

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS INFRAVERMELHAS DO SATÉLITE SENTINEL PARA O CÁLCULO DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA URBANA, PELO MÉTODO RACIONAL: CASO DO CÓRREGO SÃO SILVESTRE, ANÁPOLIS - GO

Bruno Vinicius de Souza

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (bruno.vini27@gmail.com)

Carolina Pereira Dias

Bacharelada do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (carolinap.dias@hotmail.com)

João Vinicius Macedo Pereira

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (winicius.macedo18@gmail.com)

Taylor Felipe Barbosa

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (taylorfelipebarbosa@gmail.com)

Eduardo Dourado Argôlo

Professor Doutor do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (eduardo@spatial.ag)

RESUMO

Este estudo tem como objetivo investigar a detecção e classificação do solo utilizando imagens de satélite e técnicas de deep learning para processá-las. Este método tem se mostrado promissor na identificação automatizada de áreas de risco de alagamento, auxiliando no planejamento de infraestruturas de drenagem urbana. Para validar os dados processados a partir de imagens infravermelhas obtidas do satélite Sentinel, a bacia do córrego São Silvestre, em Anápolis, foi escolhida como área de estudo, abrangendo um período de quatro anos: 2010, 2015, 2020 e 2022. Em 2022, um evento de tempestade causou significativa erosão e danificou uma adutora de água sob a Avenida Independência. Para analisar o escoamento superficial decorrente da ocupação desordenada na área do córrego São Silvestre, foi utilizado o método de cálculo racional. Informações sobre a área e a classificação do solo foram obtidas por meio de imagens de satélite e ferramentas do software ArqGIS™, identificando áreas permeáveis e impermeáveis e suas modificações devido à urbanização ao longo dos anos. Os coeficientes de escoamento foram calculados com base em tabelas de artigos com áreas de estudo semelhantes, mostrando um aumento proporcional à redução das áreas de infiltração. Dados pluviométricos foram fornecidos pela Estação Meteorológica de Anápolis, e a construção dos mapas e a avaliação do processo de urbanização foram realizadas utilizando o software ArcMAP™. Os resultados indicam um aumento na urbanização da área de estudo, resultando em maior escoamento superficial e coeficiente de escoamento (C). A detecção e classificação do solo demonstraram eficiência ao identificar padrões nos pixels das imagens, revelando grandes alterações que podem sinalizar desastres naturais, como alagamentos e erosões. Este método mostrou-se útil para o planejamento seguro do uso e ocupação do solo, bem como para o gerenciamento eficaz de riscos em infraestruturas de drenagem urbana.

PALAVRAS-CHAVE: *deep learning*; satélite; cálculo racional; bacia hidrográfica.

1 INTRODUÇÃO

A drenagem urbana é um desafio para muitas cidades do Brasil. A urbanização e o crescimento populacional tendem a aumentar a superfície impermeável, como estradas e edifícios, reduzindo áreas de solo que possuem maior capacidade de absorver a água das chuvas. Como consequência, essas regiões ficam mais suscetíveis a inundações, danos à infraestrutura e riscos para a saúde pública. Para enfrentar esse desafio, há uma necessidade de desenvolvimento e aplicação de um sistema de planejamento eficaz e uma gestão adequada da drenagem urbana (Smith, 1950). As imagens de satélite e o *deep learning* têm se mostrado uma ferramenta promissora para a detecção de pontos de alagamento. Através de um sistema de processamento de imagens, é possível um planejamento e gerenciamento mais eficaz em relação a inundações e desastres naturais (Couto; Garcia; Silva, 2018).

Desastres naturais, como inundações e alagamentos, representam um sério risco para comunidades em todo o mundo. Esses eventos podem ser desencadeados por fortes chuvas, derretimento de neve, marés altas ou falhas em infraestruturas de drenagem. As inundações podem resultar em riscos à vida, danos materiais significativos e interrupções nas atividades diárias. Segundo o Relatório de Avaliação Global de Riscos de Desastres, publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), esses eventos têm se tornado mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas. É essencial investir em medidas de preparação, como sistemas de alerta precoce, planejamento urbano resiliente e gerenciamento adequado de bacias hidrográficas, a fim de minimizar os impactos desses desastres e proteger vidas e propriedades (PNUMA, 2021).

O município de Anápolis vem sofrendo bastante nos períodos de chuvas intensas, com frequentes alagamentos e algumas erosões. As áreas mais urbanizadas são as que mais estão suscetíveis a estes desastres naturais, pois é onde se concentra mais solo impermeável, como pavimentações e edificações com pouca ou nenhuma área permeável. Este trabalho teve como área de estudo o córrego São Silvestre, localizado no Município de Anápolis, em Goiás, local que teve uma grande erosão em fevereiro de 2022, mostrado na Figura 1. Para determinar o escoamento superficial, foi escolhido o método do cálculo racional, desenvolvido pelo engenheiro irlandês Thomas Mulvaney.

Figura 1 – Adutora de água tratada na Avenida Independência destruída pela chuva em 12 de fevereiro de 2022



Fonte: <https://portal6.com.br>

As obras de engenharia desempenham um papel fundamental na previsão e mitigação de inundações e alagamentos. Por meio de projetos de infraestrutura adequados, é possível reduzir os impactos desses eventos e proteger comunidades vulneráveis. A falta de investimento em projetos torna necessária a implantação de novas técnicas, pois no Brasil muitas cidades sofrem com inundações e as imagens de satélite são uma fonte valiosa de informações para a análise e gestão da drenagem urbana. Elas permitem obter informações sobre a cobertura do solo, a topografia, a vegetação e outros fatores que afetam o fluxo de água em áreas urbanas (Santos, 2021). As imagens de satélite também podem ser usadas para monitorar mudanças na superfície terrestre ao longo do tempo, o que é importante para o planejamento de infraestrutura de drenagem urbana. A utilização destas imagens e o *deep learning* são iniciativas modernas, para que sejam evitados grandes desastres e suporte às equipes de socorro em atender as demandas de lugares em situação de vulnerabilidade. Possibilitando a emissão de alertas precoces, o planejamento eficaz de evacuações e a alocação de recursos adequados.

O *deep learning* é uma técnica de aprendizado de máquina que tem sido amplamente utilizada em muitas áreas, incluindo o processamento de imagens. Ele se baseia em redes neurais profundas, que são capazes de aprender a partir de exemplos e identificar padrões complexos em conjuntos de dados grandes e complexos. O uso de algoritmos tem mostrado uma precisão cada vez maior na detecção e classificação de objetos em imagens de satélite e pode ser aplicado para identificar áreas urbanas propensas a inundações. Com sistemas automatizados, que fazem o processamento de imagens aéreas em tempo real, além de evitar, será possível planejar de forma mais eficiente um sistema de gestão de riscos.

2 IMAGENS OBTIDAS PELO SENTINEL 1

As imagens infravermelhas provenientes do satélite Sentinel oferecem características espectrais fundamentais para a classificação do uso do solo. Além das bandas visíveis, o Sentinel captura informações nas bandas infravermelhas próximas (NIR) e infravermelhas de ondas curtas (SWIR). A sensibilidade a essas faixas espectrais permite uma discriminação mais precisa das características da superfície terrestre. Por exemplo, a vegetação exibe forte reflexão no NIR, enquanto a água e outros materiais podem apresentar padrões espectrais distintos. Essa riqueza espectral é crucial para a eficácia da classificação supervisionada, pois enriquece os dados de treinamento e melhora a capacidade do algoritmo de distinguir classes de uso do solo com maior precisão (Smith, 1950).

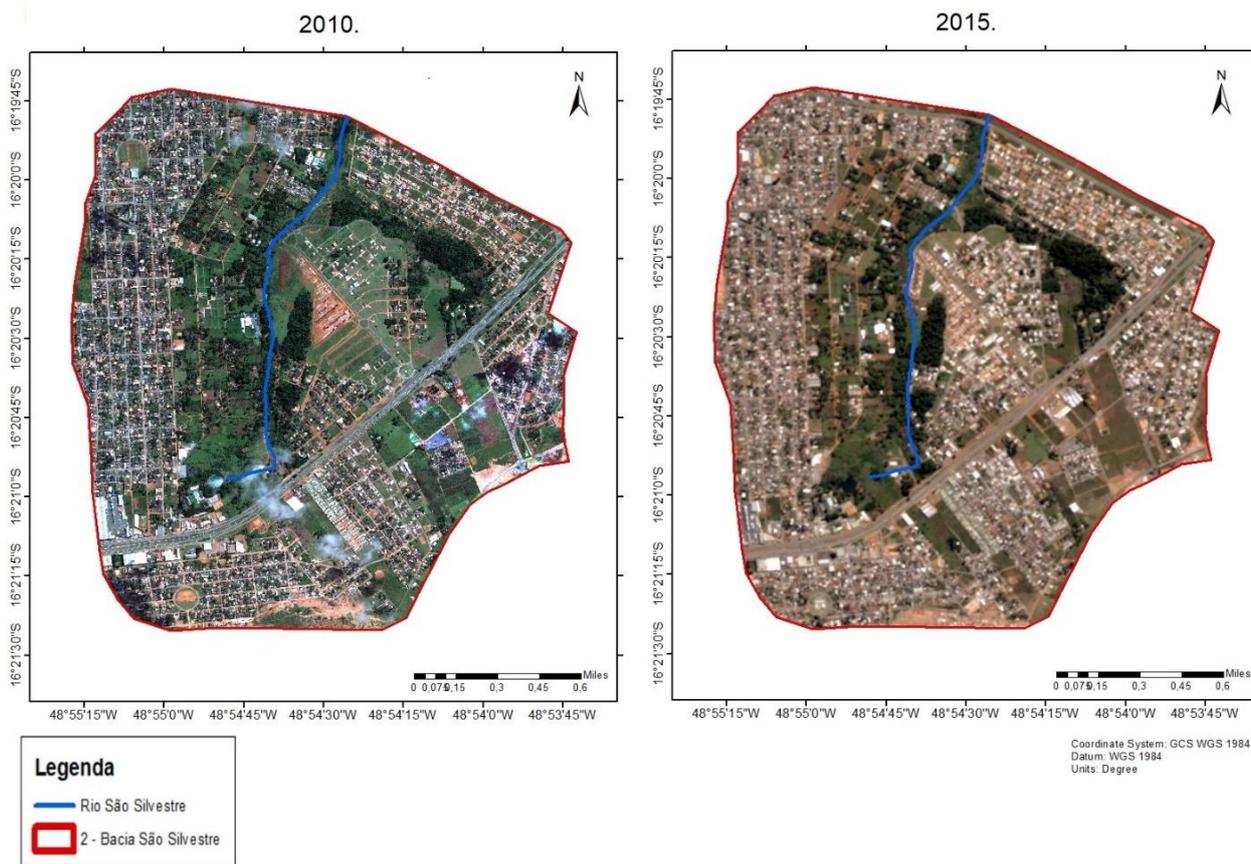
A metodologia de classificação supervisionada, aplicada às imagens infravermelhas do Sentinel, incorpora essas características espectrais para treinar algoritmos de aprendizado de máquina. Máquinas de suporte vetorial (SVM) e redes neurais, quando treinadas com conjuntos de dados previamente classificados, proporcionam uma classificação mais precisa e confiável em relação ao uso do solo. A combinação da sensibilidade espectral do Sentinel e da abordagem supervisionada apresenta resultados mais robustos, particularmente em ambientes de maior complexidade (Li *et al.*, 2020).

A utilização de diferentes comprimentos de onda proporciona vantagens específicas na obtenção de informações sobre o terreno. A Banda C, com seu comprimento de onda mais curto de aproximadamente 5,6 cm, é adequada para a detecção de detalhes finos e a identificação de alvos pequenos, como estruturas urbanas. Já a Banda L, com seu comprimento de onda mais longo de aproximadamente 23,6 cm, é menos sensível a interferências atmosféricas e oferece maior penetração em vegetação densa, permitindo a

identificação de características do solo e da vegetação com maior clareza (Argôlo; Giustina, 2021). A vegetação geralmente reflete bem na banda do infravermelho próximo, enquanto a água absorve radiação nessa faixa. Essas respostas espectrais auxiliam na identificação e classificação de diferentes tipos de cobertura terrestre. As curvas de reflectância espectral representam a quantidade de luz refletida ou absorvida por um objeto em relação ao comprimento de onda (Chen *et al.*, 2019).

Para a realização deste estudo, foram obtidas imagens da bacia do córrego São Silvestre, através do satélite Sentinel, sendo cada uma correspondente aos anos de estudo, 2010, 2015, 2020 e 2022, todas capturadas no mês de dezembro. No primeiro intervalo de cinco anos, mostrado na Figura 2, é possível visualizar uma expansão significativa da urbanização, principalmente nos locais de maior proximidade à margem do córrego São Silvestre.

Figura 2 –Bacia do Córrego São Silvestre, capturada por Sentinel em 2010 e 2015

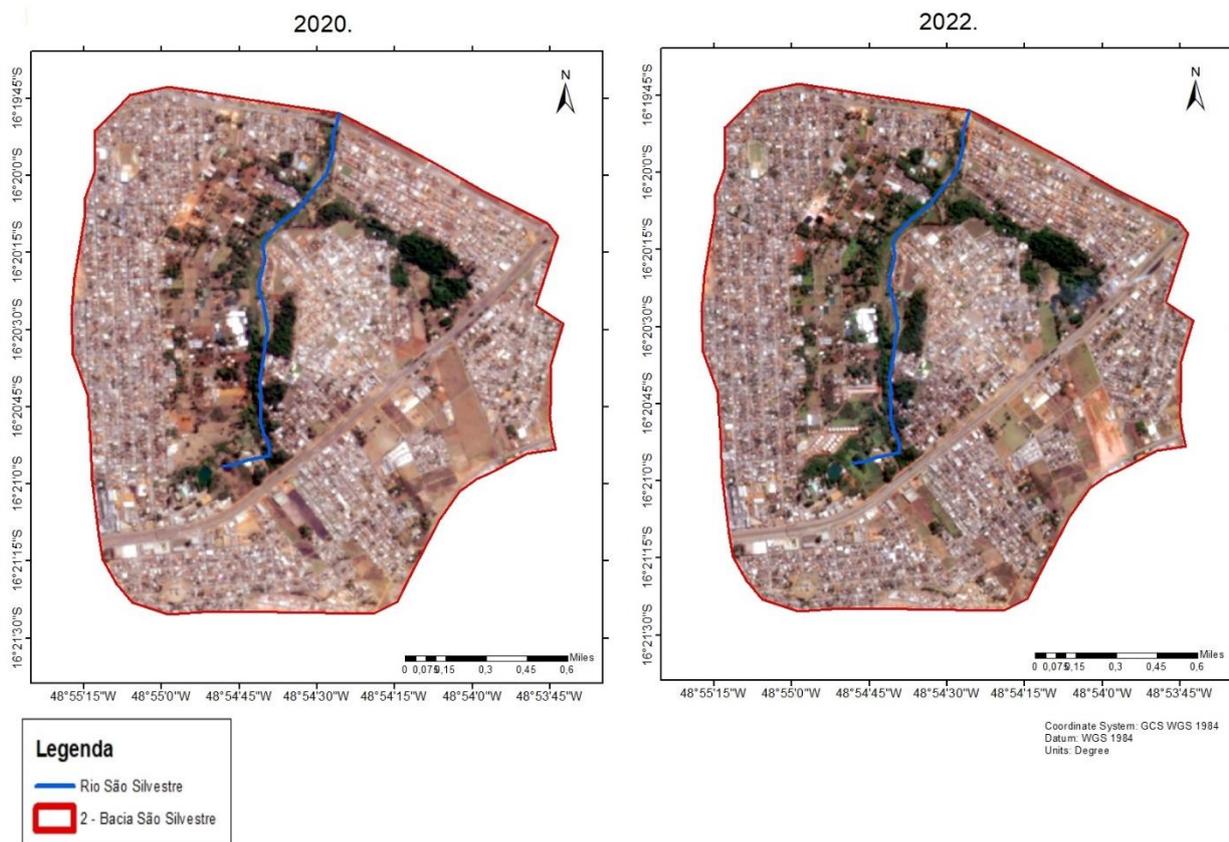


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Na Figura 3, através de uma análise visual, verificou-se que o processo de urbanização se manteve em um ritmo mais lento entre os anos de 2020 e 2022, tendo em vista que não houve mudanças drásticas nas áreas de edificações captadas pelo satélite. Possivelmente houve influência da pandemia do COVID-19 para que áreas verdes se reestabelecessem, levando em consideração o período de isolamento obrigatório.

O impacto econômico mundial causado pela pandemia, foi diretamente refletido na construção civil. Os preços de materiais tiveram um aumento exponencial e devido a isso muitas obras foram paralisadas ou adiadas, este cenário justifica a estabilidade na ocupação e uso do solo.

Figura 3 –Bacia do Córrego São Silvestre capturada por Sentinel em 2020 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

3 PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O sensoriamento remoto ocorre dentro do aspecto eletromagnético (Venturieri, 2007) e é dividido em segmentos distintos, os quais representam áreas com características específicas em relação aos processos físicos e fontes de energia presentes em cada segmento. Qualquer corpo acima de 0 Kelvin emite radiação eletromagnética, que se move em forma de ondas na velocidade da luz e sua frequência é proporcional a sua energia. Para a realização do pré-processamento das imagens, foi realizada a correção atmosférica, que é essencial no processamento de dados de sensoriamento remoto, já que cada elemento presente na imagem tem um comportamento espectral diferente. “O espaço espectral descreve a variação da reflectância de uma dada superfície em função do comprimento de onda, resultando na assinatura espectral” (Gleriani, 2004). Esta correção visa remover ou reduzir os efeitos da atmosfera na imagem, permitindo uma interpretação mais precisa dos objetos e características da superfície da Terra. A correção foi realizada utilizando o método empírico *Dark Object Subtraction* (DOS), uma técnica de correção atmosférica usada em imagens de satélite. Este método estima a interferência atmosférica diretamente dos números digitais (ND) na imagem, negligenciando a absorção atmosférica.

Assume-se que áreas escuras na imagem, como sombras causadas por topografia ou nuvens, deveriam ter um ND igual a zero. No entanto, devido à dispersão atmosférica, o ND nessas áreas é diferente de zero. Esse valor representa a quantidade de ND que deve ser subtraída de cada banda espectral da imagem. A seleção desse valor de ND é feita com base em um histograma da imagem, sem a necessidade de inserir parâmetros sobre as condições atmosféricas no momento da captura da imagem. O método DOS usa informações diretamente da imagem para estimar e corrigir os efeitos da atmosfera,

tornando-o uma abordagem empírica e prática para a correção atmosférica. Realizada esta correção atmosférica para minimizar as interferências atmosféricas, posteriormente foi feito o recorte nas imagens para abranger a área de estudo deste trabalho.

4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A classificação não supervisionada permitiu uma abordagem mais flexível, uma vez que não requer informações prévias sobre as classes do uso de solo. O uso do algoritmo *Iso-Cluster* (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), que é uma técnica de segmentação e classificação que utiliza princípios de análise espectral para agrupar pixels semelhantes em classes distintas, proporcionou uma segmentação eficaz, identificando padrões espectrais complexos nas imagens infravermelhas. O algoritmo baseia-se em métodos matemáticos, como análise de componentes principais e *k-means*, para identificar padrões espectrais nas imagens. O *K-Means* é um dos algoritmos de clusterização mais populares e amplamente utilizados em aprendizado de máquina e análise de dados, ele é projetado para agrupar um conjunto de dados em clusters, com base na variabilidade espectral de dados, formando centroides de dados de cada agrupamento, garantindo uma segmentação eficiente.

Neste trabalho foi utilizado o software ArqGIS™ para realizar o processamento das imagens, que através de técnicas de classificação de imagens de satélite, como o *Iso-Cluster*, que realizou a categorização dos pixels por semelhança e pré-classificou em diferentes grupos.

Para a determinação de qual tipo de solo cada cluster referenciava, foi necessária uma pós-supervisão manual, utilizando imagens RGB, pelos autores deste artigo, fazendo as correções de possíveis erros ou ambiguidades na classificação automatizada. Esta análise manual, juntamente com os dados obtidos em campo, permitiu definir os tipos de solo em vegetação alta, vegetação baixa, solo exposto e área impermeável, separada entre telhados/edificações e vias asfaltadas, além da validação da precisão do mapeamento.

Essa metodologia aliada ao uso eficiente do hub do satélite Sentinel, proporcionou uma compreensão detalhada das mudanças no uso do solo ao longo do tempo na bacia hidrográfica do Córrego São Silvestre, em Anápolis. Este processamento nas imagens oferece as informações a respeito do solo, tanto quanto a sua tipologia, como também a sua extensão em hectares.

5 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE NÍVEL

A obtenção de curvas de nível e a delimitação da bacia hidrográfica do Córrego São Silvestre, em Anápolis, Goiás, Brasil, são procedimentos cruciais para a análise topográfica e o entendimento do sistema hidrológico local. A metodologia empregada segue as etapas detalhadas abaixo:

- I - Aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE):
 - Download do MDE SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) referente à região de Anápolis, Goiás, por meio do Earth Explorer ou de repositórios geoespaciais confiáveis.
- II - Importação e Processamento no ArcPro:
 - Importação do MDE SRTM para o ArcPro.
 - Pré-processamento do MDE para eliminar falhas e resolver inconsistências, assegurando a qualidade dos dados.

III - Geração de Curvas de Nível:

- Utilização da ferramenta de geração de curvas de nível no ArcPro, especificamente na área abrangida pelo Córrego São Silvestre.
- Definição de um intervalo apropriado para a criação das curvas, considerando a escala necessária para a análise da bacia.

IV - Validação das Curvas de Nível:

- Verificação visual das curvas geradas em comparação com características topográficas conhecidas na região do Córrego São Silvestre.
- Ajustes manuais, se necessários, para garantir a precisão das curvas de nível.

V - Extração da Bacia do Córrego São Silvestre:

- Identificação do ponto de saída (exutório) da bacia do Córrego São Silvestre.
- Utilização da ferramenta de extração de bacia hidrográfica no ArcPro, onde as curvas de nível são fundamentais para delimitar a área de contribuição específica do córrego.

VI - Análise Hidrográfica e Caracterização da Bacia:

- Criação de perfis longitudinais e transversais da bacia do Córrego São Silvestre.
- Cálculo de parâmetros hidrológicos, incluindo área de drenagem e comprimento do curso d'água.

VII - Validação da Bacia do Córrego São Silvestre:

- Comparação com mapas hidrográficos existentes ou dados de campo para validar a precisão da delimitação da bacia.

6 MÉTODO RACIONAL

O método racional é utilizado para estabelecer uma relação entre chuva e escoamento superficial, calculando a vazão de pico de bacias hidrográficas. Este método foi desenvolvido em 1851, pelo engenheiro irlandês Thomas Mulvaney para contrapor os métodos empíricos utilizados na Europa e Estados Unidos, que eram em sua maioria obtidos por meio de observação para prever os picos de vazões.

A fórmula racional é amplamente utilizada nos cálculos hidrológicos e de drenagem urbana para estimar vazões de pico em áreas urbanas. Ele se baseia na premissa de que a taxa de escoamento superficial é proporcional à intensidade de chuva e à área impermeável da bacia hidrográfica. Esse método é útil para o dimensionamento de estruturas de drenagem, como galerias pluviais e bueiros, visando evitar inundações em áreas urbanas. É importante ressaltar que o método racional apresenta algumas simplificações e limitações, pois não considera características complexas da bacia hidrográfica, como atraso na resposta do escoamento ou o efeito de armazenamento. Por isso, é recomendado o uso de métodos mais avançados, como modelos hidrológicos, para análises mais precisas em projetos de drenagem urbana (Mccuen, 2005).

Um exemplo de utilização do método racional para cálculo de drenagem urbana é o dimensionamento de uma galeria pluvial em uma área urbana. Nesse caso, considera-se a área impermeável da bacia hidrográfica, que contribui para a galeria, a intensidade de chuva característica para a região e o coeficiente de escoamento superficial, que leva em conta as características do solo e da superfície da área urbana. Com base nessas informações, é possível estimar a vazão de pico que a galeria precisa suportar para evitar inundações. Esse cálculo é importante para dimensionar adequadamente as estruturas de drenagem e garantir a eficiência do sistema de drenagem urbana. A fórmula racional é a seguinte:

$$Q = C.I.A/360 \quad (I)$$

Sendo:

Q= Vazão de pico (m^3/s);

C= Coeficiente de escoamento superficial;

I= Intensidade média da chuva (mm/h);

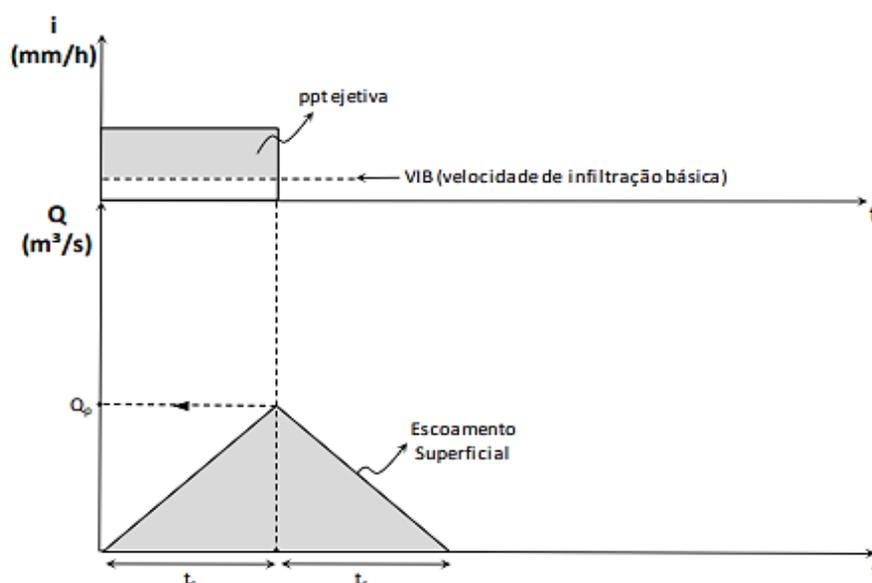
A= Área da bacia (ha).

Por meio do estudo realizado por Mulvaney (1851), foi determinado que o método racional possui escoamento superficial triangular, o que significa que considerando uma chuva distribuída uniformemente sobre a área total da bacia representada pelo hietograma, com duração para o pico de vazão igual ao tempo de concentração (TC), e o tempo para escoamento, representado pelo hidrograma, igual ao dobro do tempo de concentração na bacia, conforme mostrado na Figura 4.

Sendo assim, este método é válido desde que sejam consideradas algumas hipóteses:

- A área total da bacia contribui com o escoamento superficial;
- A razão do tempo de duração da tormenta deve ser igual ou exceder ao tempo de concentração da bacia, que é obtido através do tempo gasto na trajetória da gota d'água sobre a área total de contribuição da bacia hidrográfica, adotando a trajetória mais longa;
- A chuva é distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia;
- As perdas de carga estão incorporadas ao coeficiente de escoamento superficial.

Figura 4 – Hietograma e hidrograma triangular de escoamento superficial



Fonte: Secretaria executiva do XXVIII CONBEA 99, 2020.

O método racional ainda tem muitas discussões a respeito do limite da bacia a ser utilizado. Cada autor adota uma área diferente, levando em consideração o local de estudo e a definição de pequenas e médias bacias (Tabela 1).

Foi adotado o limite estudado por Osman Akan, em 1993, para a bacia de estudos deste trabalho, cuja área de estudo conta com 705 hectares.

Tabela 1 – Limites da aplicação do Método Racional

AUTORES	(ha)	(km²)
David H. Pilgrim e Ian Cordery (Austrália) Método probabilístico, 1993	de 2000 a 50.000	20 a 500
DAEE, 2005 para pequenas barragens	200	2
DAEE-Cetesb	até 100	1
Porto.1995	até 300	3
Linsley et al.	40 a 486	0.4 a 4.86
Paulo Sampaio Wilken	até 500	5
Linsley e Franzini	até 500	5
Osman Akan, 1993	até 1300	13
Califórnia Hihgwavs	até 4.050	405
Otto Pfafstctter	até 20.000	200
ASCE,1992	até 80	0,8
Debo e Reese,1995	até 40	0,4
Regulamento do sul da Califórnia proíbe acima de oito hectares.	até 8	0,08
McCuen.1998	Pequenas Bacias	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Por definição, Coeficiente de Runoff é a razão entre o volume total de escoamento superficial no evento e o volume total precipitado (Tucci, 2000).

O coeficiente de escoamento sofre influencia de diversos fenômenos, como por exemplo o grau de compactação do solo, porosidade, declividade e depressões, onde a água pode armazenar, sendo necessária experiência por parte do calculista para sua determinação. Para o estudo presente, foi utilizado como referência os valores adotados pela Prefeitura de São Paulo (Wilken,1978).

Tabela 2 – Coeficiente de Escoamento Superficial “C”

SUPERFÍCIE	COEFICIENTE C
Telhados	0,70 a 0,95
Pavimentos	0,40 a 0,90
Via macadamizadas	0,25 a 0,60
Vias e passeios apedregulhados	0,15 a 0,30
Quintais e lotes vazios	0,10 a 0,30
Parques, jardins, gramados dependendo da declividade	0,00 a 0,25

Fonte: Wilken, P.S. – CETESB, 1978.

As variações nos valores do Coeficiente de Escoamento Superficial Runoff, se devem principalmente à evolução do processo de urbanização, que impacta diretamente na incidência de vazões.

A partir da pesquisa de Wilken (1978) foi possível estabelecer os coeficientes de cada tipo de superfície capturada pelo satélite. Através da média ponderada destes valores, foi obtido o valor do coeficiente de escoamento superficial para solo permeável e impermeável presente na área de estudo deste trabalho. Conforme as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Runoff por tipo de superfície

TIPO DE SUPERFÍCIE	RUNOFF
Vegetação Alta	0,25
Área Impermeável - Asfalto	0,90
Vegetação Baixa	0,20
Área Impermeável - Casa	0,95
Solo Exposto	0,30

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Tabela 4 – Runoff por classificação de solo

DESCRIÇÃO	SOMA RUNOFF	RUNOFF FINAL
Solo Impermeável	2,15	0,72
Solo Permeável	0,45	0,23

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

A pluviosidade dos anos necessários para a equação foi obtida por meio dos dados fornecidos pela estação meteorológica de Anápolis. A análise foi feita no mês de fevereiro de 2022 e foi adotada a quantidade de 30 mm/h, para o cálculo do estudo, visando que o valor se aproximasse das informações coletadas no dia 12 de fevereiro de 2022, dia este que houve o transbordamento do córrego presente na área de estudo.

A escolha deste valor levou em conta o momento do desmoronamento da via e os eventos anteriores de chuva. No presente trabalho esta mesma chuva, de 30 mm/h, foi simulada em anos anteriores para prever as vazões em diferentes momentos da bacia.

Tabela 5 – Pluviosidade do município de Anápolis em fevereiro de 2022

Id	Estação	Data/Hora(Local)	Tmin(°C)	Tmax(°C)	Tmed(°C)	URmin(%)	URmax(%)	Vel Vento(m/s)	Dir Vento(graus)	ChuvaDiária(mm)	ChuvaAcum.(mm)
EC35776C	Estação Anápolis	28/02/2022	19,4	29	24,1	43	82	1,4	NE	0,00	340,00
EC35776C	Estação Anápolis	27/02/2022	19,6	29,3	24,1	45	86	1,4	NE	0,00	340,00
EC35776C	Estação Anápolis	26/02/2022	19	29,2	23,2	54	91	1,8	E	6,20	340,00
EC35776C	Estação Anápolis	25/02/2022	19	29,6	22,9	53	93	1,4	E	1,40	333,80
EC35776C	Estação Anápolis	24/02/2022	18,2	27,8	23,1	52	92	1,2	NW	0,00	332,40
EC35776C	Estação Anápolis	23/02/2022	18,9	28,6	22,4	50	95	1,5	NE	7,40	332,40
EC35776C	Estação Anápolis	22/02/2022	18,2	27,6	21,4	55	97	1,4	E	1,00	325,00
EC35776C	Estação Anápolis	21/02/2022	18,9	25,4	20,7	76	97	1,1	NE	7,60	324,00
EC35776C	Estação Anápolis	20/02/2022	17,6	24,6	19,4	76	98	1,5	N	1,80	316,40
EC35776C	Estação Anápolis	19/02/2022	18,5	25,2	20,1	68	96	2,8	E	46,80	314,60
EC35776C	Estação Anápolis	18/02/2022	19,2	26,3	22	64	95	1,4	W	0,20	267,80
EC35776C	Estação Anápolis	17/02/2022	17,3	25,2	21,2	72	96	1,7	NW	55,40	267,60
EC35776C	Estação Anápolis	16/02/2022	19,1	28	21,9	58	93	1,5	N	25,40	212,20
EC35776C	Estação Anápolis	15/02/2022	19,6	28,9	22,5	60	91	1,2	N	1,20	186,80
EC35776C	Estação Anápolis	14/02/2022	20	25,9	22,2	69	94	1,8	NW	1,00	185,60
EC35776C	Estação Anápolis	13/02/2022	18,5	25,2	21,4	74	96	1,6	NW	5,40	184,60
EC35776C	Estação Anápolis	12/02/2022	18,6	25,8	20,8	75	98	1,3	NW	36,60	148,00
EC35776C	Estação Anápolis	11/02/2022	18,9	23,5	20,2	78	96	1,7	NW	3,60	142,60
EC35776C	Estação Anápolis	10/02/2022	18,5	22,9	19,8	76	97	2,6	N	25,60	139,00
EC35776C	Estação Anápolis	09/02/2022	18	23,9	20,7	81	97	1,5	N	35,20	113,40
EC35776C	Estação Anápolis	08/02/2022	18,5	26	21,1	73	96	1,3	W	8,40	78,20
EC35776C	Estação Anápolis	07/02/2022	18,9	25,7	21,7	66	94	1	NW	31,20	69,80
EC35776C	Estação Anápolis	06/02/2022	19	25,1	21,4	71	95	1,5	E	12,00	38,60
EC35776C	Estação Anápolis	05/02/2022	21,4	27,4	24	60	84	1,1	N	0,00	26,60
EC35776C	Estação Anápolis	04/02/2022	19	27,9	23,2	48	92	1,7	E	0,00	26,60
EC35776C	Estação Anápolis	03/02/2022	18,6	27,5	21,4	54	97	1,8	NE	0,00	26,60
EC35776C	Estação Anápolis	02/02/2022	19,2	26,8	21,6	65	95	1,4	N	22,40	26,60
EC35776C	Estação Anápolis	01/02/2022	18,6	25,6	21,1	69	92	2,3	N	4,20	4,20

Fonte: Estação meteorológica de Anápolis, 2022.

6.3 BACIA HIDROGRÁFICA

As macrozonas pertencentes ao município de Anápolis abrangem áreas residenciais, industriais, comerciais e de preservação ambiental. A Macrozona do Rio das Antas desempenha um papel vital no contexto ambiental e hídrico da cidade, com suas nascentes e afluentes, contribui significativamente para o fornecimento de recursos hídricos essenciais para atividades agrícolas, industriais e o abastecimento público. O Rio das Antas conta como seus principais afluentes, os córregos Góis, Água Fria, São Silvestre, da Formiga, Bebedouro, Córrego dos Cezários, Reboleiras, Barreiro, da Grama, Pires, Palmital e o Rio da Extrema (Mapa Urbano Digital de Anápolis, 2008).

A bacia do Córrego São Silvestre, utilizada no presente estudo, possui uma área de 705 hectares, com relevo suavemente ondulado que desempenha um papel na drenagem pluvial, ajudando a mitigar os impactos das chuvas e a prevenir enchentes na área urbana. No entanto, de acordo com Jesus, (2007) a intervenção humana acarretou diversas modificações propositais no ambiente que incluem o dimensionamento inadequado de pontes e bueiros, que é capaz de favorecer a ocorrência de inundações.

Através do uso do satélite, foi possível quantificar a área de estudo em 705,07 hectares, também a área de cada subdivisão dela. Devido à ausência de informações acessíveis sobre a bacia do Córrego São Silvestre não foram incorporadas no texto características adicionais a respeito da mesma.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 5 e 6, é possível verificar como o algoritmo realizou o processamento das imagens, classificando o solo e separando por cores os tipos de superfícies captadas.

Figura 5 – Classificação do uso de solo na área da bacia do Córrego São Silvestre em 2010 e 2015



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Figura 6 – Classificação do uso de solo na área da bacia do Córrego São Silvestre em 2020 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

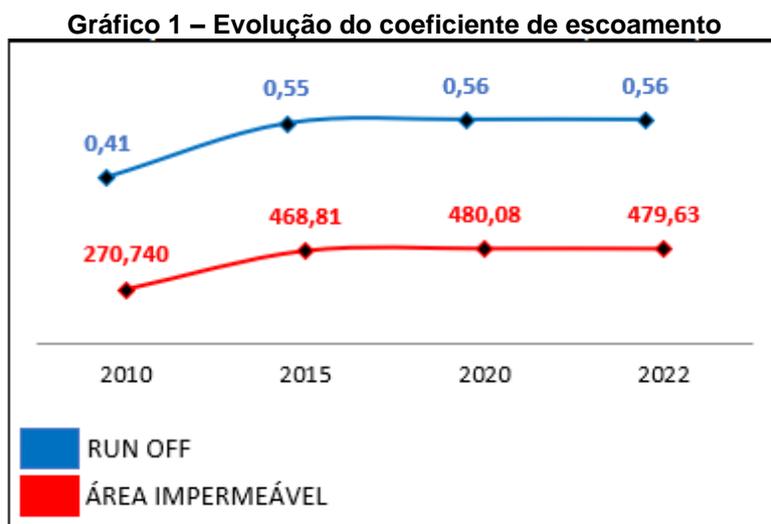
O sensoriamento remoto, através de técnicas de geoprocessamento, juntamente com o método racional, permitiu a avaliação do progresso do processo de urbanização da bacia do Córrego São Silvestre nos anos de 2010, 2015, 2020 e 2022. Os resultados dos quatro anos, respectivamente são mostrados na Tabela 6. Para a determinação do coeficiente de escoamento da bacia, foi necessário fazer uma média ponderada, para que cada tipo de solo não fosse considerado individualmente, mas sim como parte de um sistema completo.

Tabela 6 – Evolução da ocupação de solo da área de estudo

DESCRIÇÃO	2010	RUNOFF	RUNOFF FINAL (C)
Área Impermeável	270,740	0,72	0,28
Área Verde	434,331	0,23	0,14
Total	705,071	-	0,41
DESCRIÇÃO	2015	RUNOFF	RUNOFF FINAL (C)
Área Impermeável	468,810	0,72	0,48
Área Verde	235,947	0,23	0,08
Total	704,757	-	0,55
DESCRIÇÃO	2020	RUNOFF	RUNOFF FINAL (C)
Área Impermeável	480,084	0,72	0,49
Área Verde	224,672	0,23	0,07
Total	704,757	-	0,56
DESCRIÇÃO	2022	RUNOFF	RUNOFF FINAL (C)
Área Impermeável	479,632	0,72	0,49
Área Verde	225,581	0,23	0,07
Total	705,213	-	0,56

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Pode-se observar que o coeficiente de escoamento superficial aumenta na medida em que a urbanização avança. Verificou-se que o processo foi mais intenso entre os anos de 2010 e 2015, com isso o C tendeu a aumentar de 0,41 em 2010 e 0,55 em 2015, o que representa um crescimento de cerca de 34%. E entre os anos de 2015 e 2022 não houve um aumento significativo, principalmente nos últimos dois anos, pois foi o período de pandemia mundial, em razão do COVID-19. Devido ao isolamento social e grande impacto econômico enfrentado, a construção civil teve uma redução significativa, afetando menos a impermeabilização do solo na sub-bacia hidrográfica. As chuvas intensas, em dezembro do ano de 2022, causaram diversos desastres na cidade de Anápolis, inclusive um na área de estudo, onde uma adutora de água foi danificada e a ponte da Avenida Independência completamente destruída, tendo isso em vista, o satélite identificou uma redução da área impermeável, mas não tão grande a ponto de impactar no escoamento.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Com todos os componentes da equação racional definidos, foi possível determinar a vazão de pico de cada ano, mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Vazão de pico (Q) pelo método racional

ANO DE ESTUDO	C	I (mm/h)	A (ha)	Q/360 (M ³ /s)
2010	0,41	30	705,071	24,08992583
2015	0,55	30	704,757	32,3013625
2020	0,56	30	704,757	32,88866
2022	0,56	30	705,213	32,90994

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Os dados apontados na Tabela 7, indicam que a vazão de pico do córrego teve um aumento de aproximadamente 36% em doze anos. Este aumento se deve principalmente ao processo de urbanização acelerado que reduz as áreas permeáveis, fazendo com que a água escoe de forma mais rápida para o exutório. Para que se seja garantido o avanço das edificações com segurança, deve-se ser feito um projeto de drenagem urbana que comporte ações mais violentas da natureza sem causar alagamentos e enchentes.

Para fins de comparação, é viável calcular hipoteticamente as dimensões de um canal com base nas vazões modeladas. Em 2010, com uma vazão de 24,08 m³/s e utilizando a equação de *Manning*, para escoamento em condutos livres, considerando um canal retangular de concreto com uma declividade de 3% a montante, as dimensões

calculadas foram de 5 metros de altura por 6,7 metros de largura. No entanto, em 2022, essas dimensões aumentaram para aproximadamente 5 metros de altura por 8,9 metros de largura, representando um acréscimo de 35% no comprimento do canal. Outro elemento importante é a determinação precisa da vazão de projeto, que é crucial para o cálculo estrutural de pontes. Essa avaliação hidrológica considera as condições fluviais, garantindo segurança e eficiência na concepção de infraestruturas resilientes e capazes de suportar as demandas hidráulicas previstas (Smith, 2019).

O uso combinado do processamento de imagens de satélite e da aplicação do cálculo racional evidencia a necessidade de dimensionar os canais de drenagem do córrego São Silvestre para suportar uma vazão mínima de 32,91 m³/s, considerando as características da área permeável da bacia em 2022. Essa análise reforça a importância de adequar as estruturas às demandas hidráulicas crescentes, para garantir uma gestão eficiente da drenagem urbana.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os eventos extremos, como as chuvas intensas em dezembro de 2022, resultaram em desastres na cidade de Anápolis, afetando uma adutora de água e levando à destruição da ponte da Avenida Independência. Isso destaca a importância de projetos de drenagem urbana baseados em estimativas precisas de vazão, essenciais para prevenir danos estruturais e garantir a segurança das pontes diante das demandas hidráulicas previstas.

A utilização de satélites pode auxiliar de forma eficiente na gestão das obras de drenagem urbana, pois além de ser um processo automatizado e com uma boa precisão de dados, ele pode ser utilizado para estimar vazões futuras.

O sensoriamento remoto, aliado ao método racional, contribui significativamente para a gestão das obras de drenagem urbana, permitindo estimar o impacto da impermeabilização do solo em áreas urbanas. Porém, é necessário investir em sistemas eficazes de alerta para riscos hidrológicos em Anápolis, garantindo uma resposta rápida diante de eventos catastróficos.

Atualmente, Anápolis, em algumas áreas, não possui sistemas que sejam eficazes em alertas de riscos hidrológicos e as imagens infravermelhas do Sentinel podem auxiliar de forma significativa a detecção e modelagem de vazões e fornecer informações do futuro de outras bacias hidrográficas. A iminência de inundação e a falta de avisos à população são questões preocupantes que podem resultar em perdas humanas e danos significativos. Nesse sentido, as obras de engenharia desempenham um papel fundamental na previsão e mitigação de inundações e alagamentos, visando proteger vidas e reduzir os impactos desses eventos. No entanto, para uma gestão eficiente e resposta rápida, é necessário dispor de informações precisas sobre as áreas suscetíveis a enchentes, e as imagens de satélite se tornam uma fonte valiosa para a análise e gestão da drenagem urbana.

REFERÊNCIAS

ARGOLO, E. D.; GIUSTINA, C. C. D. **Simulações e Modelagem Hidrológica de Microbacia Urbana para Previsão de Inundações: o caso do rio das Antas na cidade de Anápolis-GO.** Journal of Social, Technological and Environmental Science, v.5, n.3, p. 252-270, jul.-dez. 2016.

Disponível:<http://revistas.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/>

CHEN, J., ZHANG, S., XU, M., & DU, P. **Classification of land cover using a support vector machine algorithm based on high-resolution satellite imagery.** Journal of Applied Remote Sensing, 13(1), 014505, 2019.

COUTO, R.; GARCIA, K. J; SILVA, M. L. **Conflitos de uso e ocupação do solo nas áreas de preservação permanente do Município de Inconfidentes – MG.** 2018. 11, 2244-2259. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/236867>.

GLERIANI, J.M. **Redes neurais artificiais para a classificação de espectro – temporal de culturas agrícolas** / J.M. Gleriani. – São José dos Campos: INPE, 2004.

JESUS, A. S. **Impactos Ambientais na Alta Bacia Urbana do Rio das Antas em Anápolis (GO).** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais – IESA. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

LI, Y., ZHANG, Z., WU, P., & CHEN, Y. **Change detection of vegetation cover based on remote sensing and random forest algorithm.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 432(1), 012019, 2020.

MAPA URBANO DIGITAL DE ANÁPOLIS. **Produzido por NHL Engenharia e Informática Ltda.** Anápolis: Copigraf Computação Gráfica Ltda, 2008.

MCCUEN, R. H. **Análise e projeto hidrológico.** 3ª Ed., Pearson/Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ. 2005.

MULVANEY, T.J. **On the use of self-registering rain and flood gauges.** Trans. Inst. Civ. Eng. Ireland, 4(2), 1-8, 1851.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Relatório de Avaliação Global de Riscos de Desastres.** Recuperado de UNEP_AR2021_PT.

SANTOS, W. O. PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIA: **Comparativo sobre métodos de levantamentos topográficos com utilização de drones na idade de Santarém – Pará.** 1. ed. Belém: RBF Editora, 2021.

SMITH, K.G. **Standards for Grading Texture of Erosional Topography.** Amer. J. Sei. 248: 655-668, 1950.

Smith, J. (2019). **Hydraulic Engineering Principles.** Springer International Publishing.

TUCCI, M.E.C. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** – Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, 2000.

VENTURIERI, A. **Curso de Introdução às técnicas de sensoriamento remoto.** Disponível em: <http://www.ufpa.br/epdir/images/docs/paper64.pdf> - Universidade Federal da Bahia.

WILKEN, P. S. **Estruturas hidráulicas singulares.** In:_____. Engenharia de drenagem superficial. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, p. 337-451, 1978.