



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS: CASO DA
AVENIDA ARAGUAIA EM ARAGUATINS - TO**

LUCAS KELVIN ARAÚJO COSTA

Foz do Iguaçu
2021



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS: CASO DA
AVENIDA ARAGUAIA EM ARAGUATINS - TO**

LUCAS KELVIN ARAÚJO COSTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientadora: Prof. Ma. Mara Rubia Silva
Coorientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo

Foz do Iguaçu
2021

LUCAS KELVIN ARAÚJO COSTA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS: CASO DA
AVENIDA ARAGUAIA EM ARAGUATINS - TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Ma. Mara Rubia Silva
UNILA

Prof. Dr. César Winter de Mello
UNILA

Prof. Ma. Tatiana Ferreira Wanderley
UFT

Foz do Iguaçu, 08 de dezembro de 2021.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Lucas Kelvin Araújo Costa

Curso: Engenharia Civil de Infraestrutura

	Tipo de Documento
graduação	(x) (.....) artigo
especialização	(.....) (x) trabalho de conclusão de curso
mestrado	(.....) (.....) monografia
doutorado	(.....) (.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....)

Título do trabalho acadêmico: Geotecnologias aplicadas ao estudo de alagamentos: Caso da Avenida Araguaia em Araguatins – TO

Nome da orientadora: Mara Rubia Silva

Nome do coorientador: Jiam Pires Frigo

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial a meus pais, Maria Josinete e Adailton, por todo o esforço e suporte oferecidos durante o período de graduação e de vida, o que foi fundamental para a execução deste trabalho, também a meus irmãos, Déborah, Lays, Lhairton e Victor, que em diversos momentos estiveram presentes e prestaram apoio relevante.

A meus orientadores, por toda a dedicação de tempo e apoio, me direcionando para o melhor caminho não só nesta pesquisa, mas em diversos momentos da trajetória acadêmica.

Aos docentes e servidores da Universidade Federal da Integração Latino - Americana, a vivência na instituição foi enriquecedora muito por conta do serviço prestado, sou grato a todos da UNILA envolvidos direta e indiretamente na execução deste trabalho.

Aos amigos e colegas do curso de Engenharia Civil de Infraestrutura que acompanharam esta caminhada, agradeço todo o suporte e compreensão, este trabalho é também fruto da integração e aprendizado diário vividos com eles.

A Cerrados Florestal, na figura de Pedro Galvão, que ministrou o curso de geoprocessamento no qual me guiei para execução deste trabalho, o material foi fundamental para a geração dos produtos necessários para a pesquisa, espero retribuir o apoio.

A meus amigos de Araguatins, os quais fazem parte da minha rede de apoio e se fizeram presentes sempre que necessário durante este período.

COSTA, Lucas Kelvin Araújo. **Geotecnologias aplicadas ao estudo de alagamentos: Caso da Avenida Araguaia em Araguaatins - TO.** 2021. Número de páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

RESUMO

A urbanização com alta taxa de impermeabilização do solo faz parte da dinâmica socioeconômica e ambiental das cidades brasileiras, causando diferentes impactos ao Meio Ambiente. Um deles é a alteração do ciclo natural das bacias hidrográficas, visto que a taxa de infiltração da precipitação é diminuída, e os caminhos preferenciais do escoamento superficial alterados, resultando na necessidade de gestão das águas pluviais urbanas. Diante disto, municípios com ausência ou ineficiência de redes de drenagem urbana são mais suscetíveis a eventos de alagamentos, que se tornam cada vez mais recorrentes. Esta pesquisa tem por objetivo elencar as condicionantes de ocorrência dos eventos de alagamento na Avenida Araguaia, na cidade de Araguaatins – TO. Mediante a utilização de Geotecnologias e de visitas de campo, deu-se enfoque em relacionar os eventos de alagamento às características fisiográficas das microbacias de contribuição, às condições de drenagem da avenida, e às características de uso e ocupação do solo nos arredores. Um mapa de susceptibilidade foi confeccionado com auxílio do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e de Sensoriamento Remoto, o qual permitiu corroborar o trecho crítico da avenida, levantado anedoticamente. Encontrou-se uma relação direta entre as condicionantes avaliadas e os eventos de alagamento, principalmente baixas declividades atreladas à impermeabilização do solo, além da confirmação da necessidade de implementar-se medidas estruturais e não estruturais para reduzir-se a susceptibilidade de maneira economicamente viável, socialmente justa e ambientalmente correta.

Palavras-chave: Drenagem Urbana; Alagamentos; Bacia Hidrográfica; Geotecnologias, AHP.

COSTA, Lucas Kelvin Araújo. **Geotechnologies applied to rainwater flooding: Case study of Araguaia Avenue in Araguatins - TO.2021.** Número de páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

ABSTRACT

Urbanization with a high rate of soil impermeabilization is part of the socioeconomic and environmental dynamic of Brazilian cities, causing different impacts on the environment. One of them is the alteration of the natural cycle of the hydrographic basins, since infiltration rates are reduced and the preferential paths of the surface runoff altered, resulting in the necessity of urban rainwater management. Considering this, cities with an absence or inefficiency of urban drainage networks are more susceptible to flooding events, which become increasingly recurrent. This research aims to list the conditions for the occurrence of flooding events on Araguaia Avenue, in the city of Araguatins - TO. Through the use of Geotechnologies and field visits, the focus will be on relating the flooding events to the physiographic characteristics of the contributing watersheds, the drainage conditions of the avenue, and land use in the surroundings. A susceptibility map will be produced with the aid of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Remote Sensing, which will allow the confirmation of the critical points indicated anecdotally along the avenue. A direct relationship is expected to be found between the evaluated conditions and the magnitude of flooding events, in addition to confirming the need to implement structural and non-structural measures to reduce vulnerabilities in an economically viable, socially fair and environmentally correct manner.

Key words: Urban Drainage; Precipitation; Hydrographic Basin; Geotechnologies.

COSTA, Lucas Kelvin Araújo. Geotecnologías aplicadas al estudio de inundaciones: Caso de la Avenida Araguaia en Araguatins - TO.2021. Número de páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

RESUMEN

La urbanización con una alta tasa de impermeabilización del suelo es parte de la dinámica socioeconómica y ambiental de las ciudades brasileñas, provocando diferentes impactos en el medio ambiente. Uno de ellos es la alteración del ciclo natural de las cuencas hidrográficas, ya que se reducen las tasas de infiltración y se alteran las trayectorias preferenciales de la escorrentía superficial, resultando en la necesidad de un manejo urbano de aguas pluviales. Considerando esto, las ciudades con ausencia o ineficiencia de redes de drenaje urbano son más susceptibles a eventos de inundaciones, que se vuelven cada vez más recurrentes. Esta investigación tiene como objetivo enumerar las condiciones para la ocurrencia de eventos de inundación en la Avenida Araguaia, en la ciudad de Araguatins - TO. Mediante el uso de Geotecnologías y visitas de campo, el enfoque estará en relacionar los eventos de inundación con las características fisiográficas de las cuencas hidrográficas contribuyentes, las condiciones de drenaje de la avenida y el uso del suelo en los alrededores. Se elaborará un mapa de susceptibilidad con la ayuda del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y Teledetección, que permitirá confirmar los puntos críticos señalados anecdóticamente a lo largo de la avenida. Se espera encontrar una relación directa entre las condiciones evaluadas y la magnitud de los eventos de inundación, además de confirmar la necesidad de implementar medidas estructurales y no estructurales para reducir las vulnerabilidades de manera económicamente viable, socialmente justa y ambientalmente correcta.

Palabras clave: Drenaje Urbano; Precipitación; Cuenca Hidrográfica; Geotecnologías.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípio básico de funcionamento dos sensores ópticos.....	19
Figura 2. As linhas contínuas indicam a distância do <i>pixel</i> candidato às respectivas classes.....	21
Figura 3. Representação gráfica de uma hierarquia.	23
Figura 4. Delimitação da área de interesse.....	27
Figura 5. Avenida Araguaia e Microbacias de interesse.....	29
Figura 6. A)Representação da área de interesse em Cor Natural; e B)Representação em Falsa Cor.	34
Figura 7. Pista principal no Trecho AB.	35
Figura 8. Canteiro no Ponto A.....	35
Figura 9. Cruzamento Av.Araguaia e R.Bartolomeu Bueno (Trecho AB)	35
Figura 10. Cruzam.Av.Araguaia e Av.Castelo Branco (Ponto B).	36
Figura 11. Acúmulo de água no Canteiro leste, no Trecho BC.....	36
Figura 12. Cruzamento Av.Araguaia e Av.Castelo Branco (Ponto B).	36
Figura 13. Acúmulo de água no canteiro leste, no Trecho BC.	36
Figura 14. Cruzamento Av.Araguaia e R.Bartolomeu B.	36
Figura 15. Processo Analítico Hierárquico – Esquema de aplicação.Adaptado de Caprario (2019).	40
Figura 16. Aplicação da AHP para confecção de mapa de Susceptibilidade a alagamentos via SIG e Sensoriamento Remoto.	41
Figura 17. Pedologia de Araguatins-TO.	43
Figura 18. Trecho AB – Cruzamento Av.Castelo Branco.....	44
Figura 19. Trecho AB – Cruzamento R.Bartolomeu Bueno.....	44
Figura 20. Trecho AB – Cruzamento R.Bartolomeu Bueno.....	44
Figura 21. Mapa de Hipsometria e Drenagem das Microbacias de interesse.	45
Figura 22. Mapa de Declividade das Microbacias de interesse.	46
Figura 23. Perfil Longitudinal da Avenida.....	47
Figura 24. Perfil Longitudinal do Trecho crítico.	47
Figura 25. Caracterização do Trecho Crítico.....	48
Figura 26. Perfil Longitudinal da Rua 13 de Outubro	48
Figura 27. Perfil Longitudinal da Av. Dom Orione.....	49
Figura 28. Perfil Longitudinal da Avenida Castelo Branco	49

Figura 29. Mapa de Uso e Ocupação do Solo.	50
Figura 30. Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Sub-bacias de contribuição direta.	52
Figura 31. Percentuais de Uso e Ocupação – Comparação entre a área de todas as sub-bacias de contribuição e as sub-bacias BC-1 e BC-5.....	53
Figura 32. Mapa de Susceptibilidade a alagamentos.	56
Figura 33. Distribuição espacial das classes de susceptibilidade – comparativo entre as áreas delimitadas.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. População Residente, Densidade Demográfica, Taxa de Urbanização e Taxa de Crescimento - 1991, 2000 e 2010.....	28
Tabela 2. Bandas Espectrais do Sentinel 2.....	32
Tabela 3. Escala fundamental de Saaty.....	37
Tabela 4. Matriz de comparação pareada.....	37
Tabela 5. Índice de Consistência Aleatório.....	39
Tabela 6. Características Físicas das Microbacias.....	42
Tabela 7. Reclassificação dos Mapas de Caracterização das Microbacias.....	54
Tabela 8. Matriz de comparação pareada dos fatores.....	55
Tabela 9. Distribuição espacial das classes de susceptibilidade.....	57
Tabela 10. Distribuição espacial das classes de uso e ocupação nas sub-bacias BC-1 a BC-5.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas

AHP Processo Analítico Hierárquico

ALOS *Advanced Land Observing Satellite*

CAD Desenho Assistido por Computador

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC Índice de Circularidade

INPE Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

KC Coeficiente de Compacidade

KF Fator de Forma

MDE Modelo Digital de Elevação

MDS Modelo Digital de Superfície

MDGE Modelo Digital Global de Elevação

MSI *Multispectral Imager*

PALSAR *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*

REM Energia Eletromagnética

SEPLAN Secretaria do Planejamento e Orçamento do Tocantins

SIG Sistema de Informação Geográfica

SHP *Shapefile*

SR Sensoriamento Remoto

TIFF *Tagged Image File Format*

UNILA Universidade Federal da Integração Latino-Americana

USGS *Sole Science Agency for the Department of the Interior*

WGS *World Geodetic System*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	11
2.2 BACIA HIDROGRÁFICA	12
2.3 DRENAGEM URBANA	13
2.4 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS	15
2.4.1 Sensoriamento Remoto	16
2.4.1.1 Dados de Radar	17
2.4.1.2 Dados de Sensores Ópticos	18
2.5 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP)	23
3 MÉTODO DE PESQUISA	26
3.1 ARAGUATINS – TO E A ÁREA DE ESTUDO	26
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
3.2.1 Dados Planialtimétricos	30
3.2.2 Dados de Uso e Ocupação do Solo	32
3.2.3 Aspectos Estruturais e Trecho Crítico	34
3.2.4 Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Nível de Susceptibilidade	36
4 RESULTADOS	42
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MICROBACIAS DE INTERESSE	42
4.1.1 Características Físicas e Tipo de Solo	42
4.1.2 Hipsometria e Declividade	44
4.1.3 Uso e Ocupação do Solo	50
4.2 SUSCEPTIBILIDADE A ALAGAMENTOS	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
5.1 RECOMENDAÇÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

Os eventos de alagamentos, enchentes ou inundações, tornam-se cada vez mais recorrentes nas cidades brasileiras, inclusive nas de menor porte, por exemplo, conforme observado por Michel (2019) e Cerquinha e Melo (2013), que analisaram as cidades de Sarandi-RS e Serra Talhada-PE, respectivamente. Municípios deste porte estão numa fase de desenvolvimento em que ainda é possível - pelo menos em parte da cidade - planejar o uso e ocupação do solo de modo a evitar eventos indesejados. Para Alves Filho e Ribeiro (2006), que se referem às enchentes diretamente, tais eventos deveriam gerar na sociedade um questionamento acerca do modelo de ocupação urbana utilizado.

Segundo Tucci (2012), os principais problemas diretos da urbanização desordenada, que causam impactos sobre os recursos hídricos são: expansão irregular sobre áreas de mananciais; ocupação de área de risco de encostas e inundações; aumento da demanda de água e da carga de poluentes sem tratamento de águas residuais; impermeabilização das áreas públicas, canalização de rios urbanos, produzindo inundações. De maneira preventiva, a existência dos Planos de Saneamento Básico e de Uso e Ocupação do Solo é importante para os municípios evitarem ou amenizarem os problemas relacionados a alagamentos, inundações ou enchentes, decorrentes de deficiências nos sistemas de drenagem.

No âmbito Federal, a existência de tais planejamentos é contemplada em algumas Leis, uma delas é a Lei Federal nº 14.206/2020, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, onde, em seu inciso IV, Art.2º, inclui-se a “serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, tratamento, limpeza e fiscalização preventiva das redes, adequados à saúde pública, à proteção do meio ambiente e à segurança da vida e do patrimônio público e privado” (BRASIL, 2020b).

Na atualidade, com o desenvolvimento contínuo das geotecnologias, como por exemplo, o Sistema de Informações Geográficas (SIG), pode-se cruzar dados hidrológicos, aspectos estruturais e de características fisiográficas das bacias de contribuição. Por isso, tais ferramentas mostram-se efetivas no estudo e gestão das águas pluviais nas cidades, pois permitem uma análise macro da problemática em menos tempo, com mapeamento e definição de áreas de risco, incluindo a compreensão dos processos hidrológicos envolvendo toda a bacia hidrográfica, evitando a transferência de impactos para jusante (MANTIS; VAZ, 2019).

A facilidade em acessos gratuitos aos produtos de imageamento terrestre tem crescido a cada dia, tal como os resultados da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) ou “*Advanced Land Observing Satellite*” (ALOS), com os quais é possível gerar Modelos Digitais Globais de Elevação (MDGE) para análise de risco de inundações e alagamentos, mostrando-se uma ferramenta muito útil (BRUBACHER; OLIVEIRA, 2012). E também produtos dos satélites Sentinel, que são utilizados para detalhamento do uso e ocupação do solo, através de métodos como a Classificação de Imagem Orientada ao Objeto (OBIA), ferramentas úteis quando utilizadas de maneira adequada quanto a escolha das imagens, do método, e a qualidade do pré-processamento (PHIRI; MORGENROTH, 2017).

A precisão desses resultados é relevante para cidades como Araguatins, que com um PIB per capita de R\$ 8.9568,35 em 2014, ocupando a 16ª posição dentre os 139 municípios do estado (SEPLAN, 2017), caracteriza-se como um importante polo econômico do extremo norte do Tocantins. Localizada na divisa com o estado do Pará, na microrregião do Bico do Papagaio, a cidade passa a vivenciar mudanças demográficas mais significativas a partir da criação do território do estado do Tocantins, pela Constituição Federal Brasileira de 1988 (BRASIL, 1988), evoluindo de uma taxa de urbanização de 45,54% em 1991 para 64,27% em 2010 (último censo) (SEPLAN, 2017).

Segundo Ferreira Barbosa et al. (2019), os polos econômicos do Tocantins localizados às margens e nas proximidades da rodovia BR 153 sofrem maior influência em termos de desenvolvimento, devido a estrutura de transporte e facilidades de deslocamento nas respectivas vias de tráfego. Araguatins não se desenvolveu às margens da rodovia supracitada (Belém-Brasília), mas sim da TO-010, rodovia estadual que faz ligação com a BR-230, também conhecida como Transamazônica, importante rota de conexão entre os estados do Pará, Maranhão e Tocantins.

A Avenida Araguaia, trata-se de um trecho de perímetro urbano da rodovia TO-010, que conectada à BR-230, integram também a região do MATOPIBA – Maranhão, Tocantins, Piauí, Bahia – onde, segundo Buainain et al. (2017), existe uma dinâmica agropecuária que é central nas tomadas de decisões do setor privado quanto à investimentos que promovam o desenvolvimento regional, e também na formulação de políticas públicas adequadas à região. Os eventos de alagamentos que ocorrem em determinados pontos da Avenida causam transtornos à população local e atrapalham a dinâmica socioeconômica e ambiental da cidade, visto que a Avenida de estudo é uma importante rota de tráfego, seja humano ou de mercadorias.

Os serviços de saneamento básico de Araguatins são de competência do Serviço Municipal de Saneamento (SEMUSA), criado pela Lei 711/1999, e segundo a mesma, em seu Artigo 2º, compete, também ao SEMUSA, realizar direta ou indiretamente a construção, ampliação ou recuperação das obras relacionadas ao esgoto sanitário e drenagem urbana do Município, entretanto, ambos os sistemas ainda não foram totalmente implantados.

Para tanto, justifica-se a realização de pesquisas e levantamento de dados que sirvam de orientação na construção de documentos pertinentes ao planejamento urbano, auxiliando nas tomadas de decisões em relação a investimentos em infraestrutura viária e drenagem urbana. Neste trabalho, buscou-se, através de produtos gerados a partir de geotecnologias, e do Processo Analítico Hierárquico (AHP), elencar e avaliar as condicionantes dos eventos de alagamento na Avenida Araguaia em Araguatins-TO, que por ser uma Avenida municipal e uma rodovia Estadual (TO-010) ao mesmo tempo, mostra-se uma importante rota para a manutenção da dinâmica socioeconômica da região.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Utilizar ferramentas de Geotecnologias para elencar as condicionantes naturais e estruturais que ocasionam eventos de alagamento na região da Avenida Araguaia em Araguatins – TO.

1.1.2 Objetivos Específicos

- A) Determinar as características fisiográficas das microbacias de drenagem da região proposta;

- B) Avaliar as condições de micro e macrodrenagem atuais na Avenida Araguaia e elencar os pontos críticos;
- C) Analisar a relação entre uso e ocupação do solo e eventos de alagamento na região de estudo;
- D) Utilizar o Processo Analítico Hierárquico (AHP) para o mapeamento da susceptibilidade a alagamentos das microbacias de interesse.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), o ciclo hidrológico mostra-se como o conceito central da Hidrologia, é o fenômeno de circulação fechada da água, influenciado pela energia solar, gravidade e rotação terrestre. A energia do sol provoca o aquecimento das águas superficiais, do solo e do ar, resultando a evaporação da água líquida e a evapotranspiração da água do solo, através das plantas.

O vapor de água gerado se direciona à atmosfera, e sob determinadas condições, formam-se microgotículas de água que se mantêm suspensas até o momento da transferência para a superfície da terra, seja por chuva, neve, granizo ou orvalho, todos definidos como precipitação, que ocorre devido às movimentações das massas de ar e ao fato de o peso das partículas já superar as forças de turbulência. Durante o trajeto à superfície, a precipitação é interceptada de três (3) principais maneiras: a evaporação durante o trajeto; interceptação pela cobertura vegetal; vento (esta água irá precipitar em outra região). Assim a precipitação que atinge o solo é infiltrada até a saturação superficial do maciço, neste ponto, a infiltração reduz para uma taxa residual, formando-se o escoamento superficial (SILVEIRA; TUCCI, 1997).

A magnitude do escoamento superficial é função da intensidade das chuvas, da capacidade de infiltração do solo e das características da bacia hidrográfica. A água que atinge o solo tende a escoar para as cotas mais baixas e chegar a um curso d'água, é um fenômeno complexo devido à variabilidade das características da bacia e dos diferentes caminhos tomados pela água (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Nas microbacias urbanas tem-se o poder de absorção reduzido, devido à impermeabilização do solo, e um conseqüente aumento do escoamento superficial, fato que pode se agravar nos próximos anos. Segundo relatório do IPCC (2014) existe uma tendência de aumento da proporção de precipitações pesadas em regiões tropicais ao longo do século 21, isso em função do aquecimento global, sendo assim, propõe-se uma gestão de águas pluviais mais eficiente para pequenas e médias cidades, em adaptação às mudanças climáticas.

O aumento das temperaturas médias do Brasil entre 1961 e 2011 foi estudado por Salviano et al. (2016), e neste estudo, para a região Norte foram encontradas

tendências positivas na temperatura média e na precipitação, indicando assim que mudanças importantes estão ocorrendo, mesmo que estudos mais aprofundados estejam sendo realizados, tais mudanças encontradas pelos autores podem justificar as alterações de precipitações e os consequentes impactos na agricultura, no ciclo hidrológico e nas pessoas, exigindo uma visão holística na gestão das águas pluviais.

2.2 BACIA HIDROGRÁFICA

No tópico anterior, descreveu-se o ciclo hidrológico do ponto de vista global, como um sistema fechado, entretanto, da perspectiva da engenharia, segundo Silveira (1997), a fase terrestre do ciclo reveste-se da maior importância dos estudos, onde a bacia hidrográfica é o elemento central, atribuindo ao ciclo hidrológico um caráter regional, com perdas em relação à quantidade de água que entra e a que sai da bacia, aqui tratada como um sistema. De acordo com Villela e Mattos (1975), considerando uma bacia fictícia, totalmente impermeável, onde aplica-se um temporal “*input*” (I), um escoamento “*output*” (O) será direcionado ao exutório¹, o balanço hídrico neste sistema pode ser representado pela Equação 1.

$$I - O = \frac{ds}{dt} \quad \text{Equação 1}$$

Onde (I), (O) e ds/dt são o *input* por unidade de tempo, o *output* por unidade de tempo e a variação do armazenamento dentro do sistema por unidade de tempo, respectivamente. Ainda segundo os autores, uma vez que o evento de precipitação se encerra, a água presente na superfície continuará escoando até deixar a bacia como vazão efluente. Tratando-se de bacias reais, deve-se considerar as perdas durante o processo, como a evaporação, infiltração, e o acúmulo nas depressões do terreno. Em bacias ou sub-bacias urbanas, tais depressões podem ser uma das condicionantes para eventos de alagamentos.

A propensão à eventos de enchentes/alagamentos pode ser elucidada a partir de índices de caracterização morfométrica, como apresentado na pesquisa Souza et

¹ A bacia hidrográfica é a área de captação natural da água advinda da precipitação, e direciona os escoamentos para um único ponto ou seção transversal de saída, seu exutório (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

al. (2021), os autores caracterizam a bacia do Riacho do Navio em Pernambuco através da área e perímetro de drenagem, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, altitudes, declividades, e densidade de drenagem. Evidenciando a relevância dos dados para a gestão dos recursos hídricos da região. Assim como apresentado por Fiorese (2020), na caracterização da sub-bacia do córrego Mão Forte Quente, no Espírito Santo, o autor indica parâmetros que podem justificar problemas de abastecimento, tendência à erosão e assoreamentos.

Tingsanchali (2012) frisa a importância em estudar-se as microbacias hidrográficas, pois em muitos casos, as mesmas estão presentes em duas ou mais unidades político-administrativas, ou seja, as atividades à montante afetam todos os recursos hídricos e transferem os problemas ambientais para os municípios a jusante. O autor ainda descreve conceitos, políticas, planos e operações frente a desastres de inundações urbanas e gestão de riscos, e defende uma descentralização da gestão dos desastres, ou seja, o ideal é que se tenha mais participação de instituições não-governamentais e dos setores privados.

O fato é que toda a gestão de inundações ou alagamentos urbanos parte da análise das microbacias hidrográficas em questão, como realizado por Caprario *et al.* (2019), os autores avaliaram a redução da susceptibilidade à alagamentos urbanos em função do uso de técnicas compensatórias² na microbacia do Distrito de Campeche, em Florianópolis-SC, em que constataram a possibilidade de redução de 27% de susceptibilidade quando tem-se uma drenagem associada a um Plano Diretor de Gestão de Águas Pluviais, incentivando o aumento de áreas permeáveis na bacia hidrográfica e a não ocupação das áreas muito próximas aos principais cursos d'água.

2.3 DRENAGEM URBANA

A drenagem urbana se enquadra no manejo de águas pluviais descrito no Glossário do Atlas de Saneamento do IBGE (2011), segundo o mesmo, trata-se do controle do escoamento das águas da chuva a fim de evitar eventos como alagamentos, erosões e

² Tecnologias de baixa complexidade construtiva e baixo impacto ambiental, que visam otimizar a infiltração e/ou reter água de chuva, reduzindo o escoamento superficial direto e os altos investimentos em dispositivos hidráulicos da drenagem tradicional (DE OLIVEIRA; BARBASSA; GONÇALVES, 2016).

assoreamentos, que causam prejuízos à saúde, segurança e bem-estar da população. Dentro desta definição, tem-se a drenagem realizada por elementos superficiais (sarjetas) ou subterrâneos (coletores ou condutos). Ainda segundo o Glossário, a drenagem urbana divide-se em macro e microdrenagem:

- “Microdrenagem: Sistema de drenagem de condutos pluviais a nível de loteamento ou de rede primária urbana, que constitui o elo entre os dispositivos de drenagem superficial e os dispositivos de macro e mesodrenagem, coletando e conduzindo as contribuições provenientes das bocas de lobo ou caixas coletoras [...]” (IBGE, 2011, p.08).
- “Macro drenagem: Sistema de drenagem que compreende [...] os principais canais de veiculação das vazões, recebendo, ao longo de seu percurso, as contribuições laterais e a rede primária urbana provenientes da microdrenagem [...]” (IBGE, 2011, p.08).

Tais definições foram realizadas no âmbito, principalmente, dos sistemas de drenagem clássicos, que, segundo Moura (2004), trazem alguns inconvenientes à medida que as cidades crescem, como a rápida propagação das vazões para jusante e a necessidade de obras onerosas para ampliação. Porém, de acordo com Cardoso e Baptista (2011), opondo-se à ideia de evacuação rápida das águas pluviais, surgem os sistemas de drenagem compensatórios, que tentam diminuir o escoamento superficial através de retenção e infiltração das águas, integrando o sistema à natureza, contornando problemas como condutos sobrecarregados, que podem resultar em alagamentos.

Os alagamentos ocorrem em função da ineficiência, insuficiência ou até inexistência dos sistemas de drenagem, uma definição formal é dada pelo extinto Ministério das Cidades, que descreve o fenômeno como o “acúmulo momentâneo de águas em uma dada área por problemas no sistema de drenagem, podendo ter ou não relação com processos de natureza fluvial” (BRASIL, 2007b, p.94). Então faz-se necessário a diferenciação entre alagamentos e outros três (3) termos constantemente confundidos, enchentes, inundações e enxurradas: 1) enchentes: “elevação temporária do nível d’água em um canal de drenagem devido ao aumento da vazão ou descarga” (BRASIL, 2007b,p.90); 2) inundação: “processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio (BRASIL, 2007b,p.91); 3) enxurradas: “escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte” (BRASIL, 2007b, p.94).

Na direção de ter-se cidades mais sustentáveis, uma das alternativas para

a prevenção ou mitigação dos eventos descritos no parágrafo anterior passa pela elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana, contendo informações como os dados hidrológicos; dados fisiográficos da bacia; cadastro da rede de drenagem construída; e a legislação relacionada à infraestrutura de saneamento da cidade. O cruzamento de dados resulta na adoção de medidas de controle estruturais e não-estruturais. As primeiras são aquelas que exigem maior investimento e com uma intervenção brusca no espaço, pois consistem em obras como diques, barragens, canais abertos etc. Já as não-estruturais se baseiam em mecanismos legais para a prevenção, como emissão de alertas e capacitação profissional (TUCCI, 2012).

Em estudo de caso realizado por Moura e Silva (2015) na cidade de Recife-PE, evidenciou o aumento do escoamento superficial e alagamentos na sub-bacia, em função da impermeabilização das áreas conectadas diretamente à rede de drenagem. Concomitantemente, a manutenção da permeabilidade de lotes particulares e das vias (canteiros) exercem importante papel na atenuação dos eventos de alagamento, servindo de parâmetro para revisões do Plano Diretor da cidade.

2.4 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS

As geotecnologias englobam técnicas de coleta, armazenamento, edição, processamento e análise de dados georreferenciados. Alguns das geotecnologias são a Topografia Clássica, Cartografia Digital, Desenho Assistido por Computador (CAD), Aerofotogrametria, Geodésia, SIG, Sensoriamento Remoto por Satélites, entre outros (ZAIDAN, 2017). Ainda segundo o autor, o geoprocessamento pode ser definido como:

“conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais relacionados com a coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados, a fim de gerar novos dados e ou informações espaciais ou georreferenciadas. É importante observar que informações georreferenciadas têm como característica principal o atributo de localização, ou seja, estão ligadas a uma posição específica do globo terrestre por meio de suas coordenadas” (ZAIDAN, 2017, p.198)

À medida que a disponibilidade de dados de todas as áreas do conhecimento aumenta, a definição de SIG torna-se ampla, mas uma abordagem clássica

descreve o SIG como um poderoso conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real para um determinado conjunto de propósitos (BURROUGH *et al.*, 2015). Seja para o planejamento urbano; saúde e educação; análise dos meios de transporte; planejamento agropecuário; análises econômicas, entre outros, as ferramentas de SIG são aplicáveis, quase sempre com o uso de imagens de satélite, englobando assim o Sensoriamento Remoto.

O uso de geotecnologias na delimitação e caracterização de microbacias e estudo de alagamentos e/ou inundações pode ser observado em trabalhos como os de Mantovani (2016) e Brito (2020), realizados nos estados de Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Norte, respectivamente. No primeiro, o autor reproduziu técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) para mapear uso e cobertura da terra, aferidas com trabalhos de campo, e também obteve dados altimétricos de Radar, formando assim um “banco de dados geográficos, para tratamento, conversão, processamento e análise dos resultados, implementados em um SIG, no *software* ArcGIS 10®”.

Já na pesquisa de Brito (2020), na cidade de Mossoró-RN, o autor elaborou um Modelo Digital de Superfície (MDS) simplificado a partir de calibração de um MDE obtido por dados *raster* de radar, no MDS conseguiu-se uma representação aproximada de ruas e edificações. A análise de susceptibilidade a alagamentos segue com integração entre SIG, Sensoriamento Remoto e Levantamentos de campo, obtendo-se as depressões topográficas, rede de fluxo e volumes de contribuição das bacias de interesse.

2.4.1 Sensoriamento Remoto

Para Slater (1980) apud Lorenzetti (2015), Sensoriamento Remoto trata-se de conjunto de técnicas utilizadas para a obtenção de dados relativos ao meio ambiente e aos recursos naturais terrestres, através da análise da energia eletromagnética (REM) refletida, emitida ou retroespalhada pelos alvos, coletada por sensores instalados em plataformas em altitude, como aviões ou satélites. O fato é que o SR se refere às tecnologias que contrastam das medidas *in situ*, ou seja, trata-se da obtenção de dados a distância.

A utilização do SR para obtenção de características geomorfológicas de Bacias hidrográficas está presente em larga escala na bibliografia, aqui destaca-se estudos que utilizaram a ferramenta para análises de susceptibilidade a alagamentos, como os de Ghosh (2018), Hammami (2019), que têm em comum a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE's) para obtenção das características geomorfológicas das bacias em questão.

Já Ghosh (2018) estudou o caso do distrito de Malda, na Índia, usando dados de SR, para obter os parâmetros geomorfológicos, climáticos e hidrológicos; o autor avaliou que as variações espaciais de vulnerabilidade considerando elementos socioeconômicos, infraestruturais e geomorfológicos com auxílio do MDE ASTER GDEM, para preparar o mapa de risco de inundação do distrito, compilando a pontuação de perigo e vulnerabilidade. E Hammami (2019), fez a elaboração de um mapa de susceptibilidade a inundações numa área da Tunísia, utilizando oito (8) parâmetros, sendo seis (6) extraídos ou gerados a partir de dados do SRTM, tais como: a densidade de drenagem, o uso e ocupação do solo, a declividade, o tipo de solo, a elevação, e a litologia, e dois (2) de Hidrografia, a precipitação e o nível do lençol freático.

2.4.1.1 Dados de Radar

Diferentes sensores são utilizados na obtenção de diversos Modelos Digitais de Elevação (MDE's), os sensores que tem fonte de radiação própria, a saber, do tipo Radar, são os mais utilizados tratando-se da obtenção de dados altimétricos, dois exemplos são o sensor PALSAR (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) e os utilizados na missão SRTM. Segundo Abreu (2016), em linhas gerais, os radares altímetros emitem pulsos de energia nas frequências das micro-ondas e recebem o sinal de retorno pela mesma trilha, conseguindo assim calcular a distância entre o satélite e a superfície abaixo. Tais pulsos percorrem o espaço e a atmosfera terrestre até encontrarem a superfície refletora, então, a partir do tempo de retorno do sinal para o satélite altímetro, calcula-se a distância com base na velocidade conhecida, aplicando-se

as devidas correções, visto as distorções causadas por refrações e movimentos da Terra (MOREIRA, 2016).

A obtenção de variáveis geomorfológicas de bacias hidrográficas é avaliada por Ferreira e Cabral (2021) no território Tocantinense, com o uso de produtos provenientes de quatro (4) missões e sensores diferentes, a ALOS, a GMTED2010 (*Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010*), SRTM e TOPODATA. Para estudar a acurácia dos MDE's, utilizaram-se os dados de alta precisão da rede altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro, na área de estudo encontram-se 105 estações oficiais. Evidenciou-se melhores resultados para o MDE ALOS PALSAR e piores para o GMTED2010, com resoluções espaciais de 12,5m e 30m, respectivamente. Mais de 90% dos pontos extraídos dos MDE's avaliados apresentaram erros altimétricos menores que 25 metros quando comparados aos pontos de referência. Nesse sentido, esses DEMs podem suportar de forma satisfatória estudos que necessitem de um nível de detalhamento compatível com escalas 1: 100.000.

Dá-se aplicação parecida ao MDE ALOS PALSAR no trabalho de Niipele e Chen (2019), a extração da rede de drenagem da Sub-bacia do Lishana no centro-norte da Namíbia serviu para atualização dos mapas hidrológicos da região e ter-se conhecimento dos impactos da dinâmica geo-hidrológica. A acurácia da rede extraída foi avaliada através de inspeções visuais e do Coeficiente de correspondência de Linha (CLC)³, com um CLC=0,91 aponta-se que na ausência de dados de alta resolução obtidos por sensores LIDAR (*Light Detection And Ranging*), por exemplo, os dados do ALOS MDE podem ser efetivos na detecção e extração de redes usando diferentes parâmetros, em diferentes tipos de ambientes.

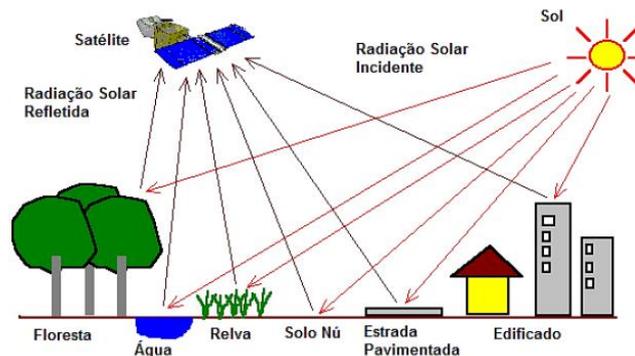
2.4.1.2 Dados de Sensores Ópticos

A disponibilidade de dados provenientes de sensores ópticos para estudo de uso e ocupação do solo oferecem um grande potencial para o mapeamento de grandes áreas de ocupação urbana. Por exemplo, o sensor óptico MSI, a bordo da missão Sentinel-

³ “métrica que quantifica recursos lineares correspondentes e incorretos nas duas redes. O intervalo é $0,0 < CLC < 1,0$. Sendo 0,0 a indicação de que não existem recursos correspondentes em ambos os conjuntos de dados, e para 1,0 indica-se que todos os recursos são correspondentes em ambos os conjuntos de dados” (STANISLAWSKI *et al.*, 2018)

2, é do tipo passivo, ou seja, funciona através da detecção da energia eletromagnética solar refletida pelos alvos e utiliza as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de comprimento de onda curto para gerarem as imagens da superfície, na Figura 1 mostra-se o princípio básico de funcionamento. No caso dos equipamentos multiespectrais, o sensor possui multicanais com algumas bandas espectrais. Cada canal é sensível à radiação de uma determinada banda de comprimento de onda, resultando numa imagem de multicamadas que contém tanto o brilho como a informação espectral (cor) dos alvos observados (CRISP, 2001).

Figura 1. Princípio básico de funcionamento dos sensores ópticos.



Fonte: adaptado de Crisp (2001).

Tais imagens ganharam interesse dos usuários do sensoriamento remoto para o mapeamento de uso e ocupação do solo, pois apresenta quatro vantagens principais: (1) Cobre todas as superfícies continentais com alta resolução espacial, (2) gratuito, (3) tem um grande número de bandas espectrais, e (4) oferece a oportunidade de construir-se uma série temporal (CLOSE et al., 2018). Exemplos de aplicação estão em trabalhos como os de Sekertekin et al. (2017) e Osgouei (2019). No primeiro, comparam-se classificações de uso da terra provenientes de dados dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8 geradas através do método de classificação supervisionada de Máxima Verossimilhança, baseado em *pixels*, obtendo-se, para o Sentinel-2 e Landsat-8 índices Kappa 0,78 e 0,85, respectivamente. Apesar de apresentar menor índice Kappa, afirma-se que a classificação obtida via Sentinel-2 representa a realidade com maior proximidade em situações genéricas, com exceção para algumas áreas de oceano.

Já na pesquisa intitulada “*Separating Built-Up Areas from Bare Land in Mediterranean Cities Using Sentinel-2A Imagery Paris*”, em tradução livre “Separando áreas construídas de solos expostos em cidades mediterrâneas usando imagens paralelas

do Sentinel-2A”, de Osgouei (2019), utiliza-se apenas imagens Sentinel-2A para uma abordagem de múltiplos índices, construída usando combinações de três bandas de índices espectrais, onde cada índice representa uma das três principais categorias de cobertura do solo, áreas verdes, corpos d'água e regiões construídas. A combinação dos índices apresentou um excelente desempenho geral com uma precisão de 93% e um valor Kappa de 0,91 para todas as classes de uso e ocupação. A classificação das imagens do Sentinel-2A de dez bandas também forneceu resultados aceitáveis relacionados à área construída e às classes de terreno descoberto.

Segundo os autores supracitados, as imagens de satélite são um dos principais recursos para monitorar as mudanças na Terra, especialmente os satélites de observação de nova geração, como o Landsat-8 e Sentinel-2, com uma boa resolução espacial e temporal, os equipamentos permitem análises temporais que ajudam os planejadores e tomadores de decisão a melhorarem os padrões das cidades. Melhores elucidacões acerca da classificacão de imagens e validacão de mapas são apresentadas a seguir.

Quando se utiliza um software SIG, geralmente o objetivo final do usuário é a produçãõ de mapas vetoriais, carta-imagem ou fotocarta que contenham uma classificacão do terreno, de acordo com diversos parâmetros, sejam eles fisiográficos ou não. A classificacão da imagem geralmente visa a identificacão de uso e ocupacão do solo em cada *pixel*, o algoritmo atua em determinada cena considerando suas diferentes bandas espectrais, ou seja, os *pixels* são “comparados” seguindo-se uma regra de decisãõ definida pelo usuário, e *pixels* semelhantes são agrupados em determinada categoria. A classificacão pode ser do tipo Supervisionada, ou Não Supervisionada (NISHIDA, 1998).

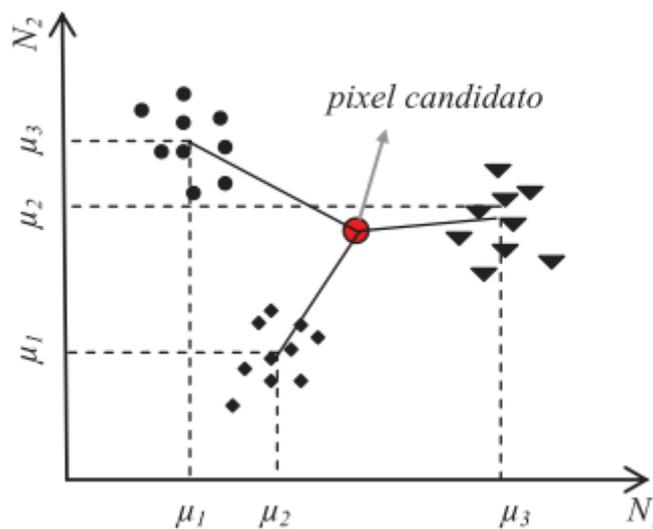
Os classificadores Não-Supervisionados geralmente são utilizados em duas situações específicas, quando não se tem conhecimento acerca das classes dos alvos presentes na área de estudo, ou quando deseja-se fazer uma classificacão de caráter exploratório da imagem, a fim de ter-se noçãõ de quantas e quais classes estariam presentes na área. Em ambas as situações a participaçãõ do analista é mínima, já que não há uma definiçãõ das classes realizada manualmente, via amostragem (MENESES; ALMEIDA, 2012). Em pesquisas onde a área de estudo é conhecida, geralmente utiliza-se a classificacão Supervisionada, visto que o operador pode treinar o algoritmo e as classes (corpos d'água; pastagem; espaço urbano, etc.) podem ser definidas inclusive com o auxílio das visitas de campo.

Na classificacão supervisionada, o treinamento do algoritmo é realizado

através da coleta de amostras realizadas pelo operador, assim tem-se reconhecimento de padrões espectrais para cada *pixel*. Dentre os algoritmos supervisionados, os mais utilizados são a máxima verossimilhança (Maxver); a Mínima distância euclidiana (MinDist) e o Método do Paralelepípedo (MOREIRA, 2007).

O método da distância mínima avalia um *pixel* candidato e o atribui à classe cuja a média é mais próxima a ele. Em termos gerais, considera-se a distância euclidiana entre os valores de *pixel* e o centroide da amostra da classe. O classificador apresenta uma execução rápida, dependendo do número de dados fornecidos no treinamento, e todos os *pixels* serão classificados, mesmo que a menor distância de um determinado *pixel* à uma classe seja relativamente grande (NAIR; BINDHU, 2016), ou seja, não existirão *pixels* “não-classificados”. Um exemplo do plano cartesiano onde os eixos tratam-se de duas bandas espectrais (N_1 e N_2), pode ser visto na Figura 2, o *pixel* candidato é designado à classe com média (μ_n) mais próxima. Ao final do processo, faz-se a validação da classificação obtida.

Figura 2. As linhas contínuas indicam a distância do *pixel* candidato às respectivas classes.



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

A acurácia temática da classificação depende de diversos fatores como a complexidade do terreno, a resolução espacial e espectral do sistema sensor e a qualidade das amostras definidas pelo usuário. Através das matrizes de erros pode-se avaliar a concordância entre a imagem classificada e o conjunto de amostra de referência. Com os dados da matriz pode-se calcular o índice Kappa, que varia de zero (0) a um (1), sendo zero (0) concordância nula e um (1) concordância perfeita. Uma escala para a qualidade da

classificação em função do índice Kappa foi dada por Landis e Koch (1977) apud Meneses e Almeida (2012) : $0 < K \leq 0,20$: ruim; $0,20 < K \leq 0,40$: razoável; $0,40 < K \leq 0,60$: boa; $0,60 < K \leq 0,80$: muito boa; $0,80 < K \leq 1,0$: excelente.

A fim de validar a larga utilização do classificador MaxVer, na pesquisa de Da Cunha *et al.* (2017), comparam-se artigos publicados nas principais revistas da área de geografia do Brasil e, como exemplo, a classificação supervisionada do município de Natal-RN. Na comparação externa entre os classificadores, o MaxVer obteve melhores resultados em 64% da bibliografia analisada, assim como na comparação interna para classificadores (ALD-F, MaxVer, MinDist e KNN) na cidade de Natal, onde o MaxVer obteve 72,33% dos *pixels* classificados em concordância com a realidade, e índice Kappa 0,66. No estudo também se evidencia a eficiência do classificador para análises urbanas, que tem aumentado dentre os usuários de SR.

Em pesquisa realizada na cidade de São José do Cerrito – SC, os autores também comparam quatro (4) classificadores de imagem - MaxVer, Redes Neurais Artificiais (RNA), MinDist e *Support Vector Machine (SVM)* - para caracterização do uso da terra do município. Segundo Pertille *et al.* (2018) a utilização de imagem orbital do sensor Sentinel 2/MSI pode ser eficiente no planejamento urbano, visto que todas as classificações obtiveram satisfatória correspondência com a realidade e elevados índices Kappa. Definiram-se as classes de agricultura, área urbana, corpos hídricos e vegetação, e após os cálculos estatísticos de acurácia, o melhor classificador foi o RNA, seguido do MaxVer, SVM e MinDist.

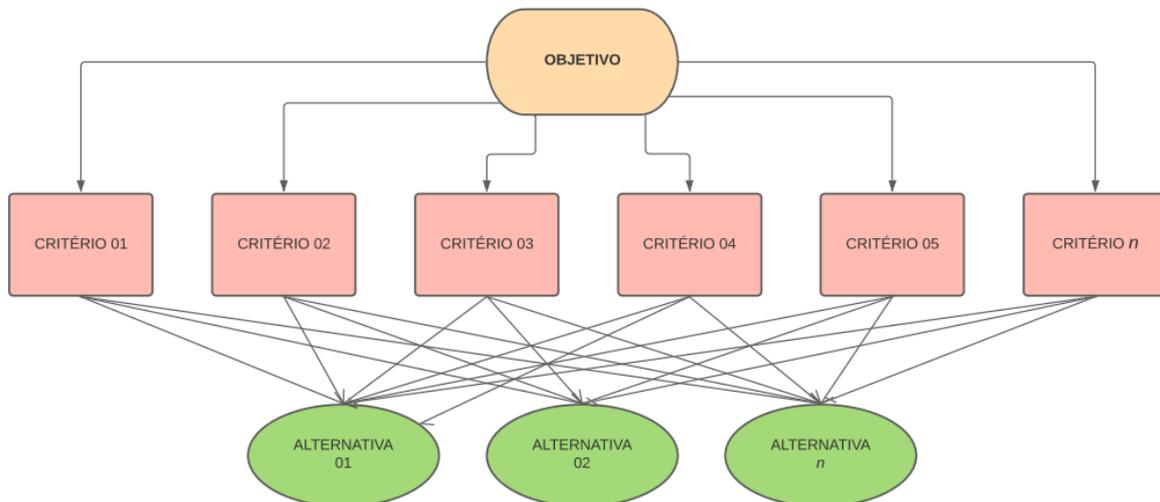
De fato todo e qualquer processo de classificação supervisionada de imagens envolve deficiências, sejam relacionadas à quantidade de informações sobre cada *pixel*, à resolução espacial das imagens, ou estrutura, premissas e hipóteses utilizadas no desenvolvimento do método de classificação, ou seja, às regras de decisão adotadas para designar os *pixels* às classes (NISHIDA, 1998).

No Brasil, os trabalhos de SR são realizados principalmente por instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que disponibilizam material relevante e de caráter público, que facilitam o aprofundamento no tema por partes de muitos autores.

2.5 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP)

O método, em tradução direta de *Hierarchical Analysis Process* (AHP), foi desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty a fim de modelar problemas desestruturados do cotidiano das pessoas. A técnica se baseia numa hierarquia de no mínimo três (3) níveis, onde no topo está o objetivo, seguido dos critérios e por fim as alternativas, conforme demonstrado na Figura 3, adaptada de Saaty (1991).

Figura 3. Representação gráfica de uma hierarquia.



Fonte: adaptado de Saaty (1991).

Sabe-se que a gestão das águas urbanas envolve diversas decisões baseadas em diferentes objetivos e critérios, a saber, dados pluviométricos, de altimetria, erodibilidade, pedologia, declividade, infraestrutura de macro e microdrenagem, uso e ocupação da terra, vulnerabilidade da população residente etc. O que justifica uma abordagem qualificada e a utilização de métodos de apoio, comumente aplicados em diversas áreas da engenharia, como recursos hídricos, urbanismo, gestão de resíduos sólidos, transportes, entre outras. Um dos métodos úteis à gestão pública é a AHP ((MICHEL, 2019). Na Figura 3, as condicionantes supracitadas estariam no segundo nível da estrutura hierárquica (critério 01, critério 02,...,critério n) com seus respectivos pesos em

termos de importância nas comparações par a par.

Na bibliografia encontram-se exemplos como Mantovini e Bacani (2018) , Ghosh e Kar (2018) e Caprario et al. (2019), de estudos realizados sobre a susceptibilidade à inundações ou a alagamentos urbanos, através, principalmente, da análise dos mapas de declividade, hipsometria e uso e ocupação do solo, realiza-se a avaliação de risco com atribuição de prioridades e pesos, seguindo o método AHP integrado ao geoprocessamento (SIG), o qual atribui valores de importância para as características da microbacia estudada, possibilitando a criação de uma hierarquia, de acordo com a influência que cada parâmetro tem de ocasionar eventos de alagamentos, sendo os fatores de maior nota os que possuem maior influência (MANTINS; VAZ, 2019). A seguir apresenta-se uma síntese de cada autor citado com foco nos critérios utilizados no Processo Analítico Hierárquico

No artigo intitulado “Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis a inundação e/ou alagamento na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS”, Mantovini e Bacani (2018) utilizaram cinco (5) critérios para aplicação da AHP, Solos, Hipsometria, Escoamento, Declividade e Geomorfologia, sendo os dois últimos os que obtiveram maior grau de importância sobre as outras variáveis. Elucidou-se que as áreas com maior tendência a alagamentos estão relacionadas à baixa declividade associada a alterações antrópicas.

Os autores Ghosh e Kar (2018), no trabalho de título “*Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India*” utilizam o MDE ASTER GDEM e dados hidrológicos para caracterização do distrito de Malda, na Índia, obtendo-se os indicadores Hipsometria, Declividade, Categoria do Relevo (Geomorfologia), distância dos cursos d’água e Padrão de Precipitação. Segundo os autores, a hipsometria foi o critério mais importante no contexto do mapeamento de susceptibilidade à inundação, as áreas baixas são mais propensas a inundações, pois podem ser inundadas por enchentes de baixa magnitude. A Declividade é apresenta o segundo critério em ordem de importância, já que áreas mais planas com declives suaves enquanto declives moderados a altos fornecem uma passagem mais rápida do escoamento superficial.

Já o trabalho intitulado “*Influence of drainage network and compensatory techniques on urban flooding susceptibility*” de Caprario et al. (2019) utilizaram seis (6) critérios em sua análise, listados em ordem de importância definida pelos autores: Técnicas Compensatórias, Rede de drenagem, Declividade, Altimetria, Uso do Solo e Tipo de solo. Para as classes de cada parâmetro, atribuiu-se uma taxa “i”, variando entre 1 e 10,

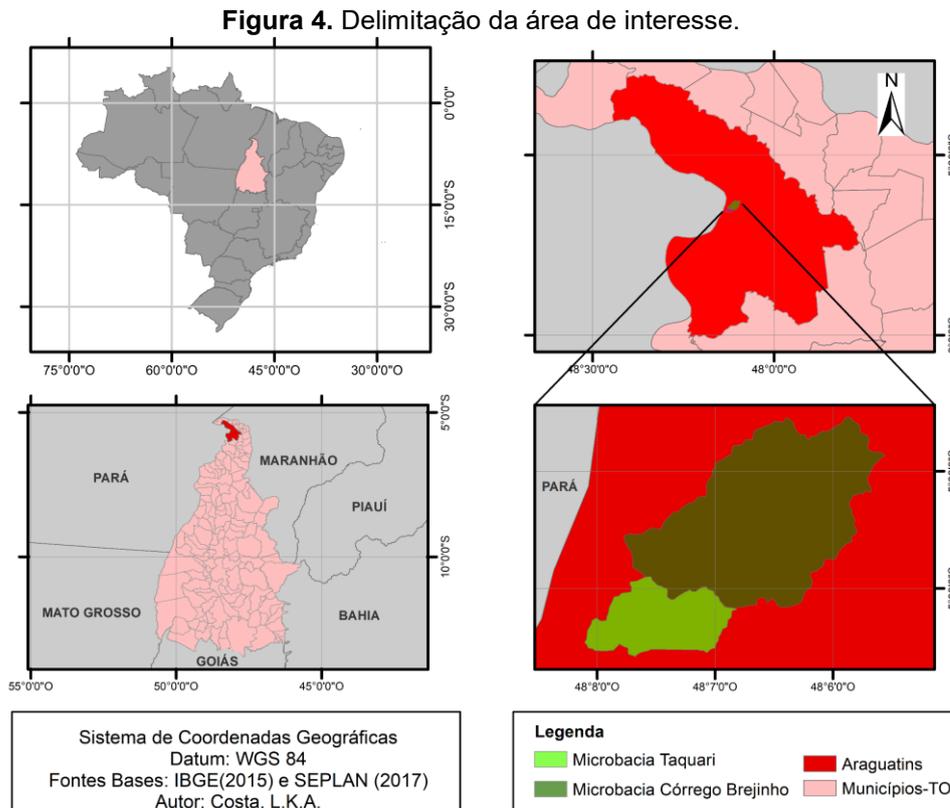
representando a importância relativa em termos de susceptibilidade a alagamentos. Os autores consideraram três (3) cenários, sendo que na ausência de rede de drenagem e técnicas compensatórias, a Declividade tem maior importância, seguindo a mesma sequência supracitada.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O presente trabalho possui essencialmente características de pesquisas exploratórias e explicativas, como proporcionar familiaridade com o problema de alagamentos urbanos e elencar os fatores que contribuem para a ocorrência do fenômeno. O Método de pesquisa foi dividido em duas (2) etapas principais: 1) Caracterização da área de estudo; 2) Procedimentos Metodológicos.

3.1 ARAGUATINS – TO E A ÁREA DE ESTUDO

Para esta etapa utilizou-se dados no formato *.shp (shapefile)* disponibilizados pelo IBGE(2015), contendo metadados do município, como os limítrofes e malha viária na escala de 1:250.000, com resolução espacial de 30metros. Os dados são disponibilizados no Sistema Geodésico Brasileiro (SIRGAS 2000), entretanto, a fim de padronizar-se o Datum utilizado na pesquisa, foram reprojatados via ferramenta do ArqGIS® para o sistema *World Geodetic System 1984 (WGS-84)*, pois é o sistema de referência presente na maioria dos arquivos de domínio público e disponíveis para dowload. Araguatins está inserida na projeção WGS 84 / UTM zone 22 S, ocupa uma área de 2633,278 Km² e coordenadas geográficas 5° 39' 04" de latitude sul e 48°07'28" de longitude oeste , como mostra a Figura 4. Tem como limítrofes o município de São Bento do Tocantins, ao Sul; o Rio Araguaia, fazendo fronteira com os municípios Brejo Grande do Araguaia e Palestina do Pará, à Oeste; os municípios de Esperantina, São Sebastião do Tocantins, ao Norte; e os municípios de Augustinópolis e Axixá, à Leste (SEPLAN, 2017). Para obter-se as microbacias de contribuição da área de estudo, ou seja, as quais a Avenida está inserida, seguiu-se procedimento a partir de ferramentas do ArqGIS®, descrito no tópico 3.2.1.



Fonte: o autor, 2021.

No censo demográfico de 2010, a população de Araguatins foi estimada em 31.329 pessoas, com projeção de 36.170 habitantes para 2020. Apesar de oficialmente ter 154 anos, foi somente a partir de 1945, via Decreto-Lei Estadual nº 8.305, de 31 de dezembro, que o anterior povoado “São Vicente”, passou a ser chamado de Araguatins, combinação decorrente de Araguaia e Tocantins, os dois grandes rios que fazem confluência na região no Norte do Estado, mas ainda sem sua autonomia administrativa foi no dia 13 de outubro de 1948 que outro Decreto-lei, do Estado de Goiás, reconduziu a sede municipal para Araguatins (IBGE, 2020).

No documento “Perfil Socioeconômico dos Municípios do Tocantins”, elaborado pela Secretaria do Planejamento e Orçamento – (SEPLAN, 2017), em que se descreve os principais aspectos econômicos da cidade, despontam as atividades de agricultura, pecuária, setor terciário de bens e serviços, funcionalismo público, e em menor

escala, o turismo, que se fortalece nos meses de junho a agosto, quando o rio Araguaia tem redução de seu nível, e os bancos de areia formam praias fluviais.

O processo de urbanização se deu sem planejamento e sem um pico acelerado, como mostram os dados dos censos do IBGE. Com os dados apresentados na Tabela 1 é possível verificar o crescimento da população, da densidade demográfica e da taxa de urbanização nos censos demográficos de 1991, 2000 e 2010.

Tabela 1. População Residente, Densidade Demográfica, Taxa de Urbanização e Taxa de Crescimento - 1991, 2000 e 2010.

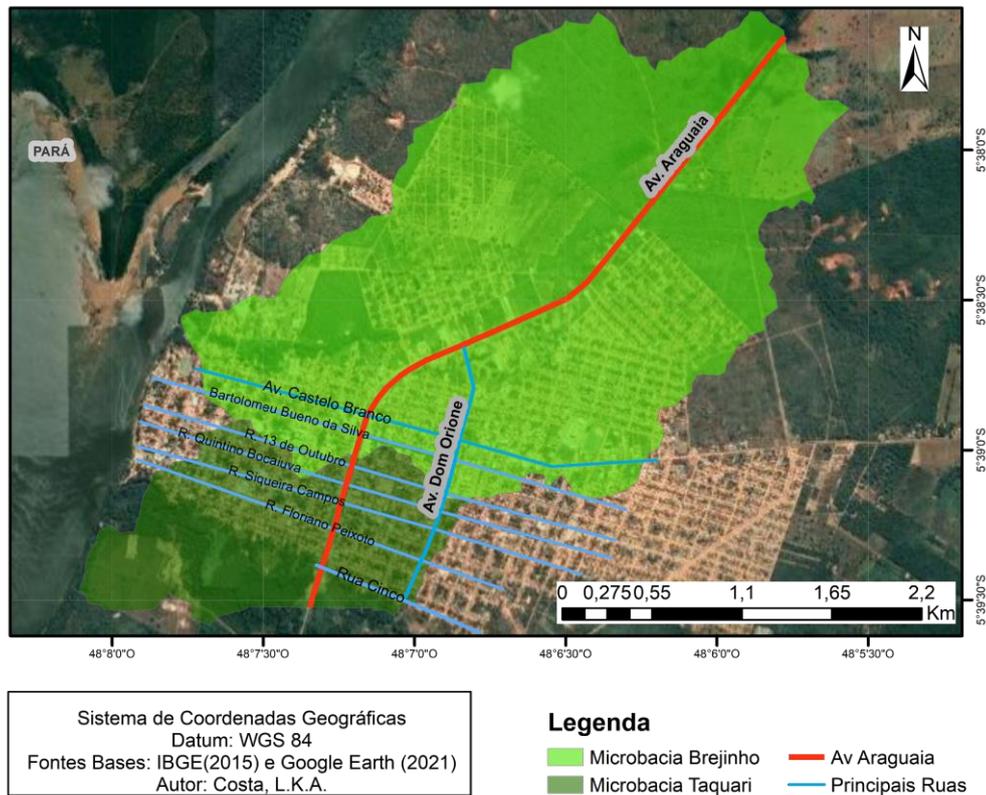
Informações	1991	2000	2010
População	27.861	26.010	31.329
Densidade Demográfica (hab./Km ²)	10,61	9,61	11,93
Taxa de Urbanização (%)	45,54	60,70	64,27

Fonte: SEPLAN, 2017.

A Avenida Araguaia tem aproximadamente três (3) Km de extensão, com quatro (4) pistas de rolamento, sendo duas (2) principais, e duas (2) marginais. As ruas marginais não se estendam por todo o comprimento da Avenida, ambas têm início no cruzamento com a Rua 05, e final no cruzamento com a Avenida Dom Orione, tendo assim aproximadamente 1,8 Km, na Figura 5 pode-se observar a posição da Avenida em relação às principais ruas da cidade, e às Microbacias de interesse - Brejinho e Taquari. Cabe ressaltar que a Microbacia Taquari trata-se apenas de um dreno já próximo ao exutório da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Taquari, que abrange uma área bem maior, que não faz parte do escopo do trabalho, logo, o nome atribuído aqui não deve ser confundido.

Ainda segundo a SEPLAN (2017), Araguatins se encontra na região de transição de biomas, entre o Cerrado e a Amazônia legal, com um clima B1wA'a' - Clima úmido com moderada deficiência hídrica (classificação de Thornthwaite), e precipitação média anual de 1600 mm. Quanto a pedologia, no município predominam a presença de Plintossolos (16,65%), Latossolos (22,07%) e Neossolos (35,81%).

Figura 5. Avenida Araguaia e Microbacias de interesse.



Fonte: o autor, 2021.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As etapas seguidas a fim de atingir-se os objetivos da pesquisa foram divididas em obtenção de dados vetoriais e *raster*; processamento e análise de dados planialtimétricos; definição de classes de uso e ocupação do solo; análise de aspectos estruturais; escolha do trecho crítico, e por fim, aplicação da AHP. A partir do cruzamento dessas informações foi possível elencar as condicionantes e produzir um mapa de susceptibilidade a alagamentos da região estudada.

3.2.1 Dados Planialtimétricos

Os dados foram importados e processados no programa ArqGIS®. Para obtenção da altimetria, utilizou-se dados do tipo *Tagged Image File Format (.tif)* provenientes do MDE da missão ALOS/PALSAR (sensor do tipo Radar), disponibilizados pela *Alaska Satellite Facility*; com resolução espacial de 10 metros, e datadas de 11/03/2010. Inicialmente definiu-se um polígono que englobasse todo o perímetro urbano da cidade, definido visualmente por dois (2) vértices de coordenadas geográficas (5°42'30,01"S , 48°09'29"O) e (5°37'31,44"S, 48°02'2,70"O). A partir do MDE foi possível produzir-se curvas de nível espaçadas a cada um (1) metro.

Em seguida gerou-se a declividade do terreno, a partir da ferramenta *slope*, dividida segundo as classes da Embrapa, a saber: Plano (terrenos de desnível pequeno e declividades que variam de 0 a 3%), Suave Ondulado (relevos pouco acidentados, com declives entre 3 e 8%), Ondulado (terrenos de declives moderados, que variam de 8 a 20%), Forte Ondulado (relevos mais acidentados, que possuem declividades fortes de 20 a 45%), Montanhoso (terrenos extremamente acidentados, com declividades fortes e muito fortes que variam de 45 a 75%) e Escarpado (relevos com formas abruptas de descontinuidade, com declividades acima dos 75%) (EMBRAPA, 2018).

A rede de drenagem e a delimitação das microbacias de interesse da pesquisa, não foram encontradas disponíveis para *download* em plataforma oficial do Estado, ou em qualquer banco de dados de domínio público, por isso optou-se por extrai-las por via do *software* ArqGIS®, que utiliza ferramentas de *raster*, descritas abaixo segundo o *Geoprocessing Commands Quick Reference Guide – ArqGIS®* (2006):

- a) Utilização da ferramenta "*Fill*", que corrige imperfeições do dado *raster*;
- b) Inicialmente, através dos dados de hipsometria, define-se as direções de fluxo através da ferramenta *flow Direction*, visto que o escoamento tende a fluir das maiores cotas para as menores;
- c) Obtenção do fluxo acumulado em cada célula (*pixel*), a partir da ferramenta "*flow accumulation*";
- d) Definição da Hierarquia fluvial ou ordem dos cursos d'água, através do *stream order*;
- e) Aplicação da ferramenta *Stream to feature*, que permite a conversão dos dados *raster* da rede de drenagem em dados do tipo linha.

- f) Com a rede de drenagem obtida na etapa anterior, partiu-se para a definição das microbacias de interesse, que englobassem toda a extensão da Avenida. Utilizou-se a ferramenta *Watershed*, que determina a área de contribuição a montante de uma célula de um conjunto de dados *raster*. Buscou-se escolher dois pontos mais a jusante, de maneira que as microbacias obtidas englobassem todos os talvegues que transpõem a Avenida Araguaia.

Fez-se o traçado em planta da Avenida, e dos dados de altimetria, gerou o perfil longitudinal da via, para entender o comportamento do escoamento superficial nas pistas de rolamento. A partir do perfil longitudinal foi possível realizar a escolha dos pontos críticos.

Para verificar o quão propensa se as bacias delimitadas são a eventos de inundação, calculou-se os parâmetros o Índice de Circularidade (I_c), o fator de forma (K_f), e o Coeficiente de Compacidade (K_c), respectivamente, utilizando as Equações 2, 3 e 4.

$$I_c = \frac{12,57A}{P^2} \quad \text{Equação 2}$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Equação 3}$$

$$K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- A : área [Km^2];
- L : comprimento axial do eixo paralelo ao curso d'água principal [Km];
- P : Perímetro da bacia [Km].

3.2.2 Dados de Uso e Ocupação do Solo

Para classificar o uso e ocupação do solo utilizou-se a composição colorida falsa-cor R4G8B3 de imagens do sensor óptico MSI, a bordo da missão Sentinel-2, disponibilizadas pelo *Sole Science Agency for the Department of the Interior* (USGS), foi o primeiro satélite óptico da série a ser operado pela ESA, lançado em 2015 e leva a bordo um sensor multiespectral com 13 bandas, variando de 443 a 2190 nm, com resolução espacial de 10 m para as bandas do visível, 20 m para o infravermelho e 60m para as bandas de correção atmosférica. As Bandas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas Espectrais do Sentinel 2.

Banda	Resolução	Comprimento de Onda Central	Descrição
B1	60 m	443 nm	Ultra Azul
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Vermelho
B5	20 m	705 nm	Visível e infravermelho próximo (VNIR)
B6	20 m	740 nm	
B7	20 m	783 nm	
B8	10 m	842 nm	
B8a	20 m	865 nm	
B09	60 m	940 nm	Infravermelho de onda curta (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	
B11	20 m	1610 nm	
B12	20 m	2190 nm	

Fonte: adaptado de GISGEOGRAPHY(2021).

Para a classificação de uso do solo, utilizou-se como base o documento elaborado pelo IBGE (2020), “ Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2016 – 2018”. Visto a baixa variabilidade de uso e ocupação do solo em Araguatins, julgou-se suficiente a escolha de quatro (4) classes, apresentadas a seguir:

1. Área Urbana (Áreas Antrópicas Não Agrícolas): " [...] predominam superfícies antrópicas não-agrícolas. São aquelas estruturadas por edificações e sistema viário, nas quais estão incluídas as metrópoles, cidades, vilas, as aldeias indígenas e comunidades quilombolas, áreas ocupadas por complexos industriais e comerciais e edificações que podem, em alguns casos, estar situadas em áreas peri-urbanas [...]."

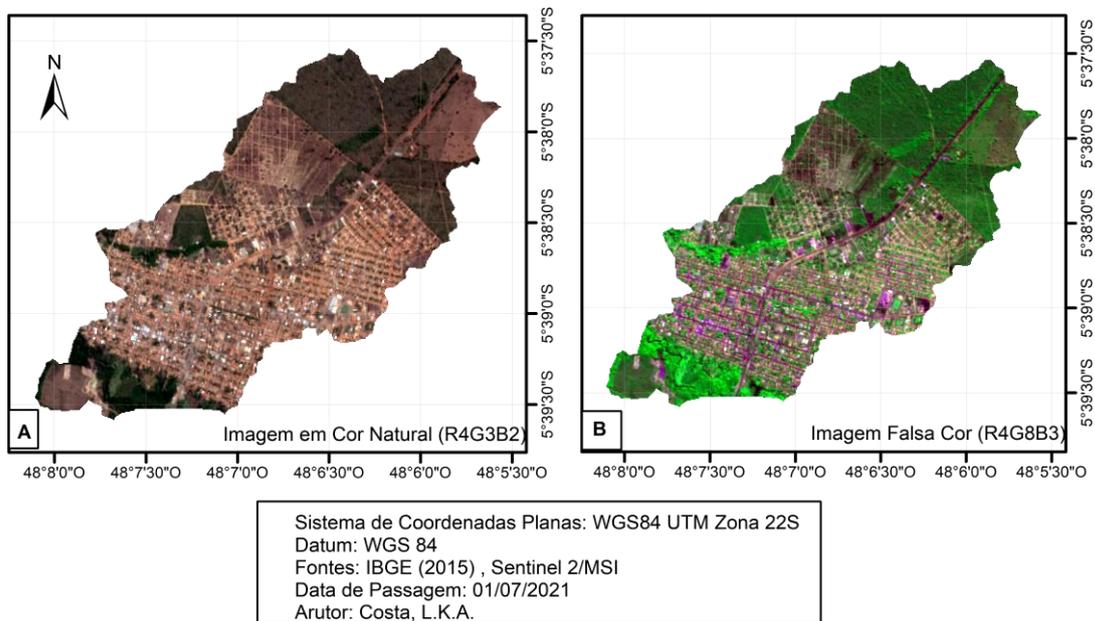
2. Vegetação (Mosaico de ocupações em Área Florestal) : "[...] ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área."

3. Solo Exposto (Área Descoberta): "[...] locais sem vegetação, como os afloramentos rochosos, penhascos, recifes e terrenos com processos de erosão ativos. Também inclui as praias e dunas, litorâneas e interiores, e acúmulo de cascalho ao longo dos rios."

4. Água (Corpos D'água Continentais): " [...] águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais de água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica). Não inclui os tanques de aquicultura."

O processo de amostragem e classificação se iniciou com a realização da composição Falsa-Cor (R4G3B3) da imagem, a fim de diminuir-se a confusão espectral e facilitar o trabalho do operador, visto que a partir da composição as amostras podem ser melhor identificadas, coletaram-se 5 amostras de cada classe e utilizou-se o método da Máxima verossimilhança (Maxver). Na Figura 6 apresenta-se a imagem das microbacias em cor natural R4G3B2, e em composição Falsa-Cor R4G8B3, percebe-se que a vegetação, devido à clorofila, tem a maior resposta espectral na faixa do Infravermelho próximo (Banda 8), e como a mesma está associada à cor verde, pode-se observar a vegetação ciliar em maior destaque (verde claro).

Figura 6. A) Representação da área de interesse em Cor Natural; e B) Representação em Falsa Cor.



Fonte: o autor, 2021

Para a validação das classificações utilizou-se os índices Kappa e a Acurácia Total do mapa, obtidos a partir da Matriz de erro ou Matriz Confusão do mapa. O índice Kappa trata-se de uma técnica multivariada discreta, que mede o quão bem os dados de classificação concordam com os dados de referência. Já a Acurácia Global analisa a concordância geral entre os dados de classificação e os de referência através da soma da diagonal principal dividida pelo total de amostras (SOUZA, 2020).

3.2.3 Aspectos Estruturais e Trecho Crítico

Inicialmente realizou-se uma avaliação empírica da rede de micro e macrodrenagem da Avenida, que atualmente mostra-se inexistente de canaletas propriamente ditas, somente contêm meio fio. Tampouco coletores de águas pluviais, tanto

à jusante (Centro de Araguatins) quanto à montante da Avenida (Bairro Nova Araguatins), ou seja, não existem estruturas para transposições de talvegue ou direcionamento das águas pluviais que atravessam a Avenida.

Quanto à escolha do trecho crítico, buscou-se documentos oficiais que discorram sobre a problemática da Avenida. Em 2018, a gestão municipal deu início a um convênio com a União, via Caixa Econômica Federal, com objetivo de realizar as obras de revitalização da via, incluindo a infraestrutura de drenagem, o que consta na Página 119, da Seção do Diário Oficial da União (DOU) de 27 de Dezembro de 2018. Através da Plataforma Mais Brasil pode-se consultar o convênio N° 881246/2018, que foi anulado em Novembro de 2020 (BRASIL, 2020).

Diante do documento supracitado, não foi encontrado uma indicação direta de quais seriam os pontos ou trechos críticos quanto aos eventos de alagamento. Mas constatou-se a necessidade – descrita pelo poder público – da realização de obras de macro e micro drenagem, e pavimentação na Avenida, então, a fim de embasar a escolha do trecho crítico, buscou-se também imagens e vídeos publicados pela imprensa local, como o “Folha do Bico”, que registraram os eventos, além de imagens captadas pelo Autor durante visitas de campo, todas indicando como trecho crítico o que delimitado pelos cruzamentos com a Rua 13 de Outubro (Ponto A), Rua Bartolomeu Bueno da Silva, Avenida Castelo Branco (Ponto B) e Avenida Dom Orione (Ponto C), como mostram as Figuras 7 a 14.

Figura 7. Pista principal no Trecho AB.



Fonte: o autor,2021

Figura 8. Canteiro no Ponto A.



Fonte: o autor,2021

Figura 9. Cruzamento Av.Araguaia e R.Bartolomeu Bueno (Trecho AB)



Fonte: o autor,2021

Figura 10. Cruzam. Av. Araguaia e Av. Castelo Branco (Ponto B).



Fonte: o autor, 2021.

Figura 11. Acúmulo de água no Canteiro leste, no Trecho BC.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 12. Cruzamento Av. Araguaia e Av. Castelo Branco (Ponto B).



Fonte: Folha do Bico, 2016

Figura 13. Acúmulo de água no canteiro leste, no Trecho BC.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 14. Cruzamento Av. Araguaia e R. Bartolomeu B.



Fonte: Folha do Bico, 2016

3.2.4 Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Nível de Susceptibilidade

Para definir o nível de susceptibilidade adaptou-se o método utilizado por Hammami et al. (2019), baseado no Processo Analítico Hierárquico (AHP). A partir dos níveis de importância pode-se montar uma matriz de pares quadrada $n \times n$ em que as linhas e colunas se referem a n critérios elencados para a problemática em questão. Sendo que

os critérios são analisados em pares de acordo com a escala de importância proposta por Satty (1980) que varia de 1 a 9, onde os valores pares são os intermediários, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Escala fundamental de Saaty.

Nível de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Os dois elementos avaliados contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada em relação a outro critério	Experiência e julgamento favorecem levemente um elemento em relação a outro
5	Importância forte em relação a outro critério	Experiência e julgamento favorecem moderadamente um elemento em relação a outro
7	Importância muito forte em relação a outro critério	Experiência e julgamento favorecem fortemente um elemento em relação a outro
9	Importância absoluta em relação a outro critério	Experiência e julgamento favorecem absolutamente um elemento em relação a outro
2,4,6,8	Valores Intermediários entre os valores adjacentes	-
Recíproco dos valores	Se um elemento 'a' recebe um valor X acima em relação a um elemento 'b', então 'b' recebe o valor inverso (1/X) em relação a 'a'.	-

Fonte: adaptado de Satty (1980).

Na matriz de comparação pareada ou matriz de julgamento, a diagonal principal sempre tem valor unitário, visto que um elemento sempre tem igual importância em relação a ele mesmo, e os valores abaixo da diagonal principal são o inverso dos valores acima da mesma, característica de uma matriz simétrica, como mostra a Tabela 4. A ideia é que o julgamento dos fatores ajustados e confrontados entre si representem mais precisa e seguramente as características encontradas na área de estudo (MANTOVANI, J. R.; BACANI, 2018).

Tabela 4. Matriz de comparação pareada

Fatores	A	B	C	n
A	1	a_{12}	a_{13}	a_{1n}
B	$1/a_{12}$	1	a_{23}	a_{2n}
C	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	a_{3n}
n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{3n}$	1

Fonte: adaptado de Satty (1980).

Para calcular o vetor de prioridades da matriz em questão, o autor do método sugere quatro (4) maneiras, que variam de acordo com a disponibilidade do usuário em realizar os cálculos de maneira automatizada, o que não é um problema para este trabalho, então descreve-se abaixo a maneira que, segundo o autor, fornece um resultado mais preciso, assim como as etapas seguintes.

- a) Dada a Matriz de julgamentos $n \times n$ como mostra a Tabela 4, multiplicam-se todos os elementos de cada respectiva linha, e extrai-se a n -ésima raiz, formando-se uma matriz de n linhas e 1 coluna, ou seja, um vetor, onde cada linha é resultado da operação descrita acima, como mostra a Equação 5.

$$V1_1 = (1 * a_{12} * a_{13} * a_{14} * \dots * a_{1n})^{\frac{1}{n}} \quad \text{Equação 5}$$

$$V1_2 = \left(\frac{1}{a_{12}} * 1 * a_{23} * \dots * a_{2n} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$V1_n = \left(\frac{1}{a_{1n}} * \frac{1}{a_{2n}} * \dots * \frac{1}{a_{(n-1)n}} * 1 \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$V1 = \begin{bmatrix} V1_1 \\ V1_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V1_n \end{bmatrix}$$

- b) Normaliza-se o vetor $V1$, dividindo cada elemento pela soma de todos os elementos, obtendo-se o vetor de prioridades VP .
- c) Faz-se a multiplicação entre a matriz de julgamentos MC e o vetor de prioridades VP ;
- d) Divide-se cada elemento do vetor obtido no passo (c) por *cada* respectivo elemento de VP .
- e) Calcula-se a média simples entre os elementos do vetor obtido em (d), obtendo-se assim $\lambda_{máx}$, chamado por Satty de autovalor principal.
- f) Calcula-se o Índice de Consistência do julgamento, que depende de $\lambda_{máx}$, como mostra a Equação 6 abaixo

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Equação 6}$$

g) Em seguida, a fim de verificar a consistência do julgamento, calcula-se a razão de consistência CR (Equação 7), que compara o índice de consistência da matriz CI , com um índice de consistência aleatório, fornecido por Saaty (1980) de acordo com a dimensão da matriz, conforme a Tabela 5. O valor de CR deve ser aproximadamente 0,1 para o julgamento ser aceitável ou consistente.

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad \text{Equação 7}$$

onde:

CI : Índice de Consistência;

RI : índice de consistência aleatório, fornecido por Saaty em função da dimensão 'n' (1991)

Tabela 5. Índice de Consistência Aleatório.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1991).

Neste trabalho, os quatro fatores utilizados foram Hipsometria, Declividade, Uso e Ocupação do Solo, e Pedologia (Classe de Solo), cada um deles foi dividido em classes que receberam notas de 1 a 10, que representam uma susceptibilidade crescente de cada classe de cada fator. Em seguida, através da Equação 8, calculou-se a susceptibilidade de cada célula ou *pixel* da imagem a partir da combinação dos quatro mapas. Ao final, mediante ferramentas de simbologia do ArqGIS®, dividiu-se os valores de susceptibilidade em cinco classes: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta, Muito alta.

$$S_t = \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad \text{Equação 8}$$

S_t : Valor de Suscetibilidade.

W_i : Peso do Fator, advindo do vetor de prioridades VP , obtido via AHP;

R_i : Notas atribuídas às classes dos respectivos fatores

Abaixo apresenta-se a Equação 9 de susceptibilidade aplicada aos fatores escolhidos, e implantada no software através da ferramenta Raster Calculator.

$$St = W_{US}R_{US} + W_{DL}R_{DL} + W_{HP}R_{HP} + W_{PD}R_{PD} \quad \text{Equação 9}$$

onde:

W_{US} e R_{US} : *Uso e ocupação do solo*;

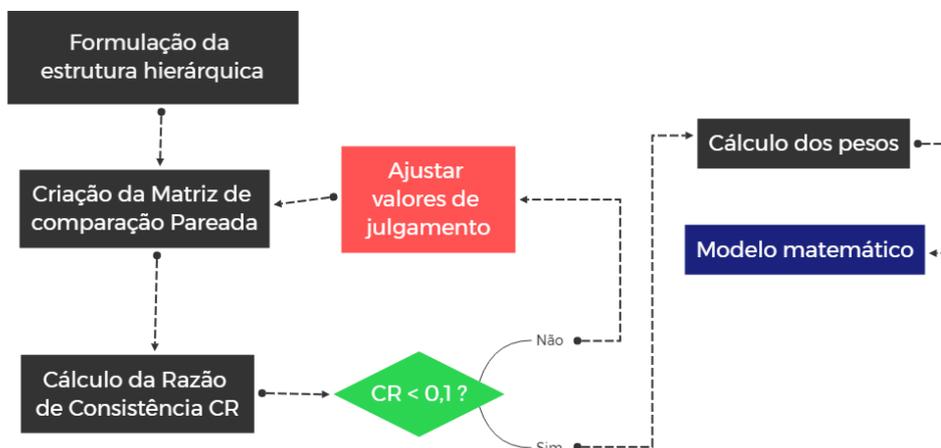
W_{DL} e R_{DL} : *Declividade*;

W_{HP} e R_{HP} : *Hipsometria*;

W_{PD} e R_{PD} : *Pedologia*.

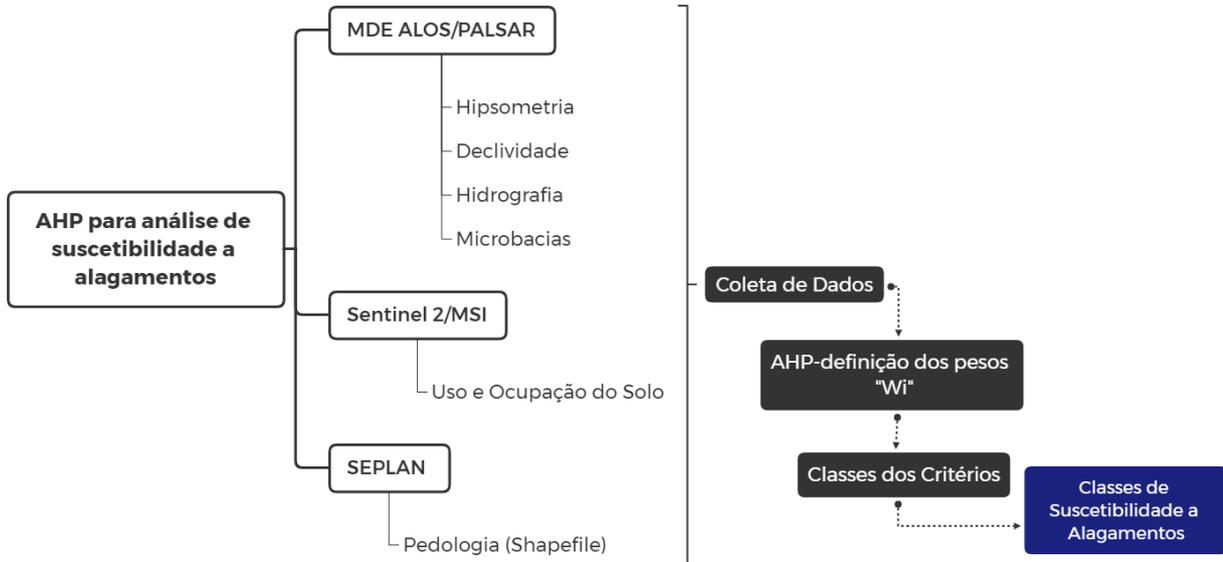
Definiram-se as classes dos fatores e suas respectivas notas. E após obter-se o vetor de prioridades VP a partir da Matriz de comparação pareada, foi possível calibrar o julgamento através do índice de consistência e observar qual fator tem maior influência no cálculo da susceptibilidade a alagamentos. Nas Figura 15 e 16 apresentam-se os fluxogramas de aplicação do método AHP e da confecção do mapa de susceptibilidade, respectivamente.

Figura 15. Processo Analítico Hierárquico – Esquema de aplicação.



Fonte: adaptado de Caprario (2019).

Figura 16. Aplicação da AHP para confecção de mapa de Susceptibilidade a alagamentos via SIG e Sensoriamento Remoto.



Fonte: o autor, 2021

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MICROBACIAS DE INTERESSE

4.1.1 Características Físicas e Tipo de Solo

Para a obtenção dos parâmetros desejados, fez-se necessário o cálculo do comprimento axial dos principais cursos d'água das respectivas bacias, que não apresentam características perenes, ou seja, não escoam durante todo o tempo (VILLELA; MATTOS, 1975). Seguindo a classificação dos autores supracitados, o córrego Brejinho é intermitente, escoando em alguns trechos durante o período de chuvas, e no caso da Microbacia Taquari, não existe um curso d'água bem definido na área urbana, e a maioria do escoamento se direciona ao Rio Taquari, de características perene. Os comprimentos foram calculados via ferramentas de “*polyline*” do ArqGIS®, através da drenagem obtida conforme o capítulo “3.2.1.Dados Planialtimétricos” e validados através do Google Earth. Na Tabela 6 pode-se observar os parâmetros calculados.

Tabela 6. Características Físicas das Microbacias.

Característica	Brejinho	Taquari
A [Km ²]	7,132	1,878
P[Km]	17,282	8,441
L[Km]	1,960	1,107
Coefficiente de Compacidade - Kc	1,812	1,725
Fator de Forma - Kf	0,599	0,509
Índice de Circularidade - IC	0,300	0,331

Fonte: o autor, 2021.

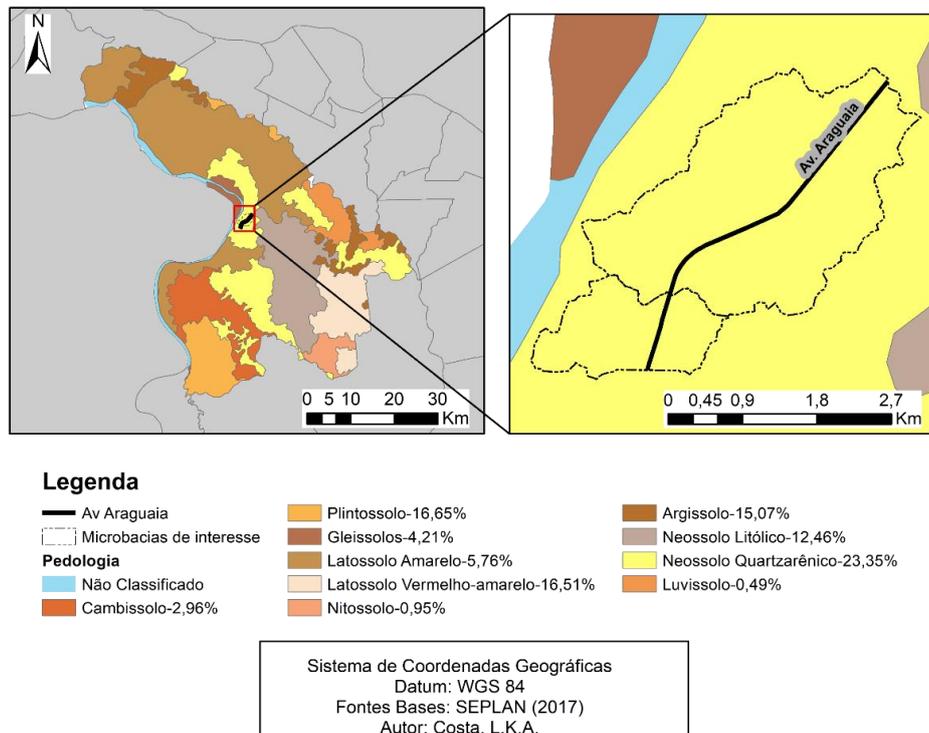
Quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de compacidade, mais próximo de um círculo é a bacia, implicando num menor tempo de concentração, e maior será a susceptibilidade a inundações (VILLELA; MATTOS, 1975). Os valores encontrados indicam que as microbacias apresentam formato alongado e portanto baixa propensão à

enchentes. Quanto ao fator de forma K_f , o parâmetro relaciona a largura média e o comprimento axial da bacia, e quanto menor o seu valor, menor a probabilidade de ocorrência de enchentes, os resultados encontrados seguem a tendência indicada pelo coeficiente de compacidade, de baixa susceptibilidade. Os valores de índice de circularidade I_c comprovam o indicado pelos fatores anteriores, já que são bem menores que a unidade e indicam um formato alongado das respectivas microbacias.

Quanto ao tipo de solo, de acordo com dados fornecidos pela SEPLAN (2015), na área de estudo tem-se a presença de solo do tipo Neossolo Quartzarênico, conforme a Figura 17. Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC (2013), a classe é comum em relevos planos ou suaves ondulados e apresenta textura essencialmente arenosa. De acordo com Scopel Et al. (2013), as taxas de infiltração são altas e apresentam drenagem excessiva, e chuvas intensas como as que ocorrem entre os meses de outubro e abril na região, potencializam a erosão hídrica, mesmo em baixas declividades, com baixa velocidade de escoamento.

A presença de Neossolo Quartzarênico pode, somada a outros fatores, justificar a facilidade com que a chuva acentua buracos existentes na Avenida, como pode-se observar nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 17. Pedologia de Araguaatins-TO.



Fonte: adaptado de SEPLAN(2015).

Figura 18. Trecho AB - Cruzamento
Av. Castelo Branco



Fonte: o autor, 2021

Figura 19. Trecho AB -
Cruzamento R. Bartolomeu Bueno



Fonte: o autor, 2021.

Figura 20. Trecho AB -
Cruzamento R. Bartolomeu
Bueno



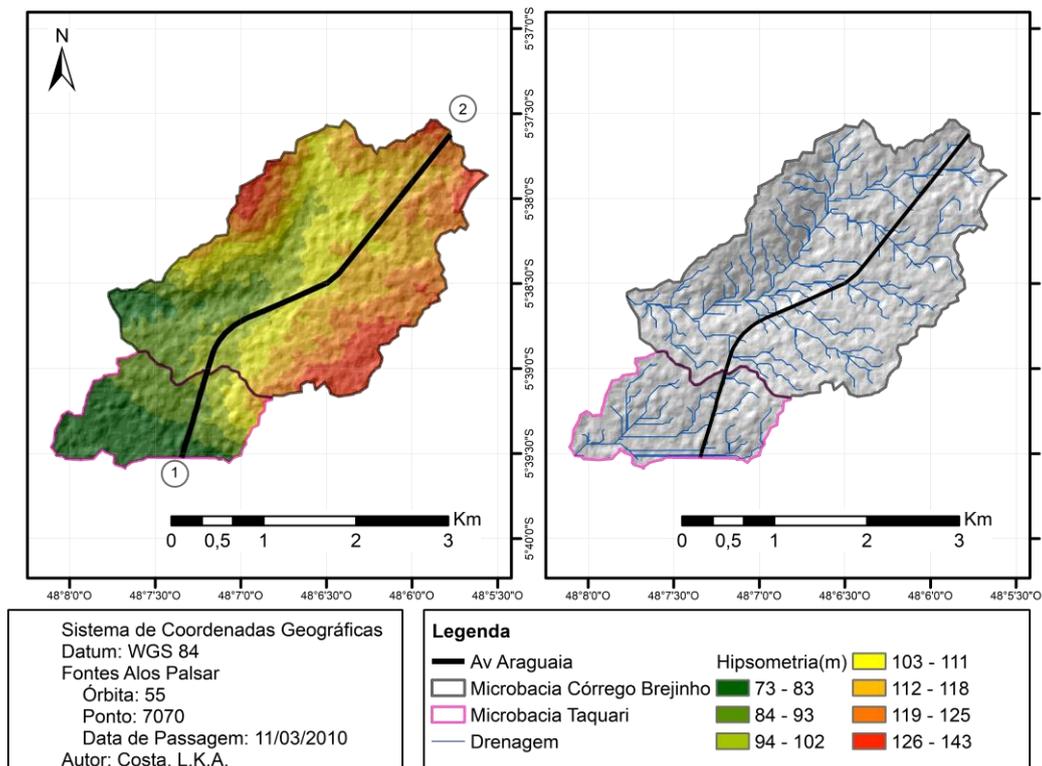
Fonte: o autor, 2021

4.1.2 Hipsometria e Declividade

A Hipsometria e a Drenagem são apresentadas na Figura 21, ambas obtidas através do MDE ALOS/PALSAR, em comparação com os dados de drenagem em formato *shapefile* (.shp) disponibilizados pelas SEPLAN(15) percebeu-se diferenças entre o traçado do curso d'água principal da ordem de 5 a 8 metros no caso da Microbacia Brejinho, e da ordem de 10 a 15 metros para o rio Taquari, principalmente no trecho mais sinuoso, onde, devido à resolução do *pixel*, houve dificuldade em representar o córrego com precisão no trecho próximo à foz. Entretanto, as variações foram consideradas aceitáveis, já que na literatura cita-se um erro tolerável de $(0,0002 \times M)$, sendo "M" o denominador da escala do mapa, então, para a escala utilizada nos mapas deste trabalho,

de 1/100.000, tem-se um erro tolerável de até 20m, o que corrobora o fato de que as variações observadas não influenciaram os resultados de maneira relevante.

Figura 21. Mapa de Hipsometria e Drenagem das Microbacias de interesse.

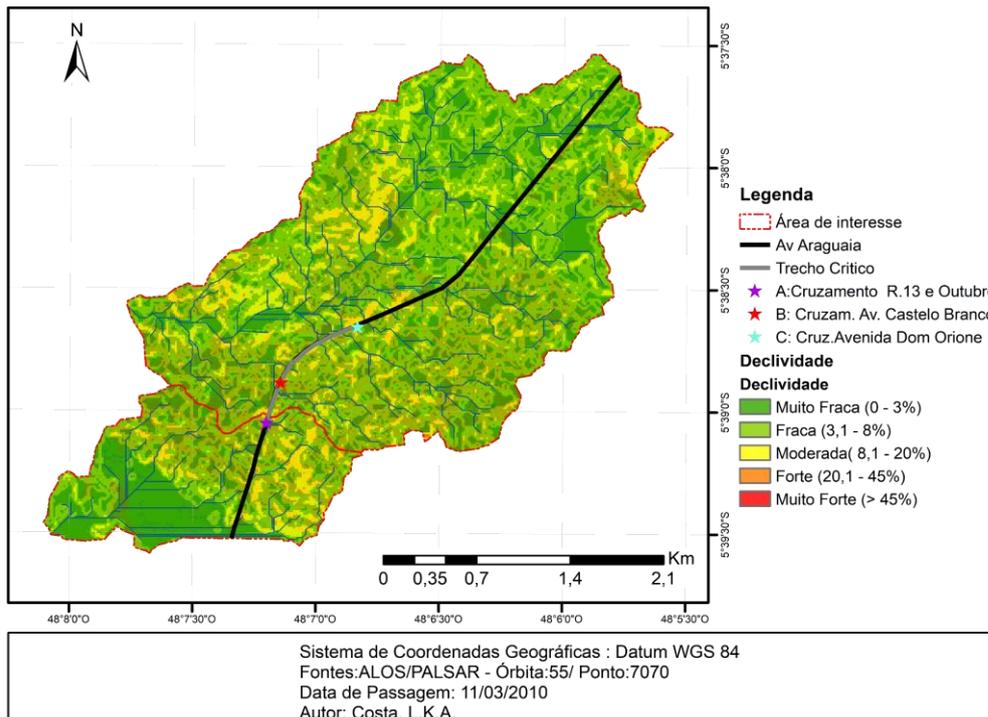


Fonte: o autor, 2021

No mapa de Hipsometria percebe-se que o maior trecho da Avenida Araguaia encontra-se em altitudes de 73 a 111 metros - sendo os valores mais baixos presentes na Microbacia Taquari - e declividades de 0 a 8% (Muito Fraca a Fraca), com algumas regiões de valores moderados (8 a 20%), percebeu-se também uma região de baixas declividades na interface entre as duas microbacias. Na Figura 21 pode-se observar a presença de drenos que atravessam a Avenida, principalmente na Microbacia Brejinho, e como a via carece de bueiros e estruturas auxiliares para a transposição dos talwegues, a transição do escoamento ocorre pela faixa de rodagem da via, provocando acúmulo de

água à medida que o escoamento superficial se acentua. E na Figura 22 tem-se o mapa de declividade, destaca-se o trecho crítico delimitado pelos pontos A, B e C, o perfil transversal nesses pontos é mostrado a seguir, a fim de elucidar o caminho preferencial do fluxo.

Figura 22. Mapa de Declividade das Microbacias de interesse.

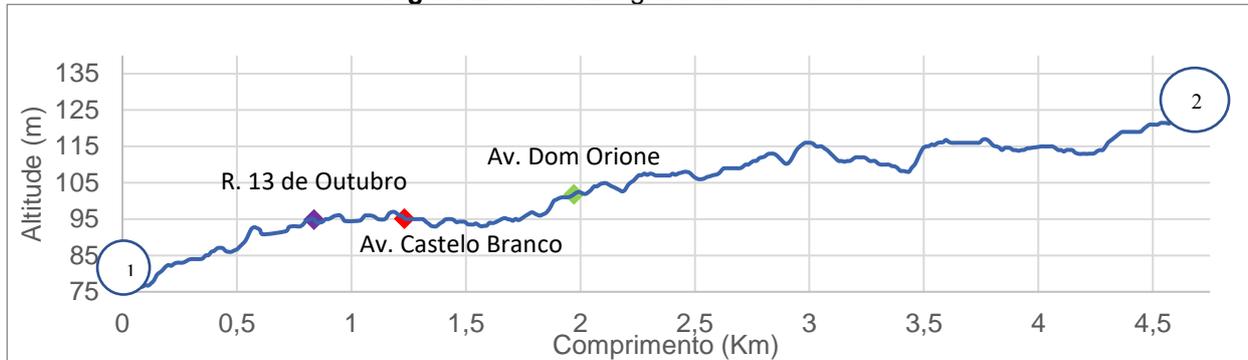


Fonte: o autor, 2021.

Na Figura 23 apresenta-se o perfil longitudinal da Avenida, com a escala vertical extrapolada, para melhor visualização. Apesar de uma considerável variação de altitudes – aproximadamente 30 metros entre os pontos “1” e “2” - a Avenida sofre uma redução em sua declividade no trecho entre os cruzamentos A e C (1.095 metros de comprimento), indicando uma redução na velocidade do escoamento, e um conseqüente acúmulo das águas. No recorte do perfil apresentado na Figura 24, observa-se as altitudes dos pontos C (101,818m), B(95,155m) e A(94,005), o perfil tem características que indicam um fluxo rápido de “C” para “B”, o trecho de aproximadamente 740m de comprimento tem uma diferença de cotas de 6,663m. Já no Trecho AB, de 355,31m de comprimento, constata-se uma variação de cotas de menos de um (1) metro entre as extremidades, propiciando um acúmulo de fluxo, ressaltando que no trecho AB existem cotas maiores que as do ponto “A”, ou seja, seria incorreto afirmar que toda a precipitação ou escoamento que

incide na área se direciona totalmente para um dos pontos, em visitas a campo observou-se um maior acúmulo na região central do trecho - entre 950m e 1150m no eixo horizontal do gráfico da Figura 24.

Figura 23. Perfil Longitudinal da Avenida.



Fonte: o autor, 2021.

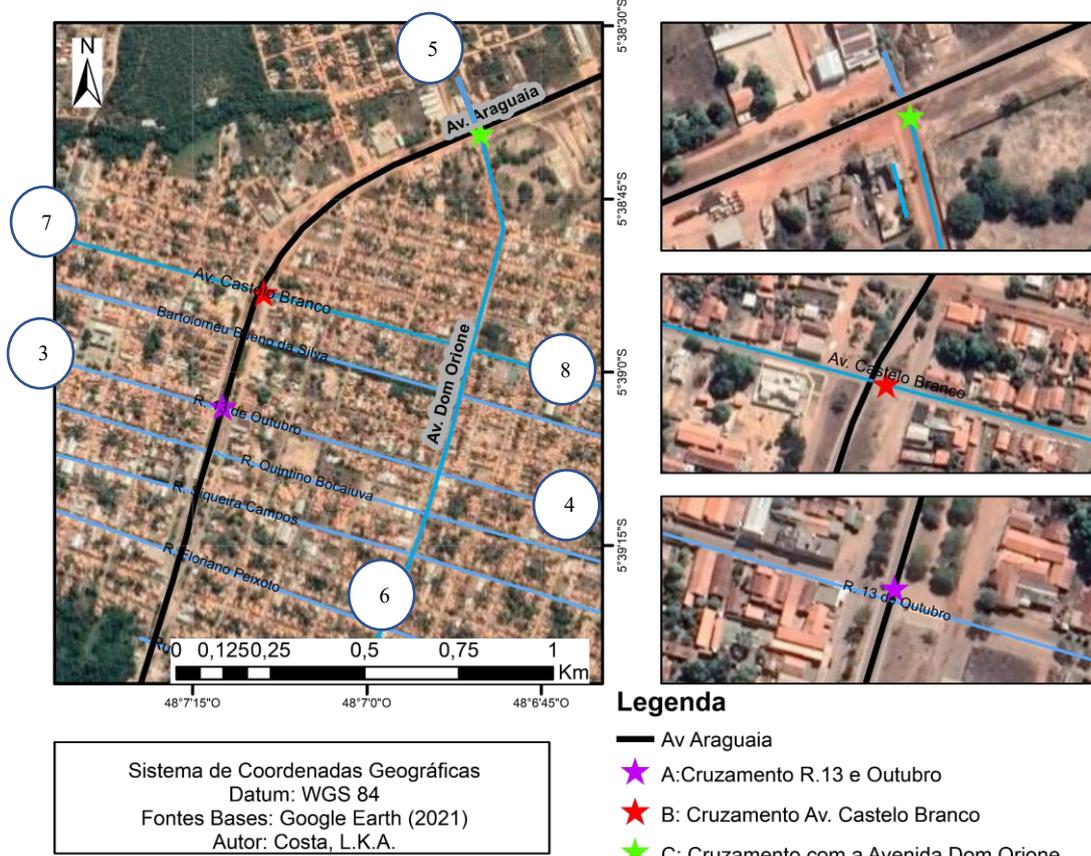
Figura 24. Perfil Longitudinal do Trecho crítico.



Fonte: o autor, 2021.

Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 apresenta-se a caracterização do trecho crítico, em planta e perfis, respectivamente. Onde pode-se observar os aspectos de ocupação no entorno, perfil longitudinal das ruas supracitadas e a indicação do local de cruzamento com a Avenida Araguaia. A alteração de declividade mais acentuada pode ser observada no caso da R. 13 de Outubro, onde o escoamento superficial proveniente do ponto “4” é parcialmente acumulado na faixa de rodagem da Avenida, e o excesso do fluxo segue em direção ao ponto “3”, o perfil corrobora a ocorrência dos eventos de alagamentos no Trecho AB.

Figura 25. Caracterização do Trecho Crítico.



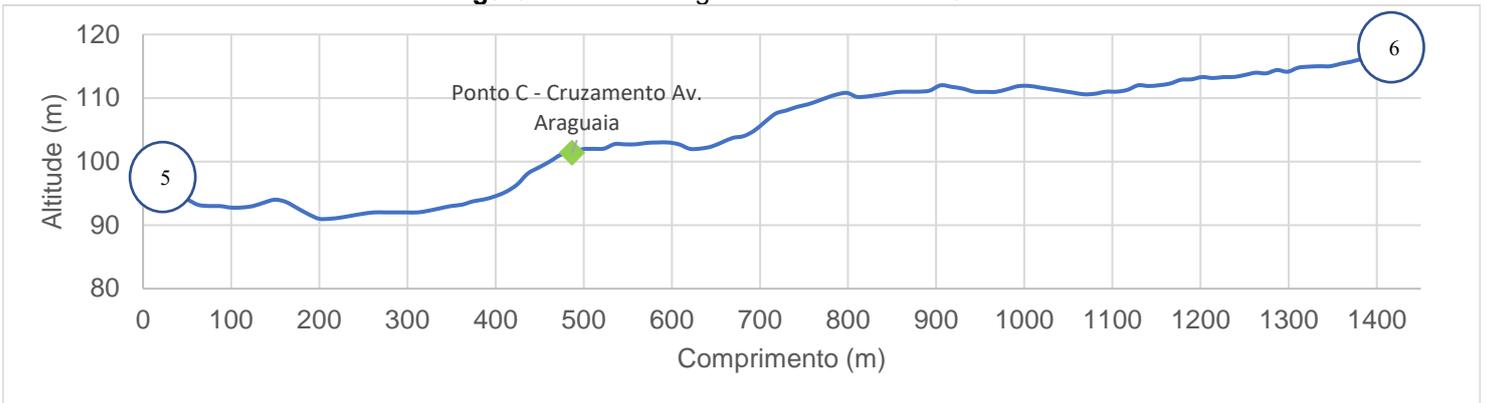
Fonte: o autor,2021.

Figura 26. Perfil Longitudinal da Rua 13 de Outubro



Fonte: o autor, 2021.

Figura 27. Perfil Longitudinal da Av. Dom Orione.



Fonte: o autor, 2021.

Figura 28. Perfil Longitudinal da Avenida Castelo Branco



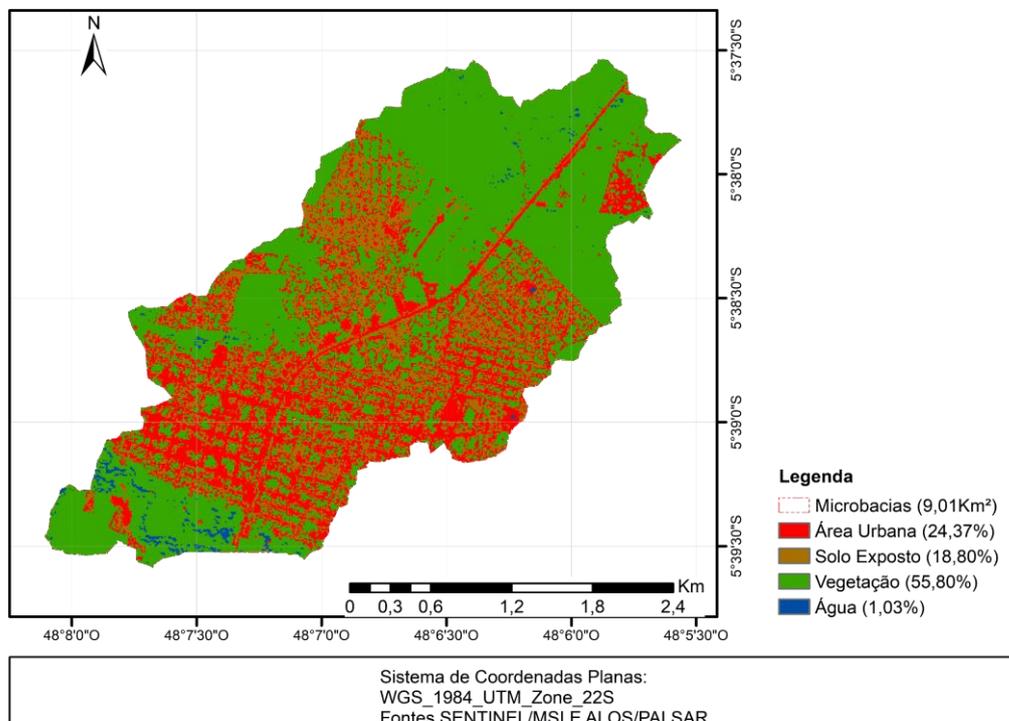
Fonte: o autor, 2021.

4.1.3 Uso e Ocupação do Solo

A escolha das classes se deu em função da influência que cada tipo de uso e ocupação tem no escoamento superficial da microbacia, e também levou-se em consideração a resolução espacial da imagem utilizada (*pixels* de 10x10m). A classificação é apresentada na Figuras 29, encontrou-se um índice Kappa de 0,57 (bom) e uma acurácia global de 68,3%. A imagem utilizada, datada de 01/07/2021 apresentou baixa presença de nuvens e consequentemente poucos *pixels* do tipo “sombra”.

A classe de vegetação (5,02Km²) incluiu tanto a rasteira quanto a florestal, ambas conferem proteção ao solo contra o impacto da precipitação, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e favorecendo a infiltração, a classe foi a que apresentou maior facilidade em ser vetorizada, já que foi de fácil identificação no processo de amostragem.

Figura 29. Mapa de Uso e Ocupação do Solo.



Fonte: o autor, 2021

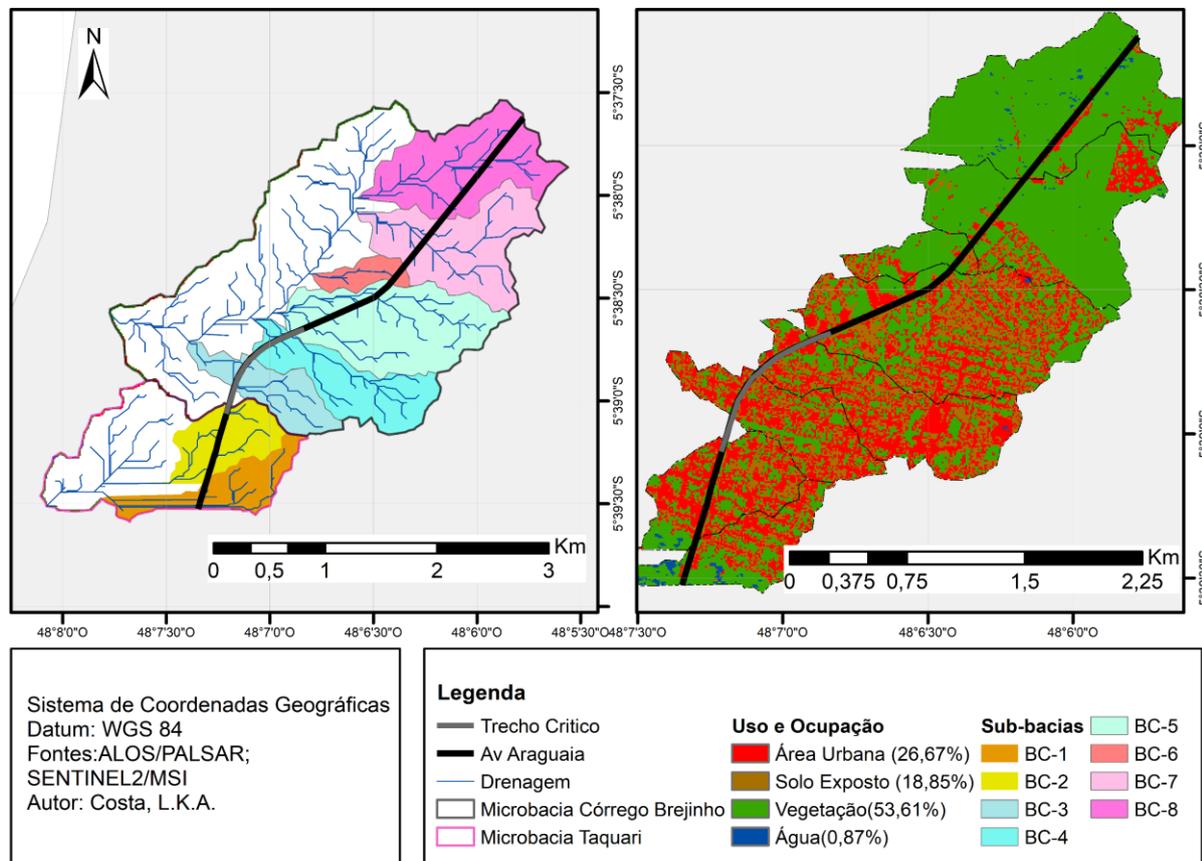
A classe de solo exposto (1,7Km²) está ligada principalmente às vias não pavimentadas e loteamentos onde a cobertura vegetal foi retirada, tais áreas contribuem

para o aumento da taxa de infiltração das águas, visto a característica essencialmente arenosa do solo da região, mas em contrapartida favorecem o carreamento de solo durante os eventos de precipitação, o que, segundo Scopel et al.(2013) pode ser prejudicial para as estruturas de micro e macrodrenagem, sejam convencionais ou compensatórias. Durante o processo de amostragem encontrou-se dificuldade em diferenciar-se os *pixels* representativos de telhados cerâmicos e os de solo exposto, visto a semelhança de coloração, isso posto, ressalta-se a importância das visitas e análises in loco para validação da classificação.

Encontrou-se dificuldade na amostragem para a classe de águas (0,092 Km²), devido à pequena largura do leito do Rio Taquari e a presença de mata ciliar que gera sombra, diminuindo a acurácia da classificação. Não obstante, a data de passagem corresponde ao período de estiagem da região, época em que se tem a diminuição do nível do rio Taquari e seus afluentes. Respeitou-se o número de amostras de *pixels* que caracterizavam cursos d'água em outras quatro (4) tentativas de classificação, entretanto não encontrou-se resultados muito diferentes entre si, ou seja, o percentual de água o índice Kappa encontrados foram semelhantes e julgou-se a resultado aceitável.

Para a Área Urbana (2,19 Km²) incluiu-se vias asfaltadas, telhados e calçadas, tais elementos tem funções ligeiramente diferentes em relação à geração de escoamento superficial, mas são essencialmente áreas antrópicas e impermeáveis, que cumprem papel semelhante no ciclo hidrológico da região. No Trecho Crítico da Avenida pode-se observar uma alta taxa de impermeabilização do solo, que apresenta-se como um baixo percentual quando comparada à toda a área das microbacias, entretanto, numa análise das sub-bacias que a Avenida está inserida de contribuição direta no escoamento que incide na avenida, observou-se maior percentual de áreas antrópicas, como mostra o recorte da classificação apresentado na Figura 31 a seguir. Através da ferramenta *Watershed*, citada na metodologia, as sub-bacias foram extraídas da drenagem obtida e, a análise identificou oito (8) drenos que transpõem a via, as oito sub-bacias foram identificadas conforme a Figura 30, com o prefixo "BC" (BC-1,BC-2,BC-3,BC-4,BC-5,BC-6,BC-7, BC-8).

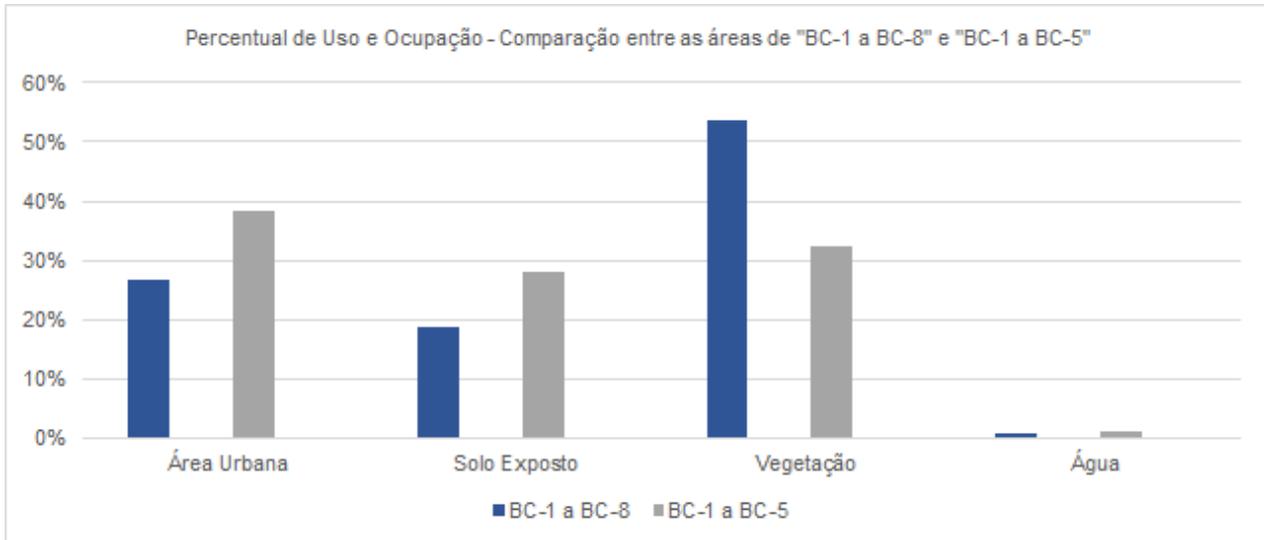
Figura 30. Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Sub-bacias de contribuição direta.



Fonte: o autor, 2021

Os percentuais de uso e ocupação seguiram a mesma tendência da classificação geral apresentada na Figura 29 anteriormente, principalmente em função da vasta área de pastagem já mais afastada do perímetro urbano, a fim de uma melhor representação do uso e ocupação nos arredores da região problema, na Figura 31 mostra-se os percentuais de uso e ocupação considerando as oito sub-bacias e em seguida as BC's de 1 a 5, visto que o alto percentual de vegetação nas sub-bacias BC-6,7 e 8 podem proporcionar uma interpretação equivocada da problemática.

Figura 31. Percentuais de Uso e Ocupação – Comparação entre a área de todas as sub-bacias de contribuição e as sub-bacias BC-1 e BC-5.



Fonte: o autor, 2021.

Pode-se observar que na segunda análise, considerando as principais sub-bacias de contribuição do trecho crítico da Avenida, tem-se uma maior antropização, mas também uma área considerável de vazios urbanos, que representam áreas como lotes baldios e canteiros, que se mostram como potenciais regiões para implementação de técnicas compensatórias de drenagem, tais soluções podem ser integradas à paisagem quando seguidas de um planejamento voltado à melhoria da qualidade ambiental urbana, exemplos são os jardins de chuva, trincheiras de infiltração e bacias de contenção, dentre outros métodos encontrados na infraestrutura verde.

4.2 SUSCEPTIBILIDADE A ALAGAMENTOS

Os resultados do mapa de susceptibilidade a alagamentos são apresentados a seguir conforme a sequência de execução, já que foi desenvolvido em duas etapas, na fase teórica realizou-se a reclassificação dos atributos temáticos contidos nos mapas propostos (uso e ocupação, declividade, hipsometria e pedologia), e obteve-se os

pesos a serem inseridos na Equação de Susceptibilidade, implementada no ArqGIS® na etapa seguinte.

Para cada fator estabeleceu-se uma escala crescente de valores adimensionais, que variam de notas 1 (menos suscetível) a 10 (mais suscetível), a influência de cada classe em acentuar o escoamento superficial direto foi o critério base, na Tabela 7 pode-se observar as notas (R_i) atribuídas. No mapa de uso e ocupação do solo, áreas antrópicas receberam a nota máxima, principalmente devido ao fato de não existirem na Avenida, e tampouco nas vias contidas nas sub-bacias de contribuição, estruturas de macrodrenagem, como coletores de concreto ou ferro fundido.

Tabela 7. Reclassificação dos Mapas de Caracterização das Microbacias.

Fator	Classes	Notas (R_i)
Uso e Ocupação do Solo	Área Urbana	10
	Solo Exposto	6
	Vegetação	2
	Água	1
Declividade (%)	Muito Fraca (0-3%)	10
	Fraca (3-8%)	8
	Moderada (8-20%)	5
	Forte (20-45%)	2
	Muito Forte (>45%)	1
Hipsometria (m)	73-83	10
	84-93	7
	94-102	5
	103-111	4
	112-118	3
	119-125	2
Pedologia	126-143	1
	Gleissolos	10
	Argissolos	6
	Neossolo Quartzarênico	4
	Latossolos	2
	Neossolo Litólico	1

Fonte: o autor, 2021.

As notas assignadas às classes de declividade levam em consideração que em áreas mais planas a tendência é de redução da velocidade do escoamento e acúmulo das águas caso haja baixa permeabilidade, principalmente quando à montante de tais regiões existem declividade mais acentuadas, como é o caso do Trecho Crítico da Avenida, situado nas cotas mais baixas das sub-bacias BC-3, BC-4 e BC-5. Quanto à hipsometria, considerou-se como mais suscetíveis as regiões de cotas mais baixas, já que o escoamento tende a fluir para as mesmas, e para as classes de solos, seguiu-se a ideia de que as classes mais arenosas tem uma maior taxa de infiltração, este teve o menor peso de

prioridade na etapa de comparação pareada, a matriz é apresentada na Tabela 8, assim como a Equação 10, encontrada via AHP e aplicada no software para o cálculo de susceptibilidade, em que a maior prioridade é associada aos fatores de Uso e ocupação e Declividade do terreno.

Tabela 8. Matriz de comparação pareada dos fatores.

	Uso e Ocupação	Declividade	Hipsometria	Pedologia
Uso e Ocupação	1	3	7	9
Declividade	1/3	1	5	8
Hipsometria	1/7	1/5	1	3
Pedologia	1/9	1/8	1/3	1

Fonte: o autor, 2021.

$$\lambda_{max} = 4,1684$$

$$CR = 0,0624 < 0,1$$

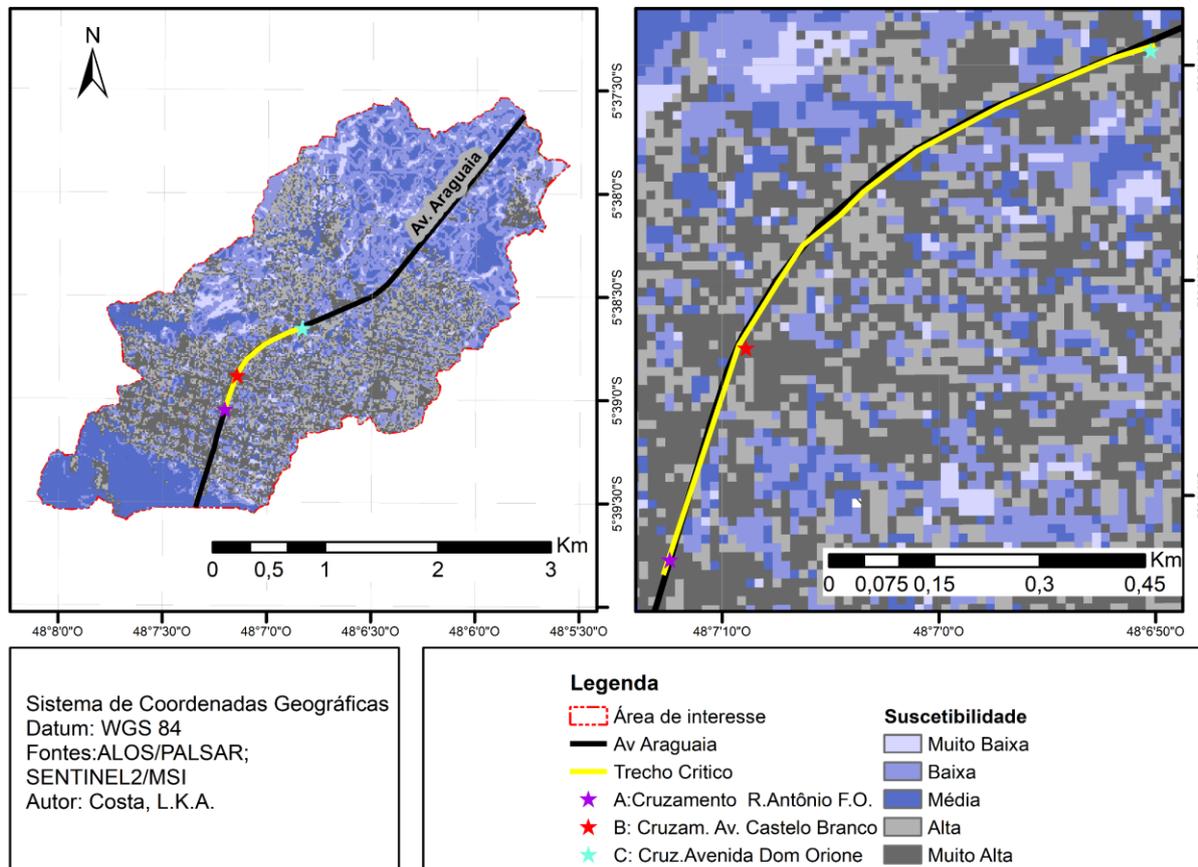
$$VP = \begin{bmatrix} W_{US} \\ W_{DL} \\ W_{HP} \\ W_{PD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5775 \\ 0,2976 \\ 0,0843 \\ 0,0406 \end{bmatrix}$$

$$St = 0,5775R_{US} + 0,2976R_{DL} + 0,0843R_{HP} + 0,0406R_{PD} \quad \text{Equação 10}$$

O julgamento pareado entre fatores tenta representar mais precisa e seguramente as condições específicas da região, a análise por meio de observações empíricas, e estudo dos mapas temáticos confeccionados indica como áreas mais suscetíveis aquelas impermeabilizadas, em baixas altitudes e declividades. O autovetor de prioridades VP resultou numa razão de consistência de 0,0624, e de acordo com Saaty(1991) os resultados são aceitáveis, já que de $CR=0,0624<1$.

A classificação de cada *pixel* do arquivo *raster* em termos de susceptibilidade através da Equação 10, resultou no mapa apresentado na Figura 32 a seguir, assim como um recorte mais próximo ao trecho crítico, demonstrando que o mesmo está associado à classes média, alta ou muito alta. As regiões de menor susceptibilidade se encontram nas regiões de maior elevação e taxas de vegetação ao norte, na Microbacia Brejinho; as de média susceptibilidade estão majoritariamente mais ao sul da área estudada, na Microbacia Taquari.

Figura 32. Mapa de Susceptibilidade a alagamentos.



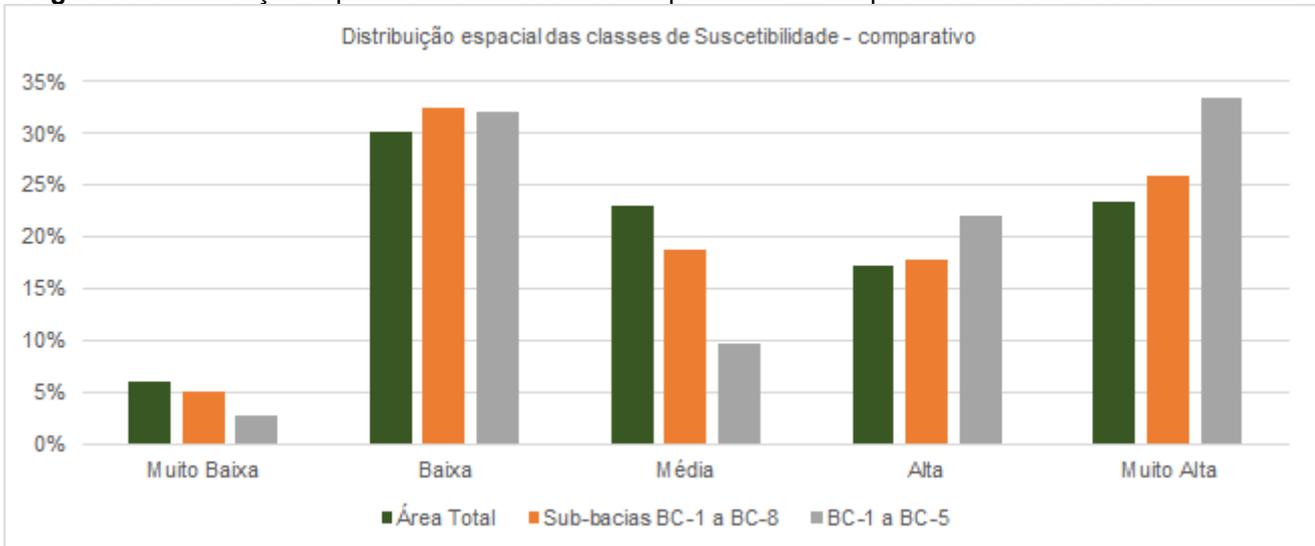
Fonte: o autor, 2021.

A distribuição espacial das classes mapeadas é apresentada na Tabela 9 e Figura 33, seguindo da análise macro, analisando toda a área de estudo, passando pelas sub-bacias de contribuição de toda a avenida, e por fim analisou-se o percentual das classes de susceptibilidade nas sub-bacias BC-1 a BC-5, que são mais representativas do perímetro urbano de Araguatins.

Tabela 9. Distribuição espacial das classes de susceptibilidade.

Susceptibilidade	Área Total		Sub-Bacias (BC's)		BC-1 a BC-5	
	[ha]	%	[ha]	%	[ha]	%
Muito Baixa	54,02	5,99%	27,58	5,05%	9,23	2,82%
Baixa	272,41	30,23%	178,01	32,55%	105,29	32,11%
Média	207,85	23,07%	102,61	18,77%	31,63	9,65%
Alta	155,79	17,29%	97,07	17,75%	72,10	21,99%
Muito Alta	210,97	23,41%	141,53	25,88%	109,60	33,43%
Total	901,04	100%	547,82	100%	327,880	100%

Fonte: o autor, 2021.

Figura 33. Distribuição espacial das classes de susceptibilidade – comparativo entre as áreas delimitadas.

Fonte: o autor, 2021.

A partir da Figura 33 percebe-se que, à medida que restringe-se a região de análise, aproximando-se da principal área de contribuição de escoamento para a Avenida, as classes de susceptibilidade “Alta” e “Muito Alta” aumentam, em função, principalmente, da maior taxa de impermeabilização do solo. Dito isso, a seguir apresentase, na Tabela 10, um comparativo de uso e ocupação entre as sub-bacias BC-1 a BC-5, com a distribuição espacial de cada classe de uso e ocupação, em percentual da área total de cada sub-bacia. Na coluna “Total” tem-se o percentual que a sub-bacia ocupa da área supracitada (BC-1 a BC-5).

Tabela 10. Distribuição espacial das classes de uso e ocupação nas sub-bacias BC-1 a BC-5.

Sub-bacias	Área Urbana	Solo Exposto	Vegetação	Água	Total
BC-1	9,3%	8,1%	21,6%	83,2%	13,7%
BC-2	17,3%	12,8%	13,7%	10,7%	14,8%
BC-3	16,5%	15,4%	10,2%	0,0%	14,0%
BC-4	24,8%	23,4%	16,6%	2,0%	21,5%
BC-5	32,1%	40,4%	37,9%	4,1%	36,0%

Fonte: o autor, 2021.

No geral tem-se em cada classe uma proporção que acompanha o tamanho das bacias, isto é, o maior percentual de área urbana da região está presente na sub-bacia BC-5, seguida da BC-4, e assim por diante, com exceção para as classes de “Solo exposto” e “Água”, devido à maior proximidade da BC-2 com o rio Taquari. A tabela demonstra, como intuitivamente era de se esperar, que nenhuma das classes está majoritariamente concentrada numa sub-bacia específica, salvo a água, devido a presença do córrego.

Não obstante, como já exposto no capítulo anterior, percebeu-se, que aproximadamente 60,5% da área das três principais sub-bacias de contribuição do trecho crítico, a saber, BC-3, BC-4 e BC-5, são de vazios urbanos, o percentual por si só não pode implicar em conclusões relevantes, para isso faz -se necessário o levantamento dessas áreas, e avaliação quanto à parâmetros como tipo de propriedade (se pública ou privada), tipo de vegetação presente, características urbanas do entorno, especulação imobiliárias, dentre outras. O fato é que existem, à montante da Avenida, áreas com potencial para execução de Bacias de Detenção (BD), a fim de reduzir-se a velocidade da enxurrada que chega na via - principalmente no Trecho AB – e no centro da cidade, que se encontra em cotas mais baixas que a Avenida Araguaia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do caráter exploratório da pesquisa, os objetivos propostos foram atingidos e os resultados foram contundentes com as variáveis ambientais analisadas:

- Caracterizou-se, satisfatoriamente, as microbacias de interesse através de arquivos *raster* e *shapefile*, e processamento de dados no *software* ArqGIS;
- Determinou-se principais fatores de influência na dinâmica do escoamento superficial que acomete a Avenida, destaca-se, além da ausência de canaletas e bueiros, as áreas impermeabilizadas e as baixas taxas de declividade, os quais foram fatores de maior peso na matriz de comparação pareada;
- O uso de geotecnologias mostrou-se eficaz no processamento dos dados, permitindo uma análise integrada acerca dos alagamentos, a partir de dados de caráter público;
- O modelo aplicado, via AHP foi validado para o mapeamento da susceptibilidade a alagamentos na Avenida Araguaia e suas imediações.

As cidades do extremo norte do Tocantins são de pequeno porte e carecem de planos de gestão integrada que contemplem um uso ordenado do solo, assim como diretrizes para a gestão de águas pluviais. As infraestruturas de drenagem são deficitárias ou inexistentes, como é o caso da Avenida Araguaia em Araguatins, a via trata-se de um trecho urbano de uma rodovia estadual, a TO-010, e sofre anualmente, ou na ocorrência de chuva de maior intensidade, com eventos de alagamentos e enxurradas, principalmente no trecho crítico descrito, entre os cruzamentos com a Rua 13 de outubro e Av. Dom Orione.

Sendo assim, o presente estudo pode auxiliar nas tomadas de decisão quanto à gestão da drenagem urbana, e pode ser implementado pela gestão pública para análise de outras áreas da cidade, visto o incremento de antropização dos últimos anos, e que de fato é inerente ao processo de urbanização e desenvolvimento, mas é importante que a ocupação do solo seja precedida de planejamento que considere o equilíbrio ambiental nas bacias urbanas. Destaca-se aqui a importância em realizar-se pesquisas geoambientais integradas, que subsidiem planos diretores participativos e promovam o uso

ordenado do solo do município, de modo a prevenir ou atenuar os eventos hidrológicos recorrentes.

A proposição de solução detalhada para a problemática não faz parte do escopo do trabalho, entretanto, encontra-se na bibliografia recomendações de medidas estruturais e não estruturais para uma gestão sustentável das águas pluviais, a fim de ter-se uma adaptação das cidades frente às mudanças climáticas. Na área de estudo existem espaços suficientes em canteiros e lotes baldios para a implementação de medidas estruturais alinhadas com os princípios de infraestrutura verde, de retenção/detenção das águas pluviais e integração de técnicas de drenagem à paisagem urbana. Obras como bacias de detenção, jardins de chuva e praças alagáveis com tanques de captação, podem ser implementadas, gerando uma cadeia de valor tanto na fase de execução quanto na manutenção periódica. Medidas não estruturais são importantes para a gestão a longo prazo, como a criação e aplicação de legislação pertinente, políticas de incentivo à execução de cisternas nos lotes particulares, educação ambiental da população, regras para uso e ocupação da terra, realocação de comunidades ribeirinhas, dentre outras, tais ações complementam as medidas estruturais, e ambas possuem maior efetividade quando trabalhadas em conjunto.

Dentre as dificuldades e limitações encontradas, cita-se o baixo número de trabalhos que tratem de problemáticas envolvendo eventos hidrológicos em municípios de pequeno porte da região, seria interessante comparar os resultados obtidos com os de bacias de tamanho e ocupação parecidas, além da indisponibilidade de cartas topográficas detalhadas do município no banco de dados da prefeitura municipal. A princípio utilizou-se as informações obtidas no Banco de Dados Geográficos do Exército, que apesar de terem servido de base para análises iniciais das características do município, não foram utilizados nos processamentos da metodologia.

5.1 RECOMENDAÇÕES

No geral, em municípios onde a rede de macrodrenagem é inexistente, obras como bacias de detenção podem ser uma alternativa frente ao aumento de escoamento superficial, principalmente quando avalia-se o custo de escavações e tubulações para um sistema convencional. Bacias de detenção (BD's) subterrâneas podem

ser implementadas com técnicas construtivas simples, que envolvem a escavação, preenchimento com rochas, e camada de solo permeável, além de drenos e estruturas auxiliares (CORMIER; PELLEGRINO, 2008). Para o caso de Araguatins, apesar da ausência de dados hidrológicos específicos do município, pode-se realizar estudo de viabilidade a partir de informações de cidades próximas e com características similares, resultando num dimensionamento em função das áreas de contribuição, Tempos de Concentração, Tempo de Retorno, Intensidade de Precipitação etc. Deve-se considerar variáveis como limpeza de terreno, escavação, compactação, dispositivos hidráulicos, plantio de grama ou vegetação similar, obtenção de rochas adequadas, telas metálicas para os drenos, dentre outros aspectos, além de um plano de manutenção periódica, para controle da vegetação interna e limpeza dos canais de escoamento.

Para trabalhos futuros, sugere-se levantamentos em maior detalhe acerca da região, como a definição de mais classes de uso e ocupação, através de imagens de alta resolução produzidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), além de um levantamento mais preciso para obtenção da altimetria do terreno. Recomenda-se também a realização dos cálculos de escoamento superficial e infiltração da sub-bacias através de dados hidrológicos não somente da estação meteorológica automática da Agência Nacional de Águas (Estação 28850000/ 00548000 – Araguatins), mas que se ativem estações meteorológicas locais, monitoradas com maior frequência e em maior nível de detalhe.

Por fim, indica-se que as regiões de planejamento do município sejam divididas em função das delimitações das bacias urbanas, a fim de que a gestão esteja integrada e sensível aos recursos hídricos do município, princípios reforçados no marco legal do saneamento básico, atualizado pela Lei Nº 14.026/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. G. A. de C. **Determinação de Variação de Volume na Represa de Três Marias com o uso de Radar Altimétrico e Imagens Orbitais.** v. d, p. 1–8, 2016.

ALVES FILHO, Ailton Pinto; RIBEIRO, Helena. **A percepção do caos urbano, as enchentes e as suas repercussões nas políticas públicas da Região Metropolitana de São Paulo.** Saúde e Sociedade, v. 15, n. 3, p. 145–161, 2006.

BRASIL. **Lei 14.026.** 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em 08/12/2021.

BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. 2007b. E-book.**
BRITO, Tenório José de. **Uso de geotecnologias no mapeamento de alagamentos em cenários de uso e ocupação do solo: estudo de caso no bairro Alto Sumaré-Mossoró/RN.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

BUAINAIN, Antônio Márcio; GARCIA, Junior Ruiz; VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro. **Dinâmica da economia e da agropecuária no Matopiba.** Texto para Discussão, 2017.

BURROUGH, Peter A *et al.* **Principles of geographical information systems.** Oxford university press, 2015.

CAPRARIO, Jakcemara *et al.* **Influence of drainage network and compensatory techniques on urban flooding susceptibility.** Water Science and Technology, v. 79, n. 6, p. 1152–1163, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.113>

CARDOSO, ADRIANA; BAPTISTA, Márcio. **Metodologia para Avaliação de Alternativas de Intervenção em Cursos de Água em Áreas Urbanas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 1, p. 129–139, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n1.p129-139>

CERQUINHA, Gastão; MELO, Marcos José Vieira De; JOAQUIM, Jaime. **Os Impactos da Expansão Urbana no Manejo de Águas Pluviais em Pequenas Cidades : Estudo de Caso em Serra Talhada (Pernambuco).** p. 3–6, 2013.

CLOSE, Odile *et al.* **Use of Sentinel-2 and LUCAS database for the inventory of land use, land use change, and forestry in Wallonia, Belgium Land.** v. 7, n. 4, p. 1–16, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land7040154>

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

CORMIER, Nathaniel S; PELLEGRINO, Paulo Renato Mesquita. **Infra-Estrutura Verde : Uma Estratégia Paisagística Para a Água Urbana.** Paisagem e Ambiente: Ensaios, v. 25, p. 127–142, 2008.

DA CUNHA, Ricardo Borges; MARTINS, Cesar Augusto Avila. **Geografia eleitoral: Uma revisão e possíveis caminhos**. RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise, v. 39, p. 43–56, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega>

DE OLIVEIRA, Alinne Prado; BARBASSA, Ademir Paceli; GONÇALVES, Luciana Márcia. **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM NA REQUALIFICAÇÃO DE ÁREAS VERDES URBANAS EM GUARULHOS**. Cidades Verdes, v. 4, p. 87–101, 2016.

EMBRAPA. **ALOS - Advanced Land Observing Satellite**. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/alos>>. Acesso em 02/11/2021.

EMBRAPA. **SENTINEL- Missão Sentinel**. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel> >. Acesso em 03/11/2021.

EMBRAPA. **Satélites de Monitoramento**. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> >. Acesso 08/11/2021.

FERREIRA BARBOSA -UFT -, Gislâne; AIRES, Rafaela; SANTOS, Tavares. **Tocantins e Seus Polos Regionais: Uma Proposta De Regionalização Econômica**. n. May, 2019.

FERREIRA, Zuleide; CABRAL, Pedro. **Vertical Accuracy Assessment of ALOS PALSAR, GMTED2010, SRTM and Topodata Digital Elevation Models**. n. Gistam, p. 116–124, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5220/0010404001160124>

FIORESE, Caio Henrique Ungarato. **Caracterização morfométrica da sub-bacia hidrográfica do córrego Mão Forte Quente**, Espírito Santo. 2020.

GHOSH, Abhishek; KAR, Shyamal Kumar. **Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: a case study in Malda district of West Bengal, India**. Natural Hazards, v. 94, n. 1, p. 349–368, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3392-y>

HAMMAMI, Salma *et al.* **Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia)**. Arabian Journal of Geosciences, v. 12, n. 21, p. 1–16, 2019.

IBGE. Glossário IBGE. 2011. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv53096_glossario equipetec.pdf
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil: 2016-2018**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, n. D, p. 1–26, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change**. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>

LORENZZETTI, João A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. Editora Blucher, 2015.

MANTIS, ALEXIA BONDIOLLI; VAZ, JHONNES ALBERTO. **MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO DE ALAGAMENTO DO MUNICÍPIO DE GUARUJÁ-SP UTILIZANDO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA**. LEOPOLDIANUM, v. 45, n. 126, p. 18, 2019.

MANTOVANI, José Roberto; BACANI, Vitor Matheus. **Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ou alagamento, na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS**. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 22, n. 3, p. 687–706, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.146752>

CAMPANA, Néstor Aldo; BERNARDES, Ricardo Silveira; DA SILVA JR, Jolival Antonio. **Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção**. Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 2, n. 3, p. 98-111, 2007.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati De. **Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto**. Cnpq/Unb, p. 266, 2012.

MICHEL, Jessica Andrade. **Gestão de águas pluviais em pequenas e médias cidades voltada para a adaptação às mudanças climáticas**. 2019.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3 edição atualizada e ampliada. Editora UFV-Universidade Federal de Viçosa, 320p, 2007.

MOREIRA, Daniel Medeiros. **GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA AMAZÔNICA**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e PEsquisa de Engenharia - COPRE - UFRJ, 2016.

MOURA, Erika Fernanda da Silva; SILVA, Simone Rosa da. **Estudo Do Grau De Impermeabilização Do Solo E Propostas De Técnicas De Drenagem Urbana Sustentável Em Área Do Recife-Pe**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 3, n. 15, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/231884723152015993>

MOURA, Pricilla Macedo. **Contribuição para a avaliação global de sistemas de drenagem urbana**. p. 146, 2004. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/110M.PDF>

NAIR, Minu; BINDHU, J S. **Supervised techniques and approaches for satellite image classification**. International Journal of Computer Applications, v. 134, n. 16, 2016.

NIPELE, Johanna Ngula; CHEN, Jianping. **The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The lishana sub-basin**. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 21, n. November 2018, p. 57–67, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>

NISHIDA, Waleska. **Uma rede neural artificial para classificação de imagens multi**

espectrais de sensoriamento remoto. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, p. 101, 1998. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77542/138042.pdf?sequence=1%0Ahttps://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/77542>

OSGOUEI, Paria Ettehadi *et al.* **Separating built-up areas from bare land in mediterranean cities using Sentinel-2A imagery.** *Remote Sensing*, v. 11, n. 3, p. 1–24, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11030345>

PERTILLE, Carla Talita *et al.* **Estudo Da Eficiência De Classificações Supervisionadas Aplicadas Em Imagem De Média Resolução Espacial.** *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 2, p. 289, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/biofix.v3i2.60477>

PHIRI, Darius; MORGENROTH, Justin. **Developments in Landsat land cover classification methods: A review.** *Remote Sensing*, v. 9, n. 9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9090967>

RODRÍGUEZ, Carlos Andrés Martínez; TEIXEIRA, Bernardo Arantes do Nascimento. **Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de São Carlos (SP), Brasil.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 1, p. 143–150, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190034>

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROppo, Juliano Daniel; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. **Trends analysis of precipitation and temperature data in Brazil.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SATTY, Thomas L. **Analytic Hierarchy Process.** 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429504419-2>

SCOPEL, Iraci; SILVA SOUSA, Marluce; PERINI MARTINS, Alécio. **Infiltração De Água E Potencial De Uso De Solos Muito Arenosos Nos Cerrados (Savanas) Do Brasil.** *Boletim Goiano de Geografia*, v. 33, n. 2, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v33i2.25556>

SEKERTEKIN, A.; MARANGOZ, A. M.; AKCIN, H. **Pixel-based classification analysis of land use land cover using Sentinel-2 and Landsat-8 data.** *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 42, n. 4W6, p. 91–93, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W6-91-2017>

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO DO TOCANTINS. **Araguatins.** 2017. Disponível em < <https://www.to.gov.br/seplan/araguatins/4d0wauy7uzd2> >. Acesso em 02/11/2021.

SILVEIRA, André L.L. da; TUCCI, Carlos E M. SILVEIRA. **Hidrologia, Ciência e Aplicação - Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.** 1997 (TUCCI cap. 2). 1997.

SOUZA, Ênio Gomes Flôr; DO NASCIMENTO, Antônio Henrique Cardoso; DA CRUZ, Ellen Abreu. **Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do**

Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 03, p. 1530–1540, 2021.

STANISLAWSKI, Lawrence V. *et al.* **An open source high-performance solution to extract surface water drainage networks from diverse terrain conditions.** *Cartography and Geographic Information Science*, v. 45, n. 4, p. 319–328, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15230406.2017.1337524>

TINGSANCHALI, T. **Urban flood disaster management.** *Procedia Engineering*, v. 32, p. 25–37, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1233>

TUCCI, Carlos E M. **Gestão da Drenagem Urbana.** Textos para Discussão CEPAL .IPEA. p. 50, 2012.

VILLELA, Swami Marcondes; MATOS, Arthur. **A Hidrologia Aplicada.**1975.

ZAIDAN, Ricardo Tavares. **Geoprocessamento Conceitos E Definições.** Revista de Geografia - PPGeo - UFJF, v. 7, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.34019/2236-837x.2017.v7.18073>