

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO DE FREITAS NEMESIO

**IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DE CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA SUB-BACIA DO RIO PERUCABA NO
MUNICÍPIO DE ARAPIRACA/AL.**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2022

GUSTAVO DE FREITAS NEMESIO

**IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DE CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA SUB-BACIA DO RIO PERUCABA NO
MUNICÍPIO DE ARAPIRACA/AL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus Sertão, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Odair Barbosa de Moraes

DELMIRO GOUVEIA – AL

2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

N433i Nemesio, Gustavo de Freitas

Impactos da implantação de condomínios residenciais no escoamento superficial em uma sub-bacia do Rio Perucaba no município de Arapiraca / AL / Gustavo de Freitas Nemesio. - 2022.

74 f. : il.

Orientação: Odair Barbosa de Moraes.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2022.

1. Geoprocessamento. 2. Modelos hidrológicos. 3. Urbanização. 4. Drenagem urbana. 5. Sub-bacia do Rio Perucaba. 6. Arapiraca - Alagoas I. Moraes, Odair Barbosa de. II. Título.

CDU: 628.131

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUSTAVO DE FREITAS NEMESIO

IMPACTOS DA IMPLANTAÇÃO DE CONDOMÍNIOS RESIDENCIAIS NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA SUB-BACIA DO RIO PERUCABA NO MUNICÍPIO DE ARAPIRACA/AL.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
corpo docente do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas – Campus Sertão
e aprovado em 25 de julho de 2022



Prof. Dr. Odair Barbosa de Moraes, UFAL – Campus Sertão

(Orientador)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ANTONIO PEDRO DE OLIVEIRA NETTO
Data: 10/08/2022 10:23:42-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto, UFAL – Campus Sertão

(Avaliador interno)



Prof. Dr. Thiago Alberto da Silva Pereira, UFAL – Campus Arapiraca

(Avaliador externo)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudenise e Roberto, por todo o suporte que me foi dado durante esse trajeto, não medindo esforços para que tudo isso fosse possível. Vocês foram as peças mais fundamentais, amo vocês.

À minha irmã, Jéssica, por todo apoio e conselhos que me foram dados.

A todos os amigos da turma 2016.1, em especial à Renata, Melyssa, Kimberlly, Demerson e Túlio, por estarem junto comigo enfrentando as dificuldades de graduação e da vida durante os anos longe de casa, vocês tornaram todo esse processo mais leve.

À I9 Engenharia Jr., por ter me proporcionado as primeiras experiências voltadas ao mercado de trabalho junto a pessoas com que aprendi muito, em especial os amigos André e Coutinho.

Aos meus amigos e colegas de moradia, Leandro e Juan, que foram as pessoas com que passei mais tempo nesse período de graduação e pudemos compartilhar experiências que serão levadas para a vida.

À Universidade Federal de Alagoas, juntamente com seu corpo docente, em especial ao professor Odair, por toda a orientação, paciência e dedicação para que o presente trabalho pudesse ser realizado.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que isso fosse possível.

RESUMO

O rápido processo de urbanização, juntamente com a falta de planejamento adequado são as principais causas de mudanças no cenário natural de um município. Essas mudanças ocorrem principalmente no que se refere ao uso e ocupação do solo, que, quando combinados com a falta de um projeto de drenagem adequado, podem ocasionar alterações no ciclo hidrológico natural, acarretando em adversidades como inundações e enchentes. O município de Arapiraca/AL, cidade onde o processo de urbanização nas últimas décadas se deu de forma bastante intensa, tem apresentado diversas formas de empreendimentos que interferem no grau de impermeabilização do solo. Um deles é o investimento em condomínios residenciais e/ou loteamento de terrenos para construção de imóveis. Com isso, o presente trabalho pretende avaliar o impacto no uso e ocupação do solo em uma sub-bacia do Rio Perucaba, município de Arapiraca, na geração de escoamento superficial. Foram selecionados três cenários para análise do uso e ocupação do solo, 2013, 2021 e uma projeção futura. O cenários para 2013 e 2021 foram obtidos a partir de imagens de satélite, já o cenário da projeção futura, foi elaborado a partir de hipóteses de uso e ocupação do solo, obedecendo as leis municipais relacionadas ao tema. A partir desses cenários foi feita a classificação do uso e cobertura do solo de forma semi automática utilizando o software QGis, para que posteriormente fossem realizadas simulações hidrológicas utilizando o método do SCS, juntamente com o Hidrograma Unitário e a Convulsão. Foram utilizados diferentes eventos chuvosos, associados a diferentes tempos de retorno, para os três cenários de ocupação da bacia. Os resultados indicaram que para o primeiro cenário (2013), o solo da região se encontrava plenamente permeável para o nível de precipitação que ocorre na região, já para os cenários de 2021 e projeção futura, o escoamento superficial tem um aumento que pode chegar a 35 vezes em relação ao primeiro cenário estudado e por isso necessita fiscalização dos órgãos competentes para que medidas preventivas sejam aplicadas, fazendo com que eventos com precipitações intensas não venham ocasionar problemas na região.

PALAVRAS-CHAVE: Urbanização; Modelos hidrológicos; Geoprocessamento; Sub-bacia do Rio Perucaba; Drenagem Urbana.

ABSTRACT

The rapid process of urbanization combined with inadequate planning are the main causes of changes in the natural scenario of a municipality. These changes occur mainly with regard to land use and occupation and, combined with the lack of an adequate drainage project, can cause changes in the natural hydrological cycle, which can lead to adversities such as floods. In the municipality of Arapiraca, a city where the urbanization process in the last decades occurred in a very intense way, it has presented several forms of enterprises that interfere in the degree of waterproofing of the soil. One of them is the investment in residential condominiums, which is linked to the subdivision of land for real estate construction. With this, the present work intends to evaluate the impact on the use and occupation of the land with regard to the generation of surface runoff where one of these projects is being built in a basin of the Perucaba River. For this, three scenarios were chosen (2013, 2021 and a future projection) and those already elapsed were obtained from satellite images. From this, the classification of land use and land cover was made semi-automatically using the QGIS software, so that hydrological simulations were later carried out using the SCS method, combined with the Unitary Hydrogram and the Convolution using different rainfall events, associated at different return times, for the three basin occupation scenarios. The results indicated that for the first scenario (2013), the soil of the region was fully permeable for the level of precipitation that occurs in the region, as for the 2021 scenario and future projection, the surface runoff has a very significant increase that needs supervision of competent bodies so that preventive measures are applied so that events with intense precipitation do not cause problems in the region.

KEYWORDS Urbanization; Hydrological models; Geoprocessing; Perucaba River Sub-basin; Urban Drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da população urbana/rural no Brasil - 1950-2000	19
Figura 2 – Localização do Estado de Alagoas no mapa do Brasil (canto esquerdo inferior) e localização do município de Arapiraca (destaque em preto) dentro do Estado de Alagoas.	21
Figura 3 – Limites do município de Arapiraca	22
Figura 4 – Faixa de contribuição da bacia do Perucaba (em azul) no município de Arapiraca (delimitado em branco)	23
Figura 5 – Localização da área de estudo no município de Arapiraca	24
Figura 6 – Localização mais aproximada da área de estudo no município de Arapiraca .	24
Figura 7 – Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica.	27
Figura 8 – Imagem do satélite Land-Sat 8, desenvolvido pela NASA.	29
Figura 9 – Hidrograma unitário triangular	42
Figura 10 – Convolução dos hidrogramas	43
Figura 11 – Principais sistemas meteorológicos na região Nordeste do Brasil	50
Figura 12 – Mapa das Bacias Hidrográficas do município de Arapiraca.	51
Figura 13 – Hidrograma unitário triangular de uma sub bacia do Rio Perucaba	53
Figura 14 – Curvas IDF	55
Figura 15 – Cenário de 2013, juntamente com as delimitações das sub-bacias do Rio Perucaba na Região	56
Figura 16 – Cenário de 2021, juntamente com as delimitações das sub-bacias do Rio Perucaba na Região	56
Figura 17 – Área de estudo para o cenário de 2013	57
Figura 18 – Área de estudo para o cenário de 2021	57
Figura 19 – Classificação da cobertura do solo utilizando o SCP no cenário de 2013 . .	58
Figura 20 – Classificação da cobertura do solo utilizando o SCP no cenário de 2021 . .	58
Figura 21 – Classificação da cobertura do solo para uma projeção futura	59
Figura 22 – Evolução das diferentes tipologias de solo consideradas	60
Figura 23 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=2 . .	62
Figura 24 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=5 . .	63
Figura 25 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=10 .	63
Figura 26 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=25 .	64

Figura 27 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=50	65
Figura 28 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=100	65
Figura 29 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 2 anos	66
Figura 30 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 5 anos	66
Figura 31 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 10 anos	67
Figura 32 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 25 anos	67
Figura 33 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 50 anos	67
Figura 34 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 100 anos	68
Figura 35 – Comparação das vazões de pico de cada tempo de retorno nos cenários estudados	68
Figura 36 – Diferença das vazões de pico de cada tempo de retorno em função dos períodos estudados	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – População absoluta, urbana e grau de urbanização no Brasil	18
Tabela 2 – Períodos de retorno (T) propostos por DAEE-CETESB, em 1980, em função do tipo de ocupação da área	33
Tabela 3 – Taxas de infiltração para cada tipo de solo	36
Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas	37
Tabela 5 – Períodos de retorno (T) propostos por DAEE-CETESB, em 1980, em função do tipo de ocupação da área	47
Tabela 6 – Localização e dados das estações selecionadas.	53
Tabela 7 – Precipitações (i) em mm/hora	54
Tabela 8 – Porcentagem do uso e ocupação do solo para cada um dos cenários na sub bacia estudada.	60
Tabela 9 – CN médio dos cenários	61
Tabela 10 – Capacidade de armazenamento da bacia (S), em mm	61
Tabela 11 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 2 anos)	62
Tabela 12 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 5 anos)	62
Tabela 13 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 10 anos)	63
Tabela 14 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 25 anos)	64
Tabela 15 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 50 anos)	64
Tabela 16 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 100 anos)	65
Tabela 17 – Vazões de pico, em m ³ /s, para cada cenário e tempo de retorno	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AcATaMa	Avaliação da Precisão de Mapas Temáticos (<i>Accuracy Assessment of Thematic Maps</i>)
ANA	Agência Nacional de Água
CN	Curva Número (<i>Curve number</i>)
GEV	Valor Extremo Generalizado (<i>Generalized Extreme Value</i>)
HU	Hidrograma unitário
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-duração-frequência
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MML	Momentos-L
NRCS	Centro Nacional de Sensoriamento Remoto (<i>National Resources Conservation Service</i>)
PMP	Precipitação Máxima Provável
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
SCP	Classificação semi-automática (<i>Semi-Automatic Classification</i>)
SCS	Serviço de Conservação do Solo (<i>Soil Conservation Service</i>)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Sensoriamento Remoto
TR	Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	URBANIZAÇÃO E DRENAGEM URBANA	17
2.1.1	Arapiraca: desenvolvimento urbano e os impactos ambientais	21
2.2	SISTEMA DE GESTÃO DE DRENAGEM URBANA	25
2.3	GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO	26
2.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA	31
2.4.1	Modelo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário	32
2.4.1.1	Chuva de projeto e curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)	32
2.4.1.2	Determinação da chuva efetiva utilizando o Método SCS	34
2.4.1.3	Hidrograma de projeto a partir do hidrograma unitário	41
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
3.1	REVISÃO DA LITERATURA	45
3.2	PESQUISA E OBTENÇÃO DE DADOS SECUNDÁRIOS	45
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	46
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	CLIMA, HIDROGRAFIA E GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO DA ÁREA DE ESTUDO	49
4.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UMA SUB BACIA DO RIO PERUCABA	52
4.2.1	Dados iniciais	52
4.2.2	Hidrograma unitário da sub-bacia	52
4.2.3	Determinação das chuvas de projeto	53
4.3	CÁLCULO DAS CHUVAS EFETIVAS - Métodos SCS	55
4.3.1	Cálculo do CN a partir da classificação de imagens de satélite	55

4.3.2	Chuvas efetivas para os cenários estabelecidos	62
4.4	HIDROGRAMA DE PROJETO E VAZÕES MÁXIMAS DA SUB-BACIA .	65
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das populações das cidades sem o devido desenvolvimento da infraestrutura urbana adequada tem implicado em impactos negativos tanto no ambiente urbano como natural. Entre os impactos negativos que esse processo tem causado, estão o agravamento das enchentes, o aumento de sua frequência, além da criação de novos pontos de alagamento. Estes efeitos provêm da crescente impermeabilização do solo com aumento do volume pluvial escoado e redução de amortecimento, causando aumentos nas vazões máximas, que podem representar até seis vezes a vazão de pré-urbanização (TUCCI; GENZ, 1995).

Por outro lado, a gestão da drenagem urbana tem sido, cada vez mais, um desafio para a administração pública, pois envolve o manejo do escoamento das águas no tempo e no espaço, visando a minimizar danos à sociedade e ao ambiente. A visão moderna da gestão da drenagem urbana envolve a integração dos recursos hídricos na bacia hidrográfica e das águas urbanas, o que inclui a drenagem urbana.

Dessa forma, a grande maioria dos estudos de hidrologia urbana incide na análise do escoamento superficial, que por sua vez se relaciona estreitamente com a proteção contra os problemas provocados pelo movimento da água na superfície do solo .

Nesse sentido, o crescimento de zonas edificadas, vias de acesso e todo o tipo de estrutura urbana tem provocado alterações no escoamento superficial, que evidenciam a necessidade da implantação de um sistema de drenagem de águas pluviais que acompanhe a urbanização, ou a reabilitação do sistema preexistente, de modo a fazer frente às exigências a que está sujeito (MARTINS *et al.*, 2010).

Diante desse contexto, o desenvolvimento e aplicação de ferramentas adequadas à gestão ambiental têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas, com destaque para a aplicação das geotecnologias, que incluem os Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) e o Sensoriamento Remoto os quais se encontram num estágio avançado de desenvolvimento, permitindo grande acessibilidade de recursos, a custos relativamente baixos.

Os SIG's têm papel relevante na gestão ambiental por facilitarem o gerenciamento de informações espaciais e permitirem a elaboração de diagnósticos e prognósticos, subsidiando a tomada de decisões. Já o Sensoriamento Remoto, devido à rapidez e periodicidade na obtenção de dados primários sobre a superfície terrestre, constituiu-se numa das formas mais eficazes de

monitoramento ambiental em escalas locais e globais (JACINTHO, 2003).

Diante do exposto, a realização de estudos no que se refere ao grau de impacto causado por um processo de urbanização em uma bacia hidrográfica, se fazem necessários para avaliar e fornecer subsídios que possam levar a harmonia entre esse tipo de desenvolvimento e o meio ambiente.

Em Alagoas, o município de Arapiraca, no Agreste Alagoano, tem experimentado um acelerado processo de urbanização, desde os anos 1960, associado a implantação de grandes empreendimentos, como condomínios residenciais, conjuntos habitacionais populares e *shopping center*. Dentre os empreendimentos instalados neste município, destacam-se três condomínios pertencentes a um mesmo grupo de investidores, que atualmente estão com obras em andamento, são eles: Reserva Perucaba, Jardins Perucaba I e Jardins Perucaba II. Estes condomínios estão localizados em uma área do município, às margens do Lago da Perucaba, e ocupam uma área em torno de 1.500.000 m².

Como afirmado anteriormente, a implantação de zonas edificadas, vias de acesso e todo o tipo de estrutura urbana provoca alterações no escoamento superficial as quais precisam ser avaliadas para uma melhor proposição de medidas de proteção contra inundações e enchentes. Nesse sentido, o presente trabalho visa analisar, através de técnicas de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos, os possíveis impactos causados por esses empreendimentos no que se refere às mudanças que ocorreram no uso, ocupação e cobertura do solo da região, avaliando o nível da perda de permeabilidade da superfície e conseqüentemente estimando o aumento de escoamento superficial que ocorreu e o que poderá ocorrer dentro de um período previamente estabelecido. Este estudo pretende contribuir para o entendimento dos impactos da urbanização em problemas de drenagem no ambiente urbano, servindo como base para a elaboração de propostas de solução ou mitigação de tais problemas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Analisar os impactos causados pelo processo de urbanização no escoamento superficial em uma sub-bacia do Rio Perucaba, no município de Arapiraca/AL, em função da implantação de um empreendimento de condomínios.

1.1.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, fez-se necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar as mudanças causadas no uso, ocupação e cobertura do solo, a partir da implantação dos empreendimentos Reserva Perucaba, Jardins Perucaba I e Jardins Perucaba II na bacia do rio Perucaba;
- Estimar as vazões máximas na sub-bacia a partir de diferentes cenários representando diferentes estágios de urbanização.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentado o contexto da pesquisa através da revisão da literatura, cujo objetivo é tecer algumas considerações sobre os conceitos envolvidos neste trabalho, notadamente os conceitos no que se refere ao processo de urbanização, incluindo uma breve revisão sobre o processo de urbanização do município da área de estudo e seus impactos ao meio ambiente; hidrologia, tendo como foco a drenagem urbana; geoprocessamento e sensoriamento remoto. São também apresentados os conceitos referentes a modelagem hidrológica, cujo objetivo é apresentar os métodos e modelos que foram utilizados no presente trabalho para cumprir os objetivos inicialmente propostos.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados no presente trabalho, mostrando todo processo desde a pesquisa de dados secundários, como a escolha da imagem de satélite até o processo das convoluções dos hidrogramas unitários para obtenção dos hidrogramas de cheia, para análises dos impactos gerados pela urbanização.

No capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados através de cálculos, ilustrações e gráficos. A análise dos dados foi feita concomitantemente a apresentação resultados. Estas considerações são sintetizadas ao final do capítulo para direcionar as conclusões gerais do trabalho.

E finalmente, no capítulo 5 são feitas as considerações finais de todo o trabalho, sendo analisadas as ocorrências e objeções que ocorreram durante a realização do presente estudo e também uma verificação dos resultados no que se refere a consecução dos objetivos inicialmente propostos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em três seções com temas complementares e considerados essenciais para o desenvolvimento deste trabalho: urbanização e drenagem urbana, geoprocessamento e sensoriamento remoto e modelagem hidrológica.

2.1 URBANIZAÇÃO E DRENAGEM URBANA

O processo de urbanização é uma realidade constatada mundialmente e geralmente está associado a mudança da população de ambientes rurais para áreas urbanas. Quando a taxa de crescimento da população urbana está maior que a rural, é dito que esse processo está em andamento. Segundo Silva e Macedo (2009), o Brasil, como os demais países da América Latina, apresentou um rápido processo de urbanização no século XX, sobretudo, a partir da década de 1960. Segundo Maricato (2003), sob a influência de diversos fatores, como a regulamentação do trabalho urbano, incentivo à industrialização e construção de infraestrutura industrial, entre outras medidas, que reforçaram o movimento migratório campo-cidade.

No Brasil, o processo de urbanização das cidades está mais relacionado ao crescimento urbano que ao próprio desenvolvimento. Veiga (2005) afirma que, enquanto interessa ao crescimento as questões relacionadas à quantidade, ao desenvolvimento interessa as questões relacionadas à qualidade. Partindo dessa afirmação, no Brasil nós podemos constatar que há em maior intensidade um crescimento urbano que um desenvolvimento urbano (MORAES, 2008).

Corroborando com a situação no Brasil, constata-se um processo de urbanização mundial que produz situações cada vez mais conflitantes. Mesmo que a urbanização seja, em geral, associada ao desenvolvimento, este processo de urbanização não tem se refletido em melhor qualidade de vida para todos. Há uma necessidade urgente nas cidades de países em desenvolvimento de acomodar o rápido crescimento populacional, prover infra-estrutura básica, responder aos problemas de rápida deterioração física dos ambientes e, acima de tudo, melhorar as condições habitacionais, especialmente para os pobres (SALAT, 2006). No entanto, o atendimento a estas necessidades tem sido aquém e desproporcional às demandas (BECHTEL, 2006). Cada vez mais surgem assentamentos urbanos deteriorados e degradados que figuram como um dos maiores desafios a serem enfrentados para a promoção do desenvolvimento sustentável e de uma melhor qualidade de vida.

Segundo Maricato (2001), em 1940, a população brasileira que residia nas cidades era de 18,8 milhões, correspondendo a 26,3% do total de habitantes e em 2000 ela era de aproximadamente 138 milhões, correspondendo a 81,2% do total. Dessa forma, como também analisa Brito e Pinho (2012), a taxa de crescimento da população urbana média anual foi de 4,1%, e a cada ano, em média, foram acrescentados 2.378.291 habitantes às cidades, fazendo com que a população urbana, em apenas meio século, aumentasse 7,3 vezes. Os dados oficiais do IBGE, no entanto, mostram uma população urbana em 1940 de 12,88 milhões, representando cerca de 31% da população brasileira. Este valor atingiu cerca de 84% em 2010, com mais de 160 milhões de residentes nas cidades (Tabela 1).

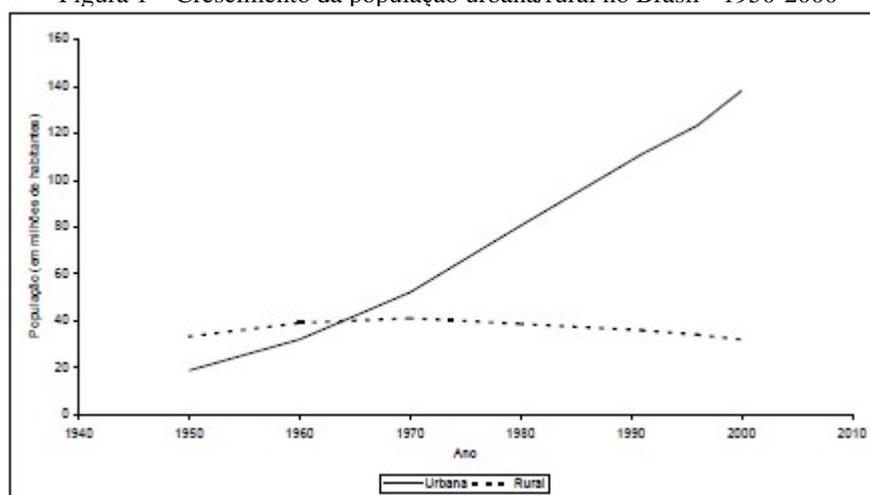
Tabela 1 – População absoluta, urbana e grau de urbanização no Brasil

Período (ano)	Total	Urbana	Grau de Urbanização (%)
1940	41.236.315	12.880.182	31,24
1950	51.944.397	18.782.891	36,16
1960	69.930.293	31.214.700	44,64
1970	93.139.037	52.084.984	55,92
1980	119.502.716	80.436.419	67,31
1991	146.825.475	110.990.990	75,59
2000	169.544.443	137.697.439	81,22
2010	190.755.799	160.925.792	84,36

Fonte: FIBGE, Censos Demográficos de 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010.

A Figura 1 ilustra, em formato de gráfico, o crescimento da população urbana. A partir de meados dos anos 1960 percebe-se que o Brasil já seguia uma trajetória crescente para a população urbana, ao contrário da população rural, que seguia no sentido inverso.

Figura 1 – Crescimento da população urbana/rural no Brasil - 1950-2000



Fonte: MORAES (2008)

A ideia de urbanização associada ao desenvolvimento e melhores condições de vida gerou um gigantesco movimento de construção urbana, necessário para acomodar a grande quantidade de pessoas que se dirigiam às cidades. Assim, as cidades que no início pareciam ser a salvação, onde o futuro já havia chegado, onde havia emprego pleno, assistência social providenciada pelo Estado, lazer e novas oportunidades para os filhos, no final do século XX, têm sua imagem associada à violência, poluição das águas e do ar, criança desamparada, tráfego caótico e enchentes (MARICATO, 2003).

Silva e Macedo (2009) em consonância com Maricato (2003), afirmam que embora o fenômeno de país urbanizado seja característica de um país desenvolvido, esse processo, no Brasil, veio acompanhado de um crescimento desordenado, ocasionando inúmeros problemas socioambientais, como a multiplicação de bairros com infra-estrutura deficiente, o processo de favelização, habitações situadas em áreas de risco e alterações nos sistemas naturais. Essa urbanização quando não acompanhado de um grande investimento em infra-estrutura básica (água, esgoto, luz, pavimentação), produz áreas pobres e marginalizadas.

Segundo Maricato (2003), a falta de alternativas habitacionais é evidentemente o motor que faz o pano de fundo dessa dinâmica de ocupação ilegal e predatória de terra urbana. Com relação às ocupações em áreas de proteção ambiental, a autora ressalta que embora a ocupação pela população pobre e o progressivo aterramento de mangues nas cidades litorâneas brasileiras seja praticamente uma regra, não é somente a população pobre a responsável pela degradação ambiental. As classes de renda mais altas, bem como o poder público, muitas vezes foram os responsáveis por ocupações nestas áreas.

Maricato (2003) afirma ainda que é notável a tolerância que o Estado brasileiro têm manifestado em relação às ocupações ilegais em terra urbana. Aparentemente constata-se que é admitido o direito à ocupação, mas não o direito à cidade. O resultado desse processo são cidades desiguais a ponto de Taschner (2003) afirmar que uma marca da nossa sociedade é a desigualdade, e esta característica reflete-se tanto no diferencial entre regiões, quanto entre cidades, como também dentro do espaço intra-urbano, onde a segregação é uma presença constante.

Um crescimento abrupto, desenfreado, traz consigo inúmeros problemas no que se refere aos recursos hídricos de uma cidade, muito pelo fato de que essa expansão dos espaços urbanos acontece, em geral, no entorno de rios e seus principais afluentes. E, dessa forma, segundo Silva *et al.* (2016), esse processo colabora diretamente para execução de ações como encaixotamento dos córregos, impermeabilização do solo, além da redução de vegetação natural, o que altera as características naturais de drenagem de sub-bacias.

Neste contexto, as bacias hidrográficas assumem importante papel no planejamento e gestão ambiental, pois todos os fatores que afetam a produção e o equilíbrio no meio ambiente refletem sobre suas características físicas, bióticas e antrópicas (RESCK, 1992).

Diante dessa conjuntura, através da constitucionalização do planejamento urbano, com o advento da Constituição Federal de 1988, surge o plano diretor municipal cujo objetivo é estabelecer regras, parâmetros, incentivos e instrumentos para o desenvolvimento da cidade. Villaça (1999) destaca a importância do plano como:

"[...] um diagnóstico científico da realidade física, social, econômica, política e administrativa da cidade, do município e de sua região, apresentaria um conjunto de propostas para o futuro desenvolvimento socioeconômico e futura organização espacial dos usos do solo urbano, das redes de infra-estrutura e de elementos fundamentais da estrutura urbana, para a cidade e para o município, propostas estas definidas para curto, médio e longo prazos, e aprovadas por lei municipal."

Em outras palavras, o plano diretor, de modo geral, é uma lei municipal cujo objetivo é disciplinar o crescimento e funcionamento de uma cidade, indicando os caminhos que devem ser seguidos para que uma cidade cresça de forma que favoreça suas questões sociais, como condições de moradia, saúde, transporte, educação, cultura e lazer.

Com a necessidade de planejar melhor a vida urbana, a gestão ambiental ganhou força no que se refere a organização dos espaços urbanos em médio e longo prazo, e portanto não é mais possível simplesmente adotar medidas restritivas de reduzida eficácia sem apontar caminhos para

os problemas urbanos. O processo de planejamento ambiental precisa contemplar as necessidades vitais da cidade, e não somente o ambiente natural (PRESTES, 2006).

Assim como o Plano Diretor, a Lei Federal nº 14.026/2020, estabeleceu-se orientações básicas para o saneamento básico no Brasil. Neste instrumento, como ressalta Tucci (2012), foi previsto a elaboração do Plano de Saneamento Básico (PSB). Os serviços públicos de saneamento básico foram definidos no artigo 2º do PSB e nele está incluso o sistema de Drenagem e manejo de águas pluviais.

Apesar dessas medidas legislativas que visam a melhoria da qualidade de vida da população urbana, o planejamento da ocupação através do Plano Diretor Urbano, como ressalta Batista (2017), ainda não tem considerado os aspectos de drenagem urbana da melhor forma, talvez por não receber a importância devida o desenvolvimento urbano brasileiro tem apresentado aumento significativo na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água. Esta é uma realidade constatada em todos os municípios brasileiros, assim como em Arapiraca, como apresentado a seguir.

2.1.1 Arapiraca: desenvolvimento urbano e os impactos ambientais

O município de Arapiraca está localizado na porção sudoeste da região Agreste de Alagoas (Figura 2). Ocupando uma posição central e estratégica no território alagoano.

Figura 2 – Localização do Estado de Alagoas no mapa do Brasil (canto esquerdo inferior) e localização do município de Arapiraca (destaque em preto) dentro do Estado de Alagoas.

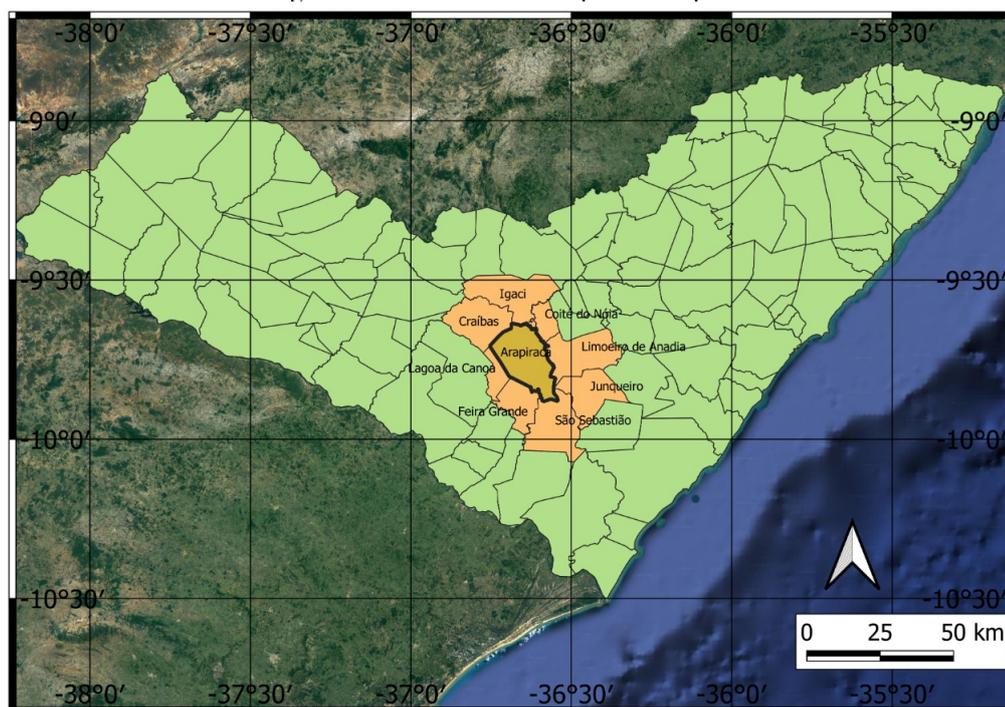


Fonte: IBGE (2018)

A Figura 3 apresenta os limites do município, são eles: ao Norte - Igaci e Craíbas; ao Sul -

São Sebastião, Lagoa da Canoa e Feira Grande; a Leste - Limoeiro de Anadia, Junqueiro e Coité do Nória; a Oeste - Girau do Ponciano e Craíbas. A concentração de caminhos e a curta distância em relação a outras localidades, além da diversidade de acessibilidade oferecida, vêm fortalecer a cidade de Arapiraca enquanto um polo de atração territorial, exercendo grande influência sobre os municípios circunvizinhos e estados nordestinos.

Figura 3 – Limites do município de Arapiraca



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

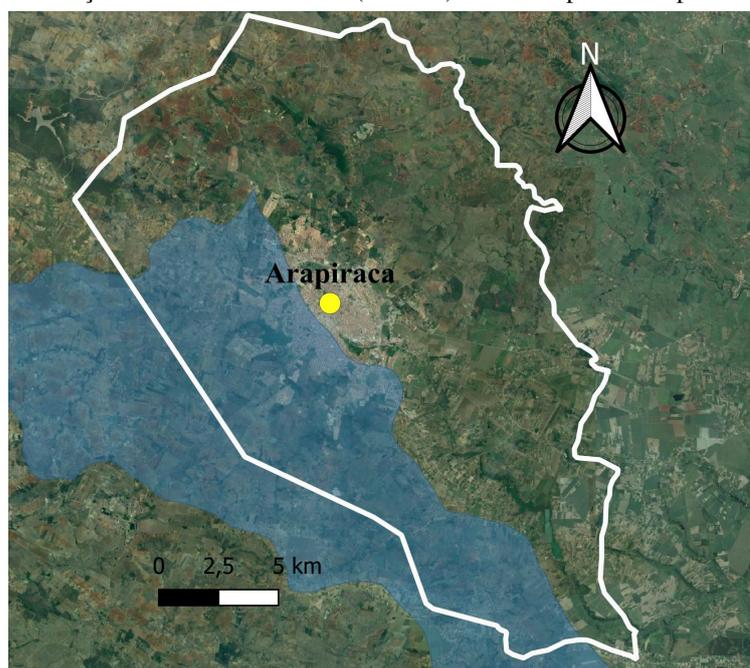
Arapiraca iniciou seu desenvolvimento de forma mais relevante a partir da década de 1970, com a cultura da produção de fumo e, segundo Santos e Oliveira (2014), abrangia cerca de 90% do setor agrícola da época. Ainda segundo o mesmo autor, a cultura do fumo iniciou seu apogeu nos anos 1930 que perdurou até os anos 1980 a partir do qual começou o seu período de declínio, levando consigo, a cidade e toda a região circunvizinha.

Dessa forma, houve uma mudança na cultura de atividade econômica, começando a abranger comércios locais. Foi nessa época que ocorreu uma explosão da população urbana, chegando a alcançar uma taxa média geométrica de crescimento anual superior à do Nordeste e a do Brasil e uma concentração populacional na zona urbana 7,2 vezes maior do que na década de 1960 (BATISTA, 2017).

Em relação a sua hidrografia, a área urbana do município de Arapiraca possui duas bacias hidrográficas: a bacia do rio Perucaba, demonstrada na Figura 4, que drena os bairros

localizados na parte oeste da cidade, e a bacia do rio Piauí, que engloba a porção centro-leste da mancha urbana. Ambas as bacias vêm sofrendo uma intensa degradação ambiental ocasionada pelo rápido crescimento urbano-populacional, promovido nos anos 1960, 1970 e 1980 pela explosão da cultura fumageira, que apesar de ser uma atividade agrária, atraiu muita gente para residir na cidade. A partir da década de 90, houve um declínio da produção de fumo; contudo a cidade já havia desenvolvido um amplo e diversificado comércio, consolidando-se como um polo comercial e industrial para o interior do Estado de Alagoas.

Figura 4 – Faixa de contribuição da bacia do Perucaba (em azul) no município de Arapiraca (delimitado em branco)



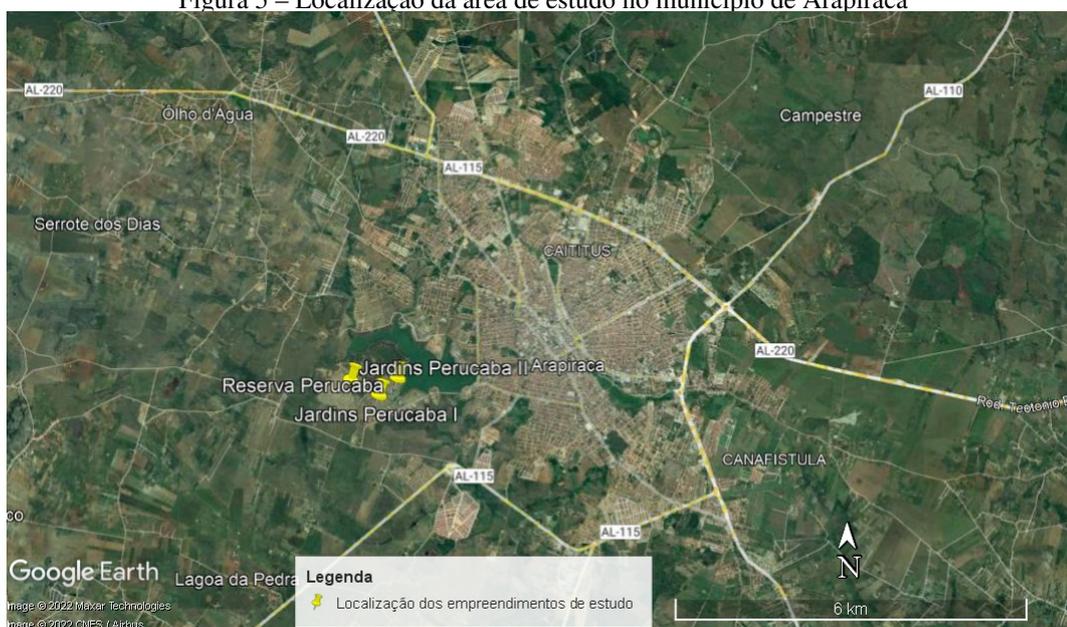
Fonte: Google Maps (adapado de QGIS)

Os principais problemas ambientais do município em relação aos recursos hídricos são: diminuição da vegetação à margem dos rios, bem como a ocupação de suas margens; o lançamento de esgoto domiciliar e hospitalar, entre outros dejetos; a canalização de rios, decorrente do processo de urbanização, o que causou a submissão dos recursos naturais à dinâmica econômica de urbanização local.

Com os debates ambientais em pauta nos últimos anos, o município efetuou ações que visam promover a proteção do meio ambiente e também executando medidas mitigadoras, tais como a realização do projeto de esgotamento sanitário da cidade e a implantação do Bosque Urbano das Arapiracas, este último com o objetivo de recuperar e preservar as nascentes do Riacho Seco, ao mesmo tempo, dotando a cidade de um pulmão verde e recompondo a vegetação das margens da antiga Lagoa das Olarias.

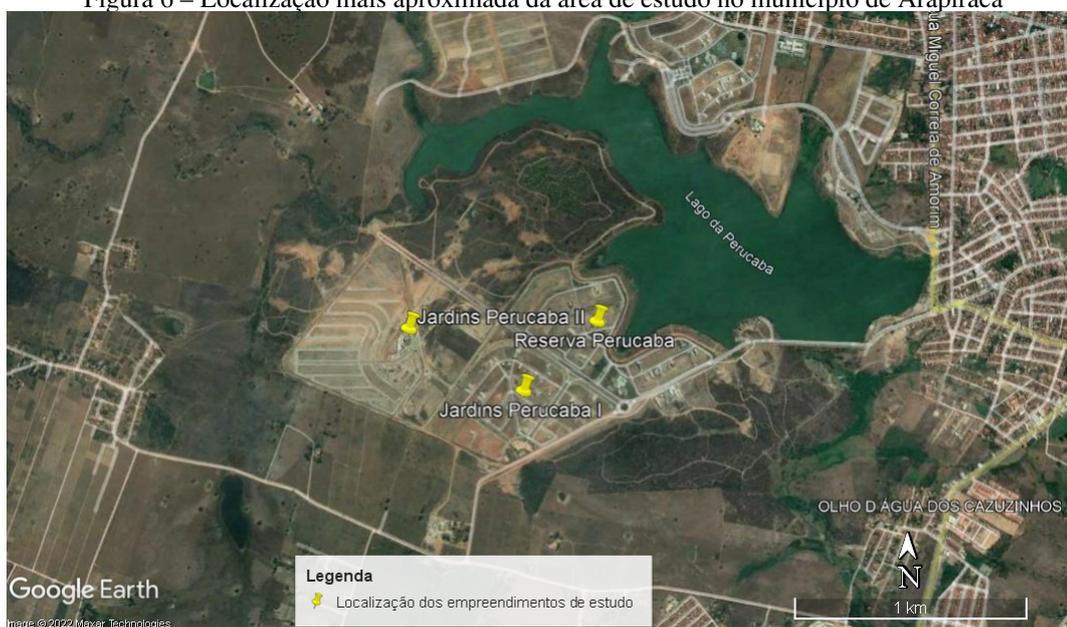
Um modelo de empreendimento que está em evidência no município de Arapiraca, são os condomínios residenciais privados. Em todo o entorno da cidade é possível encontrar com facilidade obras finalizadas e em andamento desse tipo de investimento. Dito isso, o local de estudo do presente trabalho está localizado no entorno do Lago da Perucaba, onde um desses grandes empreendimentos, envolvendo um conjunto de três de condomínios, está em andamento em todo entorno do lago, são eles: Jardins Perucaba I, Jardins Perucaba II e Reserva Perucaba. Logo abaixo, nas Figuras 5 e 6, é possível visualizar a localização de cada um deles.

Figura 5 – Localização da área de estudo no município de Arapiraca



Fonte: Google Earth Pro (2022)

Figura 6 – Localização mais aproximada da área de estudo no município de Arapiraca



Fonte: Google Earth Pro (2022)

A seguir será feita uma revisão sobre o estudo do sistema de drenagem urbana, uma vez que este estudo torna-se fundamental para o entendimento das relações existentes entre a urbanização e os impactos ambientais relacionados

2.2 SISTEMA DE GESTÃO DE DRENAGEM URBANA

O sistema de gestão da drenagem urbana de um município é de suma importância para a qualidade de vida da sociedade, já que segundo a Lei nº 11.445/2007, está ligado a um conjunto de medidas infraestruturais cujo objetivo é transportar, deter e reter as águas pluviais para evitar o acúmulo na superfície urbana, e, dessa forma, diminuindo a probabilidade de alagamentos.

O escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas e, segundo Tucci (2008), elas acontecem em razão de dois fatores: através de inundações de áreas ribeirinhas e /ou através de inundações em razão da urbanização. O primeiro acontece de forma natural por causa de variações frequentes de um canal de drenagem e o segundo processo acontece por causa do efeito da impermeabilização do solo ou obstruções de sedimentos durante o escoamento. Tucci (2008) afirma ainda que tais condições acontecem por uma limitação do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano das cidades, visto que as ações nele previstas não têm sido efetivas quanto às restrições de ocupação das áreas de risco e invasão de áreas ribeirinhas, que em geral, ocorre pela população de baixa renda.

O gerenciamento da drenagem urbana faz parte do gerenciamento das áreas urbanas. Este, por sua vez, se realiza por meio dos chamados Planos Diretores de Urbanização (PDUs) ou de Uso do Solo Urbano. Segundo IBGE (2000) dos 5.507 municípios brasileiros, apenas 841 possuem PDUs, correspondendo a 15,3%, sendo que destes, apenas 489 com data posterior a 1990 (8,9%). Se forem considerados apenas os municípios com mais de 20.000 habitantes, 485 possuem PDU de um total de 1.483 (32,7%).

Ainda assim, Tucci *et al.* (2007) destacam que os planos existentes, em sua maioria absoluta, não concentram seus esforços em cenários ecossistêmicos, principalmente no que se refere a drenagem urbana, ficando apenas em aspectos arquitetônicos e urbanísticos. Dessa forma, as questões ambientais ainda necessitam de instrumentos legais mais adequados aos cenários de planejamento sustentável nos setores urbanos.

Segundo Tucci (2002), o processo de gerenciamento da drenagem urbana deve iniciar-se pelo Plano Diretor de Águas Pluviais (PDAP), que deve abordar o seguinte:

- Política das águas pluviais;
- Medidas estruturais e não-estruturais;
- Produtos
- Programas
- Informações.

Tucci *et al.* (2007) definem cada item de forma mais detalhada a seguir:

A política das águas pluviais de um município deve contemplar os princípios e objetivos do controle das águas pluviais no meio urbano e as estratégias para o desenvolvimento e articulação do PDAP com os demais planos setoriais. A partir de cenários de diagnóstico e prognóstico do funcionamento dos sistemas de drenagem propõem-se alternativas de controle ou medidas estruturais e não-estruturais [...] O desenvolvimento do PDAP deve contemplar a geração de produtos, como planos de ação, manuais de drenagem, regulamentação e planos de gestão da drenagem urbana [...] A elaboração e a atualização de um PDAP estão diretamente relacionados ao grau de precisão e à disponibilidade de informações na região [...]

Neste sentido, atualmente, o grau de precisão e a disponibilidade de informações de uma região podem ser associadas às técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, as quais podem, e devem, ser inseridas para pré analisar uma determinada área em relação aos seus recursos hídricos e proporcionar uma solução mais assertiva no desenvolvimento de projetos civis no sentido de evitar problemas futuros de drenagem urbana. Dessa forma, na próxima seção será apresentada uma breve revisão de conceitos e definições relacionados ao geoprocessamento, sensoriamento remoto e possíveis aplicações na gestão da drenagem urbana.

2.3 GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Jacintho (2003), o geoprocessamento e o sensoriamento remoto fazem parte de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o qual pode ser definido como um sistema computacional, dotado de ferramentas para manipulação, transformação, armazenamento, visualização, análise e modelagem de dados georreferenciados. Essa tecnologia é voltada para produção dos mais diversificados tipos de informações, constituindo-se numa importante ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Os SIG's possuem as mais diferentes possibilidades de aplicações, como na agricultura, meio ambiente e urbanismo. Segundo Camara (1995), há pelo menos três maneiras, não excludentes, deles serem utilizados:

- Ferramenta para produção de mapas;
- Suporte para análise espacial de fenômenos;
- Banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação da informação espacial.

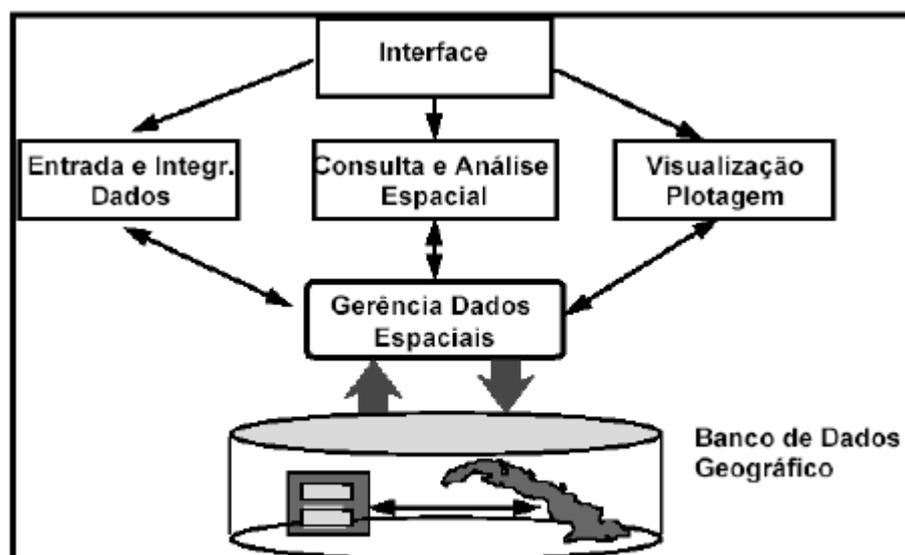
Os SIG's funcionam como meio para a integração de dados espaciais adquiridos em tempos diferentes, e em diferentes escalas e formatos (JACINTHO, 2003). Estes autores expõem também que o principal objetivo dos usuários que utilizam um SIG está ligado ao desenvolvimento de quatro atividades principais: Medição, Mapeamento, Monitoramento e Modelagem.

Câmara (1995) também indica com principais características de um SIG:

Integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno e oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise e para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.

A seguir, na Figura 7, temos um fluxograma para ilustrar o processo:

Figura 7 – Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica.



Fonte: Camara (1995)

Para auxiliar a complementação da definição feita pelo autor na citação anterior, Jacintho (2003) aborda que os dados espaciais devem ser enquadrados numa das categorias abaixo:

- Dados Temáticos: descrevem a distribuição espacial de uma feição geográfica, de forma qualitativa (Ex.: Carta de Declividade, Uso do Solo etc).
- Dados Cadastrais: distingue-se dos mapas temáticos pois seus elementos possuem atributos, e sua representação gráfica pode variar conforme a escala (Ex.: Mapa de Municípios).
- Redes: cada objeto possui localização geográfica exata e está associado a atributos descritivos, com informações sobre recursos que fluem espacialmente (Ex.: Rede de drenagem).
- Modelos Numéricos de Terreno: denotam a representação quantitativa de uma grandeza com variação contínua no espaço (Ex.: Cartas Altimétricas).
- Imagens: Obtidas por Sensoriamento Remoto e armazenadas no formato “raster”. Podem ser consideradas como dados primários, de onde se pode derivar mapas temáticos (Ex.: Imagens de Satélite).

É importante ressaltar que várias disciplinas cooperam para o desenvolvimento dos SIG's, dentre as quais se destacam a cartografia, a estatística, a informática e o sensoriamento remoto. Este último sendo de fundamental importância para o entendimento do presente trabalho.

O termo Sensoriamento Remoto surgiu da tradução da expressão “Remote Sensing” (SR), referente à ciência que, num sentido amplo, resume os anseios do Homem pela expansão dos seus limites (JACINTHO, 2003). Segundo Lillesand e Kieffer (1994), o sensoriamento remoto é "a ciência e a arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados obtidos por um aparelho que não esteja em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação", ou seja, no contexto das geotecnologias, tem por objetivo monitorar ou obter informações sobre um determinado alvo sem contato direto com o mesmo.

Segundo Jacintho (2003), o termo técnico em inglês “Remote Sensing” apareceu na comunidade científica internacional apenas em 1960. Porém, se quisermos absorver o termo de forma mais literal, o homem se utiliza do sensoriamento remoto desde seus primórdios, pois os olhos podem ser considerados, dentro das definições acima, como sensores remotos atuando na faixa de comprimentos de onda do visível.

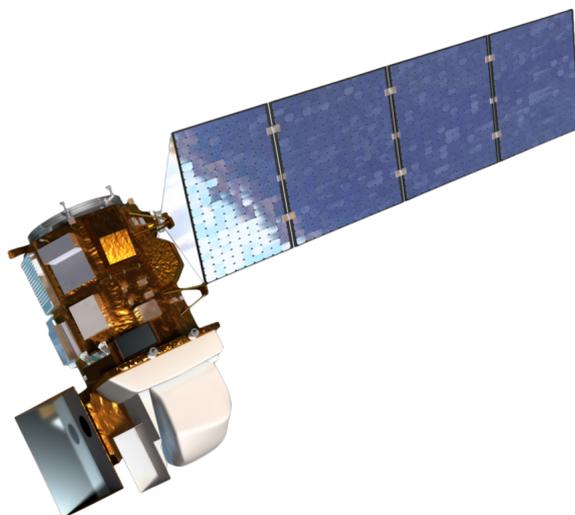
No entanto, foi com a ideia de construção de um artefato aéreo não tripulado que finalmente foi possível a obtenção de informações geográficas mais expansivas. A primeira fotografia aérea conhecida e patenteada foi obtida pelo francês Gaspard Tournacho em 1858, tirada a partir de balões cativos tripulados (EISENBEISS, 2009).

Em 1883, Douglas Archibold em suas experiências instalou um anemômetro a um fio em papagaio de papel, para medir a velocidade do vento em diferentes altitudes. Ainda com o mesmo tipo de artefato cinco anos depois, em 1888, o francês Arthur Bolut instalou uma câmera fotográfica, obtendo as primeiras fotografia aéreas (LONGHITANO, 2010).

Mas foi principalmente por causa de atividades militares, durante a primeira e segunda guerras mundiais e também durante a guerra fria entre os EUA e a antiga URSS, que o desenvolvimento da aerofotogrametria se intensificou. Estes países desenvolveram os satélites espiões e com isso teve origem o SR orbital, com a incorporação de sofisticados sensores de imageamento em plataformas orbitais e aéreas (JACINTHO, 2003).

A partir da disponibilização dessa tecnologia para o grande público, a aquisição de imagens por sensoriamento remoto se tornou uma forma rápida de obter informações sobre determinada região. O satélite americano Land-Sat tem grande utilização por possuir um grande acervo de imagens que são disponibilizadas gratuitamente. Ele foi desenvolvido pela NASA e é considerado um marco no desenvolvimento do sensoriamento remoto, pois foi o primeiro satélite lançado para observação da Terra, em 1972 (SILVA *et al.*, 2017). O último satélite dessa série é o Land-Sat 8 (Figura 8), lançado em 2013, possuindo uma resolução de 15 metros da superfície.

Figura 8 – Imagem do satélite Land-Sat 8, desenvolvido pela NASA.



Fonte: NASA (2013)

Um outro satélite que também possui bastante relevância, é o satélite CBERS que tem como seu modelo mais recente a versão 04A, lançado em 2019. Essa tecnologia é fruto de um programa de cooperação tecnológica entre o Brasil e a China, cujo objetivo é o desenvolvimento e a operação em órbita de satélites de sensoriamento remoto (INPE, 2019). Ele possui uma melhor resolução em relação ao Land-sat, podendo chegar a 2 metros da superfície.

Dentro desse contexto, no decorrer do tempo, as aplicações do uso do SR se expandiram para as mais diferentes áreas, e umas delas é o uso no que abrange os recursos hídricos de uma região. Isso se deu pelo fato de que essa tecnologia apresenta um menor custo financeiro e maior acessibilidade para realizar levantamentos técnicos, mapeamentos e monitoramentos para planejamento ambiental e urbano.

Segundo Silva *et al.* (2017), a utilização do SR como ferramenta para os recursos hídricos, incluindo a drenagem urbana, ganharam impulso nas últimas décadas, principalmente devido ao advento de novos sensores orbitais, através de satélites meteorológicos, a partir de 1960, e dos satélites de recursos naturais, a partir de 1970. Os produtos oriundos do sensoriamento remoto e as ferramentas de geoprocessamento representam hoje grandes aliados no desenvolvimento de novas metodologias necessárias para o monitoramento dos recursos hídricos e gestão das bacias hidrográficas.

Com isso, planos de recursos hídricos devem conter o diagnóstico da situação atual e tendências de longo prazo em relação a demanda por recursos hídricos (BATISTA, 2017). Isso pode ser feito através de análise de séries temporais, envolvendo o processamento de múltiplas imagens ao longo dos anos e, dessa forma, permite constatar tendências em relação à expansão da área urbana, o consumo e o escoamento superficial da água.

Batista (2017) ainda ressalta que o SR, referente à questões do perímetro urbano, permite a realização do mapeamento do solo, onde, a partir daí é possível contribuir para a criação de planos de ação e intervenção ambientais efetivos pela prefeitura municipal, permitindo definir, avaliar e analisar questões ambientais urbanas ou de qualquer natureza aplicada, como as ligadas à drenagem urbana, controle de enchentes, criação de planos diretores e perícias ambientais.

Diante desses conceitos, e conforme o contexto atual de demanda crescente por água torna-se essencial analisar a distribuição espacial dos componentes do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica, bem como os usos do solo, deplecionamentos e produtividade de água em diferentes escalas espaciais e temporais, sendo o sensoriamento remoto uma ferramenta fundamental e de

fácil acesso para essa análise.

2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

De modo geral, a modelagem hidrológica visa representar de forma simplificada, através de modelos matemáticos, os vários fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. São tipicamente empregados na transformação de chuva em vazão, onde a parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial é de grande interesse para o seu planejamento (TUCCI, 2005).

Este processo de geração de escoamento por excesso de chuva em relação à capacidade de infiltração, é conhecido como processo Hortoniano, porque foi primeiramente reconhecido por Horton (1933). Ele é importante em bacias urbanas, em áreas com solo modificado pela ação do homem, ou em chuvas muito intensas (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial é chamada de chuva efetiva, ou precipitação efetiva. Dentre os vários métodos para estimar a chuva efetiva durante um evento, destaca-se o método conhecido como SCS, desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (Soil Conservation Service) dos Estados Unidos. (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Neste caso, a transformação da chuva em vazão é feita combinando a determinação da chuva efetiva, pelo método SCS, com o método do Hidrograma Unitário. Uma alternativa para a estimativa de vazão de pico, também muito utilizada, é o o método racional que permite estimar esta vazão em função do tempo de concentração e do coeficiente de escoamento da bacia, que é um parâmetro que descreve as características da bacia em análise. No entanto, este método tem sido recomendado apenas para bacias pequenas, uma vez que não permite obter informações mais detalhadas sobre o hidrograma da cheia causada por uma chuva intensa.

Além disso, segundo Collischonn e Dornelles (2013), bacias hidrográficas pequenas, como as existentes em áreas urbanas, raramente possuem dados observados de vazão e nível de água, dessa forma a estimativa de vazões máximas nessas bacias, objeto de estudo deste trabalho, não pode ser realizada usando os métodos estatísticos baseados em séries observadas de vazão. Nestes casos, resta-nos utilizar métodos de estimativa de vazões máximas a partir das características locais das chuvas intensas, como os já mencionados.

Visto que o método racional apresenta limitações quanto ao tamanho da bacia e infor-

mações sobre o hidrograma de cheia, daremos ênfase neste trabalho ao modelo de chuva-vazão baseado na chuva efetiva e no hidrograma unitário proposto por Collischonn e Dornelles (2013).

2.4.1 Modelo chuva-vazão utilizando o hidrograma unitário

Como afirmado anteriormente, o método de estimativa das vazões máximas a partir da chuva baseado no hidrograma unitário pode ser utilizado em bacias maiores, ou quando se deseja representar todo o hidrograma da cheia, e não apenas a vazão máxima. Uma possibilidade de aplicação desse modelo é obter a separação de escoamento com o método SCS para posterior obtenção dos hidrogramas de cheia a partir do método do hidrograma unitário. Este modelo é desenvolvido considerando eventos de chuva de projeto. Admite-se que uma chuva de T anos de tempo de retorno provoque uma vazão máxima de T anos de tempo de retorno. A seguir são discutidos os principais conceitos e métodos envolvidos neste processo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

2.4.1.1 Chuva de projeto e curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

Segundo BEMFICA (1999), chuvas de projeto são metodologias simplificadas de representação da distribuição temporal da precipitação, utilizadas basicamente como entrada em modelos de simulação chuva-vazão. Em hidrologia, a frequência de uma chuva pode ser denotada pelo seu tempo de retorno, definido como o intervalo de tempo médio estimado para que o evento seja igualado ou excedido (BATISTA, 2017).

Dessa forma, para que possam ser elaborados projetos de drenagem urbana, é necessário ter conhecimento sobre o tempo de retorno mais adequado para determinado tipo de obra. Com isso, diante da dificuldade em se estabelecer de forma objetiva o tempo de retorno dos eventos para fins de projeto, algumas referências disponibilizam tempos de retorno associados a cada tipo de obra e às características de ocupação da região, como pode ser visto a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Períodos de retorno (T) propostos por DAEE-CETESB, em 1980, em função do tipo de ocupação da área

Tipo de obra	Tipo de ocupação da área	Tr (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Área com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2 - 5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5 - 10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50 - 100
	Áreas de importância específica	500

Fonte: (DAEE-CETESB, 1980)

Nesse contexto, como afirma Martins *et al.* (2010), o monitoramento de uma bacia hidrográfica urbana depende de dados confiáveis de chuvas e características físicas da bacia, o que permitirá implementar com segurança, um modelo hidrológico que simule o comportamento da bacia mais próximo da realidade. A obtenção destes dados são essenciais para a determinação das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF). As curvas IDF são uma das formas mais utilizadas na área de hidrologia para medir as chuvas máximas de um local numa bacia hidrográfica, relacionando a intensidade máxima da chuva (mm/h) com a sua duração no tempo (minutos) e a sua probabilidade ou tempo de retorno (probabilidade em % ou anos).

Estas curvas possuem uma grande importância para o projeto de infraestruturas no Brasil, visto que compõem os parâmetros básicos para o projeto de estradas, ruas, condutos e barragens. Esta função é utilizada para estimar a erosão do solo, para drenagem de forma geral, determinar vazões de projeto para pequenas bacias e apoiar a determinação para bacias maiores (TUCCI, 2002).

Inicialmente, a obtenção das curvas IDF partem da análise de dados provenientes de pluviógrafos, os quais registram a variação das chuvas com o tempo, sendo assim possível relacionar, intensidades, durações e frequência de chuvas.

A partir da análise dos valores das intensidades máximas de chuva para diferentes durações e tempos de retorno, são determinados os parâmetros da Equação 1, o qual expressa a curva IDF de uma determinada localidade:

$$I = \frac{KT^m}{(t + b)^n} \quad (1)$$

Onde I é a intensidade média máxima de chuva (mm h^{-1}); K , m , b , n são os coeficientes; T é o período de retorno (anos) e t é a duração da chuva (minutos).

No entanto, visto que o Brasil não apresenta uma cobertura uniforme de monitoramento por este tipo de equipamento, métodos alternativos de obtenção de curvas IDF para localidades que não possuem dados pluviográficos, foram desenvolvidos, tomando como base os dados de chuvas diárias registrados em pluviômetros. Nestes métodos, as chuvas máximas diárias são ajustadas a distribuições estatísticas, a partir das quais é possível determinar as probabilidades de ocorrência de uma determinada precipitação e por decorrência, o seu tempo de retorno.

Então, utilizando relações para desagregação das chuvas para tempos de menor duração, presentes na literatura é possível obter as curvas IDF ajustadas para uma determinada localidade.

Tanto os métodos de obtenção de curvas IDF a partir de dados de pluviógrafos como de pluviômetros têm sido essenciais para a determinação de chuvas de projeto mais compatíveis com as demandas de projetos. Pois é a partir dessas chuvas que podemos, através dos modelos de chuva-vazão, estimar as vazões de pico, ou vazões máximas, de uma determinada bacia ou sub-bacia.

2.4.1.2 Determinação da chuva efetiva utilizando o Método SCS

O método Soil Conservation Service (SCS) - atual National Resources Conservation Service (NRCS) - é um dos modelos hidrológicos mais utilizados em pesquisas e projetos. Esse método foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), aplicado inicialmente para determinar o escoamento superficial em bacias rurais. Tornou-se popular ao longo dos anos pela facilidade de uso e resultados satisfatórios, e atualmente é utilizado também na modelagem de bacias urbanas com áreas contidas no intervalo de 2 km^2 a 5.000 km^2 (TOMAZ, 2013).

O método SCS baseia-se em um procedimento que calcula hidrogramas unitários sintéticos, os quais serão apresentados a seguir, a partir de fatores empíricos. Consiste na determinação da precipitação efetiva, ou seja, precipitação que gera o escoamento superficial e na transformação de chuva em vazão (DECINA, 2012).

Segundo USDA (1986), o objetivo do método SCS Curve Number é determinar a precipitação efetiva de um evento hidrológico (precipitação), em função das características do solo que influenciam na infiltração da água de chuva.

Segundo Tucci (2005), a estrutura do método SCS é dividida da seguinte forma:

- Precipitação de projeto – podendo ser determinada pelos conceitos de Precipitação Máxima Provável (PMP), ou precipitações baseadas em probabilidade de ocorrência;
- Determinação do volume superficial – onde o mesmo consiste na separação do escoamento superficial, tendo como parâmetro o conceito de Curve Number (CN), no qual o mesmo é determinado, relacionando o tipo e o uso do solo da bacia em análise;
- Propagação Superficial – onde, por fim, o volume superficial gerado na etapa anterior, é propagado até o curso d'água, utilizando o conceito de Hidrograma Unitário Sintético Triangular.

Neste método, os solos podem ser classificados, segundo Tucci (2012), em quatro grupos hidrológicos:

- Solos A: Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila;
- Solos B: Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e permeabilidade superior à média;
- Solos C: Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo;
- Solos D: Solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com baixíssima capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Cada grupo de classificação hidrológica do solo apresentando anteriormente possui uma taxa mínima de infiltração apresentadas na Tabela 3.

Já para a condição de umidade antecedente do solo, o método SCS Curve Number (CN) utiliza três categorias (USDA, 1986):

- Condição de umidade I: Solos secos, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm;

Tabela 3 – Taxas de infiltração para cada tipo de solo

Tipo de solo	Taxa de Infiltração (T_i)
Solos A	$T_i > 7,62$ mm/h
Solos B	3,81 - 7,62 mm/h
Solos C	1,27 - 3,81 mm/h
Solos D	$T_i < 1,27$ mm/h

Fonte: (TUCCI, 2012)

- Condição de umidade II: situação média dos solos na época de cheias, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 40 mm. Esta condição é normalmente utilizada para se determinar hidrogramas de escoamento superficial quando são elaborados projetos de drenagem urbana;
- Condição de umidade III: solos úmidos, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias ultrapassam 40 mm e as condições meteorológicas não favorecem a evaporação.

O *CN* está associado às condições de uso e ocupação do solo, ao tipo hidrológico do solo e à umidade antecedente, relacionada à precipitação acumulada nos últimos 5 dias. Seu valor pode variar de 0 a 100, sendo que quanto maior o valor de *CN*, maior será o escoamento superficial em detrimento da precipitação total (ALMEIDA, 2016).

A seguir, na Tabela 4, os valores de *CN* serão apresentados, referente à condição II de umidade antecedente do solo, para os diferentes tipos de solo e suas respectivas condições de ocupação.

Tabela 4 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Zonas Cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prados em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim	45	66	77	83
cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, boas condições: com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m ²)	%Média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: (TUCCI, 2012)

Segundo Batista (2017), uma vez que o método do SCS é focado nas características dos solos dos Estados Unidos, os conceitos dos grupos hidrológicos do solo a nível Brasil acabam por se tornar pouco consistentes, pois, segundo a autora, nessa classificação não são considerados outros fatores além da textura do solo.

Outra limitação do método, segundo Sartori (2014), é o fato de sua aplicação no Brasil tornar-se delicada devido a limitação na estimativa do parâmetro *CN*, pois as características dos solos norte-americanos fornecidas pelo método, são diferentes das do solo brasileiro, tendo como

consequência, uma vazão de pico superestimada de 30 a 40%, quando comparada com outros métodos.

Porém, para contornar essas diferenças no tipo de solo, Sartori (2014), baseado na metodologia de classificação dos solos do estado de São Paulo apresentada por Lombardi Neto *et al.* (1986) mostrou uma nova proposta o qual contemplou características de solos brasileiros proposta pelo método *SCS*, definidas no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação hidrológica dos solos brasileiros

Grupo Hidrológico	Solo	Textura
A	Latossolo amarelo; Latossolo vermelho amarelo; Latossolo vermelho.	Argilosa ou muito argilosa e com altamacroporosidade.
B	Latossolo amarelo; Latossolo vermelho amarelo;	Média, mas com horizonte superficial de textura arenosa.
	Latossolo bruno; Nitossolo vermelho; Neossolo quartzarênico; Argilossolo vermelho.	Textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	Argissolo;	Não apresenta mudança textural abrupta apesar de pouco profundo.
	Latossolo vermelho; Latossolo vermelho amarelo; Argissolo amarelo;	Apresenta mudança textural abrupta causada por sua profundidade.
	Cambissolo háplico ou Húmico.	Características físicas semelhantes aos Latossolos (latossólico)
D	Neossololítico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo ; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvisolo; Plintossolo; Solos de mangue; Afloramentos de rocha; Cambissolos.	Pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Adaptado de Sartori (2014)

Segundo Porto (1995), uma forma de aplicação do método do SCS para áreas urbanizadas, consiste em fazer uso de tabelas que consideram os tipos de ocupação do solo e características de

áreas urbanas. Assim, se a bacia apresentar diversos tipos de solo e ocupação, deve-se adotar um valor de CN obtido pela média ponderada dos CNs correspondentes às áreas homogêneas. Cabe ressaltar a importância das técnicas de sensoriamento remoto para identificação e quantificação destas áreas.

Uma vez determinado os CNs médios, esse valor é utilizado para que sejam obtidas as chuvas efetivas, utilizando-se a equação 2, o qual representa a precipitação efetiva (Pe) em função da precipitação total (P) e do potencial de retenção do solo (S), após início do escoamento superficial.

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (2)$$

A condição que torna possível o uso desta equação é a de que a precipitação total deve ser maior que 20% da capacidade máxima de armazenamento do solo (USDA, 1986). A quantidade de 0,2S é uma estimativa de perdas iniciais (A_i), devido à interceptação e retenção em depressões. Por essa razão, impõe-se a condição $P > 0,2S$ (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Dessa forma, o escoamento superficial ocorre somente se o valor de precipitação total exceder as perdas iniciais.

Segundo Collischonn e Dornelles (2013), a precipitação total (P) é obtida através do produto da duração total da chuva de projeto (D) pela intensidade (I), como pode ser visto, a seguir, na Equação 3.

$$P_{total} = I \times \frac{D}{60} \quad (3)$$

sendo D determinado como sendo 60% maior que o tempo de concentração.

A capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo é dada pela Equação 4:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

sendo CN o valor da curva número.

Para a determinação do hidrograma de cheia correspondente a chuva de projeto é necessário realizar a convolução dos hidrogramas das chuvas efetivas incrementais, obtidos a partir do hidrograma unitário da bacia, que será apresentado a seguir.

2.4.1.3 Hidrograma de projeto a partir do hidrograma unitário

O hidrograma unitário é o hidrograma produzido por uma unidade de chuva excedente distribuída uniformemente sobre a bacia com uma duração especificada. Ele pode ser determinado pela análise de dados de precipitação e vazão, ou por meio de fórmulas empíricas, chamados de hidrogramas sintéticos. Na hidrologia urbana prevalecem os hidrogramas sintéticos, visto que muitas vezes os dados são escassos, e também pela necessidade de se determinar o hidrograma para condições futuras de ocupação (PORTO, 1995).

O hidrograma unitário é uma ferramenta essencial para o hidrólogo prever as descargas de cheias de pico e determinar a resposta do escoamento direto frente à precipitação (SULE; ALABI, 2013).

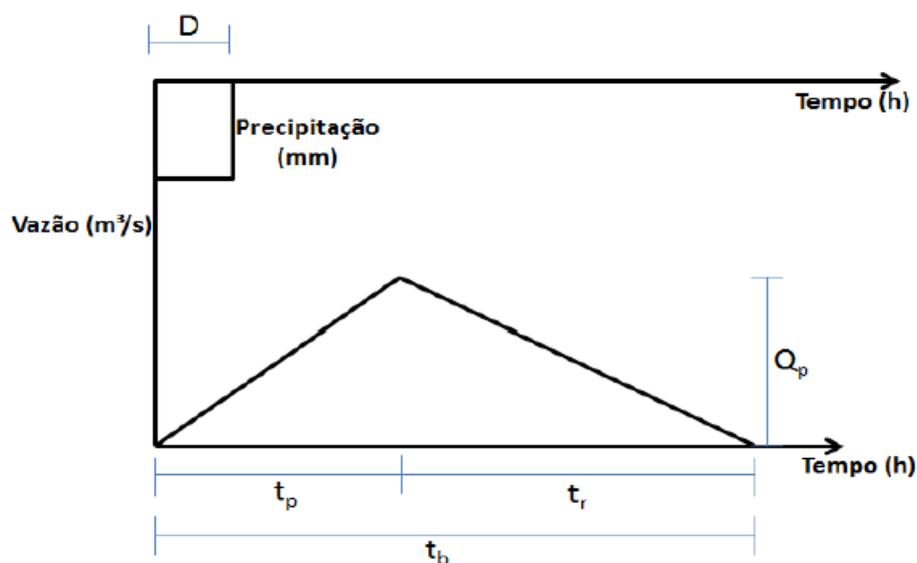
Este método foi proposto inicialmente por Sherman (1932) e a grande aceitação se deu pela sua versatilidade e simplificação de aplicação, uma vez que, o método pressupõe que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e invariante no tempo. Isso significa que, segundo Collischonn e Dornelles (2013), podem ser aplicados os princípios da proporcionalidade e superposição e, com isso, é possível calcular a resposta da bacia a eventos de chuva diferentes, considerando que a resposta é uma soma das respostas individuais, também chamado de convolução dos hidrogramas.

Para a aplicação do método, as chuvas complexas devem ser subdivididas em chuvas simples. Assim, se for conhecido o hidrograma resultante de uma chuva simples, poderá ser facilmente determinado o hidrograma correspondente à chuva complexa (BATISTA, 2017).

Um método bastante difundido na literatura, é o Hidrograma Unitário Triangular (HUT), desenvolvido a partir de análises em bacias com diferentes características nos Estados Unidos. O que foi concluído com esses estudos, é que os hidrogramas unitários podem ser aproximados por relações de tempo e vazão estimadas com base no tempo de concentração e na área das bacias (STEINMETZ, 2017).

Com isso, o hidrograma unitário pode ser aproximado por um triângulo, definido pela vazão de pico (Q_p), pelo tempo de pico (t_p) e pelo tempo de base (t_b) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). A ilustração do HUT pode ser visto a seguir, na Figura 9.

Figura 9 – Hidrograma unitário triangular



Fonte: (CARDOSO, 2014)

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), as equações do HU são dadas pelas relações abaixo:

$$d = 0,133t_c \quad (5)$$

$$t_p = \frac{d}{2} + 0,6t_c \quad (6)$$

$$t_b = 2,67t_p \quad (7)$$

$$Q_p = 2,08 \frac{A}{t_p} \quad (8)$$

Onde: d é a duração da precipitação (h); t_c é o tempo de concentração da bacia (h); t_p é o tempo de pico do HU (h); t_b é o tempo de base do HUS (duração do escoamento superficial – h); Q_p é a vazão de pico do HUS (m^3/s) e A é a área da bacia (km^2).

O tempo de concentração é um parâmetro hidrológico que surge da hipótese de que a bacia hidrográfica responde como sistema linear para o escoamento superficial direto. Decorre desta hipótese a definição de tempo de concentração como o tempo para que toda a água precipitada em uma bacia passe a contribuir em uma seção de controle (SILVEIRA, 2005).

Segundo Silveira (2005), as fórmulas de tempo de concentração foram estabelecidas ao longo do tempo basicamente por necessidades práticas de engenharia. A maioria guarda por isso um caráter altamente empírico e são essencialmente equações de regressão, obtidas com preceitos estatísticos precários.

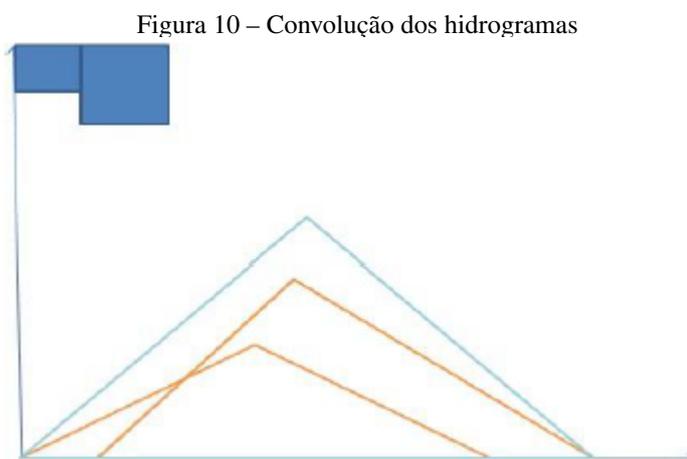
Cada uma das equações foram formuladas contendo variáveis correspondendo a características que envolvem uma bacia, como localização (urbana ou rural), área e comprimento do talvegue. Dentre as principais estão as equações de Kirpich, Ventura, Temez, Pickering, Ven Te Chow, Passini, Picking e Dodge.

Neste conjunto, destaca-se a equação proposta por Kirpich (Equação 9), pois, apesar da equação ter sido originalmente formulada para bacias de até 0,45km², no estudo feito por Silveira (2005) verificou-se que a equação possui um bom desempenho para bacias maiores, tanto em ambientes urbanos quanto rurais.

$$T_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (9)$$

Onde L é o comprimento do curso d'água (talvegue) em km e H é a diferença entre o ponto de maior altitude do curso d'água e a altitude do ponto da seção analisada, em metros.

Uma vez obtidos os hidrogramas unitários, é necessário fazer uma operação conhecida por convolução, que é a composição linear dos diversos hidrogramas unitário defasados (exemplo na Figura 10).



Fonte: (CARDOSO, 2014)

Collischonn e Dornelles (2013) propõem os seguintes passos para obtenção de tais hidrogramas:

1. Definição do intervalo de tempo de cálculo (d) para os cálculos de convolução com o hidrograma unitário. O valor de d dentro de um intervalo de 5 a 10 vezes menor do que o tempo de concentração;
2. Com base na curva IDF, define-se a chuva de projeto, com duração D de aproximadamente 60% maior do que o tempo de concentração da bacia;
3. Calcula-se a chuva incremental para cada um dos N blocos de chuvas;
4. Com base nos N valores de chuva incremental e no hidrograma unitário, é feita, a convolução para gerar o hidrograma de projeto através da Equação 10.

$$Q_n = \sum_{m=1}^n p_m \times q_{n-m+1} \quad (10)$$

sendo p a precipitação do diagrama unitário, q a vazão efetiva e Q a vazão do hidrograma resultante.

Em suma, mesmo que uma área não apresente dados de monitoramento das vazões, é possível obter boas estimativas de vazão para projetos de drenagem a partir de dados de precipitação existentes, aliando modelos hidrológicos com dados de fontes públicas a técnicas de sensoriamento remoto. Tais procedimentos serão utilizados neste trabalho para avaliar o impacto da urbanização na vazão de pico de uma sub-bacia do Rio Perucaba em Arapiraca/AL.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O caminho percorrido neste trabalho para a consecução dos objetivos propostos pode ser dividido em 4 etapas: (i) revisão da literatura para obtenção do marco teórico e conceitual do trabalho; (ii) pesquisa e obtenção de dados secundários, imagens de satélite, dados de precipitação e curvas IDF, bem como parâmetros físicos da região estudada; (iii) o processo de modelagem hidrológica com a determinação dos parâmetros de análise das chuvas de projeto, aplicação do método SCS e obtenção dos hidrogramas para cenários pré-estabelecidos; e por fim, (iv) a análise dos resultados, visando verificar os impactos da urbanização no acréscimo da vazão de pico da região.

3.1 REVISÃO DA LITERATURA

Durante esta etapa foram realizadas pesquisas bibliográficas relacionadas ao tema: urbanização e seus efeitos sobre a drenagem urbana, modelos hidrológicos para estimativa de vazão, aplicações do geoprocessamento e do sensoriamento remoto à Hidrologia. Devido a interdisciplinaridade do tema, a apresentação desses tópicos foi feita de forma resumida, visando garantir a compreensão destes itens no contexto do tema apresentado.

3.2 PESQUISA E OBTENÇÃO DE DADOS SECUNDÁRIOS

Os dados básicos necessários para dar início à modelagem do problema foram obtidos a partir da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), bem como de artigos e outros documentos de órgãos governamentais.

Tais dados visaram as seguintes subetapas:

- **Caracterização física da Área de Estudo:** A partir de dados obtidos no site do IBGE sobre informações das bacias hidrográficas do estado de Alagoas e com a ajuda do software *Qgis*, foi possível delimitar a área de interesse da bacia em questão.
- **Obtenção de imagens da bacia em diferentes anos:** foram adquiridas imagens de satélite da região de interesse em anos estratégicos, 2013 e 2021, compreendendo o ano de início do processo de urbanização da região e um ano mais atual para que seja possível fazer dados comparativos sobre as alterações causadas. Foram utilizadas duas fontes de imagens,

uma para cada ano estabelecido. Para o ano de 2013, optou-se pela imagem fornecida pelo software *Google Earth*, com uma resolução de 16 metros da superfície proveniente do programa Landsat-8, pois, para esse ano, foi a imagem com a melhor qualidade disponível para uma classificação mais assertiva para o período em questão. Já para o ano de 2021, optou-se por utilizar imagens provenientes do satélite CBERS 04A, com uma resolução de 2 metros da superfície, disponível no catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), devido a sua melhor resolução e qualidade de imagem e, com isso, possibilitou uma boa classificação das imagens em estudo.

- **Classificação do uso do solo na sub bacia nos cenários estabelecidos:** a classificação do solo foi feita com o auxílio do plugin *Semi-Automatic Classification (SCP)* dentro do software *Qgis*, o qual permite a classificação supervisionada a partir da coleta de amostras nos diferentes tipos de cobertura do solo, assim, o plugin calcula de forma automática toda a área pré-classificada. Foram escolhidas cinco classificações para determinação do uso e cobertura do solo, são eles: vegetação, água (o próprio lago no entorno da região), pastagem, solo exposto e área impermeabilizada. Em seguida, para a realização da acurácia das classificações realizadas pelo SCP, foi utilizado um outro plugin chamado *AcATaMa* dentro também do *QGis*. Esse plugin foi projetado para aplicar as metodologias de validação e acurácia propostos por Olofsson *et al.* (2014). Entre as opções de alocação de amostras foi escolhida a amostragem aleatória estratificada com proporção baseada em área. Esta amostragem utiliza a fórmula de tamanho de amostra de Cochran (1977). O tamanho total da amostra e o número de pontos para cada estrato são calculados de acordo com a proporção da área de cada estrato no mapa, sendo calculada automaticamente pelo *AcATaMa* (FERREIRA, 2020). Com isso, após a realização desses procedimentos, foi possibilitado a criação de mapas temáticos da região de interesse, tendo como foco a classificação de uso e cobertura do solo em análise. Esta classificação se faz necessária para obtenção de um valor de CN médio para cada um dos anos estudados no método SCS.

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Partindo da chuva de projeto, obtida pela curva IDF determinada por Back *et al.* (2020), foi feita a separação da chuva efetiva utilizando o método do SCS, juntamente com o hidrograma unitário e a convolução, foram encontrados os hidrogramas resultantes das chuvas de projeto para cada um dos cenários. Estes serviram como base para análise de como o processo de urbanização

na área da bacia impactou no escoamento superficial ao longo dos anos. Para estas análises, o tempo de retorno, período de tempo médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez, foi definido a partir das informações apresentadas na Tabela 5 e tendo em vista que a bacia do Rio Perucaba está localizada numa região urbana. Foram escolhidos para a determinação das curvas IDF os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Tabela 5 – Períodos de retorno (T) propostos por DAEE-CETESB, em 1980, em função do tipo de ocupação da área

Tipo de obra	Tipo de ocupação da área	Tr (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Área com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2 - 5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5 - 10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50 - 100
	Áreas de importância específica	500

Fonte: (DAEE-CETESB, 1980)

De forma resumida, foram seguidos os passos propostos por Collischonn e Dornelles (2013), descritos na sequência:

- Calcular a área da bacia.
- Calcular o tempo de concentração da bacia.
- Definir o intervalo de tempo de cálculo (d) para os cálculos de convolução com o hidrograma unitário. O valor de d deve ser cerca de 5 a 10 vezes menor do que o tempo de concentração para permitir descrever adequadamente a subida e a descida do hidrograma.
- Com base nas características da bacia (área e tempo de concentração), e assumindo o valor do intervalo de tempo de cálculo (d) como duração da chuva, define-se o hidrograma unitário sintético.
- Com base na curva IDF define-se a chuva de projeto, com duração (D) aproximadamente 60% maior do que o tempo de concentração da bacia. Idealmente, o valor de D deve ser escolhido de forma que a relação D/d seja um número inteiro N.

- A intensidade da chuva deve ser considerada variável, em intervalos de tempo de tamanho d , e organizada em blocos alternados, ou metodologia semelhante. O resultado é uma chuva de duração total D , definida por N blocos individuais de duração d .
- Cada um dos blocos da chuva de projeto deve ser multiplicada pelo fator de redução de área, de acordo com a área da bacia e com a duração total da chuva. Porém, para o presente estudo, isso não será aplicado, pois, pelo tamanho da área de estudo da região, esse fator fica muito próximo a 1 e por isso esse procedimento não se faz necessário.
- Com base na chuva de projeto corrigida do passo anterior e usando uma metodologia de separação de escoamento, como o método SCS, baseado no coeficiente CN, calcula-se a chuva efetiva incremental para cada um dos N blocos de chuva.
- Com base nos N valores de chuva efetiva incremental e no hidrograma unitário é feita a convolução para gerar o hidrograma de projeto.
- A maior vazão do hidrograma de projeto é a vazão máxima estimada a partir da chuva.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados obtidos tanto com a classificação das imagens, quanto com os hidrogramas e suas respectivas vazões de pico, foram analisados as variações entre os cenários estabelecidos, permitindo avaliar o impacto da implantação do empreendimento, na urbanização da área e conseqüentemente no escoamento superficial da área. Foram analisados a evolução em 3 cenários (2013, 2021 e uma projeção futura), além de diferentes tempos de retorno, possibilitando assim avaliar o impacto em diferentes tipos de projeto de drenagem, tanto de microdrenagem como macrodrenagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CLIMA, HIDROGRAFIA E GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com Pinto e Vasconcelos (2004), por estar mais próximo à Zona da Mata, em Arapiraca, as contribuições dos sistemas de leste são muito mais importantes do que as da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), com o mês mais chuvoso se deslocando para junho.

Segundo Lima (1965), o município de Arapiraca situa-se na região do agreste sub-úmido (Figura 11), onde o clima é do tipo *As* (clima de savana), segundo a classificação climática de Köppen, com uma estação seca no verão e chuvas de outono/inverno. Segundo o trabalho desenvolvido por Nimer (1979) sobre o clima da região Nordeste, a área onde se situa o município estudado, é caracterizada por temperaturas elevadas, com a média anual de 25°C, e totais anuais de precipitação segundo o intervalo de 750 a 1000 mm. Os três meses mais chuvosos são maio, junho e julho, concentrando geralmente mais de 50% do total anual, e os mínimos pluviométricos são registrados na primavera ou no verão, possuindo de 4 a 5 meses secos. Portanto, trata-se de um regime estacional típico das regiões de “clima mediterrâneo”.

Figura 11 – Principais sistemas meteorológicos na região Nordeste do Brasil



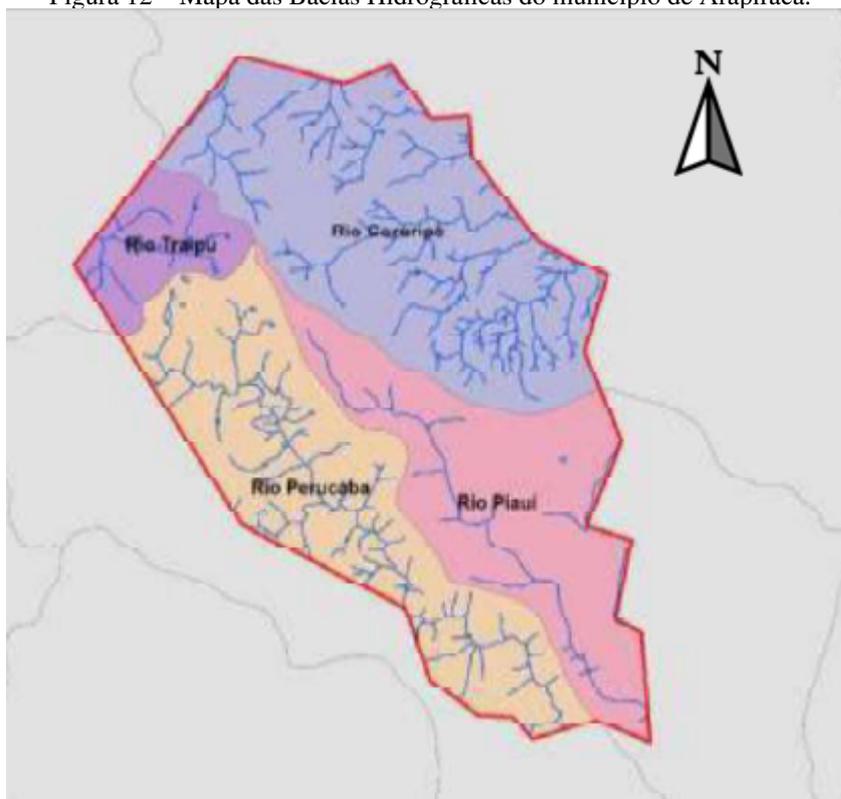
Fonte: SEMARHN/AL (2003).

O território do município de Arapiraca, como pode ser visto na Figura 12, está contido entre quatro bacias hidrográficas, são elas:

- Bacia Hidrográfica do Rio Coruripe;
- Bacia Hidrográfica do Rio Piauí;
- Bacia Hidrográfica do Rio Perucaba;
- Bacia Hidrográfica do Rio Traipu.

Na área urbana, as principais bacias do município são a do Rio Piauí e Rio Perucaba, os quais também são utilizados como destinos dos efluentes.

Figura 12 – Mapa das Bacias Hidrográficas do município de Arapiraca.



Fonte: Plano Nacional de Saneamento Básico (PMSB, 2014)

Segundo HYDROS (1998), a Região Hidrográfica do Rio Piauí, é composta pelas bacias hidrográficas do rio Perucaba (com área de drenagem de 637,7 km²), Rio Tibiri (129,5 km²), Rio Itiúba (469,6 km²), Rio Boacica (808,8 km²), Rio Piauí (1109,4 km²) e Rio Batinga (159,3 km²).

O rio Perucaba possui uma extensão de 103 km e uma área de drenagem de 606,22 km². Este rio nasce a 14 km de Arapiraca, entre as serras do Alecrim e Mata D'Água, a uma altitude de 300m. O sentido de escoamento desse rio é sudeste. As declividades são mais acentuadas no seu trecho inicial (PMSB, 2014).

Sobre o lago, o qual está localizado no entorno da área de estudo, ainda segundo o PMSB (2014), apesar das características de intermitência das bacias da região, ele se mantém permanentemente com volume de água e isso se deve, principalmente, ao lançamento de efluentes e escoamento pluvial da área urbana de Arapiraca.

Sobre a geomorfologia e relevo do município, Mascarenhas *et al.* (2005) descrevem que o município de Arapiraca faz parte da unidade dos Tabuleiros Costeiros que, de modo geral, são solos profundos e de baixa fertilidade natural.

Já sobre o solo, segundo Jacomine *et al.* (1975), a principal ocorrência na área em estudo é do solo tipo *Lvd Associação de Latossolo Vermelho Amarelo Distrofíco coeso pdozólico* com

textura média mais *Podzólico Vermelho Amarelo* textura arenosa e argilosa. Este tipo de solo costuma ocorrer em ambientes bem drenados.

4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UMA SUB BACIA DO RIO PERUCABA

4.2.1 Dados iniciais

A área da sub-bacia e o comprimento da drenagem principal foram obtidos automaticamente através do software *QGis 3.16*, sendo a área correspondendo a $1,37\text{km}^2$ e o curso d'água principal correspondendo a $1,02\text{km}$.

A declividade do curso d'água presente na sub-bacia em estudo foi obtida através do software *Google Earth*, calculando razão da diferença entre as cotas do ponto mais alto e o mais baixo, pelo comprimento do curso d'água principal. Os valores obtidos podem ser vistos a seguir:

- Cota do ponto mais alto: 242m;
- Cota do ponto mais baixo: 224m;
- Comprimento do curso d'água principal: 1,02km;
- Declividade do curso d'água principal: 17,65m/km.

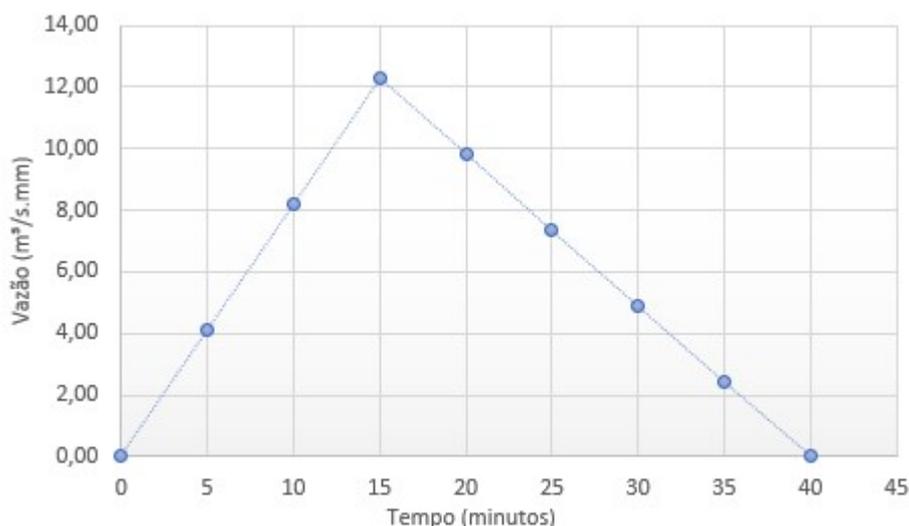
Com esses dados foi possível calcular o tempo de concentração através da equação de *Kirpich*, já apresentada, sendo $t_c = 19,12\text{min}$.

Com base nesse tempo de concentração, foi definido o intervalo de tempo de cálculo para o hidrograma unitário, sendo adotado o valor $d=5\text{min}$.

4.2.2 Hidrograma unitário da sub-bacia

De acordo com as equações descritas no tópico 2.4.1.3, o tempo de subida do hidrograma T_p é igual a 0,25h (15 minutos), o tempo de base do hidrograma T_b é igual a 0,67h (40 minutos) e a vazão de pico Q_p do hidrograma unitário triangular é $12,27\text{ m}^3/\text{s.mm}$. A Figura 13 mostra o hidrograma unitário da região de estudo obtido a partir desses valores encontrados.

Figura 13 – Hidrograma unitário triangular de uma sub bacia do Rio Perucaba



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Determinação das chuvas de projeto

As curvas IDF usadas neste estudo foram provenientes do estudo feito por Back *et al.* (2020), no qual eles analisaram as séries de máximas anuais e ajustaram as equações para todas as 44 estações pluviométricas pertencentes à Rede Hidrológica da Agência Nacional de Águas (ANA) presentes no estado de Alagoas. Para isso, os autores se utilizaram da distribuição estatística proposta por Gumbel e também a de Valor Extremo Generalizado (GEV).

Na Tabela 6, temos a estação pluviométrica utilizada no município de Arapiraca, assim como suas respectivas coordenadas, série histórica e clima.

Tabela 6 – Localização e dados das estações selecionadas.

Num.	Código	Cidade	Lat. (°S)	Long. (°O)	Período	Num. anos	Clima
18	936066	Arapiraca	9.7500	36.6500	1964-1961	24	Tropical Semi Úmido

Fonte: (BACK *et al.*, 2020)

Os parâmetros da equação IDF estimada para Arapiraca são apresentados na Equação 11.

$$I = \frac{375T^{0,29}}{(t + 9)^{0,706}} \quad (11)$$

Esta equação apresentou um bom ajuste, com coeficiente de determinação de 0,997. A partir dela pode-se estimar a intensidade da chuva com duração de 5 minutos a 24 horas e período

de retorno de 2 a 100 anos, com erro padrão de estimativa inferior $6,83 \text{ mmh}^{-1}$ (BACK *et al.*, 2020). Sendo assim uma boa estimativa para as chuvas de projeto.

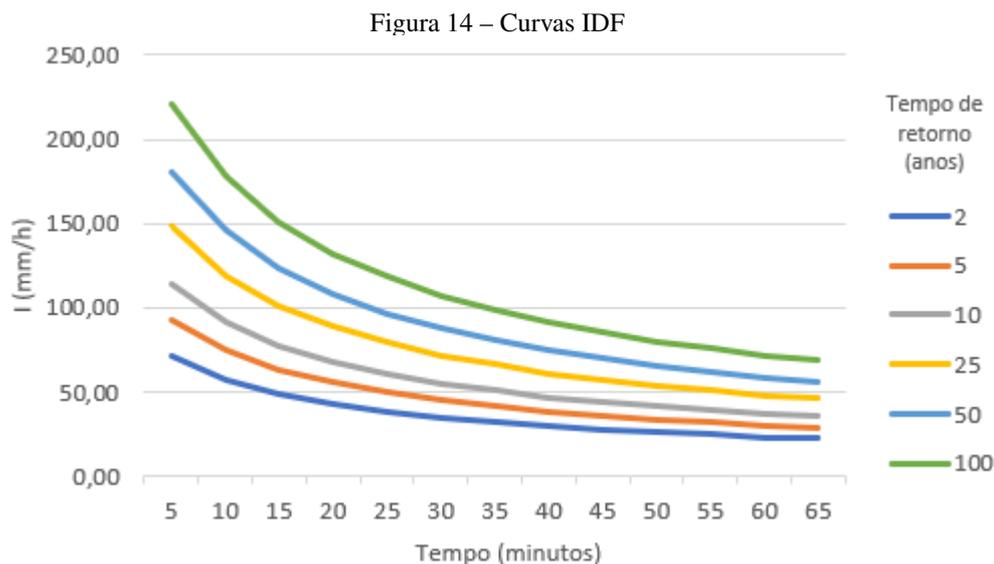
Para calcular os valores das precipitações, em mm/h, utilizou-se a Equação 11. Os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos; e o intervalo de tempo de cálculo (d) igual a 5 minutos. A seguir, na Tabela 7, são mostrados os valores obtidos, os quais são necessários para a determinação das chuvas de projeto.

A Figura 14 ilustra as curvas IDF geradas pela tabela em questão.

Tabela 7 – Precipitações (i) em mm/hora

d (min)	Tr (anos)					
	2	5	10	25	50	100
5	71,15	92,80	113,47	148,00	180,95	221,24
10	57,35	74,81	91,46	119,30	145,86	178,33
15	48,63	63,43	77,55	101,16	123,68	151,22
20	42,55	55,50	67,85	88,51	108,21	132,31
25	38,03	49,60	60,65	79,11	96,72	118,25
30	34,52	45,02	55,05	71,80	87,79	107,33
35	31,70	41,35	50,55	65,94	80,62	98,57
40	29,38	38,32	46,85	61,12	74,72	91,36
45	27,43	35,78	43,75	57,06	69,77	85,30
50	25,77	33,61	41,10	53,61	65,54	80,13
55	24,33	31,74	38,80	50,61	61,88	75,66
60	23,07	30,10	36,80	48,00	58,68	71,75
65	21,96	28,65	35,02	45,68	55,85	68,29

Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

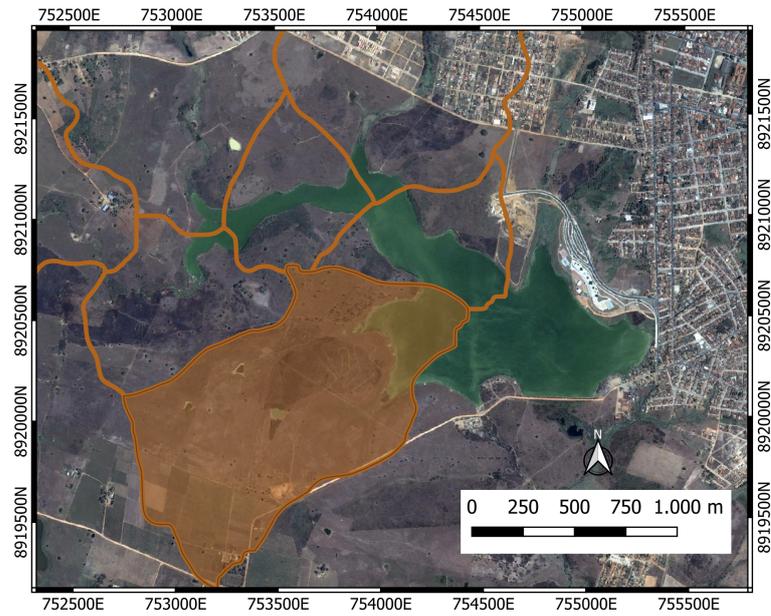
4.3 CÁLCULO DAS CHUVAS EFETIVAS - MÉTODOS SCS

Para o cálculo da chuva efetiva é necessário conhecer o tipo e cobertura do solo. Por se tratar de uma área em processo de urbanização, esta cobertura não é homogênea, sendo necessário assim, utilizar-se de técnicas de classificação de imagens, a partir de imagens de satélite para a obtenção de um CN médio. Os resultados dessas técnicas na área de estudo estão descritos a seguir.

4.3.1 Cálculo do CN a partir da classificação de imagens de satélite

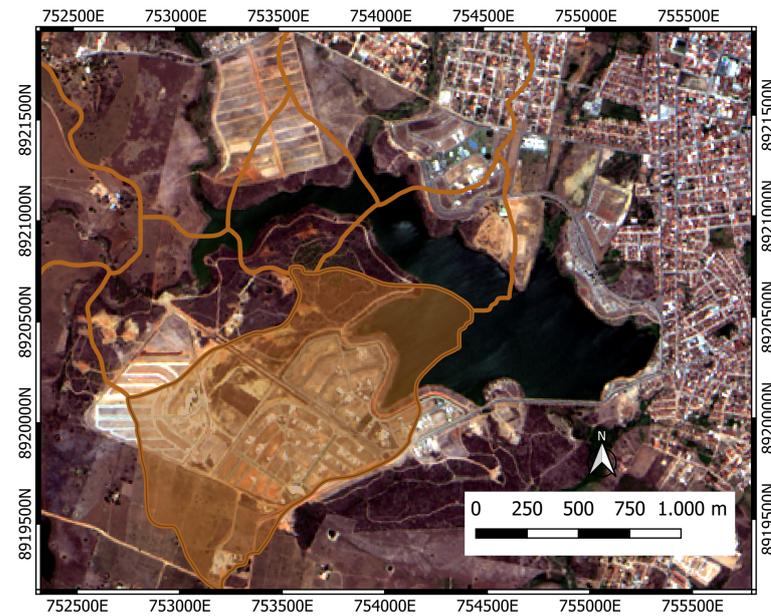
Os cenários escolhidos para obtenção das imagens da área de estudo são de 2013 e 2021, além de uma projeção futura para quando o empreendimento estiver finalizado, como podem ser vistas a seguir, juntamente com a delimitação das áreas da sub-bacia (feita a partir da base de dados da ANA) tendo como destaque a sub-bacia escolhida para estudo, nas Figuras 15 e 16. Os períodos escolhidos se dão pelo fato de que até meados de 2013 não havia qualquer indício de construção na área de estudo, já para o cenário 2021 se deve para efeito de dados comparativos com uma imagem mais atual. Todas as imagens foram georreferenciadas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 24S, datum SAD-69, pelo software QGis 3.16.

Figura 15 – Cenário de 2013, juntamente com as delimitações das sub-bacias do Rio Perucaba na Região



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

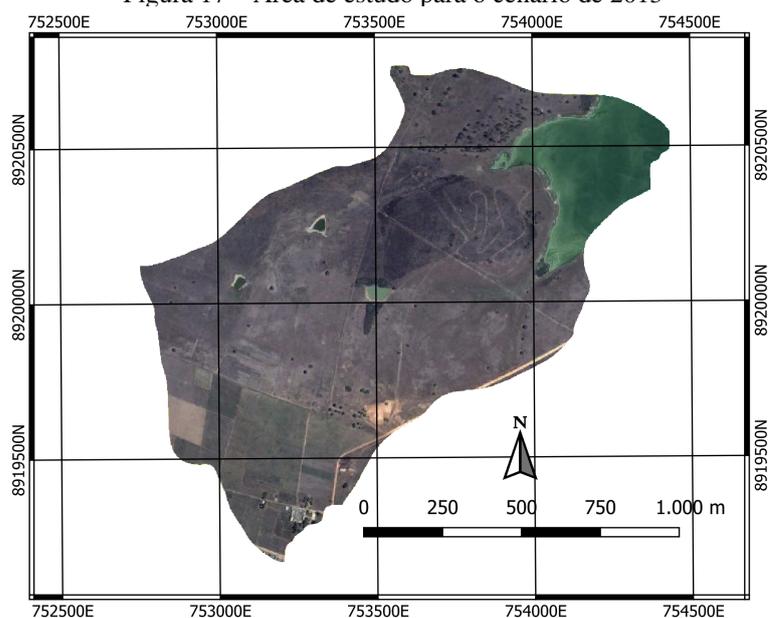
Figura 16 – Cenário de 2021, juntamente com as delimitações das sub-bacias do Rio Perucaba na Região



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

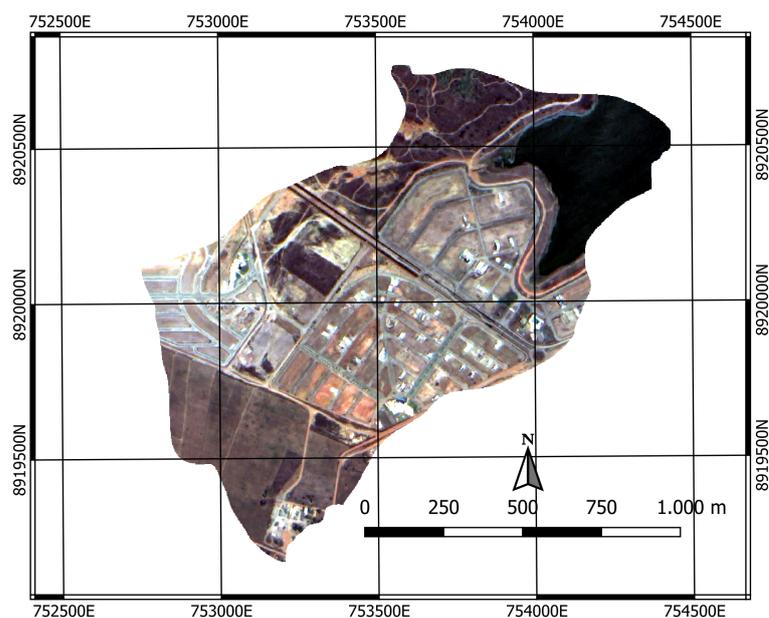
Com a região de interesse recortada de acordo com a delimitação de uma sub-bacia que sobrepõe a maior parte da área de estudo, temos a superfície para análise, a seguir, nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Área de estudo para o cenário de 2013



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

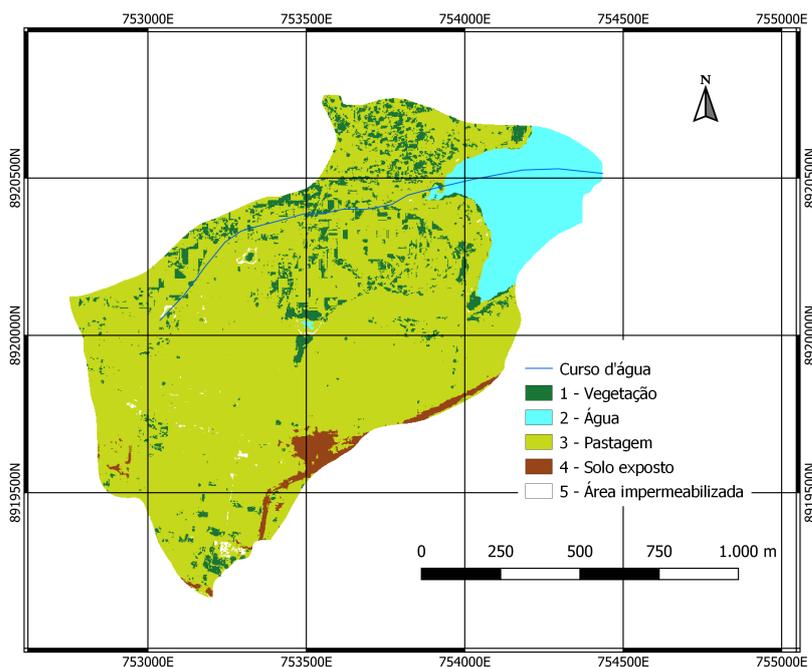
Figura 18 – Área de estudo para o cenário de 2021



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

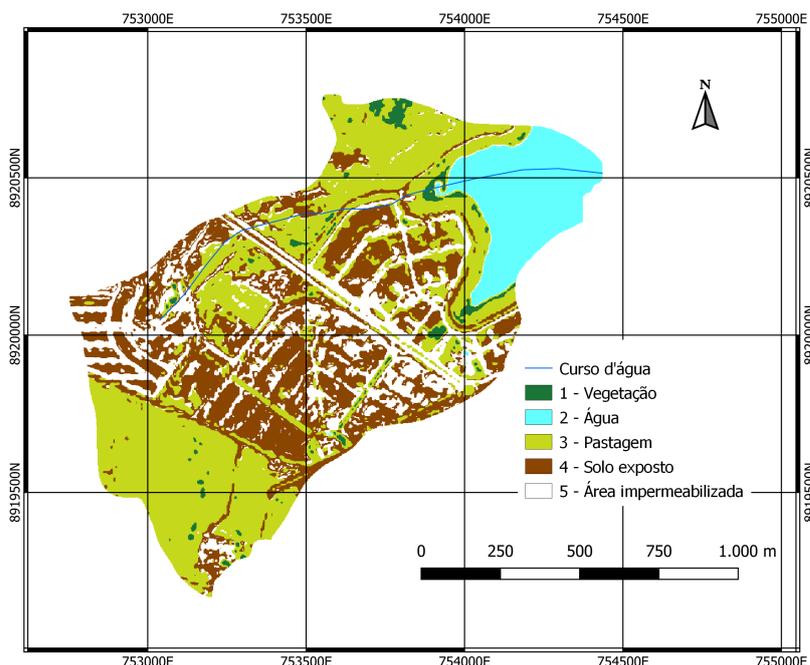
Utilizando o programa *QGis 3.16*, juntamente com os plugins *SCP* e *AcATaMa*, foi possível elaborar mapas temáticos para os três cenários em estudo, tendo como foco o uso e cobertura do solo ilustradas através de cinco classificações com uma margem de acerto de cerca de 75%, como podem ser vistas a seguir nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Classificação da cobertura do solo utilizando o SCP no cenário de 2013



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

Figura 20 – Classificação da cobertura do solo utilizando o SCP no cenário de 2021



Fonte: Elaborado pelo autor (adaptado de QGis)

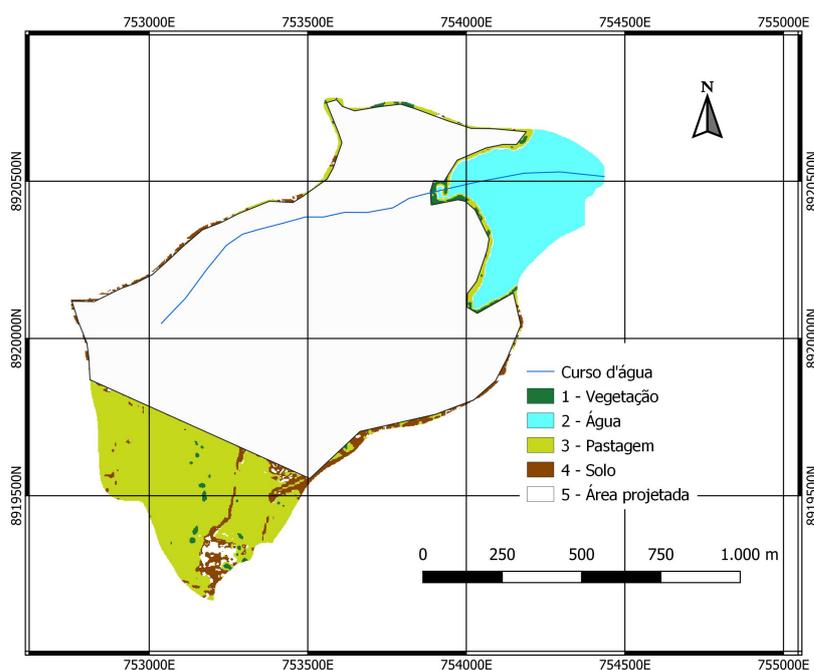
Através das imagens do cenário de 2013 e 2021, já foi possível perceber um aumento significativo de áreas impermeabilizadas e de solo exposto, como consequência do empreendimento que está sendo construído na região.

A determinação do cenário futuro (Figura 21), foi simulado, através de um polígono sobrepondo a área onde será todo o empreendimento, como se todo ele já estivesse totalmente

ocupado. acompanhando o que determina a Lei Municipal de Arapiraca Nº 2.895/2013 que dispõe sobre a aprovação de projetos de condomínios de lotes no perímetro urbano do Município de Arapiraca. A lei determina, em seu Artigo 4º e inciso VI, que a taxa de ocupação do lote é de no máximo 65% e os outros 35% são de áreas verdes, áreas comuns e arruamentos.

Dessa forma, considerando que os arruamentos neste trabalho estão juntos ao que foi considerado a área impermeabilizada e também levando em consideração que não foi possível o acesso ao projeto do empreendimento estudado, ocasionando uma certa dificuldade em mensurar as ocupações de forma mais assertiva, a área ocupada pelo empreendimento na sub-bacia (ilustrada em branco) foi dividida como sendo 80% de área impermeabilizada (sendo 65% da ocupação do lote mais 15% de arruamentos); 0% para pastagens; 7% para vegetação e 13% para solo exposto. O resultado englobando a classificação de uso e ocupação do solo em toda sub-bacia estudada está presente na Tabela 8.

Figura 21 – Classificação da cobertura do solo para uma projeção futura



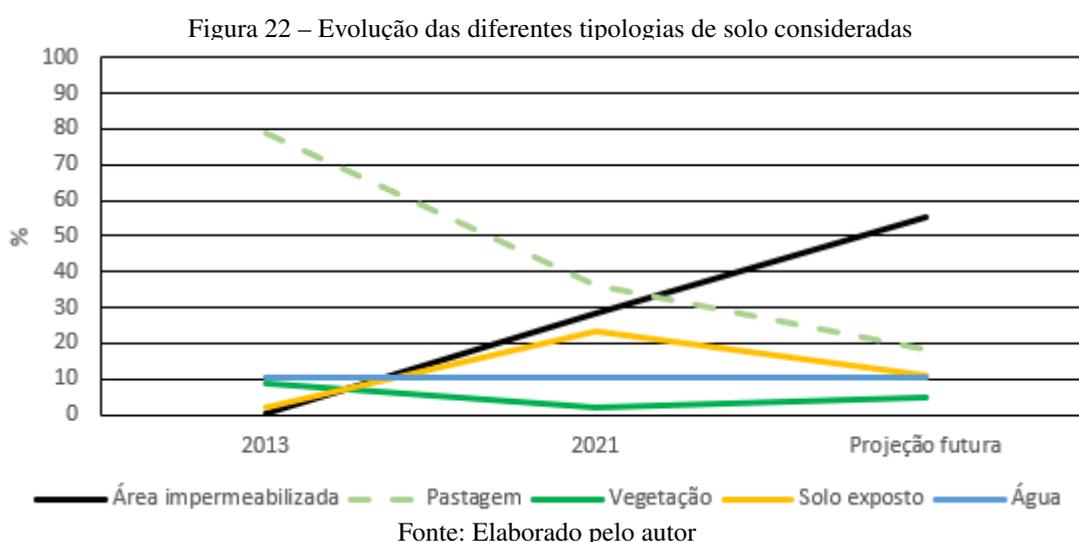
A Tabela 8 e a e a Figura 22 mostram os percentuais referentes a cada uma das cinco tipologias consideradas em seus respectivos cenários. O destaque se deu principalmente nas áreas impermeabilizadas, as quais aumentaram de praticamente 0%, no cenário de 2013, para 28,3% no cenário de 2021 e ainda possui uma projeção futura de crescimento até 55,4%. Em contrapartida, as áreas de pastagens apresentaram um decaimento expressivo, iniciando com 78,6% no primeiro cenário (2013), chegando a 36,4% em 2021, e com perspectiva de atingir a

18,2% em uma projeção futura.

Tabela 8 – Porcentagem do uso e ocupação do solo para cada um dos cenários na sub bacia estudada.

CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DO SOLO (%)					
	Área impermeabilizada	Pastagem	Vegetação	Solo exposto	Água
2013	0,4	78,6	8,6	2,2	10,3
2021	28,3	36,4	1,8	23,2	10,3
Projeção futura	55,4	18,2	5,0	11,1	10,3

Fonte: Elaborado pelo autor



Por outro lado, o solo exposto também apresentou um crescimento relevante, entre 2013 e 2021. Já em um cenário futuro há tendência de decaimento, visto que neste cenário é possível que as áreas impermeabilizadas ocupem estes espaços. Em relação à vegetação, houve um decaimento em relação ao período de 2013 e 2021, entretanto, devido a um cenário otimista, considerado no presente trabalho influenciado pela Lei Municipal N° 2.895/2013, é possível que haja um leve aumento da vegetação do período de 2021 a uma projeção futura.

Para determinação do parâmetro *CN*, se fez necessário a determinação do tipo de solo presente na região de estudo e, para isso, foi consultado o Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Arapiraca (PMSB, 2014), sendo possível verificar que o tipo predominante na bacia do Rio Perucaba é o solo do tipo *Latossolo Vermelho-Amarelo* e, de acordo com o Quadro 1, esse tipo de solo pertence ao do grupo B. Os valores de *CN* são provenientes da Tabela 4, e tem-se os seguintes resultados para o solo da área de estudo:

- Área impermeabilizada, *CN* = 85;

- Vegetação , $CN = 66$;
- Pastagem, $CN = 72$ para os cenários de 2021 e futuro, e 61 para o cenário de 2013;
- Solo exposto, $CN = 82$.

A seguir, na Tabela 9, temos a média ponderada do valor CN para cada um dos três cenários em estudo neste trabalho. Vale ressaltar que a curva número trabalha dentro de um intervalo entre 0 e 100, e quanto maior o valor mais impermeável é a superfície analisada.

Tabela 9 – CN médio dos cenários

Ano	2013	2021	Projeção futura
CN	62,09	78,57	80,94

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela tabela, é possível perceber o aumento dos valores de CN devido ao rápido processo de urbanização que ocorre na região, causados pelos empreendimentos que estão sendo implantados na área estudada. Dessa forma, de acordo com os valores da curva número apresentados, enquanto em 2013, segundo Tucci (2012), a superfície seria proporcional a um parque ou campo de golfe, em 2021 a superfície seria proporcional a uma pastagem ou terreno em más condições. Isso mostra que o grau de permeabilidade do solo foi afetado.

Com os valores CN definidos, foi possível calcular os valores referentes à capacidade de armazenamento da bacia, em mm, através da Equação 4. Os valores encontrados estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Capacidade de armazenamento da bacia (S), em mm

Ano	2013	2021	Projeção futura
S	155,07	69,30	59,82

Fonte: Elaborado pelo autor

Como consequência do aumento que ocorreu com os valores CN , a bacia teve um decréscimo considerável em sua capacidade de armazenamento no decorrer do período estudado, enquanto em 2013 o solo tinha uma capacidade de armazenamento de 155,07 mm (que também pode corresponder a litros para cada metro quadrado), em 2021 esse valor decaiu para 69,30 litros para cada metro quadrado. Ou seja, sua capacidade de infiltração diminuiu em mais da metade de 2013 em relação a 2021 e em quase 2/3 em relação à projeção futura.

4.3.2 Chuvas efetivas para os cenários estabelecidos

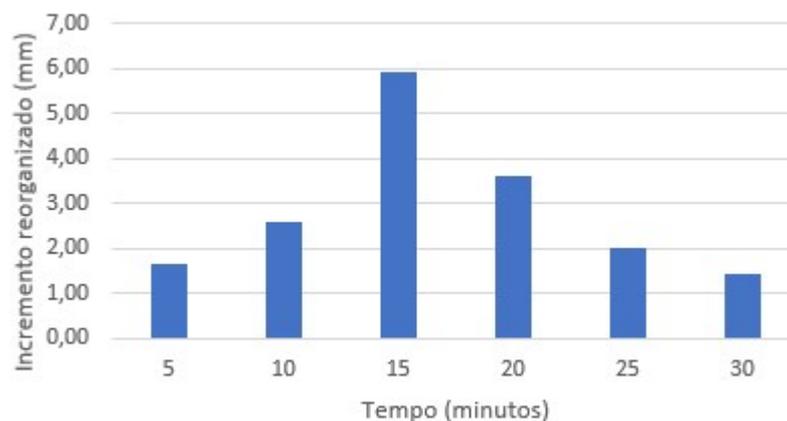
Estabelecido o CN para cada cenário, foi possível então calcular as chuvas efetivas para cada tempo de retorno e cenário proposto. Os resultados estão nas tabelas 11 a 16 e seus respectivos hietogramas ilustrados nas figuras 23 a 28.

Tabela 11 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 2 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	71,15	5,93	5,93	1,66
10	57,35	9,56	3,63	2,60
15	48,63	12,16	2,60	5,93
20	42,55	14,18	2,03	3,63
25	38,03	15,85	1,66	2,03
30	34,52	17,26	1,41	1,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=2



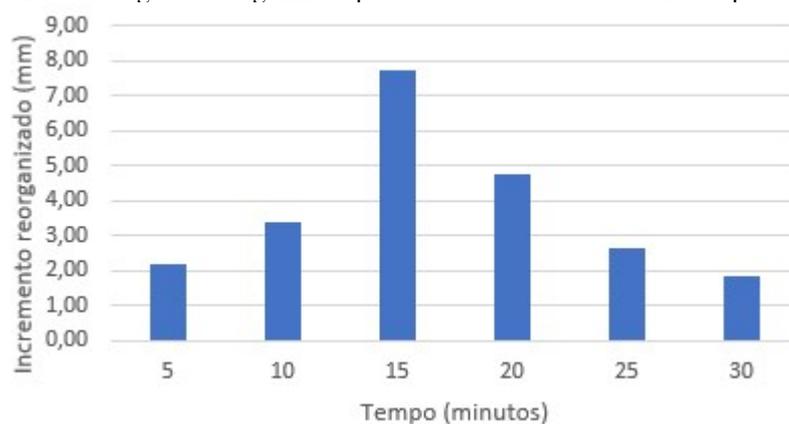
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 5 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	92,80	7,73	7,73	2,17
10	74,81	12,47	4,73	3,39
15	63,43	15,86	3,39	7,73
20	55,50	18,50	2,64	4,73
25	49,60	20,67	2,17	2,64
30	45,02	22,51	1,84	1,84

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=5



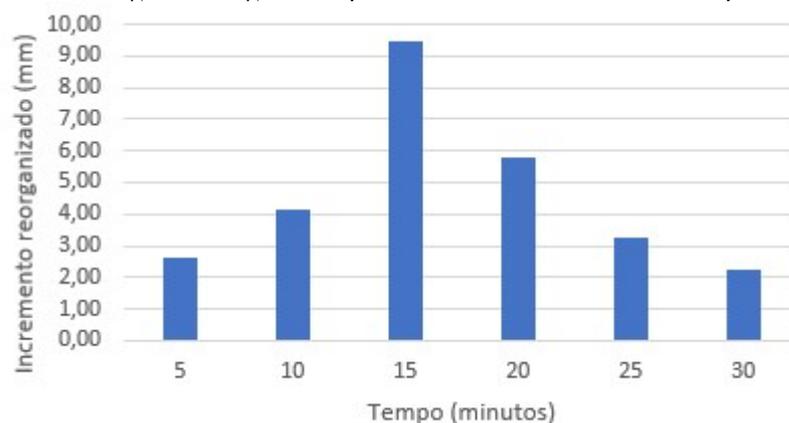
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 10 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	113,47	9,46	9,46	2,65
10	91,46	15,24	5,79	4,15
15	77,55	19,39	4,15	9,46
20	67,85	22,62	3,23	5,79
25	60,65	25,27	2,65	3,23
30	55,05	27,52	2,25	2,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=10



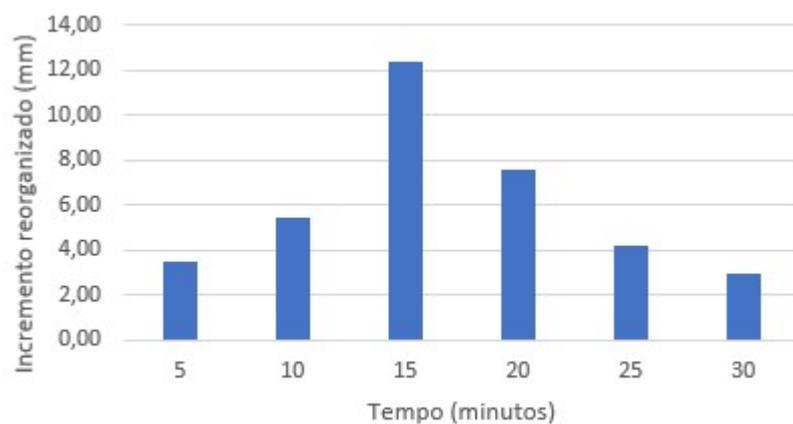
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 25 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	148,00	12,33	12,33	3,46
10	119,30	19,88	7,55	5,41
15	101,16	25,29	5,41	12,33
20	88,51	29,50	4,21	7,55
25	79,11	32,96	3,46	4,21
30	71,80	35,90	2,94	2,94

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=25



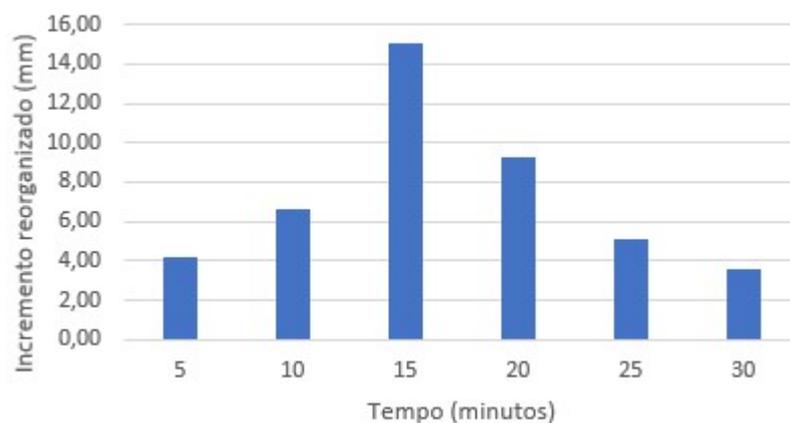
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 50 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	180,95	15,08	15,08	4,23
10	145,86	24,31	9,23	6,61
15	123,68	30,92	6,61	15,08
20	108,21	36,07	5,15	9,23
25	96,72	40,30	4,23	5,15
30	87,79	43,89	3,60	3,60

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=50



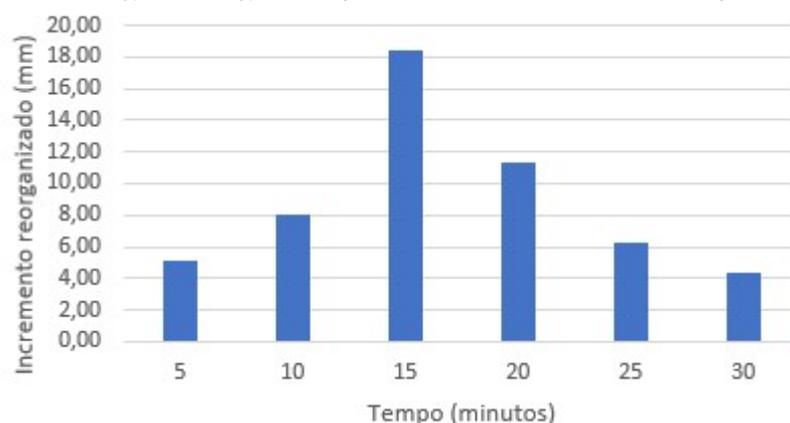
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Chuva de projeto com intensidade variável a partir da curva IDF (Tempo de retorno = 100 anos)

Duração (minutos)	Intensidade (mm/h)	Altura total (mm)	Incremento (mm)	Incremento reorganizado (mm)
5	221,24	18,44	18,44	5,17
10	178,33	29,72	11,29	8,08
15	151,22	37,80	8,08	18,44
20	132,31	44,10	6,30	11,29
25	118,25	49,27	5,17	6,30
30	107,33	53,67	4,40	4,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Hietograma reorganizado pelo método dos blocos alternados para TR=100



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 HIDROGRAMA DE PROJETO E VAZÕES MÁXIMAS DA SUB-BACIA

Uma vez obtidos os valores de chuvas efetivas, pelo método SCS, e do hidrograma unitário, o próximo passo para dar procedimento ao estudo foi realizar as convoluções dos

hidrogramas para os cenários e tempos de retorno analisados. O destaque se deu quanto ao grande aumento na vazão de escoamento desde o primeiro período analisado até o final, uma vez que, em 2013, a vazão de escoamento só começa a surgir a partir de tempos de retorno maiores (25 anos), antes disso, o solo se encontrava perfeitamente permeável para o nível de precipitação da região, entretanto, após o processo de urbanização da região, já de imediato nota-se o escoamento excedente na superfície. Os gráficos ilustrando esses resultados podem ser vistos, a seguir, nas Figuras 29 a 34.

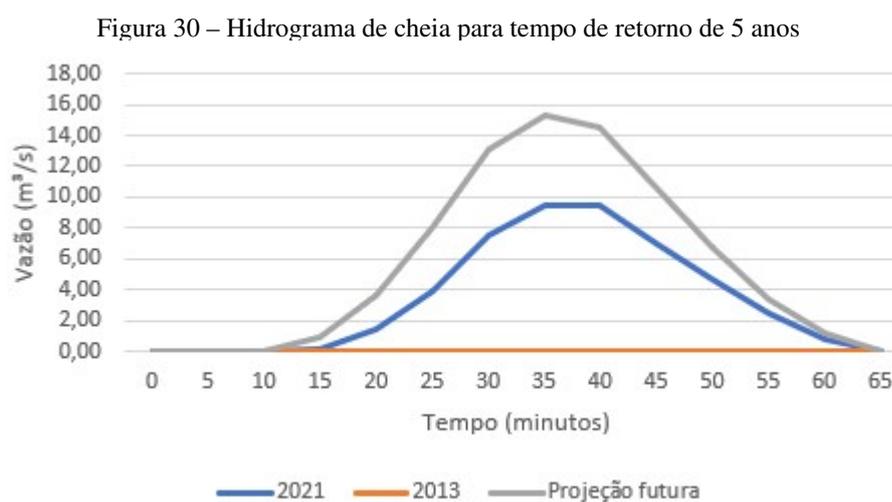
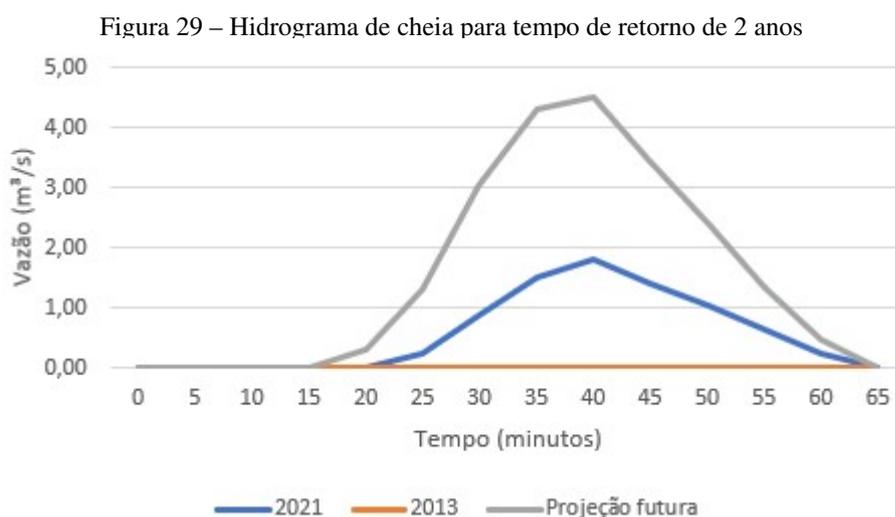
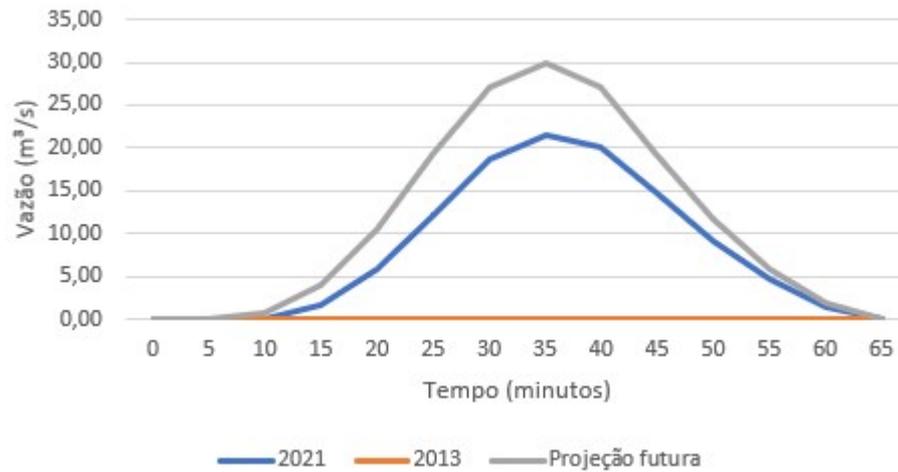
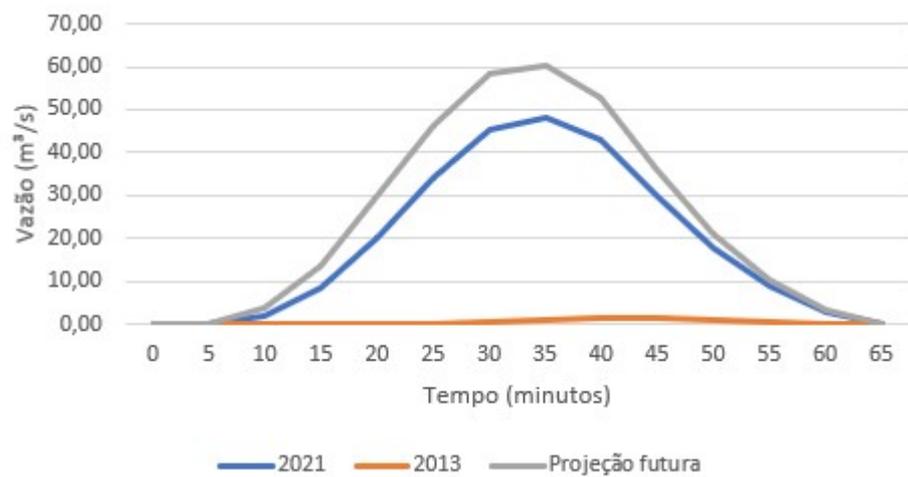


Figura 31 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 10 anos



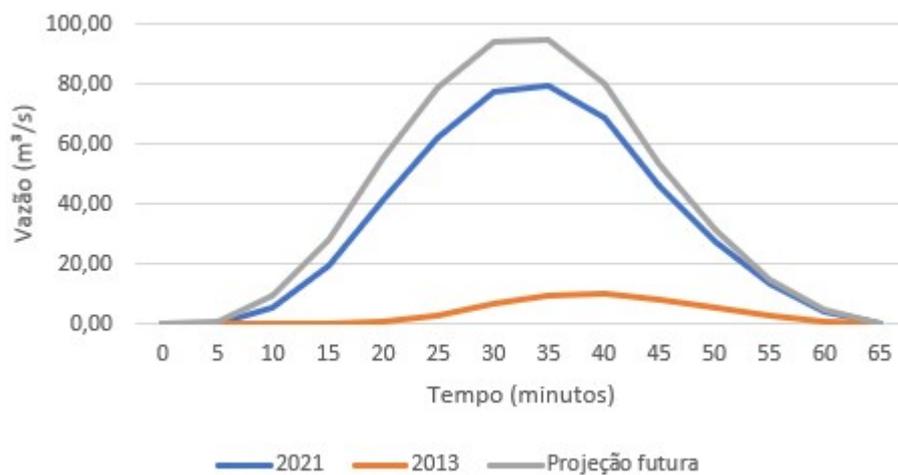
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 25 anos



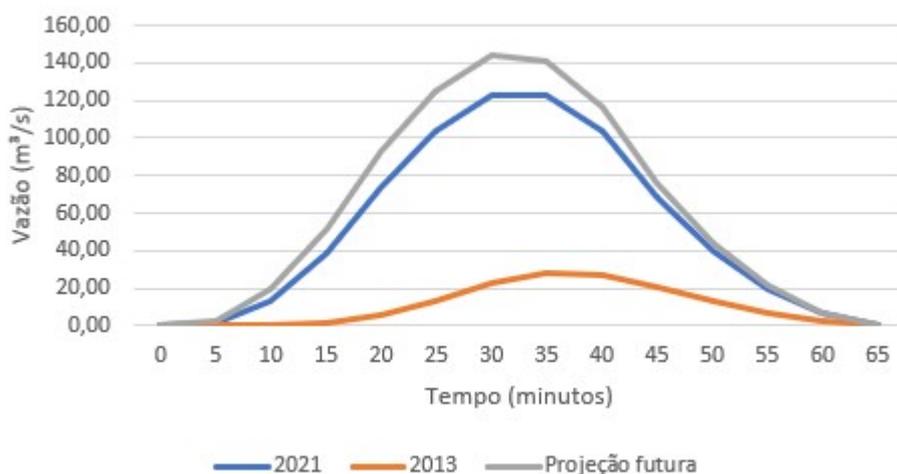
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Hidrograma de cheia para tempo de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo autor

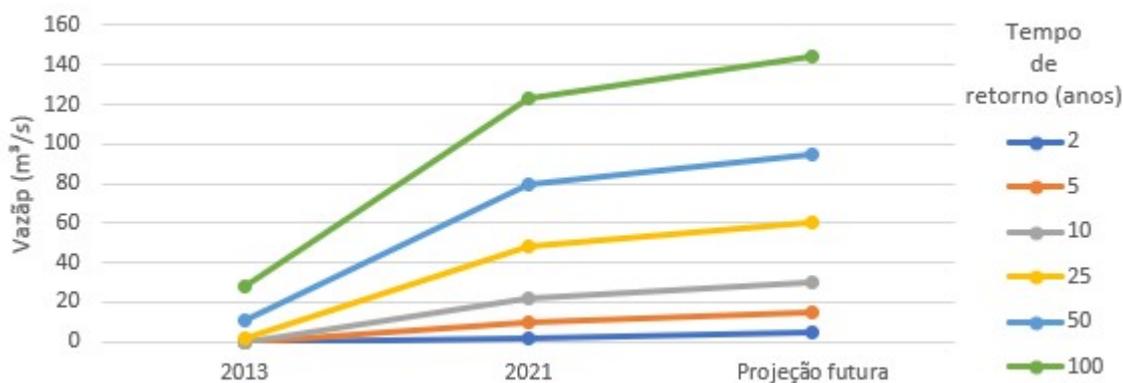
A seguir, na Tabela 17 e Figura 35, temos a vazão de pico de cada cenário e tempo de retorno estudado, com destaque para as vazões nulas nos três primeiros tempos de retorno de 2013, demonstrando que nesse período não havia escoamento superficial excedente. Destaque também para o aumento da vazão já do primeiro para o segundo cenário, além do aumento significativo que ainda poderá acontecer, demonstrado pela projeção futura, quando a área estudada estiver completamente urbanizada.

Tabela 17 – Vazões de pico, em m^3/s , para cada cenário e tempo de retorno

Cenário	Tr (anos)					
	2	5	10	25	50	100
2013	0	0	0	1,77	10,45	28,30
2021	1,81	9,50	21,53	48,19	79,27	122,97
Projeção futura	4,51	15,29	29,80	60,30	94,43	144,01

Fonte: Elaborado pelo autor

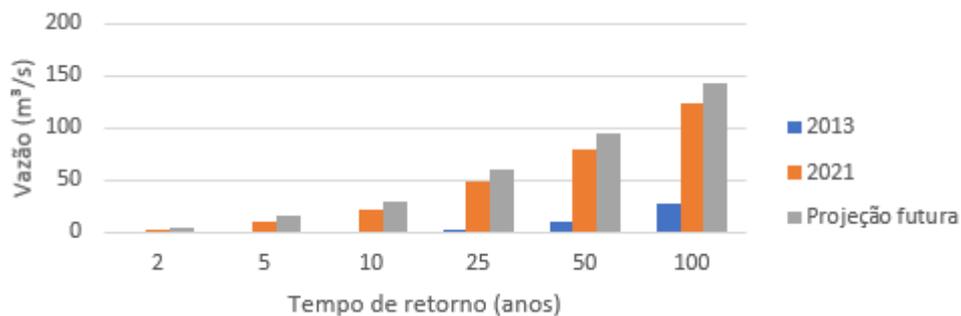
Figura 35 – Comparação das vazões de pico de cada tempo de retorno nos cenários estudados



Fonte: Elaborado pelo autor

Já na Figura 36, temos um gráfico ilustrando a diferença da vazão de pico dos tempos de retorno em função dos períodos estudados.

Figura 36 – Diferença das vazões de pico de cada tempo de retorno em função dos períodos estudados



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, como apresentado na Tabela 2, o qual mostra que para projetos de macrodrenagem de áreas comerciais e urbanas usa-se tempos de retorno de 50 a 100 anos, o projeto de drenagem da localidade de estudo deve ser feito para abranger uma vazão de pico entorno de 120 a 151 m³/s. Vale destacar o expressivo aumento que ocorreu com esses dois TRs do período de 2013 à projeção futura, em pouco mais de 9 vezes com o de 50 anos, e em pouco mais de 5 vezes com o de 100 anos.

Como pôde-se observar, os resultados mostram como o processo de urbanização de uma região pode alterar o processo natural de escoamento superficial, demonstrando ser um fator agravante para intensificar a vazão de pico de uma bacia. Obtidas as vazões se comprovou que com a impermeabilização do solo provocada pela urbanização, há um aumento de vazão da bacia, levando a causar escoamento superficial excedente no solo.

5 CONCLUSÃO

Mesmo com todas as dificuldades de obtenção de dados, principalmente pelo não acesso ao projeto do empreendimento, os resultados quanto ao uso e ocupação do solo, no que se refere aos objetivos inicialmente propostos, se mostraram bastante consistentes. O estudo mostrou que o processo de urbanização na região analisada causou um aumento significativo na vazão de escoamento da bacia, o que serve de alerta, tanto para a prefeitura quanto para os investidores desse empreendimento, para que haja sistemas de drenagem preventivos que evitem problemas causados por precipitações intensas.

Os cenários foram estrategicamente escolhidos para facilitar o entendimento do processo de urbanização que há na região, mostrando que esse desenvolvimento está se dando de forma bastante rápida, o que pede bastante cautela aos órgãos competentes.

Como a tendência é surgir cada vez mais empreendimentos como esse no entorno dessa bacia, cabe à secretaria de obras do município de Arapiraca se atentar no tocante ao controle de permissões de construções de novos empreendimentos, exigindo projetos de infraestrutura, entre esses o de drenagem, para evitar transtornos e prejuízos causados por possíveis inundações à população.

Destaca-se também a grande importância e contribuição dos sistemas de sensoriamento remoto para a determinação de todos os parâmetros que levaram a realização do presente estudo, uma vez que, as imagens de satélite, o modelo digital do terreno e o uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) que se refletem através do software QGIS usado no trabalho, permitiram e viabilizaram a análise de cada dado colhido para que as informações fossem aqui expostas.

O presente trabalho mostrou que os impactos causados pelo processo de urbanização provocado por um empreendimento de condomínios modificaram o uso e a ocupação do solo, de modo que, as áreas impermeabilizadas aumentaram de forma expressiva, e por consequência, causaram um aumento significativo no processo natural de escoamento superficial que intensificaram a vazão de pico da bacia.

Por fim, este trabalho se mostra importante para àqueles que desejam analisar as alterações que as ocupações urbanas podem causar numa bacia e, dessa forma, os resultados aqui mostrados podem servir como impulso para o estudo de medidas preventivas de drenagem urbana de forma mais detalhada que sirvam para manter a harmonia entre o desenvolvimento urbano e ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. A. de. **Impactos decorrentes das mudanças ocasionadas pelo uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica urbana da UFJF - Campus JF sobre o escoamento superficial.** Juiz de Fora, MG: UFJF, 2016.
- BACK Álvaro J. *et al.* Extreme rainfall and idf equations for alagoas state. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, IPABH, v. 15, n. 6, 2020.
- BATISTA, K. J. M. **Impacto da alteração do uso do solo no escoamento superficial a partir de técnicas de sensoriamento remoto: aplicação na bacia do riacho Piauí, Arapiraca - AL.** Delmiro Gouveia, AL: UFAL, 2017.
- BECHTEL, R. **Handbook of environmental psychology.** Arza. Nova York: John Wiley Sons, 2006.
- BEMFICA, D. D. C. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre.** Porto Alegre: UFRS, 1999.
- BRASIL. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007: estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.** [S.l.: s.n.], 2007.
- BRITO, F. A. de; PINHO, B. A. T. D. de. **A Dinâmica do Processo de Urbanização no Brasil.** Belo Horizonte: UFMG/CEDEPLAR, 2012.
- CAMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos.** São José dos Campos: Tese de Doutorado em Computação Aplicada, 1995.
- CARDOSO, L. P. L. **Avaliação quantitativa do sistema misto de saneamento de Delmiro Gouveia - AL: estudo de caso riacho caraibeirinhas.** Maceio: UFAL, 2014.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais.** 12. ed. Porto Alegre, RS: Associação brasileira de recursos hídricos (ABRH), 2013. ISBN 978-85-8868-634-2.
- DAEE-CETESB. **Drenagem urbana - Manual de Projeto.** São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1980.
- DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.** São Paulo: Dissertação de mestrado, EESC/USP, 2012.
- EISENBEISS, H. **VANT Photogrammetry.** Zurich, University of Technology Dresden. Zurich: Doctor of Sciences: 237, 2009.
- FERREIRA, D. M. **Mudanças De Uso E Cobertura Da Terra Na Bacia Do Rio Lajeado, Estado Do Maranhão.** Maranhão: UEMA, 2020.

HYDROS. **Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí**. Maceio: SERHI/AL, 1998.

IBGE. **Ministério do planejamento, orçamento e gestão. Pesquisa nacional de saneamento básico**. Brasília: Governo Federal, 2000.

INPE. **CBERS 04A**. Brasília: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2019.

JACINTHO, L. R. de C. **Geoprocessamento e sensoriamento remoto como Ferramentas na gestão ambiental de unidades de Conservação : o caso da área de proteção Ambiental (apa) do capivari-monos**. USP - São Paulo: Dissertação de Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, 2003.

JACOMINE, P. K. T. *et al.* **Levantamento exploratorio-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Recife: EMPBRAPA-CPP, 1975.

LILLESAND, T. M.; KIEFFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley Sons. EUA: New York, 1994.

LIMA, I. F. **Geografia de Alagoas**. São Paulo: Editora do Brasil S/A Coleção didática do Brasil, 1965.

LOMBARDI NETO *et al.* **Nova abordagem para calculo de espaçamento entre terracos**. Campinas, SP: Simpósio sobre terraceamento agrícola, 1986.

LONGHITANO, A. G. **Vants Para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade Na Avaliação E Monitoramento De Impactos Ambientais Causados Por Acidentes Com Cargas Perigosas**. São Paulo: Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese de Mestrado, 2010.

MARICATO, E. **Alternativas para a crise urbana**. Petropolis: Editora vozes, 2001.

MARICATO, E. Estudos avançados. **Metrópole, legislação e desigualdade**, IEA/USP, v. 17, n. 48, p. 151–167, 2003.

MARTINS, C. M. T. *et al.* **Hidrologia urbana - Conceitos básicos**. Lisboa, Portugal: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos - Universidade de Coimbra, 2010. ISBN 978-989-8360-03-8.

MASCARENHAS, L. P. G. *et al.* **Relação entre diferentes indices de atividade física e preditores de adiposidade em adolescentes de ambos os sexos**. [S.l.]: Revista Brasileira de Medicina do Esporte, v. 11, n. 4, 2005.

MORAES, O. B. D. **Método de análises de dados para avaliação de áreas urbanas recuperadas - Uma abordagem utilizando a lógica Fuzzy**. Tese de doutorado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

NIMER, E. Climatologia da região nordeste. **Climatologia do Brasil**, IBGE, n. 11, p. 315–361, 1979.

OLOFSSON, P. *et al.* Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, n. 1, p. 42–57, 2014.

PINTO, J. E. S.; VASCONCELOS, C. A. **Caracterização têmporo-espacial da pluviosidade: o município de Sairé e sua microrregião - brejo pernambucano**. Aracaju, SE: Anais do VI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica (cd-rom), 2004.

PMSB. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Arapiraca - AL**. [S.l.]: Prefeitura de Arapiraca AL, 2014.

PORTO, R. L. L. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre, RS: ABRH/Editora da Universidade, 1995.

PRESTES, V. B. **Temas de direito urbanístico-ambiental**. Belo Horizonte: Fórum, 2006.

RESCK, D. V. S. **Manejo e Conservação do Solo em Microbacias Hidrográficas**, Embrapa – CPAC, n. 40, p. 17, 1992.

SALAT, S. **The sustainable design handbook – China**. France: CSTB, 2006.

SANTOS, F. T. dos; OLIVEIRA, L. A. de. **A CRISE DA CULTURA DO FUMO E AS ALTERNATIVAS SÓCIOECONÔMICAS COM A INTRODUÇÃO DE NOVAS CULTURAS NO MUNICÍPIO DE ARAPIRACA-AL**. Vitória - ES: VII Congresso Brasileiro de Geógrafos, 2014.

SARTORI, A. Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos estados unidos. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 189f, 2014.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501–505, 1932.

SILVA, E. J. *et al.* Sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, RJ, n. 33, p. 121–130, 2017.

SILVA, R. C. da; MACEDO, C. de S. **A Urbanização brasileira**. Natal e João Pessoa: UFRN e UEPB, 2009.

SILVA, R. F. da; SANTOS, V. A.; GALDINO, S. M. G. **Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG**, Caderno de Geografia, v. 26, n. 47, p. 2318–2962, 2016.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RBRH, v. 10, n. 1, p. 5–23, 2005.

STEINMETZ, A. A. **Estimativa de cheias aplicando a técnica de hidrograma unitário com diferentes abordagens de discretização espacial em uma sub-bacia do Arroio Pelotas**.

Pelotas, RS: UFPel, 2017.

SULE, B.; ALABI, S. A. Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 11, p. 639–647, 2013.

TOMAZ, P. **Método do SCS**. Guarulhos - SP: [s.n.], 2013.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RBRH, v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Porto Alegre: Estudos avançados, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana**. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbanização. **Coleção ABRH de Recursos Hídricos**, Editora da Universidade, v. 5, 1995.

TUCCI, C. E. M.; SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S. **Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade**. [S.l.]: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

USDA. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington, NRCS: Technical Release 55, 1986.

VEIGA, J. E. da. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond, 2005.

VILLAÇA, F. Dilemas do plano diretor. **O município no século XXI: cenários e perspectivas**, São Paulo: Fundação Prefeito Faria Lima - Cepam, n. 40, p. 237–247, 1999.