**, v. 1, n. 13, 2013.
- ANDERSSON, J. O.; NYBERG, L. Using official map data on topography wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments. **Hydrology and Earth System Science**, v. 13, p. 537-549, 2009.
- ARAÚJO NETO, M. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. **Revista Geonomos**, fev. 2013. Disponível em:<<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/226>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- ATTANASIO, C. M. **Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade**. 2004. 193 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2004.
- ATTANASIO, C. M. et al. Método para a identificação da zona ripária: microbacia hidrográfica do Ribeirão São João (Mineiros do Tietê, SP). **Scientia Forestalis**, n. 71, p. 131-140, agosto 2006.
- ATTANASIO JÚNIOR, M. R.; ATTANASIO, C. M.; TONIATO, M. T. Aspectos ecológicos da conservação e restauração florestal: bases para o direito ambiental. **Fatecnológica (FATEC-JAHU)**, v. 4, p. 91-106, 2011.
- BACCARO, C. A. D. Estudos geomorfológicos do município de Uberlândia. **Revista Sociedade & Natureza**. Uberlândia EDUFU – Ano 1, nº 4, 1989.

BACCARO, C. A. D. As unidades geomorfológicas e a erosão nos chapadões do município de Uberlândia. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n. 6, v. 11 e 12, janeiro, 1994. p. 19-33.

BAENINGER, R. O processo de urbanização no Brasil: características e tendências. In: BÓGUS E WANDERLEY (orgs.). **A luta pela cidade em São Paulo**. São Paulo: Cortez, 1992, pp. 11-29

BAKIR, M.; ZHANG, X. GIS-based hydrological modelling: A comparative study of HEC-HMS and the Xinanjiang model. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports**, v. 319, p. 124-133, 2008.

BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 132p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2005.

BEVEN, K.J.; WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M. On hydrological heterogeneity - catchment morphology and catchment response. **Journal of Hydrology**, v.100, p.353-375, 1988. Disponível em: <[http://dx.doi.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0022-1694\(88\)90192-8](http://dx.doi.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0022-1694(88)90192-8)>. Acesso em: 05 nov. 2014.

BORGES, D. J. **As condições sócio-ambientais de áreas de preservação permanente na zona urbana de Uberlândia**: aspectos paisagísticos e sociais. Dissertação de Mestrado em Biologia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2005. Disponível em: <<http://www.bdtd.ufu.br/tdebusca/resultado-tdes-prog.php>>. Acesso em: 5 jun. 2014.

BOSQUILIA, R. W. D. et al. Comparação entre modelos de mapeamento automático de drenagens utilizando SIG. **Anais...** In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

BRASIL, **Código Florestal** – Lei no. 12.651/2012, art. 2º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 1 maio 2014.

BRASIL, **Estatuto das Cidades** – Lei 10.257/2001, art. 2º. e art. 4º. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Acesso em: 1 maio 2014.

BRASIL, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico de Minas Gerais 1980, 1991, 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 26 ago. 2014.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Áreas de Preservação Permanente Urbanas**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/areas-verdes-urbanas/%C3%A1reas-de-prote%C3%A7%C3%A3o-permanente>>. Acesso em 30 ago. 2014.

BROOKS, E. S.; BOLL, J.; McDANIEL, P. A. Distributed and integrated response of a geographic information system-based hydrologic model in the eastern Palouse region, Idaho. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 21, p. 110-122, 2007.

BUARQUE, D. C. et al. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.

CAPPUS, P. (1960) Bassin experimental d'Alrance: etudes des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. **La Houille Blanche A**, 493-514.

CHECCHIA, T. Influência da zona ripária sobre os recursos hídricos: aspectos quantitativos e qualitativos. **Anais...** In: I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias – Alfredo Wagner/SC – 22/09/2003.

CHORLEY, R. J. (1978). The hillslope hydrological cycle. In: **Hillslope Hydrology**. KIRKBY, M. J. (Ed). John Wiley and Sons: 1-42.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrología Aplicada**. Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia. 583 p., 1994.

DA SILVA, K. N.; RIBEIRO FILHO, V. (2012). Desenvolvimento sócio-espacial e dinâmica urbana da zona sul da cidade de Uberlândia. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, (31), 69-78.

DE CASTRO, T. C. et al. Uso do índice topográfico na identificação de áreas potenciais para a recarga de aquífero na bacia hidrográfica do rio Bacanga, São Luís-MA, Brasil. **Anais...** 64ª Reunião Anual da SBPC, UFMA, São Luís, MA, 2012

DEL GROSSI, S. R. **De Uberabina a Uberlândia: os caminhos da natureza**. Tese de Doutorado. USP/FFLCH, São Paulo, 1991.

DICKINSON, W.T.; WHITELEY, H. Watershed areas contributing to runoff. In: **IAHS Publ.**, v. 96, p. 12-26, 1970. Disponível em:
[http://www.researchgate.net/profile/Hugh_Whiteley/publication/238797114_WATERSHWA AREAS CONTRIBUTING_TO_RUNOFF/links/00b7d52ccd2f338f9d000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Hugh_Whiteley/publication/238797114_WATERSHWA AREAS CONTRIBUTING TO RUNOFF/links/00b7d52ccd2f338f9d000000.pdf). Acesso em: 26 nov. 2014.

DOORNKAMP, J.C.; KING, C.A.M. (1971) **Numerical analysis in geomorphology: An introduction**. London: Edward Arnold Ltd., 372p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, INPE (Brasil). Divisão de Processamento de Imagens. Grupo de Modelagem para Estudos da Biodiversidade. **HAND Distância vertical à drenagem mais próxima**. São José dos Campos, SP. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/hand.php>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

Divisão de Processamento de Imagens DPI-INPE. **TerraViewHidro**. Disponível em:< <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro/>>. Acesso em: 14 set. 2015.

- DUNNE, T.; BLACK, R. D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. **Water Resources Research**, 6, p. 478-490, 1970a.
- DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff production in a small New England watershed. **Water Resources Research**, 6, p. 1296-1311, 1970b.
- DUNNE, T. (1978). Field Studies of Hillslope Flow Processes In: Kirkby, M.(Ed.), **Hillslope Hydrology**, New York: John Wiley & Sons, p.227-293.
- EMBRAPA. 1982. Serviço nacional de levantamento e conservação dos solos. Epamig (Belo Horizonte, MG). **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Boletim de pesquisa 1. Rio de Janeiro, RJ. p.34-43.
- EWATER TOOLKIT. Disponível em: <<http://www.toolkit.net.au/>>. Acesso em: 30 nov. 2014.
- FERRAZ, F.F.B. Aplicação de sistema de informações geográficas em estudo de área urbana de Piracicaba sujeita à inundação. [Tese de mestrado, CENA/USP, 1996].
- FORMAN, R. T.T. **Land Mosaics**. Cambrigde University Press, Cambridge, Reino Unido, 1995.
- FROSINI, F. et al. Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 14, p. 45-56, 1999.
- FRY, J. F.; STEINER, F. R.; GREEN, D. M. Riparian evaluation and site assessment in Arizona. **Landscape and Urban Planning**. Amsterdam, v. 28, p. 179-199, 1994.
- GROHMAN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v.2, n.2 p. 73-83, 2008. Disponível em:
<http://www.igc.usp.br/pessoais/guano/downloads/Grohmann_et.al_2008_RGA.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2015.
- GREGORY, S. V. et al. An ecosystem perspective of riparian zones. Focus on links between land and water. **BioScience**, Washington, v. 41, p. 540-551, 1991.
- GUIMARÃES, J. L. B. **Relação entre a ocupação do solo e o comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais-PR**. 2000. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- GUIMARÃES, R. Z. **Avaliação da qualidade de água no processo de recuperação de áreas de plantio de *Pinus taeda* em APP na bacia do Rio Campinas-Joinville-SC**. 2012. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W. International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon, Oxford, UK. 1966. p.275-290.

HERZOG, C. P. Corredores verdes: expansão urbana sustentável através da articulação entre espaços livres, conservação ambiental e aspectos histórico-culturais. In: Terra, Carlos G. e Andrade Rubens de. **Coleção Paisagens Culturais – Materialização da Paisagem através das Manifestações Sócio-Culturais**. UFRJ-EBA, 2008.

HIBBERT, A.R.; TROENDLE, C.A. Streamflow by variable source area. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, D.A.Jr. (Ed.). **Forest Hydrology and Ecology at Coweeta**. New York: Springer, 1987. p. 111-128.

HICON. Atualização da metodologia para demarcação das faixas marginais de proteção no estado do Rio de Janeiro. Desenvolvimento de Metodologia para Demarcação das Faixas Marginais de Proteção no Estado do Rio de Janeiro. **Nota Técnica INEA 009/2011**. Abril/2011.

HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology** 106, p. 211-232. 1989. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/222463571_A_new_procedure_for_gridding_elevation_and_stream_line_data_with_automatic_removal_of_spurious_pits. Acesso: 06 fev. 2015.

IBGE. **Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014. Disponível em:
<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>. Acesso em: 19 fev. 2014.

JOHNSON, M. S. et al. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. **J. Hydrol.**, 284, 57–76, 2003.

JÚNIOR, O. B. Interferência entre a ocupação urbana e a dinâmica no litoral sul do Paraná. **Análise Conjuntural**, v.25, n.11-12, p.13, 2003.

KIRKBY, M.J. Infiltration, throughflow and overland flow. In: CHORLEY R.J. **Water, Earth and Man**. Methuen, London, 1969. p.215-227.

KOBIYAMA, M. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. In: SEMINÁRIO DE HIDROLOGIA FLORESTAL: ZONAS RIPÁRIAS, I, 2003, Alfredo Wagner. **Anais...** Pós-Graduação em Engenharia Ambeintal – PPGEA – UFSC, Florianópolis. 2003. Versão eletrônica.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba: Organic Trading, 2008. 160p. Disponível em:
<http://www.revistageonorte.ufam.edu.br/attachments/article/7/Rela%C3%A7%C3%A3o%20entre%20desastres%20naturais%20e%20floresta.pdf>. Acesso 18 jan. 2015.

KUNKLE, S.H. (1974). Agua - Su calidad suele depender del forestal. **Unasylva**.

26(105):10-16.

LIMA, W.P. Relações hidrológicas em matas ciliares. In: HENRY, R. (Ed.). **Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos**. São Carlos: Rima Editora, 2003. p.301-312.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H.F.(Ed.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. São Paulo: EDUSP/ Fapesp, 2000. p.33-44.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. O papel do ecossistema ripário. In: LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. (Org.). **As florestas plantadas e a água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: RiMa, 2006. p. 77-87.

LINO, J.F.L. et al. Análise da Vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Preto com o Modelo SWAT. In: Simpósio Brasileiro de Recurso Hídrico, 18, 2009. Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1-20.

LUDWIG, R.; MAUSER, W. Modelling catchment hydrology within a GIS based SVAT-model framework. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, n. 2, p. 239-249, 2000.

LUIZ, E. L. **Influência da dinâmica hidrológica e das características das formações superficiais nos mecanismos de rupturas das encostas com rochas granitoides de áreas subtropicais – São Pedro de Alcântara/SC**. Instituto de Geociências, UFRJ, Tese (doutorado), Rio de Janeiro, 2003.

MAFRA, N. M. C. Erosão e planificação de uso do solo. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; SILVA, Antônio Soares da; BOTELHO, Rosangela Garrido Machado (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos**: Conceitos, temas e aplicações. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. Cap. 9. p. 301-320.

MEDEIROS, J. D. A demarcação de áreas de preservação permanente ao longo dos rios. **Biotemas**. 26(2), p. 261-270, junho 2013.

MEHTA, V. K. et al. Application of SMR to modeling watersheds in the Catskill Mountains. **Environmental Modeling and Assessment**, Amsterdam, v. 9, p. 77-89, 2004.

MEIJERINK, A.M.J. (1988) Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, 1: 23- 44.

MELLO, C.R.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M. Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MENDES. P. C. **A gênese espacial das chuvas na cidade de Uberlândia – MG**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2001. 237 p. (Dissertação Mestrado em Geografia).

MENKE, et al. Classificação pelo método K-médias das bacias de drenagem do rio Ipanema (AL/PE) considerando os atributos morfométricos. **Geo UERJ**, v. 2, n. 24, 2014. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/viewFile/2810/9088>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

MILLER, S. N. et al. GIS-based hydrologic modeling: the automated geospatial watershed assessment tool. In: **Proceeding of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference**. 2002. p. 12.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, Set. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012000900010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 18 jan. 2015.

MIRANDA, E. E. de (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MOORE, I.D. et al. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991

MORAES, J. M. et. al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.8, n.1, p.61-70, 2003.

MOTA, A. A.; GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Relação entre sinuosidade e índices topográficos na zona topográfica fluvial. **Revista Geonorte**, v.9, n.1, p.42-60, 2013.

PEREIRA, V. R. **Identificação de áreas com potencial para a produção de sedimentos a montante dos reservatórios do Sistema de Abastecimento Cantareira: os reservatórios de Cachoeira e Atibainha**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)-Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PEREIRA DIAS, A. **Análise espacial aplicada à delimitação de áreas úmidas da planície de inundação do médio Araguaia**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

PRATES, V. Utilização de índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂDIA. Diagnóstico estratégico de habitação de interesse social. 2009. Disponível em: <http://www.uberlandia.mg.gov.br/uploads/cms_b_arquivos/6342.pdf>. Acesso 30 maio 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA. Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. Disponível em: <www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso 26 ago. 2014.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, **Hydrological Processes**, Chichester, v. 5, p. 59–79, 1991.

QUINN, F.; BEVEN, K. J.; LAMB, R. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the Topmodel framework. **Hydrological Processes**, v.9, p.161-182, 1995. Disponível em: < [ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/\[1995\]20quinn%20-%20the%20ln%28atanbeta%29%20index%20and%20how%20to%20calculate%20it%20a%20how%20to%20use%20it%20within%20the%20topmodel%20framework.pdf](ftp://www.lwr.kth.se/Common/UllaM/For_Imran/[1995]20quinn%20-%20the%20ln%28atanbeta%29%20index%20and%20how%20to%20calculate%20it%20a%20how%20to%20use%20it%20within%20the%20topmodel%20framework.pdf)>. Acesso: 30 jan. 2015.

RAMOS, V. M., et al. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Porto Alegre, n. 2, p. 41-49, 2003.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese Doutorado do Curso da Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 2003. 158p.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. **Anais...** XI Simpósio Brasileiro Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, MG, 2003.

RENNÓ, C. D., NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112(9). 2008.

RICHERSON, P.J.; LUM, K. Patterns of plant species diversity in California: relation to weather and topography. **American Naturalist**, v.116, n.4, p.504-536, 1980.

RODRIGUES, G. O. et al. Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) – estudo de caso em Manaus/AM. **Anais...** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5769-5776.

ROSA, R., LIMA, S.C., ASSUNÇÃO, W.L. Abordagem preliminar das condições climáticas de Uberlândia-MG. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.3, n.5 e 6, p.91-108. Jan/dez., 1991.

ROSIM, S. Estrutura baseada em grafos para representação unificada de fluxos locais para modelagem hidrológica distribuída. 2008. 107p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada), INPE, São José dos Campos, 2008.

SÁNCHEZ, P. S. O processo de ocupação em áreas de proteção aos mananciais: conflito com a lei e realidade social na Região Metropolitana de São Paulo. In: MARTINS, R. C.;

VALENCIO, N. F. L. S (eds.). **Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil**. São Carlos: Rima, 2003. 293p.

SANTOS, I. Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 2009. 167f. **Tese** (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS, J. B. Geotecnologias na delimitação de áreas prioritárias à recomposição florestal na sub-bacia do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2013.

SANTOS, R. L. et al. O sistema de informações geográficas aplicado à modelagem hidrológica. In: GEONORDESTE, 2008, Aracajú - SE. GEONORDESTE - IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 2008.

SECRETARIADO DA CONVENÇÃO SOBRE DIVERSIDADE BIOLÓGICA – CDB. **Panorama da Biodiversidade Global 3**, Brasília, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas (MMA), 2010. 94 p. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf2008_dcbio/_arquivos/terceiro_panorama_147.pdf Aces 14 jul. 2014.

SIEFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidromórficos**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SIEFERT, C. A. C.; DOS SANTOS, I. Áreas hidrologicamente sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR, **Brasil Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, vol. 5, nûm. 2, 2010, p. 61-76, Universidade de Taubaté, Brasil.

SIEFERT, C. A. C.; DOS SANTOS, I. Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação de áreas de preservação permanente. **Ra'e Ga-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 24, 2012.

SILVA, A.M da.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B de. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2007, 2ed.158p.

SILVA, M. M. D. **Dinâmica espaço-temporal das áreas variáveis de afluência da bacia do córrego do Cavalheiro**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2012.

SILVEIRA, A. L. L. Apostila: **Drenagem Urbana: aspectos de gestão**. 1. Ed. Curso preparado por: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Fundo Setorial de Recursos Hídricos (CNPq), 2002.

SCHIAVINI, J.; ARAUJO, G. M. Considerações sobre a vegetação da Reserva Ecológica do Panga (Uberlândia). **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n. 1, v. 1, 1989.

SOUZA, M. C. Algumas considerações sobre vegetação ripária. **Cadernos da Biodiversidade**, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 4-10, 1999.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v.33, n.2, p. 309-319, 1997.

TARBOTON, D. G. **Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)**. Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>>. Acesso 18 out. 2014.

TEIXEIRA, M. A. C. **Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais. Utilização de modelos matemáticos de base física na bacia de Tibo, Arcos de Valdevez**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território), Universidade do Porto, Portugal, 2012.

THE JAPAN SOCIETY OF EROSION CONTROL ENGINEERING. (2000). “Management of Riparian Zone”. Tokyo, Kokon-Shoin. 329p.

TSUKAMOTO, Y. Storm discharge from an experimental watershed. **J. Japanese Soc. Forestry** 45, 1963. p. 186-190.

TUCCI, C. E. M. **Curso de Gestão das inundações urbanas**. Porto Alegre: UNESCO – Global Water Partnership South America - Asociación mundial del agua, 2005a. Disponível em: <<http://www.vitalis.net/Manual20Gestion%20de%20Inundaciones%20Urbanas.pdf>>. Acesso em: 4 de jun. 2014.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre, 2005b. 669 p.

UBERLÂNDIA, Prefeitura Municipal. **Plano diretor da cidade de Uberlândia. (Diagnóstico preliminar)** Uberlândia, 1991, 115 p.

URL 1, Hydrology Research Group - David Tarboton:
<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html>.

URL 2, INPE: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>

URL 3, Página pessoal do pesquisador: <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/hand/>

XAVIER, M. C. R. **Estudo da distribuição espacial de vazões na gestão dos recursos hídricos**. 2007. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de

Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WALTER, M.T. et al. Hydrologically sensitive areas: Variable source area hydrology implications for water quality risk assessment. **Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny**, v. 55, n. 3, p. 277-284, 2000.

WALTER, M. T. et al. Simple estimation of prevalence of Hortonian flow in New York City watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.8, n.4 (1), p.214-218, 2003.

ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental**: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. São Carlos: USP, 1998. 98 p. Tese (doutorado).

ZAKIA, M.J.B.; RIGHETTO, A.M.; LIMA, W.P. Delimitação da zona ripária em uma microbacia. In: LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. (Org.) **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: RIMA, 2006. p. 89-106.

ZOLLWEG, J. A., GBUREK, W. J.; STEENHUIS, T. S. SMoRMod A GIS integrated rainfall runoff model applied to a small northeast U.S. watershed, **Trans. ASAE**, 39, 1299-1307, 1996.