UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO EM GEOGRAFIA

RODRIGO LIMA SANTOS

EXPANSÃO URBANA E MODELAGEM DE CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE GOIÂNIA-GO (2002-2030)

GOIÂNIA-GO
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[ ] Dissertação [X] Tese

2. Nome completo do autor

Rodrigo Lima Santos

3. Título do trabalho

Expansão urbana e modelagem de cenários hidrológicos em bacias hidrográficas de Goiânia-GO (2002-2030)

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO LIMA SANTOS**, **Discente**, em 29/05/2022, às 23:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Fabrizia Gioppo Nunes**, **Professora do Magistério Superior**, em 30/05/2022, às 08:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2938898** e o código CRC **A056B7B0**.

RODRIGO LIMA SANTOS

EXPANSÃO URBANA E MODELAGEM DE CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE GOIÂNIA-GO (2002-2030)

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Fabrizia Gioppo Nunes

Área de Concentração: Natureza e Produção do Espaço

Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica

Goiânia-GO

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Rodrigo Lima
EXPANSÃO URBANA E MODELAGEM DE CENÁRIOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE GOIÂNIA-GO (2002-2030) [manuscrito] / Rodrigo Lima Santos. - 2022.
186 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Fabrizia Gioppo Nunes.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2022.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. modelos hidrológicos. 2. cobertura da terra. 3. escoamento superficial. 4. pressão hidrológica. 5. método racional. I. Nunes, Fabrizia Gioppo, orient. II. Título.

CDU 911

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **54/2022** da sessão de Defesa de Tese de **Rodrigo Lima Santos** que confere o título de Doutor em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço.**

Aos **dezesseis dias do mês de maio do ano de dois mil e vinte e dois**, a partir das **14 horas**, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **"Expansão urbana e modelagem de cenários hidrológicos em bacias hidrográficas de Goiânia-GO (2002-2030)"**. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora **Fabrizia Gioppo Nunes (IESA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Alex Mota dos Santos (UFSB)**, membro titular externo; Professor Doutor **Luiz Carlos Araújo dos Santos (UEMA)**, membro titular externo; Professora Doutora **Karla Maria Silva de Faria (IESA/UFG)**, membro titular interno; Professora Doutora **Juliana Ramalho Barros (IESA/UFG)**, membro titular interno. Durante a argüição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Fabrizia Gioppo Nunes**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata, que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora aos **dezesseis dias do mês de maio do ano de dois mil e vinte e dois**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **Alex Mota dos Santos**, **Usuário Externo**, em 16/05/2022, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Juliana Ramalho Barros**, **Professora do Magistério Superior**, em 16/05/2022, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Karla Maria Silva De Faria**, **Professor do Magistério Superior**, em 16/05/2022, às 18:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Fabrizia Gioppo Nunes**, **Professora do Magistério Superior**, em 16/05/2022, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Araujo dos Santos**, **Usuário Externo**, em 17/05/2022, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2906226** e o código CRC **05672871**.

Dedico este trabalho aos brasileiros e às brasileiras, que diariamente lutam e constroem este país.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade de viver e ser tão abençoado.

Ao meu pai, Raimundo Vieira Santos, e à minha mãe, Beniza Lima Santos, pelos incentivos e pela oportunidade de continuar meus estudos, além dos sonhos de melhoria de vida que sempre viveram comigo, mesmo diante de todos os sacrifícios.

À existência de instituições públicas de ensino neste país, dentre as quais estou inserido desde os anos iniciais da educação infantil até a conclusão deste doutorado.

À minha esposa, Josiane Silva de Oliveira, por conviver diariamente comigo e com este trabalho de tese, ao qual muitas vezes dediquei mais atenção do que a ela própria.

À professora Fabrizia Gioppo Nunes, pela confiança, calma e serenidade de sempre, com as quais conduziu a orientação desta pesquisa. Obrigado também pelas parcerias nas publicações que realizamos.

Aos amigos que estiveram envolvidos diretamente no processo de doutoramento, a saber, Joelson Passos, Laís Rodrigues Campos, Helci Ferreira Ramos e tantos outros (na certeza de ter esquecido de alguém, peço desculpas).

Aos professores Alex Mota dos Santos e Karla Maria Silva de Faria, pela leitura atenta e pelas contribuições profícuas, antes, durante e posteriormente ao processo de qualificação, bem como pelos outros momentos que pude com vocês compartilhar (disciplinas, debates e trabalhos de campo).

Agradeço aos amigos conquistados durante este processo, professor Pedro França, Tatiana Salgado, Anna Maria K. Kovacs e professora Lucimar Garção, pessoas com quem trabalhei ou mantive contato. Obrigado pelos incentivos de sempre!

Aos amigos Sérgio Henrique de Moura Nogueira e Claudinei Oliveira Santos, o primeiro por partilhar seus conhecimentos por meio do curso de modelagem espacial de paisagens com o *software* Dinâmica EGO; o segundo, pelo auxílio com o entendimento de questões relacionadas à linguagem computacional/estatística R.

Aos professores Alessandro Samuel-Rosa (UTFPR) e Alexandre Ten Caten (UFSC), que me ajudaram de maneira muito solícita no entendimento do modelo de predição de solos.

Aos professores Maria Geralda de Almeida e Alex Mota dos Santos, pela indicação e confecção do parecer consubstanciado de indicação ao doutorado direto

a partir da minha qualificação no curso de mestrado deste programa. Ao amigo Carlos Roberto Bernardes de Souza Júnior, que, entre outras coisas, me ajudou com a documentação.

À Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Geografia, na pessoa dos diferentes servidores que atuaram durante o meu período de formação e que foram também responsáveis pelo meu ingresso direto ao Doutorado por meio do Ofício nº 720/2017-CEX/CGSI/DPB/Capes.

Aos recursos da sociedade brasileira, que tornaram possível a materialização das ideias aqui contidas, repassados a mim por meio da bolsa de pesquisa financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Agradeço ao corpo docente do PPGeo/IESA/UFG, por levarem adiante e com excelência o projeto de formação de recursos humanos configurado pelo Programa e pela dedicação durante as disciplinas e discussões.

Meus sinceros agradecimentos a todos e a todas que contribuíram, direta e indiretamente, para a minha formação pessoal e profissional.

RESUMO

As pesquisas com foco em modelagens de processos ambientais historicamente apresentam interesses diversificados, com enfoques ora ligados ao levantamento de informações e integração, ora vinculados à espacialização e sistematização. Nas últimas décadas, este campo de pesquisa volta sua atenção aos modelos com abordagem preditiva, que tem ganhado destaque especial no universo acadêmico. Tal temática torna-se importante devido ao contexto de ocupação das bacias de drenagem urbanas e das perturbações causadas na hidrologia de superfície. Assim, no âmbito da modelagem preditiva, esta tese procura responder aos seguintes questionamentos: a) de que forma modificações provenientes de alterações na cobertura da terra impactam o escoamento superficial, em bacias hidrográficas com períodos de precipitações concentradas? b) Qual é o comportamento do escoamento superficial em diferentes condições de cobertura da terra? c) Quais são os impactos de novas expansões urbanas, considerando o escoamento superficial e as vazões de pico em função da projeção de novos cenários urbanos? Para responder a esses questionamentos, parte-se da tese de que: a associação entre modelos de previsão de escoamento superficial e modelos preditivos de crescimento urbano configura-se em uma técnica adequada para fins de estimativas do escoamento superficial em microbacias urbanas a parcialmente urbanizadas. Como objetivo geral, se estabelece o desenvolvimento de um modelo de avaliação da condição hidrológica para pequenas bacias hidrográficas urbanas, a partir da conjugação do método racional e do estabelecimento do índice de pressão hidrológica. Os procedimentos metodológicos envolveram a delimitação de microbacias; o mapeamento de diferentes aspectos do meio físico; a escolha e a adaptação de modelos tanto de crescimento urbano quanto hidrológico; além da execução dos processamentos de dados; a implementação de equações; o uso de linguagem de programação R e trabalhos de campo. Os resultados permitem avaliar que a pressão hidrológica e os níveis de modificação, nas diferentes variáveis hidrológicas das bacias urbanas avaliadas, encontram-se com alto grau de comprometimento, tendo como consequência o agravamento de problemas hidrológicos urbanos. Nas três bacias analisadas, constatou-se que a medida que a malha urbana evolui o tempo de concentração e a capacidade de infiltração diminui, acarretando no aumento da velocidade e da quantidade de fluxo do escoamento superficial. No que diz respeito à avaliação dos condicionantes hidrológicos do escoamento superficial em associação com a cobertura da terra, tal como proposto, o procedimento de mapeamento e modelagem e aplicação do Índice de Pressão Hidrológica (IPH), é capaz de oferecer subsídios para pensar e estruturar políticas públicas de planejamento e controle da água no meio urbano. Por fim, as análises levam a identificação de um modelo de ocupação urbana no contexto das bacias e variáveis analisadas, podendo ser extrapolado para ~~a~~ bacias em nível hierárquico imediatamente superior.

Palavras-chave: modelos hidrológicos; cobertura da terra; escoamento superficial; pressão hidrológica; método racional.

ABSTRACT

Research focused on modeling environmental processes has historically presented diversified interests, with approaches sometimes linked to the collection of information and integration, sometimes linked to spatialization and systematization. In recent decades, this field of research has turned its attention to models with a predictive approach, which has gained special prominence in the academic world. This theme becomes important due to the context of occupation of urban drainage basins and the disturbances caused in surface hydrology. Thus, within the scope of predictive modeling, this thesis seeks to answer the following questions: a) How do modifications resulting from land cover changes impact runoff in watersheds with periods of concentrated precipitation? b) What is the behavior of runoff under different land cover conditions? c) What are the impacts of new urban expansions, considering runoff and peak flows as a function of the projection of new urban scenarios? To answer these questions, we start from the thesis that: the association between runoff prediction models and urban growth prediction models is an adequate technique for the estimation of runoff in urban and partially urbanized watersheds. The general objective is to develop a model to evaluate the hydrologic condition of small urban watersheds, based on the combination of the rational method and the establishment of a hydrologic pressure index. The methodological procedures involved the delimitation of watersheds; the mapping of different aspects of the physical environment; the choice and adaptation of both urban growth and hydrological models; as well as the execution of data processing; the implementation of equations; the use of R programming language and field work. The results allow us to evaluate that the hydrological pressure and the levels of modification, in the different hydrological variables of the urban basins evaluated, are at a high level of compromise, with the consequence of worsening urban hydrological problems. In the three basins analyzed, it was found that as the urban network evolves, the concentration time and infiltration capacity decrease, leading to an increase in the speed and amount of surface runoff flow. Regarding the evaluation of the hydrological conditioning factors of surface runoff in association with land cover, as proposed, the procedure of mapping and modeling and application of the Hydrological Pressure Index (HPI) is able to offer subsidies to think and structure public policies for planning and control of water in the urban environment. Finally, the analyses lead to the identification of a model of urban occupation in the context of the basins and variables analyzed, which can be extrapolated to basins at an immediately higher hierarchical level.

Keywords: hydrological models; land cover; runoff; hydrological pressure; rational method.

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AcATaMa	*Accuracy Assessment of Thematic Maps*
APP	Área de Preservação Permanente
BHACM	Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira
BHCQA	Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol
BHCVB	Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava
C	Coeficiente de Escoamento Superficial
Dd	Densidade de drenagem
GO	Goiás
Inmet	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Índice de Pressão Hidrológica
Kc	Coeficiente de Compacidade
Kf	Fator de Forma
LIDAR	*Light Detection and Ranging*
LV	Latossolos Vermelhos
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
PDIG	Plano de Desenvolvimento Integrado de Goiânia
RMG	Região Metropolitana de Goiânia
S	Coeficiente de Armazenamento de Água no Solo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SWAT	*Soil & Water Assessment Tool*
TC	Tempo de Concentração
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
Vi	Velocidade de Escoamento Superficial

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação do método racional 50
Equação 2 – Índice de circularidade 82
Equação 3 – Coeficiente de compacidade 83
Equação 4 – Fator de forma 83
Equação 5 – Densidade de drenagem 83
Equação 6 – Razão de relevo 84
Equação 7 – Equação do método racional 86
Equação 8 – Equação da precipitação efetiva 87
Equação 9 – Equação para determinação dos valores de CN 87
Equação 10 – Equação para cálculo do escoamento superficial 87
Equação 11 – Equação para cálculo das intensidades máximas das precipitações 88
Equação 12 – Equação para cálculo do tempo de concentração 88
Equação 13 – Equação para cálculo da velocidade de escoamento superficial 89
Equação 14 – Equação do índice de pressão hidrológica – IPH 89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo conceitual de uma bacia hidrográfica urbana, denotando a complexidade dos processos hidrológicos. 27
Figura 2 – Síntese dos processos envolvidos no ciclo hidrológico.....33
Figura 3 – Representação dos processos no ciclo hidrológico em condições naturais 35
Figura 4 – Representação dos processos no ciclo hidrológico em condições urbanas 37
Figura 5 – Propósitos da modelagem hidrológica urbana 44
Figura 6 – Síntese da modelagem atual, deficiências e possibilidades de soluções.46
Figura 7 – Etapas de escolha do método para a implementação de um modelo hidrológico.....51
Figura 8 – Localização das Bacias Hidrográficas dos Córregos Quebra-Anzol, Alto Macambira e Vaca Brava 54
Figura 9 – Configuração inicial de Goiânia, com o plano de instalação de Atílio Correia de Lima no contexto da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns .56
Figura 10 – Planos de ocupação iniciais da cidade de Goiânia. À esquerda, o de 1933 e, à direita, o de 1938.....57
Figura 11 – Fases do processo de expansão urbana de Goiânia e áreas adjacentes 59
Figura 12 – Chuva mensal no ano de 2020.....61
Figura 13 – Gráfico comparativo das últimas duas normais climatológicas e período recente 62
Figura 14 – Precipitações extremas em Goiânia entre 1961 e 2018.....63
Figura 15 – Declividade e hipsometria das bacias hidrográficas em análise 64
Figura 16 – Mapa de solos das bacias hidrográficas 67
Figura 17 – Classes de solo e quantitativo por bacias hidrográficas.....69
Figura 18 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.....70
Figura 19 – Delimitação manual da área de contribuição das bacias hidrográficas em análise e dados processados 72
Figura 20 – Procedimento de inspeção visual das amostras estratificadas por classe/ano/bacia.....77
Figura 21 – Mosaico de fotografias de procedimentos realizados em campo.....79

Figura 22 – Fluxograma para mapeamento digital de solos.....81
Figura 23 – Visita de campo para inspeção das tipologias de solo da bacia hidrográfica.....82
Figura 24 – Fluxograma modelagem espacial urbana. 85
Figura 25 – Cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol.....97
Figura 26 – Dinâmica do eucalipto na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol 98
Figura 27 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Córrego Quebra-Anzol).....99
Figura 28 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos analisados 100
Figura 29 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (a) período 2002/2011; (b) período 2011/2020 101
Figura 30 – Gramíneas compactadas e plantios comerciais ao fundo 102
Figura 31 – Cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira 103
Figura 32 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Alto Córrego Macambira).....104
Figura 33 – Padrão de urbanização na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira.....105
Figura 34 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos analisados 106
Figura 35 – Aspectos naturais na Bacia do Alto Córrego Macambira 106
Figura 36 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (A) período 2002/2011; (B) período 2011/2020 107
Figura 37 – Cobertura da terra da bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava 108
Figura 38 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Córrego Vaca Brava) 109
Figura 39 – Mosaico de paisagens vista do Parque Municipal da Serrinha 110
Figura 40 – Aspecto urbano na bacia hidrográfica.....111
Figura 41 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos analisados ...112

Figura 42 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (A) período 2002/2011; (B) período 2011/2020 113
Figura 43 – Cenários de cobertura urbana modelados para os anos de 2025 e 2030 115
Figura 44 – Representação do tempo de concentração na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030 117
Figura 45 – Representação do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, entre os anos de 2002 e 2030 119
Figura 46 – Representação do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, entre os anos de 2002 e 2030.....121
Figura 47 – Valores de referência máximos para o tempo de concentração (Tc) ...122
Figura 48 – Representação da velocidade de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030..124
Figura 49 – Representação da velocidade de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030126
Figura 50 – Representação da velocidade de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030.....128
Figura 51 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030 ..131
Figura 52 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030132
Figura 53 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030 134
Figura 54 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030 ..136
Figura 55 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030 138
Figura 56 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030 140
Figura 57 – Variáveis do índice de pressão hidrológica (IPH) e classes categóricas 142

Figura 58 – Índice de pressão hidrológica (IPH) equivalente às classes mínimo, moderado e muito alto 143
Figura 59 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, nos cenários de 2002 (a), 2011 (b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e) 147
Figura 60 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol 148
Figura 61 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol 150
Figura 62 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, nos cenários de 2002 (a), 2011 (b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e) 151
Figura 63 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira 152
Figura 64 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira 153
Figura 65 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, nos cenários de 2002 (a), 2011(b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e) 155
Figura 66 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava .. 156
Figura 67 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava 157
Figura 68 – Valores percentuais de área das classes de pressão hidrológica e tendências horizontal e vertical nas bacias hidrográficas analisadas 159
Figura 69 – Representação da pressão hidrológica no ano de 2020 e pontos de monitoramento da defesa civil nas bacias hidrográficas e proximidades 160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relações possíveis entre os conceitos geográficos e as análises hidrológicas em diferentes escalas de análise 39
Quadro 2 – Tipologias de modelos hidrológicos e característica norteadora 48
Quadro 3 – Categorias de modelos hidrológicos, características e aplicações.....49
Quadro 4 – Detalhamento da chave de interpretação das classes de cobertura da terra, com destaque para suas características físicas e hidrológicas.....74
Quadro 5 – Características das bacias hidrográficas relativas à cobertura da terra114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – População e área urbanas, na América Latina e no Caribe, nos anos 2000,2010, 2020, 2040 e 2050.....29
Tabela 2 – Detalhamento da condição urbana e ambiental das bacias hidrográficas 65
Tabela 3 – Acurácia total da classificação de cobertura da terra, dada por bacias e anos.....78
Tabela 4 – Variáveis e pesos atribuídos aos dados para cálculo do IPH.....91
Tabela 5 – Variáveis e pesos atribuídos aos dados para cálculo do IPH.....92
Tabela 6 – Parâmetros morfométricos segundo os aspectos geométricos, de relevo e hidrográficos.....95

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **20**

CAPÍTULO 1 – BACIAS HIDROGRÁFICAS E FUNCIONAMENTO HIDROLÓGICO **24**

1.1 Bacias hidrográficas: processos, dinâmicas e interações urbanas **24**

1.2 Por uma Hidrologia de Base Geográfica: conceitos e apontamentos para uma aproximação **31**

CAPÍTULO 2 – MODELOS, MODELOS HIDROLÓGICOS, MODELAGENS E SUAS INTERFACES COM OS SIGS **41**

2.1 Modelagem hidrológica e sistemas de informação geográfica: aspectos gerais **41**

2.2 Modelos hidrológicos: classificação, tipologias, finalidades e processo decisório **47**

CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO **53**

3.1 Localização da área de estudo **53**

3.2 Processo de ocupação da Região Hidrográfica do Anicuns: município de Goiânia **55**

3.3 As bacias hidrográficas em análise **60**

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA **70**

4.1 Procedimentos metodológicos: base de dados **70**

4.1.1 Delimitação das bacias de drenagem e correção da rede de drenagem 71

4.1.2 Fotografias aéreas 73

4.1.3 Delimitação das classes de mapeamento de cobertura da terra 73

4.2 Execução do mapeamento de cobertura da terra **76**

4.2.1 Parâmetros para exatidão da acurácia dos mapas 77

4.3 Processamento do modelo digital de terreno – MDT **78**

4.4 Trabalho de campo **79**

4.5 Técnica de mapeamento de solos **80**

4.6 Parâmetros para os cálculos morfométricos das bacias **82**

4.7 Modelagem do crescimento urbano **84**

4.8 Modelagem de escoamento superficial: método racional **86**

4.9 Índice de pressão hidrológica 89

CAPÍTULO 5 – MORFOMETRIA E COBERTURA DAS TERRAS 94

5.1 Parâmetros morfométricos 94

5.2 Análise de cobertura da terra 96

5.2.1 Bacia do Córrego Quebra-Anzol 96

5.2.2 Bacia do Alto Córrego Macambira 102

5.2.3 Bacia do Córrego Vaca Brava 108

5.3 Cenários urbanos modelados para 2025 e 2030 114

CAPÍTULO 6 – MODELAGEM DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DAS BACIAS EM ANÁLISE E CENÁRIOS FUTUROS 117

6.1 Tempo de concentração – Tc 117

6.2 Velocidade do escoamento superficial – Vi 123

6.3 Coeficiente de armazenamento de água no solo – S 129

6.4 Coeficiente de escoamento superficial – C 135

CAPÍTULO 7 – MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL DO ÍNDICE DE PRESSÃO HIDROLÓGICA (IPH) 142

7.1 Formulação do Índice de Pressão Hidrológica (IPH) 142

7.2 IPH na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol 144

7.3 IPH na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira 150

7.4 IPH na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava 154

CONSIDERAÇÕES FINAIS 162

REFERÊNCIAS 167

APÊNDICES 180

INTRODUÇÃO

O surgimento, o desenvolvimento e a expansão dos espaços urbanos, manifestado pela sua expressão física, a cidade, tem impactado e causado perturbações ambientais e riscos na dinâmica hidrológica (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015; TUCCI, 2001, 2008; TUCCI; CLARKE, 1997). Desse modo, os fluxos de água, que antes obedeciam às leis naturais, acabam por modificar-se à medida que a ocupação do ambiente é realizada, resultando, via de regra, em desequilíbrios no ciclo hidrológico urbano (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015).

Estimativas recentes, apresentadas por Angel *et al.* (2011) e Onu-Habitat (2012), demonstram que as cidades latino-americanas, nos próximos anos, continuarão se expandido, tanto em área quanto em número de habitantes. Isso significa que o número de pessoas impactadas por problemas relacionados ao aumento do fluxo de escoamento da água superficial em áreas urbanas deve aumentar, especialmente nas grandes metrópoles. Isso porque as populações menos favorecidas economicamente não dispõem de recursos para moradia em outras áreas que não aquelas onde os riscos são elevados (GUERRA, 2011).

Dentre as principais consequências do crescimento das cidades associadas a problemas hidrológicos encontram-se: o aumento dos picos de vazão de cheias, as alterações na configuração de canais fluviais, o surgimento de erosões (CAVALCANTE, 2019), o transporte de sedimentos, os riscos de enchentes e alagamentos, bem como o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015; TUCCI, 2001). Além de todos esses problemas, há também transtornos relativos à escassez de recursos hídricos em quantidade e qualidade (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011).

No âmbito das pesquisas em modelagem hidrológica e aspectos correlatos, alguns estudos têm sido realizados em Goiânia-GO e na região metropolitana, sob diversas subáreas da Hidrologia e em diferentes perspectivas (ALMEIDA DE OLIVEIRA *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2011a, 2011b; ARGOLO; DELLA GIUSTINA, 2016; CARVALHO, 2008; LINO, 2013; NASCIMENTO, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2012; OLIVEIRA; VESPUCCI, 2015; PEREIRA, 2015; REGO, 2015; REGO; BARROS, 2014; ROCHA, 2013; SANTOS, 2010, 2012, 2015; SANTOS; LEMES; ROMÃO, 2009; SANTOS; ROMÃO, 2009, 2010; SEIBT, 2013; SOUZA; CRISPIM; FORMIGA, 2012).

Especificamente sobre a hidrologia de superfície, poucos trabalhos têm explorado essa temática. Dentre as parcas investigações têm-se o estudo de Nunes (2012), no qual a autora avalia a capacidade permeável do solo urbano da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns. Outra pesquisa que merece destaque é a de Nunes e Borba (2018), que avaliam os efeitos do adensamento urbano na dinâmica hidrológica da bacia do Córrego Tamanduá, no município de Aparecida de Goiânia.

A necessidade de pesquisas que contemplem essa temática torna perceptível a importância desta tese. Tal investigação pauta-se pela preocupação com a tendência do aumento da urbanização em Goiânia e os impactos dela decorrentes sobre três bacias hidrográficas, a saber: a do Córrego Quebra Anzol, a do Alto Córrego Macambira e a do Córrego Vaca Brava. Essas bacias apresentam problemas como os constantes casos de alagamentos e inundações, já recorrentes na cidade de Goiânia, conforme externam alguns autores (ALVES, 2011a, 2011b; NUNES, 2012; PEREIRA, 2015; ROCHA, 2013; NASCIMENTO, 2019).

Seu caráter de ineditismo justifica-se pela carência de estudos direcionados ao desenvolvimento de modelos de previsão de cenários de crescimento urbano, especialmente daqueles associados a modelos de previsão de impactos no escoamento superficial, atrelados às características inerentes dessa região. Outro aspecto diz respeito as literaturas consultadas, cerca de 86,7% destas, abordam temas ligados a hidrologia como um campo mais amplo, ao passo que somente 13,3%, referem-se a hidrologia de superfície. Esta pesquisa, porém, se insere no percentual de apenas 6,7% dos trabalhos com interesse na modelagem de processos hidrológicos. Nesse sentido, o desafio sustentado pelas questões-problema desta tese é validar uma associação, entre diferentes modelos, para bacias em distintas condições de antropização, localizadas em uma das maiores metrópoles urbanas do cerrado brasileiro.

O recorte temporal se deu em consonância com a existência de dados em escala compatível com o fenômeno, no âmbito das bacias hidrográficas selecionadas. Por sua vez, a escolha da problemática ocorreu em virtude dos problemas hidrológicos pelos quais a cidade de Goiânia vem passando, uma vez que as bacias hidrográficas vêm sendo ocupadas sem a preocupação adequada com os fluxos superficiais. Ademais, no âmbito das políticas públicas de habitação recente, é iniciada a ocupação da bacia hidrográfica do córrego Quebra Anzol, como um novo vetor de expansão da cidade, em geral, com moradias do tipo horizontal.

Dessa forma, a pesquisa apresenta como principais questões/problemas, as seguintes indagações: a) de que forma modificações provenientes de alterações na cobertura da terra impactam o escoamento superficial em bacias hidrográficas com períodos de precipitações concentradas? b) Qual é o comportamento do escoamento superficial em diferentes condições de cobertura da terra? c) Quais são os impactos de novas expansões urbanas, considerando o escoamento superficial e as vazões de pico em função da projeção de novos cenários urbanos?

A hipótese desta pesquisa, é que ao atingirem determinado grau de impermeabilização, bacias hidrográficas com diferentes graus de urbanização tendem a apresentar comportamentos hidrológicos adversos, de acordo com a variação espaço-temporal das condicionantes hidrológicas de infiltração e escoamento superficial. Acredita-se, portanto, que o uso da modelagem de cenários de crescimento da impermeabilização do solo, associado a um modelo de previsão de impactos hidrológicos urbanos, é uma técnica adequada para estimar a tendência da pressão hidrológica.

Nesse sentido, apresenta-se, como principal objetivo deste estudo, o desenvolvimento de um modelo de avaliação da condição hidrológica para pequenas bacias hidrográficas urbanas a partir da conjugação do método racional e do estabelecimento do índice de pressão hidrológica. Para tanto, realizou-se a avaliação dos impactos da expansão urbana sobre o escoamento superficial em três bacias hidrográficas com diferentes condições de cobertura da terra, tendo, como objetivos específicos: (i) investigar, por meio de métodos e metodologias clássicas de análise, os parâmetros hidrológicos básicos das bacias selecionadas, em distintas condições de urbanização; (ii) avaliar, por meio da aplicação de modelos hidrológicos e dados de sensoriamento remoto, as variações nas taxas de fluidez da infiltração e do escoamento superficial da água; (iii) analisar as implicações do processo de adensamento da malha urbana, dentro do sistema bacia hidrográfica, por meio da simulação de cenários temporais (2002-2030); e (iv) estimar, pelo índice de pressão hidrológica *(*IPH), os impactos hidrológicos urbanos. Nesse sentido, a organização da tese foi pensada da seguinte forma:

O Capítulo 1 versa sobre a temática de bacias hidrográficas e o funcionamento dos processos hidrológicos em seu interior. A partir disso, direciona-se para as reverberações e as complexidades das bacias hidrográficas predominantemente urbanas. Outro ponto importante desta parte é a tentativa de construção de uma

aproximação entre a Geografia e a Hidrologia. Já o Capítulo II procura realizar uma distinção entre as temáticas relativas ao campo dos modelos e das modelagens, assim como ressaltar as possibilidades, os desafios e as tendências das interações possíveis entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográficas (SIG).

Apresentar uma caracterização da área de estudos, constituída por três importantes bacias hidrográficas urbanas do município de Goiânia, foi o alvo do Capítulo 3. Neste, o autor procura destacar aspetos do meio físico-geográfico e dos processos de ocupação das bacias em destaque. Por sua vez, o Capítulo 4 detalha o procedimento metodológico desenvolvido nesta pesquisa.

O Capítulo 5 trata da apresentação dos resultados dos mapeamentos de uso e cobertura da terra, assim como dos dados referentes aos aspectos morfométricos das bacias hidrográficas analisadas. A proposta contida no Capítulo 6 visa realizar uma análise do comportamento de quatro importantes parâmetros hidrológicos, a saber: o tempo de concentração, a velocidade de escoamento superficial e os coeficientes de infiltração e escoamento superficial. Por fim, apresenta-se, no Capítulo 7, o Índice de Pressão Hidrológica (IPH), no qual as bacias hidrográficas do Córrego Quebra Anzol, Alto Córrego Macambira e Vaca Brava são examinadas do ponto de vista de suas fragilidades hidrológicas.

CAPÍTULO 1 – BACIAS HIDROGRÁFICAS E FUNCIONAMENTO HIDROLÓGICO

1.1 Bacias hidrográficas: processos, dinâmicas e interações urbanas

Ao desenvolver estudos hidrológicos e ambientais, tendo como unidade de análise a bacia hidrográfica, é cada vez mais importante a abordagem sistêmica da realidade (BERTALANFFY, 1977). Nesse sentido, os estudos necessitam assumir um paradigma integrador mediante seus elementos, sejam eles naturais, sociais ou uma integração entre ambos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Tundisi e Matsumura-Tundisi (2011, p. 152) ressaltam que “a abordagem tradicional para a gestão de recursos hídricos sempre foi realizada de forma compartimentada, e não integrada”.

Sob esse aspecto, é importante ressaltar que as ações de gestão, e também as políticas de ocupação das bacias hidrográficas, sempre foram realizadas de forma desconectada, não se importando com a cobertura das terras ou o estabelecimento claro de regulamentações, entre outras medidas. A perspectiva da abordagem integrada é esclarecida por Branco (1999, p. 1-2) da seguinte forma:

> Tomemos como exemplo, muito simples, de um copo de cristal. De acordo com o método analítico, a melhor maneira de conhecer a sua essência, a sua intimidade, consistiria em reduzi-lo a tantas partes quantas possíveis, as quais seriam, a seguir, examinadas em detalhe. Ora, todos sabemos que o copo, uma vez fragmentado, deixa de ser um copo, pois já não atende à sua função primordial, que é de conter líquidos para serem bebidos. [...] Dir-se-ia que, com a fragmentação, algo foi perdido, alguma ligação entre as partes, ligação essa que seria indispensável à compreensão do todo.

A investigação só se torna completa, então, a partir do momento em que o pesquisador consegue captar a essência do fenômeno observado, sem que a ligação entre as partes seja perdida, tal como propõe Christofoletti (1999) ao mencionar as noções de unidade, totalidade e complexidade. Para esse autor, tais elementos remetem a uma concepção integrada do meio ambiente. Em outras palavras, busca-se trazer como exemplo o copo de vidro – que é a bacia hidrográfica –, cujos fragmentos são os elementos que constituem sua dinâmica, que conduzem as trocas de energia e matéria. No entanto, nem todos são essencialmente importantes para a compreensão do processo em análise, cabendo ao pesquisador filtrar somente aquilo que lhe seja necessário.

Sobre o conceito de bacia hidrográfica, entende-se “a área da superfície terrestre drenada por um rio principal e seus tributários, sendo limitada pelos divisores de água” (BOTELHO, 2005, p. 269). Outro autor que a define é Christofoletti (1979, p. 9), para quem ela refere-se a “um sistema aberto, através do qual se realiza a troca de energia e matéria entre seus elementos, tanto internamente quanto externamente, sendo determinada pela condição de equilíbrio deste sistema”. Ainda, nas palavras de Silveira (2001, p. 40), “uma área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório”.

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de estudo e análise é sustentada pela Lei nº 9.433/1997, que define a bacia hidrográfica como unidade de planejamento territorial (BRASIL, 1997). O conhecimento de informações referentes às bacias hidrográficas é necessário para a tomada de decisões, como a gestão dos recursos naturais disponíveis nas bacias. Essas informações devem contemplar, além da estrutura física da bacia – com ênfase na sua morfometria –, o uso dado ao solo. Este, por sua vez, aliado às características da bacia, é quem definirá seu comportamento frente a eventos hidrológicos, a exemplo do regime de precipitação, variável esta que indica uma maior ou menor tendência a enchentes.

Sobre a ocorrência de problemas em bacias hidrográficas urbanas, Botelho (2011, p. 93) destaca ser “[...] preciso desenvolver novas formas de ocupação, novos materiais, novas técnicas, novas leis, estabelecendo novas relações de uso do espaço urbano”, um processo que só pode ser mais bem observado a partir da adoção de referenciais de base sistêmica.

Nenhuma bacia hidrográfica é igual a outra justamente em função do seu *modus operandi*, que varia em função das características ambientais e dos processos antrópicos desenvolvidos em seu interior. A ocupação, por sua vez, além de outros fatores, deve ser examinada com cuidado, ao passo que uma ocupação concentrada ou distribuída, em área de recarga ou exutório, pode causar diferentes impactos do ponto de vista hidrológico e ambiental. A mesma ocupação deve ser objeto de investigação não somente no espaço, mas também ao longo do tempo (SANTOS, 2010).

Quanto ao processo de distinção interna das bacias hidrográficas, Silveira (2001, p. 41) menciona a necessidade de sua avaliação como um sistema físico, no qual “a entrada é o volume de água precipitado e a saída, o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e

transpirados e também os infiltrados profundamente". Nessa perspectiva, entre a entrada e a saída, vários processos podem assumir papel dominante, a depender da condição hidrológica, física, estágio de ocupação e degradação do ambiente de captação considerado.

Acerca da adoção das bacias hidrográficas como unidades fundamentais de estudo, Tundisi e Matsumura-Tudisi (2011, p. 154) destacam que a bacia hidrográfica:

(I) é uma unidade física;
(II) é um ecossistema hidrologicamente integrado;
(III) oferece oportunidade para o desenvolvimento de parcerias e a resolução de conflitos;
(IV) permite que a população local participe do processo de decisão;
(V) estimula a participação da população e a educação ambiental e sanitária;
(VI) garante visão sistêmica adequada para o treinamento em gerenciamento de recursos hídricos;
(VII) é uma forma racional de organização do banco de dados;
(VIII) garante alternativas para o uso dos mananciais e de seus recursos; e
(IX) promove a integração institucional necessária para o gerenciamento do desenvolvimento sustentável.

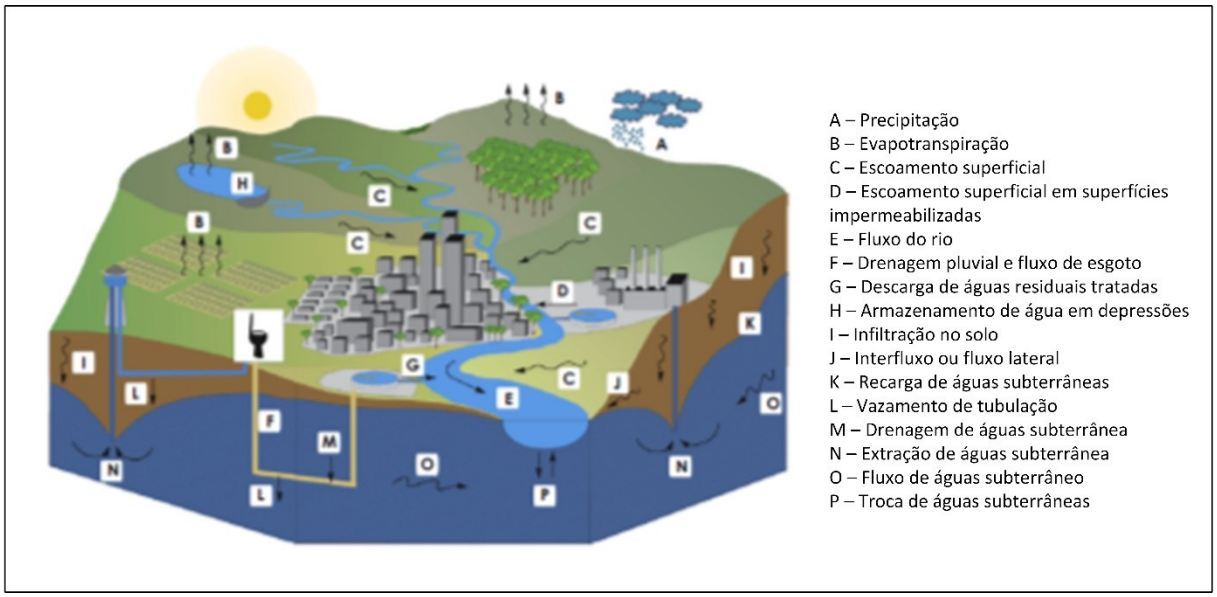
Tal unidade é adotada e considerada por diversos pesquisadores como ideal para a análise dos elementos físicos e humanos e suas implicações no espaço. Christofoletti (1979), Beltrame (1994) e Cunha (1998) afirmam que a bacia hidrográfica possui relação dinâmica entre seus elementos constituintes, facilitando a análise e o desenvolvimento de ações conjuntas. Dessa maneira, o ciclo hidrológico é normalmente estudado com mais interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica (TUCCI, 2001). Por esse motivo, a bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, pois é nas bacias que se encontram os elementos capazes de romper com a dinâmica natural do meio (RENNÓ; SOARES, 2007).

A bacia hidrográfica, respeitadas suas condições naturais, "consiste basicamente em um conjunto de superfícies, vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório" (SILVEIRA, 2001, p. 40). Em condições urbanas, diversos componentes interferem

diretamente na relação entre a água precipitada e a interação desta com o solo (TUCCI, 2008), acelerando processos como o escoamento superficial e diminuindo a infiltração.

As superfícies com permeabilidade reduzidas, representativas de grandes percentuais de áreas nas cidades brasileiras, contribuem para a geração de impactos ambientais, sociais e econômicos que afetam diretamente a população, geralmente associados ao contexto de modificação no ambiente de captação da bacia. Sobre esse aspecto, destaca Silva (2011, p. 43) que, nas áreas urbanas consolidadas, não se pode dizer que há um solo propriamente dito, "[...] pois aterros, recapeamentos e a impermeabilização do solo são tão fortes que descaracterizam aquilo que se convencionou chamar de solo". Na Figura 1 delineia-se um modelo conceitual da complexidade dos processos envolvidos em torno do ciclo hidrológico de uma bacia com predomínio de cobertura urbana.

Figura 1 – Modelo conceitual de uma bacia hidrográfica urbana, denotando a complexidade dos processos hidrológicos.



Fonte: Salvadore, Bronders e Batelaan (2015), adaptado pelo autor.

O modelo conceitual trazido na Figura 1 aponta ao menos cinco processos antrópicos que alteram diretamente a configuração hidrológica de bacias urbanas, a saber: (I) escoamento superficial com capacidade permeável reduzida; (II) drenagem pluvial e fluxo de esgoto; (III) descarga de águas residuais; (IV) vazamento de tubulações; e (V) extração de água subterrânea. Além dos processos mencionados, o modelo segue ressaltando que o sistema hidrológico difere muito de cidade para

cidade, uma vez que a população e a área de superfície impermeável produzem impactos muito diversificados sobre os recursos hídricos (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015).

A conceituação dos fluxos de água é, para os mesmos autores (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015), um pré-requisito para a compreensão do comportamento hidrológico das bacias urbanas, pois é o elemento químico que instaura todo o processo. Nesse viés, Villela e Matos (1975) explicam que o escoamento superficial envolve o excesso de precipitação gerado após uma chuva intensa, que se desloca em direção a um curso d'água. Este passa a ser alimentado tanto pelo excedente de precipitação como por águas subterrâneas.

As colocações que aqui se apresentam são fundamentais e tratam, dinamicamente, da temática abordada. Por conseguinte, a possibilidade de realizar mapeamentos ou modelagem de processos dinâmicos ainda se mostra muito tímida diante da ciência geográfica, uma vez que os estudos optam por analisar lapsos no espaço-tempo. Posto isso, alguns questionamentos podem ser suscitados, tais como (I) o quão grande deve ser um aglomerado urbano para que uma bacia seja considerada urbana e (II) se a bacia de captação pode ser definida somente com base na porcentagem de área coberta apenas por habitações e indústrias, mesmo diante da complexidade maior envolvida no ambiente hidrológico.

No sentido de melhor compreender a discussão anterior, Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) esclarecem que uma cidade compacta e muito densa por vezes pode causar um impacto menor, considerando sua resposta hidrológica, em relação a uma cidade cheia de núcleos populacionais, porém, distribuídos na bacia hidrográfica. Um raciocínio como este, porém, jamais deve ser generalizado indiscriminadamente. Os mesmos autores ainda acrescentam, de modo a evitar definições unicamente baseadas em números percentuais de cobertura da terra, que uma bacia hidrográfica deve ser considerada urbana quando "os impactos antropogênicos são capazes de influenciar os fluxos hidrológicos de maneira significativa [...]" (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015, p. 64).

De fato, "o sistema hidrológico difere muito de cidade para cidade, igualmente a população e as superfícies impermeáveis", fato que pode produzir impactos muitos diversificados (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015, p. 64). A capacidade permeável do solo urbano, quando reduzida, gera, dentre outros problemas e impactos ambientais, o aumento das vazões de pico, o assoreamento da rede

hidrográfica, a deterioração da qualidade e da quantidade de água e a ampliação de pontos de alagamento (TUCCI, 2008).

No âmbito mundial e utilizando-se de dados de sensoriamento remoto, Angel *et al.* (2011) projetam que até 2050 haverá um aumento crescente da população e de áreas urbanizadas. Esse incremento das malhas urbanas, por sua vez, foi projetado para diversas regiões do planeta, considerando três intervalos 0%, 1% e 2%, que representam a densidade de concentração das malhas urbanas. A questão que se coloca é onde essa população estará assentada, quais novas áreas podem ter suas dinâmicas naturais modificadas? Quem utiliza os recursos hídricos? Quem ficará sem água? Quem será afetado por enchentes, alagamentos, falta de água? E quais estruturas físicas e sociais podem ser modificadas? A Tabela 1 expõe os resultados da modelagem, com ênfase no cenário mundial e na América Latina e Caribe.

Tabela 1 – População e área urbanas, na América Latina e no Caribe, nos anos 2000,2010, 2020, 2040 e 2050

Região projetada	**Área 2000 km²**	**Densidade de concentração (%)**	**Projeção da cobertura da terra urbana (km²)**				
			2010	2020	2030	2040	2050
América Latina e Caribe	91.298	0	109.894	126.611	140.646	151.697	159.414
		1	121.452	154.644	189.852	226.305	262.829
		2	134.225	188.882	256.273	337.608	433.332
Mundo	602.864	0	711.770	824.200	938.765	1.047.862	1.145.698
		1	786.628	1.006.680	1.267.200	1.563.226	1.888.936
		2	869.358	1.229.562	1.710.542	2.332.059	3.114.330

Fonte: Angel *et al.* (2011), adaptado pelo autor.

Os dados apresentados revelam que haverá um aumento amplo das áreas urbanizadas nos próximos anos. Em outras palavras, significa dizer que as bacias hidrográficas da América Latina e do Caribe devem urbanizar-se ainda mais (ANGEL *et al.*, 2011). A principal consequência desse processo é, sem dúvida, a redução da infiltração e, por consequência, o aumento da velocidade do escoamento superficial, tendo como resultado situações de alagamentos, enchentes, enxurradas, desalojamento de pessoas e deslizamentos de terra. De modo a mediar tais problemas, Botelho (2011, p. 102) sugere que “[...] é preciso ampliar as áreas de cobertura vegetal, ainda que de gramíneas, e diminuir as áreas cimentadas”, visto que, entre 2040 e 2050, devemos dobrar o total de áreas urbanas mundiais em relação ao ano de 2020.

Lino (2013) constata, por meio de modelagem,[1] que o espaço urbano de Goiânia apresentava, no ano de 2013, 65,8% de áreas nas quais predominava o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Esse fato mantém uma relação direta com o crescimento urbano. A autora estima que a Região Metropolitana de Goiânia (RMG) saltará de 9,20% de ocupação urbana, em 2010, para 20,60% em 2060; ademais, parcela significativa desse aumento ocorrerá em áreas que ainda podem se expandir em Goiânia, além de cidades vizinhas, como Aparecida de Goiânia e Senador Canedo.

Sobre a relação entre redução da capacidade permeável do solo e o escoamento superficial, "[...] é razoável supor que a precipitação ocorrida perto do exutório gerará um escoamento que chegará mais cedo a este ponto, enquanto o escoamento gerado em locais mais distantes passará mais tarde pelo mesmo exutório" (SILVEIRA, 2001, p. 43). Esse processo de escoamento torna-se dependente, fundamentalmente da topologia da bacia em questão, ou seja, da disposição espacial de suas vertentes, da rede de drenagem, do nível de ocupação, e dependerá, ainda, das litologias das rochas, do tipo de solo e das interações entre cada um desses elementos. Entretanto, Silveira (2001, p. 45) assevera que "os métodos clássicos da Hidrologia para cálculos do hidrograma de saída não explicitam os papéis das vertentes e da rede de drenagem, preferindo tratar a bacia como um sistema que funciona à base da translação e/ou armazenamento".

É nesse nicho de possibilidades que a modelagem de processos ambientais, associada aos conhecimentos geográficos, pode contribuir com a discussão dos processos hidrológicos, em especial com o escoamento superficial em bacias hidrográficas urbanas. Conseguinte a essa discussão, busca-se, no próximo tópico, realizar uma aproximação entre esses dois campos científicos – Hidrologia e Geografia –, que, em muitos aspectos, apresentam real possibilidade de se complementarem.

---

[1] A autora desenvolveu o modelo de crescimento urbano para modelagem de cenários futuros na Região Metropolitana de Goiânia por meio do Dinâmica EGO.

1.2 Por uma Hidrologia de Base Geográfica: conceitos e apontamentos para uma aproximação

A Hidrologia é a ciência que trata da água na terra, importando-se com a sua ocorrência, circulação e distribuição em distintos meios (VILLELA; MATTOS, 1975). O estudo de suas propriedades físicas e químicas, assim como suas interações com o meio e as formas de vida (CHOW, 1959 *apud* TUCCI, 2011, p. 25), em especial a vida humana, fazem parte do escopo dessa ciência. Os estudos na área de Hidrologia aplicada têm sido muito relevantes na medida em que analisam, dentre outros aspectos, o "[...] resultado da ocupação de bacias hidrográficas, do incremento significativo da utilização da água e do resultado do impacto sobre o meio ambiente global" (TUCCI, 2011, p. 25).

O corpo teórico e metodológico dessa área do conhecimento evoluiu consideravelmente, "alterando-se de estudos qualitativos e descritivos para a utilização de métodos matemático-estatísticos" (TUCCI, 2001, p. 25). Atualmente, as evoluções passam pela incorporação de novos meios de estudos e tratamento de dados, a exemplo dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG) (LONGLEY *et al.*, 2013), que, graças ao desenvolvimento experimentado pela informática (JESEN, 2011), tem desencadeado possibilidades de análises matemática-estatística-espaciais.

Ao pensar os avanços da Hidrologia do ponto de vista de suas técnicas e da relação da sociedade com a água no meio urbano, Tucci (2008) apresenta quatro fases do tratamento da água pela sociedade, a saber: (I) pré-higienista, (II) higienista, (III) corretiva e (IV) desenvolvimento sustentável. No que diz respeito à última fase, no Brasil têm sido pensadas alternativas desde a década de 1990, no âmbito dos espaços urbanos, com atenção especial a questões como tratamento das águas pluviais urbanas, conservação do escoamento pluvial, tratamento de efluentes e uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas (TUCCI, 2008).

Dessa forma são incorporadas práticas que visam a diminuição dos impactos advindos de processos hidrológicos. Algumas dessas medidas preconizam a implantação de estruturas urbanas sustentáveis, valorizando o escoamento natural das águas e garantindo um percentual maior de infiltração desta no solo. Assim, corrobora-se com a última fase, relativa ao modo como a sociedade trata sua água, em especial a adoção de modelos de uso e cobertura da terra sustentáveis, fato que

pode ser evidenciado por meio de regulamentações crescentes nos espaços urbanos (TUCCI, 2002, 2016), ainda ausentes em Goiânia, mas com presença significativa em diversas regiões do Brasil.

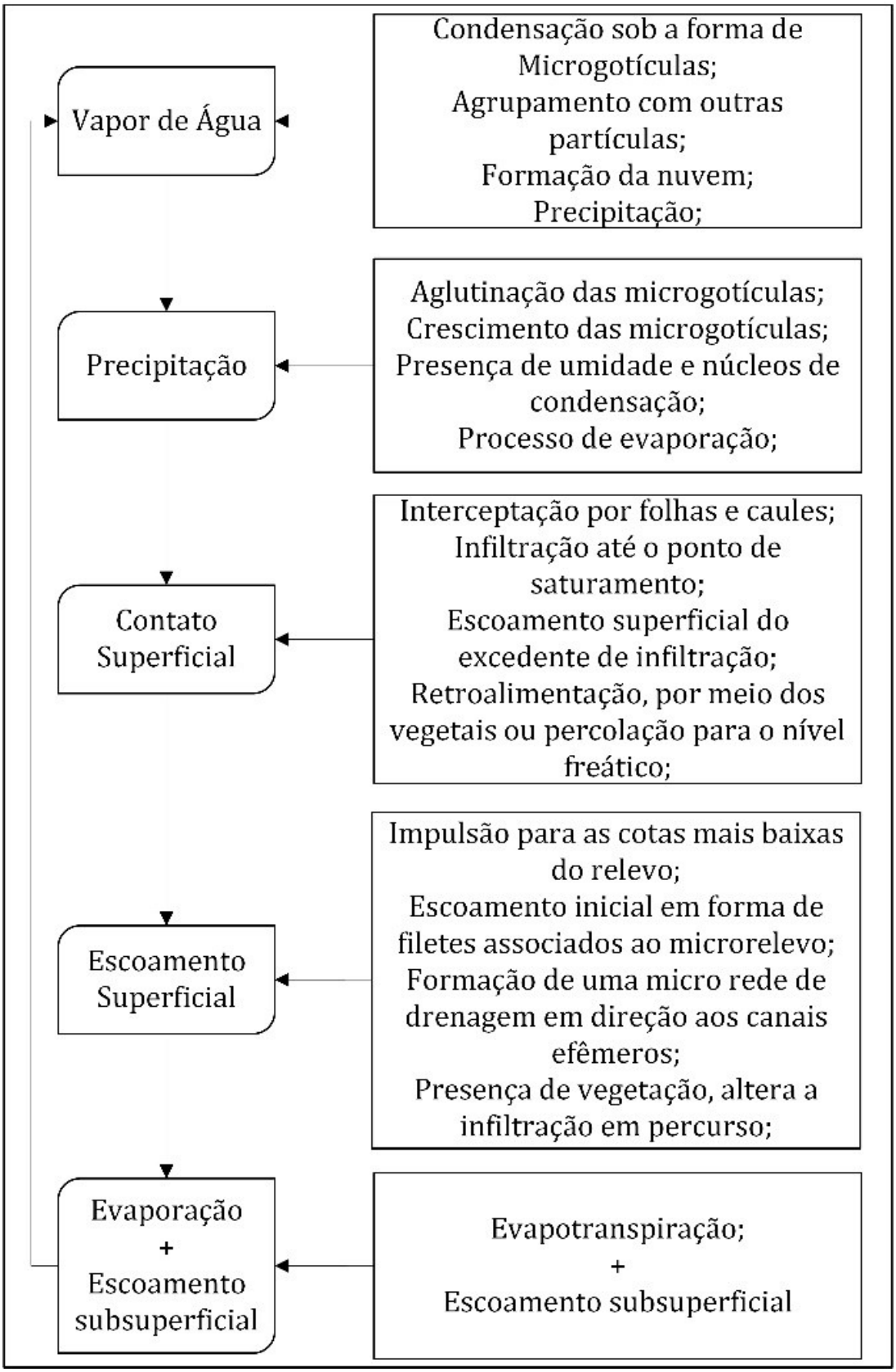
O principal objeto de análise da ciência Hidrológica é o ciclo hidrológico (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015; TUCCI, 2001) e as alterações decorrentes das modificações causadas, maiormente, pelas ações antrópicas (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; TUCCI; CLARKE, 1997). A literatura especializada costuma compartimentar o ciclo em estágios, de acordo com as características ou com o estado hidrológico dominante da água, que pode variar de acordo com o ambiente considerado, seja ele urbano, seja ele rural.

O ciclo hidrológico é um fenômeno global, variável segundo diferentes condições e somente fechado em âmbito global. “À medida que se considera áreas menores de drenagem, fica mais caracterizado o ciclo hidrológico como um ciclo aberto ao nível local” (SILVEIRA, 2001, p. 36). Por isso, torna-se propenso a sofrer impactos, inclusive de mudanças na cobertura da terra na bacia hidrográfica. Os impactos decorrem até mesmo devido à característica da composição dos materiais utilizados para implementar diferentes estruturas urbanas, como demonstram Lechiu, Oliveira Filho e Sousa (2012), ao avaliarem quinze classes de cobertura da terra urbana, por meio de imagens de alta resolução espacial.

A Figura 2 demonstra os distintos estágios e processos do desenvolvimento do ciclo hidrológico, tais como (I) vapor de água, (II) precipitação, (III) contato superficial, (IV) escoamento superficial, (V) evaporação e (VI) escoamento em subsuperfície. Em geral, de acordo com a região observada, esses processos ocorrem com mais ou menos intensidade. No caso do Brasil, localizado em sua maior parte na zona tropical, são significativos todos os estágios (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2000).

Os processos de troca realizados pelo ciclo hidrológico podem ocorrer em dois sentidos: da superfície para a atmosfera ou da atmosfera para a superfície (SILVEIRA, 2001). Neste último, embora a transferência de água possa acontecer em outros estados físicos da matéria, o principal modo são as precipitações, na forma de chuva, em especial, no âmbito das regiões tropicais. A precipitação, para Silveira (2001), é a principal consequência do ciclo hidrológico: ao mesmo tempo em que é mutuamente afetada por receber influência dos diferentes ambientes de captação, também é afetada de maneira distinta pelo escoamento e pela infiltração em maior ou menor volume.

Figura 2 – Síntese dos processos envolvidos no ciclo hidrológico



Fonte: Villela e Mattos (1975) e Tucci (2001), adaptada pelo autor.

As chuvas se formam devido à presença de umidade e núcleos de condensação nas nuvens, sendo suas características mais relevantes o total precipitado, a duração e sua distribuição no tempo e no espaço (SILVEIRA, 2001). Todos esses fatores tornam a chuva um fenômeno muito complexo do ponto de vista de modelagem, pois a definição da abrangência espacial da precipitação é importante para o controle de inundação e da erosão do solo. Somado a esses fatores, diversos outros exercem influência, tal como a própria cobertura das terras e o tamanho da área de abrangência da bacia hidrográfica.

A interceptação (Figura 2) é a “retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo” (BLAKE, 1975 *apud* TUCCI, 2011, p. 243), realizada por barreiras naturais ou artificiais que impedem a chuva de ter contato parcial ou total com o solo. O volume retido é retornado à atmosfera por evaporação, no entanto, muitas vezes a chuva é tão irrelevante que nem mesmo atinge o solo, evaporando antes mesmo de ser interceptada (TUCCI, 2011).

Na etapa seguinte à da interceptação, referente ao contato superficial (Figura 2), é importante destacar dois processos – a infiltração e o escoamento –, pois é por meio deles que a água assume diferentes trajetórias espaciais. Bertoni e Tucci (2011, p. 177) assumem que “por sua capacidade para produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a Hidrologia”, e o ambiente de precipitação, por sua vez, é o responsável pela maior ou menor capacidade de infiltração.

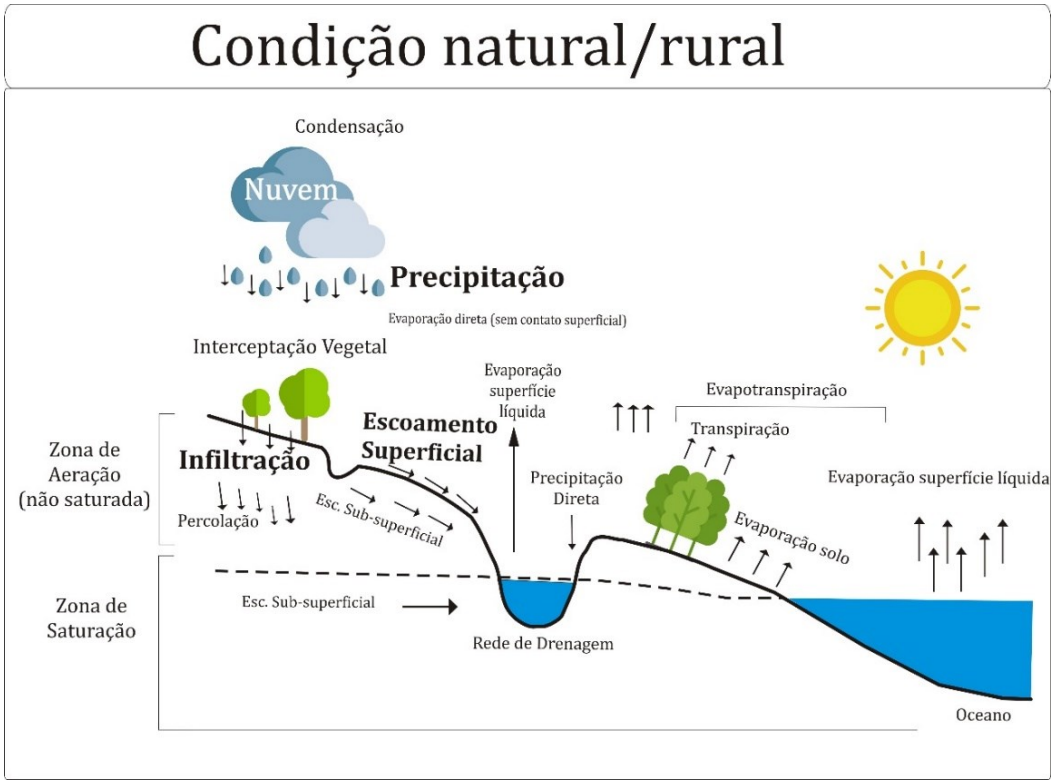
A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que “[...] depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior” (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2001, p. 335). À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o grau de umidade (TUCCI, 2011), atingindo as rochas.

Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais pode não ser capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando conseguem, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2011). O escoamento só é gerado a partir do momento em que o solo se satura; o processo completa-se com a retroalimentação, ou seja, o retorno da água para a superfície ou para o nível freático.

Assim, o escoamento superficial (Figura 2) diz respeito ao direcionamento da água, após interagir com a superfície em questão. Essa interação com a superfície de captação hidrológica determina o impacto desse escoamento. Além disso, o escoamento superficial é um processo natural que, na maioria das vezes, tem sido associado apenas a impactos negativos e estes, na verdade, apenas refletem a apropriação e a falta de cuidado com a cobertura superficial das bacias hidrográficas, rurais ou urbanas.

Para retratar o processo discutido, em que se destacam as etapas de formação do vapor de água, precipitação, contato superficial, escoamento e evaporação, apresenta-se a Figura 3, com destaque para os subprocessos que ocorrem no ambiente natural/rural – precipitação, interceptação vegetal, infiltração, percolação, escoamento subsuperficial e evapotranspiração –, divididos em duas zonas, a de aeração e saturação (TUCCI, 2001; VILLELA; MATTOS, 1975).

Figura 3 – Representação dos processos no ciclo hidrológico em condições naturais



Fonte: Villela e Mattos (1975) e Tucci (2001), adaptada pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 3, o escoamento está orientado ao relevo, buscando sempre as cotas topográficas mais baixas (TUCCI, 2001), e segue em um processo no qual são observadas as seguintes etapas: (a) escoamento em filetes,

que, juntamente com a associação ao micro relevo existente, configura o estágio no qual a água procura pequenas fendas; e (b) formação de uma micro rede de drenagem, orientada aos canais existentes, cuja origem está relacionada à evolução das pequenas fendas anteriores, e, por fim, não havendo obstáculos, a água atinge o canal de drenagem mais próximo.

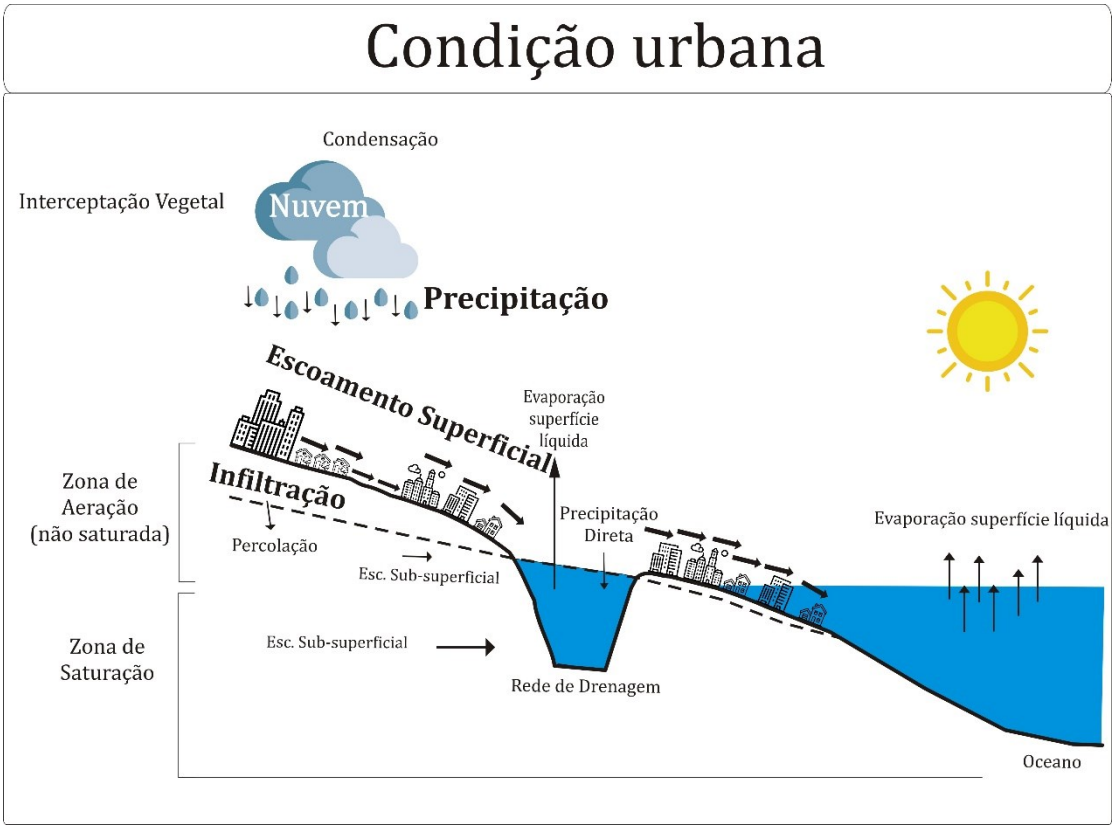
Em bacias urbanas, Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) alertam que esse processo de escoamento sofre uma grande variação, pois, ao invés de o curso d'água que está em formação seguir pequenas fendas naturais no micro relevo (TUCCI, 2001), este escoa por feições antrópicas, de tal modo que a velocidade do escoamento imbricada nesse processo aumenta consideravelmente (RAMIER; BERTHIER; ANDRIEU, 2011).

Uma maneira de medir a vazão gerada pelo escoamento superficial é o hidrograma, um gráfico que relaciona a vazão no tempo. "A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica" (TUCCI, 2011, p. 391). O tipo de cobertura da terra na região hidrológica considerada, implica, portanto, respostas hidrológicas diferentes e, após o início da chuva, existe um intervalo de tempo em que o nível começa a elevar-se. Esse tempo de retardado da resposta hidrológica deve-se às perdas iniciais por interceptação vegetal, depressões topográficas, infiltração, entre outros fatores (TUCCI, 2001).

Tem sido comum, nos espaços urbanos, a adoção de medidas sustentáveis e de métodos de contenção do escoamento superficial à montante, para não prejudicar microbacias à jusante. O somatório dessas perdas se reflete na redução da vazão média e no abatimento dos picos de enchentes (TUCCI, 2011, p. 249). Por sua vez, a solução para o problema do escoamento, conforme apontado por Faulkner (1999), está na criação e na implementação de políticas urbanas sustentáveis.

A Figura 4 demonstra as etapas de formação do ciclo hidrológico e seus subprocessos em bacias urbanizadas.

Figura 4 – Representação dos processos no ciclo hidrológico em condições urbanas



Fonte: Villela e Mattos (1975) e Tucci (2001), adaptado pelo autor.

Na condição urbana, representada na Figura 4, o ciclo hidrológico sofre variações severas, no qual é possível notar, para cada condição considerada, os processos dominantes e secundários. Em divergência com a condição rural (Figura 3), os processos de intercepção vegetal, infiltração e percolação passam a ocupar posições secundárias, exercendo papéis pouco significativos (TUCCI, 2001; VILLELA; MATTOS, 1975).

Assim, no ambiente de captação das bacias urbanas, o escoamento superficial potencializa-se em decorrência da presença de grandes áreas com potencial permeável reduzido, tornando-se um dos grandes percalços da convivência urbana (Figura 4). É importante lembrar que os elementos do ciclo hidrológico, aqui apresentados de forma fragmentada, apenas para fins didáticos, assumem uma grande complexidade na natureza. O conceito de ciclo da água é complexo, em especial em ambiente de captação urbano, pois a água utilizada em determinada bacia hidrográfica pode ser captada em outra, que, por sua vez, pode ir além de suas fronteiras por meio de redes “[...] de distribuição de água e redes de esgoto” (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015, p. 64).

A Hidrologia moderna, voltada para o uso da água, controle da ação desta sobre a população e os impactos sobre as bacias hidrográficas e o globo terrestre sempre dispôs de um vasto instrumental teórico/metodológico, inicialmente orientado para o desenvolvimento de equações, funcionamento dos processos e leis naturais envolvendo o ciclo hidrológico. Hodiernamente, essa área passa por uma incorporação no seio tecnológico, inserindo novos aparelhos e técnicas para medição de variáveis, bem como o desenvolvimento do campo computacional, aprimoramento de modelos de predição e inserção de conceitos geográficos.

Atualmente, a Geografia dispõe de um potencial de análise e visualização, apoiado em bases conceituais fortemente ligadas a disciplinas correlatas, como Cartografia, Informática e técnicas da Matemática e Estatística. Os Sistemas de Informação Geográficas agrupam todas essas bases, além de oferecerem estruturas de dados que permitem empregar os processamentos de maneira adequada (LONGLEY *et al.*, 2013). O próprio desenvolvimento e integração de ferramentas/módulos voltados para o tratamento de dados hidrológicos, integrados aos Sistemas de Informação Geográficas, é um indicador importante dessa aproximação entre as duas ciências, Hidrologia e Geografia.

Pensar a constituição hidrológica de uma bacia hidrográfica (BOTELHO, 2005, 2011), recorte espacial mais que consolidado na ciência geográfica, significa, antes de tudo, realizar uma leitura das interações possíveis, dos elementos constituintes de tal paisagem (CARVER, 1991; JANKOWSKI, 1995; MALCZEWSKI, 2006), uma vez que a Geografia tem como uma de suas preocupações o estudo do relevo, das modificações antrópicas e das transformações nas paisagens.

A evolução tecnológica no campo da ciência geográfica traz, ainda, possibilidades de análise cada vez mais complexas, são exemplos dessas aplicações os dados provenientes de Sensoriamento Remoto (NASCIMENTO, 2016; SCHMUGGE *et al.*, 2002). Além do emprego tradicional dos sensores remotos, a análise geográfica do/no espaço atualmente avança a partir do uso de imagens com resoluções espaciais cada vez menores e mais refinadas, em especial no meio urbano, com fins de monitoramento do impacto da cobertura da terra e do impacto causado no escoamento superficial (LEE; HEANEY, 2003; MEJÍA; MOGLEN, 2010; NUNES, 2012; NUNES; BORBA, 2018; YAO; WEI; CHEN, 2016).

Não é exagero afirmar, portanto, que atualmente existe uma hidrologia de base geográfica, ambas as ciências se retroalimentam de suas bases conceituais,

metodológicas e instrumentais. A Geografia é, antes de tudo, uma ciência de síntese, pois “[...] não há como imaginar que uma ciência pode existir sem definir um campo de investigação próprio e, além disso, pretenda ser a síntese de todas as demais” (GOMES, 2009, p. 20). Fica evidente, nessa crítica, que mesmo sendo a Geografia uma ciência de síntese, ela não consegue alcançar a plenitude teórica-metodológica necessária para se tornar independente não apenas das ciências hidrológicas, mas de outras ciências também.

Por isso, advoga-se que a realização de uma leitura do ambiente hidrológico de captação da bacia hidrográfica por meio da hidrologia geográfica significa, inicialmente, orientar-se pelos referenciais teórico-metodológicos de ambas as ciências. Nesse propósito, os referenciais teórico-metodológicos da Geografia oferecem diferentes possibilidades de atuação, segundo diversas lógicas de estudos dos recursos hídricos, tais como apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Relações possíveis entre os conceitos geográficos e as análises hidrológicas em diferentes escalas de análise

Temas	Conceito geográfico	Escala de análise	Aplicação	Autores
Geopolítica da Água; Concentração e distribuição espacial; Relação demanda e consumo.	Espaço Geográfico	Global	Análises ligadas ao atendimento de demandas e resolução de conflitos internacionais. Definição de estratégias e outros.	Castro, Gomes e Corrêa (2000); Suertegaray (2001); Santos (2008); Corrêa (2003); Smith (1988).
Qualidade e quantidade da água; Preservação de nascentes; APP’s e outros.	Paisagem	Local Regional	Análises ligadas ao meio ambiente, urbano-rural; Modelagem de processos; Dinâmica e mudanças de uso e cobertura da terra e de seus impactos hidrológicos; Geoprocessamento e SIG.	Bertrand (1968); Ab’Sáber (1969, 1970, 2003); Christofoletti (1980, 1999); Ross (1994, 2006); Suertegaray (2001); Passos (2000); Tricart (1977).
Relações de poder, Conflitos e agentes, Usos e abusos da água.	Território	Local Regional Global	Análises ligadas aos usos e abusos da água; Gestão dos recursos hídricos e impactos.	Santos (2005); Saquet (2004); Haerbaert (2004); Souza (2013); Castro, Gomes e Corrêa (2000).

(Continua)

(Conclusão)

Temas	Conceito geográfico	Escala de análise	Aplicação	Autores
Disponibilidade hídrica, Escassez de água, Situação hídrica.	Região	Regional	Análises ligadas ao atendimento de demandas e resolução de conflitos e regionalizações da água em âmbito nacional.	Corrêa (1991); Haesbaert (2010); Souza (2013); Castro, Gomes e Corrêa (2000).
Perspectiva de análise da Geografia física:			Bacia hidrográfica como unidade de análise	
			Teoria Geossistêmica de Sochava (1977).	

Fonte: Organizado pelo autor (2020).

No Quadro 1 é possível visualizar as plausíveis relações entre os conceitos norteadores da ciência geográfica e as diferentes possibilidades temáticas da Hidrologia; além disso, destacam-se os principais trabalhos clássicos que abordam a temática pelo viés geográfico. Ressalta-se, porém, que as escalas de abordagem podem variar de acordo com o enfoque, os estudos podem adotar a bacia hidrográfica como unidade material de análise em ambas as ciências e, no âmbito da abordagem ambiental da bacia hidrográfica ou mesmo socioambiental, sugere-se a adoção da Teoria Geral dos Sistemas, como possibilidade de leitura integrada do espaço.

A partir desse entendimento sobre as relações estabelecidas entre a Geografia e a Hidrologia, tendo como ponto em comum o estudo voltado às bacias hidrográficas, abordam-se, no Capítulo II, os modelos hidrológicos no âmbito da ciência, bem como se tecem reflexões sobre seu uso, tipos de modelos e possíveis abordagens.

CAPÍTULO 2 – MODELOS, MODELOS HIDROLÓGICOS, MODELAGENS E SUAS INTERFACES COM OS SIGS

2.1 Modelagem hidrológica e sistemas de informação geográfica: aspectos gerais

As análises espaciais podem ser realizadas, segundo Câmara *et al.* (2004), a partir de três vertentes, a saber: (I) os eventos pontuais, (II) as análises de superfícies contínuas e as (III) análises de áreas que trabalham com dados e variáveis censitárias. A primeira vertente preocupa-se com a localização dos eventos analisados e seus padrões geralmente são desvendados por meio dos estimadores de intensidade, como o de *Kernel* e Dependência Espacial (CÂMARA; CARVALHO, 2004).

Já a segunda vertente trata da amostragem de eventos naturais, tais como uma amostra de solo ou de determinado mineral e posterior estimativa, bem como utiliza-se de métodos como a *Krigagem* (CÂMARA *et al.*, 2004). Por fim, a terceira analisa áreas com dados censitários, a exemplo dos levantamentos populacionais, e utiliza, em especial, os métodos estatísticos e de regressões (CÂMARA *et al.*, 2004). Em Hidrologia, a natureza dos eventos analisados e a forma como são coletados quase sempre conduzem para uma abordagem baseada nas superfícies contínuas, cada vez mais amparadas em novas tecnologias.

Dentre os avanços tecnológicos recentes pode-se destacar, no mínimo, sete tendências que envolvem, direta ou indiretamente, dados geoespaciais e SIG, a saber: i) a possibilidade de processamento de volumes cada vez maiores de dados; ii) a utilização de cubos de imagens, ou seja, dados de múltiplos satélites; iii) a sofisticação das técnicas de processamento; iv) a incorporação de linguagens de programação (Python, Java Script, R e outras) e o desenvolvimento de *scripts* para a automatização de rotinas de processamento em Sistemas de Informação Geográficas; (v) o surgimento de plataformas de processamento de dados globais em nuvem, a exemplo do *Google Earth Engine;* (vi) o surgimento de constelações de nano satélites, com disponibilidade de informações diárias; e (vii) o aperfeiçoamento crescente das tecnologias utilizadas em Drones e VANT, dentre outras tecnologias citadas por McCabe *et al.* (2017).

Diante disso, os modelos geoespaciais podem ser entendidos como aproximações de determinada realidade e permitem observar o comportamento de

um fenômeno no espaço/tempo perante um conjunto possível de dados e variáveis, controladas ou não (ALMEIDA; SERRA, 2017). Tais modelos, além de serem importantes para o entendimento da realidade, ajudam a prever e a estimar alterações futuras. Sendo assim, existe, atualmente, uma grande quantidade de modelos. A fim de mostrar essa variedade, Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) realizaram comparações entre 43 abordagens de modelagens diferentes e elaboraram o estado da arte acerca dessa temática, destacando os principais avanços e limitações ainda presentes na área.

Para Rennó e Soares (2007), um modelo hidrológico é definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Contudo, Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) ressaltam que, até o momento, não existe metodologia universal para simular um sistema de águas e suas interações, em especial, nos sistemas urbanos, pela sua complexidade (KREBS *et al.*, 2014). Dito isso, torna-se necessário idealizar a modelagem pretendida baseando-se nas características intrínsecas de cada ambiente.

Dessa forma, a escala de análise é um elemento preponderante. Entretanto, Rennó e Soares (2007) observam que a escala espaço-temporal de um modelo não diz respeito a padrões fixos, obedecendo prioritariamente à escala do objeto ou fenômeno em análise. Tal argumento vai ao encontro dos respectivos teóricos (KREBS *et al.*, 2014; SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015). Assim, a variação na escala pode acontecer tanto no tempo quanto no espaço, assumindo formas detalhadas em tempos e espaços reduzidos ou genéricos, incluindo regiões mais amplas ou intervalos de tempo estendidos.

A modelagem de dados espaciais tem avançado graças ao desenvolvimento de recursos computacionais e de métodos de coleta de dados remotamente controlados. Esses avanços têm impactado significativamente o campo da Hidrologia com uma série de aplicações possíveis (SCHMUGGE *et al.*, 2002), ainda mais após a integração dos SIG nessa ciência. A modelagem de dados geoespaciais é uma atividade complexa, pois exige grande quantidade de dados e conhecimento acentuado sobre o fenômeno estudado e suas inter-relações no sistema ambiental.

Fenômenos físicos, quando entendidos por meio de modelos hidrológicos e ecológicos, são exemplos de fenômenos com alto índice de variação do estado da superfície ao longo do tempo. Sua representação acurada depende da capacidade de

derivar equacionamentos matemático-formais que descrevam a variação espaço-temporal do fenômeno (CÂMARA *et al.*, 2003). Atualmente, os modelos se beneficiam de uma série de vantagens, dentre elas fatores como a maior disponibilidade de informações, tipos de solo, uso da terra, radares de monitoramento de chuvas e sensoriamento remoto do visível, que facilitam a concepção de modelos hidrológicos simplificados e distribuídos espacialmente (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015; TODINI, 2007).

Conforme Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) e Weng (2007), é possível afirmar que a urbanização torna-se um desafio para a modelagem, na medida que tais espaços se apresentam fortemente heterogêneos. Dessa forma, acrescentamos não existir uma modelagem universal para os sistemas urbanos, nem mesmo bases de dados específicas. Isso faz do pesquisador também um produtor das suas bases de informação, reafirmando a necessidade da utilização de resoluções espaciais elevadas e que avancem para além dos procedimentos realizados dentro de uma perspectiva da modelagem clássica (LECHIU; OLIVEIRA FILHO; SOUSA, 2012; NUNES; BORBA, 2018). Tal escolha implica na melhor distribuição do fenômeno modelado.

O processo de modelagem requer o desenvolvimento de algumas etapas, tais como: (i) a caracterização do sistema, problema ou fenômeno; (ii) o estabelecimento de hipóteses sobre o funcionamento do objeto modelado, ou seja, uma modelagem conceitual; (iii) a tradução dos processos em equações, fórmulas matemáticas ou parâmetros aceitos por um programa computacional que realize a simulação ou modelagem; (iv) a determinação dos valores dos parâmetros, podendo ser medidas reais, coletadas em campo ou valores de referências na literatura; (v) a execução do modelo; e (vi) os procedimentos para calibração, validação, testes de sensibilidade e estimativas de incerteza (PEEL; BLÖSCHL, 2011; SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015; TODINI, 2007).

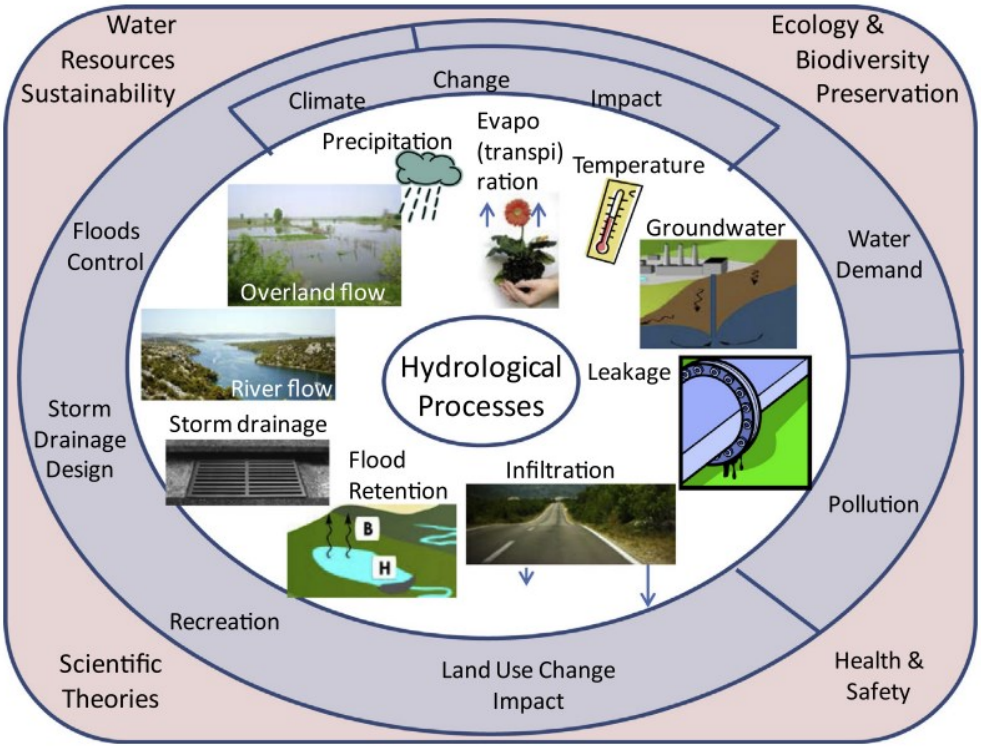
Os modelos têm utilizado, nos dias atuais, diferentes técnicas para gerarem resultados, tais como os modelos PCRaster e Dinâmica EGO, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que, respectivamente, se utilizam de uma abordagem baseada em álgebra de mapas (CARVER, 1991) e/ou autômatos celulares. Ambos realizam modelagens de fenômenos ambientais distribuídos no espaço. O modelo (*software*) TerraME também baseia seu método de modelagem na abordagem dos autômatos celulares. Já o modelo *Soil & Water Assessment Tool*

(SWAT) apresenta grande sofisticação, constituindo-se em um modelo computacional em escala de bacia, para modelagem de clima, solos, uso e manejo da terra, abastecimento de água e poluição, bem como erosão do solo, fertilidade e produção agrícola. Tal modelo é largamente utilizado no Brasil e no mundo.

Ao mencionar os modelos hidrológicos, Todini (2007), Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) e Yang, Herath e Musiake (2020) destacam que eles são desenvolvidos para avaliar os efeitos da urbanização na bacia hidrográfica, bem como para compensar a falta de dados confiáveis, a exemplo das medições constantes e inexistentes na maioria das cidades brasileiras, assim como para realização de previsões futuras, destacando cenários de mudança e seus impactos.

Analisando um total de 58 publicações no período de 1987 a 2014, Salvadore, Bronders e Batelaan (2015) preocuparam-se em verificar os enfoques dados às pesquisas, direcionados aos quesitos, às escalas espacial e temporal, ao uso de SIG e de Sensoriamento Remoto, às opções de roteamento de fluxos, aos avanços na descrição dos processos e à estimativa e avaliação dos parâmetros selecionados. Por meio dessas análises traz-se a Figura 5, na qual esses autores propõem escopos gerais e específicos da modelagem hidrológica.

Figura 5 – Propósitos da modelagem hidrológica urbana



Fonte: Salvadore, Bronders e Batelaan (2015).

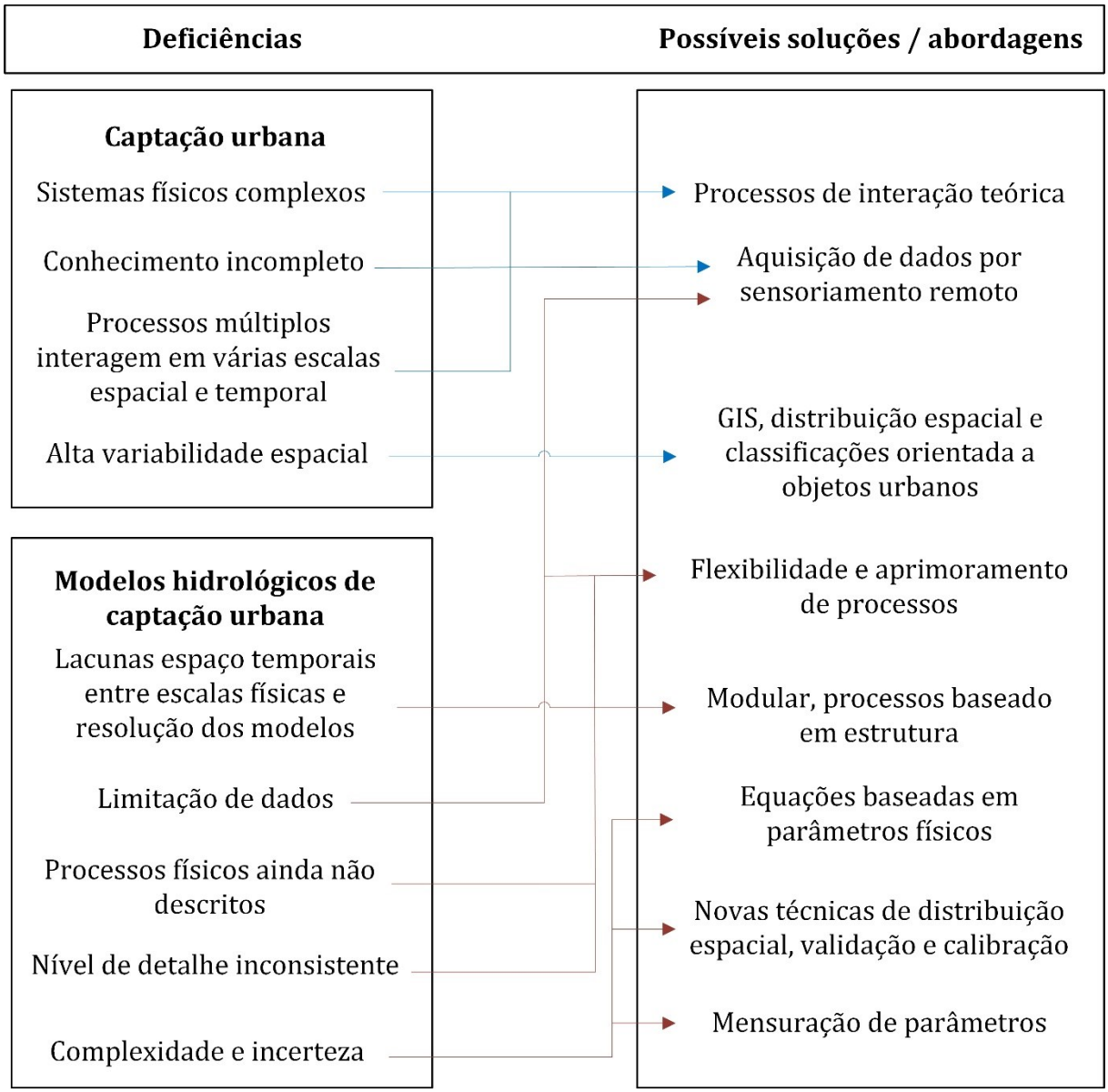
Os eixos gerais destacados na Figura 5 referem-se a: (i) sustentabilidade dos recursos hídricos; (ii) preservação da ecologia e da biodiversidade; (iii) saúde e segurança; e (iv) validação de teorias científicas. Das preocupações específicas fazem parte os aspectos: (i) climáticos; (ii) demanda por água; (III) poluição; (iv) mudanças de uso e cobertura da terra; (v) recreação; (vi) chuvas e drenagem pluvial; e (vii) controle de inundações.

Dentre as categorizadas identificadas por Salvadore, Bronders e Batelaan (2015), destaca-se a categoria representativa das coberturas impermeáveis e mudanças na cobertura da terra urbana, tendo como principal expoente a descrição detalhada do processo de infiltração urbana e a produção do escoamento (TUCCI, 2003). Assim, como objetivo visa avaliar os impactos das mudanças geradas pela cobertura e pelo uso do solo, por meio de simulações empregando, em geral, as escalas de análise que considerem a bacia de captação (PORTO; PORTO, 2008).

A disseminação das ferramentas de SIG foi um dos principais fatores responsáveis pelo desenvolvimento da Hidrologia e dos modelos hidrológicos distribuídos (PEEL; BLÖSCHL, 2011). A modelagem é uma função direta do seu objetivo, imprimindo, portanto, a necessidade de seu desenvolvedor selecionar o processo hidrológico que pretende simular e o nível de complexidade, em função da problemática envolvida (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015). Historicamente, dentre as abordagens possíveis em hidrologia urbana, cerca de 30% dos trabalhos analisados buscam compreender o impacto da perda de capacidade permeável do solo urbano, figurando como o eixo mais significativo dentre os analisados (SALVADORE; BRONDERS; BATELAAN, 2015).

Mesmo com parte significativa dos estudos voltados para a modelagem de sistemas urbanos, essa área apresenta ainda algumas deficiências. Na Figura 6, compartilha-se uma síntese desses aspectos e as possíveis soluções para os problemas da modelagem hidrológica moderna.

Figura 6 – Síntese da modelagem atual, deficiências e possibilidades de soluções



Fonte: Salvadore, Bronders e Batelaan et al. (2015), adaptada pelo autor.

Por mais que os SIG relativos ao campo da modelagem hidrológica moderna tenham proporcionado diversos avanços na obtenção e no tratamento de dados, velhas dificuldades continuam a desafiar os pesquisadores. Tais obstáculos estão direcionados à variabilidade espacial e limitação dos dados a representar de maneira adequada fenômenos como a chuva. No entanto, algumas soluções têm sido empregadas e podem tornar-se ainda mais eficazes. Destaca-se, como exemplo, os dados oriundos de sensores remotos (BERNE *et al.*, 2004) e a evolução de sistemas e técnicas de representação espacial de fenômenos distribuídos (MCCABE *et al.*, 2017). Além desses aspectos, outra vertente que tem se mostrado relevante para esse campo refere-se à modelagem de processos, apoiada em métodos de interação

teórica já existentes e em novas técnicas de distribuição espacial, validação, calibração e integração (DUAN *et al.*, 2021).

Pensando nessa diversidade de modelos, busca-se tecer, no próximo tópico, reflexões acerca das diferentes terminologias e possíveis classificações de modelos hidrológicos, focando no processo decisório para o desenvolvimento de operações dentro do campo da modelagem hidrológica.

2.2 Modelos hidrológicos: classificação, tipologias, finalidades e processo decisório

Os modelos hidrológicos, de acordo com Tucci (2005) e Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), têm apresentado grande desenvolvimento e um refinado aporte teórico-metodológico-conceitual nas últimas décadas. Tais aperfeiçoamentos constituíram verdadeiros avanços em termos de pesquisa e conhecimento das dinâmicas hídricas, de natureza atmosférica, superficial e subsuperficial. Dentre os desenvolvimentos possíveis, os modelos ficaram atrelados a duas possibilidades: aqueles ligados às grandes bacias hidrográficas e aqueles ligados a pequenas redes hidrográficas (TUCCI, 2001, 2005).

Ambas as abordagens para a condução dos modelos hidrológicos tinham seus problemas. Durante muito tempo, os modelos ligados às grandes bacias hidrográficas estiveram erradamente associados a concepções puramente ligadas a estudos empíricos, portanto, menos precisos e aplicados às grandes extensões territoriais e, na maioria dos casos, usados como exercícios de aproximação da realidade. Enquanto a segunda possibilidade se manteve ligada a certa concepção de precisão, nem sempre verdadeira, que procurava estudar de forma distribuída os fenômenos na bacia hidrográfica. Nessa mesma linha, também pode ser tomada como verdadeira a associação dos primeiros tipos de modelos direcionando as grandes bacias à concepção rural, já as pequenas bacias sempre estiveram correlacionadas às escalas urbanas.

Sobre tal discussão, Tucci (2005) já ressaltava a existência de uma abordagem mais recente, que busca utilizar modelos hidrológicos distribuídos, especialmente associados a modelos digitais do terreno e a técnicas de geoprocessamento, para a melhor representatividade espaço-temporal (ROUSSEAU *et al.*, 2011). Pensando nessas diferentes abordagens, utiliza-se, nesta tese, além das

possibilidades já citadas, técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial, algoritmos computacionais para modelagem de processos atuais e futuros e linguagem de programação em *R*.

Esse conjunto de processos permite traduzir, com mais clareza, o comportamento hidrológico resultante da interação da sociedade com o sistema hídrico (YANG; HERATH; MUSIAKE, 2000). A respeito disso, é importante diferenciar dois elementos presentes nos estudos com fins modeladores da realidade, a saber, os modelos e as simulações hidrológicas. O primeiro constitui uma “representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas” (TUCCI, 2005, p. 17).

Já as simulações hidrológicas, por sua vez, estão associadas à “heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos” (TUCCI, 2005, p. 17). Tal abordagem é capaz de garantir um caráter único às análises realizadas de acordo com os parâmetros físico-químicos adotados, objetivos e problemáticas envolvidas, variáveis e áreas de aplicação. Por conseguinte, pode-se observar, a partir do Quadro 2, algumas tipologias adotadas frequentemente nas literaturas especializadas e que tratam de modelos hidrológicos.

Quadro 2 – Tipologias de modelos hidrológicos e característica norteadora

	Característica norteadora
Contínuo x Discreto	
Um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo. Os sistemas discretos apresentam as mudanças de estado em intervalos discretizados.	**Tempo**
Concentrado x Distribuído	
Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial. Os modelos distribuídos, por sua vez, permitem que a bacia seja analisada de acordo com unidades regulares de área, ou seja, considerando a variabilidade espacial dos dados.	**Espaço**
Estocástico x Determinístico	
Os estocásticos permitem que variáveis aleatórias sejam envolvidas na modelagem e nem sempre produzem os mesmos resultados quando executados nas mesmas condições. Os determinísticos são modelos que produzem, segundo o seu conjunto de dados de entrada, os mesmos resultados sempre que executados nas mesmas condições de entrada.	**Variáveis**
Conceitual x Empírico	
O modelo conceitual permite a descrição da realidade por meio de equações que levam em consideração os processos físicos da bacia. O modelo empírico, por sua vez, é aquele que não possui relação direta com processos físicos, portanto, mais generalizante.	**Realidade**

Fonte: Tucci (2005), Zongxue (2010) e Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), adaptado pelo autor.

Observando as informações presentes no Quadro 2, é possível inferir que os modelos podem ser enquadrados em vários aspectos, ora direcionados aos parâmetros selecionados, ora aos objetivos definidos no estudo e à ciência norteadora da análise. Em um estudo hidrológico-geográfico, recomenda-se, portanto, a adoção dos modelos que primam: (i) pelo uso de parâmetros de tempo contínuos ou discretos; (ii) modelos espacialmente distribuídos; (iii) variáveis determinísticas; e (iv) parâmetros físicos da realidade física da bacia. Ainda conforme o tipo de estudo hidrológico e sua finalidade, os modelos podem ser classificados nas seguintes categorias, presentes no Quadro 3.

Quadro 3 – Categorias de modelos hidrológicos, características e aplicações.

Categorias	Características	Aplicações mais comuns
Precipitação-Vazão	Calcula a vazão de saída no exutório da bacia, por meio de uma precipitação de entrada	Avaliação do uso da terra; estimativas de séries de vazão; planejamento urbano, entre outros.
Vazão-Vazão	Calcula a vazão de uma seção do canal, por meio de um ponto a montante.	Previsão de cheias.
Hidrodinâmico	Sintetiza vazões de rios e redes de drenagem.	Simulação de alterações do sistema e efeitos do escoamento a jusante.
Qualidade da água	Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água.	Condições ambientais, eutrofização e impacto de efluentes.
Rede de canais e condutos	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto.	Usos múltiplos, rede de abastecimento de água, rede de irrigação.
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Simula condições de projetos e operação de sistemas.	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, entre outros.

Fonte: Tucci (2005), Zongxue (2010) e Devia, Ganasri e Dwarakish (2015), adaptado pelo autor.

A finalidade, o uso ou a aplicação envolvida na modelagem hidrológica definirá a categoria na qual se enquadra o modelo a ser utilizado. Um destaque, a título de exemplificação, refere-se à proposta deste trabalho, que, por ter como um dos objetivos analisar o fluxo de escoamento superficial nas três bacias de drenagem urbana selecionadas no recorte espacial, se utilizará da categoria precipitação-vazão, pois esta permite estimar o volume precipitado de chuva em vazão de água, sendo, dessa forma, a melhor opção para o desenvolvimento desta pesquisa.

O Quadro 3 apresenta um leque de possibilidades e aplicações, que não se esgota nas possibilidades por ele trazidas. Cada uma das categorias definidas mostra vários modelos já conhecidos e amplamente utilizados, tais como aqueles discutidos por Devia, Ganasri e Dwarakish (2015). Além da categoria a ser utilizada, torna-se

necessária a adoção de um método. Em vista disso, buscou-se selecionar, para esta pesquisa, o método racional, que tem sido utilizado por vários pesquisadores, como Schaake Jr., Geyer e Knapp (1967), Young, McEnroe e Rome (2009), Suryoputro *et al.* (2017), Bondeson (2021), Rohmat, Akbardin e Maknun (2021) e Coville, Endreny e Nowak (2020).

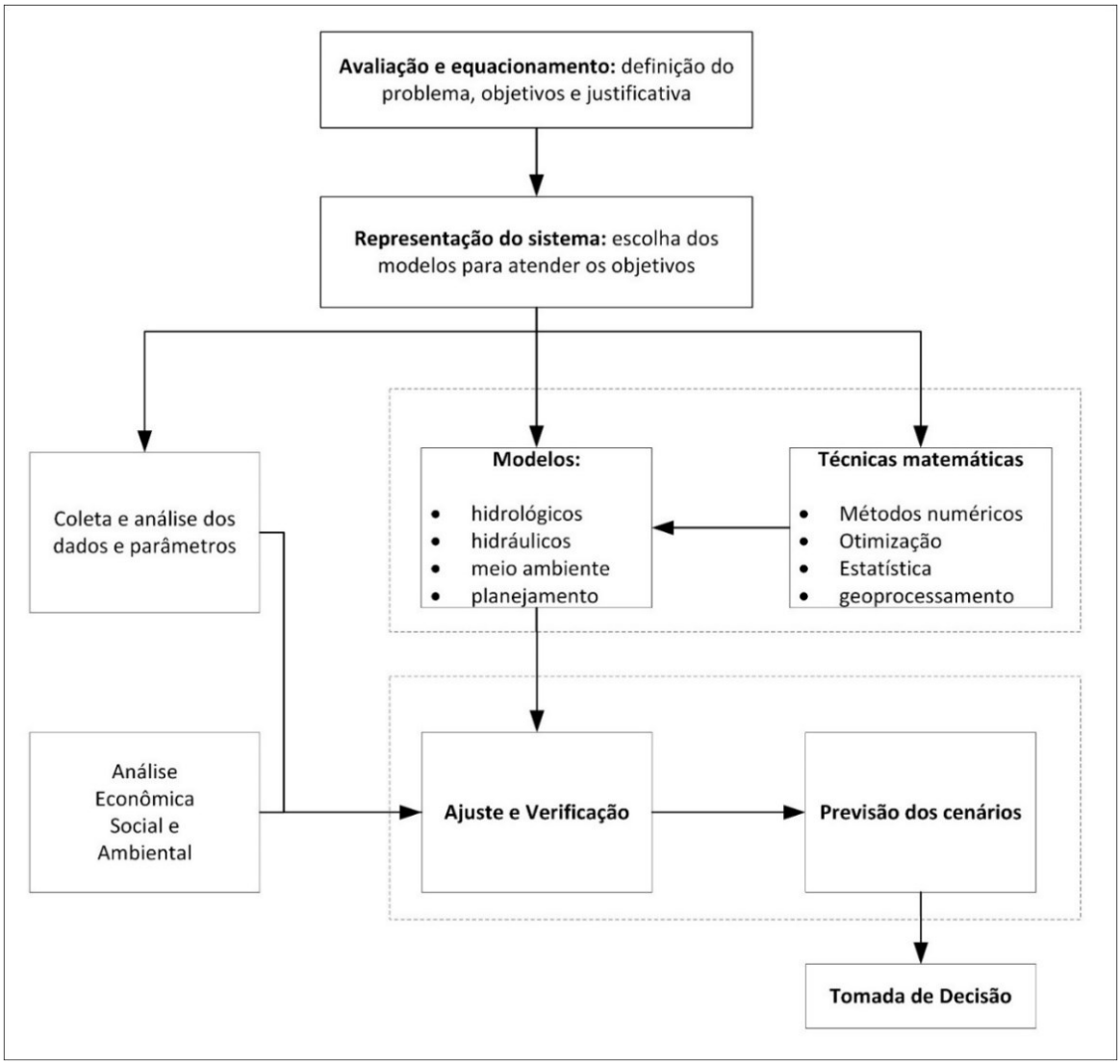
Tal escolha justifica-se por ser este um método indireto que: (i) permite a transformação de precipitação em vazão; (ii) por ser utilizado para bacias com pequenas redes hidrográficas; (iii) por considerar toda a área da bacia hidrográfica com igual intensidade de precipitação; (iv) por possuir equação simples, de fácil aplicação e implementação em SIG; e (v) por ser um método consolidado, usualmente empregado para dimensionar a capacidade de escoamento de redes de tubulações e dutos urbanos. Se utilizado da forma como proposta por Nunes (2012) e Nunes e Borba (2018), o método racional pode fornecer bons indicativos de modificações na dinâmica hidrológica de áreas urbanas. A formulação do método racional em sua concepção original é representada pela Equação 1:

$$Qmax = CiA/3,6 \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:
Qmax = vazão máxima estimada, em m³/s;
C = coeficiente de escoamento em superfície, valor adimensional;
i = média das intensidades máximas de precipitação;
A = área correspondente da bacia, em km².

Para se chegar à definição da categoria de modelo hidrológico e do método a ser utilizado é necessário definir algumas etapas e processos fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa. No caso do método racional, recomenda-se o trabalho desenvolvido por Tucci (2005), em que o referido autor apresenta as etapas de escolha do método para a implementação de um modelo hidrológico (Figura 7).

Figura 7 – Etapas de escolha do método para a implementação de um modelo hidrológico



Fonte: Tucci (2005), adaptado pelo autor.

Dentre as etapas elencadas, destaca-se a escolha do problema, dos objetivos e da justificativa, uma vez que, como mencionado anteriormente, tais elementos definirão a categoria e o método a ser utilizado. Adicionalmente às etapas de avaliação e equacionamento, representação do sistema, coleta de dados, definição do modelo, técnicas matemáticas, análise socioeconômica-ambiental, ajuste e verificação, previsão de cenários e tomada de decisão, se pode citar a definição dos recortes temporais e espaciais e, por fim, a definição do referencial teórico-metodológico a nortear todas as etapas mencionadas.

Nesta tese, desenvolveu-se, por meio de modelagens computacionais diversas, um procedimento técnico-metodológico de acompanhamento das modificações da cobertura da terra em bacias hidrográficas urbanas. Para tal, elegeu-

se como ponto principal da análise as modificações oriundas do processo de urbanização e seus impactos no escoamento superficial. Assim, procurou-se acompanhar as modificações nos principais parâmetros hidrológicos ao longo dos intervalos de tempo selecionados, reconhecendo padrões de crescimento urbano e projetando possíveis cenários futuros de cobertura da terra, com a finalidade de avaliar a amplitude das mudanças sobre o escoamento superficial.

Posto isso, a pesquisa se utilizou de uma série de parâmetros, modelos e técnicas matemáticas, tais como técnicas de classificação de imagens de sensoriamento remoto, utilização de modelos hidrológicos, métodos de predição e validação de solos, modelagem de expansão urbana e modelagem distribuída de cenários hidrológicos, que foram aplicados a três bacias hidrográficas urbanas pormenorizadas, a saber: bacia hidrográfica do córrego Quebra Anzol (BHCQA), do Alto Córrego Macambira (BHACM) e Córrego Vaca Brava (BHCVB). Tal recorte espacial é tratado no próximo capítulo, que se refere à “Caracterização da área de estudo”.

CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

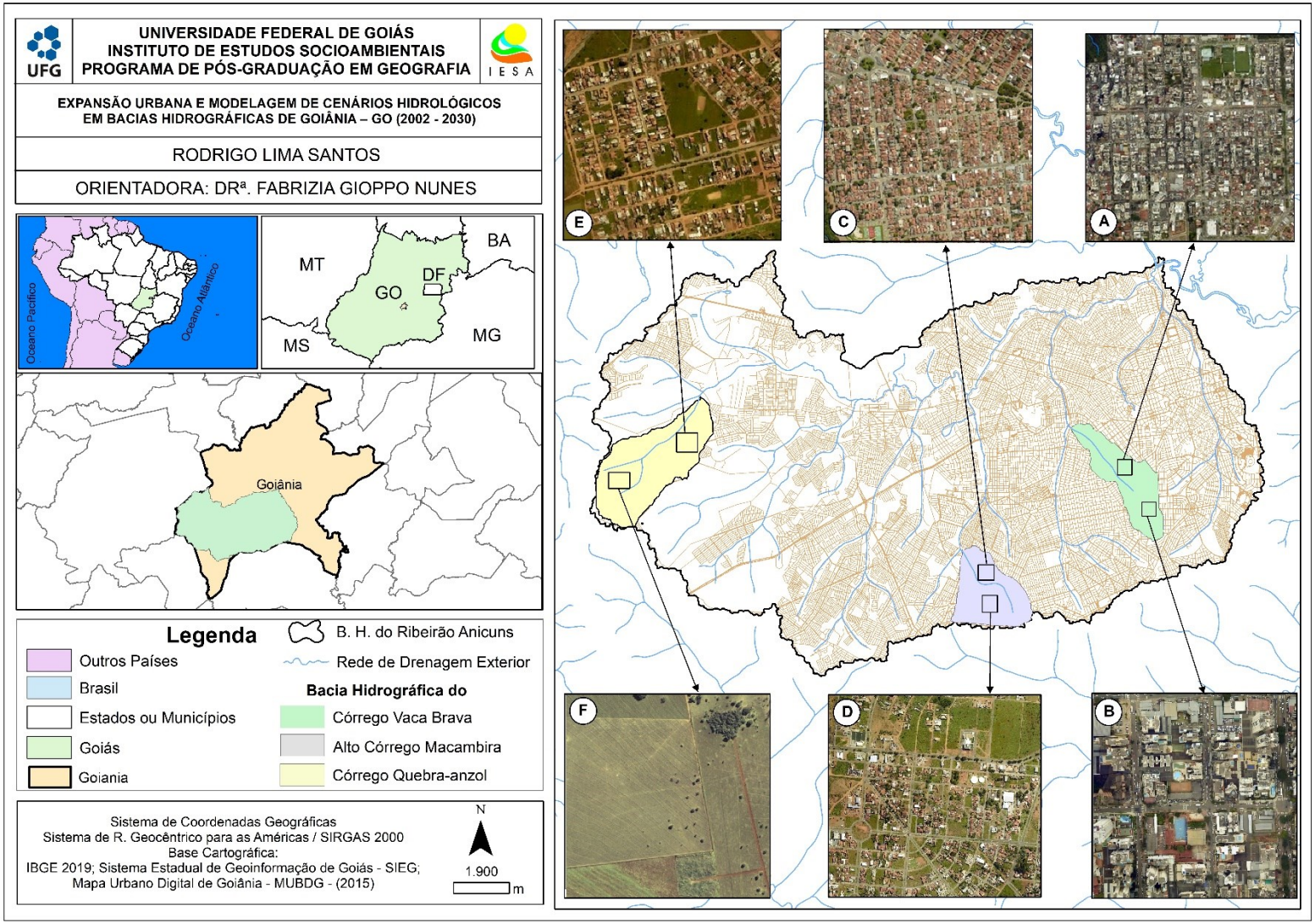
3.1 Localização da área de estudo

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas dos Córregos Vaca Brava (BHCVB), Alto Córrego Macambira (BHACM) e Quebra-Anzol (BHCQA), todas localizadas predominantemente no município de Goiânia (Figura 8). Suas áreas correspondem a 4,8, 9,1 e 4,9 km² e seus córregos possuem, respectivamente, 3,40, 4,34 e 3,22 km de extensão. Todas as três bacias localizam-se na área drenada pelo Ribeirão Anicuns, sem dúvida uma das bacias hidrográficas com maior extensão em área urbana da metrópole Goiânia.

A justificativa para a escolha desse recorte espacial se dá em função das condições relacionadas à cobertura da terra. As bacias do Córrego Vaca Brava e Alto Córrego Macambira apresentam características urbanas, uma vez que a maior parte de sua extensão é recoberta por áreas urbanizadas (Figura 8). Por mais que ambas as áreas apresentem essa característica, a configuração dos padrões de urbanização é distinta. Respectivamente, a BHCVB é composta por mais de 80% de área urbana, padrão de adensamento e verticalização elevados e distribuídos por toda a sua extensão, conforme mostram as imagens A e B, presentes na Figura 8.

Por sua vez, a BHACM é marcada por extensa área urbanizada, no entanto, um padrão de adensamento e verticalização menor que aquele da bacia anterior. A distribuição da cobertura urbana ocorre, em especial, nas áreas do baixo e médio curso, tendo suas áreas de recarga pouco urbanizadas, conforme mostram as imagens C e D, presentes na Figura 8. Já a BHCQA é marcada por um baixo percentual urbano, menos de 10% de áreas urbanizadas e em processo de consolidação. Em sua maior parte, há a presença de cobertura vegetal típica do cerrado, inicialmente caracterizados como áreas de formação florestal, e mais recentemente em virtude dos processos de conversão da paisagem predominam feições de formações arbustivas e campestres, como definido por Ribeiro e Walter (2008).

Figura 8 – Localização das Bacias Hidrográficas dos Córregos Quebra-Anzol, Alto Macambira e Vaca Brava



Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2020).

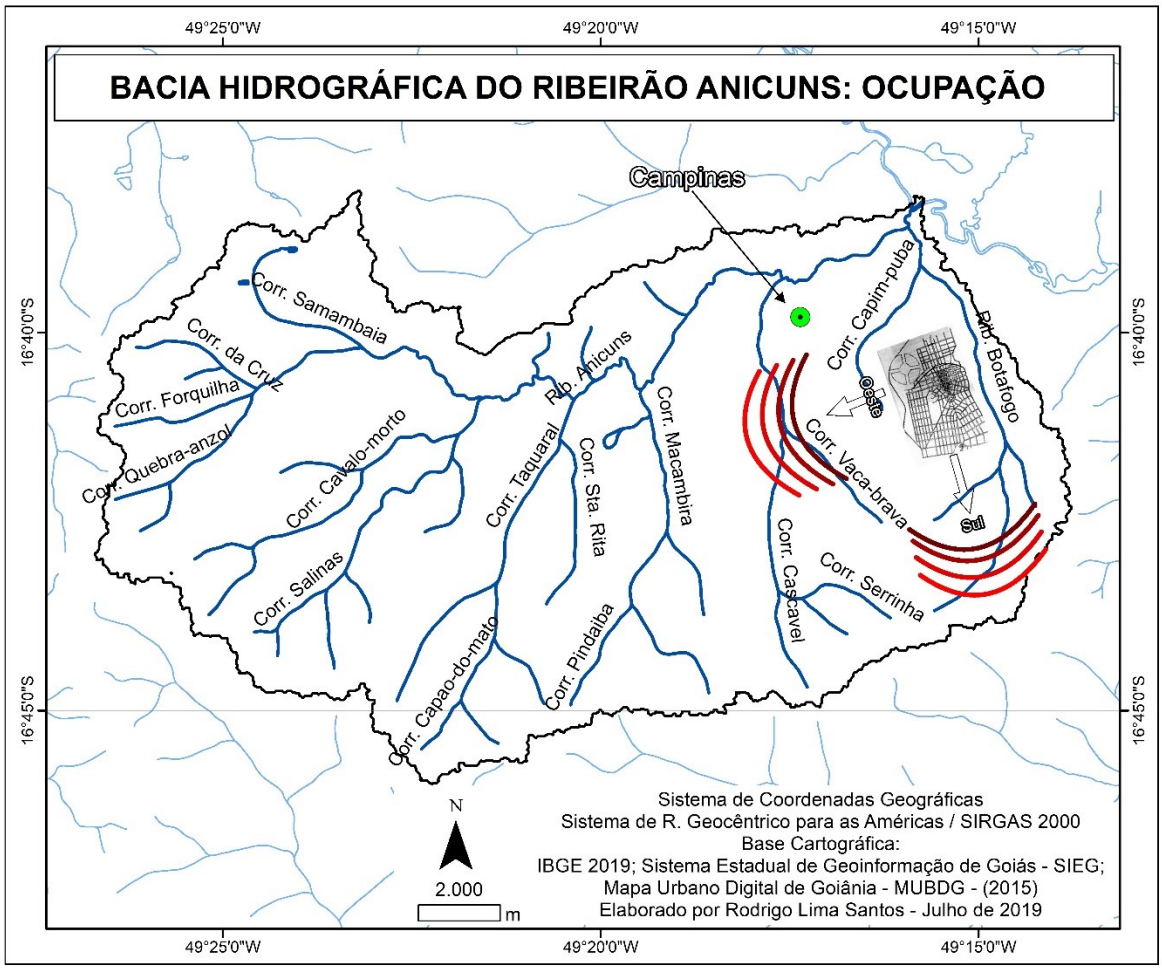
3.2 Processo de ocupação da Região Hidrográfica do Anicuns: município de Goiânia

A cidade de Goiânia surgiu por duas necessidades: a primeira delas correspondia aos anseios regionais do estado de Goiás na expectativa de buscar articulação entre as suas regiões produtivas, em especial sul e sudoeste; já a segunda refere-se ao âmbito nacional, que buscava modernizar o estado de Goiás, inserindo-o no modo de produção capitalista (OLIVEIRA, A. F., 2005). A transferência e a instalação da capital de Goiás na atual localidade ocorre na década de 1930 e, portanto, comparada a outras capitais brasileiras, Goiânia se configura como uma capital relativamente jovem e o marco inicial de uma ocupação mais sistematizada da região hidrográfica do Ribeirão Anicuns (OLIVEIRA, M., 2005). Ademais, antes mesmo da construção da capital já havia, no século XIX, a ocupação da bacia do Ribeirão Anicuns.

Na ocasião, foi pouco expressiva a atração de pessoas, fato que mudaria apenas no século seguinte, com o projeto de transferência da capital de Goiás para terras da bacia. Essa ocupação é iniciada pela sua porção leste/nordeste, com o plano de instalação de Atílio Correia de Lima, em 1933 (OLIVEIRA, A. F., 2005). Naquele momento, a atuação do Estado era notável, desde a implantação, o planejamento e o controle da nova cidade, exercendo “papel preponderante na formação original do espaço goianiense” (OLIVEIRA, A. F., 2005, p. 5).

Do ponto de vista hidrológico, nesse primeiro momento há um sítio urbano, que, junto a Campinas, ocupava uma porção pouco significativa da baixa bacia do Ribeirão Anicuns, margeando o Ribeirão Botafogo e o Córrego Capim-Puba (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018) (Figura 9). Desse modo, não é exagero referir-se à bacia como um ambiente ainda pouco impactado pelas transformações em curso. Para Nir (1983) *apud* Jorge (2011, p. 127), este é um período pré-urbano e nele existe “[...] alguma atividade de construção. Nessa etapa, ocorre aumento das vazões máximas, erosão acelerada e aumento da sedimentação nas drenagens e corpos d’água”.

Figura 9 – Configuração inicial de Goiânia, com o plano de instalação de Atílio Correia de Lima no contexto da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns

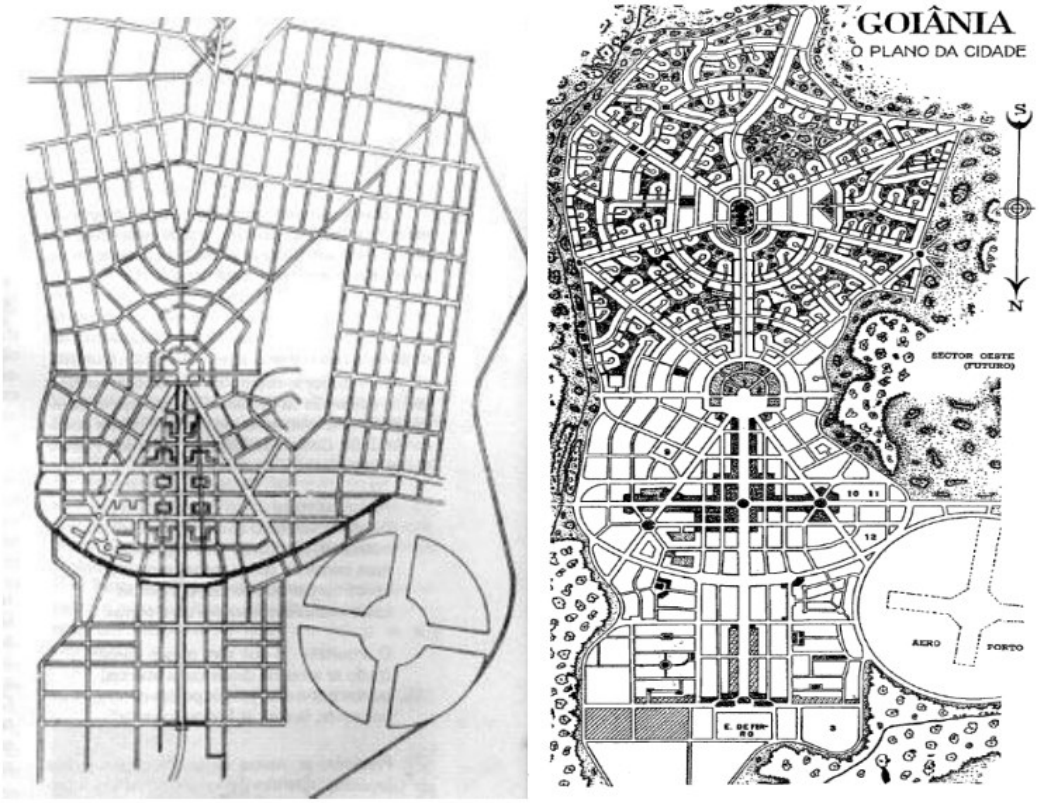


Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2019).[2]

Anos mais tarde, a cidade receberia outra contribuição, desta vez, de Armando Augusto de Godoy, que, em 1938, realiza algumas reformulações no plano inicial de instalação. Tais modificações dizem respeito à criação de novas zonas de ocupação e à tentativa de direcionar as futuras etapas de crescimento urbano, priorizando os setores Central e Norte, em seguida, o setor Sul, e, por último, o setor Oeste (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018). A cidade, porém, cresceria, como evidenciado na Figura 9, apenas nos sentidos Sul e Oeste, pois encontraria, como obstáculos, “a ferrovia, um relevo mais acentuado e os mananciais de abastecimento da capital” (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018, p. 150), localizados à Norte. Sobre os planos iniciais de ocupação da cidade destacam-se, na Figura 10, os períodos referentes aos anos de 1933 e de 1938.

[2] As linhas vermelhas representam o sentido de avanço da ocupação.

Figura 10 – Planos de ocupação iniciais da cidade de Goiânia. À esquerda, o de 1933 e, à direita, o de 1938



Fonte: Corrêa (1981) apud Nascimento e Oliveira (2018).

Goiânia nasce, *a priori*, como uma capital planejada, símbolo de modernidade. Na década de 1940, contudo, período posterior ao apresentado na Figura 10, o Estado perde o controle sobre o monopólio da atividade de expansão, passando essa a ser desenvolvida com bastante intensidade pelos agentes imobiliários. Uma vez que o código de edificações não mais previa a instalação de infraestrutura básica, por parte desses agentes, para fins de loteamento de novas áreas (OLIVEIRA, A. F., 2005), a malha urbana ainda pouco consolidada expandiu-se sem um planejamento adequado.

Ao fim da década de 1960, foi elaborado o Plano de Desenvolvimento Integrado de Goiânia (PDIG), que fez um diagnóstico da situação urbanística da cidade, identificando várias deficiências e apontando futuros problemas decorrentes da expansão urbana, tal como a "[...] ocupação de vales alagadiços do Ribeirão Anicuns e extravasamento para o município vizinho ao sul [...]" (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018, p. 152), fatos decisivos para o direcionamento da ocupação urbana no sentido Sul, Sudoeste e Oeste da bacia (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018).

Corrêa (1981) descreve o processo de ocupação de Goiânia em quatro momentos:

i) 1933 a 1935 – implantação do Plano Diretor;
ii) 1938 – crescimento da malha urbana em sentido Sul;
iii) 1940 a 1952 – crescimento da cidade no sentido Leste-Oeste; e
iv) 1950 a 1960 – expansão rumo a Oeste, estendendo-se de vários núcleos habitacionais separados por enormes vazios demográficos, portanto, um novo modelo de arranjo urbano.

Nas décadas seguintes, a bacia hidrográfica do Anicuns foi ocupada por um ritmo de crescimento muito rápido e intenso, a ponto de surgirem diversos problemas, tais como os apontados por Brito (2011, p. 21), que faz alusão aos

> [...] loteamentos clandestinos em áreas inadequadas, vazios urbanos, ocupação de fundos de vale, desmatamento sistemático, poluição das águas e do solo, explosão do crescimento vertical e a ocupação de terrenos geotecnicamente problemáticos.

A cidade passava, então, pelo período de construção, no qual grandes áreas são "[...] expostas a agentes climáticos, devido à execução de cortes e aterros, construção do sistema viário, edificações e instalação da rede de drenagem das águas pluviais e outros elementos da infraestrutura urbana" (NIR, 1983 *apud* JORGE, 2011, p. 127). Por consequência, revela-se um nível de alterações no sistema hidrológico da bacia moderado.

O plano diretor de Goiânia, datado do ano de 2007, representou alguns avanços ao considerar o grau de consolidação do espaço urbano como diretriz de planejamento. Dentre outros aspectos, estabeleceu quatro zonas especiais de ocupação, como demonstrado abaixo:

> 1) as Áreas de Adensamento em Aceleração, onde seria incentivado o maior adensamento populacional e de atividades econômicas; 2) as Áreas de Adensamento em Desaceleração, para onde seriam dirigidas ações de controle e redução do atual processo de densificação urbana; 3) as Áreas de Adensamento Básico, que apresentam baixa densidade e onde seriam admitidas a duplicação dos atuais graus de densidade; e 4) as Áreas de Restrição à Ocupação – definidas pela Carta de Risco ou pela existência de equipamentos especiais [...]. (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2018, p. 157).

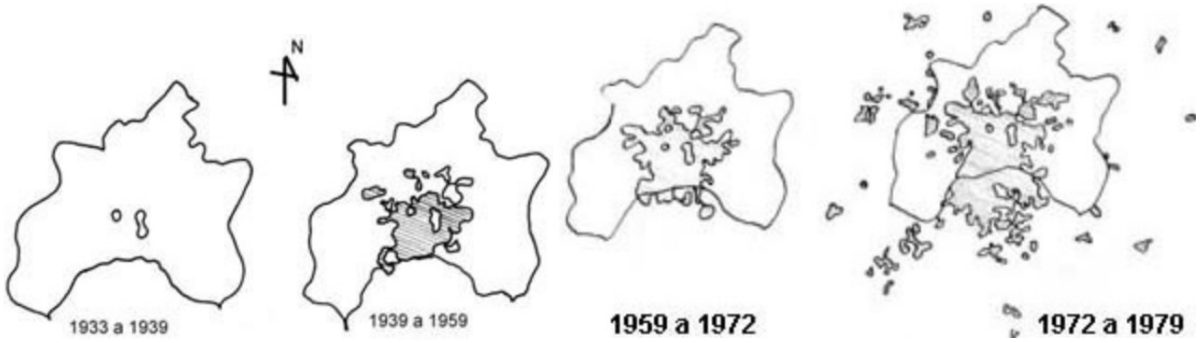
Nesse período, denominado sítio urbano consolidado, a cidade é marcada por uma nova topografia, “[...] impermeabilização extensiva, drenagem total ou parcialmente artificial, com descarga fora da área urbana. Nessa fase ocorre aumento do pico de cheia, com inundações” (NIR, 1983 *apud* JORGE, 2011, p. 127). As modificações na bacia hidrográfica já apresentam níveis elevados de perturbação, pois, de acordo com Silva (2011, p. 57), “as modificações executadas na paisagem para a implantação de cidades, afetam diretamente a dinâmica hidrológica, alterando os caminhos por onde a água circula”.

Em síntese, o processo de ocupação da bacia do Anicuns pode ser resumido conforme preconizado por Oliveira, M. (2005), nas seguinte etapas, apresentadas na Figura 11:

i) 1933 a 1950 – a criação do lugar;
ii) 1950 a 1964 – a ampliação do espaço;
iii) 1964 a 1975 – a concentração de lugares no espaço;
iv) 1975 a 1992 – a expansão urbana; e
v) 1992 até os dias atuais – os espaços urbanos segregados.

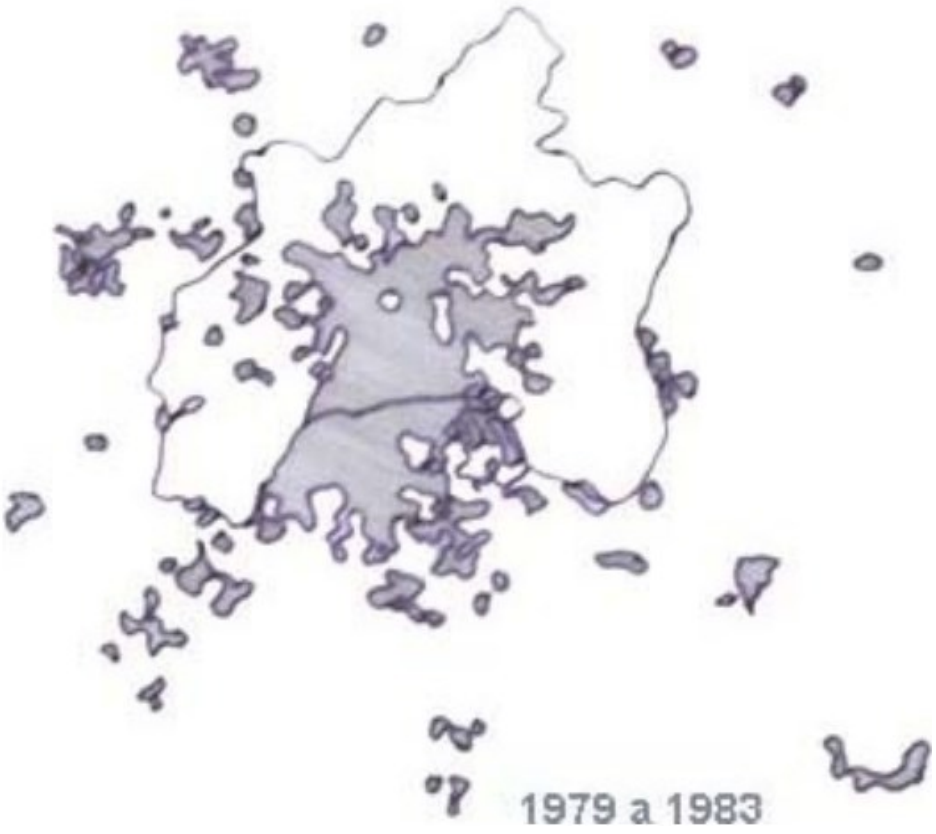
Na Figura 11, é possível visualizar também uma sistematização aproximada desse processo, com base em Vaz (2002 apud OLIVEIRA, M., 2005):

Figura 11 – Fases do processo de expansão urbana de Goiânia e áreas adjacentes



(Continua)

(Conclusão)



Fonte: Vaz (2002, p. 35) *apud* Oliveira, M. (2005).

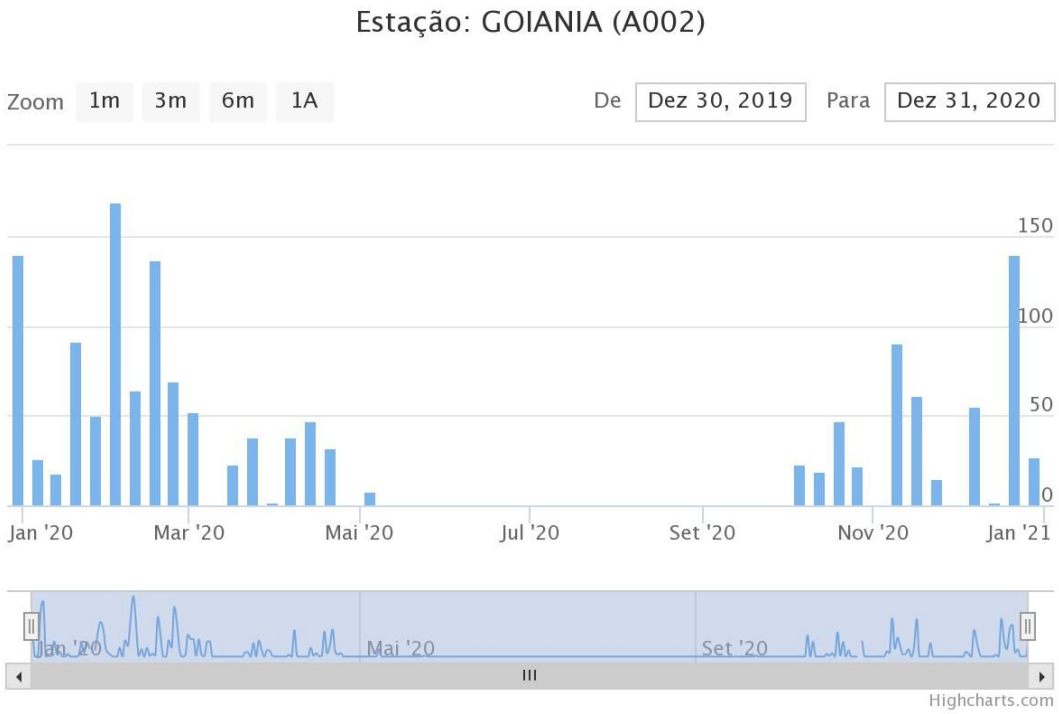
Ademais, à medida que ocorre um modelo de ocupação tão acentuado pela presença de coberturas urbanas, caso da cidade de Goiânia, especificamente entre os anos de 1972 e 1983, há também uma transformação em curso, ou seja, uma artificialização do ambiente de captação hidrológico. Essa passagem de uma cobertura natural para uma artificializada provoca, inicialmente, um desequilíbrio no processo natural vigente, em particular na hidrologia de superfície. Portanto, o ato de adjetivar o ambiente hidrológico em urbano/rural implica, inicialmente, aceitar o homem como agente transformador da paisagem.

3.3 As bacias hidrográficas em análise

As bacias hidrográficas localizam-se em uma área de clima tropical, na região Centro-Oeste do Brasil, cuja formação vegetal predominante é o cerrado (AB'SÁBER, 2003). A precipitação nessas áreas costuma ser concentrada em um período característico, que vai de novembro a abril. Já entre os meses de maio a outubro

predomina a estação seca, como observado na Figura 12, que exibe a precipitação mensal do ano de 2020, na qual é possível notar o regime anual de chuvas.

Figura 12 – Chuva mensal no ano de 2020

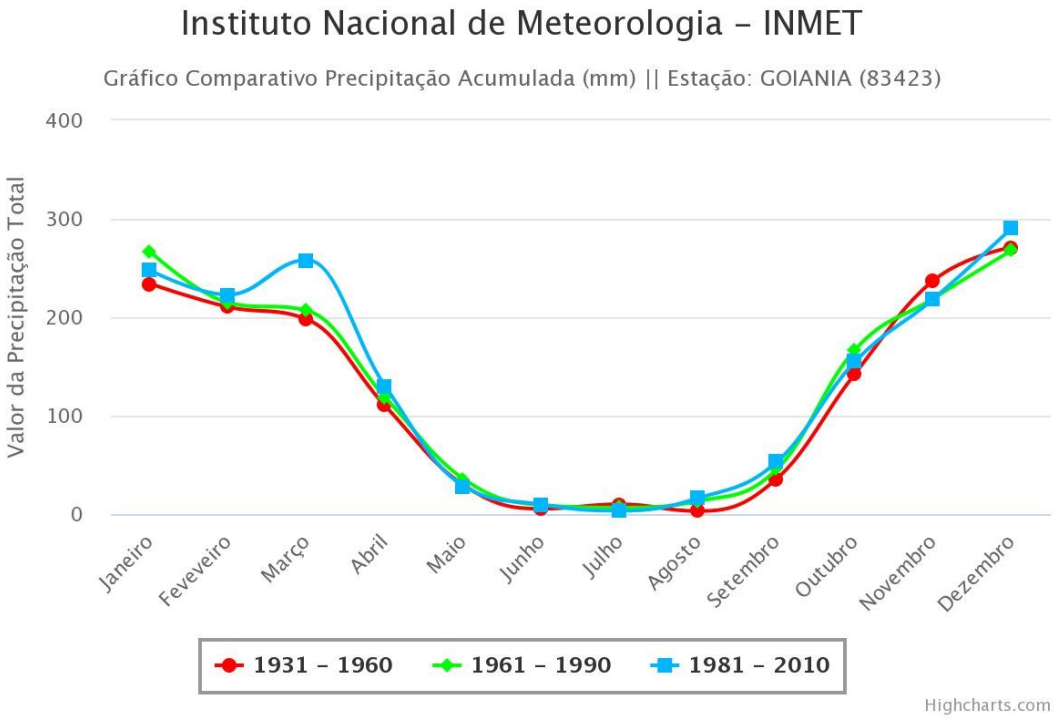


Fonte: Dados Inmet, estação 83423 – Goiânia-GO. Elaborada pelo autor (2021).

Observando os dados históricos apresentados a seguir, na Figura 13, nota-se que o comportamento dos totais precipitados em milímetros se mantém constante ao longo dos meses, entre os anos de 1931 a 1960 e de 1961 a 1990. Um comportamento anual muito semelhante ao já descrito na Figura 12, evidenciando bem a sazonalidade do sistema biogeográfico (BARBOSA; ARAÚJO, 2020) da região do cerrado brasileiro, marcado por períodos chuvosos e secos.

Considerando a precipitação distribuída mensalmente entre 1981 e 2010 (Figura 13), percebe-se haver acentuada elevação em relação às normais climatológicas anteriores no mês de março. Esse fato pode ser um indicativo de modificação no ciclo hidrológico local, no sentido de deslocamento anual do período de sazonalidade climática.

Figura 13 – Gráfico comparativo das últimas duas normais climatológicas e período recente

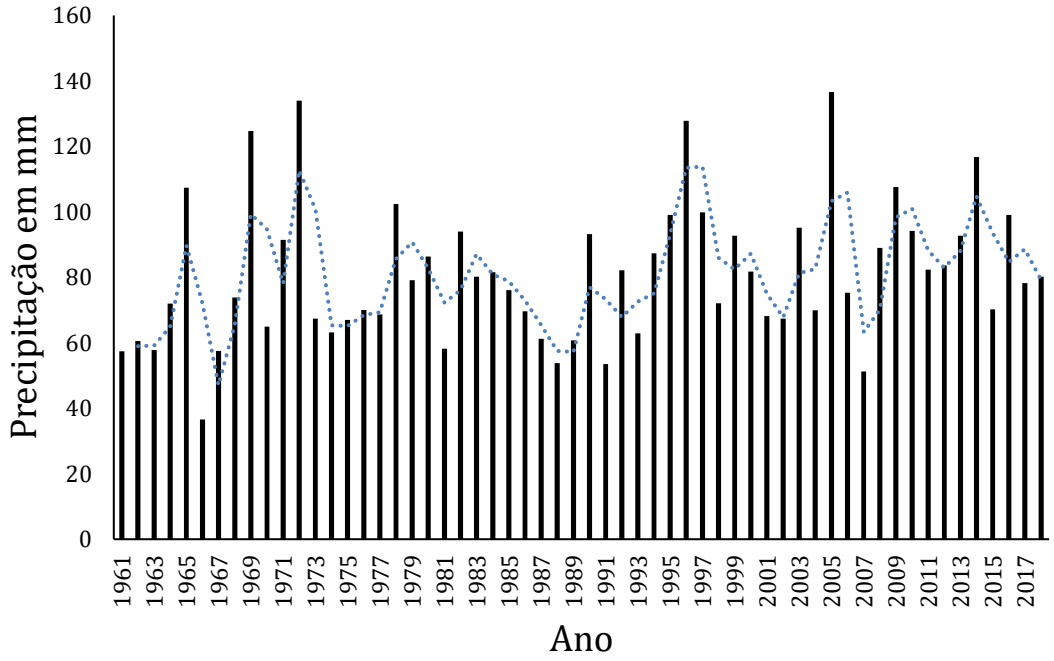


Fonte: Dados Inmet, estação 83423 – Goiânia-GO. Elaborada pelo autor (2021).

Considerando os eventos de precipitações extremas em Goiânia, levantados por Nascimento, Lima e Cruz (2019) e sistematizados na Figura 14, no período entre 1961 e 2018, as variações de acordo com a média móvel ocorrem mais ou menos com intervalos de três anos. Considerando apenas os cinco eventos extremos mais significativos, tem-se, respectivamente, os anos de 2005 (136,6 mm), 1972 (134 mm), 1996 (127,8 mm), 1969 (124,7 mm) e 2014 (116,8 mm).

Ademais, de acordo com Nascimento, Lima e Cruz (2019, p. 592), o evento mais recente registrado em Goiânia refere-se ao ano de 2014 e surpreende, pois, representou cerca de 91% da precipitação esperada para o mês de abril e causou grandes danos, como “problemas de apagões, pontos de alagamentos, arrastamento de veículos, congestionamento, destruição patrimonial e elevação de cerca de 50 cm dos cursos de água”.

Figura 14 – Precipitações extremas em Goiânia entre 1961 e 2018



Fonte: Nascimento, Lima e Cruz (2019), organizado e adaptado pelo autor (2021).

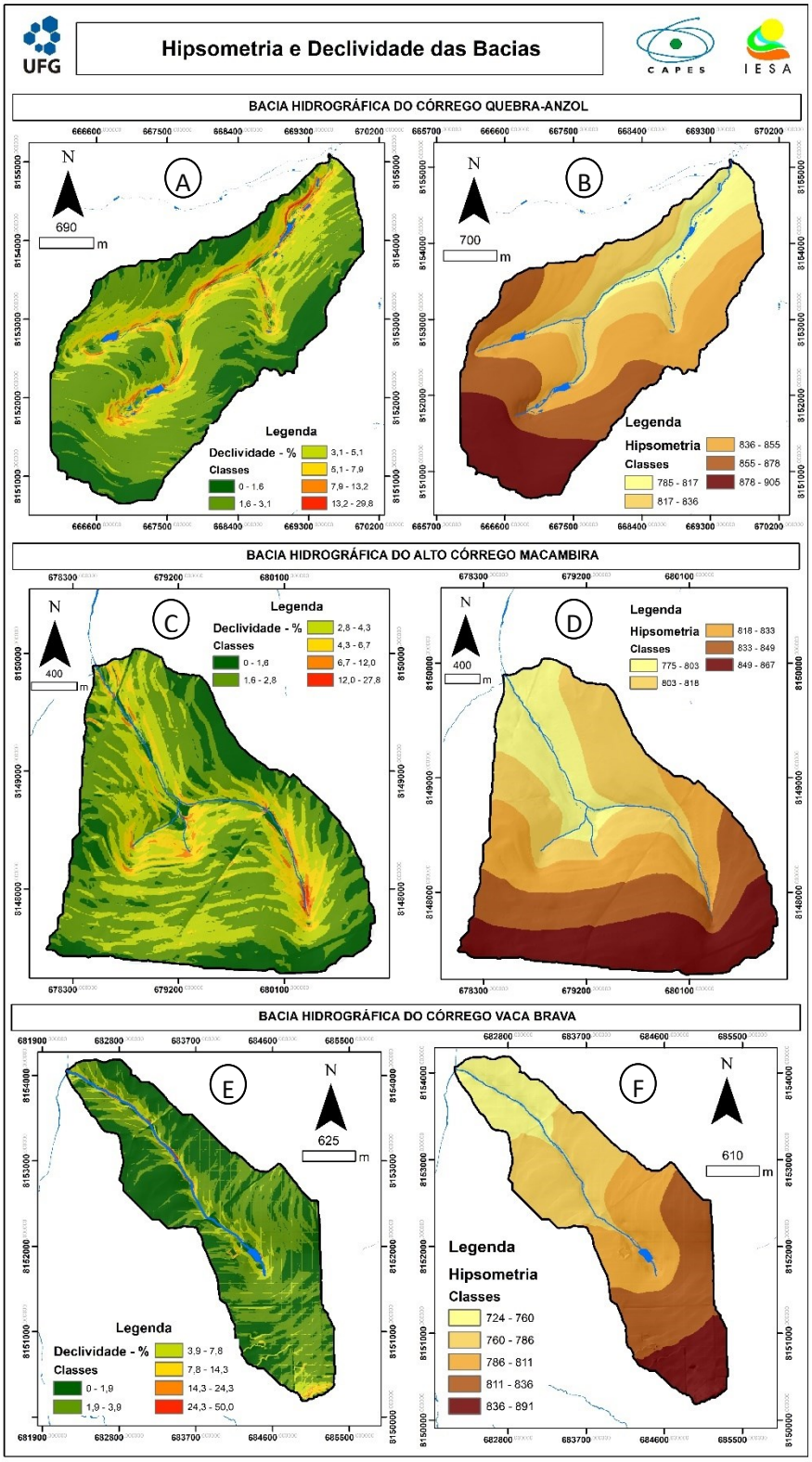
Do ponto de vista geomorfológico, a região hidrológica que compreende as bacias hidrográficas é constituída por planaltos, chapadas, terraços e fundos de vale (CASSETI, 1992). Já em termos topográficos, pode-se avaliar que as três bacias hidrográficas são marcadas por variações altimétricas entre 724 m e 905 m, configurando um desnível altimétrico que varia, em média, 181 m ao longo das áreas de captação à jusante.

As classes de hipsometria na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol (Figura 15 – A), revelam que ela representa as maiores altitudes em comparação às outras duas bacias. Suas áreas de recarga podem atingir até 905 m. Essa variabilidade mostra-se reduzida ao longo do curso d'água, em especial no médio e baixo curso, no qual se registram altitudes abaixo de 800 m, com amplitude altimétrica de 120 m.

Por sua vez, as declividades da área mencionada (Figura 15 – B) exibem uma bacia hidrográfica predominantemente plana, com a presença de variações pouco declivosas no seu interior e variações acentuadas somente ao longo dos canais de drenagem. Tal fato pode significar um relevo mais desgastado pela ação dos agentes exógenos e uma rede de drenagem pouco encaixada. Geomorfologicamente, a bacia

se encontra nas Chapadas de Goiânia, em associação com áreas de Planalto Embutido (CASSETI, 1992).

Figura 15 – Declividade e hipsometria das bacias hidrográficas em análise



Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2019).

A segunda bacia hidrográfica a ser apresentada é a do Alto Córrego Macambira. Tal recorte possui altitudes medianas em relação às demais e suas áreas de recarga podem atingir até 867 m (Figura 15 – C). Essa variabilidade espacial reduz-se de modo a atingir, no seu médio e baixo curso, altitudes abaixo de 775 m. Sua amplitude altimétrica é de apenas 92 m e as declividades (Figura 15 – D) exibem uma bacia hidrográfica predominantemente plana, com a presença de variações pouco declivosas, que podem ser encontradas na sua maioria ligadas aos canais de drenagem. Esse fato, relacionado à baixa amplitude, pode mostrar um relevo maduro e desgastado pela ação dos agentes exógenos e uma rede de drenagem possivelmente menos encaixada. Por fim, a geomorfologia dessa bacia é composta predominantemente pelo Planalto Embutido de Goiânia (CASSETI, 1992).

Em relação à terceira bacia hidrográfica, concernente ao Córrego Vaca Brava, ela possui as menores altitudes em relação às demais (Figura 15 – E). Sua maior altitude pode atingir 891 m e, na região de entorno do exutório, é possível encontrar altitudes de 724 m. Sua amplitude altimétrica é de 167 m, a mais elevada dentre as bacias. Suas declividades exibem uma morfologia predominantemente de relevo plano, com a presença de variações pouco declivosas, com exceção das declividades associadas aos canais de drenagem, onde se notam maiores variações (Figura 15 – F). Em suma, a geomorfologia da área possui constituição predominante de Chapadas de Goiânia (CASSETI, 1992).

As bacias hidrográficas analisadas nesta pesquisa apresentam-se em estágios diferenciados no que diz respeito à cobertura da terra, desenvolvimento da malha urbana, bem como à condição ambiental e total da cobertura da terra impermeabilizada em 2020. De modo a diferenciar as bacias em questão, segue-se a Tabela 2. Essas diferenças revelam a própria dinâmica complexa da ocupação numa área urbana sob influências também dinâmicas das atividades econômicas.

Tabela 2 – Detalhamento da condição urbana e ambiental das bacias hidrográficas

Bacia Hidrográfica	Desenvolvimento da malha urbana	Condição ambiental	Impermeabilização total da bacia 2020 em (%)
Córrego Quebra-Anzol	Pouco desenvolvida	Pouco alterada	7,17%
Alto Córrego Macambira	Médio desenvolvimento	Média a alta perturbação	49,09%
Córrego Vaca Brava	Muito desenvolvida	Bastante alterada	76,32%

Fonte: Pesquisa de campo e mapeamentos da cobertura da terra (2020).

Com base na Tabela 2, é possível inferir que a bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol apresenta o menor percentual de cobertura urbana, uma vez que, na sua área de abrangência, não são encontradas edificações acima de dois pavimentos. Em vista disso, tem ampla área de vegetação em seus estratos arbóreo, arbustivo e de gramíneas e, além disso, possui áreas de preservação permanente em bom estado de conservação. Sua condição ambiental é marcada pela pouca e recente representatividade da classe de cobertura urbana e baixo percentual de áreas impermeáveis.

A bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira traz, em termos de representatividade, cobertura urbana em parte significativa do baixo e médio curso. Conforme avaliam Silva et al. (2019), suas áreas de recarga ainda conseguem desempenhar papel hidrológico de infiltração considerável. Sua urbanização é predominantemente horizontal, porém, existem espaços com presença de vegetações composta por gramíneas árvores. Por apresentar um médio desenvolvimento da estrutura urbana, é notória a presença de praças, área comercial e residencial. O aumento expressivo das áreas urbanizadas tem modificado a condição ambiental dessa bacia, fato que corrobora com o aumento das áreas impermeáveis, representando um total de 49,09%.

A bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava, por sua vez, mostra um grande percentual de cobertura urbana, marcada, em sua imensa maioria, por cobertura verticalizada. Dispõe de poucas áreas de vegetação quando comparada às demais, ao passo que concentra importantes vias de circulação no meio urbano, tais como as avenidas T-1, T-2, T-4, T-63, entre outras. Ademais, possui importante área de conservação: o Parque Vaca Brava. O alto índice de urbanização tem como consequência a diminuição das áreas permeáveis, que, no caso dessa bacia, representa menos de 24%.

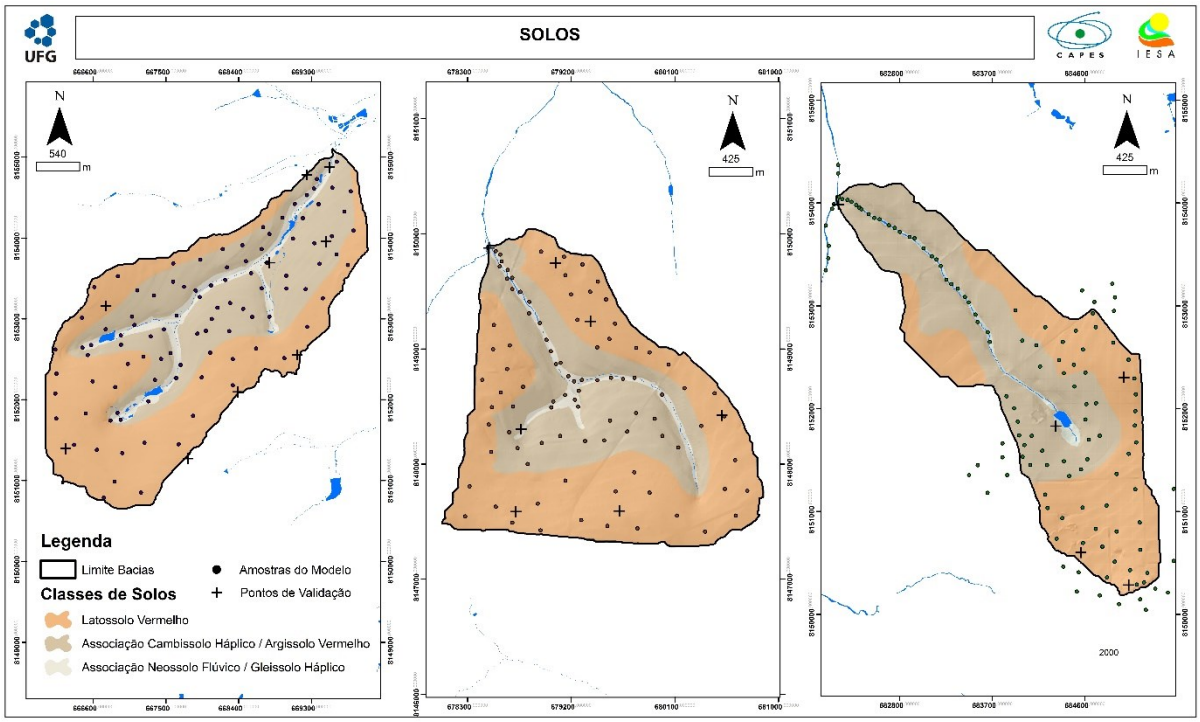
Tal configuração está relacionada ao sentido histórico de formação da cidade de Goiânia, uma vez que as áreas das regiões hidrográficas do Vaca Brava e Macambira foram as primeiras a serem ocupadas. Só recentemente esse movimento ganha força na região hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol. Nesta discussão, relacionada ao aumento da malha urbana e consequente aumento das áreas impermeáveis, destaca-se a questão dos solos.

A discussão sobre esse tema é importante ao se pensar as relações que podem ser estabelecidas entre o solo e o modelo hidrológico, uma vez que, ao entrar em

contato com o solo, os caminhos percorridos pela água são impactados de modo a ser considerada a interação com fragmentos de solos pouco antropizados e dispersos no ambiente, ou a interação com solos modificados e com características antrópicas, ou mesmo não haver contato com o solo, encontrando-se este recoberto por coberturas urbanas.

Dessa forma, elaborou-se a Figura 16, sobre os solos das bacias hidrográficas analisadas, que respondem por formações nas bacias aludidas, envolvendo áreas de latossolos vermelhos (LV) e associações entre cambissolo háplico e argissolo vermelho, além de neossolos flúvicos e gleissolos háplicos. É possível também observar os pontos amostrados para entrada no modelo e validação de campo. Destacamos, *a priori*, os latossolos, que, caracterizados por compreenderem solos em avançado estágio de intemperização, geralmente muito evoluídos, variam de fortemente a bem drenados, são solos profundos e fortemente ácidos (SANTOS *et al.*, 2018).

Figura 16 – Mapa de solos das bacias hidrográficas



Fonte: elaborada pelo autor (2020/2021).

Já os cambissolos são constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente, subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial. Devido à heterogeneidade do material, formas de relevo e condições climáticas, esse tipo de

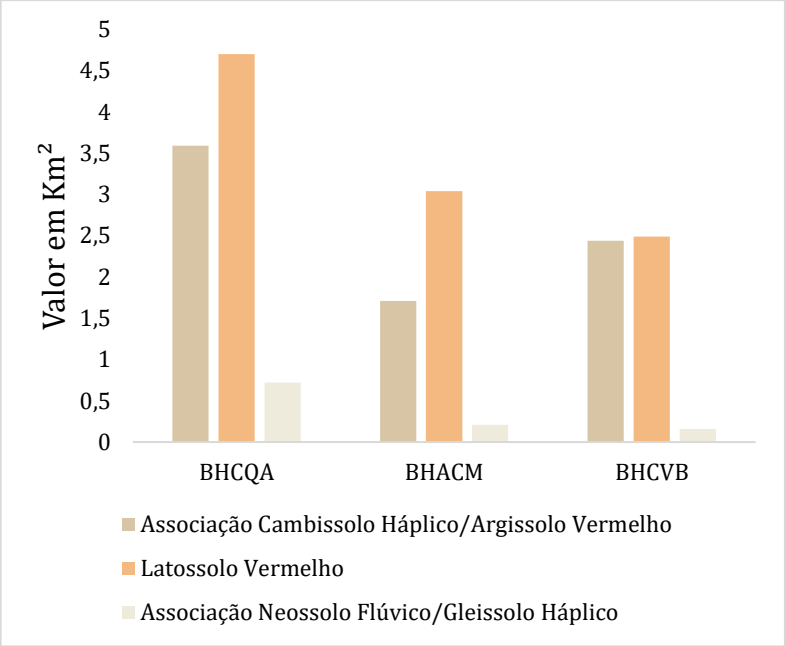
solo apresenta grande variabilidade e comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos. Os cambissolos háplicos geralmente não atendem aos critérios para se enquadrar como hísticos, húmicos ou flúvicos. No caso dos argissolos, eles são constituídos de material mineral, com horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E. Os argissolos vermelhos, em particular, exibem matiz 2,5 YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (SANTOS *et al.*, 2018).

Os neossolos são solos constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, com ausência de horizonte glei imediatamente abaixo do A e de horizonte vértico e plíntico imediatamente abaixo do horizonte A. Em especial, os neossolos flúvicos são provenientes de sedimentação aluviais com horizonte A assentado sobre camada ou horizonte C. Os gleissolos são constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm. Encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água, possuem manifestações acinzentadas, azuladas ou esverdeadas e são mal ou muito mal drenados em ambiente natural (SANTOS *et al.*, 2018).

Do ponto de vista da modelagem hidrológica, pensar a tipologia de solos e a interação destes com a precipitação, se faz necessário mesmo em ambientes altamente urbanizados, pois solos desempenham um papel muito importante no ciclo hidrológico. Ora oferecem resistência natural a infiltração da água e por sua vez, facilitam o processo de escoamento superficial e ora desempenham papel contrário, facilitando o processo de infiltração e atenuando o escoamento. Isto ocorre de acordo com o tipo de material constituinte, sua profundidade, textura e material mineral constituinte.

Em relação aos quantitativos de cada grupo de solos por bacia, a Figura 17 apresenta, em termos comparativos, cada um deles. A Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol possui 4,70 km² de latossolos vermelhos, 3,59 km² de associação entre cambissolos háplicos e argissolos vermelhos e 0,72 km² de associação entre neossolos flúvicos e gleissolos háplicos.

Figura 17 – Classes de solo e quantitativo por bacias hidrográficas



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira possui 3,04 km² de latossolos vermelhos, com 1,71 km² de associação entre cambissolos háplicos e argissolos vermelhos e apenas 0,21 km² de associação entre neossolos flúvicos e gleissolos háplicos. A Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava tem 2,49 km² de latossolos vermelhos, com 2,44 km² de associação entre cambissolos háplicos e argissolos vermelhos e apenas 0,16 km² de associação entre neossolos flúvicos e gleissolos háplicos.

Quanto ao aspecto da permeabilidade dos solos encontrados nas bacias, estes apresentam no geral boa capacidade de drenagem, favorecidos pela textura e profundidade, variando de moderadamente drenados a bem drenados no gradiente, que se estende da vertente aos fundos de vale. Sem presença de problemas estruturais geotécnicos.

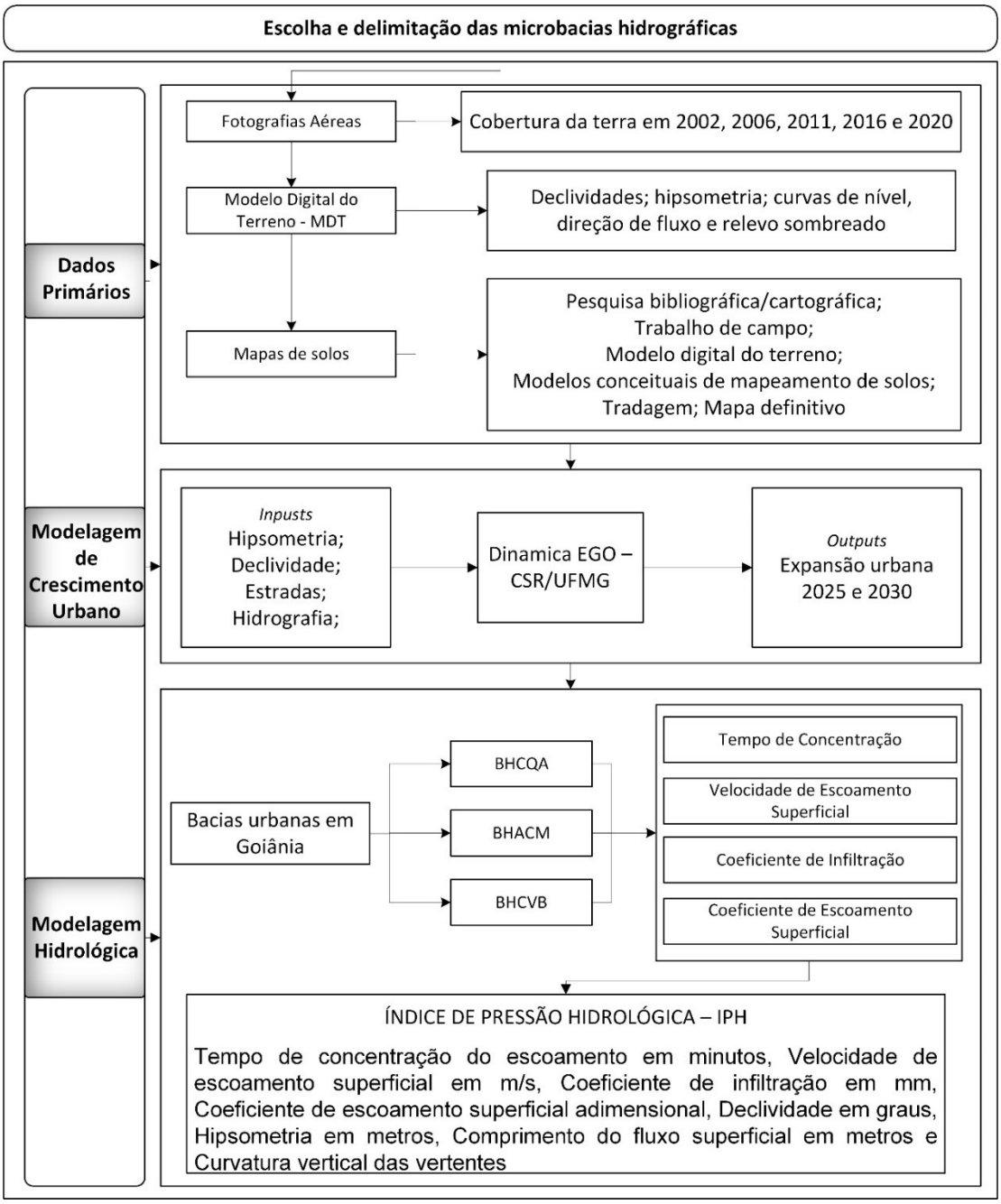
Cada classe de solo intervém de modo diferente o fluxo superficial de água, associado a todos os elementos já mencionados neste capítulo, como cobertura da terra, declividade, relevo, impermeabilização, regime de chuvas e nível de preservação antrópica na bacia. Assim, de modo a encaminhar as discussões aqui já tecidas, busca-se apresentar a metodologia utilizada para realização desta pesquisa no capítulo posterior.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA

4.1 Procedimentos metodológicos: base de dados

A metodologia se compõe de métodos diretos e indiretos, bem como nos dados e nas variáveis envolvidas na análise, ambos sintetizados na Figura 18, que apresenta as etapas da pesquisa.

Figura 18 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

A partir da escolha e da delimitação das bacias hidrográficas, realizou-se o processamento dos dados primários, compreendido pela aquisição e interpretação de fotografias aéreas. Os dados associados ao Modelo Digital de Superfície também foram obtidos e processados dando origem a MDT, declividade, hipsometria, direções de fluxos, dentre outros. A componente tipologia de solo foi modelada com auxílio da linguagem computacional R e em seguida validada por meio de levantamentos em campo, a partir do refinamento metodológico proposto por Santos (2019).

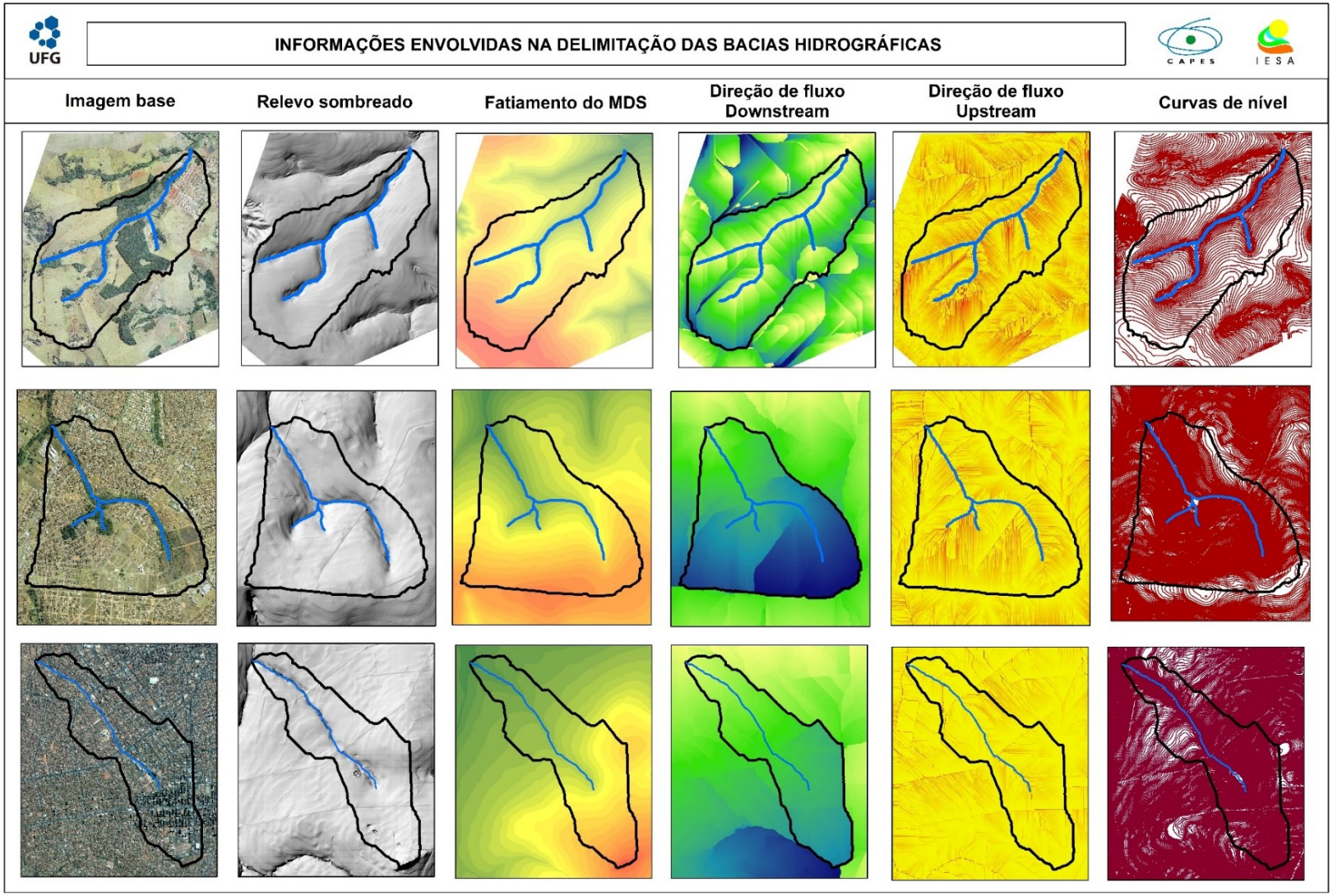
Os modelos utilizados constituíram-se principalmente na aplicação do *Dinâmica EGO,* empregado para a modelagem da evolução da mancha urbana e do método racional. O método racional, foi o escolhido para modelagem das variáveis hidrológicas, por sua versatilidade de aplicação. Ademais, o uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitiu avaliar de forma integrada os elementos da paisagem, além da execução de equações, combinadas com dados georrefenciados, das variáveis hidrológicas dessas equações. Por fim, para geração do Índice de Pressão Hidrológica foi construído um sistema de pesos, executados por meio de álgebra de mapas em ambiente SIG.

4.1.1 Delimitação das bacias de drenagem e correção da rede de drenagem

A delimitação da área de contribuição das bacias de drenagem foi realizada de modo manual, a partir da avaliação de um conjunto de dados específicos. Foi utilizado, para tanto, o Modelo Digital do Terreno (MDT); fotografias aéreas e os respectivos produtos originados de processamentos do MDT: relevo sombreado; MDT fatiado segundo suas classes de altitude; direção de fluxos, elaborada pelos modelos *downstream e upstream*; e as curvas de nível do terreno. A correção da rede de drenagem foi realizada via delimitação manual, com imagem de alta resolução espacial.

A Figura 19 ilustra a sequência de procedimento e os dados utilizados por bacias hidrográficas, constituída, respectivamente, pela delimitação da área de contribuição por meio das fotografias aéreas, relevo sombreado e modelo digital do terreno, que, em seguida, são complementados pela utilização dos modelos de fluxos superficiais da água em formato *downstream* e *upstream*, juntamente com a utilização de curvas de nível para melhor visualização dos divisores topográficos.

Figura 19 – Delimitação manual da área de contribuição das bacias hidrográficas em análise e dados processados



Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2019).

4.1.2 Fotografias aéreas

Os dados primários base desta pesquisa são fotografias aéreas oriundas de levantamentos realizados no município de Goiânia, nos anos de 2002, 2006, 2011 e 2016, contratados pela Prefeitura Municipal. O levantamento compreende os canais espectrais da região do visível, com resolução radiométrica de 16 *bits*. As resoluções espaciais das imagens/fotografias variam entre 40 cm e 1 m. Portanto, para efeito de padronização dos dados, houve a necessidade da reamostragem dos *pixels*. Assim, eles foram convertidos para 1 m de resolução espacial. As imagens do ano de 2020 foram obtidas por meio do *SAS.Planet*, um *software open source* que oferece acesso aos principais serviços de mapas *online*. Desse modo, foram realizados a visualização, o *download* das imagens georreferenciadas *Google Earth* e a compatibilização da resolução espacial dos *pixels*.

4.1.3 Delimitação das classes de mapeamento de cobertura da terra

Ao delimitar as tipologias das classes de cobertura da terra, pensou-se em dois aspectos fundamentais: a finalidade da classificação e a resolução disponível para os mapeamentos. Mediante esses critérios, foram selecionadas oito diferentes classes, representativas das condições da paisagem nas bacias hidrográficas estudadas.

Nesta etapa da pesquisa, as chaves de interpretação para além da proposta de classificação das imagens de sensoriamento remoto, permitiram também, a reflexão sobre os efeitos das precipitações, ao destacarem o potencial hidrológico das áreas urbanas e periurbanas. Este princípio, teve por base que os problemas hidrológicos ocorrem não em decorrência das precipitações mais sim, de suas repercussões no espaço. Tais repercussões, surgem em razão das mudanças no uso e na cobertura da terra.

Nesse sentido, o Quadro 4 mostra tais classes, suas características e seus aspectos hidrológicos, que, para efeito de análise, foram divididos em cobertura antrópica e não antrópica.

Quadro 4 – Detalhamento da chave de interpretação das classes de cobertura da terra, com destaque para suas características físicas e hidrológicas

Classe	Característica física	Potencial hidrológico em relação à bacia hidrográfica
Cobertura não antrópica		
Vegetação Estrato Arbóreo	Vegetação de médio-grande porte; Geralmente indivíduos arbóreos agrupados; Presentes em APP, parques, bosques ou praças.	Interceptação da chuva precipitada; Maior potencial de infiltração da água; Escoamento superficial do excedente de infiltração; Percolação para o nível freático; Aumento do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.
Vegetação Natural Estrato Arbustivo	Vegetação de pequeno-médio porte; Geralmente indivíduos arbóreos agrupados; Presentes em APP, parques, bosques ou praças.	Interceptação da chuva precipitada; Maior potencial de infiltração da água; Escoamento superficial do excedente de infiltração; Percolação para o nível freático; Aumento do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.
Lago – Massa d'água	Massas de água contínuas ou não.	Evaporação
Solo Exposto (Não compactado)	Solo exposto natural, sem modificações por processo antrópico.	Infiltração da água; Escoamento superficial do excedente de infiltração; Potencial de perda de solo (erosão/assoreamento de córregos); Percolação para o nível freático; Aumento do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.

(Continua)

(Continuação)

Classe	Característica física	Potencial hidrológico em relação à bacia hidrográfica
Cobertura não antrópica		
Gramínea Não Compactada	Gramíneas naturais, não compactadas, sem a presença de atividade antrópica.	Potencial de infiltração da água; Escoamento superficial do excedente de infiltração; Percolação para o nível freático; Aumento do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.
Cobertura antrópica		
Área Edificada	Construções com finalidade residencial ou comercial; verticalizadas ou não.	Pouco potencial de infiltração da água; Capacidade permeável reduzida; Potencialização do escoamento superficial; Diminuição do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.
Superfície Pavimentada	Superfícies com permeabilidade reduzida, tais como estacionamentos, ruas e avenidas livres de edificações.	Pouco ou nenhum potencial de infiltração da água; Potencialização do escoamento superficial; Diminuição do tempo de concentração – (*Tc*) da água na bacia.
Solo Compactado (Solo retificado/terraplenagem)	Solo exposto, modificado por processo antrópico ou transportado, tal como terraplenagem e/ou nivelamento do terreno.	Infiltração reduzida da água; Escoamento superficial do excedente de infiltração; Aceleração da perda de solo (erosão/assoreamento de córregos); Percolação reduzida para o nível freático;

(Continua)

(Conclusão)

Classe	Característica física	Potencial hidrológico em relação à bacia hidrográfica
Cobertura antrópica		
Gramínea Compactada	Gramíneas naturais ou sintéticas, compactadas pela atividade exercida sob elas;	Potencial de infiltração da água reduzido; Escoamento superficial do excedente de infiltração aumentado; Percolação para o nível freático reduzida; Diminuição do de concentração tempo – (*Tc*) da água na bacia.

Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2019).

Os dados apresentados neste quadro representam os parâmetros, ou seja, as chaves interpretativas, utilizadas para classificar as fotografias/imagens e gerar os mapas de cobertura da terra. Tais informações forneceram subsídios tanto para a modelagem do crescimento urbano quanto para as estimativas de escoamento superficial.

4.2 Execução do mapeamento de cobertura da terra

A classificação foi executada a partir das fotografias aéreas reamostradas para 1 m de resolução espacial. Posteriormente, utilizou-se o algoritmo S*egment Mean Shift,* presente na versão 10.6.1 do *ArcMap*, sob licença estudantil, com a finalidade de reduzir/homogeneizar os detalhes espectrais internos das classes. Tal recurso exige cuidados, pois o usuário deve realizar testes em busca do resultado que melhor se adéque ao tipo de imagem a ser processada. Nesse caso, imagens do meio urbano com alta variabilidade espectral.

De posse das imagens processadas e das chaves de interpretação, foram geradas as bibliotecas/arquivos de assinaturas espectrais, que, posteriormente, foram separadas, automaticamente, em um total de 30 classes diferentes, podendo elas ser consideradas amostras de treinamento coletadas de modo automático pelo SIG. Em seguida, de posse das amostras de treinamento, foi aplicado o método de classificação *Maximum Likelihood Classification*. Neste, o algoritmo classificador assume que a imagem é composta por *pixels* distribuídos e calcula a probabilidade de

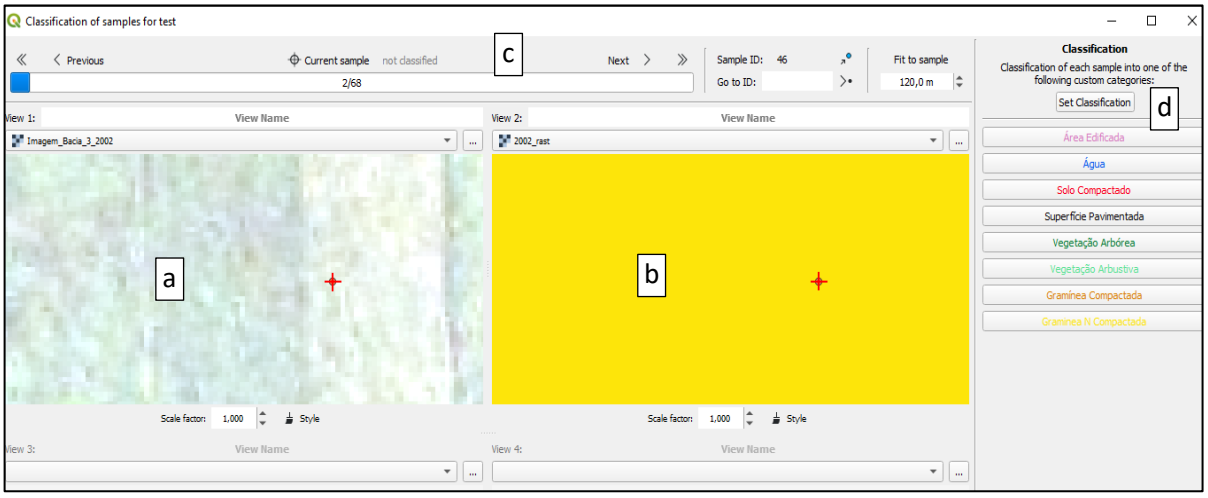
determinado *pixel* pertencer a uma das classes delimitadas. Posteriormente, as classes geradas passaram por processo de enquadramento na chave de classificação estabelecida, assim como eliminação de ruídos e inspeção visual.

4.2.1 Parâmetros para exatidão da acurácia dos mapas

A avaliação da acurácia dos mapas de cobertura da terra foi realizada com auxílio do *complemento* (*plugin*) denominado *AcATaMa – Accuracy Assessment of Thematic Maps*, que opera vinculado ao Sistema de Informação Geográficas (SIG) Qgis *Desktop*, atualmente na versão estável 3.4.15. O AcATaMa é baseado na inspeção visual de amostras, criadas aleatoriamente e estratificadas segundo a significância de cada classe temática no mapeamento que se deseja validar.

Considerando a resolução espacial das imagens, a área da bacia, a confusão média percebida entre as classes durante a fase de correção e os ajustes dos mapas gerados, foi definido um limiar de 10 inspeções por classe/ano em cada uma das três bacias analisadas. A Figura 20 representa a inspeção visual das amostras, a janela ao lado esquerdo (a) configura a imagem digital utilizada e, ao lado direito, a classificação (b). Na parte superior da Figura 20, representada pela letra (c), percebe-se o andamento do processo, bem como as possibilidades de enquadramento das amostras, representadas na imagem pela letra (d).

Figura 20 – Procedimento de inspeção visual das amostras estratificadas por classe/ano/bacia



Fonte: Organizada pelo autor (2019).

Por sua vez, a Exatidão Global dos mapas pode ser consultada na Tabela 3. Dentre os resultados obtidos, é possível considerar a acurácia global elevada, com valores máximos e mínimos, respectivamente iguais a 0.96 e 0.72, e a média por bacia igual a 0.8.

Tabela 3 – Acurácia total da classificação de cobertura da terra, dada por bacias e anos

Bacia	Anos mapeados					Acurácia média
	2002	2006	2011	2016	2020	
Bacia do Córrego Quebra-Anzol	0.89	0.75	0.85	0.81	0.80	0.82
Bacia do Alto Córrego Macambira	0.86	0.76	0.72	0.88	0.85	0.81
Bacia do Córrego Vaca Brava	0.96	0.96	0.80	0.75	0.81	0.85

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

4.3 Processamento do modelo digital de terreno – MDT

O Modelo Digital de Superfície (MDS) foi obtido por meio do levantamento aerofotogramétrico do ano de 2016, requerido pela prefeitura de Goiânia e executado por empresa privada. Como instrumento/técnica de levantamento foi utilizado um sensor *Light Detection and Ranging – LIDAR*, um sistema que emite milhares de pulsos eletromagnéticos sobre a superfície, de modo que, ao retornarem, são medidos, possibilitando o levantamento detalhado de todos os elementos da superfície imageada e representados, inicialmente, por nuvem de pontos.

O MDS, com resolução espacial de 4,799 metros, foi posteriormente reamostrado para 5 metros, de modo a facilitar os processos da modelagem por não conter números fracionados. Para a utilização nesta pesquisa, foi convertido em Modelo Digital de Terreno (MDT), processo que implica a eliminação dos elementos que não correspondem ao nível da superfície considerada, seguida da interpolação das áreas subtraídas inicialmente. Esse procedimento foi realizado pelos responsáveis técnicos da prefeitura municipal. Coube a este pesquisador analisar o modelo, que precisou passar por correções hidrológicas, com a finalidade de eliminar possíveis inconsistências ou discrepâncias de altitude notáveis entre *pixels* vizinhos.

4.4 Trabalho de campo

Os trabalhos de campo foram realizados no ano de 2020.2 e 2021.1 e consistiram na operacionalização de duas etapas distintas: a primeira refere-se à validação dos mapeamentos de solos e a segunda, à validação dos mapeamentos de cobertura da terra. Ambas tiveram como etapa inicial a pré-validação da área utilizando imagens de Sensoriamento Remoto de alta resolução espacial de 2 m e resolução temporal compatível com os anos mapeados. O mosaico de fotografias de campo, apresentado na Figura 21, ilustra as diversas etapas de inspeção visual realizadas *in loco*.

Figura 21 – Mosaico de fotografias de procedimentos realizados em campo

Fonte: Pesquisa de campo (2020.2/2021.1), elaborada pelo autor (2021).

Dentre os elementos observados *in loco*, como mostram as fotografias presentes na Figura 21, são destacados: a estrutura urbana para escoamento de águas pluviais (fotografia A); os impactos do fluxo superficial urbano em loteamento não consolidado (fotografia B); as áreas de pastagem (fotografia C); e a área urbana adensada e verticalizada (fotografia D).

Em síntese, a etapa de campo consistiu na visita de pontos pré-definidos para inspeção visual. Ao todo, foram visitados 10 pontos em cada bacia hidrográfica, nos quais foram realizadas observações e comparações com os mapeamentos elaborados, bem como a análise de perfis de solo, via tradagem manual e registros fotográficos. Além disso, foram realizadas, mesmo que de modo limitado, em decorrência da pandemia de Covid-19, conversas informais com moradores sobre a dinâmica hidrológica da região.

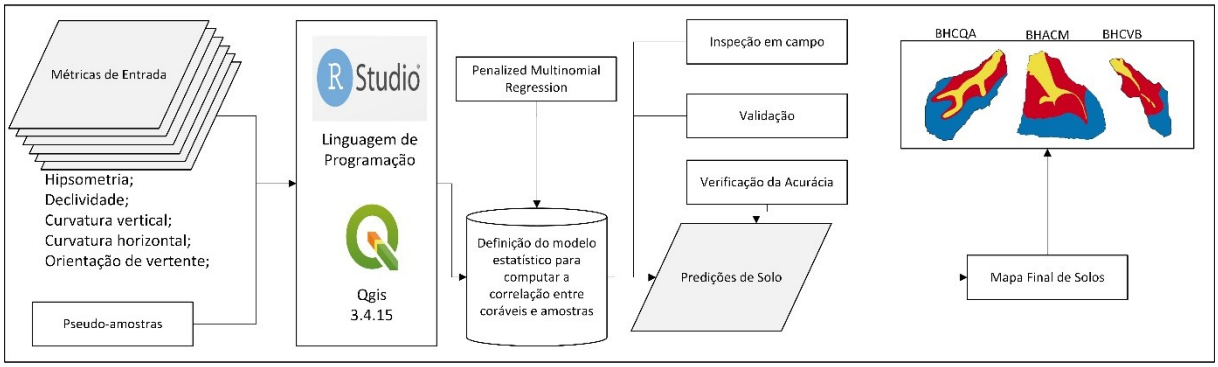
4.5 Técnica de mapeamento de solos

O levantamento dos tipos de solos foi realizado em dois momentos distintos: o trabalho em laboratório e a checagem de campo. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico, no qual identificou-se o mapeamento de solos refinado para a Região Metropolitana de Goiânia, realizado por Santos (2019), que teve como ponto de partida os trabalhos anteriormente produzidos por Dambrós *et al.* (1994) e Nogueira (2017).

Além do levantamento bibliográfico que serviu como base cartográfica de apoio, procedeu-se a modelagem estatística de dados para execução do método de Mapeamento Digital de Solos (MDS), proposto por Dalmolin *et al.* (2020) e Nascimento *et al.* (2017) e exposto na Figura 22. Tal modelo consiste em adotar amostras que são correlacionadas às variáveis de entrada capazes de alimentar o modelo. Dessa forma, por meio de padrões conhecidos, os pacotes de funções no ambiente de programação do *RStudio* conseguem modelar um mapa preliminar de solos.

Na Figura 22 é possível observar que o mapa preliminar de solos foi gerado por meio de *pseudo-amostras*, obtidas com base na relação solo-relevo-paisagem em cada uma das bacias hidrográficas. Desse modo, foi possível obter um total de 90 amostras para cada uma das três bacias. O modelo conceitual de mapeamento de solos adotado teve como enfoque as texturas e a profundidade.

Figura 22 – Fluxograma para mapeamento digital de solos



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

Conforme apresentado por Reichert e Dalmolin (2011) e Santos *et al.* (2018), essas relações são possíveis, pois, (a) em áreas planas há bastante infiltração e pouco escoamento e o solo geralmente é profundo; (b) em áreas declivosas, a erosão pode predominar como principal fator de intemperismo havendo, portanto, bastante remoção de material, apresentando os solos tendências de serem mais rasos; e (c) em baixadas planas, há acúmulo de água e sedimentos coluvial e aluvial, sendo os solos medianamente desenvolvidos.

Desse modo, as amostras (90 pontos no total) foram cruzadas com as camadas *rasteres*, referentes às seguintes métricas da paisagem: (a) hipsometria; (b) declividade; (c) curvatura vertical; (d) curvatura horizontal; e (e) orientação das vertentes. Em seguida, utilizou-se o modelo estatístico *Penalized Multinomial Regression*, além dos pacotes de ferramentas do R (*R packages*): "*caret", "ggplot2", "sf", "raster", "caret", "snow"*, entre outros, para interagir com os dados de entrada e gerar os resultados.

Posteriormente, foi realizado trabalho de campo para validação do mapeamento. Essa etapa consistiu na visitação, em campo, de pontos pré-determinados aleatoriamente em SIG para inspeção visual e registros fotográficos. As informações coletadas foram usadas para validação dos dados preditos na etapa anterior, o modelo ofereceu cerca de 80% de fidedignidade, este também foi testado por Reichert e Dalmolin (2011), que conseguiram níveis elevados de confiabilidade. Exemplo da análise realizada pode ser encontrado na Figura 23.

Figura 23 – Visita de campo para inspeção das tipologias de solo da bacia hidrográfica

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2021).

4.6 Parâmetros para os cálculos morfométricos das bacias

Para o estabelecimento dos parâmetros morfométricos foram utilizados diversos cálculos matemáticos, como o índice de circularidade, o coeficiente de compacidade, fator de forma, densidade de drenagem e razão de relevo. O índice de circularidade, proposto por Miller (1953), é a "relação existente entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro" (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 114). Seu valor máximo é igual a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, mais próximo do formato de um círculo a bacia estará. Tal parâmetro é expresso pela seguinte equação:

$IC = (A/P^2)$ Equação (2)

Onde:

IC = Índice de Circularidade;

A = área de bacia;

P = área de um círculo de igual perímetro da bacia.

Sobre o coeficiente de compacidade, tal como proposto por Villela e Mattos (1975), este relaciona a forma da bacia com a de um círculo. Desse modo, quanto mais próximo do coeficiente 1, mais assemelhado a um círculo será a bacia; portanto quanto mais próximo da unidade for o resultado calculado pela equação, maior é a propensão da bacia hidrográfica a sofrer enchentes.

$Kc = 0{,}28 * P/A^{0,5}$ Equação (3)

Onde:
Kc = Coeficiente de compacidade;
P = Perímetro da bacia;
A = Área de bacia.

O fator de forma, proposto por Horton (1945), é a relação entre a área da bacia e o comprimento do eixo da bacia, sendo utilizado para analisar a propensão das bacias a alagamentos. É dado pela seguinte equação:

$Kf = A/L^2$ Equação (4)

Onde:
Kf = Fator de forma;
A = Área da bacia;
L = Comprimento do eixo da bacia.

A densidade de drenagem proposta por Horton (1945), “correlaciona o comprimento total dos canais de drenagem com a área da bacia” (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 115). Pode ser um parâmetro inicial importante para analisar sobre que tipos de rochas os rios da bacia correm, pois a variabilidade espacial desse índice ocorre de acordo com a esculturação dos canais no relevo.

É expressa pela seguinte equação:

$Dd = \sum L / A$ Equação (5)

Onde:

Dd = Densidade de drenagem;
∑L = Somatório do comprimento da rede de drenagem;
A = Área de bacia.

A razão de relevo, proposta por Schumm (1956), é a relação existente entre a amplitude altimétrica de uma bacia e a maior extensão desta em paralelo ao principal canal de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 120). Tal parâmetro é importante, pois pode indicar uma resposta sobre a velocidade de propagação de cheias no exutório da bacia considerada.

$$Rr = \Delta a / L \qquad \text{Equação (6)}$$

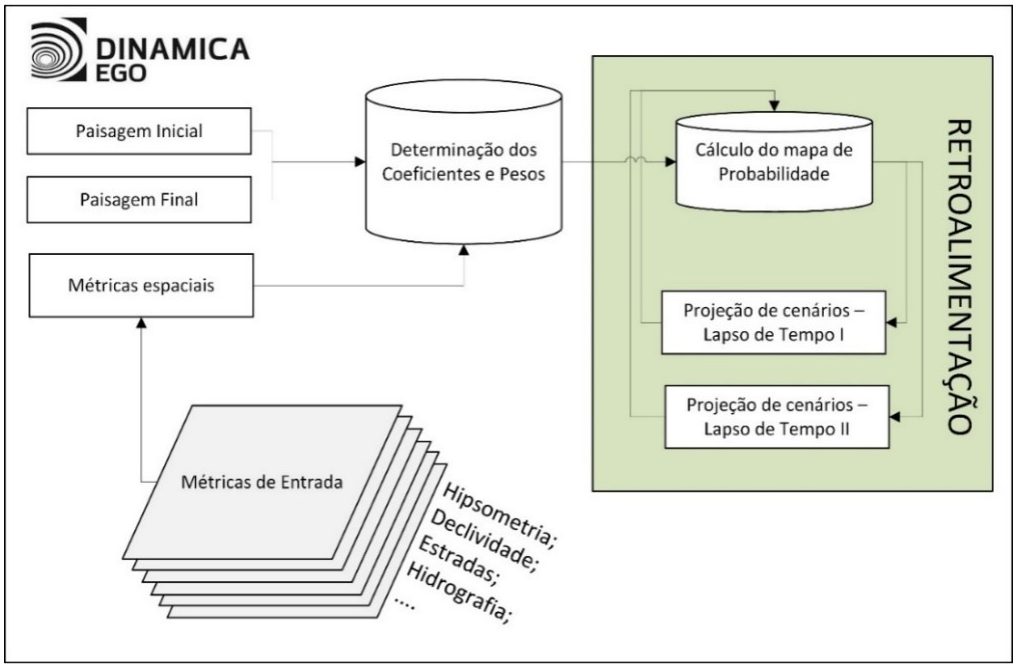
Onde:
Rr = Razão de relevo;
Δa = Amplitude altimétrica;
L = Comprimento do curso d'água principal.

4.7 Modelagem do crescimento urbano

A modelagem do crescimento da malha urbana foi realizada utilizando o *software* construtor de modelos Dinâmica EGO, elaborado pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em sua versão 5.10, que é uma plataforma robusta e gratuita para modelagem de dados ambientais. Tal programa permitiu avaliar o comportamento das áreas urbanas em função da entrada de dados, de modo a gerar cenários no espaço-tempo, baseados em comportamentos/tendências por meio da abordagem dos autômatos celulares ou *cellular automata* (*CA*). Assim, o Dinâmica EGO tem seu *modus operandi* ligado à abordagem dos autômatos celulares. Tal abordagem preconiza que "[...] o espaço é representado através de um *array* de células, em que cada célula pode assumir diferentes estados ao longo do tempo" (PEDROSA; CÂMARA, 2004, p. 1).

A Figura 24 demonstra o processo da modelagem realizada, no qual pode-se observar, basicamente, três etapas. Tais etapas constituem-se na: (i) entrada das paisagens, inicial e final; (ii) entrada das métricas e determinação dos pesos; e (iii) cálculos dos mapas de probabilidade e retroalimentação do modelo.

Figura 24 – Fluxograma modelagem espacial urbana.



Fonte: Organizado pelo autor (2020).

Assim, toda a abordagem utilizada para modelagem do crescimento urbano baseou-se nos autômatos celulares, que, conforme Batty, Couclelis e Eichen (1997), Silva (2002), Almeida, Monteiro e Câmara (2003) e Massabki *et al.* (2017), apresentam as seguintes propriedades gerais: (i) a estrutura territorial estudada é abordada por meio de *pixels*; (ii) cada célula tem pelo menos um estado (ex.: urbano/não urbano); (iii) as relações de vizinhança são elementos importantes; (iv) há regras de transição para mudanças de estado; e (v) nessa abordagem, os dados se comportam de modo interativo, conforme o lapso temporal definido pelo usuário, sempre trabalhando em cima do resultado anterior.

De forma geral, foi utilizado o método dos pesos e evidências, que funciona por meio dos valores determinados nas taxas de transição, de modo que valores positivos favorecem a ocorrência de transição dos *pixels* pertencentes a determinada classe para outra. Já os valores negativos indicam baixas possibilidades da ocorrência de mudança e valores muito próximos de zero têm tendências inalteradas de modificação.

Ademais, é importante esclarecer que as paisagens inicial e final, representadas pelos anos de 2016 e 2020, respectivamente admitiram, como classes de cobertura simplificadas, a vegetação, a água, as áreas urbanas e as áreas com gramínea compactadas. As métricas de entrada, utilizadas para determinar os pesos,

foram as seguintes: hipsometria, declividade, distância de estradas, distância de nascentes e hidrografia. Os mapas de probabilidades foram calculados de modo que se tornou possível a projeção dos cenários futuros, por meio da definição do período de modelagem no tempo, sempre retroalimentado pelo ano anterior para considerar a próxima probabilidade de cenário.

4.8 Modelagem de escoamento superficial: método racional

O método racional (MULVANEY, 1851; KUICHLING, 1889) é o modelo hidrológico adotado nesta pesquisa. Tal modelo parte de alguns pressupostos teórico-metodológicos para o seu funcionamento, a saber: (i) precipitação uniforme sobre toda a área da bacia; (ii) precipitação uniforme durante a ocorrência da chuva; (iii) intensidade constante da chuva; (iv) coeficiente de escoamento superficial constante; e (v) vazão máxima quando toda a bacia está contribuindo com a passagem de água no exutório. Para estimar as vazões é necessária a execução das seguintes equações:

$$Qmax = CiA/3,6 \qquad \text{Equação (7)}$$

Onde:
Qmax = vazão máxima estimada, em m³/s;
C = coeficiente de escoamento em superfície, adimensional;
i = média das intensidades máximas de precipitação, em mm/h; e
A = área correspondente da bacia, em km².

Para tanto, é essencial determinar a precipitação efetiva, calculada pela Equação 8. Esta se baseia na altura pluviométrica considerada e na capacidade de infiltração de água no solo:

$$Pe = \left[\frac{(P-0,2\ S^2)}{(P+0,8\ S)}\right] \text{ , quando valor de P é >= Ai de 20\% de S} \qquad \text{Equação (8)}$$

Onde:
Pe = precipitação efetiva em mm;

P = precipitação considerada, em mm;
S = coeficiente de infiltração, em mm; e
Ai (abstração inicial) = 0,2*S = abstração ou perda inicial considerada em 20%, valor da precipitação.

Os valores de retenção de água potencial no solo podem ser estimados a partir dos valores de CN e sua relação com a cobertura da terra enquadrados na proposta abaixo, pelo *Natural Resource Conservation Service* (NRCS) – USDA (1997);

$$S = \frac{25400}{\mathrm{CN}} - 254$$ Equação (9)

Onde:
S = retenção potencial, dada em (mm), considera o tipo de solo e duas de suas propriedades, textura e profundidade;
CN = valor do Número de Escoamento (*adimensional*), considera o tipo de cobertura; do solo e sua condição de umidade antecedente.

O coeficiente de escoamento superficial utilizado constitui-se no volume de chuva não infiltrado e que efetivamente pode se converter em fluxo superficial. É dado pela razão entre:

$$C = \left[\frac{(P-0{,}2\,S)^2}{(P+0{,}8\,S)}\right] * 1/P$$

Equação (10)

Onde:
C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional.

As médias das intensidades máximas das precipitações foram obtidas conforme a equação proposta por Villela e Matos (1975), demonstrada na Equação 11. Essa equação torna possível reconhecer um limite máximo para as precipitações de determinada região, substituindo os parâmetros por variáveis próprias da bacia hidrográfica e informações paramétricas referentes à estação climatológica

considerada. Para obtenção das informações hidrológicas, foi utilizado o histórico de chuvas e os parâmetros sistematizados por Oliveira et al. (2005), substituindo-os na Equação 11.

$$Im = \frac{\mathrm{K} \times Tr^{a}}{(t+b)^{c}} \qquad \text{Equação (11)}$$

Onde:
Im = média das intensidades máximas de precipitação, em mm/h;
T = tempo de retorno, em anos, para um evento extremo;
t = tempo de concentração do escoamento superficial, em minutos;
K = 920,450
a = 0,1468
b = 12
c = 0,7599

O tempo de concentração foi determinado seguindo método cinemático, que considera a bacia em trechos homogêneos e calcula a velocidade de escoamento por segmentos (MENEZES FILHO; SÁ, 2019). Tem como base a correspondência entre o comprimento de fluxo no segmento considerado e a velocidade do escoamento superficial, conforme proposto na Equação 12 pelo SCS-USDA (1971).

$$Tc = \frac{1}{60} x \, \Sigma \frac{Li}{Vi} \qquad \text{Equação (12)}$$

Onde:
Tc = tempo de concentração do escoamento superficial em minutos;
1/60 = fator de transformação de segundos para minutos;
Li = comprimento de fluxo no segmento considerado, em metros; e
Vi = velocidade do escoamento superficial, em m/s.

A velocidade do escoamento superficial foi estimada conforme a Equação 13, proposta por Porto (1995) e utilizada por Nunes e Borba (2018) como sendo a relação entre o coeficiente de escoamento superficial e a declividade.

$$Vi = Cv \times Si^{0,5} \qquad \text{Equação (13)}$$

Onde:
Vi = velocidade de escoamento superficial, em m/s;
Cv = coeficiente de escoamento superficial, adimensional; e
Si= declividade, em %, elevada ao expoente 0,5.

É importante destacar ainda que a análise das variáveis hidrológicas utilizadas no método racional combinadas com as técnicas de SIG, foram realizadas de modo a representar o melhor possível, via produtos cartográficos, a heterogeneidade da variação espacial e temporal da fisiografia das bacias em análise. Segundo Nunes (2007), esse procedimento diminui as limitações do método racional aplicado a bacias hidrográficas com tamanho de área superior a 4,0 km^2. Tal possibilidade já foi testada pela autora, quando validou seus resultados, com dados de estação fluviométrica *in loco*, na bacia hidrográfica do rio Atua que é uma bacia de médio porte localizada na região metropolitana de Curitiba - PR (NUNES, 2007).

4.9 Índice de pressão hidrológica

A ciência geográfica vem fornecendo respostas, ao longo do tempo, para inúmeras questões e, especialmente após a disseminação dos dados de sensoriamento remoto, o desenvolvimento de índices de pressão veio a ser acrescido ao ambiente e às álgebras de mapas, numa perspectiva de modelagem estática. Esses índices já foram utilizados por diversos pesquisadores, a exemplos de Rudke *et al.* (2020), que analisam o modelo de detecção de áreas de mineração na Amazônia e de Santos *et al.* (2018), no Cerrado, que procuram relevar a intensidade dos processos antropogênicos em um importante reservatório que abastece parte da região metropolitana de Goiânia.

Outros pesquisadores, como Santos e Gomide (2015), Rocha e Cruz (2009), Lourenço *et al.* (2015) e Gouveia, Galvanin e Neves (2013), têm utilizado derivações do Índice de Transformação Antrópica, desenvolvido por Lémechev (1982 apud RODRIGUEZ, 1991) e reestruturado por Rodriguez (1991). Diante das distintas possibilidades de adaptação desses índices, nesta tese apresenta-se uma leitura direcionada aos parâmetros hidrológicos superficiais em bacias hidrográficas urbanas,

que levaram à formulação do Índice de Pressão Hidrológica (IPH), expresso pela Equação (14).

$$\mathrm{IPH} = \frac{\mathrm{Tc+Vi+2(C)+S+D+H+Df+Cv}}{9} \qquad \text{Equação (14)}$$

Onde:

Tc = tempo de concentração em minutos;

Vi = velocidade de escoamento superficial em m/s;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

S = coeficiente de armazenamento de água no solo em mm;

D = declividade em graus;

H = hipsometria em m;

Df = direção de fluxo *upstream* em m;

Cv = curvatura vertical.

Os pesos utilizados no cálculo do índice de pressão hidrológica aparecem dispostos a seguir conforme a Tabela 4. No que diz respeito às variáveis hidrológicas trabalhadas no índice, temos como parâmetros teóricos aquelas apontadas por Nunes e Borba (2018), Tucci (2021) e Rocha, Pasqualetto e Nunes (2021). Desse modo, a classe equivalente ao tempo de concentração (Tc) mínimo recebeu peso 10, enquanto a classe de valores máximos recebeu peso mínimo, uma vez que, quanto menor o intervalo de deslocamento da água na bacia, maiores ainda são as chances de haver impactos. Essa variável hidrológica foi compartimentada em três classes, para gerar uma melhor interação com a direção de fluxo e a curvatura vertical. Essa lógica de valoração dos pesos foi empregada, ademais, para pensar o coeficiente de armazenamento de água no solo (S), ou seja, quanto mais água for armazenada no solo, menor o risco de a bacia sofrer pressões hidrológicas acentuadas.

A velocidade de escoamento superficial (Vi) foi pensada de modo que os intervalos com menos amplitude de velocidade recebessem o menor peso no processo, enquanto os intervalos compreendidos por uma maior velocidade recebem também os maiores pesos. Assim, foi considerado que, quanto maior o valor de Vi, maior a capacidade do ambiente de captação da bacia sofrer pressão hidrológica, especialmente associado a certas classes de Tc. A mesma lógica de valoração dos pesos é empregada para o coeficiente de escoamento superficial (C), ou seja, o

potencial elevado de realizar escoamento pode contribuir para acentuar a pressão hidrológica no ambiente.

Tabela 4 – Variáveis e pesos atribuídos aos dados para cálculo do IPH

Variáveis	**Bacias**			**Peso**
	BHCQA	**BHACM**	**BHCVB**	
Tempo de concentração	0 – 234	0 – 46	0 – 33	10
	234 – 407	46 – 78	33 – 64	5
	407 – 630	78 – 118	64 – 110	1
Velocidade de escoamento superficial	0 – 0,29	0 – 0,27	0 – 0,27	1
	0,29 – 0,70	0,27 – 0,68	0,27 – 0,73	4
	0,70 – 1,08	0,68 – 1,08	0,73 – 1,15	6
	1,08 – 1,54	1,08 – 1,42	1,15 – 1,67	8
	1,54 – 3,24	1,42 – 3,90	1,67 – 5,35	10
Coeficiente de armazenamento de água no solo	2,25 – 20	2,25 – 12,5	2,25 – 12,5	10
	20 – 51	12,5 – 26,7	12,5 – 26,7	8
	51 – 128	26,7 – 42,2	26,7 – 51,2	6
	128 – 256	42,2 – 172,2	51,2 – 172,5	4
	256 – 331	172,2 – 331,3	172,5 – 331,3	1
Coeficiente de escoamento superficial	0 – 0,11	0 – 0,13	0 – 0,16	1
	0,11 – 0,38	0,13 – 0,23	0,16 – 0,54	4
	0,38 – 0,54	0,23 – 0,58	0,54 – 0,74	6
	0,54 – 0,73	0,58 – 0,79	0,74 – 0,84	8
	0,73 – 0,96	0,79 – 0,94	0,84 – 0,97	10
Declividade	0 – 1,75	0 – 1,74	0 – 2,15	1
	1,75 – 3,51	1,74 – 3,16	2,15 – 4,7	4
	3,51 – 5,96	3,16 – 4,91	4,7 – 10,2	6
	5,96 – 10,53	4,91 – 9,27	10,2 – 20,4	8
	10,53 – 29,83	9,27 – 27,8	20,4 – 50	10
Hipsometria	785 – 817	775 – 803	724 – 760	10
	817 – 836	803 – 818	760 – 786	8
	836 – 855	818 – 833	786 – 811	6
	855 – 878	833 – 849	811 – 836	4
	878 – 905	849 – 867	836 – 891	1
Variáveis	Bacias			Peso
	BHCQA	**BHACM**	**BHCVB**	
Extensão do fluxo de drenagem	0 – 207	0 – 273	0 – 308	1
	207 – 590	273 – 1.594	308 – 2.190	5
	590 – 2.119	1.594 – 4.106	2.109 – 8.728	10
Curvatura vertical		Côncava		10
		Retilíneo		5
		Convexa		1

Fonte: Produzido e organizado pelo autor (2020).

O grupo de variáveis ambientais foi pensado a partir das referências de Silva Neto (2013) e Tucci (2001, 2005). Com relação à declividade, Silva Neto (2013), ao ressaltar sua relação com o escoamento e a infiltração, comenta que as maiores declividades geralmente estão associadas ao predomínio do escoamento e dos processos morfogenéticos, enquanto as baixas declividades associam-se ao predomínio da infiltração, ao intemperismo e à pedogênese. Nesse caso, o sistema

de pesos utilizados seguiu uma constante crescente a partir das menores declividades, recebendo progressivamente pesos maiores, segundo a intensidade do declive.

Nesse sentido, pensar a curvatura da vertente significa entender que as áreas de perfil convexo estão relacionadas ao escoamento inicial, portanto, é comum a presença de fluxos superficiais difusos, a velocidade do escoamento é crescente e a capacidade de transporte é baixa. No perfil côncavo, o fluxo é convergente, linear e concentrado (SILVA NETO, 2013). Por sua vez, os valores associados no IPH constituem maior peso para as áreas côncavas, pesos intermediários para as áreas retilíneas e pesos baixos, para as áreas com perfil convexo.

A hipsometria é pensada como um fator que não pode ser dissociado dos dois elementos citados anteriormente, por isso, recebe um sistema de pesos que valoriza a partir das menores altitudes, geralmente áreas mais planas, dando-lhes um peso maior em oposição às áreas mais altas, que, em geral, encontram-se ligadas a relevos mais movimentados e, por isso, recebem valores de pesos menores, conforme a Tabela 4, mostrada anteriormente.

A extensão do fluxo de drenagem procurou avaliar a potencialidade destes, de modo a classificar suas extensões de fluxos de acordo com a extensão e ramificação pela bacia hidrográfica; assim, foram fornecidos maiores valores de peso aos canais de maior extensão, por seu potencial de receber e distribuir os fluxos superficiais na bacia. Em sentido oposto, os pequenos fluxos superficiais de drenagem, embora muito mais ramificados pela bacia hidrográfica, pouco potencializam sem sua interligação com os primeiros; por isso, recebem pesos menores.

As variáveis foram pensadas de modo a definir uma aproximação entre cada uma delas e sua possibilidade de gerar o comprometimento da bacia hidrográfica e uma pressão hidrológica a ser exercida sobre determinada área. Nesse índice, os valores finais variam entre 1,0 e 10, sendo posteriormente reclassificados os valores para as classes qualitativas, conforme exemplificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis e pesos atribuídos aos dados para cálculo do IPH

Valor	Classe
1 - 2	Mínimo
2 – 4	Baixo
4 – 6	Moderado
6 – 8	Alto
9 - 10	Muito Alto

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

O próximo capítulo inicia a discussão dos resultados, por meio da apresentação dos dados de morfometria e cobertura da terra urbana nas bacias. Tais dados são apresentados temporalmente nos anos de 2002, 2006, 2011, 2016 e 2020, sempre na perspectiva de analisar a distribuição espacial das classes, seus níveis de permeabilidade das coberturas e as respectivas conversões de classes naturais para urbanas.

CAPÍTULO 5 – MORFOMETRIA E COBERTURA DAS TERRAS

5.1 Parâmetros morfométricos

No contexto das análises hidrológicas é bastante comum a caracterização morfométrica de bacias. Tais análises, quase sempre pautadas na ideia de uma bacia hidrográfica desnuda, ou seja, que considera apenas o formato assumido por sua delimitação perante sua área de captação e a sua rede de drenagem, releva aspectos importantes relativos à sua forma/formato, função e possibilidades de estimar a magnitude de ocorrência de diversos processos internos.

Muito embora esses processos ocorram por uma conjugação de fatores e agentes, não se pode omitir que as análises morfométricas não consideram o cenário de uso e cobertura das terras, tampouco a condição da rede de drenagem, fazendo somente alusão à mera existência desses fatores. Seja uma bacia pouco urbanizada ou completamente verticalizada, os parâmetros de análise da forma não são capazes de envolver os aspectos da urbanização na análise realizada. Tal aspecto também se estende para a configuração morfológica de seus canais de drenagem, podendo eles serem diferenciados por diversas geometrias, processos e variáveis que não são considerados pela sua simples extensão, número de canais ou densidade por unidade de área, calculados pelos parâmetros de morfometria.

Pensar uma análise morfométrica de síntese exige, portanto, um esforço no sentido de articular parâmetros tradicionalmente avaliados com fatores que venham a ser predeterminantes para modificação das dinâmicas hídricas locais. No contexto da modelagem de processos hidrológicos, em especial da comparação de cenários com vista à quantificação do escoamento superficial, essas análises podem constituir-se como fatores importantes para entender as respostas dos modelos e explicar maiores ou menores propensões à ocorrência de determinados fenômenos. Levando em consideração tais fatores, buscamos sintetizar, por meio da Tabela 6, os parâmetros morfométricos das bacias investigadas.

Como mencionado anteriormente, a simples exploração dos valores e coeficientes de forma isolada pode levar a erros, uma vez que a condição da cobertura da terra instalada pode remodelar a leitura do valor expresso pelo coeficiente analisado. Dessa maneira, apresentam-se os principais resultados obtidos na análise morfométrica, com a finalidade de integrá-los à discussão, e em outros elementos.

Depreende-se, assim, em relação aos aspectos geométricos, que as bacias em análise são pequenas regiões de drenagem, não ultrapassando, na maior delas, 9,02 km², com comprimentos do eixo principal variando entre 3,25 e 5,22 km de extensão.

Tabela 6 – Parâmetros morfométricos segundo os aspectos geométricos, de relevo e hidrográficos

Aspecto	Parâmetros	BHCQA*	BHACM**	BHCVB***	Unidade
Geometria	Área da bacia	9,10	4,98	4,89	km²
	Perímetro	13,96	9,58	11,96	Km
	Comprimento do eixo da bacia	5,22	3,25	4,82	Km
	Coeficiente de Compacidade (K)	1,3	1,2	1,5	-
	Fator forma (Kf)	0,33	0,47	0,21	-
	Índice de circularidade (Ic)	0,17	0,17	0,20	-
Relevo	Altitude máxima	905,4	867,08	891,9	m
	Altitude mínima	785,5	775,3	724,5	m
	Altitude média	845,4	821,19	808,2	m
	Amplitude altimétrica	119,9	91,78	167,4	m
	Declividade média da bacia	14,9	13,9	25	%
	Razão de relevo	24,41	29,70	47,69	-
Rede de drenagem	Comprimento do canal principal	4,91	3,09	3,51	km
	Comprimento total dos cursos d'água	7,19	4,10	3,51	Km
	Densidade de drenagem (Dd)	0,79	0,82	0,71	km/km²
	Ordem da bacia / Horton	2ª	2ª	1ª	-

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).
* Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol
** Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira
*** Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava

Os coeficientes de compacidade (K), em associação aos índices de circularidade (Ic), revelam que as Bacias do Córrego Quebra-Anzol e do Córrego Vaca Brava possuem mais propensão a sofrer enchentes em comparação à Bacia do Alto Córrego Macambira. O fator de forma (Kf) revela que as bacias se enquadram em uma tendência pouco acentuada de sofrerem alagamentos, porém, dentre as três, a que tem fator de forma maior é a do Córrego Macambira, que, então, possui mais possibilidade de sofrer alagamentos. Por sua vez, os aspectos relativos ao relevo mostram bacias muito semelhantes em termos de altitude, variando entre 724,5 m e 905,4 m de altitudes máximas.

A altitude média situa-se acima de 800 m, com amplitudes altimétricas oscilando entre 91,78 m (Córrego Macambira) e 167,4 m (Córrego Vaca Brava). As declividades médias variam entre 14% e 25% e a razão de relevo, em especial na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, mostra-se mais acentuada, atingindo

pouco mais de 47 (ver Tabela 6). Tal fato, associado a diferentes estratos de declividades, a amplitude altimétrica elevada e a cobertura da terra altamente modificada podem fazer dessa bacia uma área de intensa modificação no escoamento superficial.

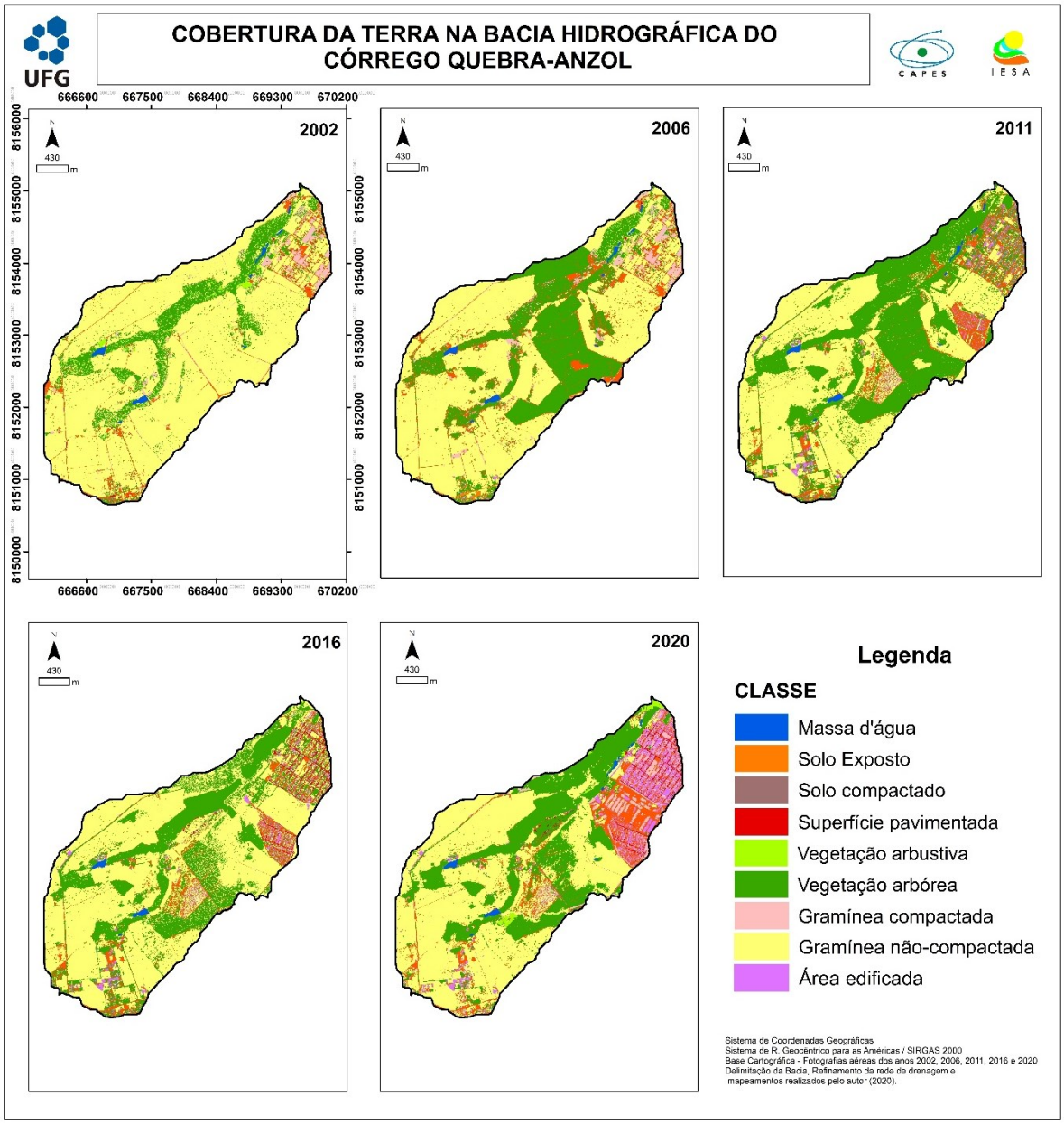
No que diz respeito à rede de drenagem, têm-se duas bacias de 2ª ordem e uma de 1ª, logo, ambas se configuram como de pequena ordem. Sobre os comprimentos totais dos cursos d'água, estes variam entre 3,51 km e 7,19 km de extensão e a densidade de drenagem mediana, entre 0,5 e 1,5 km/km² (BELTRAME, 1994). Todos esses parâmetros revelam aspectos e condições pré-estabelecidas das bacias hidrográficas, importantes para uma primeira análise. No entanto, não consideram as condições internas e externas ao sistema, uma vez que não levam em conta as entradas de matéria e energia no sistema ambiental, tampouco seu grau de antropização.

5.2 Análise de cobertura da terra

5.2.1 Bacia do Córrego Quebra-Anzol

A bacia do Córrego Quebra-Anzol, com predominância de características naturais, demonstrou sensíveis mudanças no período analisado de 2002 a 2020. Para apresentar as conversões de cobertura ocorridas, elaborou-se a Figura 25, para revelar que, no ano de 2002, a bacia era coberta por grandes quantidades de gramíneas, não compactadas, sendo representada por pouco mais de 75%. Essa classe está localizada especialmente nas áreas de recarga e do médio curso da bacia (Figura 25).

Figura 25 – Cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol

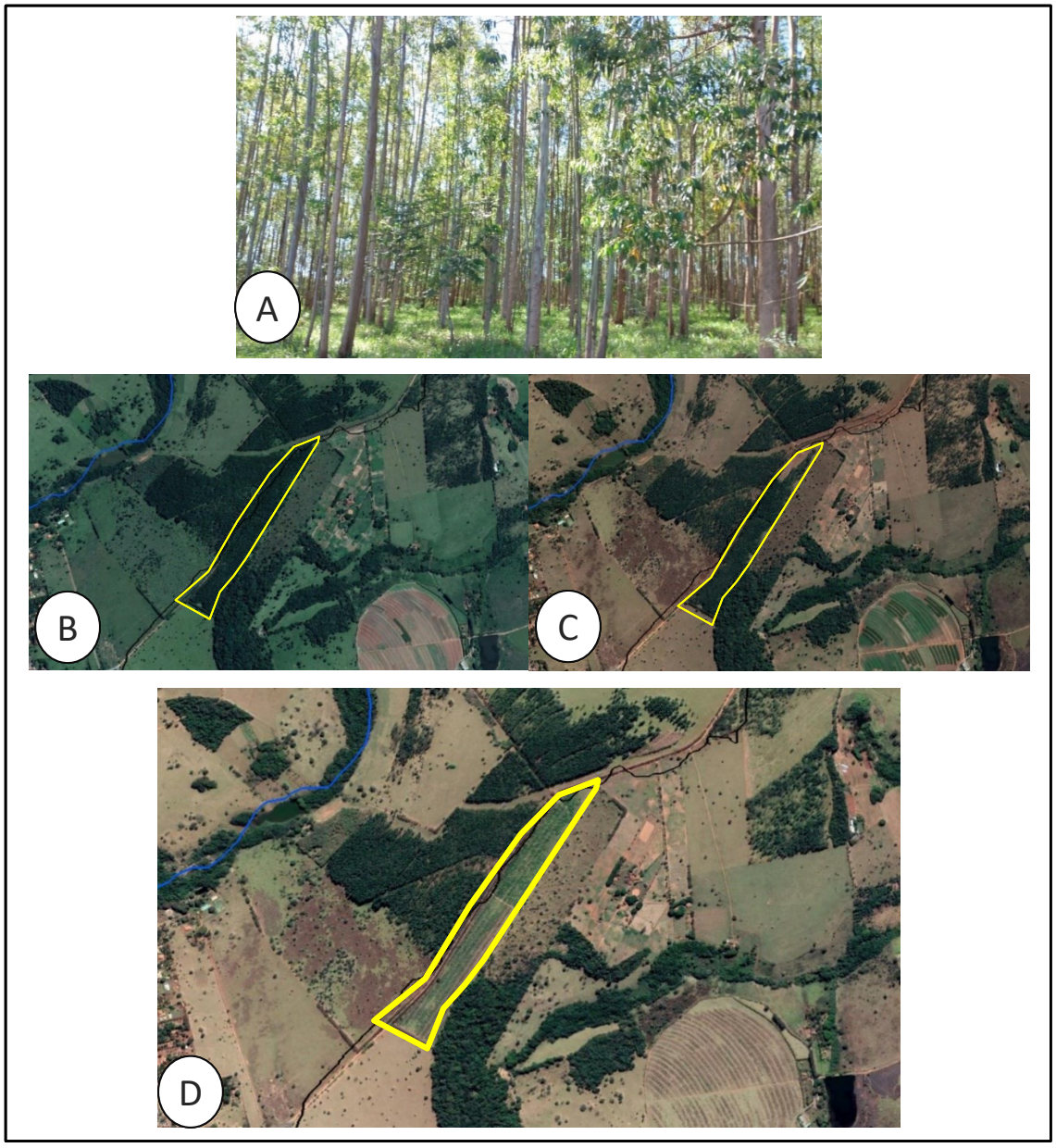


Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

A tímida presença de áreas edificadas e superfícies pavimentadas constituíam cerca de 0,4% da bacia, com dominância à leste, em particular na região do baixo curso (Figura 25). Os anos subsequentes, 2006 e 2011, exibem uma diminuição das áreas de gramíneas não compactadas, marcada, inicialmente, pelo avanço das áreas de vegetação arbórea, e, posteriormente, pelo avanço das áreas construídas. Esse padrão de construção inicial na foz da bacia, reproduz os modelos de ocupação de jusante para montante, que no caso de Goiânia foram bastante comuns no processo de ocupação de várias bacias.

Outro aspecto importante a ser avaliado é a presença de plantios comerciais, que se distribuem, principalmente, pela média e baixa bacia, caracterizando essa área como uma bacia periurbana. A Figura 26 exemplifica a dinâmica desses plantios, ajudando a compreender as conversões da cobertura vegetal. Na figura é possível identificar áreas de plantio de eucalipto na baixa bacia (letra A), registrada no ano de 2021, área plantada de eucalipto em 04/2018 (letra B), área em processo de corte, registrada em 07/2018 (letra C), e área cortada e replantada em 12/2018 (letra D).

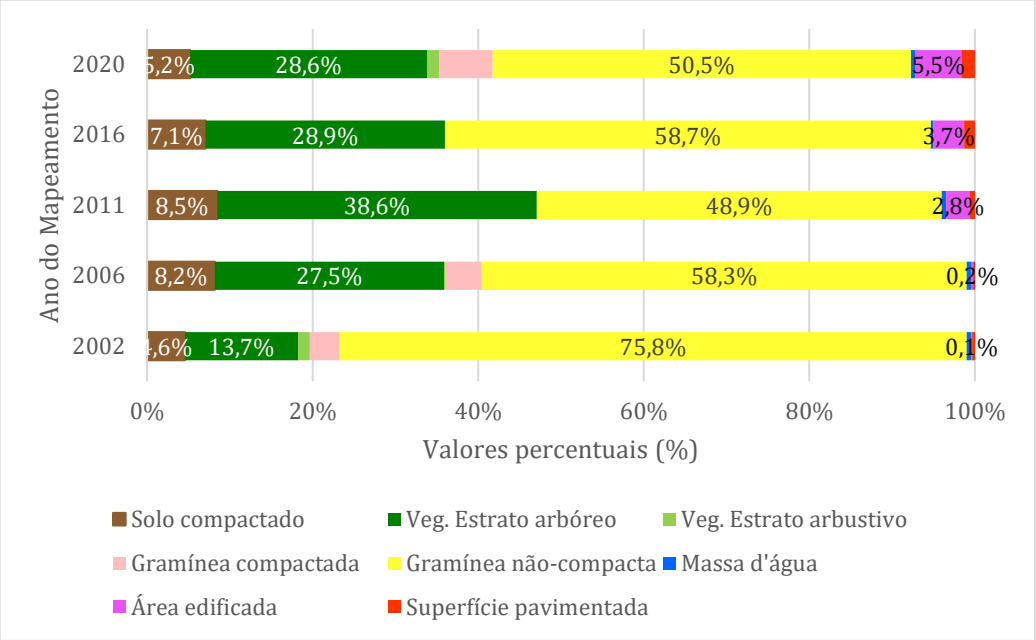
Figura 26 – Dinâmica do eucalipto na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol



Fonte: Imagens Google Earth Pro e Pesquisa de Campo (2021).

A dinâmica envolvida no cultivo de eucaliptos é a grande responsável pelas variações anuais quantitativas da vegetação presentes nos mapas de cobertura da terra. A Figura 27, a seguir, exibe os valores percentuais dos mapas anteriormente apresentados. Dessa forma é possível notar que os valores de área edificada se ampliaram de cerca de 1%, no ano de 2002, para 5,53%, em 2020. Nesse passo, a vegetação arbórea, que ocupava, no ano de 2002, cerca de 13,69%, aumentou para 28,63%, em 2020. Esses valores evidenciam a dinâmica mutável da cobertura vegetal na bacia hidrográfica, imposta pelos plantios comerciais, fato que a submete, no ano de 2011, ao seu máximo valor registrado de vegetação, cerca de 39%.

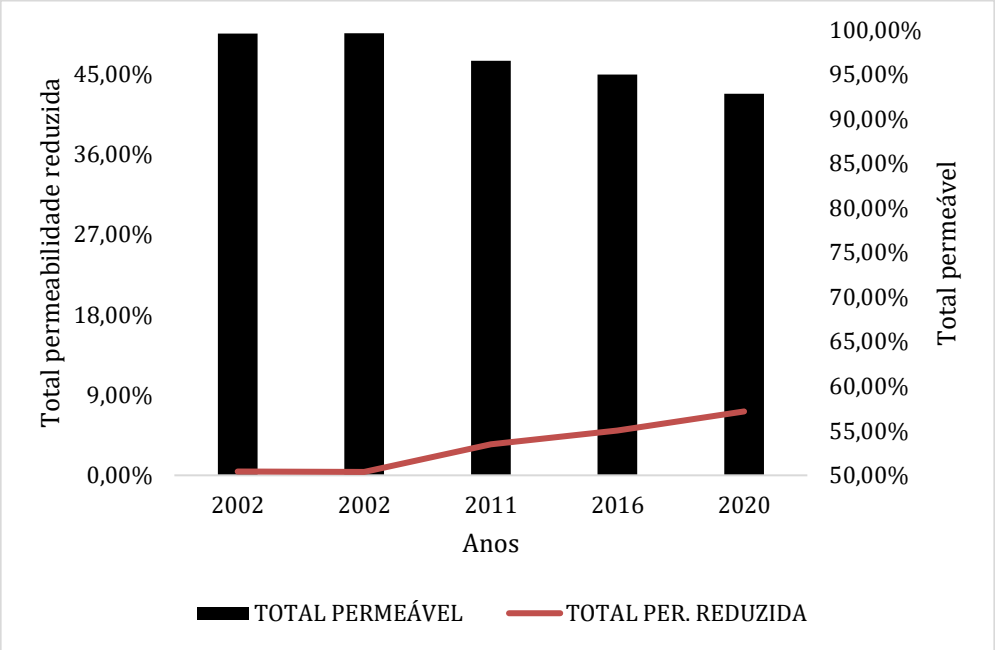
Figura 27 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Córrego Quebra-Anzol)



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

Em relação à permeabilidade da bacia hidrográfica, a Figura 28 permite avaliar ter havido uma sensível redução dessas áreas, que totalizavam 99,5% em 2002 e, no ano de 2020, passam a somatizar 92,83% da bacia. Essa tendência pode ser visualizada na figura a seguir, que exibe uma clara predisposição à redução da capacidade de infiltração de água na bacia. As superfícies com permeabilidade reduzida ampliaram-se, especialmente no que se refere às áreas edificadas e superfícies pavimentadas, corroborando com os resultados encontrados por Silva *et al.* (2019), fato que impacta diretamente o escoamento superficial na bacia aludida.

Figura 28 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos analisados



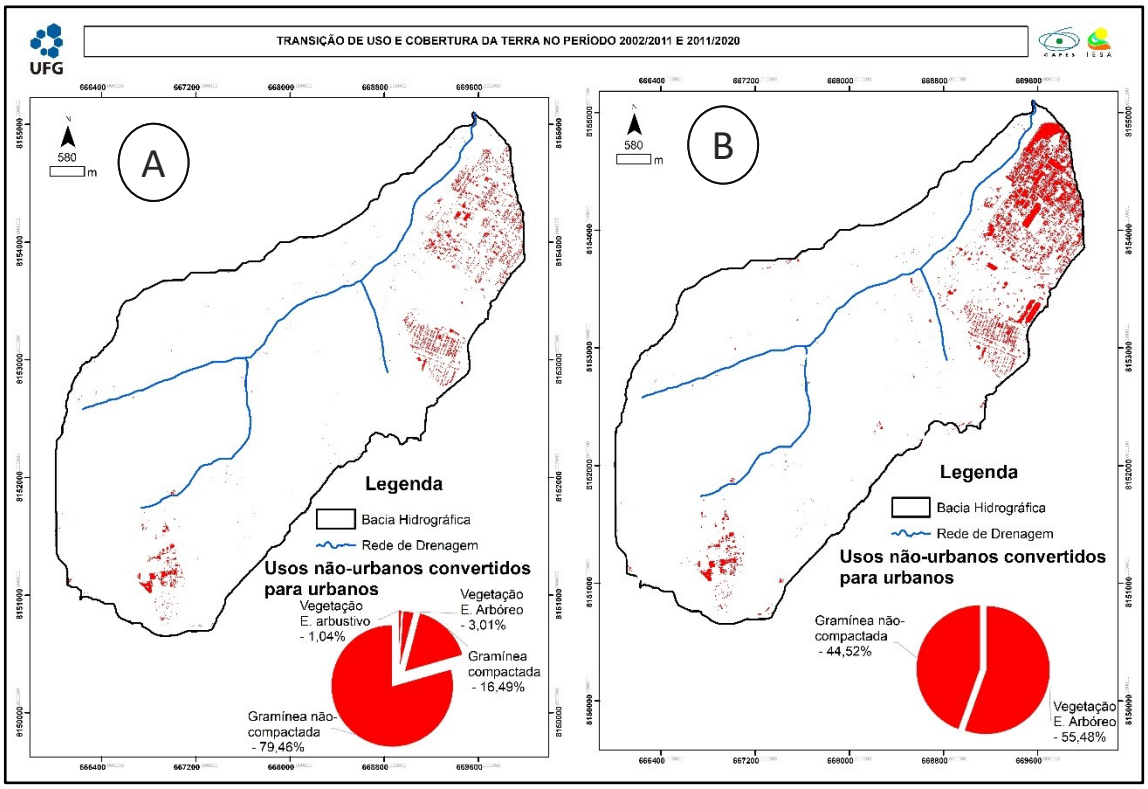
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Mapeou-se, ainda, as áreas de transições de coberturas permeáveis para áreas com permeabilidades reduzidas e sua distribuição na bacia hidrográfica na Figura 29, na qual foram registradas as conversões no período 2002/2011 e 2011/2020. As classes de cobertura com mais alterações registradas são as gramíneas compactadas, gramíneas não compactadas e áreas de vegetação arbustiva convertidas para área edificada ou superfície pavimentada, que conforme Carvalho (2008) ao avaliar a região norte de Goiânia, essa conversão de classes gera e acentua significativos impactos na interação da água com a superfície terrestre.

A Figura 29 revela, primeiramente, uma modificação na cobertura da terra referente ao período analisado, com cerca de 79,46% e 16,49% de conversões registradas nas classes de gramínea não compactada e gramínea compactada, que deram lugar, respectivamente, a áreas edificadas e superfícies pavimentadas (letra A). O segundo cenário nela apresentado (letra B) exibe predomínio das conversões de cobertura da terra sobre áreas de vegetação com estrato arbóreo e de gramíneas não compactadas. Esse aspecto remete a padrões típicos da implantação de novas áreas urbanas em Goiânia e sua região metropolitana e, que vem se expandindo também no contexto da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite. Isto acontece de

acordo com Sousa e Ferreira (2012), que avaliaram o uso e cobertura da terra nessa bacia, compreendida por sete municípios, no chamado “Mato Grosso de Goiás”.

Figura 29 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (a) período 2002/2011; (b) período 2011/2020



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

O recorte referente ao período de 2002/2011 indica um avanço das áreas urbanas sobre as de pastagem ou mesmo as já previstas para serem ocupadas, como é o caso das de solo/gramíneas compactadas, essas últimas geralmente localizadas próximas da mancha urbana existente e as demais, em áreas mais afastadas. No segundo período, que vai de 2011 a 2020, há uma ampliação ainda maior das áreas urbanas, que avançam para localidades antes destinadas ao plantio comercial, bem como áreas de vegetação natural, associadas, quase sempre, à presença de gramíneas não compactadas. Em paralelo a esse processo de expansão da malha urbana para áreas mais afastadas, notado também por Silva *et al*. (2019) em duas outras microbacias de Goiânia, houve uma forte modificação na dinâmica hidrológica da bacia.

Em relação ao padrão de estruturação da paisagem fora do perímetro urbano, conforme a Figura 30, este apresenta, predominantemente, áreas de pastagem em

primeiro plano, utilizadas para desenvolvimento da atividade pecuária, e, em segundo plano, áreas destinadas a plantios comerciais. Do ponto de vista hidrológico, há de se realizar uma distinção entre as áreas com gramíneas compactadas, localizadas no meio urbano, e aquelas presentes nas áreas rurais, como representado abaixo.

Figura 30 – Gramíneas compactadas e plantios comerciais ao fundo

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

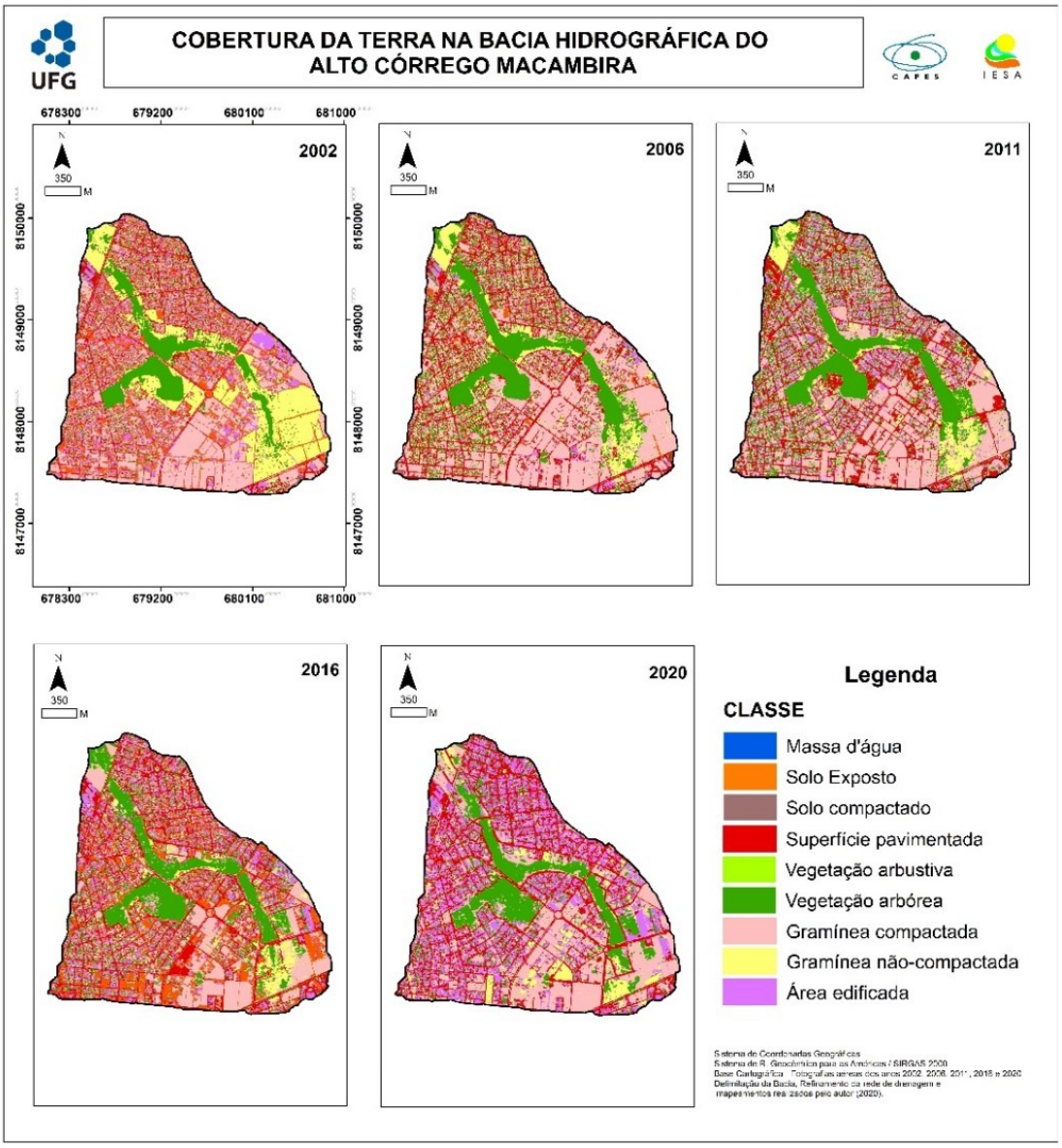
Ambas apresentam determinado grau de compactação, no entanto, no meio urbano essas áreas passam por um processo muito mais intensificado de alteração do solo, fato que compromete a capacidade de infiltração, já confirmada por Alves *et al*. (2011a), no contexto da área urbana de Goiânia e por Nunes (2012) no contexto da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns. Outro dado importante é que, na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, as superfícies com permeabilidade reduzida localizam-se predominantemente na região leste, próximas ao divisor de águas e ao baixo curso do canal de drenagem principal, em sua margem direita.

5.2.2 Bacia do Alto Córrego Macambira

A Bacia do Alto Córrego Macambira mostra-se como uma bacia predominantemente urbanizada em todos os anos analisados, fato que se intensifica especialmente nos anos mais recentes (Figura 31). Em 2002, apresentava as seguintes características: 30,2% de cobertura, representada por gramíneas compactadas, seguida pelos solos compactados (16,4%) e gramíneas não

compactadas (16,1%). A vegetação arbórea concentrava-se em pouco mais de 14%, ficando restrita às margens dos canais de drenagem, já as superfícies pavimentadas e áreas edificadas são representadas, inicialmente, por 11,7% e 11,4%, respectivamente.

Figura 31 – Cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira



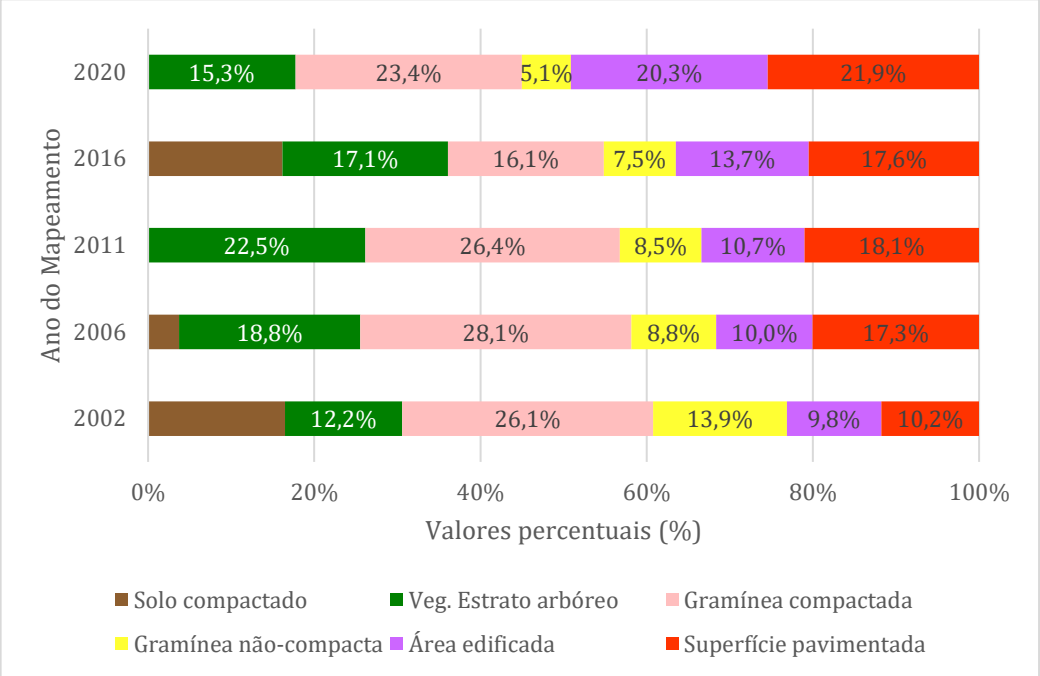
Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

Os anos seguintes, notoriamente 2006, 2011 e 2016, são marcados pela variação da cobertura vegetal, definida em estrato arbóreo e seguida pela redução das gramíneas compactadas e não compactadas, assim como a ampliação das áreas urbanas e das superfícies pavimentadas. Conversão típica, de áreas urbanas com processo de ocupação mais antigos, tais como os cenários de ocupação analisados

por Nunes e Borba (2018) no município de Aparecida de Goiânia. Diferentemente da bacia anterior, em que a ampliação sofrida em todas as classes de cobertura ocorreu de forma concentrada, na Bacia do Alto Córrego Macambira esse padrão é distribuído por toda a sua extensão. De acordo com Silva et al. (2019), bacias com padrão de distribuição das áreas pavimentadas semelhantes ao observado, geralmente podem demonstrar relação entre áreas de alagamento e qualidade das águas.

Conforme a Figura 32, o ano de 2020 é marcado pela presença de um significativo percentual de coberturas urbanas, da ordem de 20,3%, e com cerca de 21,9% de suas áreas constituídas por superfícies pavimentadas. Parecem valores de baixa expressão à primeira vista, no entanto, quando examinados a fundo, entende-se que se trata de uma região consolidada de ocupação urbana horizontal, notadamente localizada às margens do córrego principal.

Figura 32 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Alto Córrego Macambira)



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

Outro aspecto importante refere-se ao fato de as áreas destinadas a ou em processo de ocupação, para instalação de um padrão urbano vertical, frequentemente localizarem-se nas áreas de recargas da bacia. Essa bacia, em específico, dispõe de duas peculiaridades, sendo a primeira direcionada a um valor relativamente constante de cobertura vegetal arbórea, reflexo da existência do Parque Linear Macambira,

agregando uma cobertura vegetal mais densa, além de coberturas vegetais fragmentadas ao longo da bacia, que contribuem para que haja oscilações dos números percentuais ao longo do período analisado.

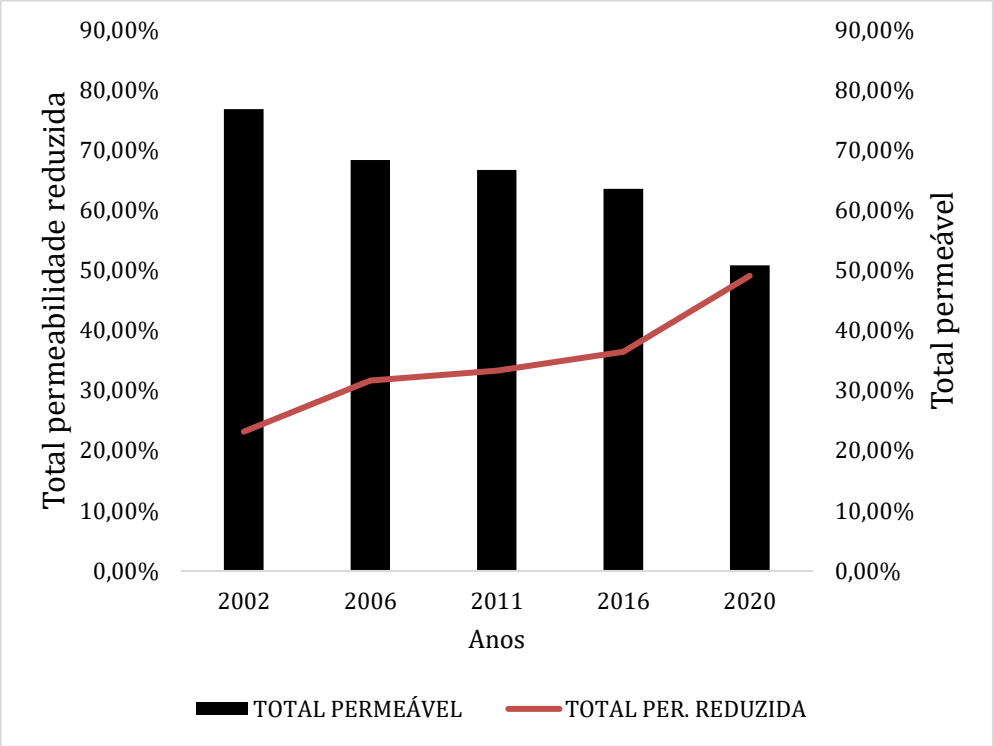
A segunda peculiaridade diz respeito à presença elevada de áreas com gramíneas compactadas e não compactadas. Esse parâmetro serve de forte indício para fundamentar que novas áreas urbanas serão implementadas nos próximos anos, a se considerar o avanço recente da cobertura da terra dessa bacia e observações de campo. Além disso, nota-se, na Figura 33 (letra A), um padrão urbano marcado pela horizontalidade das residências com alta densidade e muitas áreas pavimentadas, áreas que predominam especialmente entre a média e baixa bacia. A Figura 33 (letra B), por sua vez, traz indícios de áreas destinadas à urbanização vertical.

Figura 33 – Padrão de urbanização na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira

Fonte: Pesquisa de campo (2021).

No que tange à permeabilidade da bacia hidrográfica, observa-se que as coberturas da terra confluíram para a redução da capacidade permeável dos solos (Figura 34). Esse tipo de cobertura, que já era acentuada em 2002, estando concentrada nas adjacências do baixo curso do canal principal, passa, nos anos seguintes, a estender-se significativamente para as regiões próximas ao médio curso e áreas de cabeceiras, especialmente entre 2016 e 2020. As áreas permeáveis, que totalizavam, juntas, 76% da bacia no ano de 2002, diminuíram, respectivamente, para 66,69% e 50,81%, em 2011 e 2020. As tendências, no que diz respeito ao comportamento da capacidade permeável da bacia, podem ser mais bem observadas na Figura 34.

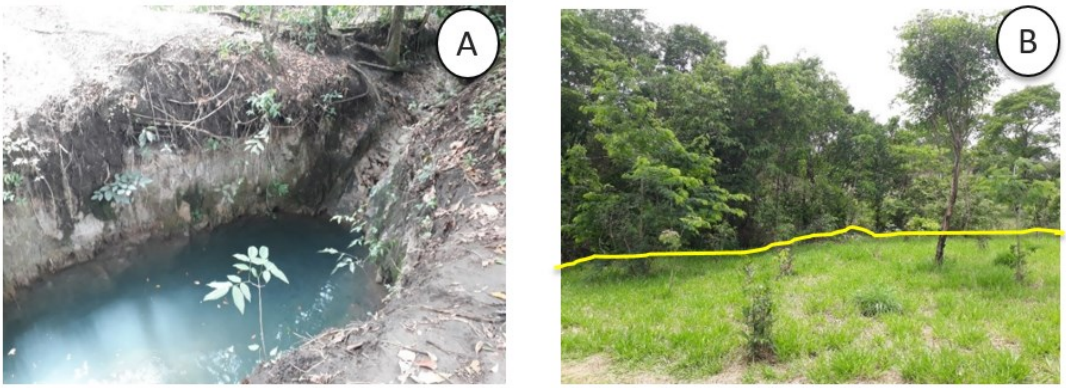
Figura 34 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos analisados



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Já a Figura 35 revela, respectivamente, aspectos das áreas permeáveis na região das cabeceiras da bacia hidrográfica, a saber, (i) área próxima à nascente do Córrego Macambira, (ii) formações florestais e savânicas de cerrado na APP do Córrego Macambira. Tais áreas, melhor avaliadas por Santos (2019) no contexto da região metropolitana de Goiânia, são sinalizadas como instrumentos para conservação dos recursos hídricos, especialmente no espaço urbano, onde desempenham um papel regulatório importante dos fluxos de água superficial e sub-superficial.

Figura 35 – Aspectos naturais na Bacia do Alto Córrego Macambira

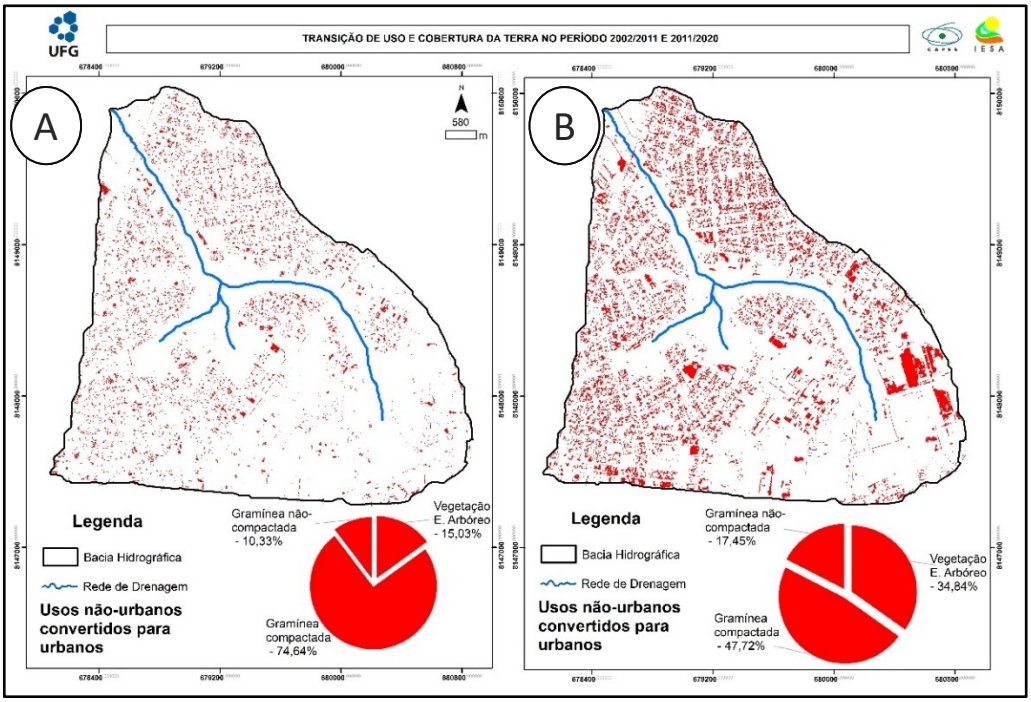


Fonte: Pesquisa de campo (2021).

Neste caso, tratando-se especificamente da área de preservação do Parque Linear do Córrego Macambira, o projeto de revitalização executado pela prefeitura de Goiânia tem servido, ainda, como elemento indutor de uma estratégia de ocupação e valoração imobiliária da região, de modo a elevar os preços de imóveis e a ocupar verticalmente as áreas de recarga da bacia (SILVA *et al.,* 2019).

A Figura 36 se refere à conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida, mostrando que a cobertura mais alterada foram as gramíneas compactadas, apresentando 70,64% e 47,72%, respectivamente, nos intervalos 2002/2011 e 2011/2020. Em seguida, constata-se um substancial aumento das áreas impermeáveis sobre as formações vegetais, convertidas para classes de superfícies pavimentadas e áreas edificadas. Conforme os dados, há um aumento de 15% entre os anos de 2002/2011 e 34,83% no período 2011/2020.

Figura 36 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (A) período 2002/2011; (B) período 2011/2020



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

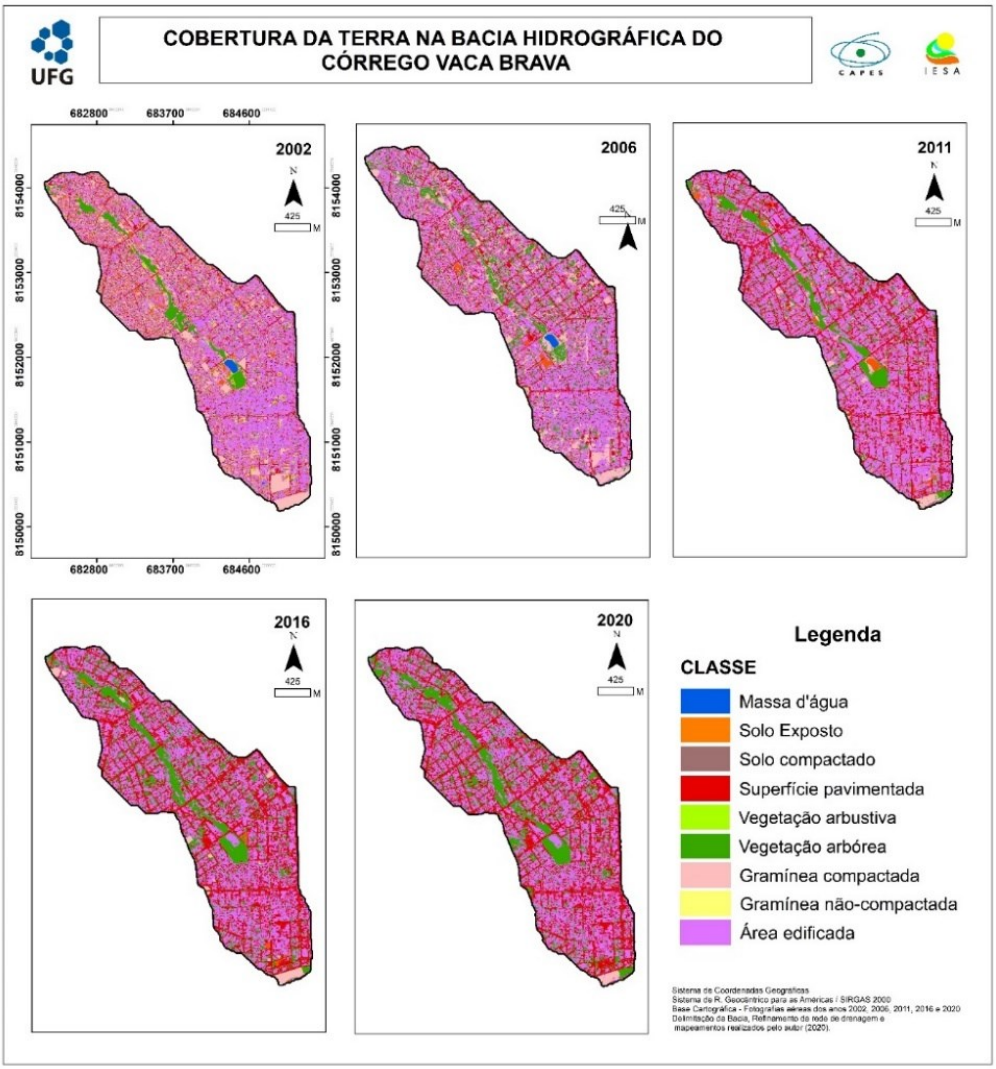
No período 2002/2011, as conversões foram menos intensas e reproduziram, no entanto, um padrão de ocupação distribuído por toda a extensão da bacia. O período seguinte (2011/2020), por sua vez, revela, além da manutenção do padrão distribuído, fragmentos de cobertura urbana maiores em extensão e localizados,

majoritariamente, nos setores ligados às áreas de recargas, sinalizando um claro avanço da ocupação dessas áreas.

5.2.3 Bacia do Córrego Vaca Brava

A Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava é a mais urbanizada de todas as analisadas, fato comprovado pelo seu processo de ocupação. As representações na Figura 37 retratam as modificações ao longo dos anos de 2002 a 2020, sendo possível evidenciar um aumento significativo das áreas pavimentadas, bem como o aumento da vegetação arbórea, associada à proximidade com o curso d'água do Córrego Vaca Brava, mesmo tendo este, alguns trechos de seu curso canalizados.

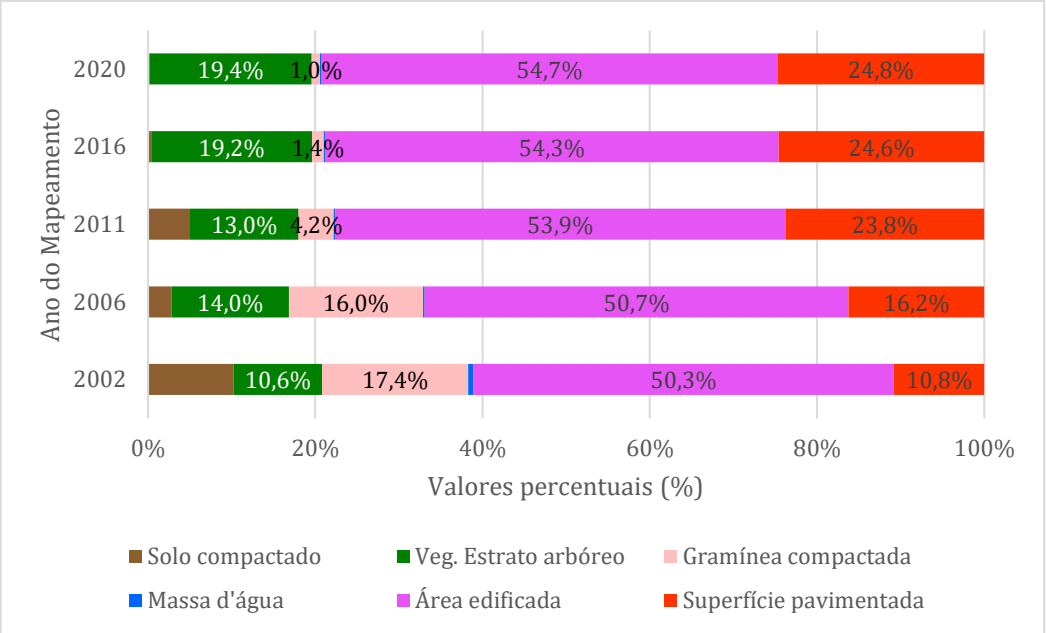
Figura 37 – Cobertura da terra da bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

No ano de 2002, de acordo com os dados da Figura 38, o Córrego Vaca Brava já apresentava pouco mais de 50% de sua extensão convertida para áreas edificadas, outros 17,4% de gramíneas compactadas, 10,2% de solos compactados e pouco mais de 10% de áreas vegetadas, considerando os estratos arbustivo e arbóreo. Fazendo alusão aos anos seguintes, percebe-se uma dinâmica que se acentua ainda mais no sentido da antropização da bacia, como é o caso do aumento percentual das superfícies pavimentadas e das áreas urbanas. Tanto o mapa apresentado anteriormente quantos os valores percentuais quantificados na Figura 38 corroboram para evidenciar o aumento de áreas antropizadas relativo aos anos de 2006, 2011 e 2016.

Figura 38 – Quantificação dos percentuais da cobertura da terra no período analisado (Córrego Vaca Brava)



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020).

Nessa bacia, conforme gráfico (Figura 38), houve uma diminuição das áreas de gramíneas compactadas, reflexo, inclusive, da expansão urbana. Esse fato corrobora para evidenciar a substituição de áreas com menor interferência antrópica, que passam a dar espaço para áreas fortemente antropizadas, como as coberturas urbanas e áreas pavimentadas. Esse aumento das áreas pavimentadas, que, em 2002, representavam 10,8%, subindo para 24,8%, em 2020, não impediu, todavia, a ampliação da vegetação estrato arbóreo, uma vez que esse tipo cresceu nas

proximidades do córrego e diminuiu no interior da bacia hidrográfica, Silva et al. (2019) também discutem esse comportamento da cobertura vegetação.

A Figura 39 traz um mosaico das paisagens na bacia e, nela, destacam-se, a princípio, as formações de cerrado arbustivo típicas do cerrado (letra A), o padrão de urbanização com predomínio de residências horizontais (letra B) e, em terceiro plano, a presença marcante da urbanização vertical na bacia hidrográfica (letra C), o Parque Vaca Brava, principal área de retenção do escoamento superficial na bacia, fica situado atrás dos primeiros prédios localizados à direita da imagem.

Figura 39 – Mosaico de paisagens vista do Parque Municipal da Serrinha

Fonte: pesquisa de campo (2021)

Por conseguinte, a representatividade das classes na bacia indica, para o ano de 2020, percentuais pouco elevados em relação às áreas já edificadas e mapeadas no primeiro cenário, referente a 18 anos atrás. Essa classe amplia-se justamente em detrimento das áreas de vegetação arbórea, gramíneas e solos compactados, sendo as duas últimas as maiores responsáveis por ceder áreas ao processo de edificação.

Tal bacia, em específico, apresenta uma forte interferência antrópica, inclusive com canalização de trechos do Córrego Vaca Brava. Esses dois aspectos podem ser observados na Figura 40, que traz as seguintes informações: a canalização em trecho do Córrego Vaca Brava, na região da baixa bacia (letra A); e os diferentes planos de visão de seu aspecto urbano, como o lago do Parque Vaca Brava, a vegetação e as construções no entorno do parque (letra B).

Sobre o processo de canalização do córrego, este, em termos hidrológicos, acelera o fluxo das águas no canal. À medida que novas áreas urbanas passam a ser construídas a montante da canalização, o trecho canalizado pode não suportar o fluxo de água recebido, tendo como consequência as inundações. Santos (2010) já relatava diversos pontos de ocorrência desse problema em Goiânia.

Figura 40 – Aspecto urbano na bacia hidrográfica

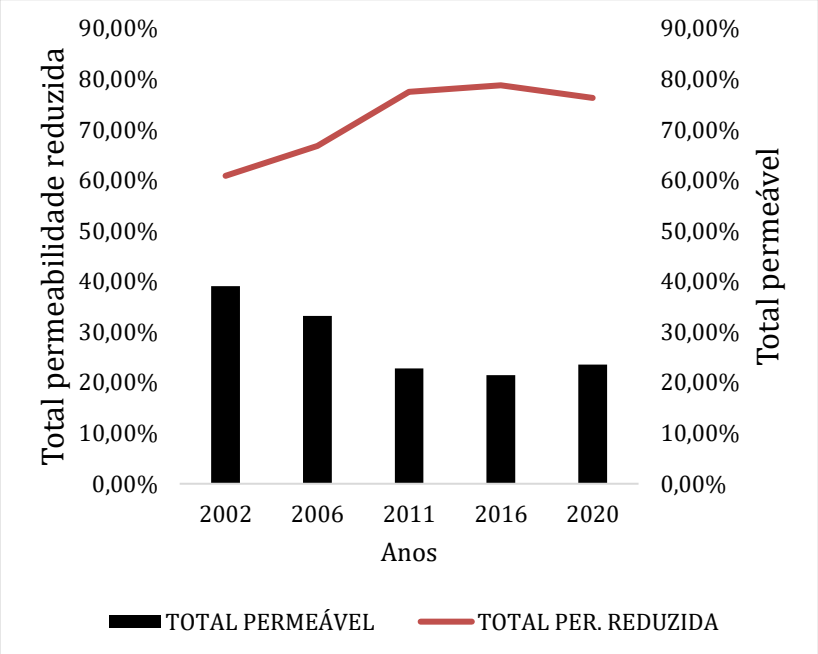
Fonte: Pesquisa de campo (2021).

Por conseguinte, os valores das áreas permeáveis da bacia hidrográfica, revelados na Figura 41, evidenciam que esse tipo de superfície sofreu uma redução de 39,1%, no ano de 2002, para 21%, em 2020, ou seja, uma perda representativa de quase metade da cobertura permeável inicial. Por outro lado, as classes representativas de coberturas impermeabilizantes do solo urbano têm aumentado

progressivamente, passando de 60,9% para 79,09% de representatividade no intervalo analisado.

Essa tendência, que pode ser observada na Figura 41, tem-se mostrado verdadeira nas análises realizadas em outras bacias hidrográficas urbanas de metrópoles brasileiras e de outros países (NUNES, 2007, 2012; CINGLER, 2017; CHEN; LEANDRO, 2019). Isso significa haver uma predisposição para a conversão de áreas naturais em uso antrópico que, nas bacias em questão, se materializam por meio de edificações urbanas e superfícies pavimentadas. Tais superfícies contribuem, de acordo com Rocha et al. (2021), para acelerar a dinâmica hidrológica da bacia, por meio da redução do tempo de concentração e aumento do pico de vazão de cheias. Isso é verificado, em especial, na Bacia do Córrego Vaca Brava, que apresenta trechos do seu córrego canalizado.

Figura 41 – Relação entre áreas permeáveis e com permeabilidade reduzida na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos analisados



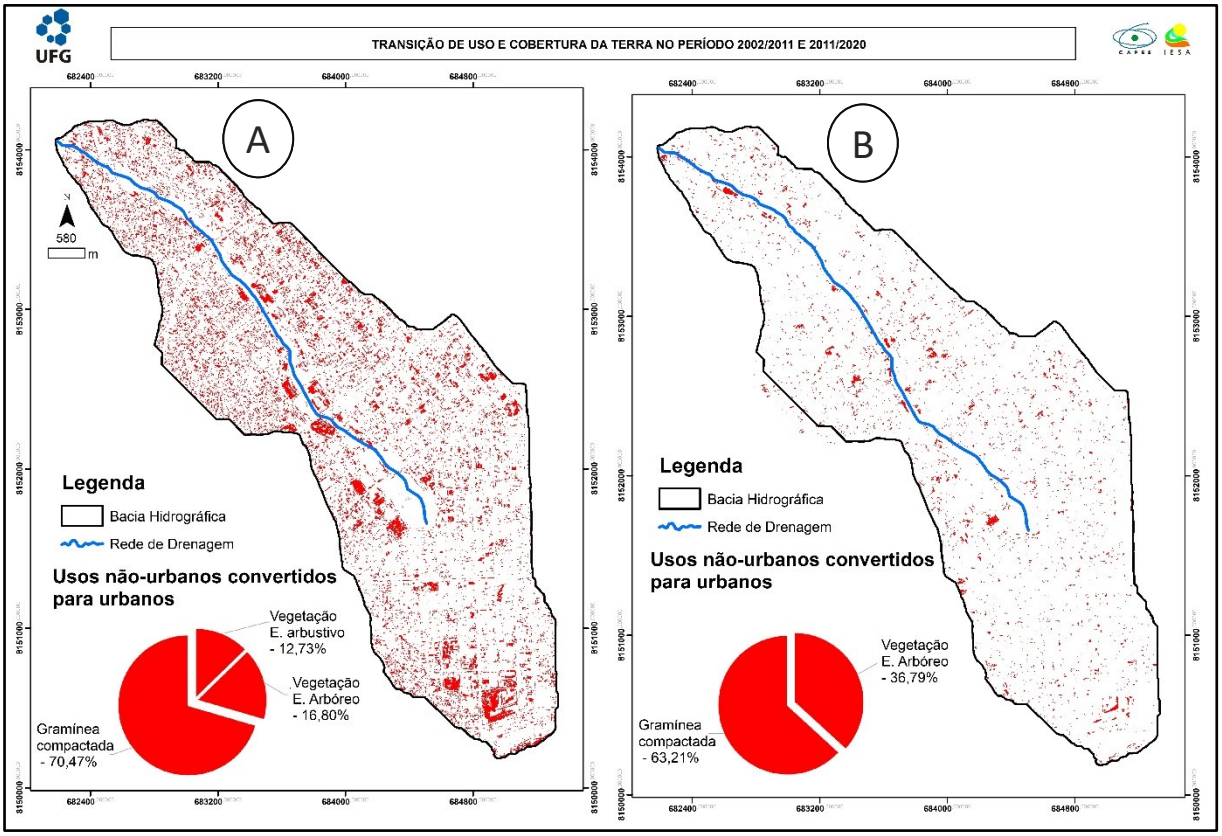
Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

A transição entre coberturas revela, conforme a Figura 42, que as gramíneas compactadas, seguidas pelas áreas de vegetação arbórea, foram as duas classes que mais cederam lugar para as áreas com permeabilidade reduzida. No primeiro caso, quando se trata de conversão para área edificada, o percentual de gramíneas compactadas chega a quase 70% no período de 2002/2011, e a cerca de 63,21% no período subsequente. É importante observar que, entre os anos de 2016 e 2020,

ocorre uma melhoria sensível nos valores de área permeável, decorrente, principalmente, de um aumento espontâneo das áreas de preservação permanente e de seu entorno, assim como da redução das áreas com solo compactado e gramíneas compactadas, nos anos de 2016 e 2020.

Quando se observa, de forma geral, os fragmentos convertidos, nota-se que as conversões estão ocorrendo em espaços menores, quando comparado o período inicial com o mais recente. Tal fato atesta que a capacidade de suporte da bacia hidrográfica em receber modificações está próxima do limite físico, quando considerada a possibilidade de novas áreas a serem ocupadas.

Figura 42 – Conversão de classes de cobertura permeáveis para classes com permeabilidade reduzida. (A) período 2002/2011; (B) período 2011/2020



Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2020)

As coberturas vegetais, por sua vez, aparecem com percentuais equivalentes a 16,80% e 37,79% de conversões nos períodos considerados. A leitura dos dados indica que tanto o percentual de conversão, que representa uma área maior no primeiro intervalo, quanto a totalidade de fragmentos convertidos foi maior no primeiro período analisado (Figura 42). Por sua vez, as transições no período seguinte,

2011/2020, exibem um padrão com fragmentos menores, mas igualmente dispersos por toda a região hidrográfica.

Em síntese, as três bacias hidrográficas em estudo são marcadas por uma consorciação de diferentes fatores, relativos à cobertura da terra, que lhes asseguram aspectos distintos, como denota o Quadro 5:

Quadro 5 – Características das bacias hidrográficas relativas à cobertura da terra

BACIA HIDROGRÁFICA	CARACTERÍSTICAS
Córrego Quebra-Anzol	• Presença de grandes áreas permeáveis; • Abertura recente de loteamentos; • Uso urbano recente/inconsolidado; • Urbanização horizontal dispersa; • Tendência de crescimento urbano em ascensão.
Alto Córrego Macambira	• Presença de grandes áreas com permeabilidade reduzida; • Uso urbano residencial consolidado; • Urbanização predominantemente horizontal, com padrão aglomerado; • Tendência de crescimento urbano em ascensão, nas áreas de cabeceira.
Córrego Vaca Brava	• Presença de grandes áreas com permeabilidade reduzida; • Canalização de córregos; • Uso urbano consolidado; • Urbanização vertical e adensada; • Tendência de crescimento urbano estabilizada.

Fonte: Organizado pelo autor (2020).

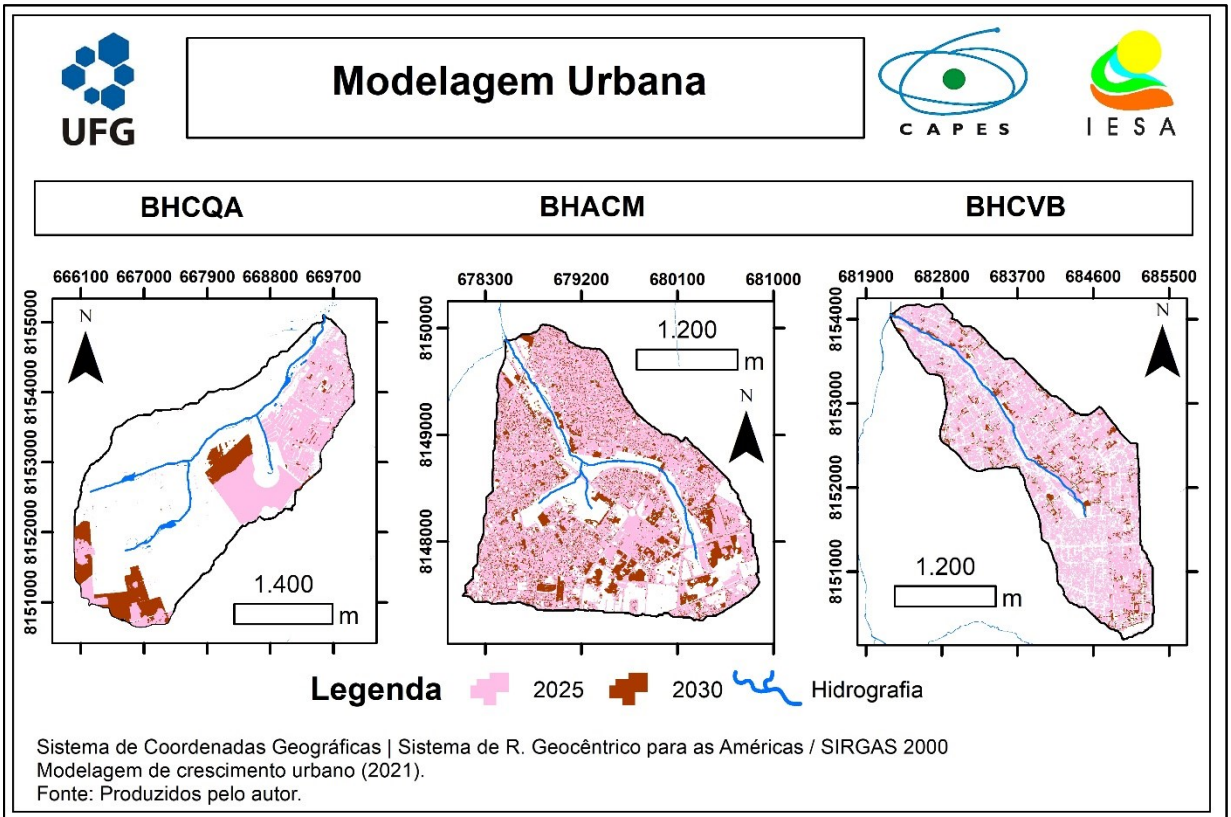
Os parâmetros listados podem alterar de maneira significativa o sistema hidrológico das bacias hidrográficas, especialmente no que diz respeito à hidrologia de superfície, de acordo com as características gerais de cada uma das regiões hidrográficas analisadas. O comportamento observado nas bacias foi estabelecido mediante análise dos dados mapeados no período compreendido entre os anos de 2002 e 2020, que serão complementados pela análise a seguir, correspondente à modelagem de crescimento urbano realizada nas bacias hidrográficas para dois cenários futuros (2025 e 2030).

5.3 Cenários urbanos modelados para 2025 e 2030

A modelagem urbana, Figura 43, ressalta as possibilidades de expansão da cobertura urbana para os anos de 2025 e 2030. Baseada nas métricas de entrada – tais como hipsometria, declividade, estradas e hidrografia –, o modelo destaca, conforme os dados de tendência, um crescimento em maior ou menor escala nas três

bacias avaliadas. A Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol é a que apresenta a maior possibilidade de expansão urbana, ligada à porção sul da bacia, bem como nas áreas localizadas à nordeste, leste e sudeste, integrando-se com a atual malha urbana.

Figura 43 – Cenários de cobertura urbana modelados para os anos de 2025 e 2030



Bacias \ Anos	2002	2006	2011	2016	2020	2025	2030	Tendência
BHCQA	0,1%	0,2%	2,8%	3,7%	5,5%	22,7%	33,2%	
BHACM	9,8%	10,0%	10,7%	13,7%	21,9%	42,9%	44,1%	
BHCVB	50,3%	50,7%	53,9%	54,3%	54,7%	58,9%	61,7%	

Fonte: Produzida e organizada pelo autor (2021).

As bacias do Alto Córrego Macambira e do Córrego Vaca Brava, por sua vez, mostram tendência de crescimento difuso por todos os setores da região hidrográfica. Considerando o período modelado e os dados quantificados em números percentuais, fica evidente a ampliação das coberturas urbanas, especialmente para os anos de 2025 e 2030, em comparação ao período anterior. Os valores de tendência, representados na parte inferior da Figura 43, corroboram para evidenciar o aumento

em todos os cenários, sendo a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava a que apresenta a menor amplitude de crescimento urbano no período 2020-2030.

A BHCVB representa um potencial de modificação das coberturas urbanas muito reduzido, pois sua estrutura urbana já se encontra bastante consolidada e comprometida, fato que pode ser comprovado pela mudança de apenas 4% de aumento desse tipo de cobertura entre os anos de 2002 e 2020, podendo chegar a até 7% de ampliação no ano de 2030. Todo esse cenário dificulta, inclusive, medidas de contenção dos danos oriundos do escoamento superficial em períodos de precipitação intensa.

A maior amplitude de crescimento foi projetada para a Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Quebra-Anzol, já que, em termos percentuais, ela passará de 5,5%, em 2020, para 33,2%, em 2030, de intensificação de suas coberturas urbanas, um crescimento de 27,7%. Por sua vez, a bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira, embora não seja a mais comprometida hidrologicamente, passará de 21,8% de cobertura urbana, em 2020, para 44,1% no ano de 2030, um aumento de 22,3%. Resultados semelhantes também foram encontrados por Oliveira et al. (2021), quando os autores projetaram o crescimento das áreas urbanizadas em Fortaleza – CE.

Observando os cenários projetados, os dados evidenciam uma intensificação, que pode ser muito comprometedora, de acordo com o padrão de crescimento e intensificação das coberturas urbanas em consonância com os resultados já apontados por Lino (2013), que projetou aumento de até 60% da mancha urbana na Região Metropolitana de Goiânia até o ano de 2060.

Do ponto de vista do escoamento superficial urbano, acontece, em todas as três bacias, uma grande intensificação dos processos hidrológicos de escoamento em detrimento da infiltração, que podem acarretar diversos problemas em pontos específicos, como no exutório e/ou em outras bacias localizadas a jusante.

A modelagem realizada, projetou apenas a expansão urbana em termo de mensuração de área, não sendo uma das variáveis consideradas o incremento populacional advindo deste aumento. Tendo realizado, neste capítulo, a análise morfométrica e da cobertura da terra em ambas as bacias mencionadas, busca-se, no capítulo subsequente, investigar, de modo complementar, por meio de processos e modelagens específicas, os potenciais comportamentos dos parâmetros hidrológicos, bem como realizar uma leitura histórica sobre como a dinâmica de modificação da cobertura da terra influencia os fluxos superficiais.

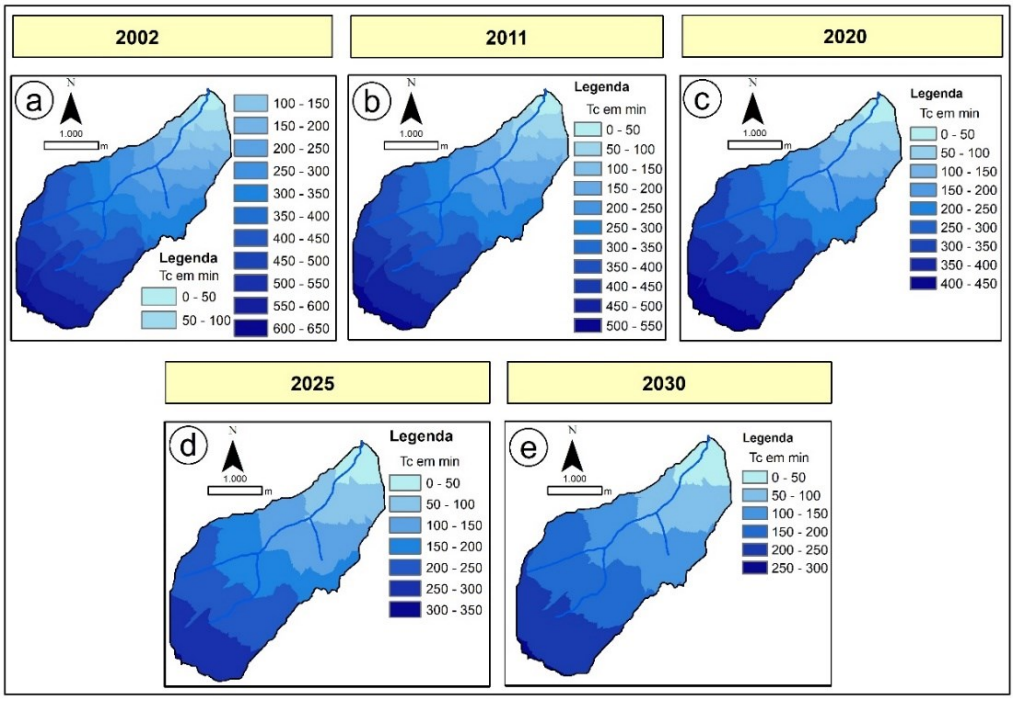
CAPÍTULO 6 – MODELAGEM DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DAS BACIAS EM ANÁLISE E CENÁRIOS FUTUROS

6.1 Tempo de concentração – Tc

O tempo de concentração (Tc) é o parâmetro responsável por quantificar o tempo necessário, em uma bacia hidrográfica, para que todo o escoamento superficial possa convergir para o exutório, sendo mensurado em minutos (TUCCI, 2012). Quando o tempo de concentração é distribuído e espacializado, fornece um retrato da contribuição hidrológica de cada parcela da bacia hidrográfica analisada (NUNES; BORBA, 2018). O tempo de concentração (Tc) é uma variável subordinada à velocidade do escoamento superficial, uma vez que o aumento da velocidade do escoamento superficial diminui o tempo de concentração, portanto, são variáveis inversamente proporcionais.

Dessa forma, para analisar esse parâmetro, foram elaborados mapas que pormenorizem o tempo de concentração, seus valores máximos e mínimos, além da representação da variação espacial e temporal desse dado distribuído por bacia. A Figura 44 apresenta esses mapas para a Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol (BHCQA) entre os anos de 2002 e 2030.

Figura 44 – Representação do tempo de concentração na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030



Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Como pode ser observado na referida figura, o método cartográfico utilizado para representar o tempo de concentração foi o do intervalo igual, pois este tornou viável o estabelecimento de parâmetros comparativos entre os diferentes cenários. Assim, é possível notar uma diminuição gradual da quantidade de classes mapeadas (Figura 44), sendo o intervalo adotado entre as classes igual a cinquenta minutos em todos os mapas. No entanto, a Figura 44 traz mais quantidades de classes relacionadas ao ano de 2002, indicando um maior tempo necessário para convergir o escoamento. Para o ano de 2030, essa variabilidade torna-se reduzida, com menos classes, indicando a diminuição do tempo de concentração.

A Figura 44 (a), registra um valor máximo de tempo de concentração de 650 minutos para o ano de 2002, ficando esse valor restrito às áreas de recarga e nascentes da bacia, que mantinham cobertura da terra predominantemente composta por gramíneas não compactadas, sem presença de áreas urbanas.

Na sequência, a Figura 44 (b e c) exibe, correspondente aos anos de 2011 e 2020, valores máximos de tempo de concentração menores em relação ao período anterior, fato que pode ser explicado pela conversão de uso da terra, especialmente pela transição entre cobertura da terra com alta capacidade permeável para uma com pouca ou nenhuma capacidade permeável. É importante notar o aumento das áreas edificadas, de superfícies pavimentadas e gramíneas compactadas, que, no conjunto, representam uma intensificação considerável na bacia, especialmente quando observados os cenários mais recentes, que acabam contribuindo para acelerar os fluxos superficiais.

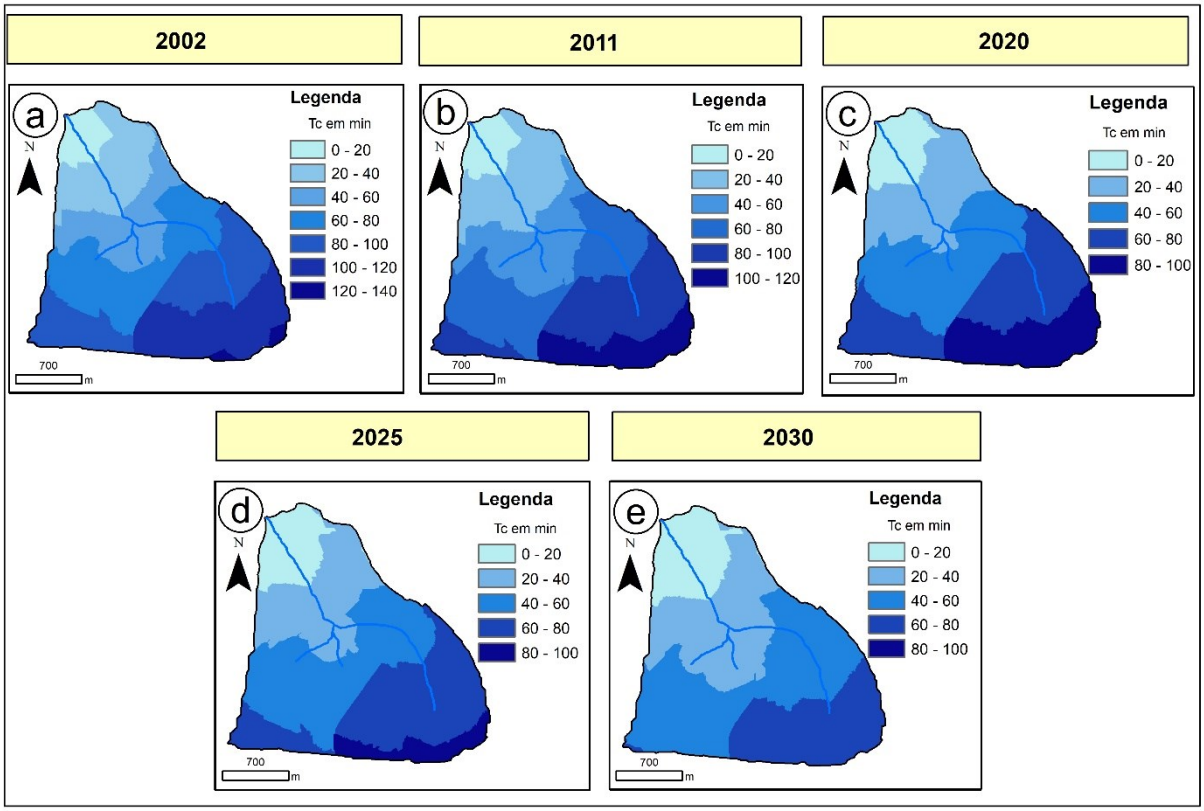
Os cenários projetados, referentes aos anos de 2025 e 2030, obtidos por meio de modelagem espacial da cobertura urbana, revelam uma continuidade da intensificação dos fluxos superficiais. Os valores máximos de tempo de concentração nos períodos representados pela Figura 44 (d, e) reduzem-se, respectivamente, para valores máximos iguais a 350 e 300 minutos. Desse modo, a bacia, que levaria, inicialmente, cerca de dez horas para contribuir com o fluxo superficial no exutório, poderá passar a contribuir em apenas cinco horas, fracionando pela metade o seu tempo de concentração.

Da mesma forma que foi realizada a análise do tempo de concentração para a Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol (BHCQA) buscou-se realizar nas demais bacias. Por conseguinte, destaca-se que a Bacia Hidrográfica do Alto Córrego

Macambira, representada na Figura 45. Esta, apresenta comportamento semelhante ao constatado na região hidrográfica anterior.

Na BHACM é possível perceber que o tempo de concentração decai de um valor máximo de 140 minutos, no ano de 2002, para 100 minutos, em 2020, valor que permanece como máximo também a partir das modelagens realizadas para os anos de 2025 e 2030. Contudo, é importante ressaltar que, nesse último período, a área ocupada pela classe de valores máximos é expressivamente reduzida no conjunto de *pixels* que a representa. Esta, por sua vez, se encontra associada às áreas de recargas e longe do exutório da bacia. Nesse sentido, o tempo de concentração referente aos anos de 2025 e 2030 encontra-se concentrado efetivamente nas classes entre 0-20 e 60-80 minutos.

Figura 45 – Representação do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, entre os anos de 2002 e 2030



Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Nos cenários demonstrados pela Figura 45 (a, b e c), é nítido um contraste implementado pela porção localizada à sudeste, responsável por abrigar os maiores valores de tempo de contração, em vista das áreas com valores menos representativos. Tal contraste, apresentado na Figura 45, acentua-se com os cenários

respectivos de cobertura da terra, traduzidos nas áreas próximas ao exutório e em geral localizadas nas porções sudoeste, oeste e noroeste, em áreas caracterizadas pela impermeabilização e presença das coberturas urbanas. Já o setor localizado à sudeste, além de mais distante do exutório, é constituído por uma parte significativa das áreas de recarga da bacia, marcadas, historicamente, por representarem áreas de cobertura da terra permeáveis. Atualmente, muitas dessas áreas situadas nessa porção da bacia encontram-se em processo inicial de ocupação.

No caso das coberturas marcadas pela impermeabilização o escoamento torna-se facilitado, uma vez que todo o sistema de vias e acessos no interior e fora dos lotes e quadras é constituído por estruturas com capacidade permeável reduzida. Quando observadas as coberturas presentes na área de recarga associada à porção sudeste, constata-se que elas ainda se encontram com destacada capacidade permeável em relação às demais, mesmo que, na prática, isso possa se traduzir em solos desprotegidos e desnudos, susceptíveis a processos erosivos lineares (CAVALCANTE, 2019) ou à presença de gramíneas compactadas.

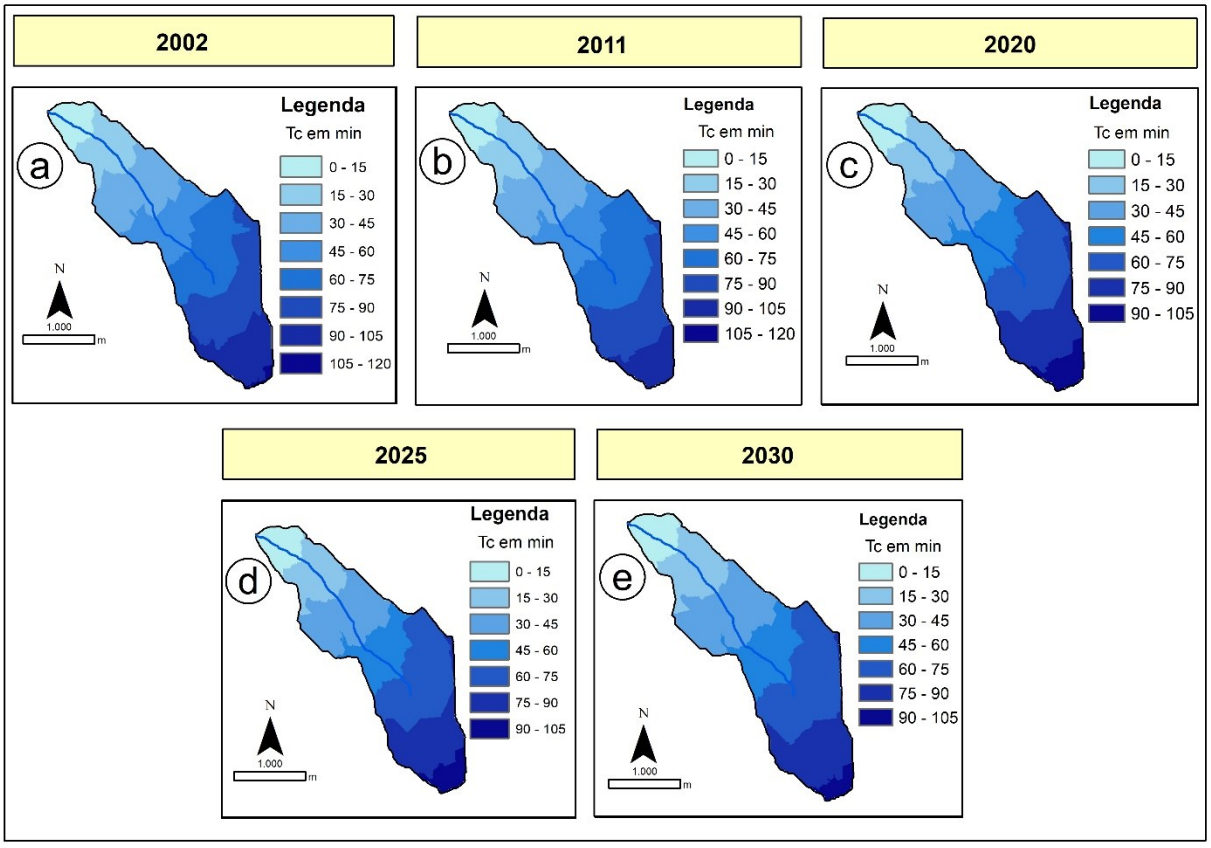
Entre os cenários apresentados na Figura 45 (a, b e c), a redução do tempo de concentração máximo foi de apenas 20 minutos. Nos períodos modelados, por sua vez, compreendidos pela Figura 45 (d e e), não houve redução do Tc máximo, entretanto, a bacia exibe uma diminuição considerável na área dessa última classe, marcando a redução da área destinada aos maiores tempos de concentração. Esse processo pode ser explicado pelo aumento expressivo, também modelado, das coberturas da terra com permeabilidade reduzida, como já abordado no Capítulo 5.

Já a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava apresenta, em relação às demais bacias analisadas, o menor tempo de concentração, fato ligado à condição de elevada urbanização presente nessa bacia desde o ano de 2002. Nesse sentido, a amplitude entre o tempo de concentração mínimo e máximo pouco varia nos períodos analisados. Dessa forma, a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava (Figura 46) tem, como tempo de concentração máximo, 120 minutos, no ano de 2002, tempo este que se reduz para 105 minutos, em 2020, e permanece constante até o ano de 2030.

Com base na Figura 46 (a e b), pode-se perceber que o tempo de concentração varia apenas em domínio de áreas na bacia, pois os intervalos de classe são exatamente os mesmos e expressam Tc típicos de áreas urbanizadas e em particular, nesse caso, uma área assinalada por forte verticalização. A Figura 46 (c) traz, como maior intervalo de Tc, a classe entre 90 e 105 minutos, valores estes que

permanecem para os anos de 2025 e 2030 (Figura 46, d e e). Pode-se inferir que isso se deve à pouca modificação interna da estrutura urbana, relativa à cobertura da terra entre os anos analisados.

Figura 46 – Representação do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, entre os anos de 2002 e 2030



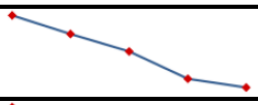
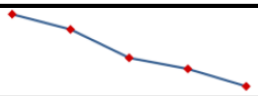
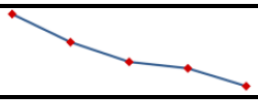
Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Cabe ainda destacar que houve mudanças na composição interna do Tc mapeado, no entanto, elas apresentam menor magnitude se comparadas às outras regiões hidrográficas analisadas. As mudanças ocorridas, porém, conseguem, de maneira sensível, modificar alguns contornos que definem as distintas classes de Tc, como é o caso do maior intervalo, representado na Figura 46 (c, d e e).

Em síntese a análise das tendências, sistematizada na Figura 47, possibilita observar, em todas as bacias hidrográficas, um comportamento de redução no tempo de concentração. Em outras palavras, essa redução significa um maior volume de água em um menor tempo, convergindo para o exutório das bacias em análise. Nessa perspectiva, o aumento dos fluxos superficiais pode ampliar diversos problemas no

meio urbano, ainda mais quando considerados fluxos adicionais de outras bacias à montante.

Figura 47 – Valores de referência máximos para o tempo de concentração (Tc)

Bacia \ Ano	2002	2011	2020	2025	2030	Tendência
BHCQA	630,31	535,76	446,47	306,15	261,34	
BHACM	129,14	118,72	99,47	92,01	80,01	
BHCVB	110,73	105,92	102,57	101,5	98,43	
	Valores em Minutos					

Fonte: Mapas de tempo de concentração (2021).

Quando comparadas as amplitudes do tempo de concentração, pode-se perceber que a transição mais abrupta ocorre na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, que passa de exatos 630,31 minutos para 446,47 minutos, em um intervalo de 18 anos, e pode chegar até 261,34 minutos nos próximos 10 anos. Isso significa que, no período mapeado (2002 a 2020), a redução foi de 184 minutos no tempo de concentração em um período de 18 anos. Já no intervalo modelado (2020 a 2030) a redução foi de 185 minutos, ou seja, em apenas 8 anos, o tempo de concentração máximo pode cair na mesma proporção do período anterior.

A Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira externa valores menos abruptos que a anterior. Dito isso, ela detinha, no ano de 2002, uma condição hidrológica melhor, capaz de retardar o tempo de concentração e, ao longo do tempo, esse aspecto mostra considerável redução a partir de seus valores máximos, principalmente nas áreas edificadas e de superfícies pavimentadas, até o ano de 2020, fato que também se repete para os anos modelados (2025 e 2030).

Os valores demonstram números que se reduzem, inicialmente, de 129,14 minutos para 99,47 minutos e, considerando o período modelado, podem chegar até 80,01 minutos. As amplitudes de tempo de concentração no período (2002 a 2020) são iguais a 29,67 minutos e, no período subsequente (2020 a 2030), a amplitude foi correspondente a 19,46 minutos. A linha de tendência é clara e indica uma redução no tempo de concentração na bacia.

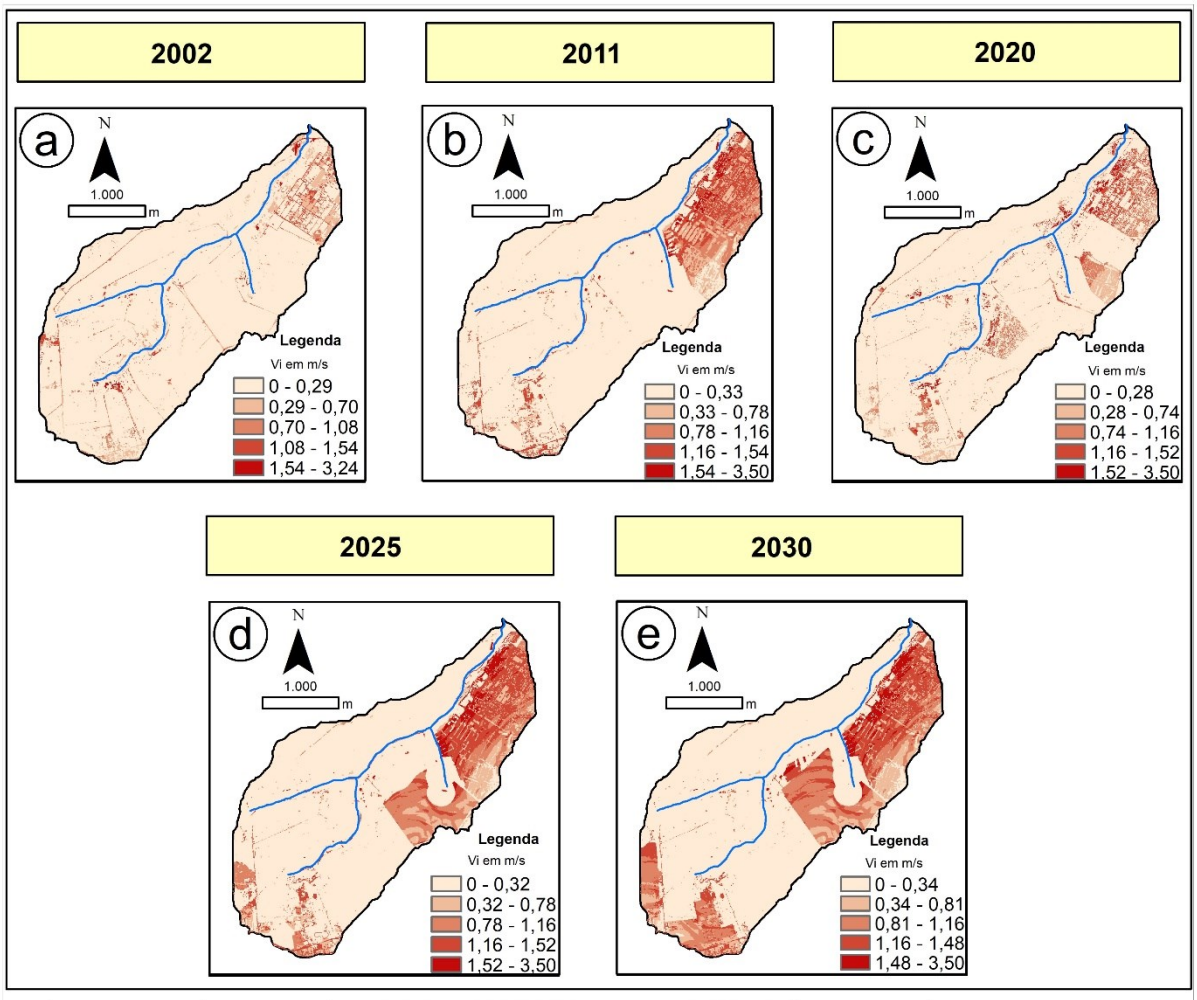
Já a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava apresenta valores de alterações menos abruptos que as demais, fato corroborado historicamente por sua cobertura da terra, que é uma área de ocupação mais antiga e consolidada que as demais. A bacia chega em 102,57 minutos, em 2020, e pode reduzir tal valor para pouco mais de 98 minutos, em 2030. A amplitude total no período é de 8,16 e 4,14, respectivamente, entre os anos de 2002 a 2020 e de 2020 a 2030. Apesar de pequena, essa redução no tempo de concentração pode impactar bastante a hidrologia da bacia, uma vez que problemas de drenagem urbana são recorrentes e podem ser intensificados, ainda mais para uma bacia que já possui toda a sua área praticamente impermeabilizada. Posto isso, busca-se, em seguida, estabelecer conexões com outra variável importante, a velocidade de escoamento superficial (Vi), bem como estabelecer sua relação com o tempo de concentração e com a cobertura da terra nas bacias.

6.2 Velocidade do escoamento superficial – Vi

A velocidade de escoamento superficial (Vi) é a estimativa que permite avaliar a rapidez de deslocamento da água quando ocorre seu contato com a superfície observada, sendo mensurada em metros por segundo – m/s (TUCCI, 2001). Quando relacionada ao tempo de concentração, especialmente se este demonstrar uma tendência de redução, parte dessa modificação pode ser explicada por uma maior velocidade da água ao interagir com a superfície analisada. A velocidade de escoamento superficial será menor quanto menor for o nível de interferência antrópica na cobertura da bacia, contribuindo para um aumento do tempo de concentração.

A Figura 48 mostra as estimativas de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, nos períodos mapeados e modelados. O método de representação adotado foi o das Quebras Naturais, em que o *software* reconhece as descontinuidades dos *pixels* e seus valores com base na área mapeada e os agrupa em classes (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Figura 48 – Representação da velocidade de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
Vi	1	91,3%	88,0%	83,1%	73,5%	67,4%	
	2	4,6%	2,8%	6,3%	7,5%	8,7%	
	3	1,5%	4,3%	3,5%	8,3%	11,4%	
	4	2,2%	3,7%	5,6%	8,3%	9,6%	
	5	0,4%	1,2%	1,5%	2,5%	3,0%	

% de área
Alto
Médio
Baixo

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Conforme a análise cartográfica, os mapas revelam que a velocidade do escoamento superficial obedece aos contornos das classes de coberturas da terra, que apresentam potencial impermeabilizante, por isso, mantém forte relação estes mapas. O valor máximo observado na Figura 48 (b, c, d e e) é de 3,50 m/s, sendo este, indicativo de que o escoamento superficial consegue movimentar-se com fluidez de até três metros e meio a cada segundo.

A tendência é de intensificação das velocidades de escoamento superficial, tanto nos períodos marcados pela Figura 48 (a, b e c) como nos cenários 48d e 48e. Essa intensificação é percebida por meio de dois principais aspectos, compreendendo o primeiro deles as áreas da baixa e média bacia, situadas à margem direita do Córrego Quebra-Anzol e envolvendo parcela da mancha urbana de Goiânia; o segundo abrange algumas regiões do divisor de águas na alta bacia, ligadas à expansão urbana de áreas rurais do município de Abadia de Goiás.

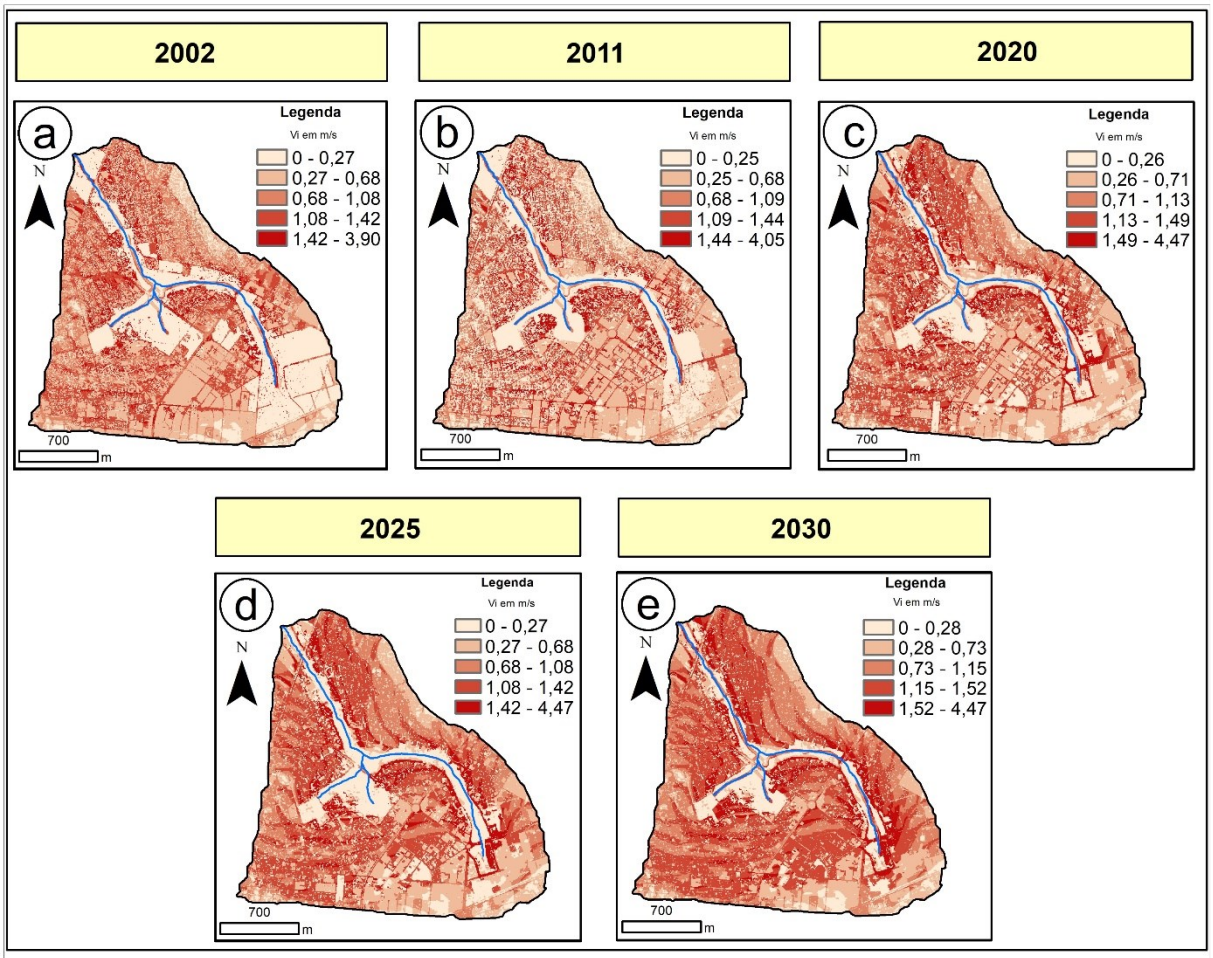
A análise temporal do percentual de área das classes, de Vi, pode revelar importantes indicativos das condições dos fluxos superficiais na bacia. Como exposto na Figura 48, há um indicativo de aumento em todas as classes, exceto para a classe referente ao primeiro intervalo, que mostra uma redução de 23,9% de área no período de 2002 a 2030. Essa redução relaciona-se com as menores velocidades de escoamento superficial, ao passo que todas as outras classes exibem respectivos aumentos anuais de área, distribuídos pelos valores mais elevados de escoamento. De modo geral, a diminuição da área compreendida pela Classe 1 é muito grande e significativa no contexto da bacia hidrográfica, pois se trata, em sua imensa maioria, de áreas com altos índices de infiltração e tempos de concentração maiores, que pode acarretar diversas consequências ao ciclo hidrológico da bacia.

De modo particular, os valores representados nos intervalos de Classes 2, 3, 4 e 5 guardam relação direta com o modelo de urbanização, que tem evoluído paulatinamente no período analisado. Os valores mapeados e quantificados na tabela da Figura 48 mostram que, até o ano de 2020, há uma tendência de crescimento acompanhada, nas referidas classes, também pelos cenários modelados 2025 e 2030. Essas áreas, portanto, registram aceleração média dos fluxos superficiais, nas classes 2, 3, 4 e 5, em aproximadamente 6% da bacia, fato este que implica diminuição, de maneira inseparável, do tempo de concentração na bacia. Assim, mesmo que os valores individualizados das referidas classes representem pequenas porções distribuídas pela área na bacia, quando somados, configuram uma parcela significativa da região hidrográfica.

A velocidade de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira (Figura 49) possui tendência de elevação em um aspecto distribuído por toda a sua área. De modo geral, apresenta valor máximo de 4,47 m/s a partir do ano de 2020. A dinâmica da cobertura da terra entre 2002 a 2020 compreende o principal fator para a ampliação, de modo significativo, das velocidades atribuídas ao

escoamento superficial, especialmente o percentual de cobertura da terra impermeável, que ampliou muito entre os anos de 2011 a 2020 (Figura 49b).

Figura 49 – Representação da velocidade de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
Vi	1	31,3%	36,0%	24,3%	22,0%	15,4%	
	2	30,5%	31,1%	28,6%	24,6%	20,2%	
	3	12,8%	8,3%	14,3%	16,6%	19,5%	
	4	19,0%	17,2%	24,4%	28,0%	35,0%	
	5	6,3%	7,4%	8,4%	8,8%	9,9%	

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

A partir da Figura 49 (c), percebe-se uma forte intensificação da concentração de áreas com velocidade de escoamento superficial elevada, especificamente na porção sudeste da bacia, que se refere à área das cabeceiras de drenagem. Devido

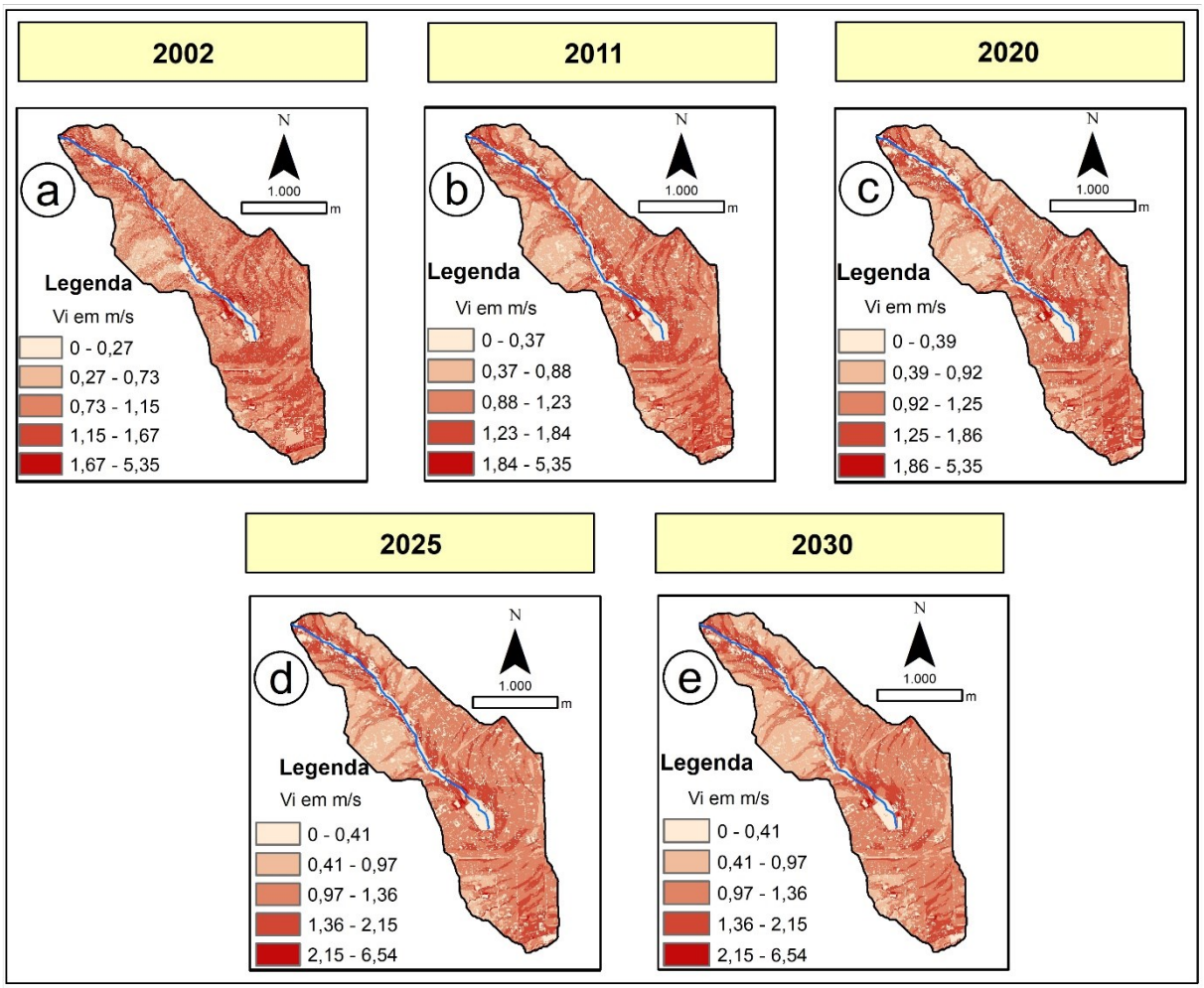
à urbanização, essa região passa a contribuir com expressiva potencialidade do parâmetro hidrológico (Vi). Caso a tendência de aumento continue, a modelagem de escoamento representada pela Figura 49 (e) mostra que o ano de 2030 poderá representar uma intensificação ainda maior, partindo de valores de Vi entre 0,78 m/s até 3,24 m/s, nessa mesma localidade e também na porção sudoeste.

Fatiados os valores, a análise de tendência do percentual de área (entre os anos 2002 a 2030) revela, para as Classes 1 e 2, uma propensão de diminuição, ou seja, as áreas que detinham as menores velocidades de escoamento superficial serão convertidas para intervalos de classes de maiores velocidades. Isso quer dizer que, no ano de 2002, a Classe 1, que detinha 31,3% de áreas na bacia, passa, em 2020, a 24,6%, e, conforme a modelagem realizada, poderá chegar a 15,4% de áreas em 2030. Em outras palavras, essas áreas deixam de ter velocidade de escoamento superficial amenas para desenvolverem maiores velocidades de escoamento. Considerando os valores mapeados nos anos de 2025 e 2030 as Classes 3, 4 e 5, tendem a ampliar-se, fazendo com que um volume cada vez maior de água chegue, em um menor tempo, ao exutório da bacia.

Sobre a velocidade de escoamento superficial na bacia do Córrego Vaca Brava, a Figura 50 destaca as modificações no intervalo selecionado. Dentre as bacias analisadas, essa bacia é a que apresenta as maiores velocidades de escoamento superficial. Tal fato pode ser explicado, em parte, pela cobertura da terra presente, com elevado grau de compactação e redução da capacidade permeável. Conforme a Figura 50 (a, b e c), a bacia exibe, nos anos iniciais (2002 a 2020), valor máximo da velocidade de escoamento de até 5,35 m/s.

Já os cenários futuros, representados com base na modelagem de processos urbanos, apresenta, como valor máximo, 6,54 m/s. Espacialmente, as velocidades de escoamento superficial encontram-se bem distribuídas, fato que potencializa ainda mais a redução do tempo de concentração, também indicando a presença de coberturas da terra com capacidade permeável reduzida por todos os setores da região hidrográfica. Isso significa que mais áreas passaram a figurar na Classe 3 entre 0,97 m/s e 1,36 m/s, que compreendem as velocidades de escoamento superficial classificadas como intermediárias.

Figura 50 – Representação da velocidade de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
Vi	1	12,7%	15,0%	20,6%	16,2%	14,1%	
	2	21,1%	16,2%	14,9%	17,3%	20,3%	
	3	35,2%	40,2%	38,6%	46,5%	48,3%	
	4	28,2%	26,6%	24,0%	18,7%	16,0%	
	5	2,9%	2,0%	1,8%	1,3%	1,3%	

% de área
Alto
Médio
Baixo

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Por sua vez, as Classes 2, 4 e 5 mostram dados de extensão de área na bacia com tendência de queda. Estes, respectivamente, eram de 21,1%, 28,2% e 2,9% no ano de 2002 e se reduzem, quando comparados ao ano de 2030, para 20,3%, 16% e 1,3%. A Classe 5 é a que apresenta menor amplitude no período. Já a Classe 4 tem tendência de queda das áreas, totalizando uma amplitude de 12,2% no período analisado. A Classe 2, a seu turno, traz uma tendência em curvatura “U”, representada

por uma queda entre 2002 a 2020, seguida de intensificação nos anos finais da análise, 2025 e 2030. Isso revela que a classe de velocidades entre 0,41 m/s e 0,97 m/s, no período analisado, pode permanecer inalterada, pois registra valores iniciais e finais muito próximos. Já a Classe 1 mostra uma tendência de aumento até 2020, passando de 12,7% para 20,6%, em seguida reduzindo-se nos cenários construídos por meio de dados modelados, atingindo, em 2030, 14,1%.

Por fim, tendo realizado a análise da velocidade do escoamento superficial, o tópico a seguir traz o coeficiente de infiltração das bacias hidrográficas, que, juntamente com o tempo de concentração e a velocidade de escoamento superficial, constituem parâmetros importantes para serem examinados na análise hidrológica de superfície.

6.3 Coeficiente de armazenamento de água no solo – S

O coeficiente de armazenamento de água no solo/infiltração (*S*) é uma variável dada em mm. Expressa por meio da Equação 10 (capítulo 4), mostra a capacidade de suporte ao armazenamento de água no solo da bacia hidrográfica, associada ao tipo de cobertura da terra e tipologias de solos observadas. Correlacionando-o com os parâmetros anteriores, as regiões com maior potencial de infiltração têm, respectivamente, maior tempo de concentração e menor velocidade de escoamento superficial, enquanto regiões com menor possibilidade de infiltração tendem a apresentar menor tempo de concentração e maior velocidade de escoamento superficial.

No contexto das bacias hidrográficas urbanas, as áreas que mais contribuem para a efetivação da infiltração de água são as de preservação permanente (APP) dos córregos e de seu entorno, inalteradas. Nesse sentido, em maior ou menor magnitude, elas são as grandes responsáveis pelos volumes infiltrados, já que, em geral, os solos estão livres de construções e preservam suas propriedades naturais.

Na conjuntura de Goiânia, as APP são constituídas, quase sempre, por uma associação entre neossolos e gleissolos nas proximidades do canal de drenagem, cabendo destacar, no contexto das bacias de drenagem em questão, o papel das áreas de preservação permanentes do córrego Quebra-Anzol, associada aos seus afluentes (NUNES; BORBA, 2018; ROCHA; PASQUALETTO; NUNES, 2021). Essas

áreas mostram características favoráveis ao melhor desempenho do coeficiente analisado, uma vez que preservam, em grande parte, a dinâmica natural do ambiente.

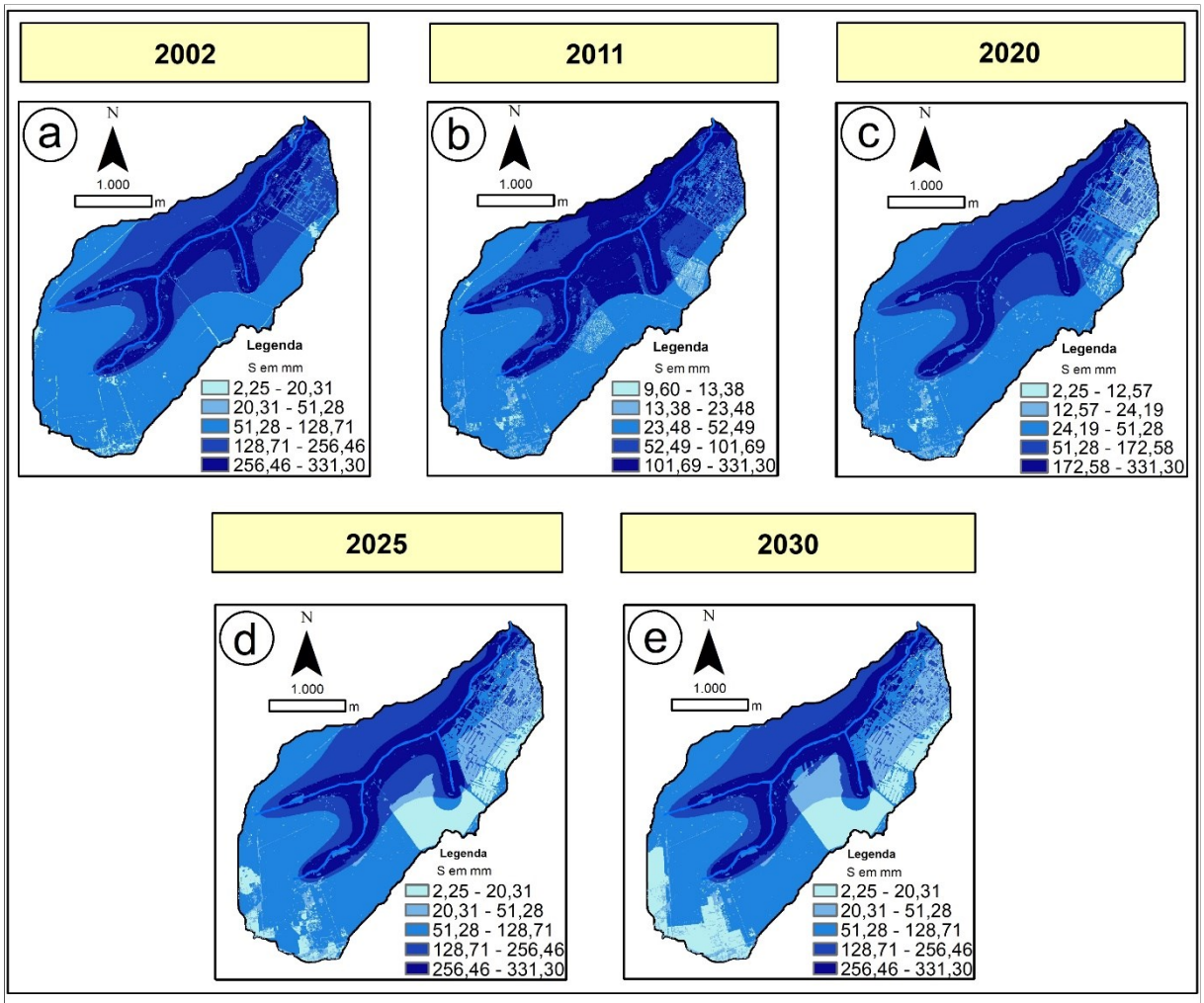
A Figura 51 (a, b e c), que retrata o coeficiente S para os anos 2002, 2011 e 2020 na BHQA, exibe, a partir da região nordeste da bacia, áreas com menor capacidade de armazenamento de água no solo, representadas pelas classes compreendidas entre valores que podem variar de 2,25 mm a 24,19 mm. Por sua vez, os cenários projetados para 2025 e 2030 (Figura 51 d e e) mostram, com mais expressividade, a intensificação e o aumento dessas áreas com baixa capacidade de armazenamento de água no solo. Tais áreas localizam-se na porção nordeste, leste e sul da bacia hidrográfica, como regiões marcadas pelas atuais e futuras intensificações urbanas.

Em termos de aumento percentual, os dados expressos pela Classe 1 ressaltam uma concentração de área que equivalia a apenas 3% da BHCQA no ano de 2002, em seguida ampliando-se para 6,4%, em 2011, e para 16,8%, em 2030 segundo as projeções realizadas. Posto isso, a capacidade de armazenar água no solo, dada pelo coeficiente S, deve diminuir nas áreas compreendidas pelo referido intervalo de classe.

Deste modo, a análise dos dados de percentual de área no intervalo analisado indica o aumento da classe que representa os percentuais mais baixos de infiltração. Isso significa que, ao longo do tempo, mais áreas podem passar a contribuir para a diminuição do coeficiente S. Na Classe 2, a tendência é inversa, visto que os valores demonstram queda. Já as Classes 3, 4 e 5, apresentam tendência de elevação da quantidade de área compreendida pelos referidos intervalos, até o ano de 2020, seguidos por relativa queda até 2030, assim demonstrando melhora na capacidade de armazenamento de água no solo.

Logo, ressalta-se que, até o ano de 2020, parte significativa da bacia tinha, em média, 32% de suas áreas compreendidas pelas Classes 4 e 5, ou seja, de valores mais elevados de S. Por outro lado, quando consideradas as modelagens realizadas para 2025 e 2030, esse mesmo intervalo de classes mostram tendência de aumento, ou seja, em média 37,3% da bacia podem passar a possuir valor de S entre as Classes 4 e 5.

Figura 51 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
S	1	3,0%	6,4%	3,5%	11,9%	16,8%	
	2	47,3%	48,9%	5,3%	7,8%	10,3%	
	3	28,4%	11,8%	49,3%	41,6%	36,8%	
	4	12,9%	12,3%	23,5%	20,7%	18,3%	
	5	8,4%	20,6%	18,5%	18,0%	17,7%	

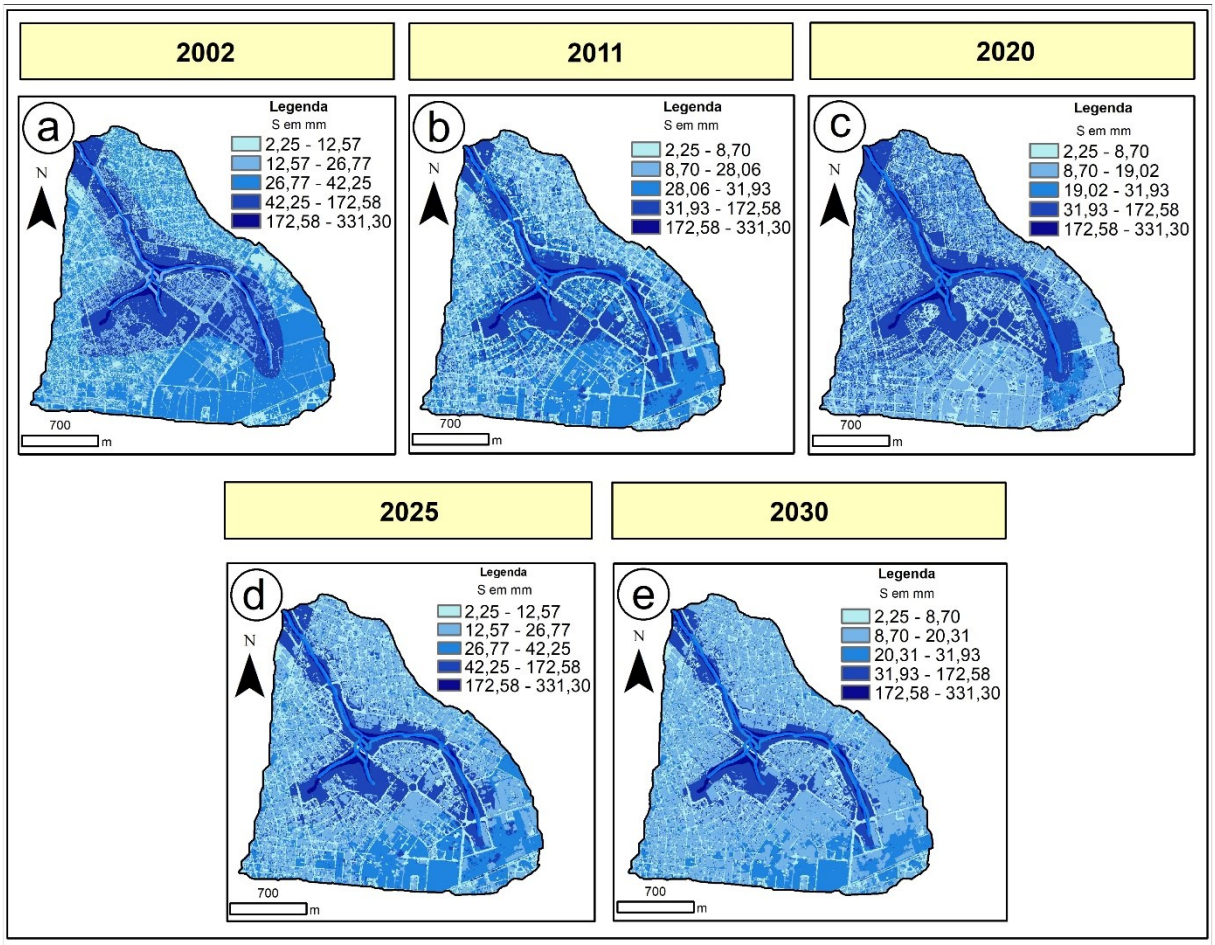
% de área
Alto
Médio
Baixo

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

O coeficiente de armazenamento de água, representado pela Figura 52, mostra que a Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira apresenta concentração das áreas com elevado grau de infiltração, com valores máximos de até 331,30 mm próximos às áreas de APP de cursos d'água, especialmente localizadas, de forma mais significativa, na alta bacia hidrográfica. Os mapas da Figura 52 (a, b e c),

referentes aos anos de 2002, 2011 e 2020, estão em tons azulados, sendo possível notar que cada vez mais áreas da bacia hidrográfica passam a figurar nas classes com menor possibilidade de infiltração.

Figura 52 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na bacia hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
S	1	30,2%	29,0%	25,0%	46,2%	51,5%	
	2	11,2%	29,1%	24,0%	13,2%	17,2%	
	3	34,2%	16,4%	29,8%	22,3%	16,3%	
	4	22,2%	23,2%	19,1%	16,3%	13,0%	
	5	2,2%	2,3%	2,0%	2,0%	2,0%	

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

A partir dos anos de 2025 e 2030, Figura 52 (d e e), a quantidade de áreas com coeficiente S elevado destina-se a diminuir de forma ainda mais acentuada,

principalmente nas regiões sul e sudoeste da bacia, caso a propensão de aumento da urbanização se concretize. Nesse sentido, os dados corroboram para atestar a importância da implantação de projetos de parques lineares, como é o caso do Macambira-Anicuns. Uma vez que as APP em bacias urbanas são muito pressionadas pela intensidade dos fluxos hídricos (NUNES; BORBA, 2018), elas acabam ainda funcionando como elementos de amortização do impacto da água.

No entanto, é preciso mencionar que pensar a infiltração da água na bacia hidrográfica não deve remeter-se apenas a uma frente de atuação estabelecida por meio do papel das áreas de preservação permanente, uma vez que elas podem, ao longo do tempo, sofrerem processos de degradação oriundos do impacto da chegada da água nas APP, em volumes e velocidades cada vez maiores e em intervalos de tempo cada vez menores.

Assim, a análise de tendência das áreas das classes revela que, somente na Classe 1, os valores apresentam propensão de elevação, ou seja, cada vez mais, áreas passam a figurar no intervalo de menor coeficiente S. Nas demais classes (2, 3, 4 e 5), os valores mostram, a partir do ano de 2002 e 2011, uma tendência de redução do coeficiente de armazenamento de água no solo, evidenciada pelas curvaturas descendentes (Figura 52).

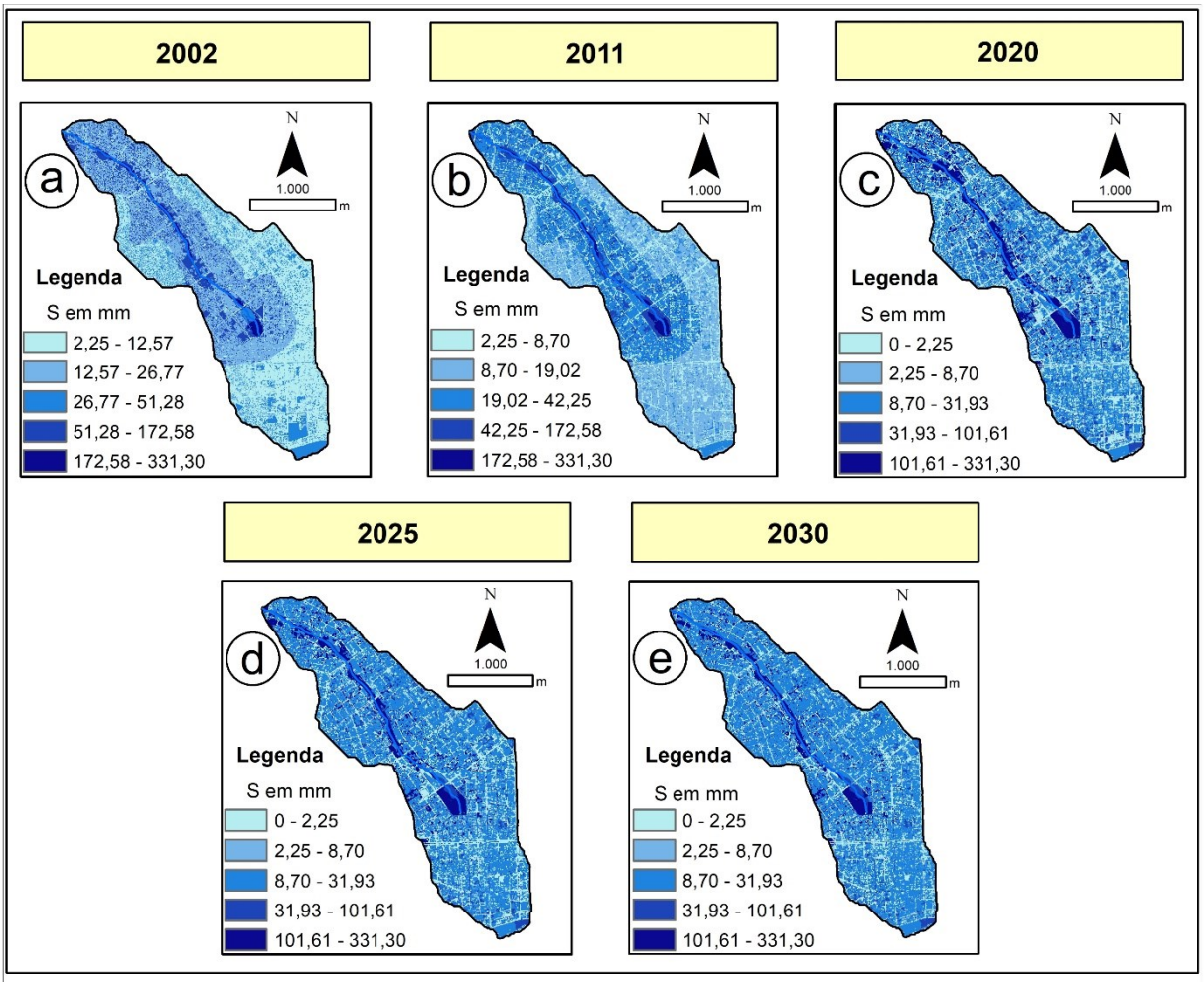
O coeficiente S, representado pela Figura 53 (a, b e c), demonstra a dinâmica temporal nos padrões de infiltração da água na bacia do Córrego Vaca Brava. O valor máximo do coeficiente registado foi de 331,30 mm. A presença desse valor mais elevado, novamente, fica a cargo das áreas de preservação permanente do canal principal da bacia. Esse mesmo padrão pode ser observado na Figura 53 (d e e).

O fato a ser observado é que há uma razoável melhora na qualidade do coeficiente S representado na BHCVB, especialmente constatada a partir do ano de 2020 em comparação com o de 2002. Ou seja, parte significativa das áreas que se encontravam na Classe 2 passam a figurar na Classe 3 na Figura 53 (c, d e e), representando, portanto, um melhor percentual de armazenamento de água no solo. Isso ocorre mesmo a BHCVB tendo intensificado suas coberturas urbanas no período.

Para explicar esse acontecido, é necessário recorrer aos dados de cobertura da terra, pois, em paralelo a essa intensificação das coberturas urbanas, ocorre também um aumento da cobertura vegetal, passando de 10,6%, no ano de 2002, para 19,4%, em 2020, acompanhada de uma redução bastante significativa dos solos compactados, que eram de cerca de 10,2%, em 2002, e passam a representar apenas

0,2%, em 2020. Ainda sobre a vegetação, essas áreas de ampliação se destacam, especialmente na APP do Córrego Vaca Brava, de forma concentrada, e também no interior da bacia hidrográfica, de maneira fragmentada.

Figura 53 – Representação do coeficiente de armazenamento de água na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
S	1	42,2%	51,1%	31,2%	25,2%	22,1%	
	2	38,6%	30,4%	23,8%	29,4%	31,8%	
	3	6,2%	8,3%	33,2%	36,1%	38,3%	
	4	12,0%	8,8%	10,2%	8,0%	6,6%	
	5	1,0%	1,4%	1,6%	1,4%	1,2%	

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

A análise dos valores de área do coeficiente S mostra que as Classes 1, 2 e 4, exibem tendência de queda em área de infiltração da bacia. No caso da Classe 1,

entre os anos de 2002 a 2030, a redução em percentuais de áreas na bacia soma 20,1%. As Classes 2 e 4, por sua vez, mantêm a tendência de queda, apresentando, respectivamente, valores de 38,6% e 12%, em 2002, para 31,8% e 6,6%, em 2030, respectivamente.

Já o intervalo 5 revela tendência de aumento, que passa de 1%, em 2002, para 1,6%, em 2020, em seguida reduzindo-se para 1,2%, portanto, uma variação pouco expressiva na classe, responsável pelos maiores coeficientes S. Já a Classe 3, em relação às demais, demonstra tendência de aumento equivalente a 32,1% na quantidade de áreas, em todo o período.

De forma geral, houve um aumento da área deste coeficiente, especialmente na Classe 3, que, no ano de 2030, poderá atingir até 38,3% da bacia, enquanto as Classes 4 e 5, somadas, só chegam a 7,8%. Em seguida, pode-se observar o coeficiente C, com uma relação inversamente proporcional ao coeficiente de armazenamento de água no solo, constituindo-se em uma variável importante para a leitura dos processos hidrológicos na bacia.

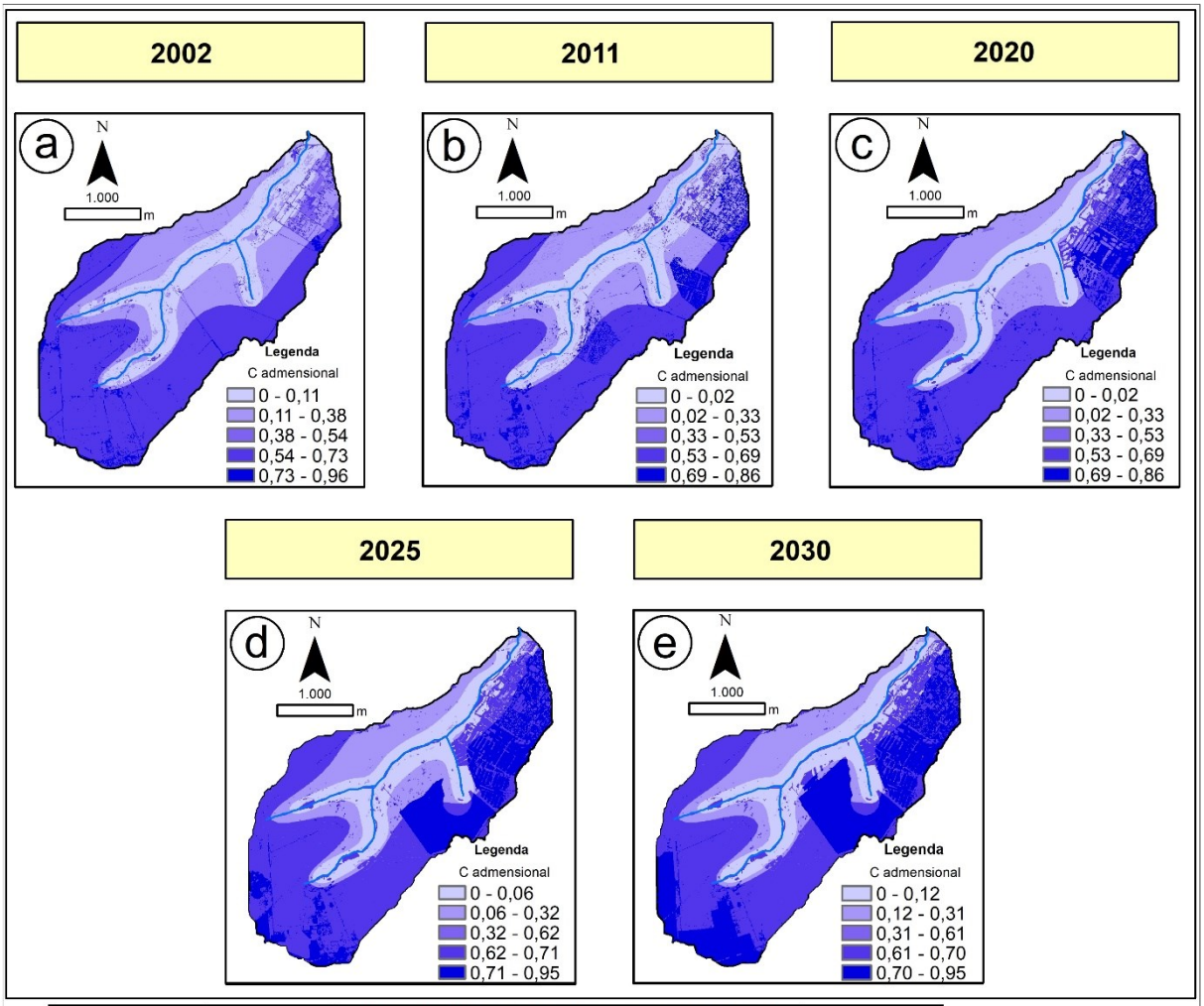
6.4 Coeficiente de escoamento superficial – C

O coeficiente de escoamento superficial (*C*) representa as áreas da bacia que efetivamente possuem capacidade de gerar escoamento superficial, descontados 20% de perdas iniciais do valor da precipitação considerada ou analisada (TUCCI, 2001). Pensando as relações existentes entre o tempo de concentração, a velocidade de escoamento superficial e o coeficiente de infiltração, pode-se estabelecer que as áreas com elevado escoamento superficial apresentam, respectivamente: tempo de concentração baixo, velocidade de escoamento alta e coeficiente de infiltração baixo. A seu turno, as áreas com baixo nível de escoamento superficial são aquelas com tempo de concentração ampliado, velocidades de escoamento superficial amenas e coeficiente de infiltração alto.

Nesse sentido, a Figura 54 refere-se à bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol e indica, claramente, uma tendência temporal de aumento das áreas com maior potencial de escoamento superficial. A mudança no comportamento do fluxo de águas na bacia é nítida. No ano de 2002 e, considerando a Figura 54 (a), o funcionamento hidrológico da bacia contribuía para deter taxas de escoamento superficial em sua

maioria menores do que aquelas encontradas atualmente, principalmente aquelas, ligadas à porção nordeste da bacia.

Figura 54 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
C	1	21,0%	20,3%	19,6%	18,6%	18,5%	
	2	28,0%	23,8%	22,4%	20,0%	17,6%	
	3	1,0%	3,3%	1,4%	41,8%	37,0%	
	4	47,1%	46,2%	49,8%	7,8%	10,3%	
	5	2,8%	6,4%	6,8%	11,9%	16,6%	

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

Os cenários representados pela Figura 54 (b e c) demonstram que, a partir da dinâmica de ocupação da bacia, esta passa a ampliar suas áreas com maiores coeficientes de escoamento superficial. Além disso, pode-se evidenciar o

agrupamento de parte significativamente dessas áreas, fato que potencializa a ação do escoamento. Esse agrupamento pode ser percebido pela intensificação dos tons de azul escuro, representados pela Classe 5, especialmente na porção nordeste da bacia, a partir do ano de 2011.

Já nos anos de 2025 e 2030, representados pelas Figura 54 (d e e), evidencia-se a ampliação das áreas com escoamento superficial elevado, uma vez que estas agora se encontram associadas de forma mais intensa às regiões de cabeceira de drenagem. A análise de tendência das áreas das classes revela que o escoamento superficial, quando compartimentado nas Classes 1 e 2, mostram, respectivamente, tendência de queda de suas áreas de abrangência, apresentando valores de 21% e 28%, em 2002, para 18,5% e 17,6% na modelagem referente ao ano de 2030, fato que atesta uma diminuição das áreas com baixo potencial de gerar escoamento.

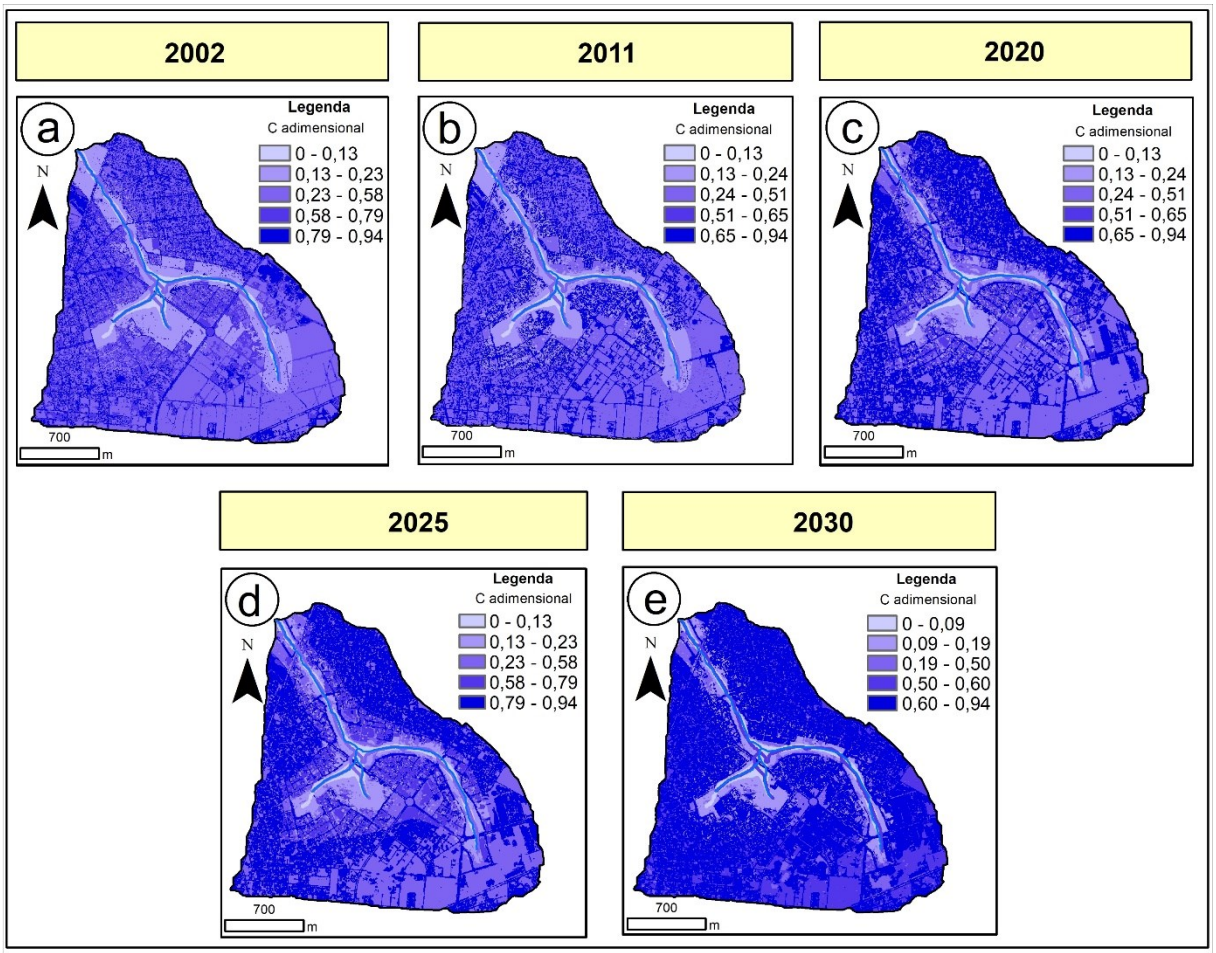
Os valores do coeficiente C, representados pelas Classes 3 e 5, demonstram tendência de aumento, ou seja, no intervalo marcado por valores de C entre 0,32-0,62 e 0,71-0,95. No período de 2002 a 2030, as áreas ocupadas por essas classes apresentam, respectivamente, amplitude entre os seus valores equivalente a 36% e 13,8%, respectivamente. Já a Classe 4 traz tendência de redução, especialmente a partir do ano de 2020, onde representava um percentual de 49,8% da bacia, a mesma classe pode chegar, no ano de 2025, a equivaler pouco mais de 7% e 10,3%, em 2030.

Os mapas representando o coeficiente C na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, Figura 55 (a, b, c, d e e), também apontam para um aumento gradativo das áreas com maior potencial de escoamento superficial ao longo do tempo. Essa intensificação ocorre, especialmente, no domínio da alta bacia hidrográfica, no qual dois aspectos podem ser percebidos: um deles remete à ampliação das áreas com potencial de escoamento superficial, especialmente nos setores norte-nordeste e oeste-noroeste da bacia; o outro diz respeito ao potencial de pressão exercida pelas construções urbanas, que fazem com que as APP da bacia, responsáveis por reter água, se reduzam.

Nos cenários representados pela Figura 55 (b, c, d e e), pode-se constatar, justamente, a intensificação do escoamento superficial, de modo a comprometer toda a região hidrográfica da bacia. Essa intensificação, na porção nordeste, próximo ao exutório da bacia, pode ser compreendida pelo contato dessa área com outras porções já consolidadas da malha urbana. Esse fato contribui para acentuar os valores

de C, a partir de 2020, de modo a que essa intensificação ganhe força também nas porções oeste, noroeste e sudoeste, como mostra a Figura 55 (c, d e e).

Figura 55 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
C	1	8,5%	13,2%	10,8%	10,1%	8,6%	
	2	15,4%	12,4%	10,4%	8,2%	6,2%	
	3	42,1%	16,5%	37,3%	35,2%	16,3%	
	4	22,5%	28,9%	16,4%	25,5%	17,5%	
	5	11,5%	29,0%	25,1%	21,0%	51,4%	

% de área
Alto
Médio
Baixo

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

A análise de tendência dos valores percentuais de área correspondentes ao coeficiente C revelam, para as Classes 1, 2, 3 e 4, um comportamento de diminuição, seja iniciando a partir do ano de 2002, como é o caso da Classe 1, ou de 2011, como

representado pela Classe 3. Assim, a quantidade de áreas na bacia que se encontravam ligadas aos níveis mais baixos de escoamento superficial diminuiu bastante. Isso é evidenciado pela considerável redução dos percentuais somados das referidas classes, que, no ano de 2002, totalizavam, juntas, pouco mais de 88% das áreas da bacia e, em 2030, apresenta pouco menos de 49% da área, uma diferença percentual de 39%. As modificações oriundas desse processo podem ser observadas especialmente nas áreas ligadas à média e alta bacia hidrográfica. Em contrapartida, a Classe 5 revela um incremento de 39,9% de áreas, ampliando consideravelmente o escoamento superficial elevado, entre de 2002 a 2030.

O coeficiente de escoamento superficial da Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava expressa a evolução temporal desse índice hidrológico na bacia. Conforme a Figura 56, percebe-se que, desde o ano de 2002, o padrão de escoamento superficial já se encontrava elevado e distribuído por toda a área da bacia. Os respectivos mapas da Figura 56 (a, b, c, d e e) reproduzem o padrão de intensificação para esse coeficiente, com destaque para o Parque Vaca Brava, que demonstra valores de escoamento superficial baixo em todos os anos analisados.

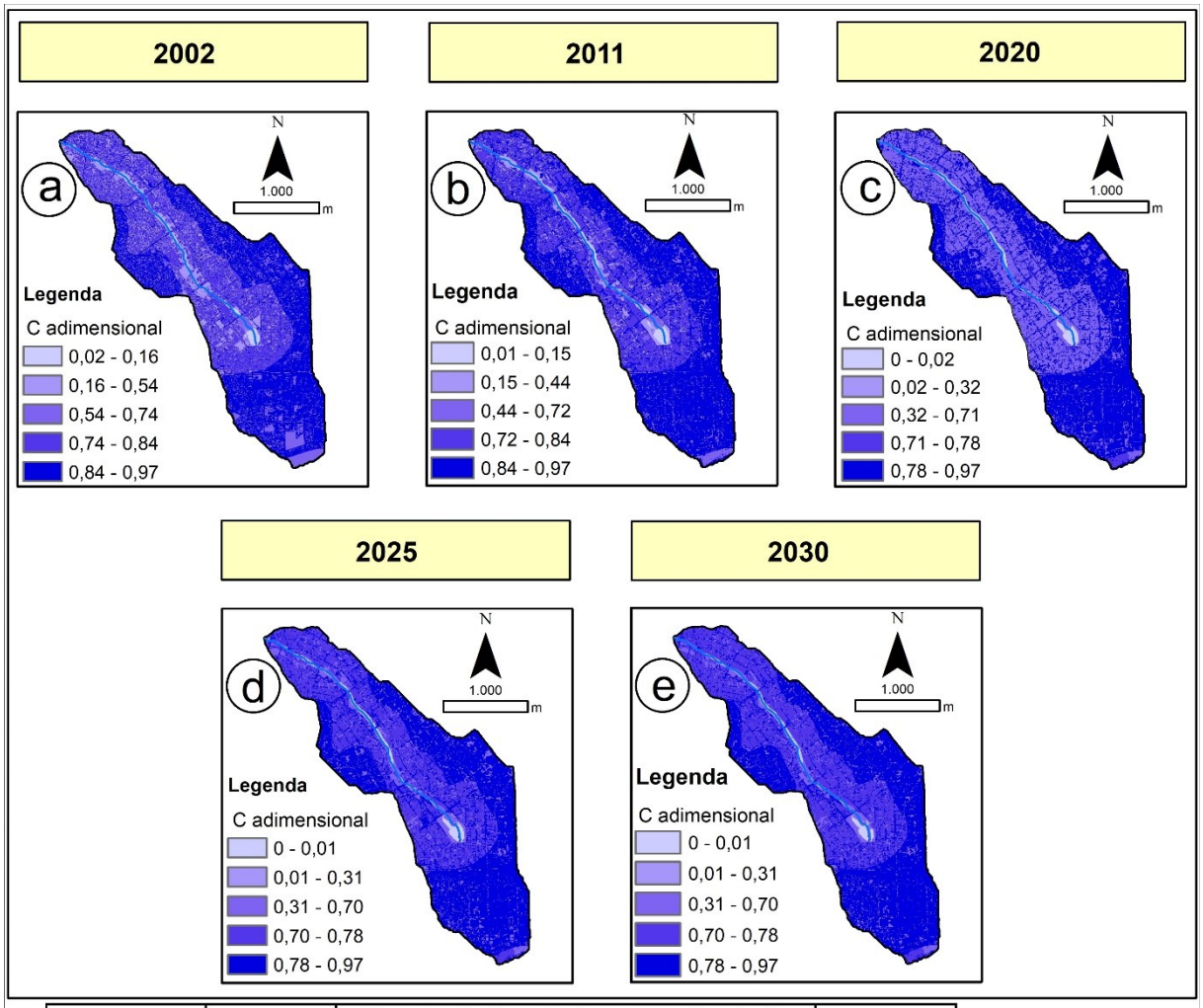
A análise da tendência, que se refere aos percentuais de áreas ocupadas pelas classes de escoamento superficial, mostra que a Classe 1, que representa os menores valores de C, traz um pequeno aumento, até os anos 2020, de 0,4%. Em seguida, considerando os anos de 2025 e 2030, a linha de tendência alcança patamares iguais aos de 2002, ou seja, passa, respectivamente, de 1,4% para 1,2% de ocupação das áreas da bacia no ano de 2030.

Já as Classes 2 e 3 têm uma tendência de queda ininterrupta nos valores de área deste coeficiente, apresentando diferenças percentuais, no período de 2002 a 2030, de 7,8% e 12,8% de redução. Tais percentuais constituem uma mudança temporal nas classes intermediárias do coeficiente C, que sinaliza para o fato de haver uma perda de área para as classes com coeficiente C intermediário, expressando um aumento dos processos hidrológicos de superfície na bacia.

As Classes 4 e 5, expressas pelos intervalos compreendidos entre 0,70 e 0,97 de coeficiente C, revelam que as áreas com valores de escoamento superficial mais elevado, se ampliaram. Em 2002, essas duas classes ocupavam 28,4% e 37,7% da área da bacia, respectivamente. Essa ampliação acontece de forma a elevar o percentual de áreas que representam a Classe 4, para 31,8% da bacia, no ano de 2030, e de modo mais expressivo, na Classe 5, o percentual de área pode atingir

54,9%. Isso significa que as regiões com maiores índices de escoamento podem aumentar consideravelmente nos próximos anos, de acordo com os dados modelados (Figura 56 d e e).

Figura 56 – Representação do coeficiente de escoamento superficial na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava entre os anos de 2002 e 2030



Variável	Classes	Percentual de áreas das classes presente na bacia					Tendência
		2002	2011	2020	2025	2030	
C	1	1,2%	1,6%	1,6%	1,4%	1,2%	
	2	14,1%	9,0%	8,9%	7,4%	6,3%	
	3	18,6%	7,9%	8,3%	6,5%	5,8%	
	4	28,4%	30,3%	25,6%	29,4%	31,8%	
	5	37,7%	51,3%	55,6%	55,3%	54,9%	

% de área
Alto
Médio
Baixo

Fonte: Mapeamento realizado pelo autor (2021).

O próximo capítulo é destinado ao raciocínio de síntese desta tese, agrupando os parâmetros hidrológicos e os elementos geomorfométricos inferidos para as bacias em análise, afim de estabelecer um Índice de Pressão Hidrológica (IPH) em forma de produtos cartográficos analíticos que facilitem a leitura integrada da dinâmica hidrológica de superfície.

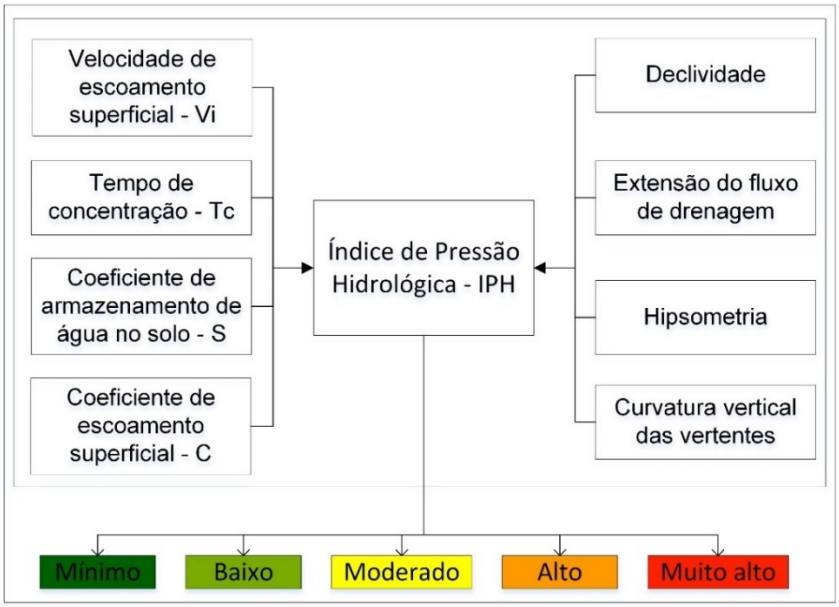
CAPÍTULO 7 – MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL DO ÍNDICE DE PRESSÃO HIDROLÓGICA (IPH)

7.1 Formulação do Índice de Pressão Hidrológica (IPH)

As bacias hidrográficas, conforme Rodrigues e Adami (2014) e Botelho (2005), são áreas que concentram forte dinâmica hidrológica. Dentre os aspectos mais comuns associados ao sistema hidrológico das bacias encontram-se os canais de drenagem, a drenagem subsuperficial e a drenagem ou hidrologia de superfície (NUNES; BORBA, 2018). No entanto, as bacias são compostas, ainda, pelos sistemas geomorfológico, climático e antrópico, este último sendo particularmente responsável por uma intensa transformação do ambiente de captação.

Para facilitar a leitura integrada da dinâmica hidrológica de superfície, neste capítulo final é empregada uma junção metodológica das seguintes variáveis: tempo de concentração do escoamento em minutos, velocidade de escoamento superficial em m/s, coeficiente de infiltração em mm, coeficiente de escoamento superficial adimensional, declividade em graus, hipsometria em metros, extensão do fluxo de drenagem em metros e curvatura vertical das vertentes para composição de um índice de pressão hidrológica urbana (IPH) (Figura 57). O referido índice tem como finalidade indicar as pressões da urbanização na potencialização do escoamento superficial sob as bacias hidrográficas presentes nesta investigação.

Figura 57 – Variáveis do índice de pressão hidrológica (IPH) e classes categóricas



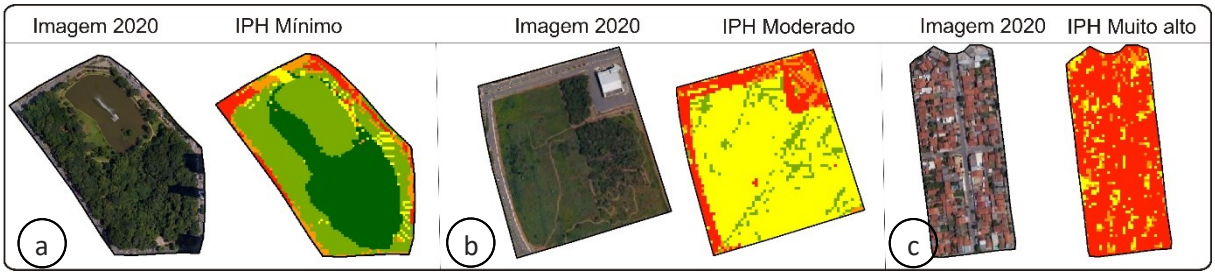
Fonte: Produzida pelo autor (2021).

O IPH aqui exposto expressa, de forma qualitativa, e por meio das classes mínimo, baixo, moderado, alto e muito alto, o grau de comprometimento das bacias urbanas analisadas (Figura 57). Este diz respeito à capacidade de funcionamento do sistema hidrológico em desempenhar, corretamente, os processos relacionados às variáveis analisadas, observando sua interação com os aspectos físicos da bacia em questão. A pressão hidrológica, portanto, no contexto desta tese, significa, antes de tudo, avaliar sistematicamente todo o impacto sobre a superfície hidrológica, o processo de ocupação histórica da bacia e a maneira como a cobertura da terra evoluiu para a atual condição.

Uma vez que a área passa a ser ocupada, os processos hidrológicos acabam entrando em desequilíbrio, afastando-se cada vez mais de uma dinâmica natural e aproximando-se de uma artificialização do ambiente, que pode comprometer a segurança, a resiliência da população e a qualidade de vida. Outro aspecto consiste na possibilidade de visualizar a representação espacial dos valores elaborados em sequência temporal, para os anos de 2002, 2011 e 2020, além da aplicação do índice sobre os dados modelados para os cenários de 2025 e 2030.

Com a finalidade de subsidiar melhor esta análise, são apresentados, a seguir, três recortes espaciais equivalentes às áreas identificadas com índice de pressão hidrológica mínima, moderada e muito alta (Figura 58). No geral, as áreas com pressão hidrológica mínima (Figura 58a) constituem-se a partir das seguintes característica, a saber: conjunção de áreas com a ocorrência de velocidade de escoamento amenas, tempo de concentração com baixa intensidade, coeficiente de infiltração elevado, coeficiente de escoamento superficial baixo, declividades moderadamente planas, hipsometria estável sem grandes variações e curvatura predominantemente côncava-retilínea.

Figura 58 – Índice de pressão hidrológica (IPH) equivalente às classes mínimo, moderado e muito alto



Fonte: Produzida pelo autor (2021).

Já as áreas com pressão hidrológica moderada constituem-se a partir da conjunção de áreas de ocorrência com velocidade de escoamento intermediária, do tempo de concentração com intensidade mediana, dos coeficientes de infiltração e escoamento superficial mediano, de declividades moderadamente movimentadas, hipsometria sem modificações abruptas e curvatura predominantemente côncava-retilínea (Figura 58 b).

As áreas configuradas como de pressão hidrológica muito alta (Figura 58 c) se constituem a partir da conjunção de áreas de ocorrência com velocidade de escoamento elevada, tempo de concentração com respostas de intensidade baixa, coeficiente de infiltração baixo, coeficiente de escoamento superficial alto, declividades movimentadas ou áreas de transição, hipsometria sem grandes modificações, com algumas áreas de transição e curvatura vertical, predominantemente convexas-retilínea.

Assim, conforme a teoria sistêmica, desenvolvida por Sochava (1977), Monteiro (2000) e Rodriguez et al. (2022), e auxiliada por uma abordagem geotecnológica, procurou-se, de modo geral, retratar os cenários do índice de pressão hidrológica. No tópico a seguir, é estabelecida sua ocorrência nas três bacias analisadas nesta pesquisa, a começar pela Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol.

7.2 IPH na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol

A pressão hidrológica, no contexto das bacias em análise, liga-se, de maneira intrínseca, à cobertura da terra ao longo dos anos. No contexto da Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, essa cobertura converte-se, ao longo dos anos, em novas ocupações urbanas, ainda em setores muito específicos da bacia, mas quase sempre instaladas em antigas áreas de pastagens.

Do ponto de vista da substituição da vegetação nativa de Cerrado por grandes áreas de gramíneas exóticas utilizadas na alimentação do gado bovino e/ou plantios comerciais, os impactos na dinâmica hídrica superficial são intempestivos (SILVA; BARBOSA, 2020). As consequências hidrológicas são visíveis quando se analisa o fato constatado por Cavalcante (2019), ao mencionar que houve, historicamente, um deslocamento de focos de feições erosivas, antes localizadas nas zonas urbanas consolidadas de Goiânia, e, mais recentemente, nas áreas de ocupação do entorno.

Essa alteração da retirada da vegetação nativa do Cerrado para implantação de áreas de pastagens implica a substituição de um sistema radicular, que pode atingir de 15 a 20 m, dependendo da espécie considerada (BARBOSA; ARAÚJO, 2020). Como resultado, haverá o comprometimento de vários fatores ambientais, a exemplo da capacidade de abastecimento do lençol freático, da modificação das estruturas geológico-geomorfológica, do assoreamento e da diminuição da rede de drenagem superficial, bem como maior produção de sedimentos (SILVA; BARBOSA, 2020; STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). Por conseguinte, a conversão dessas áreas em estruturas urbanas promove modificações ainda mais intensas sobre a cobertura da terra, quase sempre com maiores riscos, associados à presença humana.

Em comum, todos esses aspectos representam mudanças na dinâmica de entrada e saída da água no sistema da bacia hidrográfica. Na transição de coberturas naturais para antropizadas, os fluxos superficiais encontram novas condições para circular, pois o elemento do ciclo hidrológico que promovia a interceptação, a infiltração e a amenização do impacto da chuva foi substituído ou modificado, não permitindo o desempenho adequado das funções hidrológicas. Assim, os fluxos superficiais, condicionados ao tipo de solo, ao sistema de vertentes e a suas declividades, bem como às curvaturas, começam a trabalhar em função de produzir impactos ambientais, a depender da intensidade das precipitações e, ainda, da capacidade de resistência dos materiais a serem erodidos (ROCHA; PASQUALETTO; NUNES, 2021; TUCCI, 2008).

Quando há uma ocupação da cobertura da terra por áreas urbanas, no que se refere aos aspectos hidrológicos da erosão hídrica, há uma espécie de *pseudo* suspensão dos problemas gerados pela retirada da vegetação nativa. Isso porque vários dos problemas mencionados anteriormente são atenuados, sob a condição de que o solo não se encontra mais exposto, portanto, não mais suscetível a sofrer grandes perdas; além disso, os sistemas de vertentes são preservados, uma vez que se encontram recobertos novamente.

O aspecto mencionado anteriormente não significa, contudo, o restabelecimento da normalidade dos processos hidrológicos. Além disso, outros problemas são intensificados, e até mesmo concebidos, uma vez que o funcionamento do próprio sistema de vertentes é eliminado, retificado ou planificado em função do processo de ocupação. O sistema de drenagem tem, em alguns casos, seus fluxos canalizados e os solos recebem coberturas que impedem ou reduzem drasticamente

a infiltração de água, fato que contribui para concentrar os fluxos em potencial e diminuir o tempo de concentração do escoamento, assim como aumentar sua velocidade.

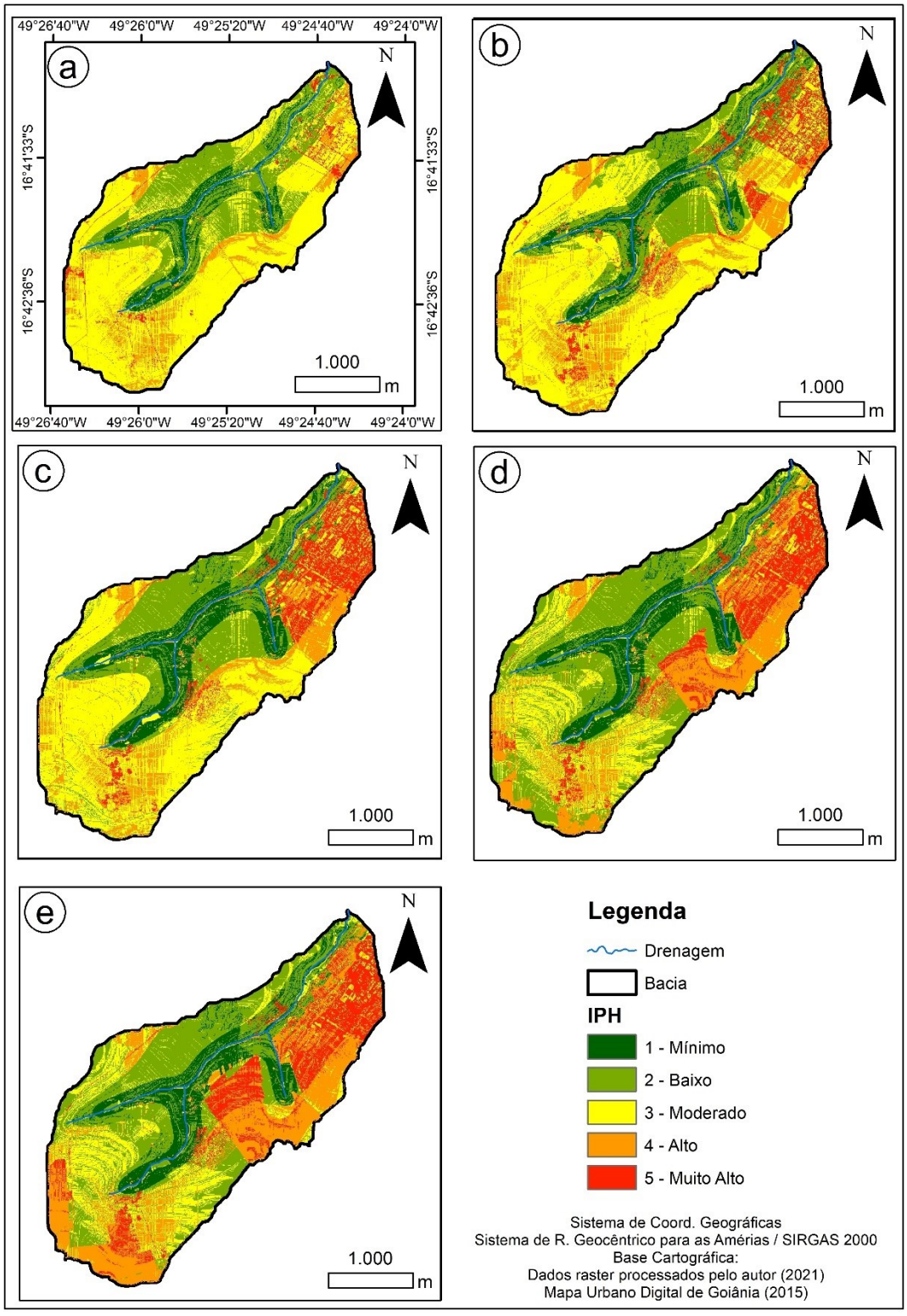
Ademais, o balanço entre a relação da infiltração e o escoamento da água sofre um grande desequilíbrio, dado que a água fica disponível no sistema por menos tempo, fato que se acentua em regiões próximas aos cursos hídricos e nas áreas de relevo rebaixados. Essas áreas podem apresentar problemas relacionados às enchentes e às inundações, que se propagam a jusante para outras bacias, como um efeito em cadeia. A Figura 59 apresenta o resultado da aplicação do IPH, na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol.

Cartograficamente, o primeiro aspecto percebido é a intensificação das áreas pressionadas hidrologicamente, especialmente a partir do ano de 2020, representadas pelas classes “alto e muito alto” (Figura 59 c). Essas manchas localizam-se, predominantemente, na porção leste, de modo a avançar por setores da baixa bacia. A partir de 2025, sobretudo, outro eixo de avanço pode ser notado na região sul da bacia, onde se localizam as áreas de cabeceira de drenagem. Em ambos os casos, essas coberturas urbanas são fronteiriças com as de outras bacias hidrográficas.

Convém chamar atenção para a grande quantidade de superfícies da bacia que equivalem a áreas de pressão hidrológica “mínima e baixa”. Essas áreas localizam-se com predominância abundante no entorno do curso d’água principal e, em sua maior parte, associam-se às áreas de plantios comerciais e às de preservação permanente (APP). Pode-se observar, ainda, certa continuidade, ou seja, um lineamento entre essas áreas, fato importante para o melhor funcionamento da dinâmica hídrica superficial.

Há de se destacar, também, que a bacia se encontra em processo de ocupação, iniciado por assentamentos urbanos recentes, na sua maioria não consolidados de maneira plena. As classes alta e muito alta acabam acentuando-se justamente nessas áreas urbanas, mesmo que elas não apresentem características de consolidação ou verticalização intensa, como nas outras bacias em análise. Ou seja, os dados referentes a essas classes não podem ser considerados como parâmetros de comparação com as mesmas classes presentes nas outras duas bacias hidrográficas, pois a realidade é distinta.

Figura 59 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol, nos cenários de 2002 (a), 2011 (b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e)

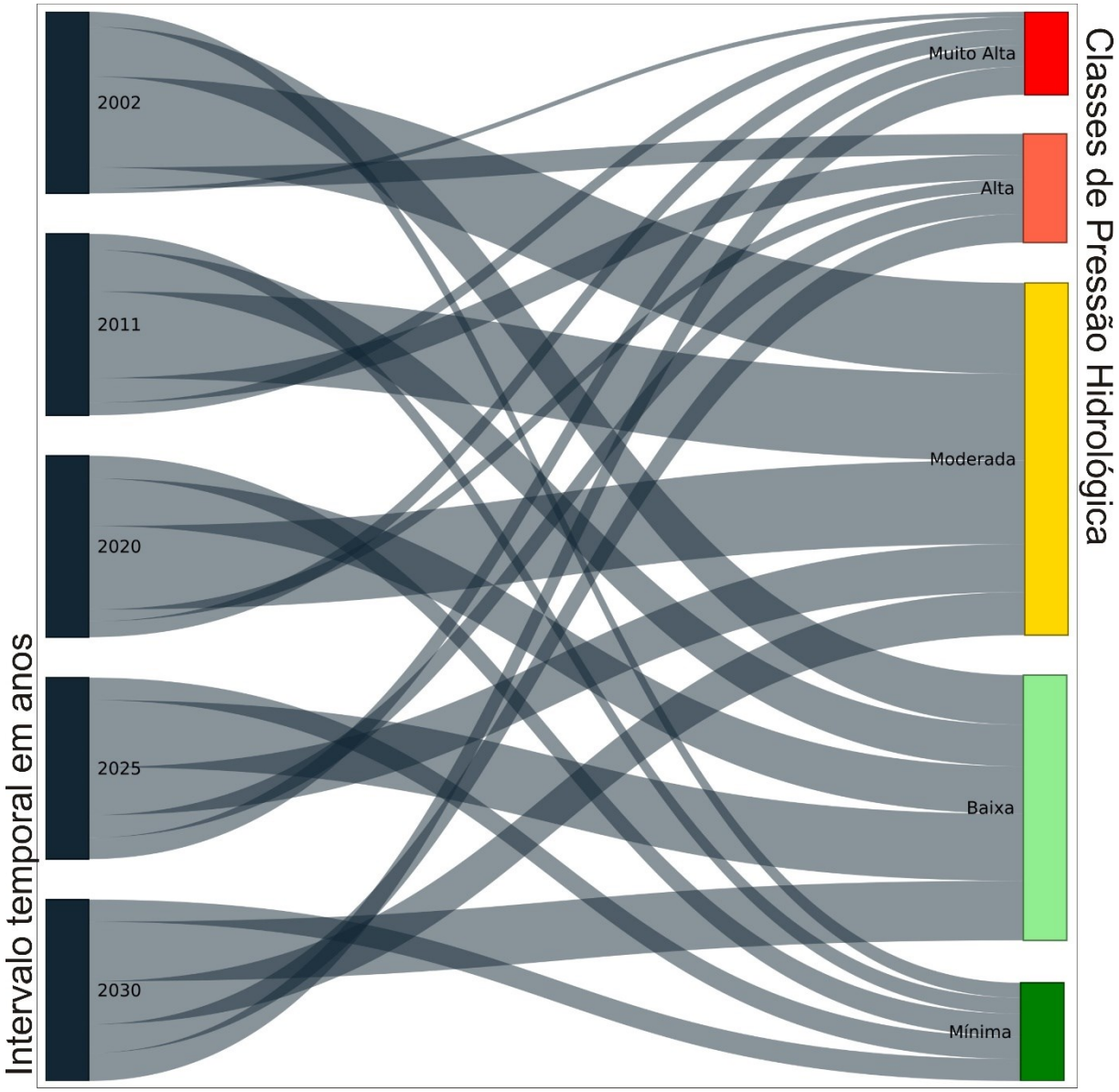


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O diagrama presente na Figura 60 apresenta a contribuição da bacia hidrográfica ao longo de cada ano e busca relacionar cada um dos percentuais de

área com suas respectivas classes de pressão hidrológica. Os cinco eixos da esquerda correspondem ao intervalo temporal analisado, sempre guardadas as mesmas proporções entre eles, por tratar-se da mesma bacia hidrográfica.

Figura 60 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Quando direcionada a leitura dos dados para o eixo direito do diagrama, porém, é possível extrair as observações mais pertinentes. Organizadas em ordem decrescente, as classes de pressão variam de muito alta à mínima, de modo que cada uma seja tocada por cinco ligações, que correspondem ao percentual de área da bacia em cada um dos anos, representado pela classe observada.

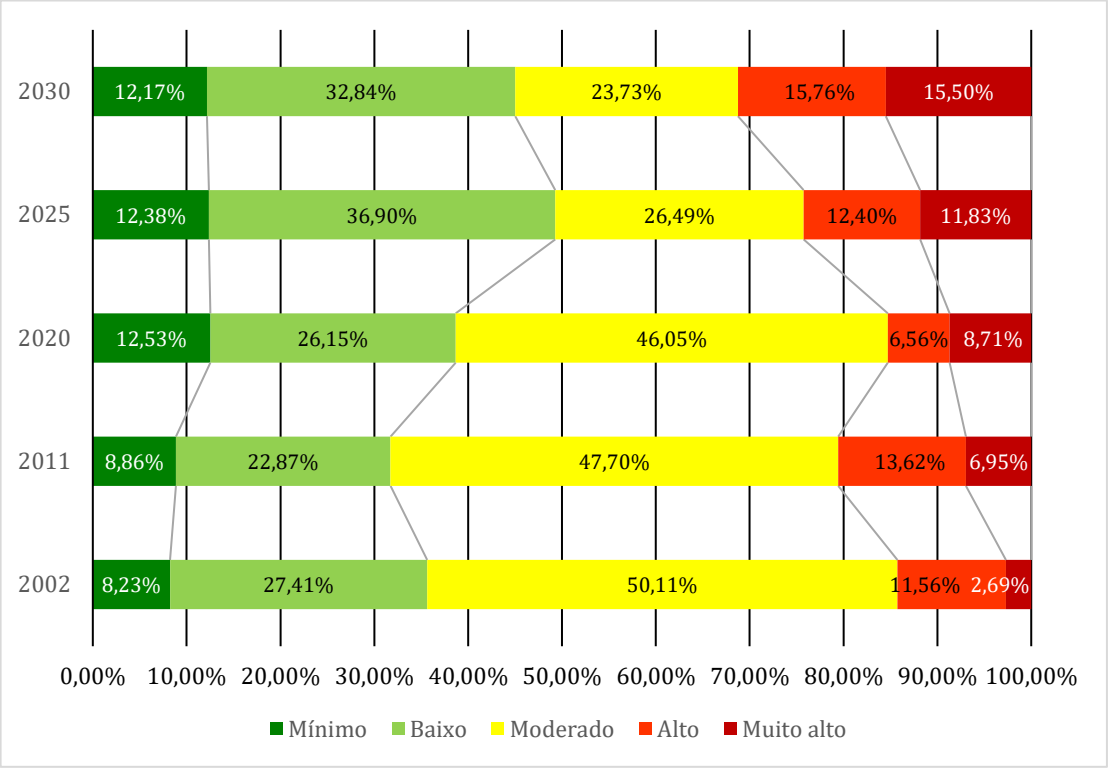
Nesse sentido, os dados conduzem a observar, modo geral, que a classe com maior percentual de área ao longo do tempo é a moderada, pois recebe as maiores contribuições, seguida, imediatamente, pelas áreas com baixa pressão hidrológica. Em oposição a essas áreas, encontram-se as zonas com pressão hidrológica muito alta e alta, sendo essas localidades constituídas com a menor área atribuída nos períodos analisados. Quando focaliza a análise nas classes superiores nota-se, porém, um aumento considerável em ambas as classes, de modo que o intervalo muito alto registra um aumento em sua proporção no ano de 2030, da ordem de cinco vezes e meia em relação ao registrado em 2002. Movimento parecido ocorre com os valores atribuídos à classe alta, no entanto, com menor expressividade.

Já a classe intermediária, representada pelo valor moderado, embora apresente o maior valor global de área entre as classes, mostra uma tendência de redução ao longo dos intervalos analisados, principalmente a partir de 2025. Posto isso, o valor apontado em 2030 é proporcionalmente equivalente à metade daquele registrado anteriormente, no ano de 2002. Essas perdas de áreas ocorrem em função de setores com pressão hidrológica mais elevada terem capturado percentuais significativos da bacia após o ano de 2020.

Os valores mínimo e baixo, que representam os ambientes com menor pressão hidrológica, apresentam sensíveis aumentos quando comparados temporalmente entre si. Em parte, esse ganho territorial pode ser explicado em virtude das características naturais da bacia, que favorecem esse tipo de área e, ainda, do avanço sobre parte das áreas anteriormente classificadas como moderadas, especialmente no último ano. Outro ponto a ser ressaltado foi o intervalo de tempo analisado, que permitiu a recuperação florestal em trechos específicos, notadamente associados aos canais de drenagem e ao seu entorno próximo.

A Figura 61 traz os valores dos percentuais e as tendências analisadas. Desse modo, fica evidente as seguintes tendências, a saber: leve aumento para as pressões hidrológicas menos elevadas, redução para pressões moderadas e aumento para pressões alta e muito alta. Em um período de 18 anos, as zonas de pressão elevada aumentaram sua ocupação na bacia em termos percentuais, passando de 14,25%, em 2002, para cerca de 15,27%, em 2020, ou seja, permanecendo em patamares muito próximos. Quando se olha para a aplicação do índice nos cenários modelados (anos de 2025 e 2030), esse valor supera o patamar de 30%, caracterizando, assim, uma maior pressão hidrológica.

Figura 61 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na bacia hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

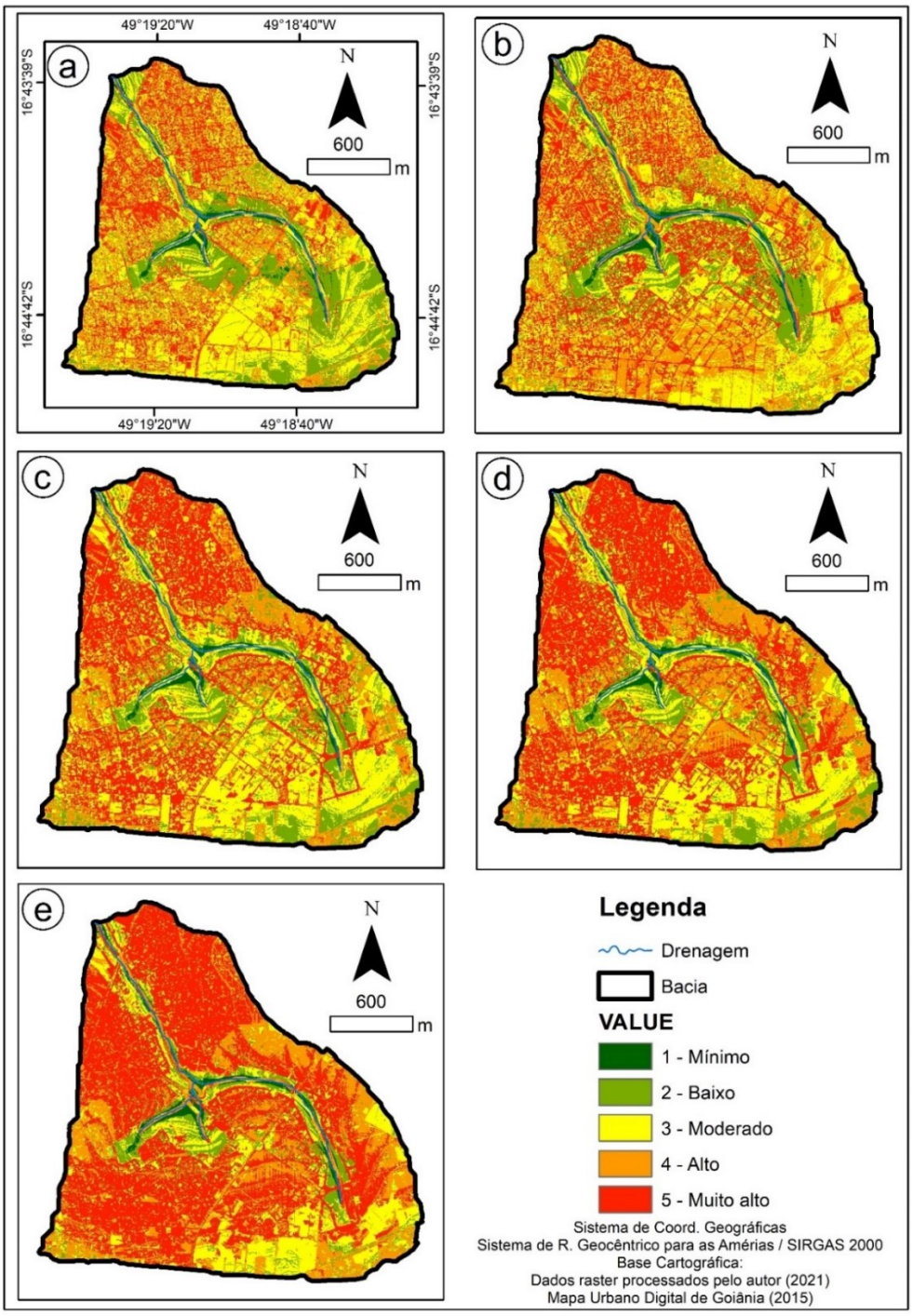
Por sua vez, em decorrência de fatores já mencionados, e de modo menos expressivo, as áreas de baixa pressão hidrológica também se ampliam, uma vez que o ritmo de mudança da cobertura da bacia do Córrego Quebra-Anzol apresenta uma ativa dinâmica de ocupação por plantios comerciais e sua cobertura urbana ainda é relativamente baixa e concentrada em torno do exutório da bacia. Assim, as classes de pressão hidrológica mínima e baixa, que, em 2002, representavam 8,23% e 27,41% de área, passam a figurar em valores aproximados de 12% e 32%, respectivamente.

7.3 IPH na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira

A Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira chama a atenção por seu elevado índice de pressão hidrológica (Figura 62). Tal índice ganha mais força a partir do ano de 2020 e segue aumentando no cenário representado pela modelagem dos anos de 2025 e 2030, conforme Figura 62 (d e e). Essa bacia apresenta uma ocupação mais antiga e consolidada que a anterior, o que explica o fato de as áreas com pressão

hidrológica elevada estarem distribuídas ao longo de todos os setores da bacia, de modo que apenas em setores muito específicos da alta bacia a urbanização não se instalou. Todavia, mesmo nesses setores das cabeceiras, os solos e a dinâmica hidrológica já apresentam claros sinais de perturbação antropogênica.

Figura 62 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, nos cenários de 2002 (a), 2011 (b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e)

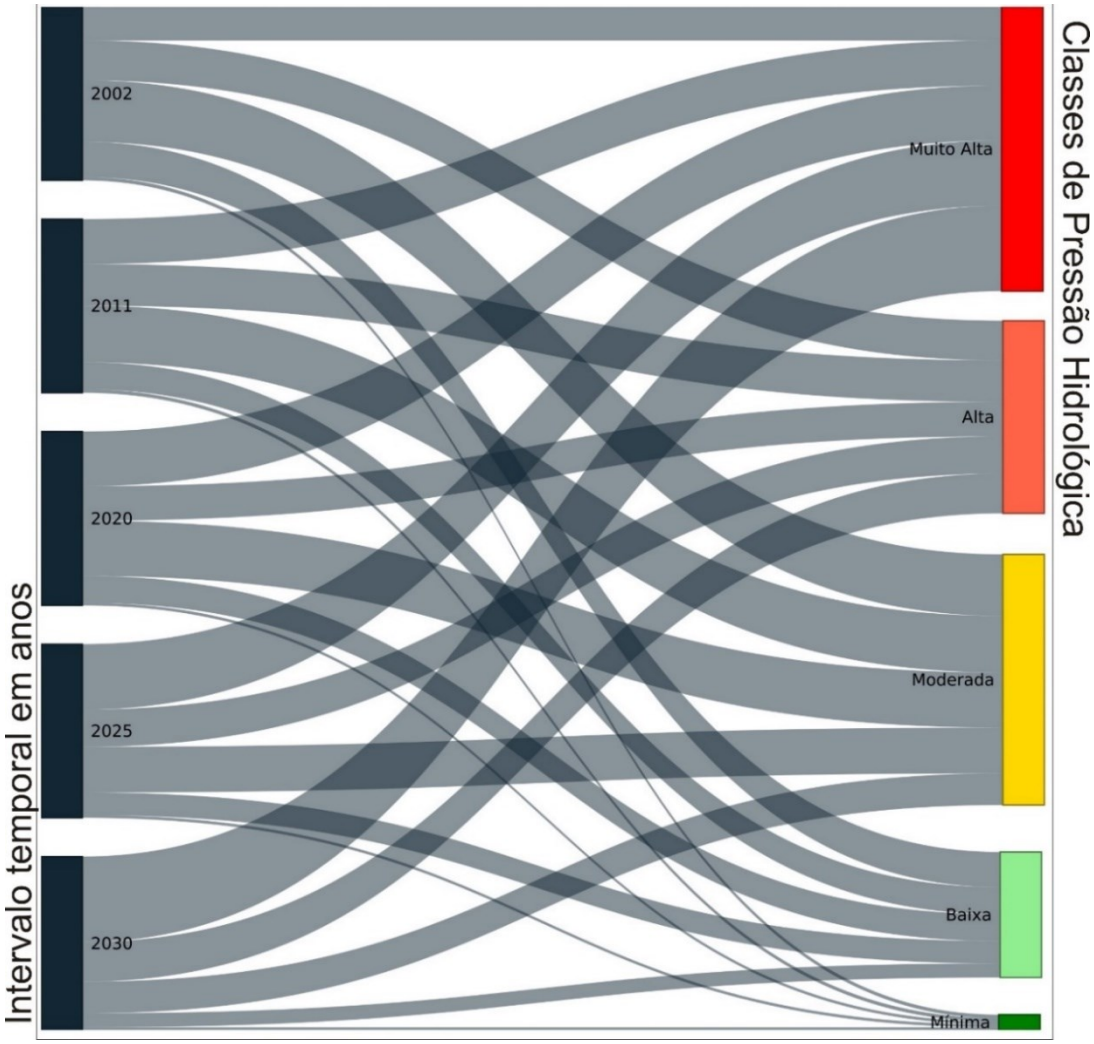


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Em função do nível de impactos antropogênicos, as áreas com pressão hidrológica mínima e baixa são pouco representativas e se reduzem à medida que os valores são examinados nos anos mais recentes e na modelagem aplicada. Essas áreas com mínimo e baixo IPH ocupavam setores localizados na porção sudoeste da bacia, entre os anos de 2002 e 2011, no entanto, após esse período, passam a restringir-se às proximidades do canal principal. Além disso, apresentam-se intercaladas, em alguns trechos, a áreas com impactos hidrológicos elevados.

O diagrama de Sankey, expresso na Figura 63, demonstra as relações entre os cenários mapeados anualmente e suas respectivas classes de pressão hidrológica. Chama a atenção, em um primeiro momento, o aspecto ordenado de crescimento de significância das classes, a partir das áreas com baixo índice de pressão hidrológica, até a classe muito alta, sendo esta a mais representativa na bacia.

Figura 63 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira



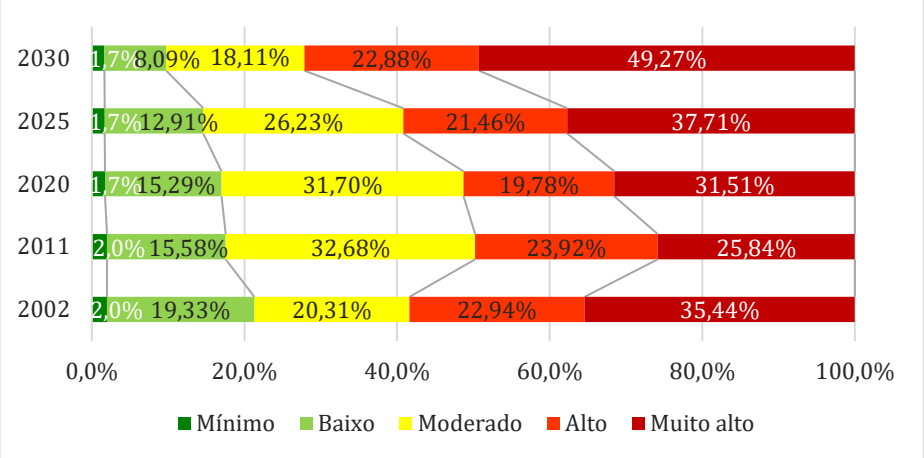
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Em geral, a bacia tem mostrado tendência histórica de agrupamentos dos valores em torno das classes muito alta, alta e moderada, caracterizando, assim, uma região hidrográfica muito impactada ao longo do tempo. As áreas com pressão hidrológica mínima são marcadas pela constância dos valores ao longo dos intervalos analisados; por outro lado, as áreas classificadas com pressão hidrológica considerada baixa encontram-se representadas por uma tendência decrescente.

As áreas com moderada pressão hidrológica têm tendência de redução, de modo a diminuírem em uma proporção de 70% quando comparadas ao fluxo relativo ao ano de 2002. A pressão hidrológica alta tem uma tendência de estabilidade, sem mudanças significativas durante os intervalos analisados. Já as áreas com pressão hidrológica muito altas respondem por um intenso aumento de fluxo, especialmente a partir de 2025, de modo que o fluxo final corresponde a cerca de 2,5 vezes o valor registrado inicialmente.

A Figura 64 traz o gráfico com a distribuição das classes de IPH e, nela, pode-se notar que os valores de mínima e baixa pressão hidrológica recuam de quase 20%, em 2002, para menos de 10%, em 2030. Essa acentuada queda ocorre de modo contínuo nessas classes em todos os períodos analisados. No que diz respeito aos padrões considerados alto e muito alto, os valores já representavam, em média, 60% da totalidade da bacia hidrográfica analisada no ano de 2002, uma proporção bem significativa, que se mostra com tendência de intensificação, podendo atingir cerca de 72,15% da área em 2030.

Figura 64 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A classe muito alta, que é a principal responsável pelo incremento dos impactos hidrológicos na bacia, expõe uma tendência de crescimento percentual da ordem de 13,83% até o ano de 2030. Por fim, as zonas de pressão moderadas registram aumento até o ano de 2020, chegando a atingir 31,7% da bacia, entretanto, começam a ser suprimidas a partir da modelagem realizada para os próximos dez anos, podendo representar cerca de 18% no ano de 2030.

7.4 IPH na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava

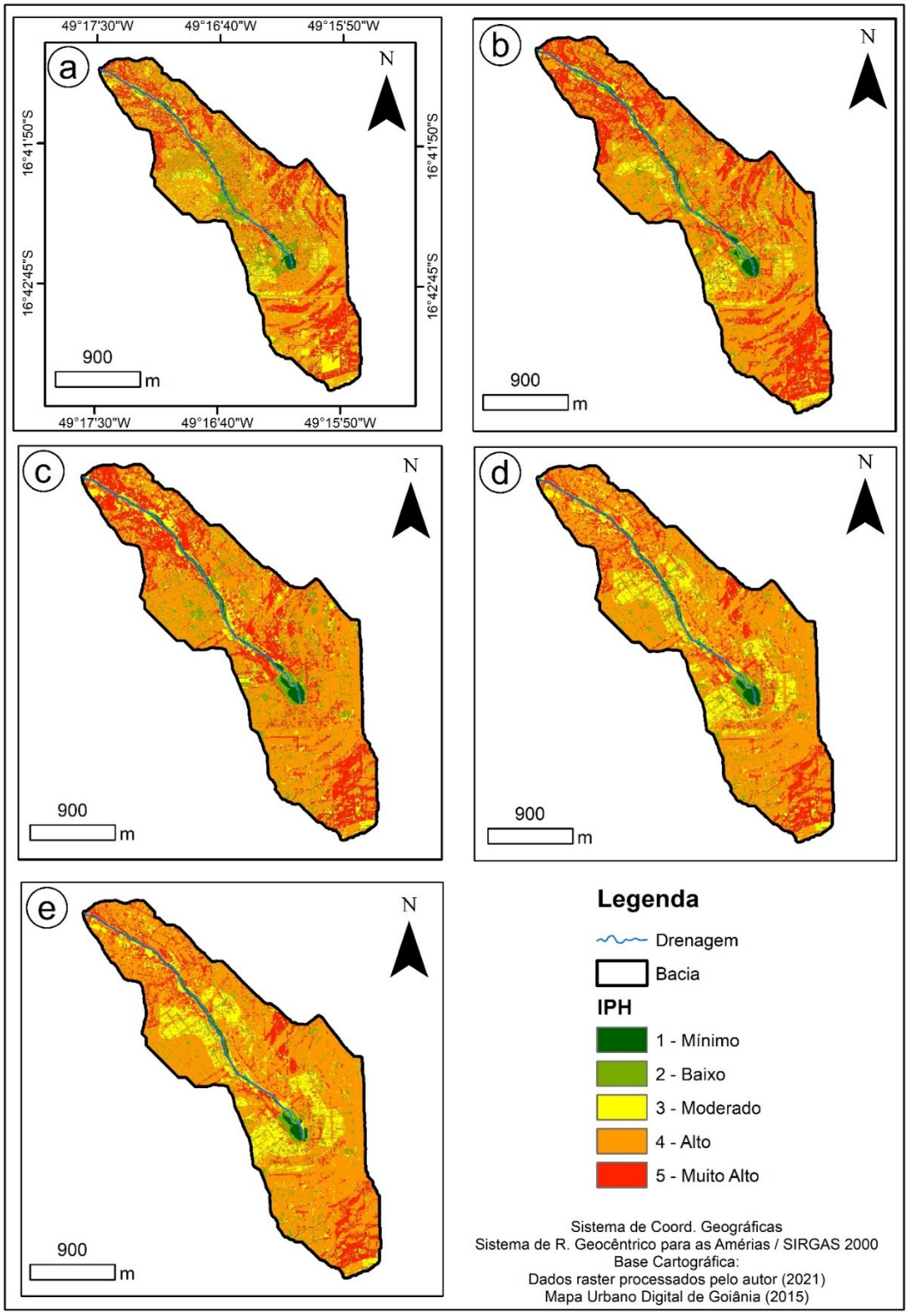
A pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava mostrou-se elevada desde o primeiro cenário analisado (Figura 65 a). Tal característica acontece em virtude de ser esta bacia a que apresenta ocupação mais antiga dentre as analisadas nesta pesquisa. A ocupação urbana nesta região evoluiu para um padrão muito concentrado, no qual a verticalidade das edificações é o aspecto mais marcante da paisagem, que, por sua vez, também possui o sistema hidrológico mais modificado, especialmente, na área da alta bacia hidrográfica, localizada ao sul.

Nas zonas de baixa pressão nota-se que, ao longo dos intervalos analisados, suas manchas aparecem, sobretudo associadas ao curso do canal principal. Apesar de alguns de seus trechos estarem canalizados, as demais seções que ainda não passaram por esse processo são consideradas zonas nas quais o balanço hidrológico entre escoamento e infiltração ainda é equilibrado.

Os primeiros mapas analisados (Figura 65a, b e c) exibem um padrão disperso de pequenas áreas com baixa pressão hidrológica, em localidades distantes do canal principal. No entanto, a partir dos anos de 2025 e 2030, esse padrão muda, visto que se revela uma clara concentração e restrição dessas áreas às margens do canal principal e ao perímetro do Parque Vaca Brava.

As áreas de pressão hidrológica alta e muito alta correspondem aos diversos setores da bacia e, historicamente, se concentram tanto no baixo como no médio e alto curso. Quanto à espacialização das distintas classes, o padrão notado é difuso, com especial destaque para as porções norte e sul da bacia. A primeira região (porção norte) refere-se às áreas ligadas ao exutório e a porção sul, às áreas de recarga da bacia.

Figura 65 – Índice de pressão hidrológica na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, nos cenários de 2002 (a), 2011(b), 2020 (c), 2025 (d) e 2030 (e)

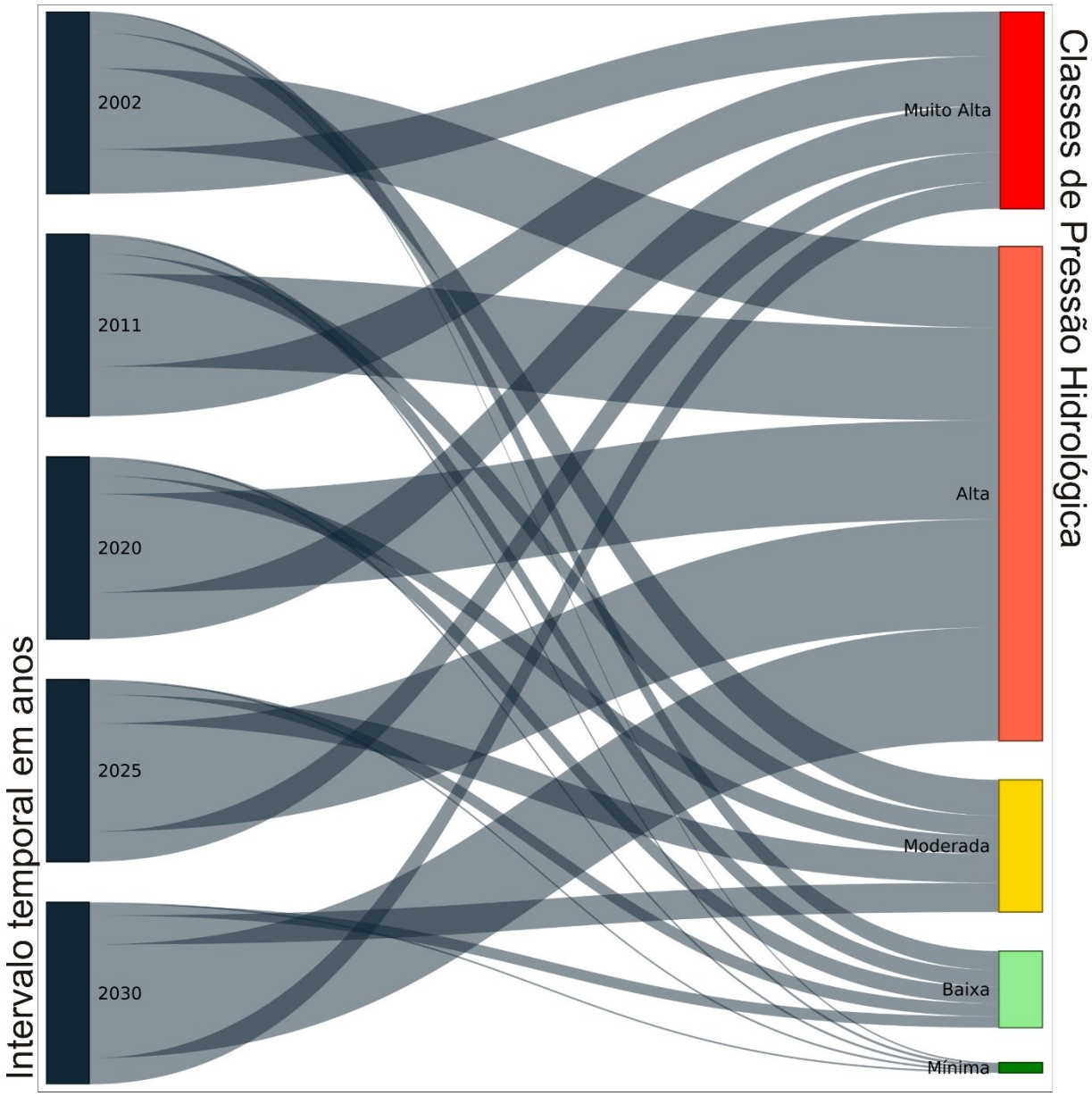


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O diagrama de distribuição do índice de pressão hidrológica (Figura 66) revela que, na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, há uma preponderância das áreas

de pressão hidrológica alta e muito alta. No que diz respeito às categorias de mínima e baixa pressão, as proporções notadas de contribuição em cada ano são quase constantes, sendo essa última responsável por uma leve redução nos fluxos da classe, quando realizada uma leitura comparativa de todos os intervalos temporais mapeados.

Figura 66 – Diagrama de Sankey da Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava



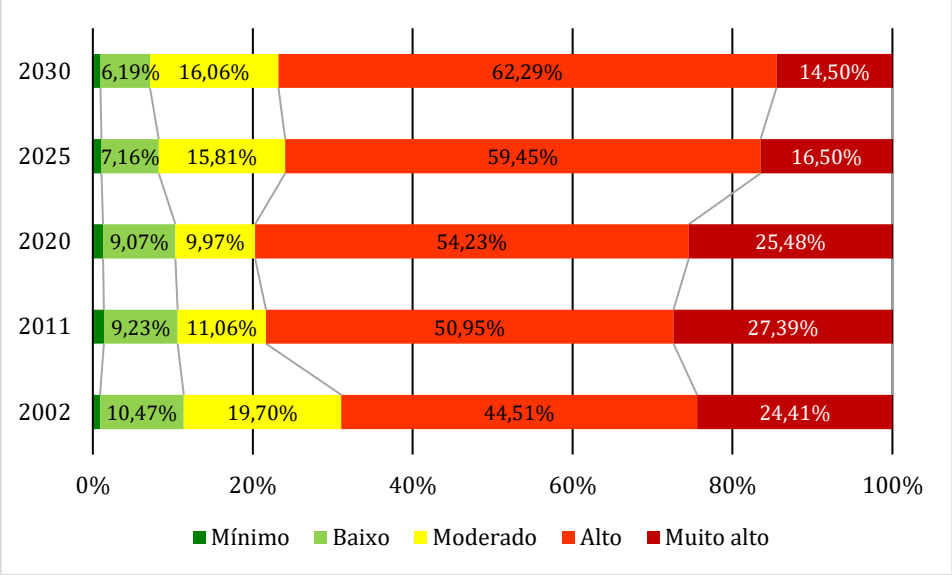
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Situação semelhante é registrada nas áreas de pressão moderada. Quando observadas, porém, as classes representativas das pressões muito alta e alta, a dinâmica da bacia altera-se de modo significativo. Seu padrão dominante é,

indubitavelmente, a classe referente à pressão alta, que chega a se ampliar em cerca de 50% do fluxo total recebido, comparado ao ano de 2002. A transfiguração para áreas de pressão alta converge para uma concentração dos fluxos de pressão, contribuindo para a redução das demais classes.

Desse modo, e de acordo com o exposto na Figura 67, os dados apresentam, na classe de pressão hídrica baixa, uma redução de área da ordem de 4,28%, entre os períodos de 2002 e 2030. Já as áreas moderadas exibem, por sua vez, uma redução de seu percentual até o ano de 2020, e, em seguida, ocorre um pequeno aumento, da ordem de 6%, mas ainda se mantendo menor que o patamar registrado no ano de 2002.

Figura 67 – Gráfico da dinâmica de pressão hidrológica urbana na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

No que diz respeito às classes de pressão hidrológica alta e muito alta, a leitura correspondente à Figura 67 mostra que, no ano de 2002, essas áreas totalizavam cerca de 68,92% da bacia, depois ampliando-se para cerca de 76,79%, um valor bem elevado. Em outros termos, significa dizer que a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava apresenta, em quase 80% de sua área, todas as condições de um IPH alto a muito alto, mencionadas na análise da Figura 58 (c), ou seja, dos parâmetros ligados à intensificação dos processos hidrológicos.

A explicação para a redução das áreas com potencial de pressão hidrológica muito alta reside no fato de a cobertura vegetal na bacia hidrográfica ter passado por

um processo de regeneração no período compreendido entre os anos de 2002 e 2020, saltando de 10,6% para 19,4%, respectivamente. O movimento inverso registrado pelos solos e pelas gramíneas compactadas também pode ajudar a explicar essa modificação no IPH, pois ambas as classes se reduzem nesse período. Esse processo pode contribuir para a melhoria do aspecto hidrológico superficial, pois parte dessas áreas passaram a incorporar, mais recentemente, cobertura vegetal densa. Em contrapartida, a outra parte passa a ser representada por superfícies pavimentadas, especialmente a partir do ano de 2011.

Mesmo com características distintas e ocupação variada, as bacias desenvolvem um perfil de impacto hidrológico semelhante, uma vez que, na medida que a urbanização avança, os desequilíbrios nas bacias tornam-se mais evidentes. No contexto macro, pensando a região hidrográfica do Anicuns, há um processo de expansão do impacto hidrológico no sentido leste-oeste e ainda de jusante para montante. A Figura 68 representa a evolução do Índice de Pressão Hidrológica e suas tendências por classe (tendência horizontal), além das tendências anuais (tendência vertical).

Desse modo, pode-se observar que a Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol traz valores de áreas que a posicionam majoritariamente na classe de pressão hidrológica moderada e baixa. Todas as tendências anuais apontam para esse movimento de maior concentração de áreas nas classes, moderado até o ano de 2020, e baixo a partir do ano de 2025.

Tais características posicionam a BHCQA com potencial de impactos sobre o escoamento superficial nas classes alto e muito alto, relativamente baixo, configuração assumida a partir do estágio de ocupação recente em que se encontra e porcentagem reduzida de área urbana ocupada. No entanto, os valores de IPH das classes alta e muito alta, especialmente nas modelagens realizadas para os anos de 2025 e 2030, apontam redução da diferença percentual entre as classes moderada e alta, que era de 38,55% em 2020, e tencionando a diminuir para 14,09% em 2025 e 7,97% em 2030. As tendências observadas verticalmente, por sua vez, sinalizam um comportamento de ampliação dos valores de pressão hidrológica alta e muito alta, em ambos os casos, podendo totalizar mais de 15% das áreas pertencentes a bacia no ano de 2030.

Figura 68 – Valores percentuais de área das classes de pressão hidrológica e tendências horizontal e vertical nas bacias hidrográficas analisadas

ANO	Mínimo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	Tendências horizontal
BHCQA						
2002	8,23%	27,41%	50,11%	11,56%	2,69%	
2011	8,86%	22,87%	47,70%	13,62%	6,95%	
2020	12,53%	26,15%	46,05%	6,56%	8,71%	
2025	12,38%	36,90%	26,49%	12,40%	11,83%	
2030	12,17%	32,84%	23,73%	15,76%	15,50%	
Tendência Vertical						
BHACM						
2002	2,00%	19,30%	20,30%	22,90%	35,40%	
2011	2,00%	15,58%	32,68%	23,92%	25,84%	
2020	1,70%	15,29%	31,70%	19,78%	31,51%	
2025	1,70%	12,91%	26,23%	21,46%	37,71%	
2030	1,70%	8,09%	18,11%	22,88%	49,27%	
Tendência Vertical						
BHCVB						
2002	0,90%	10,47%	19,70%	44,51%	24,41%	
2011	1,38%	9,23%	11,06%	50,95%	27,39%	
2020	1,26%	9,07%	9,97%	54,23%	25,48%	
2025	1,08%	7,16%	15,81%	59,45%	16,50%	
2030	0,96%	6,19%	16,06%	62,29%	14,50%	
Tendência Vertical						

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

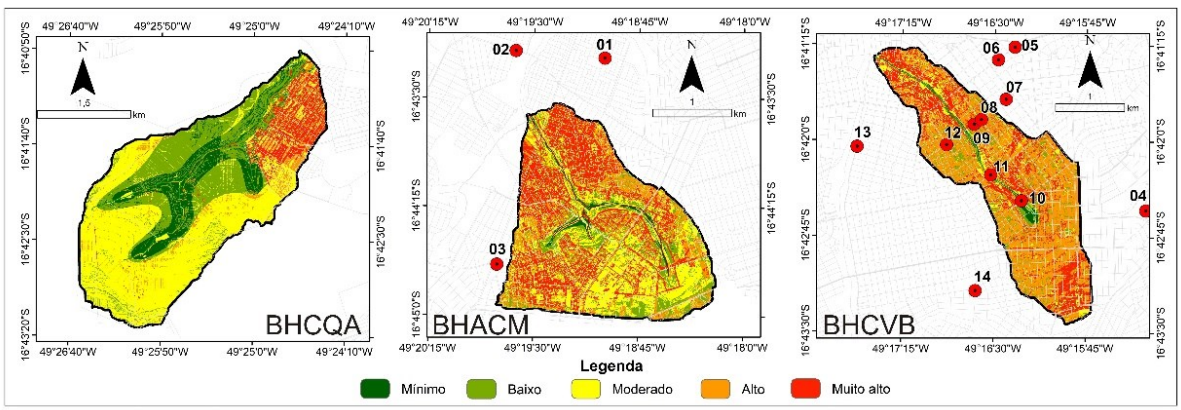
Já em relação à Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, as áreas predominam historicamente no intervalo de classes correspondentes aos maiores valores de pressão hidrológica, representados pelas classes de IPH muito alto e alto. As tendências anuais corroboram para evidenciar que o maior percentual de áreas encontra-se nessas classes durante todos os anos analisados. Considerando somente as classes de IPH alto e muito alto, estas somavam, juntas, no ano de 2020, cerca de 51% da bacia, podendo totalizar 59%, no ano de 2025, com potencial de atingir até 72% em 2030. O cenário deve ser de alerta, portanto, uma vez que a tendência vertical da classe de pressão muito alta é aumentar.

Por fim, a Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, além de concentrar-se prioritariamente dentro do intervalo de classes alto e muito alto, apresenta valores percentuais muito expressivos associados a essas classes, superiores a 50% de sua

área a partir do ano de 2011. As tendências anuais demonstram essa predominância de área nas classes alta e muito alta. Tomando como base o de 2020, a BHCVB tinha cerca de 79% de suas áreas com pressão hidrológica alta ou muito alta.

Desse modo, a Figura 69 contribui como um elemento avaliativo da eficácia do Índice de Pressão Hidrológica (IPH) desenvolvido nesta tese. Nela é possível verificar que a BHCQA ainda não apresenta pontos de monitoramento hidrológico delimitados pela defesa civil municipal. Sem embargo, conforme observações realizadas em campo, já existem indícios de áreas de preocupação hidrológica em seu exutório, especialmente pela pressão oriunda do escoamento superficial intenso nessa porção da bacia.

Figura 69 – Representação da pressão hidrológica no ano de 2020 e pontos de monitoramento da defesa civil nas bacias hidrográficas e proximidades



Bacia	Ordem	Local	Consequência
BHCQA	-	-	-
BHCMC	01	Vila Novo Horizonte - Avenida Maurício Gomes Ribeiro (Córrego Macambira)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	02	Setor Novo Horizonte - Av. Miguel do Carmo (Córrego Macambira)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	03	Jardim Presidente - Av. Presidente Juscelino Kubitscheck (Córrego Macambira)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
BHCVB	04	Setor Pedro Ludovico - Avenida 1ª Radial	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	05	Setor Oeste - Av. T-7, com a Rua 31	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	06	Setor oeste - Av. T-7, com Ruy Brasil Cavalcanti	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	07	Setor Bueno - A. T-8, esq. T-27 (prox. Instituto Ortopédico)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	08	Av T2 com Av T-8	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	09	Setor Bueno - Av. T-8 com T-30 (próx. Praça Farias Brito)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	10	Setor Bueno - Av T-10 (ao lado do Pq. Vaca Brava/ Gyn Shopping)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	11	Setor Bueno -Av. T-9 (prox. Clube Oasis)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	12	Jardim América - Av. C-206, com Av. C-198 (próximo ao Mourão)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	13	Jardim América - Rua C-107, com Rua C-190 (próximo a DPCA)	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia
	14	Parque Amazonas - Rua C-183	Pontos de inundações, enxurradas e alagamentos em Goiânia

* Pontos de monitoramento mapeados pela Defesa Civil Municipal e Prefeitura de Goiânia (2019).
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A BHCM, pelo seu contexto, também não apresenta pontos de monitoramento hidrológico em seu interior. No entanto, em suas proximidades, podem ser notados os pontos 01, 02 e 03, sendo os dois primeiros a jusante da bacia em questão, portanto, recebendo fluxos superficiais desta (Figura 69). É válido ressaltar que a modelagem indica a necessidade de atenção em várias regiões, especialmente em decorrência da urbanização horizontal. A BHCVB exibe, por sua vez, cinco pontos de monitoramento dentro dos seus limites. De acordo com a Defesa Civil municipal, esses pontos são passíveis da ocorrência de inundações, enxurradas e alagamentos (Figura 69). Observando atentamente os pontos, todos encontram-se localizados ou muito próximos de áreas com IPH alto ou muito alto, corroborando para a validação do índice de pressão hidrológica formulado.

Os apêndices A, B, C e D, detalham os principais parâmetros hidrológicos dos pontos de monitoramento da BHCVB. No entanto, a situação do escoamento superficial nas três bacias analisadas deve ser vista com cautela. A BHCQA pode ainda conciliar a necessidade de crescimento urbano e preservação dos processos hidrológicos superficiais, por meio de um planejamento urbano/territorial adequado e da execução de medidas estruturais extensivas (BOTELHO, 2011), menos onerosas e de fácil execução. As BHACM e BHCVB, por seu elevado grau de ocupação, necessitam de medidas estruturais intensivas (BOTELHO, 2011) como forma de atenuar os problemas hidrológicos.

Além do mais, é preciso pensar em escalas de ação, inclusive escalas maiores que as microbacias, como bem ressaltam Canholi (2014) e Tucci (1997). Os referidos autores sugerem que sejam realizadas ações capazes de respeitar os princípios da: (i) boa gestão interna, por meio da implantação de medidas que melhor atendam a necessidade estrutural ou não estrutural da área; (ii) o controle do escoamento na origem, quando possível, deve ser realizado o mais próximo possível do local de precipitação; (iii) a retenção local; e o (iv) controle regional, como forma de evitar uma contribuição acentuada de fluxos superficiais em intervalos de tempo reduzidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise direcionada à temática abordada nesta tese foi fundamental para entender o funcionamento de bacias hidrográficas urbanas, nas quais a água é manifestada por seu caráter de dinâmica superficial. Trabalhar com escoamento superficial e suas reverberações no espaço urbano das diferentes bacias hidrográficas de uma cidade é sempre uma tarefa desafiadora. A ausência de dados concretos, de medições confiáveis, os mapeamentos em escalas compatíveis e detalhadas e a carência de parâmetros físicos e biológicos representam apenas alguns dos desafios a serem solucionados.

Os níveis e padrões de escoamento superficial urbano, embora se tratando da mesma cidade e da proximidade entre as bacias hidrográficas analisadas, podem revelar realidades muito distintas. Quando se trata do impacto da expansão urbana sob o escoamento superficial é imprescindível observar, antes de tudo, a natureza dos processos histórico-geográficos, que dizem respeito, principalmente, a forma como foi constituída a ocupação da bacia, seus aspectos físicos, a configuração da paisagem da montante até sua jusante, bem como as atuais condições referentes ao maior conjunto de variáveis hidrológicas possíveis.

Esse conjunto de observações torna possível realizar processos de modelagem, além disso, torna cada bacia hidrográfica uma realidade hidrológica única, passível de estudos e soluções que não necessariamente podem ser replicadas para outras realidades sem as devidas adaptações. Sendo assim, as três bacias hidrográficas estudadas nesta tese apresentam diferentes condições e particularidades referentes ao nível da urbanização e de seus aspectos hidrológicos, bem como fases distintas de ocupação espaço-temporal.

Por conseguinte, já é de conhecimento que, no Centro-Oeste brasileiro, as modificações provenientes de alterações na cobertura da terra impactam o escoamento superficial, em bacias hidrográficas com períodos de precipitação intensa. Tais impactos são potencializados especialmente pelas modificações na dinâmica hidrológica, que acontecem por meio da conversão da cobertura natural, por coberturas que privilegiem materiais com permeabilidade reduzida. Tais estruturas antrópicas são responsáveis pela intensificação de diversos parâmetros hidrológicos, acentuando, dessa maneira, os riscos de inundações, os pontos de alagamento, as vulnerabilidades e as pressões existentes.

No contexto das bacias em análise, o potencial de pressão hidrológica é maior na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, seguida pela região hidrográfica do Macambira e, por fim, da Bacia do Córrego Quebra-Anzol, como aquela com maior possibilidade de manter um balanço hídrico equilibrado.

No geral, bacias hidrográficas com alto grau de modificação da cobertura da terra demonstram maior potencial de modificação dos processos hidrológicos, que, na maioria dos casos, são intensificados. Já regiões naturais ou pouco modificadas tendem a apresentar padrões de escoamento superficial sem grandes impactos ao sistema. Parâmetros como a velocidade (Vi) e o coeficiente de escoamento superficial (C) mostram tendência de aumento a partir da intensificação da cobertura urbana. Esses dois parâmetros são capazes de estressar fisicamente a bacia a partir da antecipação dos picos de vazão de cheias no exutório. Por sua vez, o tempo de concentração (Tc), juntamente com o coeficiente de armazenamento de água no solo (S), tendem a reduzir-se, contribuindo para acelerar o escoamento superficial.

Os valores mensurados das variáveis hidrológicas modeladas, podem ser analisados por meio das suas variações de amplitude, que é a diferença entre o maior e o menor valor registrado. No caso do tempo de concentração (Tc), a amplitude foi equivalente a 369 min, 46 min e 12 min, respectivamente, considerando a BHCQA, a BHACM e a BHCVB. Já os valores representativos da classe de maior velocidade de escoamento superficial equivalem em área dessas bacias, a um aumento de 2,6%, 3,6% e 13,7%, respectivamente. Em relação ao coeficiente S, os valores apontam para uma perda de capacidade de armazenamento de água no solo com percentuais iguais a 13,8%, 21,6% e 33,3%, registrados nas BCQA, BHACM e BHCVB. No caso dos valores de escoamento superficial por bacia, representados pelo coeficiente C, os percentuais de intensificação registrados foram de 13,8%, 39,9% e 17,2%.

Outro aspecto analisado e que merece ser destacado refere-se aos impactos de novas expansões urbanas considerando o escoamento superficial e as vazões de pico em função da projeção de cenários de cobertura futuros. Nesse caso, a partir das modelagens realizadas, todas as três bacias demonstraram tendência de aumento dos processos analisados para os anos de 2025 e 2030, sendo o resultado prático desse tipo de ampliação o aumento direto nas vazões de pico. Isso remete a uma intensificação dos processos relativos ao escoamento superficial urbano e, consequentemente, das pressões hidrológicas.

Na Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava, a situação do IPH mostrou-se ser a mais complicada, uma vez que a cobertura urbana domina todos os setores da bacia. Já na Bacia Hidrográfica do Alto Córrego Macambira, a situação é um pouco menos agravada, mas ainda delicada, devido à intensificação da ocupação urbana. Na bacia do córrego Quebra-Anzol, que está passando por um processo recente de conversão de áreas naturais para antropizadas, a situação ainda é passível de diligência sem grandes custos operacionais, ou seja, via planejamento e ordenamento territorial.

Ainda sobre a pressão hidrológica das bacias, considerando apenas os dois maiores percentuais de área, no ano de 2020, a BHCQA apresenta 72% de sua superfície entre as classes baixa a moderada. Os dados modelados indicam que esse percentual deve cair nos anos de 2025 e 2030, para 63% e 56% respectivamente, agravando ainda mais o IPH sobre diferentes pontos, uma vez que as áreas com piores condições de pressão aumentam no período.

Observando a BHACM, no ano de 2020, 63% da área encontra-se com valores de IPH moderado ou muito alto, o ano de 2025 e 2030, por sua vez, registram não somente um aumento mais uma troca de classes, pois respectivamente a bacia apresenta percentual de áreas iguais a 66% moderado a muito alto e 72% alto a muito alto. Esse movimento acentuado, indica uma intensificação dos processos hidrológicos na área que pode vim a agravar problemas já existentes na região.

A BHCVB, registra 79% de áreas com IPH alto e muito alto no ano de 2020, 75% das mesmas classes no ano de 2025 e 78% de regiões com moderada e alta pressão hidrológica no ano de 2030. Vale destacar que a maior parte dos percentuais mencionados se encontra vinculada diretamente a áreas de alta pressão. Sem dúvidas essa é a bacia hidrográfica mais pressionada hidrologicamente e apresenta o maior número de prontos críticos de monitoramento da defesa civil, fato também apontado pelas modelagens realizadas.

Sobre as potencialidades do método desenvolvido, pode-se mencionar: (i) a facilidade de integração com SIGs, e outros modelos; (ii) a realização por meio de ferramentas *open source*; (iii) a integração com linguagens de programação e (iv) a possibilidade de testes empíricos para modificação dos parâmetros. No que diz respeito as dificuldades e deficiências das técnicas utilizadas a maior parte delas relacionam-se diretamente com a disponibilidade de dados em escalas compatíveis.

Dessa forma, reafirma-se que o uso da modelagem de cenários de crescimento da impermeabilização do solo, associado a modelos de previsão de impactos hidrológicos urbanos, é uma técnica adequada para reconhecer e atenuar a pressão hidrológica sobre tais ambientes, confirmando, assim, a hipótese desta tese. Desse modo, se considera válida e de suma importância a proposta aqui apresentada por meio da metodologia construída, aplicada e validada. Isso posto acredita-se que a metodologia foi fundamental para resposta das questões problema, apresentadas nesta tese.

Merece ressalva ainda, a questão do impacto em sentido amplo para o contexto da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns, que embora não tenha sido analisada em sua totalidade, as bacias hidrográficas aqui estudadas, representam setores dessa, em sentido oeste-leste, que exemplificam muito bem a sua realidade. Assim as bacias analisadas exprimem mais do que resultados específicos e no contexto da cidade de Goiânia, se traduzem via de regra, em um modelo para a ocupação urbana.

Advoga-se que esta forma de ocupação, ocorre em nível hierárquico superior, na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns, implicando em inumeráveis modificações de cunho hidrológico e alteração de parâmetros importantes no funcionamento da hidrologia de superfície. Por este motivo, torna-se essencial um plano de drenagem urbana que reconheça as particularidades, as cotas de inundações, os regimes de chuva e os parâmetros topográficos e hidrológicos detalhados, e que pense na modelagem de cenários urbanos com foco em uma visão de passado, presente e futuro, deve ser alvo de discussão e implementação no contexto do município de Goiânia, e possivelmente de outras metrópoles brasileiras.

Quanto as demandas e agendas de pesquisas futuras torna-se necessário pensar formas de avaliação da pressão hidrológica de modo interrelacionado com as análises de gênese e ritmo climático, além de avaliações voltadas para o acompanhamento de setores específicos da bacia hidrográfica, tais como as áreas de preservação permanente, nascentes e de recarga do aquífero, são possibilidades de avanço concretas.

Por fim, é necessário destacar que, quando se trata de gestão do espaço urbano é importante reconhecer cada bacia hidrográfica como uma unidade hidrológica específica, mas com reverberações a montante e a jusante. Independentemente do modelo de gestão por bairros, regiões e municípios, essa pode

ser uma alternativa viável para pensar diferentes estratégias de ocupação e mitigação da pressão hidrológica urbana.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 18, p. 1-23, 1969.

AB'SABER, A. N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, n. 20, 1970.

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil:** potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ALMEIDA DE OLIVEIRA, F. *et al.* Determinação do limite da faixa de inundação com Uso do Hec-Ras para o Parque Linear do Córrego Macambira em Goiânia, Goiás. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, p. 57-66, 2016.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G. Compêndio de curso sobre Modelos de Dinâmica Urbana: conceitos, derivação de relações, calibração, exemplos. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XI., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...].** Belo Horizonte-MG, 2003.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, v. 20, p. 129-137, jan./jun. 2017.

ALVES, P. R. *et al.* Avaliação da impermeabilização do solo na área urbana em Goiânia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV., 2011a, [s. l.]. **Anais [...].** [S.l.: s.n.], 2011a. p. 4752-4759.

ALVES, P. R. *et al.* Avaliação de imagens orbitais para o mapeamento de áreas urbanas impermeabilizadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX., 2011b, [s. l.]. **Anais [...].** [S.l.: s.n.], 2011a. p. 1-21.

ANGEL, S. *et al.* The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050. **Progress in Planning**, v. 75, n. 2, p. 53-107, 2011.

ARAÚJO, P. R. de; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, p. 21-29, 2000.

ARGOLO, E. D.; DELLA GIUSTINA, C. C. Simulações e modelagem hidrológica de microbacia urbana para previsão de inundações: o caso do rio das Antas na cidade de Anápolis-GO. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 5, n. 3, p. 252, 2016.

BARBOSA, A. S.; ARAÚJO, L. M. de. Pré-História do Cerrado. **Élisée - Revista de Geografia da UEG - Goiás**, v. 9, n. 2, e922007, jul./dez. 2020.

BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. Urban systems as cellular automata. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 24, p. 159-164, 1997.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas:** modelo de aplicação. Florianópolis: UFSC, 1994. 112 p.

BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria geral dos sistemas**. 3. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 1977.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. *In:* TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (ed.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 2011. p. 177-241.

BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global - Esboço Metodológico. *In:* **Cadernos de ciência da Terra**. São Paulo. IGEO/USP, 1968.

BERNE, A. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 299, n. 3-4, p. 166-179, 2004.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. *In:* GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (eds.). **Erosão e conservação dos solos:** conceitos, temas e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p. 269-293.

BOTELHO, R. G. M. Bacias hidrográficas urbanas. *In:* GUERRA, A. T. S. (org.). **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 71-115.

BONDESON, S. **Análise de incerteza do método racional na gestão de águas pluviais -** Um estudo de caso em Gråbo, município de Lerum, usando análise multicritério. [S.l.: s.n.], 2021.

BRASIL. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n. 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 4 abr. 2022.

BRITO, G. S. de. **Alterações ambientais decorrentes da presença de depósitos tecnogênicos na bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns em Goiânia, GO**. 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/92768. Acesso em: 4 abr. 2022.

CÂMARA, G. *et al.* Análise espacial e geoprocessamento. *In:* DRUCK, S. *et al.* (eds.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap1-intro.pdf. Acesso em: 4 abr. 2022.

CÂMARA, G. *et al*. Representações computacionais do espaço: um diálogo entre a Geografia e a Ciência da Geoinformação. **Geografia**, v. 28, n. 1, p. 83-96, 2003.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise de eventos pontuais. *In:* DRUCK, S. *et al.* (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004.

CÂMARA, G.; DAVIS JR, C. A.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Rio de Janeiro: Inpe, 2001.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CASSETI, V. Geomorfologia do município de Goiânia. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 12, p. 65-85, jan./dez. 1992.

CARVALHO, E. T. L. **Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona norte da cidade de Goiânia**. 2008. 222 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

CARVER, S. J. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 5, n. 3, p. 321-339, 1991.

CASTRO, I. de; GOMES, P. C. da C.; CORRÊA, R. L. **Geografia:** conceitos e temas. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

CAVALCANTE, L. R. **Análise da evolução da paisagem urbana de Goiânia (GO) e a distribuição dos focos erosivos hídricos de 1992 a 2016**. 2019. 219 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

CIGLER, Beverly A. US inunda: A necessidade de mitigação. **Revisão do Governo Estadual e Local**, v. 49, n. 2, p. 127-139, 2017.

CHEN, Kai-Feng; LEANDRO, Jorge. Um índice conceitual de resiliência de inundações para áreas urbanas: a cidade de Munique. **Água**, v. 11, n. 4, p. 830, 2019.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec-Edusp, 1979. 106 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. Rio Claro: Edgard Blücher Ltda., 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

CORRÊA, E. M. S. **A expansão de Goiânia**: uma abordagem cartográfica - 1933-1980. 1981. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 1981.

CORRÊA, R. L. **Região e organização espacial**. 4. ed. São Paulo: Ática, 1991.

CORRÊA, R. L. **Região e organização espacial.** São Paulo: Ática, 2003.

COVILLE, R.; ENDRENY, T.; NOWAK, D. J. Modeling the impact of urban trees on hydrology. In: LEVIA, D. *et al.* **Forest-Water Interactions**. Cham: Springer, 2020. p. 459-487.

CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. *In:* GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DALMOLIN, R. S. D. *et al.* How is the learning process of digital soil mapping in a diverse group of land use planners? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0190037, 2020.

DAMBRÓS, L. A. *et al.* **Zoneamento ecológico-econômico da área do aglomerado urbano de Goiânia**. Goiânia: Seplan/IBGE, 1994.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, March 2015.

DUAN, W. *et al*. Recent Advancement in Remote Sensing Technology for Hydrology Analysis and Water Resources Management. **Remote Sensing**, v. 13, n. 6, p. 1097, 2021.

FAULKNER, B. The control of surface water runoff from new development - UK national “policy” in need of review? **Urban Water**, v. 1, n. 3, p. 207-215, 1999.

GOMES, P. C. da C. Um lugar para a Geografia: contra o simples, o banal e o doutrinário. *In:* MENDONÇA, F. *et al.* **Espaço e tempo:** complexidade e desafios do pensar e do fazer geográfico. Curitiba: Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (Ademadan), 2009. p. 13-30.

GOUVEIA, R. G. L. de; GALVANIN, E. A. S.; NEVES, S. M. A. S. Aplicação do índice de transformação antrópica na análise multitemporal da bacia do córrego do bezerro vermelho em Tangará da Serra-MT. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 37, n. 6, p. 1045-1054, 2013.

GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

HAESBAERT, R. **O mito da desterritorialização:** do “fim dos territórios” à multi-territorialidade. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

HAESBAERT, R. **Regional-global**: dilemas da região e da regionalização na geografia contemporânea. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 3, p. 251-273, 1995.

JESEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente** – uma perspectiva em recursos terrestres. 4. ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2011.

JORGE, M. do C. O. Geomorfologia urbana: conceitos, metodologias e teorias. *In*: GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 117-142.

KREBS, G. *et al*. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 482-497, 2014.

LECHIU, B. C. G.; OLIVEIRA FILHO, P. C. de; SOUSA, J. B. de. Utilização de imagens orbitais de alta resolução em superfícies com níveis distintos de impermeabilização do solo urbano: caso Irati-PR. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 2, p. 127-140, 2012.

LEE, J. G.; HEANEY, J. P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 5, p. 419-426, 2003.

LINO, N. C. **Expansão urbana da região metropolitana de Goiânia e os impactos sobre os recursos hídricos**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

LONGLEY, P. A. *et al*. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LOURENÇO, R. W. *et al*. Use of fuzzy systems in the elaboration of an anthropic pressure indicator to evaluate the remaining forest fragments. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 3, p. 2481-2488, 2015.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006.

MASSABKI, J. A. R. *et al*. Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em Autômatos Celulares. **Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba, v. 9, p. 362-371, 2017.

MCCABE, M. F. *et al.* The future of Earth observation in hydrology. **Hydrology and earth system sciences**, v. 21, n. 7, p. 3879-3914, 2017.

MEJÍA, A. I.; MOGLEN, G. E. Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 23, p. 3359-3373, 2010.

MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area, Technical Report, Dept. Geology**. Columbia: Columbia University, 1953.

MENEZES FILHO, F. C. M. de; SÁ, R. A. de. Estudo comparativo entre as equações empíricas e o método da velocidade na estimativa do tempo de concentração. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, p. 221-244, jan. 2019.

MONTEIRO, C.A.F. **Geossistemas**: a história de uma procura. São Paulo: Contexto/GeoUSP. (Novas abordagens 3). 2000. 127p.

MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, [S.l.], v. 4, p. 18-33, 1851.

NASCIMENTO, D. T. F. **Chuvas no estado de Goiás e no Distrito Federal a partir de estimativas por satélite**. 2016. 200 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

NASCIMENTO, D. T. F. Episódios e gênese dos eventos climáticos extremos em Goiânia-GO. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 57, p. 583-608, 2019.

NASCIMENTO, D. T. F.; LIMA, L. V. V.; CRUZ, V. P. Episódios e gênese dos eventos climáticos extremos em Goiânia-GO. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 57, p. 583-608, 2019.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. de. Mapeamento do processo histórico de expansão urbana do município de Goiânia-GO. **GEOgraphia**, v. 17, n. 34, p. 141, 2018.

NASCIMENTO, F. A. F. do *et al*. **Curso de mapeamento digital de solos com uso do QGIS**. Curitiba: Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural, 2017.

NOGUEIRA, S. H. de M. **Avaliação do risco à perda da qualidade ambiental do aquífero freático na Região Metropolitana de Goiânia**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

NUNES, E. D.; BORBA, L. L. Avaliação dos efeitos do adensamento urbano na dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas – Aparecida de Goiânia-GO. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 38, n. 2, p. 428, 2018.

NUNES, F. G. Modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento na estimativa da impermeabilização do solo e escoamento superficial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns - Goiânia (GO). **Ateliê Geográfico**, v. 6, n. 2, p. 55-74, 2012.

Nunes, F. G. **A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do rio Atuba.** Tese (doutorado) apresentada ao programa de pós-graduação em Geologia, Setor de Ciência da Terra, UFPR. 2007.

OLIVEIRA, A. F. de. **A reprodução do espaço urbano de Goiânia:** uma cidade para o capital. 2005. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/215/o/Oliveira_ad_o_francisco_reprodu____espa_o.pdf. Acesso em: 4 abr. 2022.

OLIVEIRA, M. das M. B. DE. O padrão territorial de Goiânia: um olhar sobre o processo de formação de sua estrutura urbana. **Arquitextos**, n. 2, 2005.

OLIVEIRA, R. B. de *et al.* Distribuição espacial das áreas de ocorrências a processos de alagamentos e inundações na cidade de Goiânia-GO. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, X., SIMPÓSIO PARANAENSE DE CLIMATOLOGIA, V., 2012, [s.l.]. **Anais [...].** [S.l.: s.n.], 2012. p. 1282-1293.

OLIVEIRA, R. B. de; VESPUCCI, A. G. Compartimentação morfopedológica como subsídio à compreensão dos processos de alagamentos e inundações na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns, Goiânia-GO. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVII., 2015, João Pessoa. **Anais [...].** João Pessoa-PB, 2015. p. 6381-6388.

OLIVEIRA, L. M., SILVA, S. M. O., SOUZA FILHO, F. A., RUFINO, I. A. A., BRITO, H. C., & LOPES, T. M. X. M. Modelagem dinâmica da expansão urbana usando autômatos celulares: o caso de Fortaleza-CE. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 13. 2021

ONU-Habitat. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. **Estado de Las Ciudades de América Latina y el Caribe 2012:** Rumbo a una nueva transición urbana. [S.l.]: ONU, 2012. Disponível em: https://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/estado-das-cidades-da-america-latina-e-caribe-2012.pdf. Acesso em: 4 abr. 2022.

PASSOS, M. M. **A construção da paisagem no Mato Grosso - Brasil.** Maringá: Editora da UEM, 2000.

PEEL, M. C.; BLÖSCHL, G. Hydrological modelling in a changing world. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 2, p. 249-261, 2011.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. *In:* DRUCK, S. *et al.* (ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. p. 1-39.

PEREIRA, T. S. R. **Modelagem e monitoramento hidrológico das bacias hidrográficas dos córregos Botafogo e Cascavel, Goiânia-GO**. 2015. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

PORTO, R. L.; PORTO, M. F. A. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. *In:* TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. P. (org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 5).

RAMIER, D.; BERTHIER, E.; ANDRIEU, H. The hydrological behaviour of urban streets: Long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall-runoff transformation. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 14, p. 2161-2178, 2011.

REGO, T. L. **Chuvas e inundações em Goiânia:** dinâmica atmosférica e áreas de risco. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

REGO, T. L.; BARROS, J. R. Alagamentos e inundações em Goiânia: uma análise a partir da imprensa local e dos registros da defesa civil. **Formação (Online)**, v. 1, n. 21, p. 170-185, 2014.

REICHERT, J. M.; DALMOLIN, R. **Fatores e processos de formação do solo**. 2011. Disponível em: http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Disciplinas/SolosFlorestais/SF_Fatores_formacao.pdf. Acesso em: 6 abr. 2022.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. *In:* **Geomática:** modelos e aplicações ambientais. v. 11, 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 529-556.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. *In:* SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado:** ecologia e flora. Ecologia e flora. Brasília: Embrapa, 2008. p. 151-222.

ROCHA, N. P**lanejamento urbano da bacia do córrego Samambaia (Goiânia-GO) utilizando o SWMM - Storm Water Management Model**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente (EEC)) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

ROCHA, W. S.; PASQUALETTO, A.; NUNES, E. D. **Goiânia, Córrego Botafogo.** Goiânia: Ed. da PUC Goiás, 2021.

ROCHA, S. P.; CRUZ, C. B. M. Aplicação do ITA na análise espaço-temporal do entorno da BR-101 nos municípios de Angra dos Reis e Parati. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), XIV., 2009, Natal. **Anais eletrônicos [...].** São José dos Campos: INPE, 2009.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas. *In:* DANTAS, E.; BURITI, I. (org.). **Praticando Geografia:** técnicas de campo e laboratório. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 147-166.

RODRIGUEZ, J. M. M. **Geoecologia de los Paisajes**. Caracas: Universidad Central de Caracas, 1991.

RODRIGUEZ, J. M. M.*et al.* **Geoecologia das paisagens** [livro eletrônico]: uma visão geossistêmica da análise ambiental. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2022.

ROHMAT, Rohmat; AKBARDIN, Juang; MAKNUN, Johar. Hydrological Analysis of The Cikapundung Watershed, Tamansari Balubur Area of Bandung, West Java, Indonesia. **Journal of Development and Integrated Engineering**, v. 1, n. 1, p. 26-36.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **RDG Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil**. Subsídios para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROUSSEAU, A. N. *et al.* Physitel, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. **Water News-Official Magazine of the Canadian Water Resources Association**, v. 31, n.1, p. 18-20, 2011.

RUDKE, A. P. *et al*. Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110392, 2020. DOI https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110392.

SALVADORE, E.; BRONDERS, J.; BATELAAN, O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. **Journal of Hydrology**, v. 529, n. P1, p. 62-81, 2015.

SANTOS, A. M.; GOMIDE, M. L. C. A ocupação no entorno das Terras Indígenas em Rondônia, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 417-436, 2015.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. B. dos. **Áreas de preservação permanente como instrumento para conservação dos recursos hídricos:** Estudo de caso na Região Metropolitana de Goiânia, Goiás. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

SANTOS, K. A. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

SANTOS, K. R. dos. **Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e análise desse fenômeno na bacia do córrego pedreira**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SANTOS, K. R. dos. Inundações urbanas: um passeio pela literatura. **Èlisée - Revista de Geografia da UEG**, v. 1, n. 1, p. 177-190, 2012.

SANTOS, K. R. dos; LEMES, S. S.; ROMÃO, P. de A. Uso do solo e escoamento superficial na bacia do Córrego Pedreira em Goiânia (GO): uma análise a partir de imagens de alta resolução espacial. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV., 2009, [s.l.]. **Anais [...].** [S.l.: s.n.], 2009. p. 859-866.

SANTOS, K. R. dos; ROMÃO, P. de A. Inundações em Bacias urbanas (GO): intervenção humana e a intensificação de fenômenos naturais. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, XIII., 2009, [s.l.]. **Anais [...].** [S.l.: s.n.], 2009.

SANTOS, K. R. dos; ROMÃO, P. de A. Espacialização de inundações em Goiânia (GO) (2004-2007). **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 2, p. 81-97, 2010.

SANTOS, M. **Espaço e método**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

SANTOS, M. O retorno do território. **Debates, território y movimientos sociales**, ano VI, n. 16, enero-abril 2005.

SAQUET, M. A. O território: diferentes interpretações na literatura italiana. *In:* RIBAS, A. D.; SPOSITO, E. S.; SAQUET, M. A. **Território e desenvolvimento:** diferentes abordagens. Francisco Beltrão: Unioeste, 2004.

SCHAAKE JR., J. C .; GEYER, J. C.; KNAPP, J. W. Exame experimental do método racional. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 93, n. 6, p. 353-370, 1967.

SCHMUGGE, T. J. *et al.* Remote sensing in hydrology. **Advances in water resources**, v. 25, n. 8-12, p. 1367-1385, 2002.

SOCHAVA, V.B. O estudo de geossistemas. **Métodos em questão**, n.16, IGUSP. São Paulo, 1977. 51 p.

SEIBT, A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Botafogo – Goiânia-GO**. 2013. 145 f. Dissertação (Mestado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SILVA, A. S. Solos urbanos. *In:* GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia Urbana.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. p. 43-70.

SILVA, E. P. Da et al. Uso do solo e caracterização morfométrica como subsídios para análise das áreas de alagamento e da qualidade da água nas microbacias do Macambira e Cascavel , Goiânia-GO. **Ciência e Natura**, v. 41, p. 1–15, 2019.

SILVA, E. A. Cenários da Expansão Urbana na Área Metropolitana de Lisboa. **Revista de Estudos Regionais**, v. 5, p. 23-41, 2002.

SILVA, S. D. e; BARBOSA, A. S. Paisagens e fronteiras do Cerrado: ciência, biodiversidade e expansão agrícola nos chapadões centrais do Brasil. Estudos Ibero-Americanos, 46(1), e34028, 2020. https://doi.org/10.15448/1980-864X.2020.1.34028.

SANTOS, J. B. dos. **Áreas de preservação permanente como instrumento para conservação dos recursos hídricos:** Estudo de caso na Região Metropolitana de Goiânia, Goiás. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

SANTOS, K. A. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

SANTOS, K. R. dos. **Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e análise desse fenômeno na bacia do córrego pedreira**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SILVA, E. P. da, *et al*. Uso do solo e caracterização morfométrica como subsídios para análise das áreas de alagamento e da qualidade da água nas microbacias do Macambira e Cascavel, Goiânia-GO. **Ciência E Natura**, *41*, e59, 2019.

SILVA NETO, J. C. A. da. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia**, Londrina, v. 22, n. 1, p. 5-25, jan./abr. 2013.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. *In:* TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS: ABRH, 2001. p. 35-51.

SILVEIRA, A. L. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. *In:* TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: EDUFRGS, 2001. p. 335-372.

SMITH, N. **Desenvolvimento desigual:** natureza, capital e a produção de espaço. Tradução de Eduardo de Almeida Navarro. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1988.

SOUZA, M. L. de. **Os conceitos fundamentais da pesquisa socioespacial**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.

SOUZA, R. M. de; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial - caso de estudo bacia do córrego samambaia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 5, p. 1-11, 2012.

SOUSA, S. B. de; FERREIRA, L. G. Mapeamento da cobertura e uso da terra: uma abordagem utilizando dados de sensoriamento remoto óptico multitemporais e

provenientes de múltiplas plataformas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, N0 66/2, p. 321-336, Mar/Abr/2014.

SOTCHAVA, V. B. O estudo de geossistemas. Instituto de Geografia. USP, São Paulo: Ed. Lunar, 1977.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. (Coleção geografia; v. 3).

SUERTEGARAY, D. M. A. Espaço Geográfico uno e múltiplo. **Scripta Nova**, n. 93, 15 de julio de 2001.

SURYOPUTRO, N. *et al.* Calibration of infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method. **IP Conference Proceedings**, v. 1887, n. 1, p. 020056, Sep. 2017.

TODINI, E. Hydrological catchment modelling: Past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468-482, 2007.

TRICART, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica: Supren, 1977. 97 p. (Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1).

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. **Livro água doce**, p. 1-40, 1997.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Revista Estudos Avaçados USP**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, oct./dec. 2003.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universidade UFRGS: ABRH, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. Regulamentação da drenagem urbana no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 13, n. 1, p. 29-42, 2016.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos Hídricos no Século XXI**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. *In:* VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Editora McGraw Hill, 1975. p. 1-68.

VÖRÖSMARTY, C. J. *et al*. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. **Science**, v. 289, n. 5477, p. 284-288, 2000.

WENG, Q. (ed.). **Remote sensing of impervious surfaces.** Boca Raton: CRC Press, 2007.

YANG, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 3, p. 403-416, 2000.

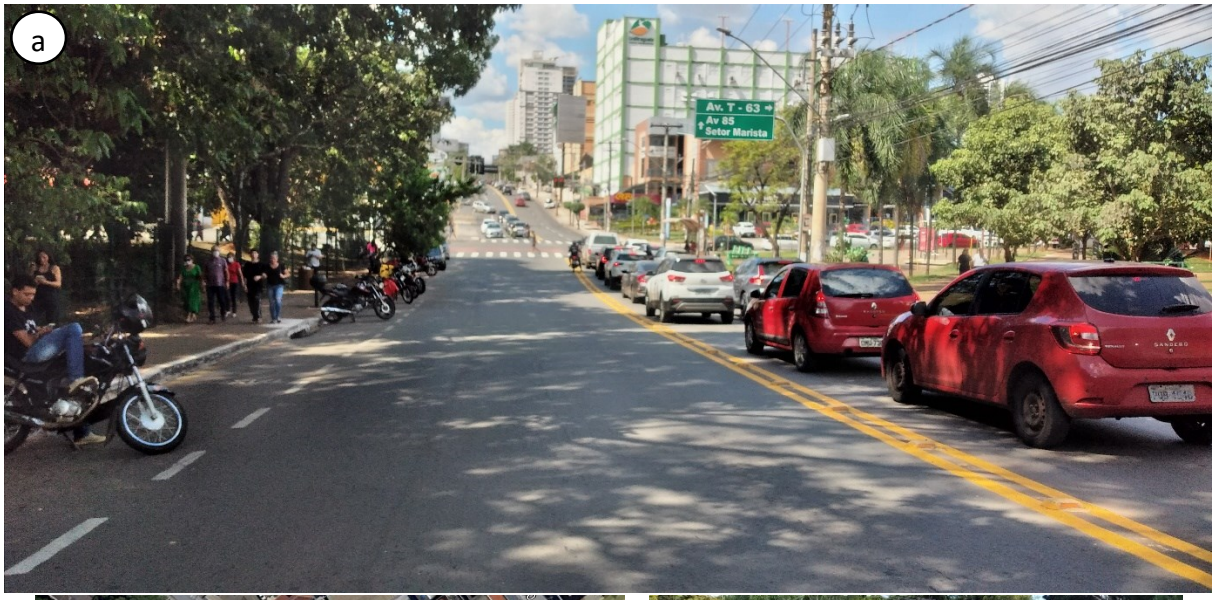
YAO, L.; WEI, W.; CHEN, L. How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? **Ecological Indicators**, v. 60, p. 893-905, 2016.

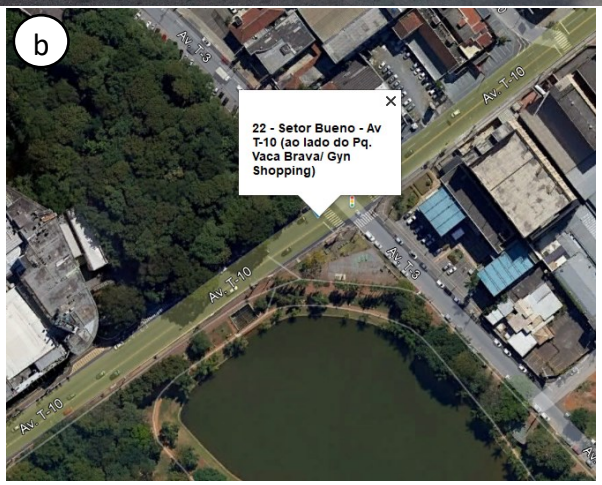
YOUNG, C. B.; MCENROE, B. M.; ROME, A. C. Empirical determination of rational method runoff coefficients. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 12, p. 1283-1289, 2009.

ZONGXUE, Xu. Modelos hidrológicos: passado, presente e futuro. **Journal of Beijing Normal University (Natural Science)**, v. 3, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Ponto de monitoramento 10 (Fig. 69), defesa civil de Goiânia - BHCVB.





Parâmetro avaliado na composição do IPH	Classificação
Declividade	0,88 %
Altitude	791 m
Extensão do fluxo de drenagem	3,0 km
Curvatura	Côncava
Velocidade de escoamento superficial – Vi	1,0 m/s
Tempo de concentração – TC	61,54 min
Coeficiente S	2,25 mm
Coeficiente C	0,97

APÊNDICE B – Ponto de alagamento 11 (Fig. 69), defesa civil de Goiânia - BHCVB.

Parâmetro avaliado na composição do IPH	Classificação
Declividade	1,1 %
Altitude	783 m
Extensão do fluxo de drenagem	2,40 km
Curvatura	Côncava
Velocidade de escoamento superficial – Vi	0,80 m/s
Tempo de concentração – TC	50,29 min
Coeficiente S	2,25 mm
Coeficiente C	0,97

APÊNDICE C – Ponto de alagamento 12 (Fig. 69), defesa civil de Goiânia - BHCVB.

Parâmetro avaliado na composição do IPH	Classificação
Declividade	1,46 %
Altitude	772 m
Extensão do fluxo de drenagem	1,80 km
Curvatura	Retilínea
Velocidade de escoamento superficial – Vi	0,50 m/s
Tempo de concentração – TC	40,58 min
Coeficiente S	2,25 mm
Coeficiente C	0,97

APÊNDICE D – Ponto de alagamento 08 (Fig. 69), defesa civil de Goiânia - BHCVB.

Parâmetro avaliado na composição do IPH	Classificação
Declividade	1,46 %
Altitude	774 m
Extensão do fluxo de drenagem	1,70 km
Curvatura	Retilínea
Velocidade de escoamento superficial – Vi	0,99 m/s
Tempo de concentração – TC	36,5 min
Coeficiente S	3,48 mm
Coeficiente C	0,97