

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM USO DE MODELAGEM QUASI-2D-
RASTER: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU, RJ

BRUNO LIMA TABET

2023

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM USO DE MODELAGEM QUASI-2D-
RASTER: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU, RJ

Bruno Lima Tabet

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Oswaldo Moura Rezende

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Rio de Janeiro

Janeiro de 2023

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM USO DE MODELAGEM QUASI-2D-
RASTER: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU, RJ

Bruno Lima Tabet

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Osvaldo Moura Rezende, D. Sc.

Prof. Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

Prof. Matheus Martins de Sousa, D. Sc.

Prof. Marcelo Gomes Miguez, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2023

Tabet, Bruno Lima

Mapeamento de Inundações com Uso de Modelagem
Quasi-2D-Raster: Estudo de Caso da Bacia do Rio Piraquê-
Cabuçu/ Bruno Lima Tabet, – Rio de Janeiro:
UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2023.

xiv, 98 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Osvaldo Moura Rezende

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Engenharia Civil, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 99-101.

1. Modelo Raster. 2. Modelo Quasi-2D. 3. MODCEL. 4.
Inundações. I. Rezende, Osvaldo Moura *et al.*. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia
Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por todo o suporte necessário ao longo da minha jornada na Escola Politécnica da UFRJ e por todos os sacrifícios que tiveram que fazer para que eu pudesse chegar até aqui. Em especial ao meu irmão, Hugo, e meus pais, Maria e Ives, pelo apoio incondicional que me fortaleceu nos momentos mais difíceis, além da educação que recebi dentro de casa.

Agradeço a todos os profissionais envolvidos no funcionamento da Universidade Federal do Rio de Janeiro pela dedicação e esforço para manter uma das maiores instituições de ensino do país, símbolo de excelência e oportunidade. Agradeço aos professores que tive ao longo da vida acadêmica, em especial aos professores do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (DRHIMA), pelos conhecimentos transmitidos.

Agradeço aos meus orientadores Osvaldo Rezende e Antonio Krishnamurti pela paciência, suporte técnico e disposição para que eu pudesse concluir este trabalho. Espero um dia poder ajudar outros alunos assim como vocês me ajudaram. Obrigado a toda a equipe técnica do Laboratório de Água e Cidades da UFRJ pela oportunidade de realização de Iniciação Científica, que contribuiu para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Agradeço ao Rodrigo Gonçalves pela orientação, suporte técnico e direcionamento nos momentos em que precisei.

Agradeço à minha companheira de vida e melhor amiga, Juliana Cavalcanti, pelas palavras de incentivo, conselhos e presença nos momentos de alegria e de tristeza ao longo da minha jornada. Por fim, agradeço a todos os meus amigos que contribuíram de alguma forma para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES COM USO DE MODELAGEM QUASI-2D-
RASTER: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU, RJ

Bruno Lima Tabet

Janeiro de 2023

Orientadores: Osvaldo Moura Rezende e Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

O processo de modelagem é uma ferramenta imprescindível para a concepção correta do comportamento de um evento de cheia de um território urbanizado e, com o avanço da tecnologia, os modelos hidrológicos e hidráulicos vêm sendo aperfeiçoados devido à, principalmente, maior facilidade de obtenção de dados topográficos, além do aumento contínuo da capacidade de processamento dos microcomputadores. Neste contexto, vem sendo cada vez mais utilizada a concepção de modelagem hidrodinâmica raster, que tem como principal função automatizar o processo de criação de uma malha, onde cada *pixel* possui informações representativas de um determinado atributo da área abrangida pela mesma, como a elevação do terreno e parâmetros de uso e ocupação do solo. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da utilização do modelo raster acoplado ao Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) para a simulação de um evento de cheia em uma bacia urbanizada, destacando seus potenciais e limitações. A bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, localizada na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro, foi escolhida como estudo de caso, sendo modelada a partir de um Modelo Digital do Terreno de 1 metro de resolução horizontal e informações de uso e ocupação do solo georreferenciadas. Os resultados obtidos, dispostos em manchas de inundação, permitem avaliar a aplicabilidade do modelo raster para o mapeamento de inundações em uma bacia urbanizada.

Palavras-chave: Modelo Raster; Modelo Quasi-2D; MODCEL; Inundações.

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineering.

FLOOD MAPPING USING QUASI-2D-RASTER MODELING: A CASE STUDY OF
THE PIRAQUÊ-CABUÇU RIVER BASIN, RJ

Bruno Lima Tabet

January/2023

Advisors: Osvaldo Moura Rezende e Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira

The modeling process is an essential tool for the correct conception of the behavior of a flood event in an urbanized territory and, with the advancement of technology, hydrological and hydraulic models have been improved due to, mainly, greater ease of obtaining topographic data, in addition to the continuous increase in the processing capacity of microcomputers. In this context, the concept of raster hydrodynamic modeling has been increasingly used, whose main function is to automate the process of creating a mesh, where each pixel has representative information of a certain attribute of the area covered by it, such as the elevation and land use parameters. This work aims to evaluate the performance of using the raster model coupled to the Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) to simulate a flood event in an urbanized basin, highlighting its potentials and limitations. The watershed of the Piraquê-Cabuçu River, located in the west zone of the city of Rio de Janeiro, was chosen as a case study, being modeled from a Digital Terrain Model of 1 meter of horizontal resolution and georeferenced land use information. The applicability of the raster model for mapping floods in an urbanized basin can be evaluated through the results disposed in flood extents.

Keywords: Raster Model; Quasi-2D Model; MODCEL; Flood.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO.....	1
1.2	MOTIVAÇÃO.....	5
1.3	OBJETIVO	5
1.4	METODOLOGIA GERAL	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO.....	7
2.1.1	Equação da Continuidade.....	7
2.1.2	Equações de Navier-Stokes	8
2.1.3	Equações de Saint-Venant	12
2.2	MODELAGEM DE CHEIAS	13
2.2.1	Modelo Hidrodinâmico 1D	14
2.2.2	Modelo Hidrodinâmico 2D	15
2.2.3	Modelo Hidrodinâmico <i>Quasi</i>-2D	15
2.2.4	Modelo <i>Quasi</i>-2D-Raster.....	17
2.2.4.1	MODCEL-Raster	22
2.2.5	Modelo Hidrodinâmico 3D	23
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	MODELO CONCEITUAL.....	24
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	25
3.3	DO ARQUIVO RASTER À MALHA IDEAL	28
3.3.1	Dados de entrada do MODCEL	28
3.3.2	Malha ótima	29
3.4	REPRESENTAÇÃO DA HIDROGRAFIA	32
3.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	33
3.6	CALIBRAÇÃO	33

4	ESTUDO DE CASO: A BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU	36
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	36
4.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	37
4.3	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	39
4.4	CLIMATOLOGIA E REGIME PLUVIOMÉTRICO	44
4.4.1	Caracterização do clima.....	44
4.4.2	Dados pluviométricos básicos.....	45
4.4.3	Equação IDF (Intensidade x Duração x Frequência).....	47
5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	50
5.1	TOPOGRAFIA E USO DO SOLO	50
5.2	DEFINIÇÃO DA MALHA IDEAL	51
5.2.1	Raster quadriculado 60 m x 60 m	52
5.2.2	Raster quadriculado 90 m x 90 m	53
5.2.3	Raster quadriculado 120 m x 120 m	54
5.2.4	Raster hexagonal 90 m x 90 m.....	54
5.3	PRINCIPAIS CANAIS DA BACIA	59
5.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO	62
5.5	CALIBRAÇÃO - CHUVA DE ABRIL DE 2010.....	63
6	RESULTADOS	68
6.1	CALIBRAÇÃO	69
6.1.1	Modelo 1	69
6.1.2	Modelo 2	71
6.1.3	Modelo 3	75
6.1.4	Modelo 4	76
6.1.5	Modelo 5	79
6.1.6	Análise de resultados.....	83
6.2	MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES	90
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	95

7.1	CONCLUSÕES	95
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 EVENTO DE INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA, RJ (GLOBO, 2019).....	2
FIGURA 2.1 ESQUEMA DAS TENSÕES NORMAIS E CISALHANTES QUE ATUAM SOBRE ELEMENTO FLUIDO (LIVI, 2004).....	10
FIGURA 2.2 VOLUME DE CONTROLE DE UM ELEMENTO FLUIDO (POPESCU, 2014).....	12
FIGURA 2.3 REPRESENTAÇÃO DAS LIGAÇÕES CANAL-PLANÍCIE EM UM MODELO DE CÉLULAS <i>QUASI</i> -2D (A) E EM UM MODELO RASTER ACOPLADO A UM MODELO 1D (B) (PAZ, 2010).....	20
FIGURA 2.4 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS LIGAÇÕES ENTRE AS CÉLULAS/PIXELS DO MODCEL/RASTER (SOUSA <i>ET AL.</i> , 2017).....	22
FIGURA 3.1 EFEITOS DA SIMPLIFICAÇÃO DA TOPOGRAFIA (HAILE E RIENTJES, 2005)	30
FIGURA 3.2 TROCAS DE VAZÕES DE UMA CÉLULA DO MODELO RASTER (PAZ, 2010)	31
FIGURA 3.3 MALHA QUADRICULADA X HEXAGONAL.....	31
FIGURA 3.4 EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE CÉLULA HEXAGONAL	32
FIGURA 4.1 MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU	36
FIGURA 4.2 HIPSOMETRIA DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU.....	37
FIGURA 4.3 MAPA DAS SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU (RIO DE JANEIRO - PDMAP, 2012, ADAPTADO POR RIBEIRO, 2017).....	39
FIGURA 4.4 COBERTURA E USO DO SOLO NA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU (RIO DE JANEIRO, 2016)	41
FIGURA 4.5 – DISTRIBUIÇÃO POPULACIONAL DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU (DIAS <i>ET AL.</i> , 2021).....	42
FIGURA 4.6 CLASSIFICAÇÃO CLIMATOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO	45
FIGURA 4.7 LOCALIZAÇÃO DO POSTO PLUVIOMÉTRICO	46
FIGURA 4.8 SÉRIE HISTÓRICA DE REGISTROS – CAMPO GRANDE	46
FIGURA 4.9 PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL – CAMPO GRANDE.....	47
FIGURA 4.10 ÁREAS DE INFLUÊNCIA DAS EQUAÇÕES IDF DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO (RIO ÁGUAS, 2019).....	48
FIGURA 4.11 CURVAS IDF (RIO ÁGUAS, 2019).....	49
FIGURA 5.1 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO – RASTER QUADRICULADO COM MALHA DE CÉLULAS DE 60M X 60M.....	52
FIGURA 5.2 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO – RASTER QUADRICULADO COM MALHA DE CÉLULAS DE 90M X 90M.....	53
FIGURA 5.3 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO - RASTER QUADRICULADO COM MALHA DE CÉLULAS DE 120M X 120M.....	54
FIGURA 5.4 EXEMPLO DE MANCHAS ISOLADAS DE INUNDAÇÃO – MALHA QUADRICULADA	55
FIGURA 5.5 MANCHA ISOLADA DE INUNDAÇÃO.....	56

FIGURA 5.6 COTAS DE FUNDO DAS CÉLULAS DE ESCOAMENTO DA MALHA HEXAGONAL – 90M X 90M	57
FIGURA 5.7 COEFICIENTES DE ESCOAMENTO DAS CÉLULAS DE ESCOAMENTO DA MALHA HEXAGONAL – 90M X 90M	58
FIGURA 5.8 COEFICIENTES DE MANNING DAS LIGAÇÕES DA MALHA HEXAGONAL – 90M X 90M.....	59
FIGURA 5.9 CÉLULAS DOS RIOS PIRAQUÊ-CABUÇU, PRATA DO CABUÇU E CABUÇU-MIRIM	60
FIGURA 5.10 EXEMPLO DE COTA DE FUNDO DE CÉLULA HEXAGONAL NO RIO ABC	61
FIGURA 5.11 VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR PARA O EVENTO DE CALIBRAÇÃO	62
FIGURA 5.12 LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS.....	63
FIGURA 5.13 PRECIPITAÇÃO DO EVENTO DE CALIBRAÇÃO (ALERTA RIO, 2010).....	64
FIGURA 5.14 PONTOS DE INUNDAÇÃO RESULTANTES DO EVENTO DE CALIBRAÇÃO NA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU (RIO-ÁGUAS, 2010).....	65
FIGURA 5.15 MANCHA DE INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA APÓS O EVENTO DE ABRIL DE 2010 (RIO-ÁGUAS,2010).....	66
FIGURA 5.16 CÉLULAS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO	67
FIGURA 6.1 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO MODELO 1	70
FIGURA 6.2 COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 1	70
FIGURA 6.3 DIQUES EXISTENTES NAS MARGENS DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU	72
FIGURA 6.4 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO MODELO COM RIO PIRAQUÊ-CABUÇU REBAIXADO	73
FIGURA 6.5 COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 2	74
FIGURA 6.6 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO MODELO 3	75
FIGURA 6.7 COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 3	76
FIGURA 6.8 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO MODELO 4	77
FIGURA 6.9 COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 4	78
FIGURA 6.10 VARIAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA MÁXIMO APÓS A INTRODUÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO	79
FIGURA 6.11 LIGAÇÕES AJUSTADAS PARA O MODELO 5	80
FIGURA 6.12 MANCHA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO MODELO 5	81
FIGURA 6.13 COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 5	82
FIGURA 6.14 EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE PROPORÇÃO CORRETA (PC)	84
FIGURA 6.15 EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE SUCESSO CRÍTICO (ISC).....	85
FIGURA 6.16 ANÁLISE DA MANCHA DE INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA.....	86
FIGURA 6.17 EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE PROBABILIDADE DE DETECÇÃO (POD).....	86
FIGURA 6.18 EVOLUÇÃO DA TAXA DE ALARME FALSO (TAF).....	87
FIGURA 6.19 EVOLUÇÃO DA TAXA DE TENDÊNCIA (BIAS).....	88
FIGURA 6.20 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS 1, 2, 3, 4 E 5.....	89

FIGURA 6.21 MANCHA DE INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA PARA OS MODELOS 4 E 5	90
FIGURA 6.22 HIDROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	91
FIGURA 6.23 CHUVA DE PROJETO – TRS 10, 25 E 50	93
FIGURA 6.24 MANCHA DE INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA PARA TR10, TR25 E TR50	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 APLICAÇÕES ENCONTRADAS NA LITERATURA DE MODELOS DE INUNDAÇÃO TIPO RASTER (PAZ, 2010)	20
TABELA 3.1 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL (RIO-ÁGUAS, 2019).....	26
TABELA 3.2 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL (DNIT, 2017)	27
TABELA 3.3 TABELA DE CONTINGÊNCIA. (ADAPTADO DE PAZ, 2010)	34
TABELA 3.4 ÍNDICES DE DESEMPENHO (PAZ, 2010).....	35
TABELA 4.1 PRINCIPAIS SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU (RIO DE JANEIRO - PDMAP, 2012)	38
TABELA 4.2 PORCENTAGEM DE USO DO SOLO NA BACIA (RIO DE JANEIRO, 2016).....	41
TABELA 4.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NOS BAIROS LOCALIZADOS TOTAL OU PARCIALMENTE NA BACIA (RIO DE JANEIRO – PDMAP, 2012).....	43
TABELA 4.4 ÁREAS COM RESTRIÇÃO DE URBANIZAÇÃO EM RELAÇÃO A COTA (RIO DE JANEIRO – PDMAP, 2012).....	43
TABELA 4.5 DADOS DO POSTO PLUVIOMÉTRICO 2243089 (HIDROWEB/ANA, 2022)	45
TABELA 4.6 INTENSIDADES DE PRECIPITAÇÃO (RIO ÁGUAS, 2019).....	49
TABELA 5.1 COEFICIENTES DE MANNING PARA OS DIFERENTES USOS DE SOLO.....	50
TABELA 5.2 COEFICIENTES DE ESCOAMENTO PARA OS DIFERENTES USOS DE SOLO	51
TABELA 5.3 TABELA DE ATRIBUTOS DAS CÉLULAS 1633, 1634, 1635, 1717, 1718, 1719, 1809, 1810 E 1911	55
TABELA 6.1 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 1.....	70
TABELA 6.2 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 2.....	74
TABELA 6.3 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 3.....	76
TABELA 6.4 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 4.....	78
TABELA 6.5 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 5.....	82
TABELA 6.6 RESULTADOS DA COMPARAÇÃO PIXEL A PIXEL DO MODELO 5.....	82
TABELA 6.6 PRECIPITAÇÃO DE PROJETO PARA 10, 25 E 50 ANOS DE RECORRÊNCIA.....	91
TABELA 6.7 ANÁLISE DE INUNDAÇÕES PARA CHUVAS DE TR10, TR25 E TR50	93
TABELA 6.8 INUNDAÇÃO NO JARDIM MARAVILHA PARA CHUVAS DE TR10, TR25 E TR50	94

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo possui caráter introdutório e apresenta o contexto no qual está inserido o trabalho de conclusão de curso denominado “Mapeamento de Inundações com Uso de Modelagem Quasi-2d-Raster: Estudo de Caso da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, RJ”, além da motivação para o desenvolvimento do estudo, objetivo principal, objetivos específicos e metodologia geral da pesquisa.

1.1 CONTEXTO

O desenvolvimento das sociedades urbanas se deu a partir da disponibilidade hídrica das regiões ocupadas, dados os múltiplos usos da água além do próprio consumo da população (BAPTISTA e CARDOSO, 2013). Com o crescimento exponencial da população, os territórios suscetíveis a inundações passaram a ser ocupados, muitas vezes de forma desordenada, pela parcela da população que não possuía condições socioeconômicas de se estabelecer em regiões mais desenvolvidas em termos de infraestrutura urbana (SOARES *et al.*, 2016). Com isso, os corpos hídricos, elementos importantes para a constituição das comunidades, passaram a sofrer alterações de forma a atender as demandas da população. A resposta fluvial veio através de inundações, deslizamentos, redução da qualidade das águas (REZENDE, 2018).

Em uma escala global, espera-se que o tempo de recorrência de eventos de inundação no século 21 seja o maior da história (HIRABAYASHI *et al.*, 2013). NKWUNONWO *et al.* (2020) enumera alguns fatores que potencializam os danos causados por este tipo de evento em países periféricos: eventos de inundação urbana pouco compreendidos e pouco estudados resultando em uma gestão de risco deficitária; impermeabilização excessiva do solo de grandes centros urbanos gerando um maior escoamento superficial; construções nas planícies de inundação e outros locais inadequados devido ao crescimento populacional acelerado; descarte inadequado de resíduos não-degradáveis e outras atividades e falta de dados medidos de eventos anteriores. Nota-se que os fatores citados parecem descrever muitos centros urbanos do território brasileiro.

De acordo com o Atlas Digital de Desastres no Brasil (CEPED/UFSC, 2022), entre os anos de 1991 e 2021, foram registrados 5.650 episódios de inundações severas no Brasil, sendo a maioria (34%) na região Sudeste onde foram afetados mais de 6,5 milhões de habitantes, deixando 268 mortos. Além dos danos humanos, os danos materiais causados por inundações

na região Sudeste também atingem valores expressivos: cerca de 170 mil habitações danificadas e 12,3 mil destruídas. A Figura 1.1 apresenta uma fotografia aérea de um evento de inundação ocorrido em abril de 2019, que atingiu a região do Jardim Maravilha, localizada na zona oeste do Rio de Janeiro.



Figura 1.1 Evento de inundação no Jardim Maravilha, RJ (GLOBO, 2019)

Em função deste cenário, estudos voltados para soluções sustentáveis de manejo de águas pluviais em ambientes urbanos assumiram papel fundamental para o desenvolvimento do processo de urbanização na direção da formação de cidades resilientes.

Segundo PAZ (2010), o conhecimento do comportamento hidrológico permite que as relações existentes entre o regime de vazões e as características ecológicas influenciadas por tal regime sejam investigadas. O autor também destaca a importância da possibilidade de previsão do comportamento futuro do sistema frente a possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas e cenários de variabilidade climática para o processo de tomada de decisão, ajuste de projetos de intervenção antrópica e elaboração de medidas de mitigação. Tal previsão pode ser desenvolvida a partir da criação de um modelo, calibrado a partir de dados medidos em eventos anteriores (CONNELL *et al.*, 2001).

De acordo com ROSMAN (2001), o processo de modelagem parte do pleno entendimento do fenômeno de interesse, suas causas, efeitos, interações e relevância dos agentes intervenientes por parte do modelador. Feito isso, é possível seguir para o modelo

matemático, definido por SOUSA (2017) como a descrição de um sistema real por equações matemáticas teóricas e/ou empíricas, geralmente com o intuito de fazer previsões de eventos que possam ocorrer nesse sistema. Este tipo de modelo é utilizado desde o século XIX, com o intuito de representar o escoamento d'água ao longo de corpos hídricos (CUNGE *et al.*, 1981).

“O máximo que se pode esperar de qualquer modelo é que ele pode fornecer uma aproximação útil da realidade: todos os modelos estão errados; alguns modelos são úteis.” (Box *et al.*, 2005).

As incertezas das próprias condições de contorno e dados obtidos em campo, além da extrapolação de dados e a necessidade de soluções numéricas são alguns dos fatores que distanciam um dado modelo do fenômeno real a ser representado. Portanto, mais uma vez, nota-se que o próprio modelador deve possuir um entendimento conceitual do objeto de estudo, de forma a avaliar a viabilidade da aplicação de um modelo tendo como premissas as incertezas envolvidas.

Um modelo unidimensional (1D) para análise de um determinado corpo hídrico é suficiente quando o objetivo do estudo ou projeto é representar o escoamento dentro de uma calha de projeto (SOUSA, 2010). Porém, quando se deseja realizar uma análise voltada para a drenagem urbana, os corpos hídricos das bacias hidrográficas ocupadas pela população integram o próprio meio urbano, portanto, a área de contribuição, que não é representada no modelo unidimensional, deve ser levada em consideração (BATES e DE ROO, 2000).

Para representar as trocas de água entre canal e planície de inundação, além do próprio escoamento na planície, modelos hidrodinâmicos tri (3D) ou bidimensionais (2D) podem ser utilizados, porém, com um elevado custo computacional e problemas numéricos decorrentes da complexidade da topografia, profundidades muito pequenas e processo de secagem e inundação (BEFFA e CONNELL, 2001, *apud* PAZ, 2010). No entanto, no que diz respeito ao elevado custo computacional envolvido no processo de modelagem bidimensional, o aumento exponencial da capacidade de processamento de computadores e a quantidade de dados topográficos disponibilizados mais precisos impulsionou este tipo de modelo, voltada para análise de planícies de inundação e fluxos terrestres (BARNARD *et al.*, 2007).

SOUSA (2017) destaca que os modelos 2D nem sempre são acompanhados de uma real demanda de base física que justifique sua utilização, de modo que muitas vezes o problema que se quer resolver não precisa de uma aproximação bidimensional ou não configura de fato uma superfície 2D de solução.

Nesse contexto, surgem os Modelos Quasi-2D, que têm como objetivo representar o escoamento de uma onda de cheia ao longo de um rio, suas planícies de inundação e/ou ambientes urbanos através de uma rede de ligações unidimensionais (SOUSA, 2017). Segundo CUNGE *et al.* (1980), quando se trata da modelagem de uma planície de inundação em zona costeira, o escoamento da água se dá de forma estritamente bidimensional, porém, quando as áreas inundadas são cruzadas por diques, ruas e outros dispositivos que configuram uma área urbana, a planície de inundação deve ser representada por uma série de células com áreas definidas pelos limites naturais do terreno, interconectadas através de ligações unidimensionais, configurando um modelo Quasi bidimensional.

De acordo com SOUSA *et al.* (2018), a maior acessibilidade de dados topográficos como Modelos Digitais de Elevação (MDE) proporcionou a difusão dos modelos hidrodinâmicos "Raster".

“O formato raster consiste em uma grade de células com representação matricial composta por i colunas e j linhas ($M_{i,j}$). Cada célula, também chamada de pixel, armazena ou representa um valor referente ao atributo e , quando georreferenciada, possui também um par de coordenadas geográficas associado.” (SOUSA *et al.*, 2018)

A fusão do conceito de células de escoamento com o formato raster resulta em um outro esquema de modelagem, onde a planície de inundação é discretizada em uma grade de células e cada pixel assume a função de célula de escoamento, estabelecendo ligações unidimensionais com seus vizinhos de forma a representar o escoamento superficial em função da topografia e uso do solo (SOUSA, 2017; HUNTER, 2005).

Sendo assim, o presente estudo visa avaliar a aplicabilidade da modelagem Quasi-2D, mais especificamente, do Modelo de Escoamento de Células – MODCEL (MIGUEZ, 2001; MIGUEZ *et al.*, 2017), acoplada a um modelo raster para representar o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica parcialmente urbanizada no Estado do Rio de Janeiro, destacando seus potenciais e limitações.

A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, situada na zona oeste do Rio de Janeiro, foi utilizada como estudo de caso. A partir dos resultados de simulações hidrológico-hidrodinâmicas com diferentes configurações, destacam-se os potenciais, limitações, recomendações e condições necessárias para a aplicação do método.

1.2 MOTIVAÇÃO

MIGUEZ (2001), SOUSA (2018) e ROSMAN (2001) são alguns dos autores que vêm desenvolvendo estudos e metodologias de modelagem hidrodinâmica e, de certa forma, motivam o desenvolvimento deste estudo. Apesar dos modelos hidrodinâmicos serem uma excelente ferramenta para mapeamento de áreas de risco, a sua utilização é complexa em muitos casos. Por exemplo, no modelo de células é necessário realizar uma interpretação do território sob o ponto de vista hidrodinâmico, o que pode levar muito tempo quando se trata de uma bacia com área relativamente elevada. A abordagem do tipo raster facilita o processo de construção do modelo, permitindo, mesmo que de maneira mais geral obter as principais áreas em risco. É esperado que o modelo inicialmente criado precise de ajustes para aproximar os resultados da realidade, entretanto, essas alterações podem ser realizadas a partir de resultados parciais representativos da simulação, formando um processo cíclico.

1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade da modelagem do tipo raster acoplada ao Modelo de Células (MODCEL) como ferramenta para análise do escoamento superficial em ambiente urbano frente a eventos hidrológicos de cheia.

De forma complementar, foram definidos os seguintes objetivos específicos, que consistem em metas imprescindíveis para que o objetivo geral deste estudo seja atingido:

- Modelagem raster da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu com base nos dados topográficos e de uso e ocupação do solo disponíveis, abordando o peso do custo computacional associado a este tipo de metodologia no que diz respeito à definição da resolução horizontal da malha de células;
- Calibração do modelo realizada de forma a subsidiar a compreensão dos impactos de cada coeficiente nos resultados calculados, bem como as limitações e potenciais decorrentes da própria metodologia;
- Simulação de eventos hidrológicos de 10, 25 e 50 anos de tempo de recorrência com o objetivo de identificar as áreas com maior suscetibilidade a inundações na bacia.

1.4 METODOLOGIA GERAL

A metodologia utilizada para que o presente trabalho fosse desenvolvido seguiu o seguinte passo a passo:

1. Revisão bibliográfica realizada de forma a embasar teoricamente o estudo;
2. Delimitação e caracterização da área de estudo;
3. Levantamento de informações fisiográficas da região;
4. Desenvolvimento do modelo raster-MODCEL e definição da malha ótima;
5. Calibração do modelo;
6. Simulação para diferentes tempos de recorrência;
7. Apresentação e discussão dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica dos conceitos principais que envolvem o presente estudo, de forma a fundamentar teoricamente a elaboração dele.

2.1 EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO

O livro escrito por LIVI (2004) discorre sobre a equação da continuidade nas suas formas diferencial e integral e, será parcialmente reproduzida no presente subcapítulo na abordagem da equação da continuidade e das equações de Navier-Stokes.

2.1.1 Equação da Continuidade

Em um dado *volume de controle* (V.C.) envolvido por uma *superfície de controle* (S.C.), a variação da massa do sistema é dada pela Eq. 2.1:

$$\frac{dM_{sistema}}{dt} = \iint_{S.C.} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho dV \quad (2.1)$$

onde:

$M_{sistema}$ = massa do sistema,

dA = elemento de área da S.C.,

dV = elemento de volume do V.C.,

\vec{V} = vetor velocidade de escoamento,

\vec{n} = vetor unitário normal a dA ,

ρ = massa específica,

t = tempo.

Dado que um sistema consiste em uma quantidade definida e identificada de matéria, o princípio de conservação da massa estipula que a massa de um sistema permanece constante, desprezando os efeitos nucleares e relativísticos, portanto, é possível aplicar a Eq. 2.2 de forma a transformar a Eq. 2.1 na Eq. 2.3.

$$\frac{dM_{sistema}}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

$$\iint_{S.C.} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho dV = 0 \quad (2.3)$$

A Eq. 2.3 é chamada de equação da continuidade na forma integral e pode ser entendida como o somatório do fluxo líquido de massa que atravessa a $S.C.$ com a taxa de variação da massa dentro do $V.C.$

O teorema da divergência de Gauss (Eq. 2.4) permite transformar uma integral de superfície em uma integral de volume:

$$\iint_S \vec{G} \cdot \vec{n} dA + \iiint_V \vec{G} \cdot \vec{\nabla} \rho dV \quad (2.4)$$

onde:

S é a superfície que envolve o volume V .

Aplicando o teorema da divergência na integral de superfície da Eq. 2.3, obtém-se a Eq. 2.5, podendo ser escrita como a Eq. 2.6.

$$\iiint_{V.C.} \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} dV + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho dV = 0 \quad (2.5)$$

$$\iiint_{V.C.} \left(\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.6)$$

Dado que o volume de controle é arbitrário, o integrando da Eq. 2.6 deve ser nulo, sendo assim, chega-se à Eq. 2.7, que é a equação da continuidade na forma diferencial.

$$\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

2.1.2 Equações de Navier-Stokes

A Eq. 2.8 corresponde a segunda lei de Newton para o movimento:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{P}_{sist}}{dt} \quad (2.8)$$

onde:

$\sum \vec{F}$ = somatório de forças atuantes sobre o sistema,

\vec{P}_{sist} = momento linear do sistema, dado por $d\vec{P}_{sist} = \Delta m \vec{V}$, sendo Δm o sistema microscópico de massa, considerado como um elemento fluido (partícula) de massa constante que se move no campo de escoamento.

A taxa de variação da velocidade fornece a aceleração das partículas fluidas no campo de escoamento (a) e, considerando um sistema referencial de coordenadas retangulares, é dada pela Eq. 2.9.

$$\vec{a} = \frac{D\vec{V}}{Dt} = V_x \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Considerando que o sistema microscópico é um elemento fluido cúbico, de massa Δm e volume $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$, é possível reescrever a Eq. 2.8 na forma da Eq. 2.10.

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{P}_{sist}}{dt} = \Delta m \frac{D\vec{V}}{Dt} = \Delta m \left(V_x \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + V_y \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + V_z \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right) \quad (2.10)$$

A Eq. 2.10 pode ser decomposta em três equações escalares, dadas pelas Eqs. 2.11.

$$\sum F_x = \Delta m \frac{DV_x}{Dt} = \Delta m \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial t} \right) \quad (2.11a)$$

$$\sum F_y = \Delta m \frac{DV_y}{Dt} = \Delta m \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_y}{\partial t} \right) \quad (2.11b)$$

$$\sum F_z = \Delta m \frac{DV_z}{Dt} = \Delta m \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial t} \right) \quad (2.11c)$$

Considerando que as forças que atuam sobre um elemento fluido correspondem às forças devidas às tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) (dispostas na Figura 2.1) e peso devido à aceleração gravitacional (g), a força resultante na direção x que atua sobre o elemento fluido é dada pela Eq. 2.12:

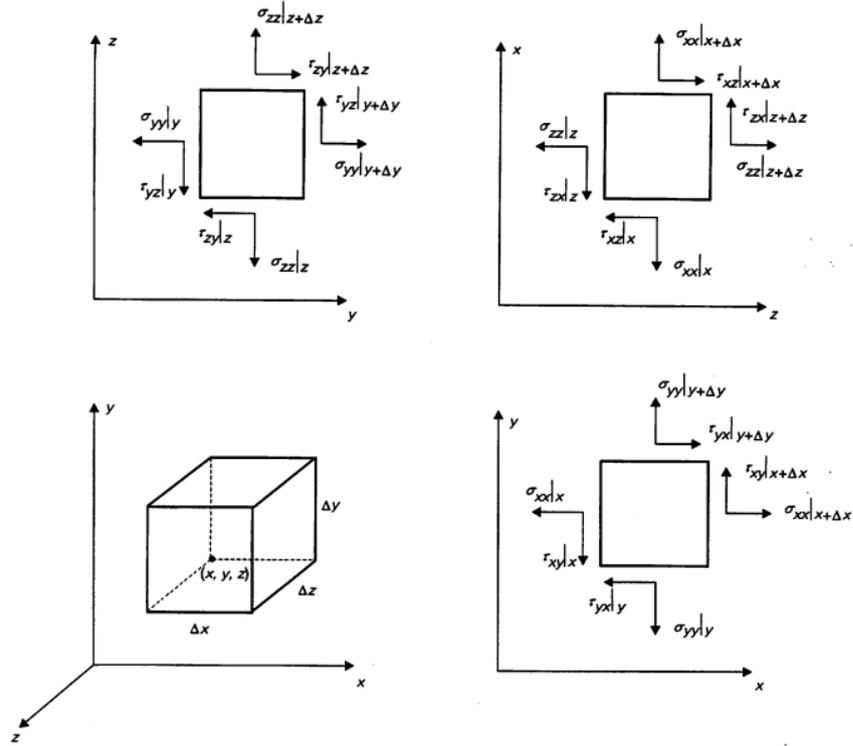


Figura 2.1 Esquema das tensões normais e cisalhantes que atuam sobre elemento fluido (LIVI, 2004)

$$\sum F_x = (\sigma_{xx}|_{x+\Delta x} - \sigma_{xx}|_x)\Delta y\Delta z + (\tau_{yx}|_{y+\Delta y} - \tau_{yx}|_y)\Delta x\Delta z + (\tau_{zx}|_{z+\Delta z} - \tau_{zx}|_z)\Delta x\Delta y + \rho(\Delta x\Delta y\Delta z)g_x \quad (2.12)$$

onde ρ é a massa específica do fluido e g_x , a componente da aceleração gravitacional na direção x . Sendo $\Delta m = \rho\Delta x\Delta y\Delta z$, juntando as Eqs. 2.12 e 2.11a e fazendo o limite quando o volume do elemento tende a zero, obtém-se a Eq. 2.13a, que é a componente x da equação diferencial do movimento do fluido.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x = \rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial t} \right) \quad (2.13a)$$

Para determinar as componentes y e z , o procedimento é análogo, resultando nas Eqs. 2.13b e 2.13c.

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y = \rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_y}{\partial t} \right) \quad (2.13b)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \rho g_z = \rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial t} \right) \quad (2.13c)$$

Observa-se que no lado esquerdo das equações diferenciais do movimento do fluido estão dispostas as forças atuantes sobre o elemento fluido, enquanto no lado direito, os termos representam a taxa de variação do momento linear do elemento fluido.

Utilizando o operador derivada material, dado pela Eq. 14:

$$\frac{D}{Dt} = V_x \frac{\partial}{\partial x} + V_y \frac{\partial}{\partial y} + V_z \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.14)$$

é possível reescrever as equações do movimento de um fluido na seguinte forma:

$$\rho \frac{DV_x}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad (2.15a)$$

$$\rho \frac{DV_y}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \quad (2.15b)$$

$$\rho \frac{DV_z}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \rho g_z \quad (2.15c)$$

Para fluidos newtonianos, em escoamentos laminares, as tensões normais e cisalhantes podem ser escritas em termos dos gradientes de velocidade e propriedades do fluido. Porém, LIVI (2004) ressalta que para escoamento incompressível, laminar e com viscosidade constante, as Eqs. 2.15 podem ser reescritas na forma das Eqs. 2.16:

$$\rho \frac{DV_x}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.16a)$$

$$\rho \frac{DV_y}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.16b)$$

$$\rho \frac{DV_z}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.16c)$$

onde μ é a viscosidade do fluido e p é a pressão.

As Equações 2.16 são as componentes x, y e z da equação diferencial do movimento para o caso de escoamento incompressível, laminar e com viscosidade constante, chamada de equação de Navier-Stokes, podendo ser escrita também na sua forma vetorial (Eq. 2.17).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.17)$$

Por fim, novamente fazendo uso da Eq. 2.14 e considerando coordenadas retangulares, é possível escrever as equações de Navier-Stokes na forma das Eqs. 2.18.

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_x}{\partial t} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.18a)$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_y}{\partial t} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.18b)$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial t} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.18c)$$

As Eqs. 2.18 somadas a equação da continuidade (Eq. 2.7) formam um sistema de quatro equações diferenciais simultâneas que fornecem a distribuição de velocidade e pressão para um dado escoamento. Cabe ressaltar que devido à natureza não-linear das equações diferenciais de movimento de um fluido (a não linearidade aparece nos termos da derivada material), há soluções analíticas somente para alguns problemas simples.

2.1.3 Equações de Saint-Venant

O livro escrito por POPESCU (2004) aborda as equações de Saint-Venant de forma sucinta e, por isso, será parcialmente reproduzido nos parágrafos seguintes.

Para um canal dado como unidimensional (Figura 2.2), as equações de Saint-Venant podem ser escritas em sua forma conservativa (Eqs. 2.19), sendo as variáveis dependentes são vazão e profundidade do nível d'água, ou na sua forma não-conservativa (Eqs. 2.20), onde as variáveis dependentes são a velocidade e a profundidade do nível d'água.

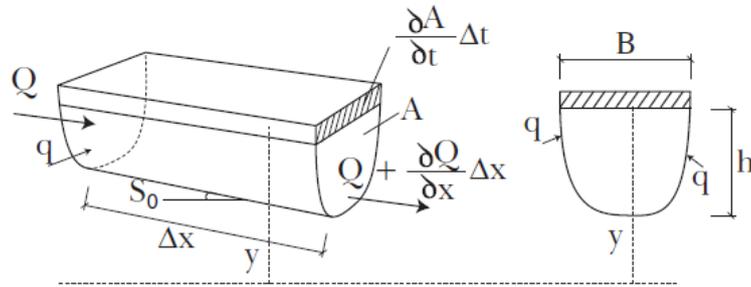


Figura 2.2 Volume de controle de um elemento fluido (POPESCU, 2014)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.19a)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(-\frac{Q^2}{A^2} + \frac{gA}{B} \right) \frac{\partial A}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = qu_q \quad (2.19b)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = q \quad (2.20a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - gS_0 + gAS_f = qu_q \quad (2.20b)$$

onde:

A = área da seção transversal,

Q = vazão no volume de controle,

q = fluxo lateral,

g = aceleração da gravidade,

h = profundidade da lâmina d'água,

S_0 = declividade do canal,

S_f = declividade da linha de energia devido à resistência,

u = velocidade de escoamento,

u_q = velocidade do fluxo lateral.

O sistema formado por qualquer um dos pares de equações, seja da forma conservativa (Eqs. 2.19) ou não (Eqs. 2.20), não possui solução analítica, porém, dependendo do problema a ser resolvido, algumas variáveis podem ser negligenciadas. POPESCU (2014) destaca que, dependendo de quantos termos são considerados na equação do momento (Eqs. 2.19b e 2.20b), existe uma terminologia adequada:

- Representação cinemática de onda: quando a equação de momento se reduz a $S_0=S_f$,
- Aproximação difusiva de onda: quanto os dois primeiros termos são negligenciados,
- Onda dinâmica completa: todos os termos são considerados

2.2 MODELAGEM DE CHEIAS

Para que sejam desenvolvidas políticas eficientes no que diz respeito à gestão de risco de desastres relacionados à recursos hídricos, é imprescindível que sejam compreendidas as relações entre precipitação, escoamento superficial, urbanização, mudanças climáticas e a própria inundação urbana de forma a viabilizar a previsão do comportamento do escoamento em um sistema frente a diversos eventos hidrológicos. Tal compreensão pode ser atingida através da análise de dados de eventos hidrológicos anteriores, porém, o próprio processo de medição possui limitações técnicas, espaciais, temporais e até mesmo financeiras quando se trata de localidades economicamente desfavorecidas. Os dados usualmente disponibilizados consistem em valores medidos apenas em alguns pontos da área de projeto. Portanto, faz-se necessária a utilização de um modelo capaz de extrapolar e interpolar os dados medidos de

forma a alcançar a representação de toda a área de interesse. Sendo assim, a modelagem de cheias urbanas representa uma ferramenta imprescindível aos estudos e projetos relacionados ao gerenciamento de corpos d'água naturais e suas interações com o meio urbano, dada a capacidade de prevenção de impactos causados por modificações no sistema (BEVEN, 2012; NKWUNONWO *et al.*, 2020; ROSMAN, 2001).

No que diz respeito à modelagem de escoamento em rios com planícies de inundação, diversas abordagens vêm sendo utilizadas e diversos materiais acadêmicos buscam apresentar análises comparativas de forma a identificar o modelo ideal para cada situação. De acordo com BATES e DE ROO (2000), até hoje, não se sabe qual processo deve ser necessariamente representado em um modelo de cheias em planícies de inundação para que os níveis d'água sejam corretamente previstos. Os autores ainda comentam que o melhor modelo é o mais simples que forneça as informações requeridas pelo usuário, ajustando razoavelmente os dados disponíveis.

2.2.1 Modelo Hidrodinâmico 1D

Modelos hidrodinâmicos 1D são modelos unidimensionais que utilizam as equações de Saint-Venant de maneira completa ou parcial. Dependendo da situação, os termos das equações de Saint-Venant podem ser ignorados em função de suas magnitudes (CUNGE *et al.*, 1980), dando origem aos modelos simplificados de: analogia à difusão, onde são desprezados os termos de inércia, e de onda cinemática, onde os termos de inércia e pressão são ignorados (SOUSA, 2017). Geralmente, este tipo de abordagem consiste na representação do rio através de seções transversais perpendiculares à direção do escoamento, que são facilmente desenhadas utilizando métodos tradicionais de levantamento de campo. A partir destes dados de entrada, é possível calcular a velocidade média em cada seção transversal, bem como a altura da lâmina d'água em qualquer seção. Entretanto, cabe ressaltar que é necessária uma metodologia para definir as localizações das seções transversais a serem modeladas e as áreas entre seções não são explicitamente representadas (BATES e DE ROO, 2000).

De forma geral, o uso de modelo unidimensional é possível e útil, principalmente, quando se deseja projetar e/ou analisar o escoamento em um determinado canal destinado à drenagem sob a ação de uma determinada vazão, dado que não são esperados extravasamentos (MIGUEZ *et al.*, 2017). A partir do momento em que o nível d'água ultrapassa a altura da calha principal do dispositivo analisado, o modelo unidimensional se torna insuficiente para representar o fenômeno do escoamento (CUNGE *et al.*, 1980).

2.2.2 Modelo Hidrodinâmico 2D

Os modelos hidrodinâmicos bidimensionais foram inicialmente desenvolvidos para contornar as limitações espaciais dos modelos unidimensionais no que diz respeito à representação das planícies de inundação, restringindo o uso dos modelos 1D somente aos casos em que não há vertimento lateral. Os modelos 2D fornecem uma maior e mais consistente representação hidráulica do corpo hídrico a partir de uma representação contínua da topografia. Porém, este tipo de abordagem apresenta duas desvantagens relativamente consideráveis: a primeira diz respeito ao aumento do custo computacional necessário e a segunda se refere à metodologia de obtenção dos dados de entrada do modelo, que não são facilmente obtidos com os tradicionais levantamentos de campo. Sendo assim, os modelos 2D são melhor utilizados quando em conjunto com um modelo digital do terreno do canal e sua planície de inundação, além de condições de contorno adequadas, permitindo o cálculo da velocidade média e profundidade em qualquer nó, em qualquer passo de tempo. O aumento da capacidade computacional e o processo de sofisticação das ferramentas de modelagem foram fatores que impulsionaram este tipo de abordagem nos últimos anos. Além disso, a grande quantidade de MDTs disponíveis acarretada pelo avanço tecnológico das metodologias de obtenção de dados topográficos justifica a crescente procura pela modelagem bidimensional. Entretanto, é importante considerar a possibilidade de utilização de abordagens mais simplistas em função do custo computacional atrelado à modelagem bidimensional (BATES e DE ROO,2000).

2.2.3 Modelo Hidrodinâmico *Quasi-2D*

De acordo com CUNGE *et al.* (1980), o processo de modelagem *Quasi-2D* consiste na representação da planície de inundação em uma série de células interligadas através de equações de escoamento unidimensional. Para uma melhor compreensão do funcionamento do escoamento entre as células, faz-se necessária a revisão das equações apresentadas por CUNGE *et al.* (1980) para fundamentar matematicamente a modelagem *Quasi-2D*. Dado que a equação da continuidade para uma célula i , ligada à célula k , entre os tempos t_1 e t_2 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta V_i = \sum_k \int_{t_1}^{t_2} Q_{i,k} dt \quad (2.21)$$

onde ΔV_i representa a variação de volume dentro da célula e $Q_{i,k}$ é fluxo entre as células i e k . Expressando o volume armazenado em função da altura da lâmina d'água, chega-se à Eq. 2.2:

$$\int_{y_1(t_1)}^{y_2(t_2)} A_i(y_i) = \sum_k \int_{t_1}^{t_2} Q_{i,k} dt \quad (2.22)$$

onde A_i e y_i representam a área superficial e a altura da lâmina d'água da célula i , respectivamente. Considerando que a variação de área é desprezível em relação à própria área total e que o intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1 \rightarrow 0$, é possível reescrever a Eq. 2.22 de forma diferencial (Eq. 2.23):

$$A_i(y_i) \frac{dy_i}{dt} = \sum_k Q_{i,k} \quad (2.23)$$

Considerando como lenta a variação de velocidades de escoamento em planícies de inundação, desprezam-se os termos relativos à inércia. Portanto, o fluxo entre células é determinado em função da diferença de altura das lâminas d'água.

SOUSA (2017) destaca que um Modelo *Quasi-2D* busca reproduzir o escoamento de uma onda de cheia ao longo de um rio, suas planícies de inundação e/ou por ambientes urbanos, dado que, apesar das leis de escoamento definidas entre as células serem unidimensionais, o sistema como um todo é capaz de simular um escoamento no espaço bidimensional. É importante ressaltar que cada célula possui características representativas da área modelada e a delimitação delas não é arbitrária, mas baseia-se nas particularidades do local a ser representado.

Dentre os modelos hidrodinâmicos *Quasi-2D* existentes, o presente trabalho tem como objetivo utilizar o Modelo de Células de Escoamento – MODCEL (MIGUEZ, 2001), que funciona da seguinte forma:

“Esse modelo trabalha com o conceito de células de escoamento, que pressupõe que toda a superfície da bacia, incluindo a própria rede de drenagem, pode ser dividida em compartimentos articulados. A integração destes compartimentos, então, é responsável pela representação física da bacia e dos elementos da paisagem urbana que se articulam com a rede de drenagem, para a definição de uma rede de escoamentos, que, por sua vez, simula a interação entre as células através de diferentes leis hidráulicas, que podem representar desde as equações completas de Saint-Venant, até simples equações de vertedouros e orifícios clássicos.” (REZENDE *et al.*, 2013)

De acordo com MIGUEZ (2001), o modelo de células traz consigo uma série de hipóteses, que são fielmente descritas a seguir:

- A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados de células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididas em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de ligações unidimensionais.
- O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios, equações de escoamento através de bueiros, entre outras várias, sendo, neste estudo, considerados os efeitos de inércia no escoamento que ocorre nos cursos d'água principais.
- Em uma célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal e a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma.
- Volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água Z_i no centro da mesma, ou seja, $V_i = V(Z_i)$.
- A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, e apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja, $V_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$.

2.2.4 Modelo *Quasi-2D-Raster*

Conforme citado no item 1.1, a crescente disponibilidade de dados topográficos obtidos através de sensoriamento remoto aliada ao aumento da capacidade computacional são fatores que possibilitam uma maior discretização do sistema modelado em relação à metodologia de modelagem de células. Este tipo de abordagem, denominada modelagem tipo raster, quando aplicado à modelagem de rios e planícies de inundação, tem como objetivo discretizar todo o sistema em uma grade de elementos com o objetivo de simular a propagação de eventos de inundação com a menor representatividade hidráulica (PAZ, 2010; BATES e DE ROO, 2000).

Um arquivo Raster é descrito por SOUSA (2017) como uma matriz que definem células como pixels, apresentando um valor referente a um determinado atributo. Em modelos tipo Raster, cada pixel funciona como uma célula de um modelo *Quasi-2D*, com nível d'água horizontal nos elementos e troca de água entre o elemento e seus “vizinhos” em função da diferença de nível d'água, incorporando ainda outras fontes e sumidouros (PAZ, 2010).

O atributo considerado na célula/pixel faz referência à elevação do terreno ou edificação sobrepostos, podendo representar um valor homogêneo ou médio das alturas envolvidas pelos limites da célula/pixel (SOUSA *et al.*, 2017).

A abordagem mais comum em modelos do tipo Raster tem sido estimar o fluxo de água entre as células/pixels pela equação de Manning (Eq. 2.29), onde as forças de pressão e de inércia da equação dinâmica de Saint-Venant são desprezadas (PAZ, 2010).

$$Q = \frac{ARh^{2/3}\sqrt{I}}{\eta} \quad (2.29)$$

Onde:

Q = vazão,

A = área molhada da seção transversal

Rh = raio hidráulico

I = declividade da linha de energia

η = coeficiente de Manning

Embora apresente similaridades com a modelagem de células, PAZ (2010) explicita uma série de vantagens deste tipo de abordagem em função da metodologia de discretização da planície:

- Automatização do processo de discretização dos elementos da planície;
- A variabilidade espacial das características físicas da planície passa a ser mais detalhada;
- O modelo de células simula os efeitos de armazenamento e amortecimento da planície, mas a representação da propagação da inundação sobre a planície propriamente dita é prejudicada em função da menor quantidade de células, com maiores áreas de armazenamento. A discretização mais refinada do modelo raster permite que a propagação da inundação seja simulada.

Apesar da representação grosseira dos processos hidráulicos, este tipo de modelagem tem apresentado bons resultados quando comparados a abordagens mais complexas. Os autores afirmam que a eficiência computacional deste tipo de abordagem configura uma vantagem, uma vez que podem ser aplicados à modelos com alta resolução espacial com um custo computacional inferior a abordagens mais complexas (HORRIT e BATES, 2001a).

Em relação a resolução espacial das células de escoamento que compõe a grade do modelo, HUNTER *et al.* (2007) define que tamanhos de grade entre 10 e 100 metros possuem

maior representatividade, porém, o autor também destaca que uma consequência inevitável do aumento da precisão espacial é o aumento concomitante dos custos computacionais. De acordo com PAZ (2010), tipicamente são utilizadas grades numéricas com elementos de dezenas de metros, levando em consideração a disponibilidade de modelos digitais de elevação de alta resolução obtidos através de sistemas imageadores a laser aerotransportados (LIDAR) ou de sistemas de radar interferométrico de abertura sintética (IFSAR). Segundo HORRIT e BATES (2001a), modelos raster com alta resolução espacial são vantajosos quando processos de pequena escala possuem um efeito significativo nos resultados da simulação, como por exemplo, quando a extensão da mancha de inundação é controlada por pequenas singularidades topográficas, como diques, canais e valas. Entretanto, SOUSA (2017) destaca que o detalhamento do grid não garante a representatividade dos caminhos de escoamento durante um evento de inundação em um cenário urbano.

O modelo de inundação do tipo raster é comumente aplicado na modelagem de sistemas formados pelo canal principal de escoamento e pela planície de inundação. Portanto, é necessária uma maior atenção aos elementos que englobam o traçado do canal principal da bacia, visto que, caso a resolução horizontal adotada seja maior que a largura do corpo hídrico, a planície de inundação tem sua área reduzida, comprometendo o funcionamento do modelo no que diz respeito à simulação da propagação da onda de cheias (BATES e DE ROO, 2000; PAZ, 2010).

Quando o objetivo da modelagem é simular eventos de inundação fluvial, a representação do canal é fundamental para uma boa previsão da inundação na planície (HUNTER *et al.*, 2007). Para evitar os problemas relacionados à representação do canal e da planície em uma mesma grade, é comum restringir o modelo raster à simulação do escoamento na planície de inundação, representando o canal principal através de um módulo específico acoplado à planície. É comum a utilização de modelos unidimensionais para o escoamento ao longo da calha principal acoplados a modelos 2D para as planícies de inundação, dada a versatilidade desta combinação. Uma outra abordagem consiste na representação dos rios através de modelos 1D acoplados a planícies de inundação representadas por modelos do tipo raster, sem ocupar elementos da grade de células. Esta metodologia permite a representação do escoamento do rio através de seções variáveis e previamente determinadas, não sendo necessária uma simplificação para que a troca de vazões ocorra de forma limitada pela dimensão dos pixels. Já as ligações canal-planície são estabelecidas por equações hidráulicas simples, como Manning e de vertedor, e podem ocorrer através de qualquer célula do modelo conectada

ao canal, diferente do modelo Quasi-2D comumente utilizados, que apresenta ligações específicas onde essas trocas ocorrem, vide Figura 2.3. Cabe ressaltar que esta metodologia despreza alguns efeitos relacionados a advecção e quantidade de movimento, porém, para rios de largura pequena em relação às dimensões das células da planície, esta simplificação é aceitável (PAZ, 2010; HORRIT e BATES, 2001a; HORRIT e BATES, 2001b).

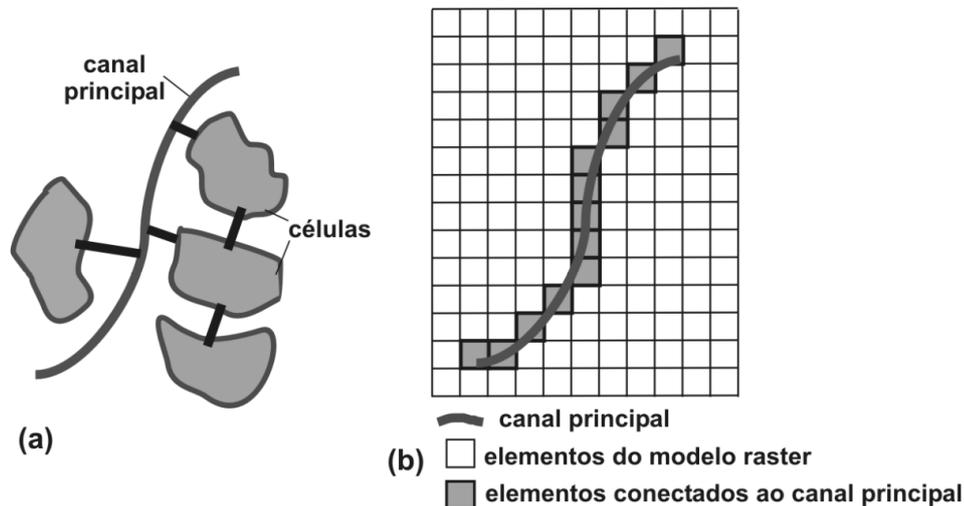


Figura 2.3 Representação das ligações canal-planície em um modelo de células *Quasi*-2D (a) e em um modelo raster acoplado a um modelo 1D (b) (PAZ, 2010)

A modelagem raster não costuma ser aplicada a grandes bacias, tanto pela falta de dados topográficos ou devido ao elevado custo computacional associado. Pelo mesmo motivo, são amplamente utilizados para simular eventos isolados com duração de algumas horas ou alguns dias, no máximo (PAZ, 2010; SOUSA, 2017). A Tabela 2.1 apresenta algumas das aplicações de modelos de inundação de planícies encontradas na literatura.

Tabela 2.1 Aplicações encontradas na literatura de modelos de inundação tipo raster (PAZ, 2010)

Referência	Método e resolução numérica	Escala do domínio, discretização espacial e dimensão da matriz de elementos	Duração do evento simulado e passo de tempo do modelo de planície	MDE - fonte, resolução espacial (RE) e precisão vertical (PV)	Dados utilizados para ajuste do modelo
HORRIT E BATES (2001a)	Planície: raster cinemático explícito; Canal: 1D difusivo implícito	Trecho = 4km; $\Delta x = 50\text{m}$; matriz = 76 x 48	Evento < 5 dias; $\Delta t = 0,5$ a 1,0 s	RE = 50 m; PV = 25 cm; Fonte: n.i.	Imagem ERS-1 SAR com resolução espacial 12,5 m

HORRIT E BATES (2001a)	Planície + canal: Hidrodinâmico 2D implícitos	Trecho = 4 km; $\Delta x = 50$ a 100m; matriz = n.i.	Evento < 5 dias; $\Delta t = ds$	RE = 50 m; PV = 25 cm; Fonte: n.i.	Imagem ERS-1 SAR com resolução espacial 12,5 m
HORRIT E BATES (2001b)	Planície: raster cinemático explícito; Canal: 1D cinemático implícito	Trecho = 60 km; $\Delta x = 50$ m; matriz = n.i.	Evento < 5 dias; $\Delta t = n.i.$	RE = 10 m; PV = 10 cm; Fonte: LIDAR	Imagem Radarsat (resolução espacial de 12,5 m) e hidrogramas observados
BATES ET AL., 2006	Planície: raster cinemático explícito; Canal: 1D cinemático implícito	Trecho = 16 km; $\Delta x = 18$ m; matriz = 333 x 683	Evento = 23 dias; $\Delta t = 5$ s	RE = 1 m; PV = n.i.; Fonte: LIDAR	4 imagens ASAR, 1,2 m de resolução espacial
BATES ET AL., 2005	Planície e rio: raster cinemático explícito	Trecho = 12,5 x 9 km; $\Delta x = 50$ m; matriz = 45000 elementos	Evento = 62 h; $\Delta t = 1$ s	RE = 5 m; PV = 1 m; Fonte: IFSAR	Área inundada máxima para evento histórico
BATES ET AL., 2005	Planície e rio: raster cinemático explícito	Trecho = 2,3 x 6,3 km; $\Delta x = 10$ m; matriz = 145.000 elementos	Evento = 12,5 h; $\Delta t = 2,5$ s	RE = 2 m; PV = 0,15 m; Fonte: LIDAR	Área inundada máxima para evento histórico
BATES ET AL., 2005	Planície e rio: raster cinemático explícito	Trecho = 40,25 x 42 km; $\Delta x = 250$ m; matriz = 27000 elementos	Evento = 10 h; $\Delta t = 1$ s	RE = 2 m; PV = 0,15 m; Fonte: LIDAR	Área inundada máxima para evento histórico
BATES ET AL., 2005	Planície e rio: raster cinemático explícito	Trecho = 140 x 60 km; $\Delta x = 250$ m matriz = 134.000 elementos	Evento = 10 h; $\Delta t = 0,1$ s	RE = 5 m; PV = 0,5 m; Fonte: IFSAR	Não ajustado
BATES E DE ROO, 2000	Planície e rio: raster cinemático explícito	Trecho = 35 km; $\Delta x = 25$ a 100 m; matriz = 108.000 elementos	Evento = 20 dias; $\Delta t = 2$ a 5 s	RE = 5 m; PV = 0,06 m Fonte: Stereo aerofot. + dados campo	Imagem ERS-1 SAR e foto aérea
BRADBROOK ET AL., 2004	Planície e rio: raster difusivo explícito	Trecho = 4 km; $\Delta x = 10$ a 100 m; matriz = n.i.	Evento < 16 h; $\Delta t = 0,18$ a 1,8 s	RE = 25 m; PV = 0,25 m; Fonte: n.i.	Imagem ERS-1 SAR
HAILE E RIENTJES, 2005	Planície e rio: Hidrodinâmico 2D implícito	Trecho = n.i. $\Delta x = 2,5$ a 15 m; matriz = n.i.	Evento = n.i.; $\Delta t = n.i.$	RE = 1,5m; PV = n.i. Fonte: LIDAR	Não ajustado
TAYEFI ET AL., 2007	Planície: raster difusivo explícito; Rio: hidrodinâmico 1D implícito	Trecho = 6 km; $\Delta x = 8$ m; matriz = n.i.	Evento = 1 dia; $\Delta t = n.i.$	RE = n.i. PV = n.i. Fonte: n.i.	Mapa inundação segundo observação em campo

WILSON ET AL., 2007	Planície: raster cinemático explícito; Rio: 1D cinemático implícito	Trecho = 260 km; $\Delta x = 270$ m; matriz = 900 x 460	Evento = 22 meses; $\Delta t = 20$ s	RE = 90 m; PV = n.i. Fonte: SRTM	Imagem JERS-1 (resolução espacial de 18 m) e dados observados de nível d'água
---------------------	--	---	---	--	---

2.2.4.1 MODCEL-Raster

De acordo com SOUSA *et al.* (2018), o MODCEL-Raster é uma adaptação do Modelo de Células e Escoamento para uma grade Raster. A estrutura do MODCEL, formada pelas células de escoamento interligadas através de ligações hidráulicas previamente determinadas, é adaptada para a configuração da topografia do terreno apresentada no formato de um arquivo raster, havendo a possibilidade de redefinição (ou não) da sua resolução horizontal (SOUSA *et al.*, 2017). Sendo assim, cada elemento da grade é representado no modelo como uma célula de escoamento, ligada às células “vizinhas” por equações unidimensionais, conforme representado esquematicamente na Figura 2.4.

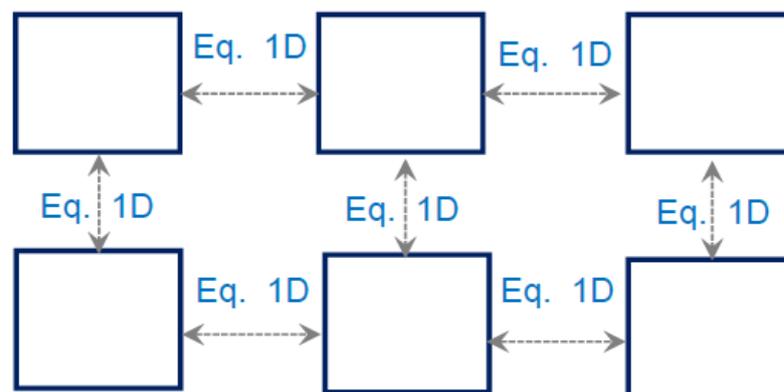


Figura 2.4 Representação esquemática das ligações entre as células/pixels do MODCEL/Raster (SOUSA *et al.*, 2017)

SOUSA *et al.* (2022) realizou um estudo comparativo entre a abordagem tradicional do MODCEL e a adaptação do mesmo para um modelo raster para simular um evento de alagamento em ambiente urbano de cerca de 0,4 km². Os resultados obtidos no estudo indicam que a abordagem raster é mais precisa no que diz respeito à representação espacial da mancha

de inundação, apresentando resultados similares de velocidade de escoamento e lâminas máximas de inundação. Em relação ao tempo gasto para concluir as simulações, o custo computacional do modelo raster foi cerca de 1300 vezes maior, entretanto, os autores ressaltam que a construção do modelo tradicional demandou mais tempo. De forma geral, ambas as metodologias apresentaram resultados equivalentes.

2.2.5 Modelo Hidrodinâmico 3D

Modelos hidrodinâmicos tridimensionais empregam as equações completas de Navier-Stokes discretizadas nas três dimensões, em alguns casos acoplando modelos de turbulência, e é mais comumente aplicada onde a componente vertical do escoamento assume certa importância (PAZ, 2010). Para a modelagem de planícies de inundação, a modelagem 3D não é necessária, visto que modelos com menos dimensões e, conseqüentemente, menor custo computacional, atingem resultados satisfatórios (HUNTER *et al*, 2017).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia utilizada para que os objetivos do presente estudo fossem alcançados. Como visto anteriormente, existem diversas abordagens para modelagem de cheias urbanas, cada uma com seus pontos positivos, negativos e simplificações envolvidas. A modelagem do tipo raster, por mais que tenha apresentado resultados satisfatórios nos estudos analisados, tem sido pouco explorada no que diz respeito à modelagem de grandes bacias. Sendo assim, a metodologia proposta pelo presente trabalho consiste na modelagem de uma bacia hidrográfica através de um modelo MODCEL-Raster, e pode ser descrita em uma série de 6 passos, listados a seguir:

1. Modelo Conceitual;
2. Caracterização Física;
3. Criação da malha de células no MODCEL;
4. Análise da representação simplificada da hidrografia;
5. Incorporação de condições de contorno;
6. Calibração do modelo.

3.1 MODELO CONCEITUAL

De acordo com ROSMAN (2001), o modelo conceitual consiste no primeiro e mais fundamental dos modelos, portanto, configura o primeiro passo da metodologia aqui utilizada. Segundo o autor, este tipo de modelo consiste no entendimento prévio do fenômeno de interesse, concebendo as causas e efeitos e compreendendo as interações e significância dos fatores intervenientes do fenômeno a ser representado pelo modelo.

Segundo SOUSA (2017), a divisão de células para a modelagem no MODCEL necessita de uma análise prévia da situação física da região a ser modelada, de forma a identificar os principais caminhos do escoamento superficial, as interações com o meio urbano, as estruturas hidráulicas existentes e quais respostas necessárias em relação à níveis, vazões e velocidades são importantes para o caso de estudo. A partir destas informações, o modelador deve estabelecer as premissas que serão adotadas durante o processo de modelagem, criando assim, um modelo conceitual do funcionamento do sistema. Este procedimento permite ao modelador um entendimento prévio sobre o problema, de forma a simplificar a etapa futura de ajuste do modelo. O autor ainda discorre sobre a importância do conhecimento do funcionamento da

bacia e das causas determinantes de suas inundações para que o problema em questão seja solucionado.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Esta etapa consiste na obtenção de informações fisiográficas e do uso do solo da região de estudo, que serão utilizadas como dados de entrada do modelo, de forma a embasar uma boa representação do escoamento superficial. De acordo com SOUSA (2017), a topografia e a sua interpretação compõem um elemento fundamental para a correta representação dos caminhos do escoamento superficial, além das sub-bacias, obstáculos e declividade do terreno. Comumente são utilizados mapas de curva de nível, modelos digitais do terreno (MDTs) e modelos digitais de elevação (MDEs) como fontes de dados altimétricos. A título de definição, os MDTs representam a cota altimétrica do nível do terreno, enquanto os MDEs levam em consideração os objetos sobre a superfície do terreno, como árvores, edifícios e outras construções. Existem diversas fontes de dados topográficos consolidadas e disponíveis para *download* gratuito através de suas respectivas plataformas, como os resultados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) realizada pela NASA em fevereiro de 2000, que consistem em um modelo digital de elevação da parte continental da Terra, com 30 metros de resolução horizontal.

Além de informações topográficas, são necessárias informações referentes ao uso e cobertura do solo da região de estudo de forma a subsidiar a definição do coeficiente de Manning, que possui papel fundamental no comportamento do escoamento superficial da bacia. A metodologia descrita por COWAN (1956) *apud* ARCEMENT e SCHNEIDER (1989) consiste no cálculo do coeficiente de forma analítica, levando em consideração as irregularidades, variações, obstruções e vegetação da planície de inundação, além de um fator de correção devido à sinuosidade da mesma (Eq. 3.1) foi adotada para o cálculo do coeficiente de rugosidade de Manning.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (3.1)$$

Na qual:

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

n_b = valor base para um canal natural reto, uniforme e suave;

n_1 = fator de correção para o efeito das irregularidades da superfície;

n_2 = valor para as variações da seção transversal;

n_3 = fator para obstruções;

n_4 = fator para vegetação e condições de escoamento;

m = fator de correção para os meandros do canal.

Informações espaciais sobre a cobertura e uso do solo também servem de base para a definição dos coeficientes de escoamento com base nas Tabela 3.1 e 3.2, disponibilizadas pela RIO-ÁGUAS (2019) e DNIT (2017) respectivamente.

Tabela 3.1 Coeficiente de escoamento superficial (RIO-ÁGUAS, 2019)

Tipologia da área de drenagem	Coeficiente de escoamento superficial
Áreas Comerciais	
áreas centrais	0,70 - 0,95
áreas de bairros	0,50 - 0,70
Áreas Residenciais	
residenciais isoladas	0,35 - 0,50
unidades múltiplas, separadas	0,40 - 0,60
unidades múltiplas, conjugadas	0,60 - 0,75
áreas com lotes de 2.000m ² ou maiores	0,30 - 0,45
áreas suburbanas	0,25 - 0,40
áreas com prédios de apartamentos	0,50 - 0,70
Áreas Industriais	
área com ocupação esparsa	0,50 - 0,80
área com ocupação densa	0,60 - 0,90
Superfícies	
asfalto	0,70 - 0,95
concreto	0,80 - 0,95
<i>blocket</i>	0,70 - 0,89
paralelepípedo	0,58 - 0,81
telhado	0,75 - 0,95
solo compactado	0,59 - 0,79
Áreas sem melhoramentos ou naturais	
solo arenoso, declividade baixa < 2%	0,05 - 0,10
solo arenoso, declividade média entre 2% e 7%	0,10 - 0,15
solo arenoso, declividade alta > 7%	0,15 - 0,20
solo argiloso, declividade baixa < 2%	0,15 - 0,20
solo argiloso, declividade média entre 2% e 7%	0,20 - 0,25
solo argiloso, declividade alta > 7%	0,25 - 0,30

grama, em solo arenoso, declividade baixa < 2%	0,05 - 0,10
grama, solo arenoso, declividade média entre 2% e 7%	0,10 - 0,15
grama, solo arenoso, declividade alta > 7%	0,15 - 0,20
grama, em solo argiloso, declividade baixa < 2%	0,13 - 0,17
grama, em solo argiloso, declividade média entre 2% e 7%	0,18 - 0,22
grama, em solo argiloso, declividade alta > 7%	0,25 - 0,35
florestas com declividade < 5%	0,25 - 0,30
florestas com declividade média entre 5% e 10%	0,30 - 0,35
florestas com declividade >10%	0,45 - 0,50
capoeira ou pasto com declividade < 5%	0,25 - 0,30
capoeira ou pasto com declividade média entre 5% e 10%	0,30 - 0,36
capoeira ou pasto com declividade >10%	0,35 - 0,42

Tabela 3.2 Coeficiente de escoamento superficial (DNIT, 2017)

Descrição das áreas das bacias tributárias	Coeficiente C
Comércio	
Áreas Centrais	0,70 a 0,95
Áreas da periferia do centro	0,50 a 0,70
Residencial	
Áreas de uma única família	0,30 a 0,50
Multi-unidades, isoladas	0,40 a 0,60
Multi-unidades, ligadas	0,60 a 0,75
Residencial (suburbana)	0,25 a 0,40
Área de apartamentos	0,50 a 0,70
Industrial	
Áreas leves	0,50 a 0,80
Áreas densas	0,60 a 0,90
Parques, cemitérios	0,10 a 0,25
Playgrounds	0,20 a 0,35
Pátio e espaço de serviços de estrada de ferro	0,20 a 0,40
Terrenos baldios	0,10 a 0,30

Ruas	
Asfalto	0,70 a 0,95
Concreto	0,80 a 0,95
Tijolos	0,70 a 0,85
Trajetos de acesso a calçadas	0,75 a 0,85
Telhados	0,75 a 0,95
Gramados; solos arenosos	
Plano, 2%	0,05 a 0,10
Médio, 2 a 7%	0,10 a 0,15
Íngreme, 7%	0,15 a 0,20
Gramados; solo compacto	
Plano, 2%	0,13 a 0,17
Médio, 2 a 7%	0,18 a 0,22
Íngreme, 7%	0,15 a 0,35

3.3 DO ARQUIVO RASTER À MALHA IDEAL

3.3.1 Dados de entrada do MODCEL

O presente item tem como objetivo apresentar o passo a passo para a construção da base de simulação de um modelo raster na interface do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL), onde a estrutura do arquivo raster é adaptada para funcionar como um modelo Quasi-2D.

A primeira etapa é a de geoprocessamento, cujo objetivo é obter três arquivos do tipo raster de mesma resolução horizontal: o primeiro contendo valores de cota obtidos durante a etapa de coleta de dados topográficos; o segundo com coeficientes de Manning; e o terceiro, coeficientes de escoamento superficial. Cabe ressaltar que a resolução horizontal dos arquivos raster correspondem à dimensão da célula de escoamento no MODCEL, portanto, é importante realizar uma análise de forma a encontrar o equilíbrio entre o custo computacional associado ao modelo e a representação coerente do território, principalmente no canal principal da bacia. Além disso, pixels menores demandam levantamentos topográficos mais precisos, que em geral não são realizados. É necessária uma preparação das malhas geradas para que sejam corretamente introduzidas na interface do MODCEL. O tipo de arquivo interpretado pelo

MODCEL é o ASCII¹, portanto, é necessário transformar as informações geradas para esta extensão com o auxílio de um software de geoprocessamento.

O arquivo ASCII de cotas é gerado a partir das informações topográficas obtidas durante a etapa de caracterização física da área de estudo, sendo responsável pela delimitação de células e atribuição de suas cotas de fundo. Cabe ressaltar que a interface do MODCEL considera que as cotas de nível d'água inicial são iguais às cotas de fundo durante o processo de importação. É importante que nesta etapa seja delimitada a área de estudo, recortando o arquivo raster pelos divisores de água antes da transformação do tipo de arquivo para ASCII.

O arquivo de coeficientes de Manning deve, necessariamente, apresentar as mesmas dimensões do arquivo de cotas. A finalidade deste arquivo é informar quais serão os coeficientes de Manning das ligações entre as células de escoamento. A definição destes valores se dá a partir da interpretação do uso e ocupação do solo, também obtidas na etapa de caracterização física da bacia hidrográfica. Geralmente as categorias de uso e cobertura do solo são disponibilizadas através de arquivos *shapefile*, portanto, faz-se necessária a conversão para tipo raster e, posteriormente, para a extensão ASCII.

O arquivo contendo informações de coeficientes de escoamento da região se dá de forma análoga ao procedimento de criação do arquivo ASCII que representa os coeficientes de Manning das ligações entre células. A diferença é que este possui valores representativos dos coeficientes específicos de cada pixel/célula da área de estudo.

Por fim, são inseridos diretamente na interface do MODCEL os fatores externos que possuem influência considerável no escoamento superficial da bacia através de condições de contorno e as chuvas de projeto sob as células do modelo.

3.3.2 Malha ótima

Em alguns casos, a bacia a ser modelada dispõe de dimensões suficientemente grandes para inviabilizar a utilização de uma malha de células que apresente escala compatível com a largura média do canal principal em virtude do custo computacional associado. Sendo assim, faz-se necessária uma simplificação, considerando maiores áreas como homogêneas através do aumento das dimensões dos *pixels*. HAILE e RIENTJES (2005) realizaram uma análise a respeito dos impactos desta simplificação em uma bacia na cidade de Tegucigalpa, Honduras, principalmente no que diz respeito à representação topográfica do terreno, como ilustrado na

¹ A codificação ASCII (American Standard Code for Information Interchange) é usada para facilitar o intercâmbio de informações entre diferentes sistemas de processamento de informações (GORN *et al.*, 1963).

Figura 3.1. De acordo com os autores, estas simplificações podem gerar áreas inundadas maiores que as esperadas, uma vez que as células que representam os corpos hídricos são muito maiores que as dimensões da calha do mesmo, além de pontos de inundação isolados, gerados pela supressão do caminho natural do escoamento, principalmente em áreas urbanas onde a topografia é mais complexa. Este é um dos maiores desafios do presente trabalho: encontrar o ponto de equilíbrio entre o custo computacional e a validade do modelo quanto a representação do escoamento superficial.

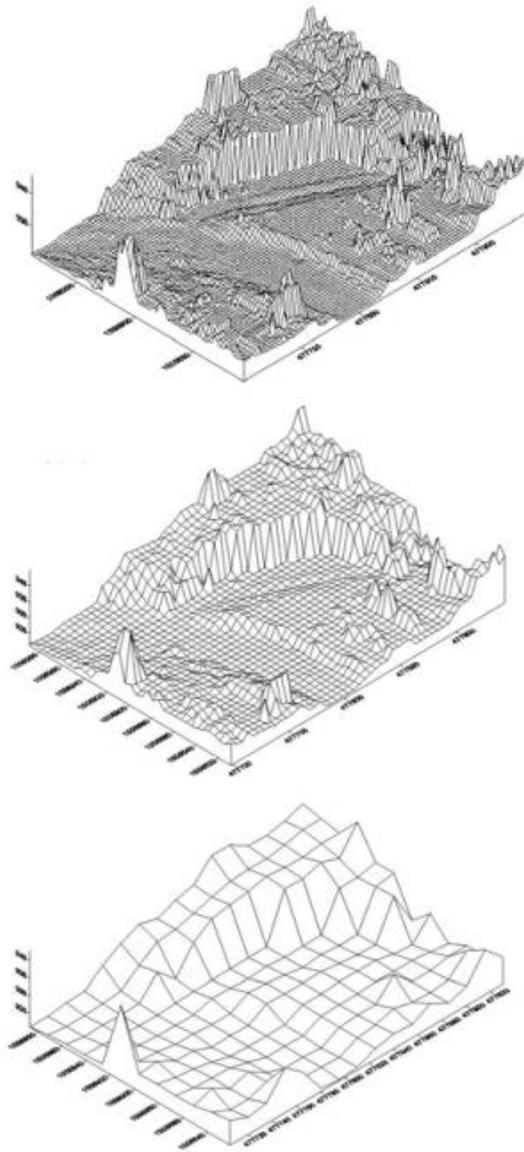


Figura 3.1 Efeitos da simplificação da topografia (HAILE e RIENTJES, 2005)

De acordo com PAZ (2010), um problema recorrente na utilização da metodologia adotada pelo presente estudo consiste na limitação envolvendo as ligações entre células, que só podem realizar trocas de vazões com suas quatro células vizinhas (Figura 3.2).

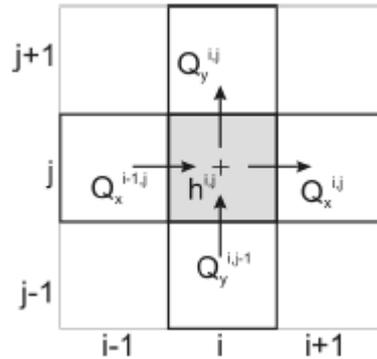


Figura 3.2 Trocas de vazões de uma célula do modelo raster (PAZ, 2010)

A interface do MODCEL dispõe de uma ferramenta para a criação de uma malha de células hexagonais a partir dos arquivos ASCII, de forma a possibilitar o escoamento em mais de 4 direções (Figura 3.3). Sendo assim, definida a resolução horizontal que apresente maior representatividade com custo computacional aceitável, é feita uma análise comparativa com o modelo de malha hexagonal a partir do mesmo arquivo raster.

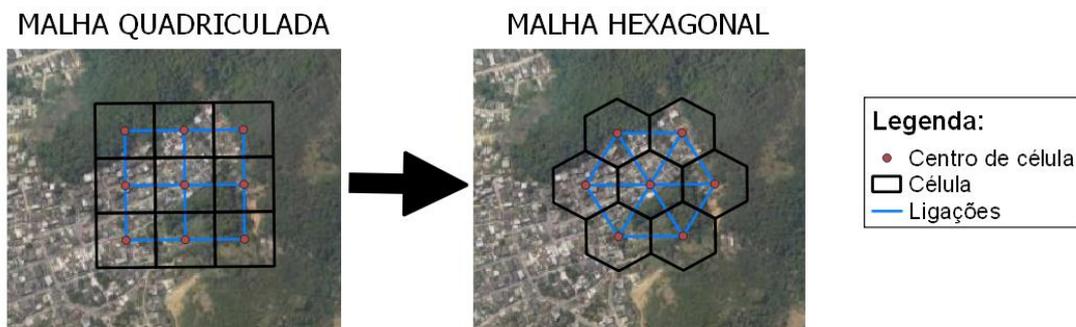


Figura 3.3 Malha Quadriculada x Hexagonal

De forma a exemplificar o processo de superestimação da mancha de inundação comentado por HAILE e RIENTJES (2005), a Figura 3.4 apresenta um terreno plano, na cota de elevação 0,5 m, a ser representado por uma célula hexagonal de cerca de 28.000 m², componente da malha de um modelo raster hexagonal. Durante o evento de cheia, o canal de cota de fundo igual a -3,0 m que atravessa a célula encontra-se quase cheio, comportando um volume de cerca de 5.000 m³ de água, com uma lâmina d'água de 2,5m. A média das cotas de elevação englobadas pela célula é igual a 0,29 m, sendo esta, a cota de fundo da célula

hexagonal do modelo raster. Dividindo o volume de água comportado pelo canal pela área da célula, obtém-se a lâmina de 0,18 m. Portanto, é possível afirmar que a porção do terreno não se encontra alagada durante o evento hidrológico hipotético, porém, apresenta lâmina d'água suficientemente grande para configurar uma célula alagada no modelo raster, configurando assim, uma superestimação do evento de inundação.

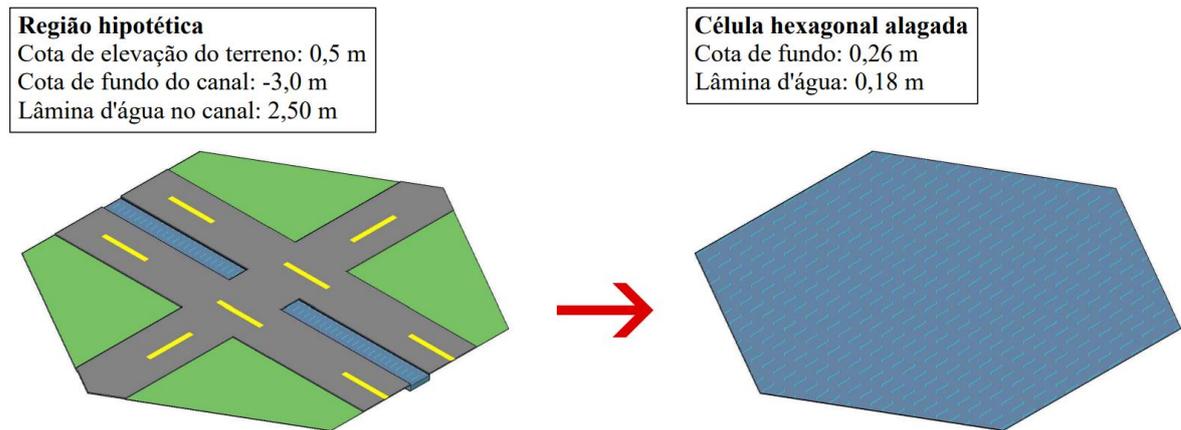


Figura 3.4 Exemplo esquemático de célula hexagonal

3.4 REPRESENTAÇÃO DA HIDROGRAFIA

Após a definição das dimensões das células que compõe a malha do modelo, a etapa seguinte consiste em uma avaliação sobre a representação dos principais canais de escoamento da bacia, uma vez que os mesmos possuem grande impacto no funcionamento geral do modelo, conforme descrito por HUNTER *et al.* (2007). Esta análise faz-se necessária devido a disparidade de dimensões horizontais entre os canais e as células de escoamento do modelo (PAZ, 2010), que provoca um superdimensionamento das vazões, uma vez que a seção transversal dos canais é mal representada. Sendo assim, alguns autores fazem uso de abordagens distintas para a planície e para o canal, como pode ser observado na Tabela 2.1.

A escolha da metodologia de modelagem do canal e sua interação com os elementos da malha de células de escoamento do modelo raster depende do custo computacional associado, base de dados disponíveis, resolução horizontal adotada e outros fatores que devem ser avaliados pelo modelador. Portanto, mesmo tendo a automatização da modelagem como uma das principais características da metodologia abordada no presente estudo, o modelador ainda possui papel fundamental na construção do modelo.

3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Um dos resultados do desenvolvimento do modelo conceitual abordado no subcapítulo 3.1 é a possibilidade de avaliar previamente a necessidade ou não do emprego de condições de contorno no modelo. De acordo com MIGUEZ (2001), três tipos de condição de contorno podem ser utilizados em diferentes pontos de uma mesma bacia hidrográfica modelada através de células de escoamento, sendo:

- Nível d'água dado em função do tempo – $Z(t)$;
- Vazão dada em função do tempo – $Q(t)$;
- Uma dada relação entre vazão e nível d'água $Q(Z)$.

3.6 CALIBRAÇÃO

De acordo com ROSMAN (2001), a metodologia adequada para o processo de calibração de um modelo hidrodinâmico deve passar pela análise de compatibilidade das escalas utilizadas na discretização do modelo e do fenômeno de interesse, checagem da geometria e das condições de contorno utilizadas na região de interesse. HUNTER *et al.* (2007) estabelecem que, independentemente da complexidade, os modelos de inundação espacialmente distribuídos devem passar por um processo de calibração e validação de forma a estabelecer a qualidade e confiabilidade da informação gerada pelo mesmo. Os autores definem a validação de um modelo como o processo pelo qual é demonstrada a capacidade do modelo de fazer previsões precisas fora do evento de calibração.

A calibração de um modelo de cheias urbanas é, de certa forma, um procedimento para identificar os desafios impostos pelas incertezas envolvidas no processo, sejam elas provenientes dos dados de entrada ou da própria metodologia adotada (NKWUNONWO *et al.*, 2020). MIGUEZ (2001) comenta que esta etapa se refere à fase de ajustes dos parâmetros utilizados e, se concluída de forma satisfatória, mesmo que utilizando de algumas hipóteses simplificadoras, o modelo passa a ser considerado um espelho da realidade, permitindo a passagem para a etapa de simulações. São diversos parâmetros que podem ser ajustados na metodologia aqui adotada para que o modelo alcance os resultados esperados.

A metodologia de calibração utilizada por TAYEFI *et al.* (2007) consiste na delimitação da extensão da inundação na planície a partir de visitas a campo após o evento de calibração e comparação com a mancha de inundação resultante do modelo, sem fazer uso de informações espaço-temporais do fenômeno a ser representado.

De acordo com PAZ (2010), é possível realizar uma análise pixel a pixel entre a mancha de inundação calculada e observada, gerando uma tabela de contingência (Tabela 3.3) que possibilite o cálculo de índices de desempenho (Tabela 3.4) a partir de 4 variáveis.

Tabela 3.3 Tabela de contingência. (Adaptado de PAZ, 2010)

Variável	Inundação observada em campo	Inundação calculada pelo modelo
a = células corretamente simuladas como inundadas	Sim	Sim
b = células erroneamente simuladas como inundadas	Não	Sim
c = células erroneamente simuladas como não inundadas	Sim	Não
d = células corretamente simuladas como secas	Não	Não

Tabela 3.4 Índices de desempenho (PAZ, 2010)

ÍNDICE	FORMULAÇÃO	SIGNIFICADO	VALOR
PC (proporção correta)	$PC = \frac{a + d}{a + b + c + d}$	Percentual de acertos geral, sem distinção entre acertos da ocorrência ou não ocorrência do evento	Varia de 0 a 1: quanto maior o valor, melhor o desempenho
ISC (índice de sucesso crítico)	$ISC = \frac{a}{a + b + c}$	Percentual de acertos nas estimativas, descontando as vezes em que a não ocorrência do evento foi corretamente prevista.	Varia de 0 a 1: quanto maior o valor, melhor o desempenho
POD (probabilidade de detecção)	$POD = \frac{a}{a + c}$	Dado que o evento ocorreu, percentual de acertos em estimar sua ocorrência'	Varia de 0 a 1: quanto maior o valor, melhor o desempenho
TAF (taxa de alarme falso)	$TAF = \frac{b}{a + b}$	Dentre as vezes em que foi estimada a ocorrência do evento, percentual em que o evento não ocorreu	Varia de 0 a 1: quanto menor o valor, melhor o desempenho
BIAS (taxa de tendência)	$PC = \frac{a + b}{a + c}$	Relação entre o número de estimativas de ocorrência do evento e o número de eventos ocorridos	Assume qualquer valor maior que 0. Quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho. Se >1 indica superestimativa, se <1 indica subestimativa.

O modelo perfeito seria o que apresenta $b=c=0$, ou seja, apresenta todas as células como corretamente simuladas. Porém, para previsões imperfeitas e reais, cada um dos índices de desempenho dispostos na Tabela 3.4 permite determinar o grau de correspondência do modelo, refletindo uma determinada característica dos resultados obtidos (WILKS, 2006). Sendo assim, no presente trabalho serão avaliados todos os índices de forma a identificar os principais potenciais e limitações da utilização da metodologia em estudo para a modelagem do escoamento superficial da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu.

4 ESTUDO DE CASO: A BACIA DO RIO PIRAQUÊ-CABUÇU

O presente capítulo tem como foco a caracterização física, geográfica, histórica e socioeconômica da bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, escolhida como estudo de caso do presente trabalho.

4.1 LOCALIZAÇÃO

A bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu é localizada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro/RJ e abrange os bairros de Guaratiba, Pedra de Guaratiba, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Santíssimo e Senador Camará Figura 4.1, todos pertencentes à Área de Planejamento 5 (AP5) do município do Rio de Janeiro. Dentre os bairros citados, três Regiões Administrativas se fazem presentes: XVIII Região Administrativa de Campo Grande, XXVI Região Administrativa de Guaratiba e a XVII Região Administrativa de Bangu.

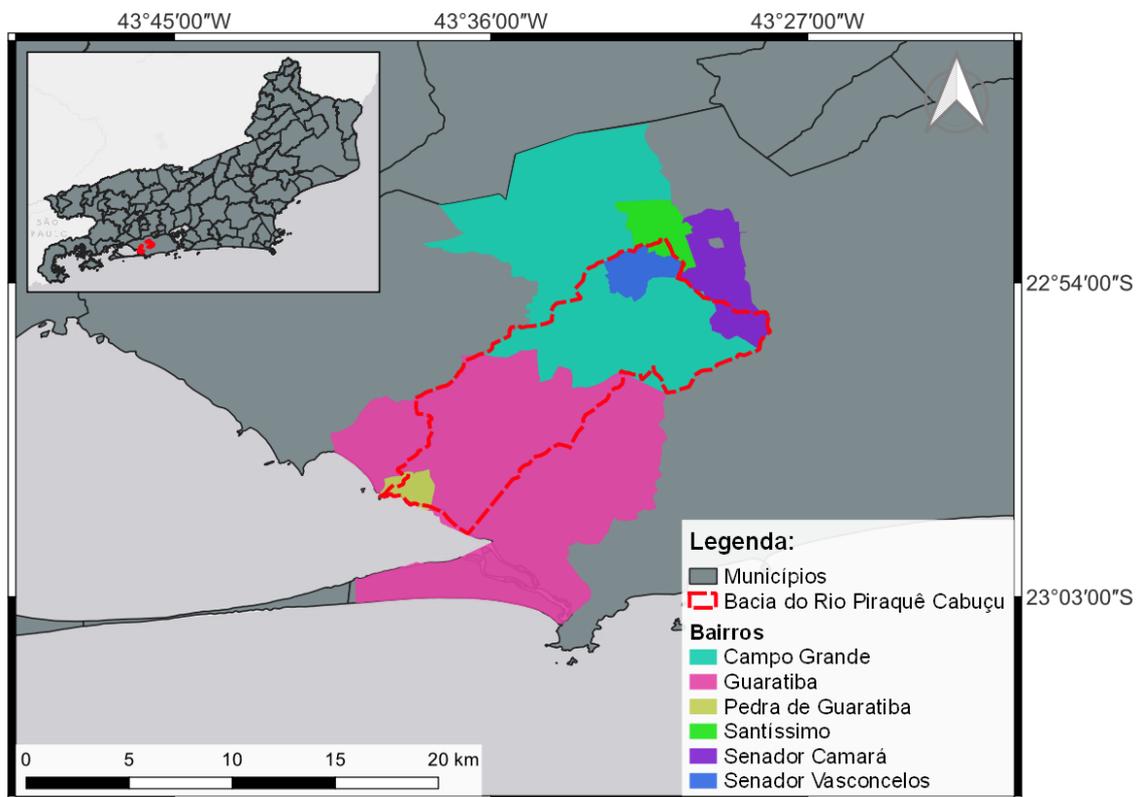


Figura 4.1 Mapa de localização da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu

4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

De forma a ilustrar graficamente a topografia da bacia, a Figura 4.2 apresenta o Modelo Digital de Elevação em formato raster com resolução horizontal de 1 metro fornecido pelo Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos (IPP). A zona leste da bacia apresenta a região do Parque Estadual da Pedra Branca, caracterizada pelas cotas elevadas, enquanto na zona oeste são encontradas colinas que delimitam a área de drenagem da bacia hidrográfica. Entre as regiões rochosas, nota-se que a bacia não possui grandes variações de declividade, principalmente na área próxima ao exutório.

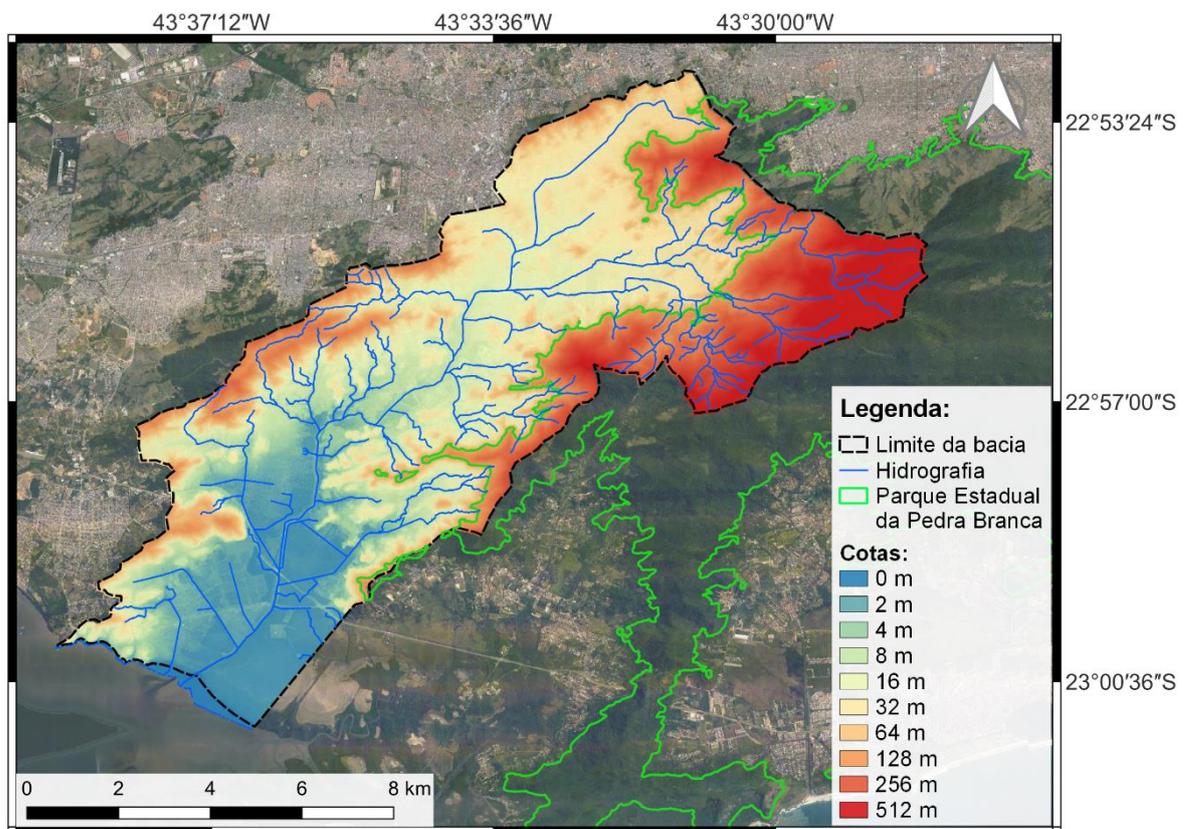


Figura 4.2 Hipsometria da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu

O Rio Cabuçu nasce no bairro de Senador Vasconcellos, entre as Serras do Lameirão e da Posse, escoia por um canal de concreto ao longo da Rua Artur Rios e das Avenidas Dom Sebastião I e Belmiro Valverde, passa sob a Estrada do Cabuçu e, após atravessar sob a Rua Olinda Elis, recebe o Rios Cabuçu-Mirim, que drena uma área de aproximadamente 2,2 km² no bairro de Campo Grande por meio de um canal de concreto ao longo da Av. Mariana. O Rio Cabuçu segue canalizado por cerca de 1,5 km até o encontro com o Rio da Prata do Cabuçu, que possui sua origem no Parque Estadual da Pedra Branca. A partir deste ponto, o rio segue

em canal natural por cerca de 5,8 km até a travessia sob a Estrada do Rio Aterrado, onde passa a se chamar Rio Piraquê. O principal talvegue da bacia segue em curso natural, recebe os Rios Consulado e dos Porcos, atravessa a Av. das Américas, a Estrada da Matriz e finalmente alcança seu trecho final, uma área alagada que se estende por cerca de 1,0 km, entre o canal do Jardim Garrido e a baía de Sepetiba. A área de drenagem da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu é de cerca de 109 km². (BARROS, 2020; PDMAP, 2012).

As principais sub-bacias da região de estudo, caracterizadas na Tabela 4.1, são apresentadas graficamente na Figura 4.3.

Tabela 4.1 Principais sub-bacias da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu (Rio de Janeiro - PDMAP, 2012)

Sub-bacia	Área (km²)	Extensão do talvegue principal (km)
Rio Cabuçu, a montante da confluência com o Rio Cabuçu Mirim	9,8	6,825
Rio Cabuçu Mirim	2,25	3,080
Rio da Prata do Cabuçu	30,48	12,121
Rio Cantagalo	4,08	4,385
Rio da Chacrinha	5,59	4,816
Rio Consulado	1,90	1,946
Rio dos Porcos	8,31	6,725
Valão das Cinzas	8,61	6,725

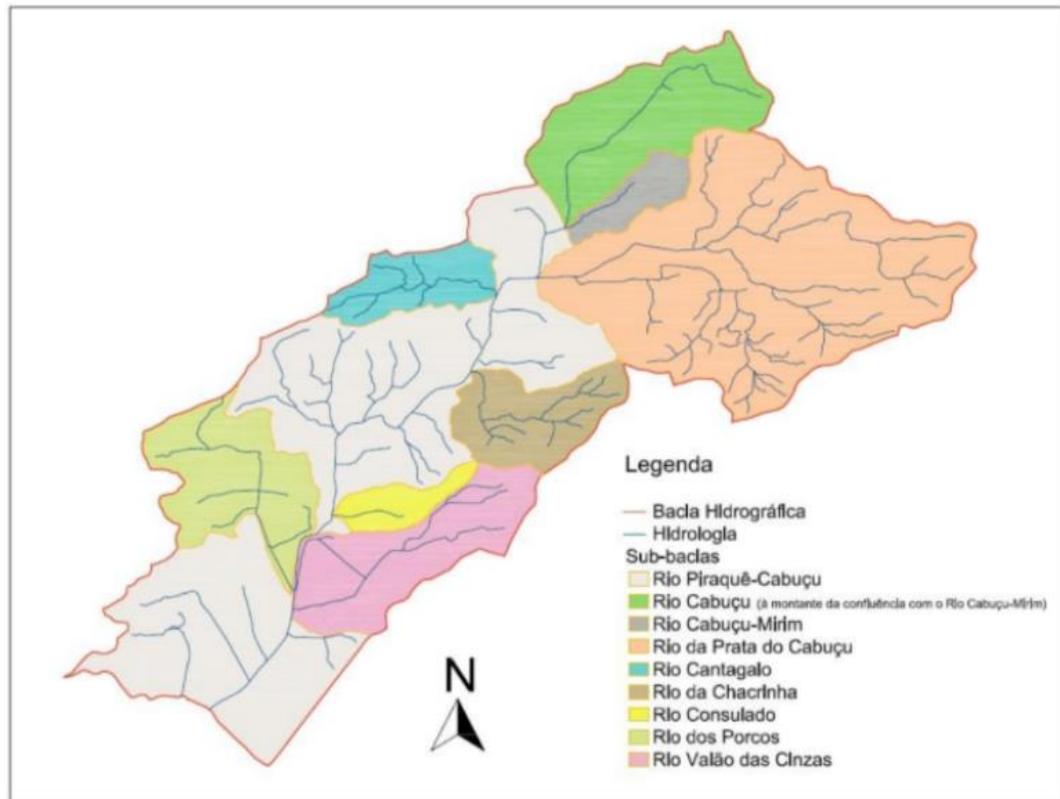


Figura 4.3 Mapa das sub-bacias da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu (Rio de Janeiro - PDMAP, 2012, adaptado por Ribeiro, 2017)

4.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A área da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu era conhecida como o “Sertão Carioca” no início do século XX devido a sua ocupação predominantemente rural, porém, a partir das décadas de 40/50, a região de Campo Grande passou a receber diversas indústrias motivadas pela fragmentação das grandes propriedades locais, além da presença de uma estação ferroviária no bairro. Essa transição de Campo Grande de uma zona rural para industrial acompanha a urbanização da região e, de forma geral, marca o início da ocupação na bacia como um todo. O bairro de Guaratiba, localizado na região central da bacia, teve seu processo de urbanização localizado às margens da Av. das Américas, implementada na década de 60. Já o bairro de Pedra de Guaratiba não demonstrou grande crescimento, sendo caracterizado pela cultura pesqueira da Baía de Sepetiba (RIBEIRO, 2017).

De acordo com BARROS (2020), a AP5 (área de planejamento que engloba a bacia do Rio Piraquê-Cabuçu) apresenta a maior contribuição em termos de crescimento populacional para o município do Rio de Janeiro entre os anos de 1980 e 2010. Diversas reformas urbanas

contribuíram para o crescimento da Zona Oeste carioca nas últimas décadas, como a remoção de favelas na Zona Sul da cidade na primeira metade do século XX e a retirada de famílias de diferentes pontos da cidade para a realização da Copa do Mundo de 2014 e Olimpíadas do Rio de Janeiro de 2016. Estas medidas vieram acompanhadas de obras de infraestrutura para comportar o crescimento da região como o Arco Metropolitano, expansão do Porto de Itaguaí e a abertura do Túnel Vice-Presidente da República José Alencar (Túnel Grota Funda), responsável por conectar os Bairros de Guaratiba e Vargem Grande.

De forma geral, a bacia em questão, segundo o PDMAP (2012) está inserida em áreas de ocupação assistida e condicionada, devendo contar com obras de urbanização de favela e fornecimento de infraestruturas de saneamento e melhorias no transporte, bem como a promoção de ocupação ordenada e áreas de reflorestamento. Tendo isso em vista, de acordo com RIBEIRO (2017), a dinâmica socioeconômica interna da área vem incentivando ações do mercado imobiliário, contribuindo ao crescimento e expansão, que extrapolam os limites da escala local.

O resultado desses diversos processos é a Figura 4.4, que traz o mapa de cobertura vegetal e uso das terras na bacia em um mapeamento realizado pela Prefeitura do Rio de Janeiro em 2016.

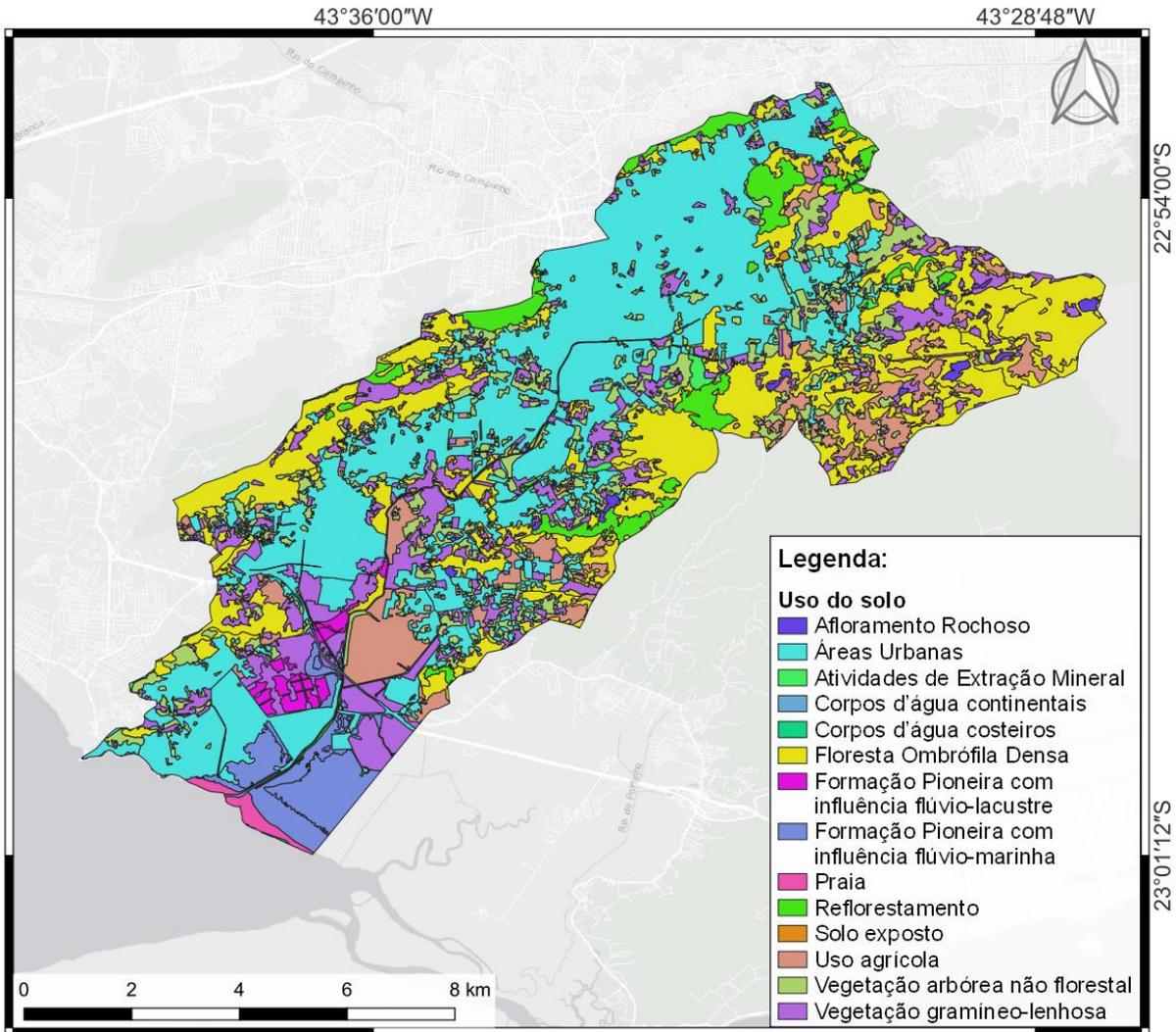


Figura 4.4 Cobertura e uso do solo na bacia do Rio Piraquê-Cabuçu (RIO DE JANEIRO, 2016)

A Tabela 4.2 indica a porcentagem de ocupação das classes de uso e cobertura do solo da bacia do rio Piraquê-Cabuçu.

Tabela 4.2 Porcentagem de uso do solo na bacia (RIO DE JANEIRO, 2016)

Uso do solo	Área (Ha)	%
Afloramento Rochoso	61,30	0,56%
Áreas Urbanas	3829,78	34,92%
Atividades de Extração Mineral	31,54	0,29%
Corpos d'água continentais	45,46	0,41%
Corpos d'água costeiros	1,23	0,01%
Floresta Ombrófila Densa	2618,98	23,88%
Formação Pioneira com influência flúvio-lacustre	102,14	0,93%
Formação Pioneira com influência flúvio-marinha	437,24	3,99%
Praia	55,40	0,51%
Reflorestamento	451,45	4,12%

Solo exposto	9,01	0,08%
Uso agrícola	781,70	7,13%
Vegetação arbórea não florestal	1141,23	10,41%
Vegetação gramíneo-lenhosa	1401,08	12,77%
TOTAL	10967,55	100,00%

A bacia do Rio Piraguê-Cabuçu possui um total de 237.553 habitantes, de acordo com a grade estatística disponibilizada pelo IBGE a partir dos dados do CENSO de 2010. A distribuição dessa população pode ser verificada na Figura 4.5.

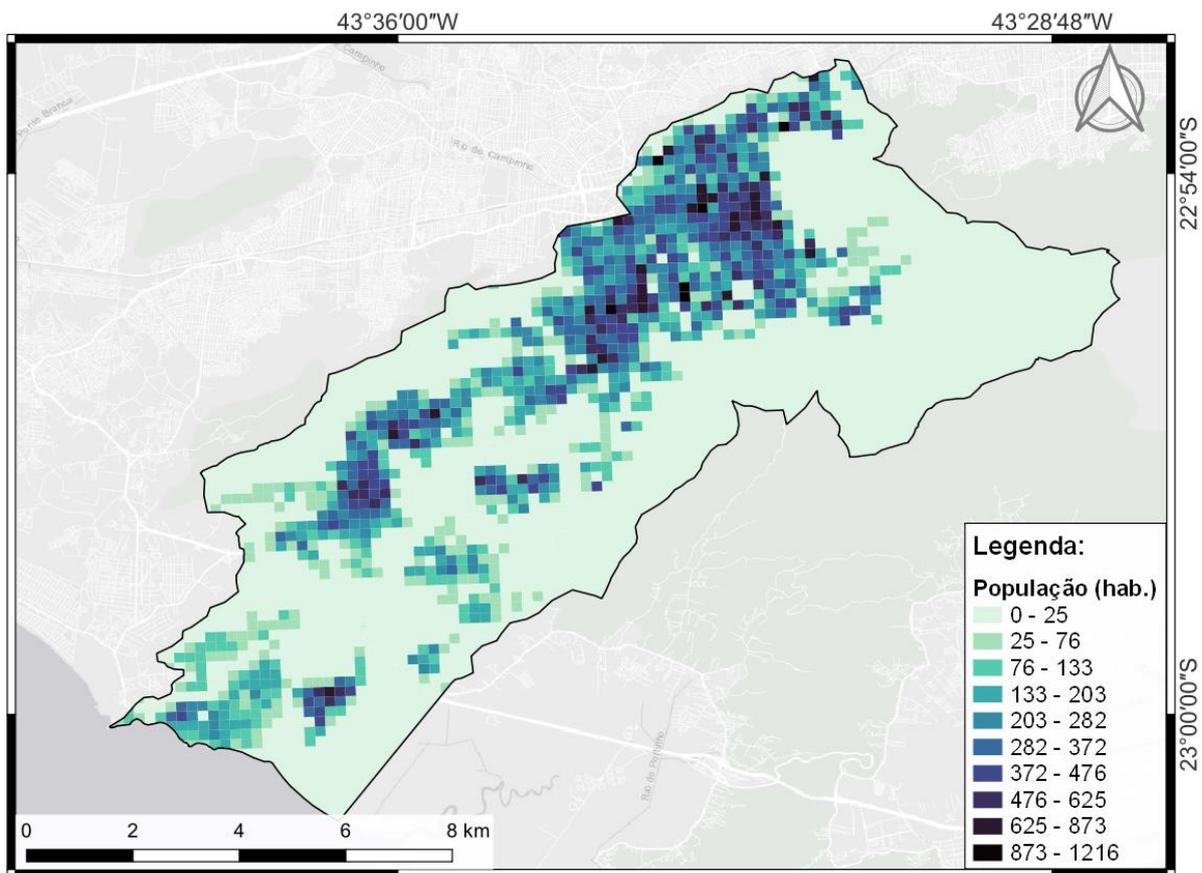


Figura 4.5 – Distribuição populacional da bacia do Rio Piraguê-Cabuçu (DIAS *et al*, 2021)

De acordo com o PDMAP (2012), a Zona Oeste do Rio de Janeiro encontra-se em consolidação da ocupação urbana, tratando-se de uma área de expansão urbana da cidade, com extensas áreas loteadas e ainda não ocupadas. A Tabela 4.3 indica o potencial de consolidação urbana dos bairros que compõem a bacia.

Tabela 4.3 Uso e ocupação do solo nos bairros localizados total ou parcialmente na bacia (RIO DE JANEIRO – PDMAP, 2012)

BAIRROS QUE COMPÕEM A BACIA DO PIRAQUÊ-CABUÇU	REGIÃO ADMINISTRATIVA (RA)	ÁREA TOTAL DO BAIRRO (km ²)	ÁREA DO BAIRRO NA BACIA DO PIRAQUÊ-CABUÇU (km ²)	% ÁREA URBANA CONSOLIDADA	% ÁREA URBANA NÃO CONSOLIDADA E COMUNIDADES	% ÁREAS DE FLORESTAS MATAS E PARQUES	% ÁREA AGRÍCOLA	% OUTRAS ÁREAS
Campo Grande	Campo Grande	118.781	50.803	29.08%	43.82%	26.79%	0.00%	0.31%
Senador Vasconcelos	Campo Grande	6.407	6.378	43.61%	50.20%	6.19%	0.00%	0.00%
Guaratiba	Guaratiba	137.141	43.74	6.49%	40.29%	16.88%	1.49%	34.85%
Pedra de Guaratiba	Guaratiba	3.408	2.755	32.64%	55.02%	7.97%	0.00%	4.37%
Senador Camará	Bangu	13.211	4.359	48.10%	43.10%	19.68%	0.00%	1.26%
Santíssimo	Bangu	8.598	0.652	38.65%	59.60%	0.77%	0.00%	1.02%
Área total da bacia do Piraquê-Cabuçu			108.687					

São previstas diversas alterações no uso e ocupação do solo na bacia, entretanto, com algumas restrições previstas com o intuito de ordenar o crescimento urbano na região. A legislação municipal prevê a não ocupação de todas as áreas com cotas superiores a 60 metros, além da desapropriação das ocupações irregulares até a cota 2 metros às margens dos cursos d'água da região, o que inclui parte do loteamento Jardim Maravilha, situado à margem direita do principal corpo hídrico da bacia. A Tabela 4.4 apresenta o percentual de áreas não urbanizáveis quando consideradas as restrições relativas à cota do terreno.

Tabela 4.4 Áreas com restrição de urbanização em relação a cota (RIO DE JANEIRO – PDMAP, 2012)

TRECHO	SUB-BACIA	BAIRRO	ÁREA (km ²)	Área não urbanizável: cotas superiores a 60m e inferiores a 2m (km ²)	% Área não urbanizável
ALTO CABUÇU	Rio Cabuçu, a montante da confluência com o Cabuçu Mirim	Senador Vasconcelos / Campo Grande	9.8	1.79	18.23%
	Rio Cabuçu Mirim	Campo Grande	2.25	0.13	5.87%
	Rio da Prata do Cabuçu	Campo Grande	30.48	19.93	65.39%
TOTAL DAS ÁREAS NO ALTO PIRAQUÊ-CABUÇU			42.53	21.849	51.37%
MÉDIO PIRAQUÊ-CABUÇU	Rio Cantagalo	Campo Grande	4.08	0.69	16.84%
	Rio da Chacrinha	Guaratiba	5.59	2.14	38.28%
	Rio Consulado	Guaratiba	1.9	0.10	5.26%
	Rio dos Porcos	Guaratiba	8.31	2.98	35.82%
	Valão das Cinzas	Guaratiba	8.608	3.26	37.88%
	Rio Piraquê-Cabuçu, entre a estrada Iaraquã e Av. das Américas	Guaratiba	24.28	3.71	15.26%
TOTAL DAS ÁREAS NO MÉDIO PIRAQUÊ-CABUÇU			52.768	12.871	24.39%
BAIXO PIRAQUÊ	Rio Piraquê, a jusante da Av. das Américas	Guaratiba	15.254	9.50	62.28%
TOTAL DAS ÁREAS NO BAIXO PIRAQUÊ-CABUÇU			15.254	9.50	62.28%
TOTAL DAS ÁREAS NA BACIA DO PIRAQUÊ-CABUÇU			110.552	44.22	40.00%

Cabe ressaltar que a área delimitada pela bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu é cercada por áreas protegidas, como o Parque Estadual da Pedra Branca e a Reserva Biológica de Guaratiba.

4.4 CLIMATOLOGIA E REGIME PLUVIOMÉTRICO

O presente subcapítulo apresenta a caracterização do clima da região do estudo de caso, os dados pluviométricos básicos e a equação de intensidade, duração e frequência para elaboração das chuvas de projeto a serem utilizadas no processo de simulação hidrodinâmica.

4.4.1 Caracterização do clima

Segundo ALVARES (2013), a classificação climática Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu está situada entre três classificações Köppen distintas: Classes Am, Aw e Cfa. A classe Am corresponde ao clima tropical de monção e trata-se de uma transição entre o tipo climático Af e Aw, com precipitação média anual de 1.900 a 2.200 mm e temperatura média anual entre de 24 a 26°C. Apresenta estação seca de pequena duração que é compensada pela precipitação total elevada em outros períodos anuais, podendo também ser denominado como “Clima tropical úmido”.

A classe Aw representa o clima tropical, apresentando precipitação média anual de 1600 a 1.900 mm e temperatura média anual entre 19 e 20°C. É caracterizada por conter verões chuvosos entre os meses de novembro e abril, e invernos secos entre os meses de maio e outubro, onde o mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm.

Já a classe Cfa corresponde ao clima subtropical úmido, apresenta em seu mês mais quente temperaturas médias superiores à 22°C e em seu mês mais frio entre 0°C ou -3°C e 18°C. Identifica-se nela um clima temperado sem estação seca, uma vez que a precipitação é abundante e bem distribuída ao longo do ano, não havendo diferença significativa no nível de precipitação entre as estações. A Figura 4.6 ilustra a distribuição espacial da classificação Köppen na área englobada pela bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu.

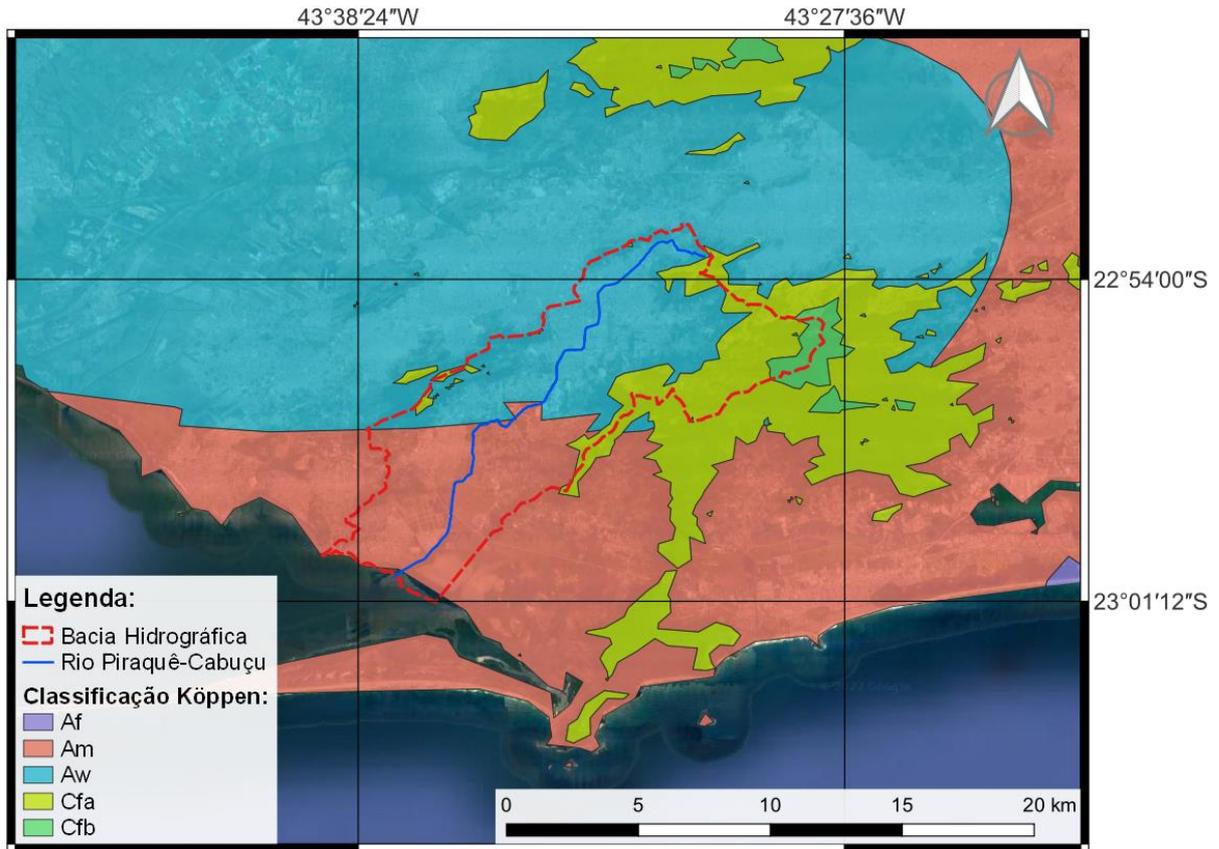


Figura 4.6 Classificação climatológica da área de estudo

4.4.2 Dados pluviométricos básicos

Diversos postos pluviométricos estão localizados na região englobada pela bacia ou próximas da mesma, porém, para caracterizar o regime pluviométrico da região, foram analisados os dados medidos do posto com série histórica mais extensa. O posto de código 2243089 (Figura 4.7), operado pelo INEA, apresenta uma série histórica de registros extensa, possuindo 24 anos de dados diários completos entre 1965 e 1993, desconsiderando os anos de registros incompletos e inconsistentes. Os dados de precipitação diária, assim como as informações do posto (Tabela 4.5), foram coletados no sistema HIDROWEB/ANA (2022). A Figura 4.8 mostra o pluviograma do posto selecionado.

Tabela 4.5 Dados do posto pluviométrico 2243089 (HIDROWEB/ANA, 2022)

Bacia	Estado	Município	Operadora	Código	Estação	Lat.	Long.
Atlântico, trecho leste	RJ	Rio de Janeiro	INEA-RJ	2243089	Campo Grande – 7DR	-22,918	-43,545

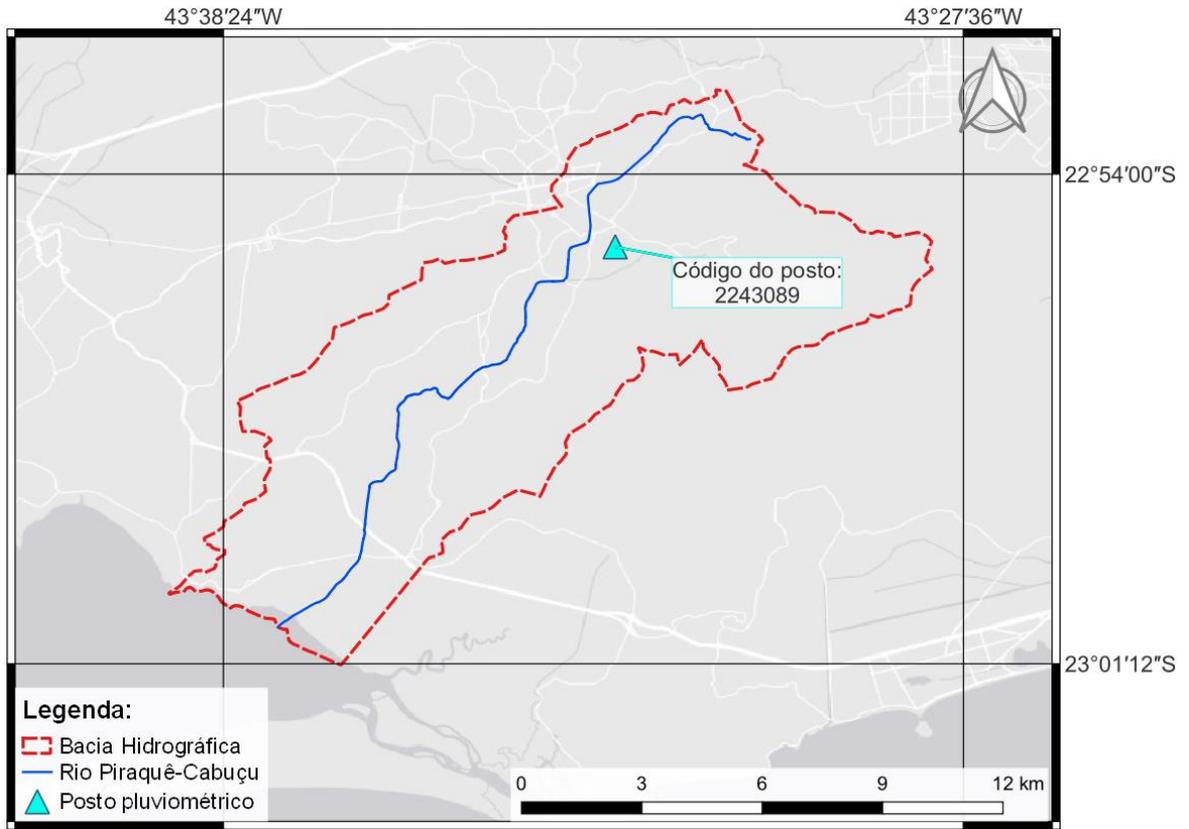


Figura 4.7 Localização do posto pluviométrico

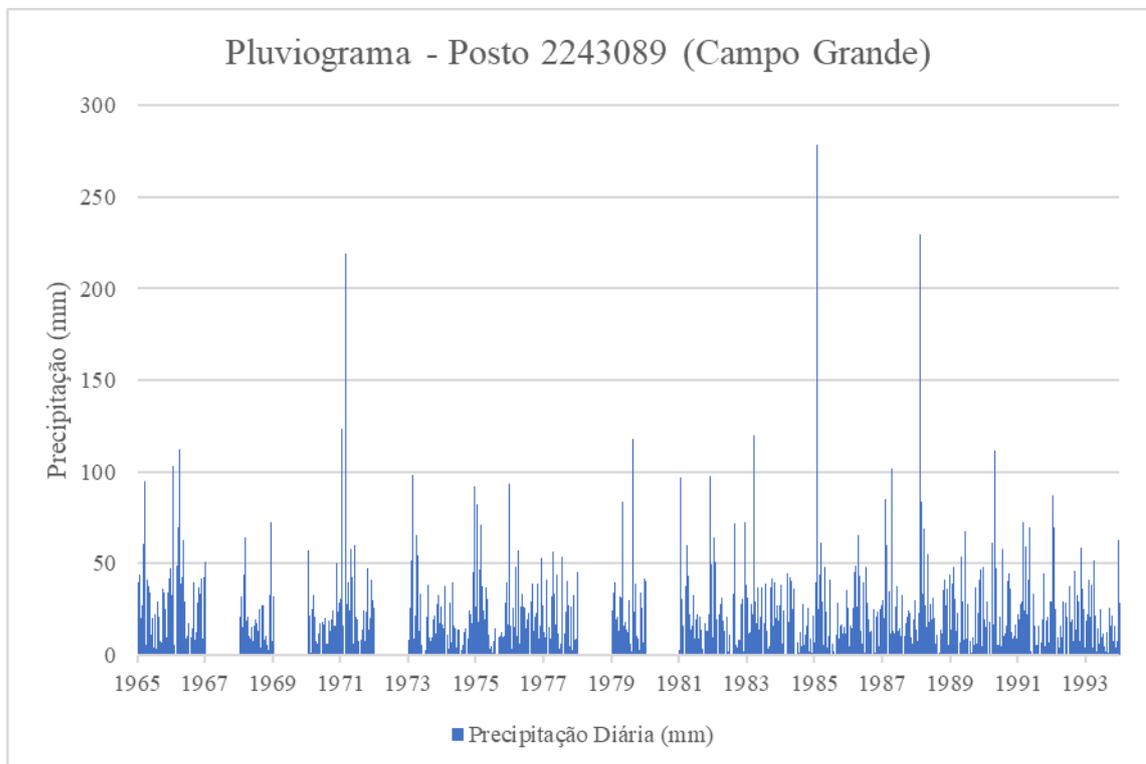


Figura 4.8 Série histórica de registros – Campo Grande

A partir dos dados dispostos anteriormente, foi possível calcular a precipitação média anual de 1305,2 mm, enquanto as médias mensais estão dispostas na Figura 4.9.

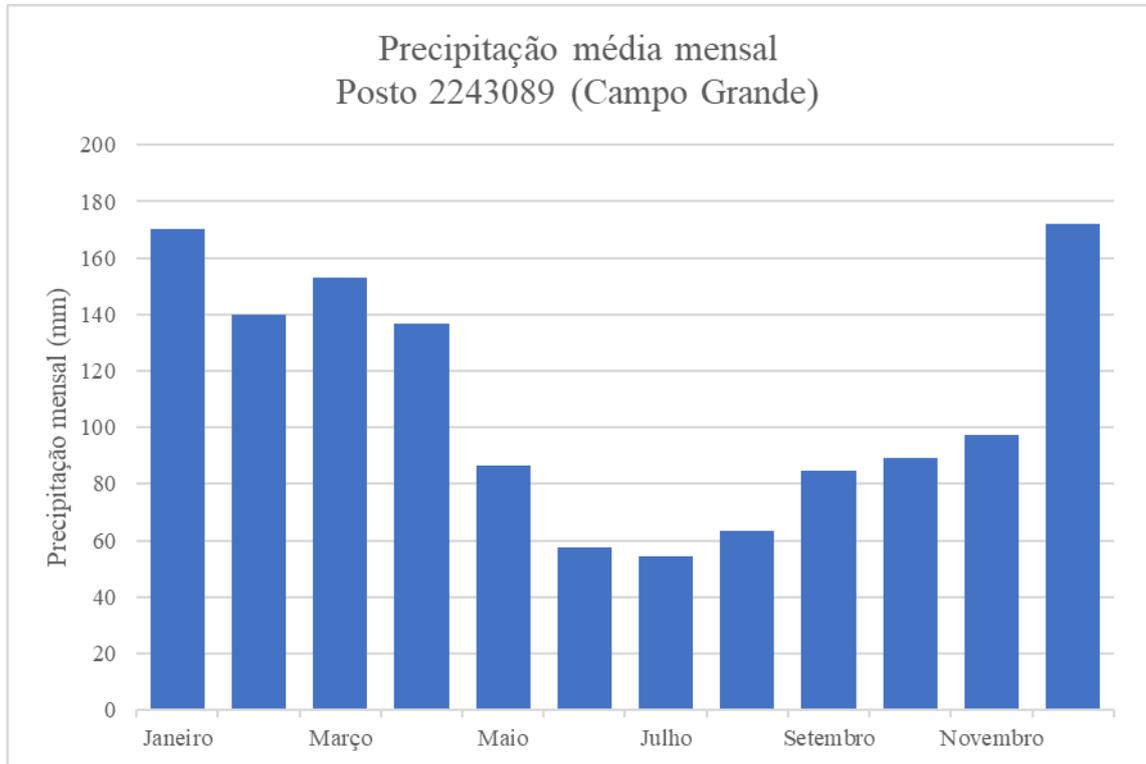


Figura 4.9 Precipitação média mensal – Campo Grande

4.4.3 Equação IDF (Intensidade x Duração x Frequência)

De acordo com as Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana (RIO ÁGUAS, 2019), a equação que relaciona tempo de duração do evento pluviométrico, tempo de recorrência e intensidade pluviométrica (equação IDF) de Campo Grande é representativa para toda a área de estudo (Figura 4.10).

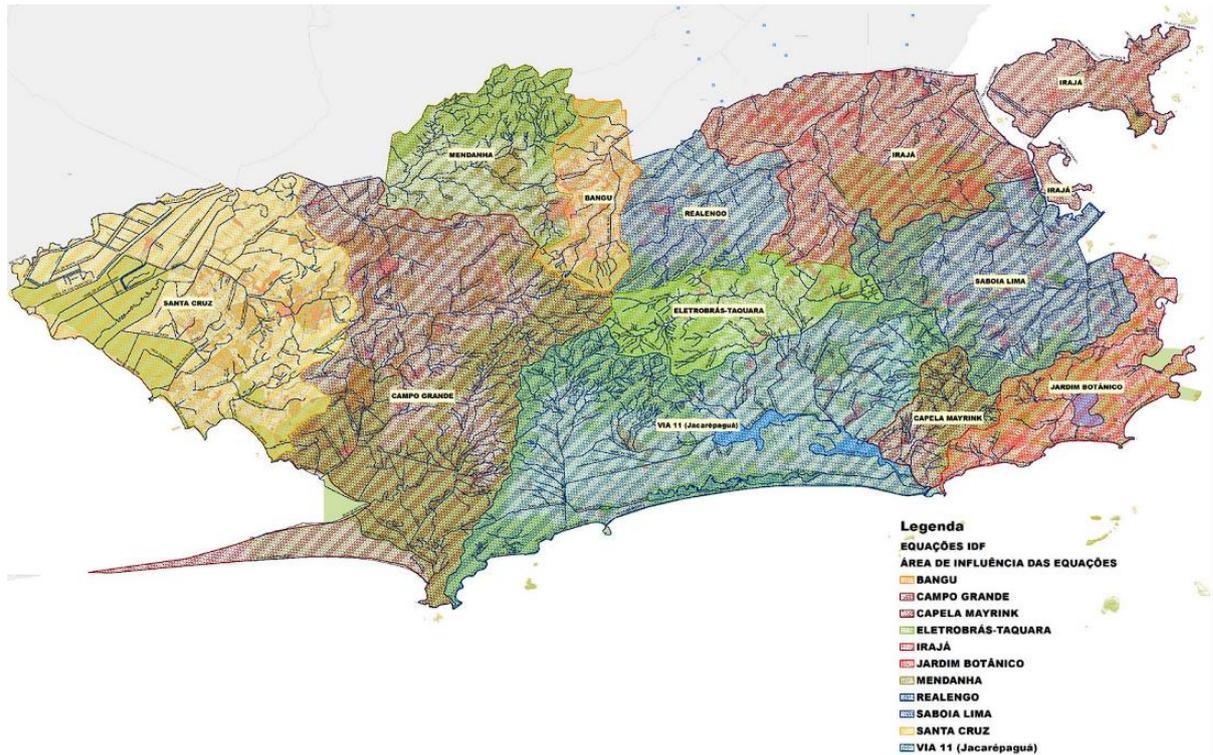


Figura 4.10 Áreas de influência das equações IDF do município do Rio de Janeiro (RIO ÁGUAS, 2019)

A equação IDF determinada pela Rio Águas está apresentada a seguir:

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{891,6 \cdot TR^{0,18}}{(t_d + 14)^{0,689}}$$

onde:

I: Intensidade da chuva (mm/h)
 TR: Tempo de Recorrência (anos);
 t_d: Duração da chuva (minutos).

As intensidades de precipitação calculadas para diferentes tempos de recorrência e tempos de duração estão ilustradas na Figura 4.11, enquanto os valores estão indicados na Tabela 4.6.

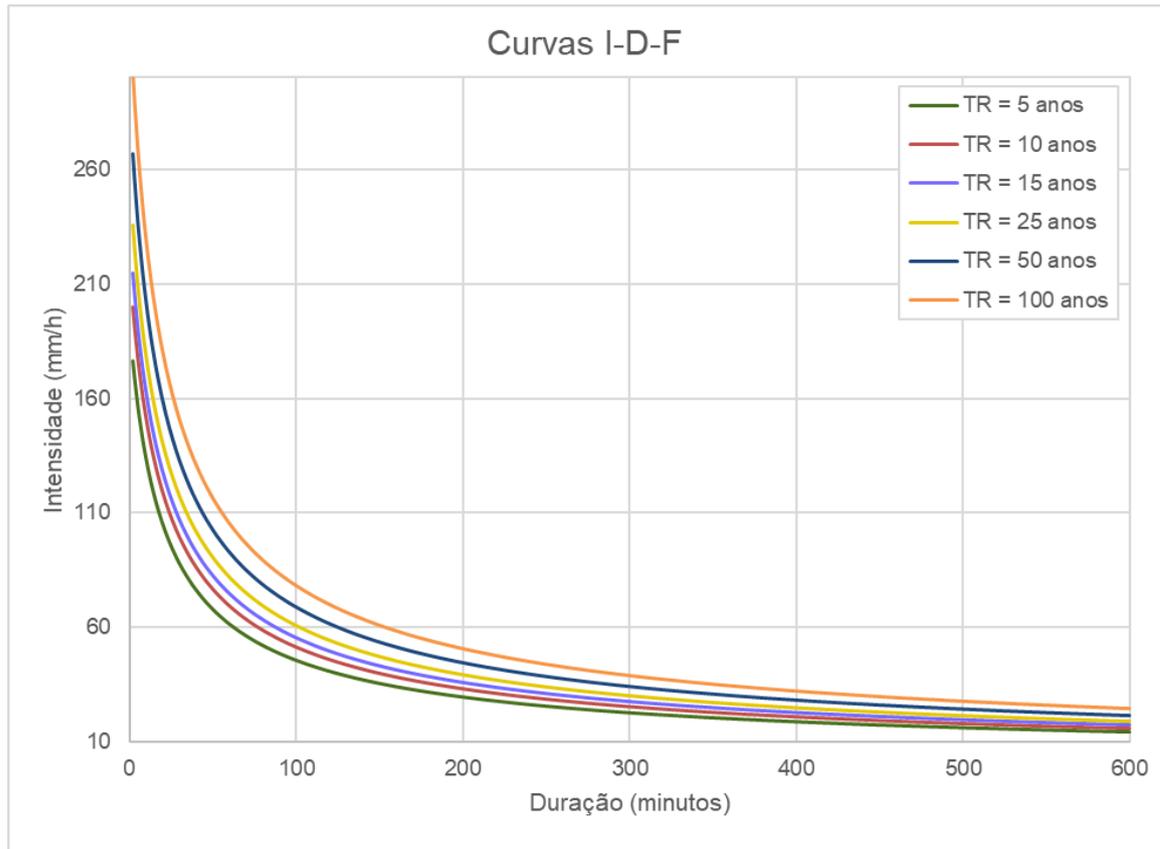


Figura 4.11 Curvas IDF (RIO ÁGUAS, 2019)

Tabela 4.6 Intensidades de precipitação (RIO ÁGUAS, 2019)

TR (anos)	Intensidade pluviométrica (mm/h)										
	Tempo de duração (minutos)										
	5	10	20	30	45	60	360	480	600	720	1440
5	156,65	133,36	104,90	87,83	71,76	61,39	20,10	16,60	14,29	12,63	7,89
10	177,46	151,08	118,85	99,50	81,29	69,55	22,78	18,80	16,19	14,31	8,94
15	190,90	162,52	127,84	107,04	87,45	74,81	24,50	20,23	17,41	15,40	9,61
20	201,05	171,16	134,64	112,72	92,10	78,79	25,80	21,30	18,34	16,21	10,12
25	209,28	178,17	140,16	117,34	95,87	82,02	26,86	22,17	19,09	16,88	10,54
50	237,10	201,85	158,78	132,94	108,61	92,91	30,43	25,12	21,62	19,12	11,94
100	268,60	228,67	179,88	150,60	123,04	105,26	34,47	28,46	24,50	21,66	13,53

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

5.1 TOPOGRAFIA E USO DO SOLO

A base de dados topográficos utilizada no presente trabalho consiste em um Modelo Digital do Terreno (MDT), em formato raster, com resolução horizontal de 1,0 metro, elaborado pelo Instituto Pereira Passos (IPP), disposto na Figura 4.2. Com o objetivo de representar o escoamento superficial na bacia do rio Piraquê-Cabuçu, foi necessário atribuir um coeficiente de rugosidade (coeficiente de Manning) para diferentes tipos de uso do solo.

De acordo com os dados fornecidos pelo LAC-UFRJ, a bacia possui os seguintes tipos de uso do solo: afloramento rochoso, área urbana, atividades de extração mineral, corpos d'água continentais, corpos d'água costeiros, floresta ombrófila densa, formação pioneira com influência flúvio-lacustre, formação pioneira com influência flúvio-marinha, praia, reflorestamento, solo exposto, uso agrícola, vegetação arbórea não florestal e vegetação gramíneo-lenhosa. Os coeficientes de rugosidade adotados para cada um dos tipos são apresentados de forma resumida na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Coeficientes de Manning para os diferentes usos de solo

Uso do solo	Coefficiente de Manning (n)
Afloramento Rochoso	0,036
Áreas Urbanas	0,078
Atividades de Extração Mineral	0,044
Corpos d'água continentais	0,023
Corpos d'água costeiros	0,025
Floresta Ombrófila Densa	0,203
Formação Pioneira com influência fluviolacustre	0,070
Formação Pioneira com influência fluviomarinha	0,150
Praia	0,021
Reflorestamento	0,175
Solo exposto	0,044
Uso agrícola	0,062
Vegetação arbórea não florestal	0,155
Vegetação gramíneo-lenhosa	0,065

O coeficiente de escoamento, que relaciona o volume de precipitação com o volume que efetivamente escoar sobre o solo, atribuído para cada tipo de uso do solo (Tabela 4.2) foi determinado com base nas tabelas disponibilizadas pela RIO-ÁGUAS (2019) e DNIT (2017).

Tabela 5.2 Coeficientes de escoamento para os diferentes usos de solo

Uso do solo	Coefficiente de escoamento
Afloramento Rochoso	0,90
Áreas Urbanas	0,80
Atividades de Extração Mineral	0,60
Corpos d'água continentais	1,00
Corpos d'água costeiros	1,00
Floresta Ombrófila Densa	0,45
Formação Pioneira com influência fluviolacustre	0,25
Formação Pioneira com influência fluviomarinha	0,25
Praia	0,05
Reflorestamento	0,25
Solo exposto	0,30
Uso agrícola	0,15
Vegetação arbórea não florestal	0,25
Vegetação gramíneo-lenhosa	0,15

Com base na distribuição espacial dos diferentes tipos de uso do solo (Figura 4.4), foi possível dar continuidade à metodologia apresentada no capítulo 3 com auxílio de um software de geoprocessamento.

5.2 DEFINIÇÃO DA MALHA IDEAL

O MDT utilizado como base de dados topográficos da região de estudo possui resolução horizontal de 1 metro, sendo considerado bastante detalhado, porém, o custo computacional para executar uma simulação de horas de duração, com uma grade de células de 1 m² em uma bacia hidrográfica que apresenta mais de 10 mil hectares torna inviável a simples transformação dos pixels do arquivo raster em células de escoamento de mesma área e cota de elevação. Portanto, faz-se necessário um rearranjo do arquivo raster de base de forma a elaborar um arquivo raster menos detalhado, com maior resolução horizontal. Tendo como base os estudos desenvolvidos por SOUSA *et al.* (2017) e HAILE e RIENTJES (2005), este procedimento era esperado em função da área de drenagem da bacia escolhida como estudo de caso do presente trabalho.

Em posse de todos os arquivos necessários para a criação da malha de células de escoamento na interface do MODCEL, o próximo passo consiste na definição da malha ótima, que apresente resolução horizontal suficientemente pequena para representar os trechos de drenagem da bacia e suficientemente grande para viabilizar a continuidade do presente trabalho em termos de custo computacional, quantificado como uma variável temporal.

O evento hidrológico utilizado para a análise e definição da malha ótima foi o mesmo evento utilizado para a calibração do modelo, que consiste em um evento de 3 dias de duração, distribuído temporalmente em 288 passos de tempo de 900 segundos. O evento de calibração, assim como seus parâmetros, será detalhado posteriormente.

5.2.1 Raster quadriculado 60 m x 60 m

No primeiro momento, foram feitos os arquivos ASCII para entrada na interface do MODCEL a partir de arquivo raster com 60 metros de resolução horizontal. O resultado foi uma malha com 30722 células e, conseqüentemente, um custo computacional de 3 dias. Foi atribuída a chuva referente ao evento de calibração e os resultados de manchas máximas podem ser vistos na Figura 5.1.

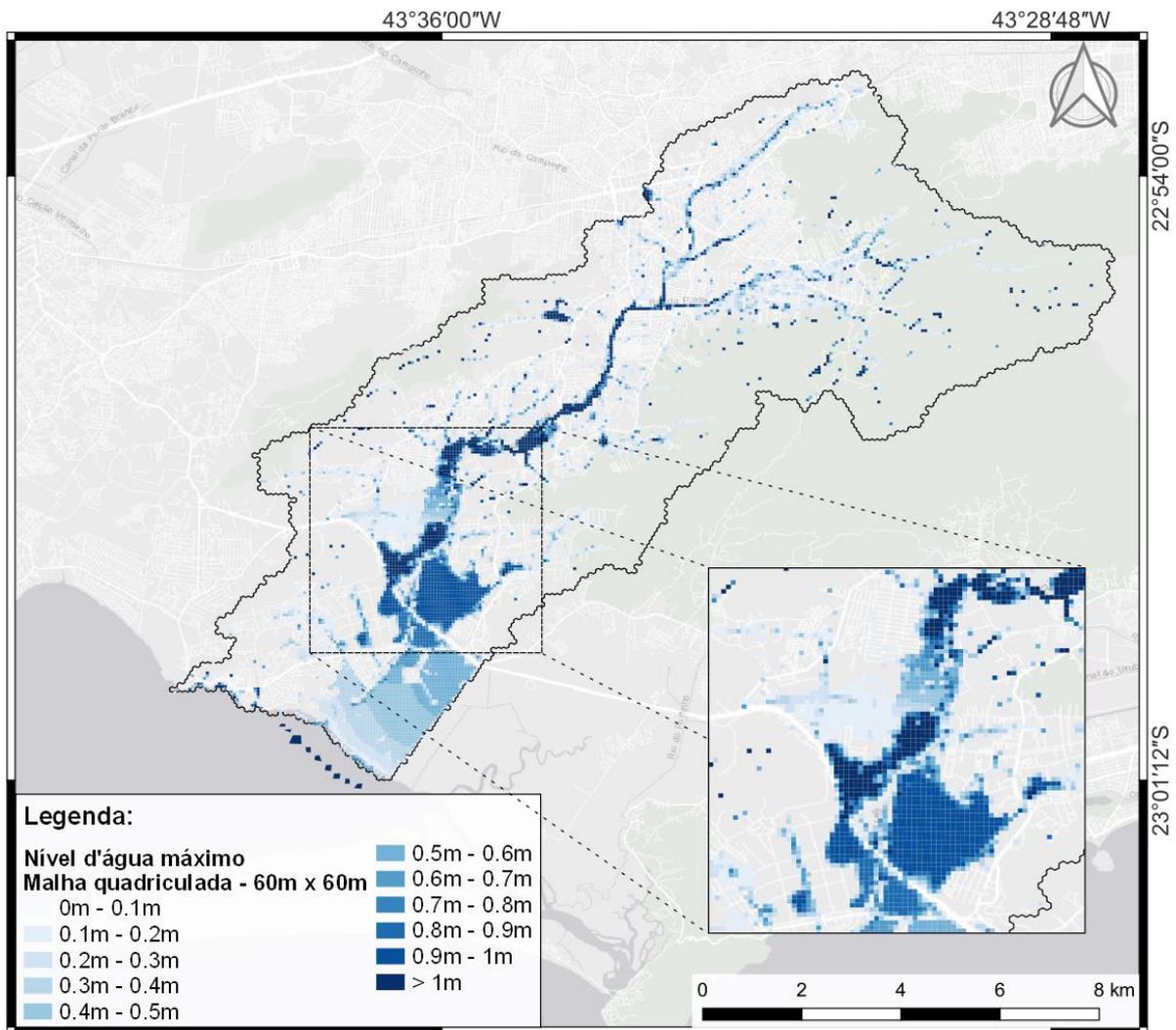


Figura 5.1 Mancha máxima de inundação – Raster quadriculado com malha de células de 60m x 60m

5.2.2 Raster quadriculado 90 m x 90 m

Uma alternativa para a redução do custo computacional associado ao modelo é o aumento da resolução horizontal adotada. Este aumento implica em uma maior simplificação da área de estudo e pode comprometer a representação do escoamento superficial na bacia, uma vez que as singularidades presentes no terreno possuem dimensões horizontais muito inferiores ao das células. O raster com 90 metros de resolução horizontal resultou em um grid com 13802 células, com um custo computacional inferior ao da Rodada 1, levando cerca de 14 horas para concluir a simulação.

Foi atribuída a chuva referente ao evento de calibração e os resultados de manchas máximas podem ser vistos na Figura 5.2.

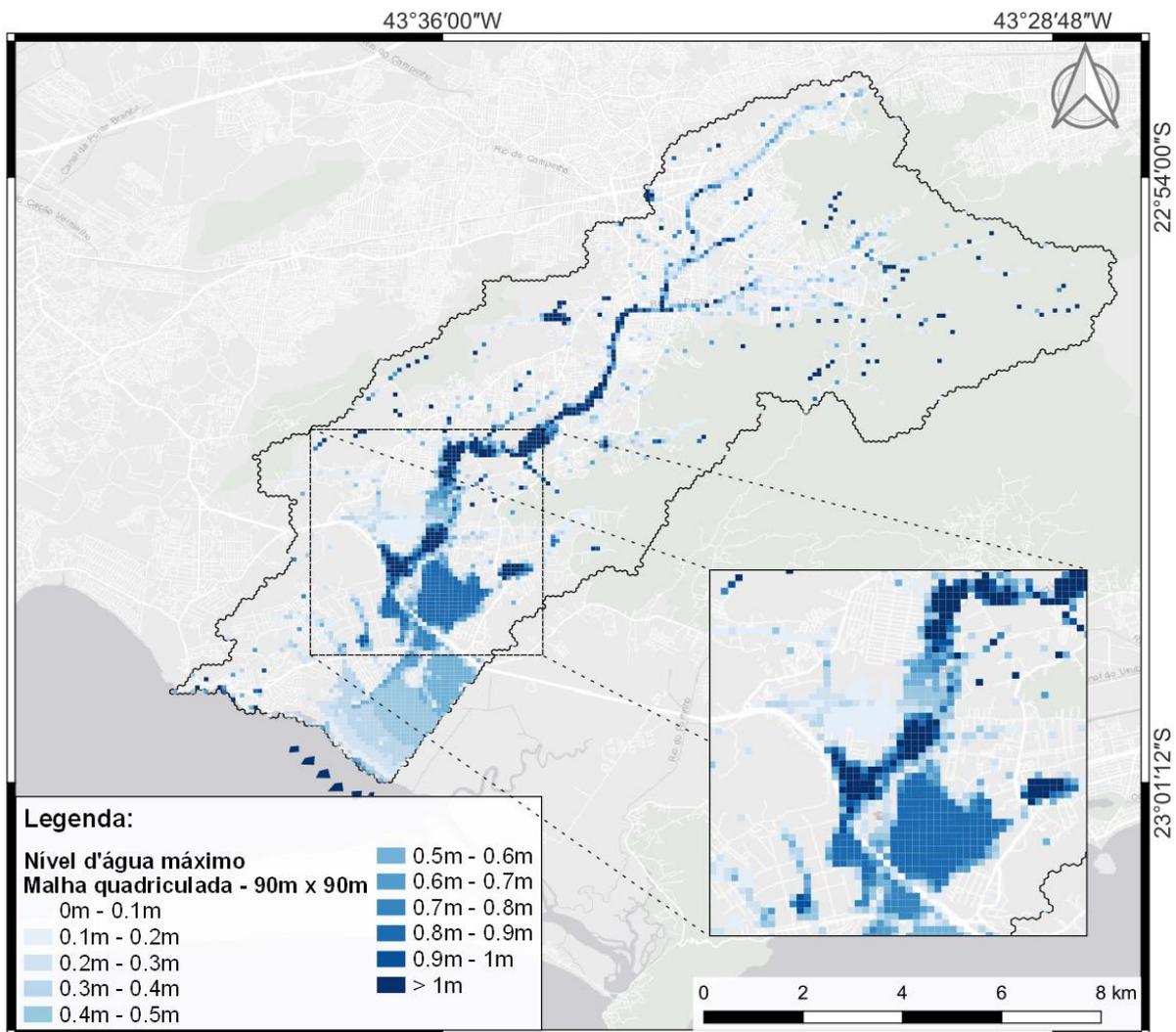


Figura 5.2 Mancha máxima de inundação – Raster quadriculado com malha de células de 90m x 90m

5.2.3 Raster quadriculado 120 m x 120 m

Buscando reduzir ainda mais o custo computacional associado, a terceira rodada de simulação corresponde a um raster com resolução horizontal de 120 metros, que resultou em um grid de 7860 células e um custo computacional ainda menor que o da Rodada 2, levando cerca de 06 horas para concluir a simulação. Foi atribuída a chuva referente ao evento de calibração e os resultados de manchas máximas podem ser vistos na Figura 5.3.

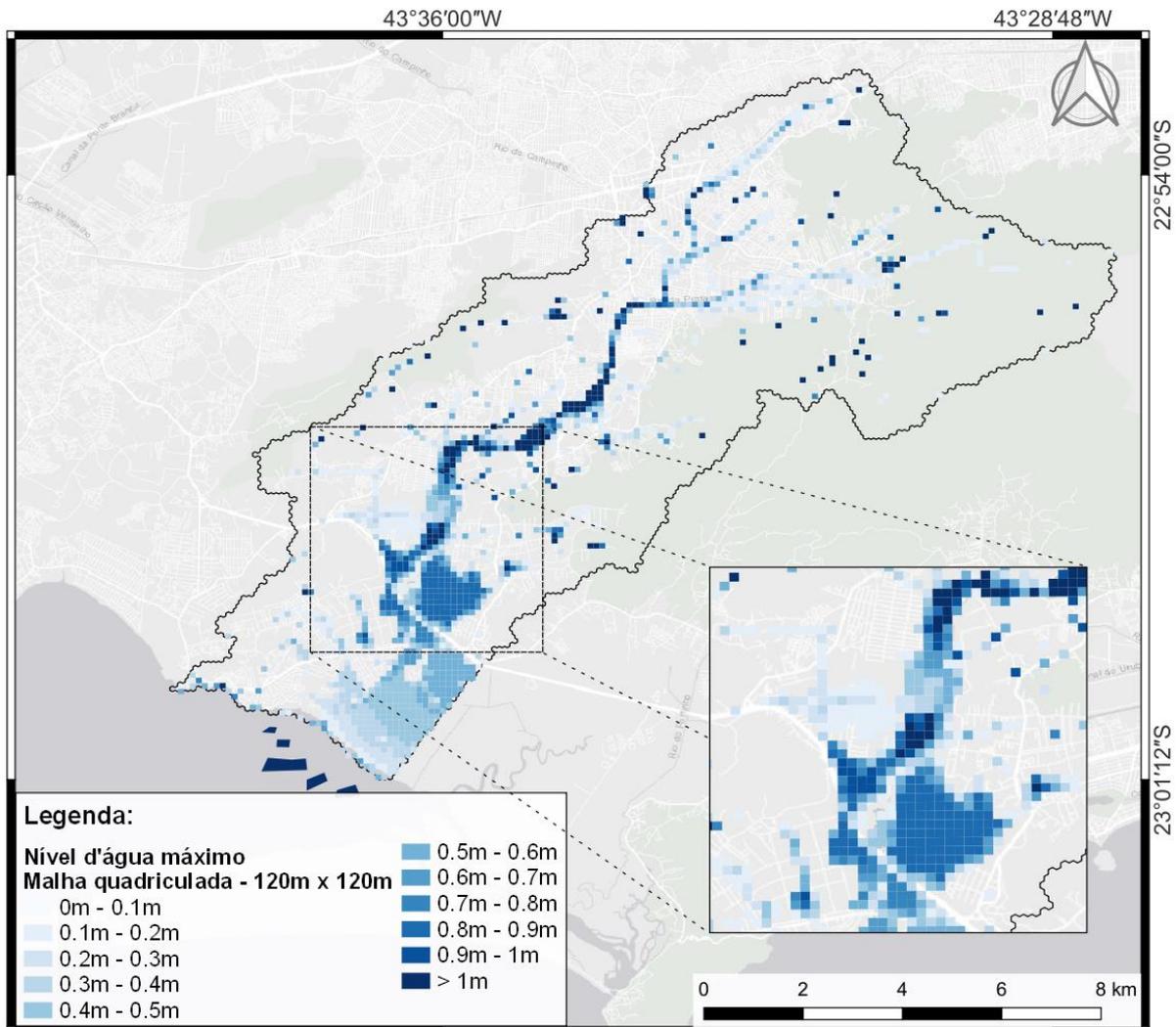


Figura 5.3 Mancha máxima de inundação - Raster quadriculado com malha de células de 120m x 120m

5.2.4 Raster hexagonal 90 m x 90 m

Apesar de apresentar menor custo computacional associado, a malha quadriculada com resolução horizontal de 120 metros dispõe de simplificações muito grosseiras no que diz respeito à representação da topografia do terreno. Esta análise é coerente com o limite superior definido por HUNTER *et al.* (2017), portanto, sua utilização foi descartada. Em relação aos

resultados das rodadas 1 e 2, não foram observadas diferenças significativas entre as manchas de inundação. Logo, visando um menor custo computacional associado, o raster com resolução horizontal de 90 metros passou a ser utilizado nas rodadas seguintes de calibração.

Uma limitação da simplificação utilizada para representar a bacia através de uma malha quadriculada é a existência de ligações apenas na horizontal ou na vertical, comprometendo a representação do escoamento em direções diagonais e resultando em manchas “isoladas” de inundação. Um exemplo pode ser observado nas células 1633, 1634, 1635, 1717, 1718, 1719, 1809, 1810 e 1911, que abrangem uma área urbanizada a jusante de uma encosta, localizada no bairro de Campo Grande. A representação gráfica da linha de escoamento superficial do terreno, tendo como base o MDT utilizado no presente trabalho, pode ser visto na Figura 5.4.

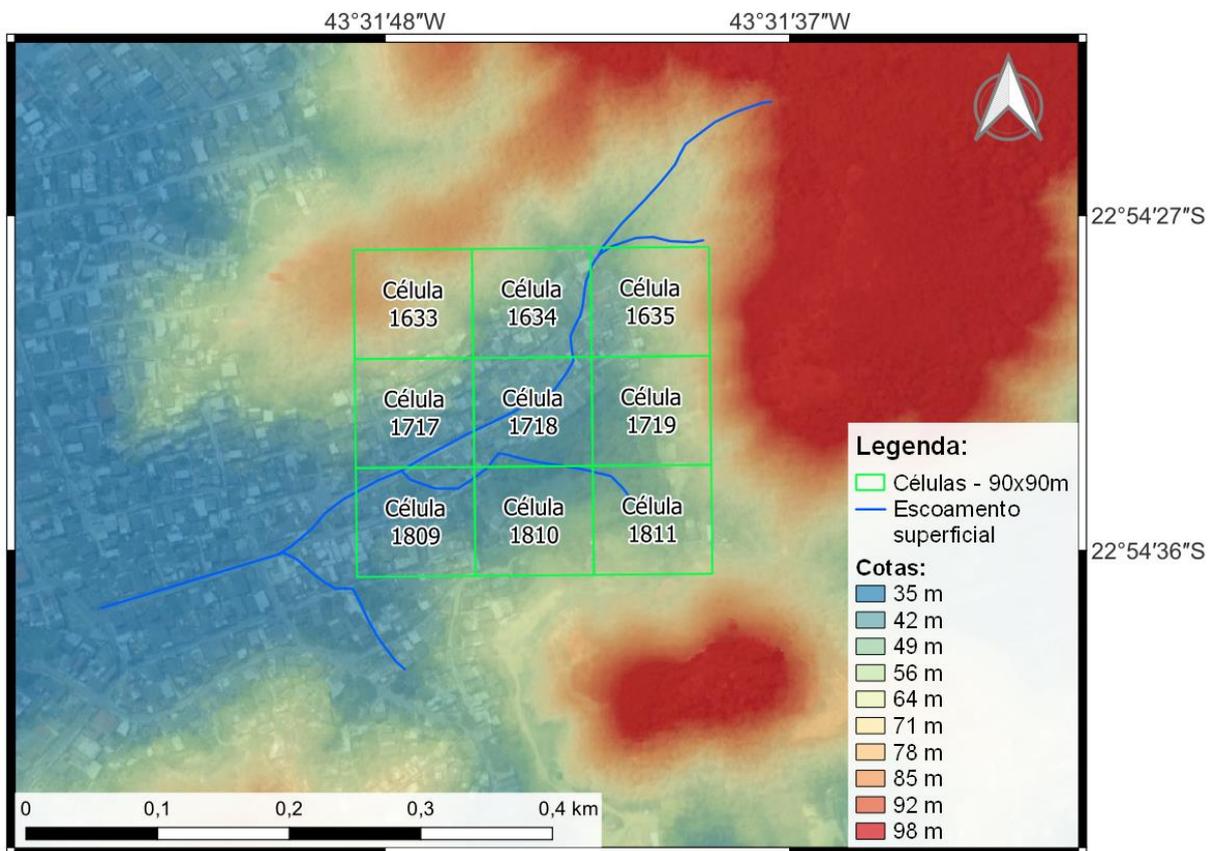


Figura 5.4 Exemplo de manchas isoladas de inundação – malha quadriculada

Os valores de cota de fundo e nível máximo de lâmina d’água resultante da simulação da modelo raster quadriculado com células de 90 x 90 metros estão dispostos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Tabela de atributos das células 1633, 1634, 1635, 1717, 1718, 1719, 1809, 1810 e 1911

ID	Cota de fundo (m)	NA máx. (m)
1633	66,44	0,00
1634	49,57	0,01

1635	56,60	0,01
1717	43,82	0,01
1718	41,41	1,75
1719	46,89	0,02
1809	41,38	0,02
1810	48,51	0,01
1811	57,10	0,00

Espera-se que o volume de água que aporta à célula 1718 siga na direção da célula 1809, entretanto, como as ligações unidimensionais utilizadas no modelo estão dispostas apenas nas direções horizontais ou verticais, o escoamento superficial acaba comprometido. Após a simulação, notou-se um acúmulo de água na célula 1718 (Figura 5.5) que não condiz com o fenômeno a ser representado no modelo.

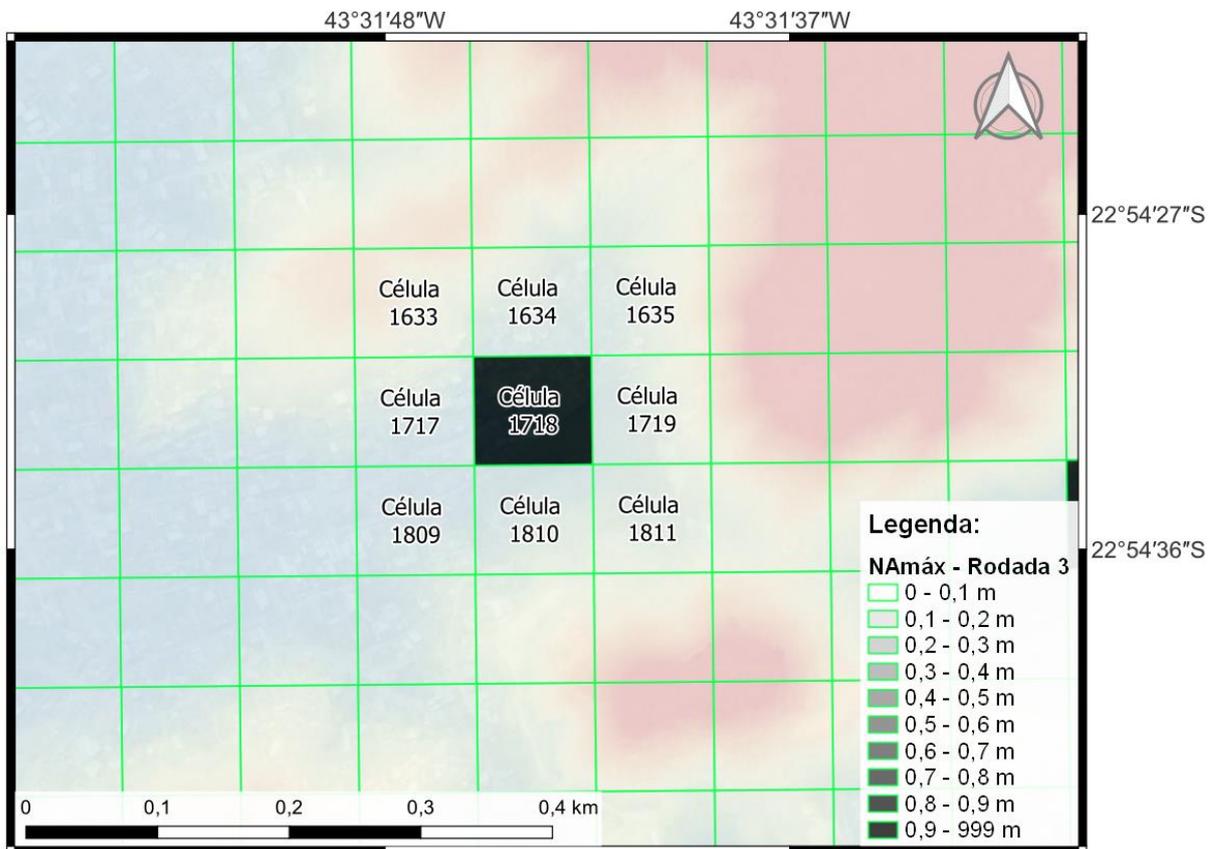


Figura 5.5 Mancha isolada de inundação

Sendo assim, com o objetivo de contornar as limitações da metodologia utilizada no que diz respeito à representação do escoamento superficial, o MODCEL dispõe de uma ferramenta para a conversão da malha quadriculada em uma malha com células hexagonais, passando de 4 para 6 ligações, todas unidimensionais, com as células vizinhas.

A chuva referente ao evento de calibração foi atribuída a uma malha hexagonal gerada a partir de um raster de resolução horizontal 90m x 90 m, com 11977 células, levando cerca de 14 horas para concluir a simulação. Os resultados de manchas máximas serão apresentados e discutidos no subcapítulo 6.1.1.

Levando em consideração o tempo demandado para completar uma rodada de simulação, assim como a representatividade do terreno e os resultados de manchas máximas obtidas, optou-se por dar sequência para o processo de calibração utilizando a malha de células hexagonais gerada a partir de um raster de resolução horizontal 90m x 90m, com cotas de fundo dispostas na Figura 5.6

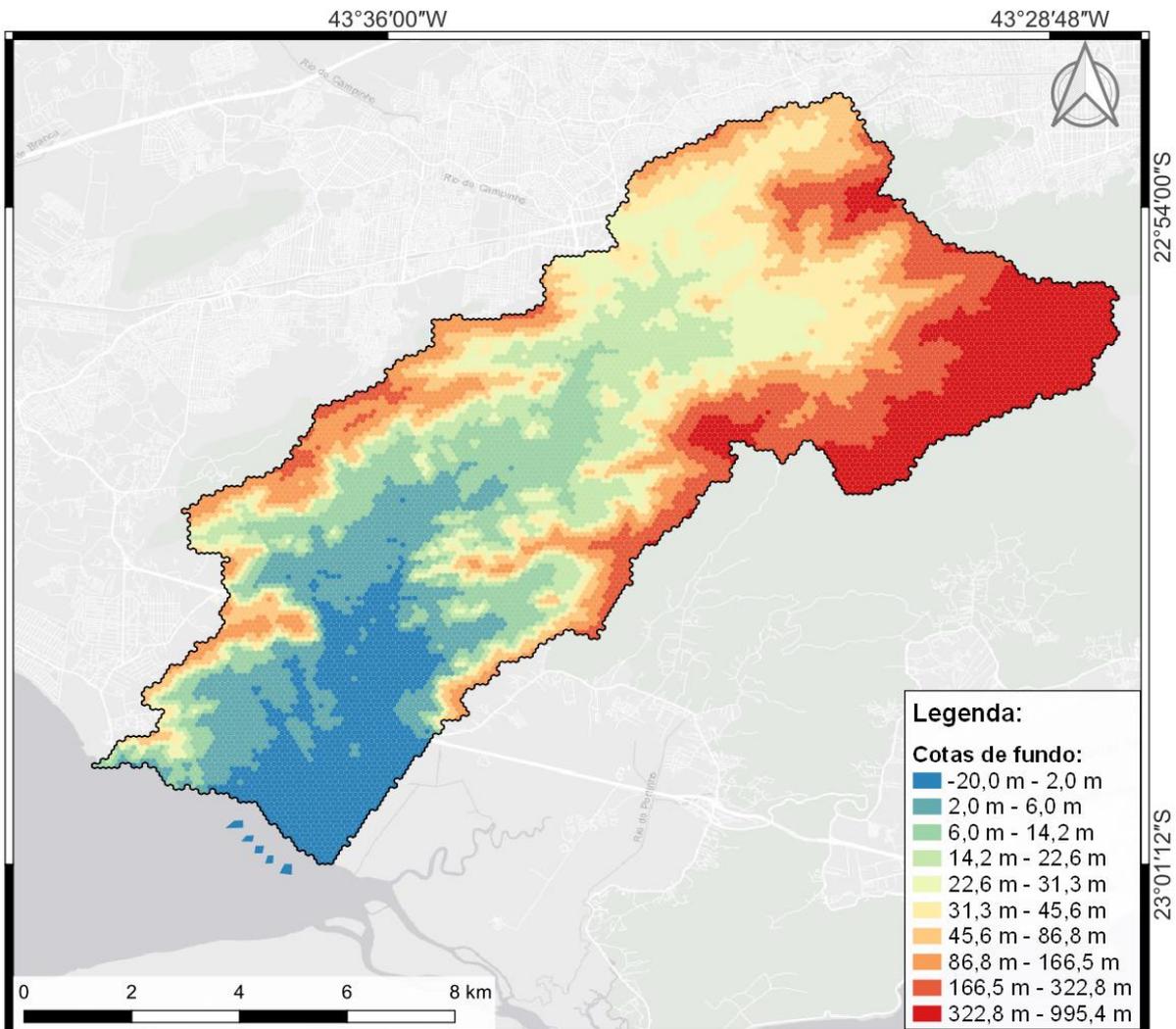


Figura 5.6 Cotas de fundo das células de escoamento da malha hexagonal – 90m x 90m

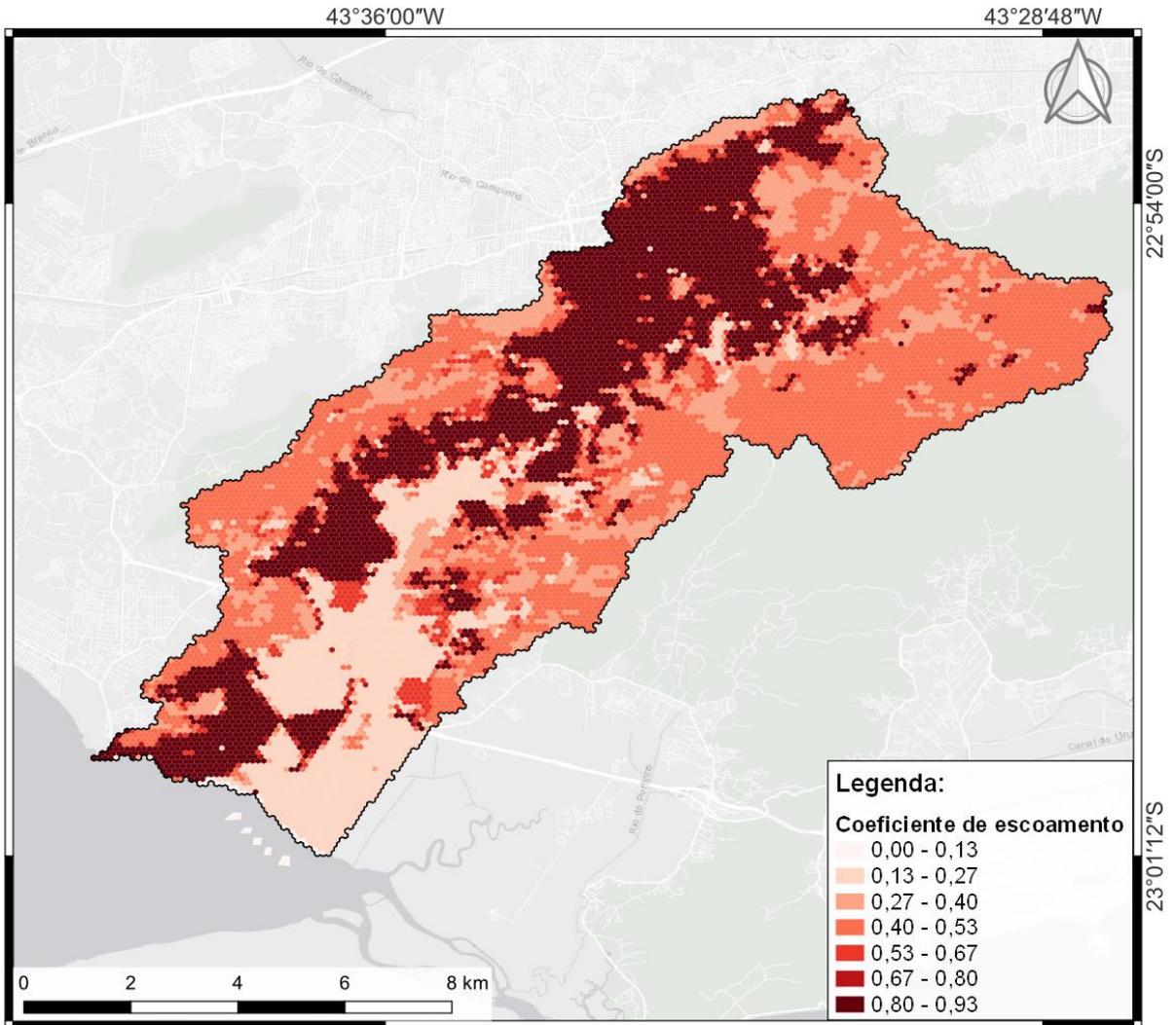


Figura 5.7 Coeficientes de escoamento das células de escoamento da malha hexagonal – 90m x 90m

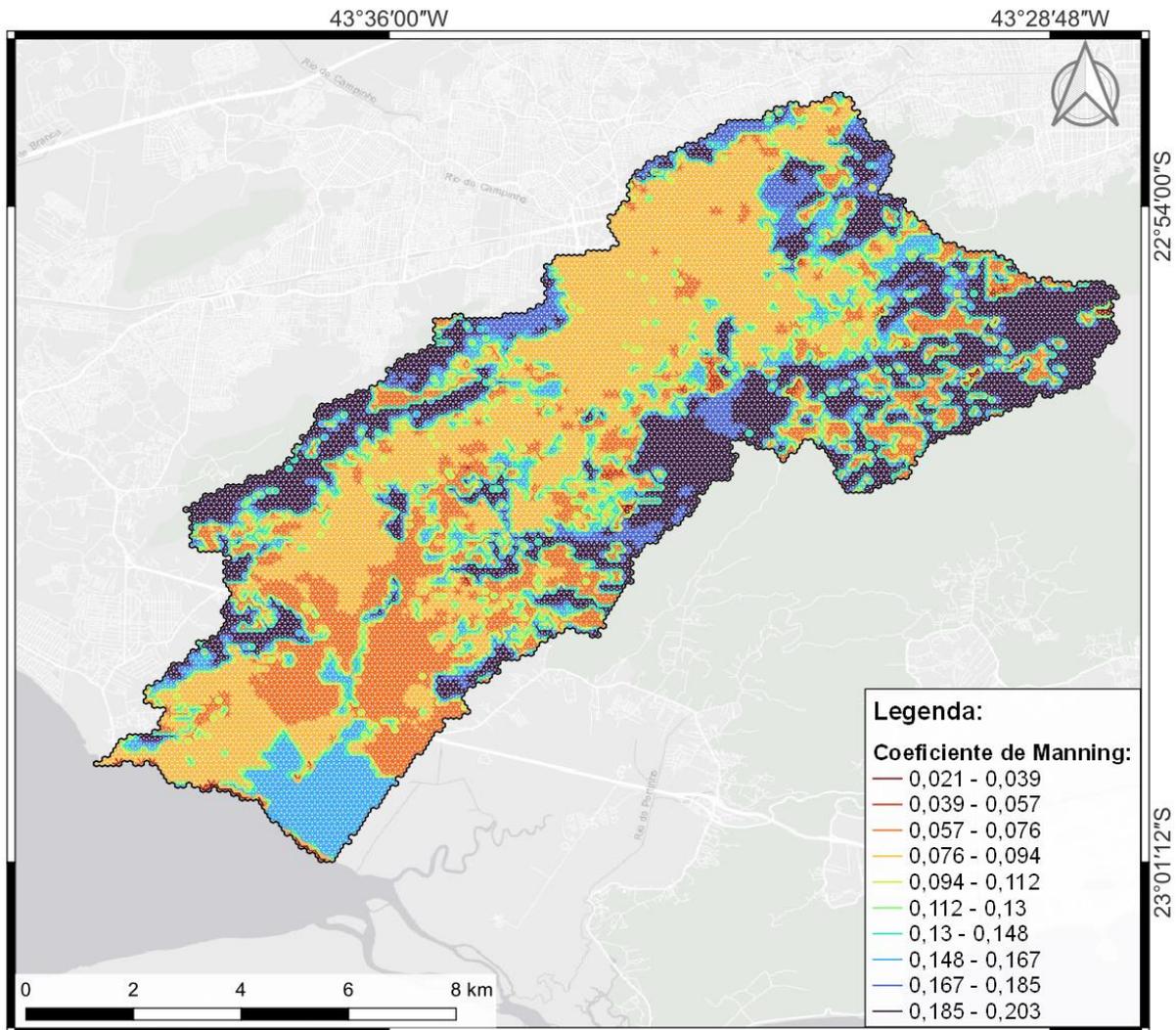


Figura 5.8 Coeficientes de Manning das ligações da malha hexagonal – 90m x 90m

5.3 PRINCIPAIS CANAIS DA BACIA

Depois da introdução dos arquivos ASCII com informações topográficas e de uso do solo na interface do MODCEL, tem-se uma malha de células onde cada uma possui valores médios das áreas englobadas pelas mesmas. De acordo com o arquivo *shapefile* contendo a hidrografia da bacia, disponibilizado pela equipe técnica do Laboratório de Água e Cidades da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAC-UFRJ), foi possível realizar uma análise espacial de forma a determinar que, para a malha de células de escoamento definida no subcapítulo 5.2.4, 18,9% das células do modelo tocam ou englobam canais, rios e/ou trechos de drenagem. Como destacado por PAZ (2010), BATES e DE ROO (2000) e outros autores que desenvolveram estudos voltados para a modelagem de cheias, a adoção da resolução horizontal superior à largura do canal principal pode comprometer a eficácia do modelo.

Sendo assim, as células correspondentes aos rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim foram manualmente modificadas. Foram utilizados levantamentos batimétricos realizados para a elaboração do Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro (2012) em diferentes seções dos rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim para subsidiar a correção dos valores de cota das células dos rios em questão. BATES e DE ROO (2000) ressaltam a atenção necessária também à largura das ligações entre as células dos canais, que configuram uma variável nas equações hidrodinâmicas utilizadas no modelo. Portanto, as ligações entre as células dos rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim foram ajustadas e em função das seções transversais levantadas em campo e disponibilizadas para o andamento do presente trabalho pela equipe técnica do LAC-UFRJ. Cabe ressaltar que este procedimento implica na consideração de que a seção transversal dos canais é retangular por toda a sua extensão. Uma consequência negativa dessas alterações consiste na não representação das áreas ribeirinhas próximas aos rios em questão, que possuem papel importante na troca de vazões entre os canais e a planície de inundação.

As células do modelo raster que passaram a representar exclusivamente os rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim, podem ser vistas na Figura 5.9.

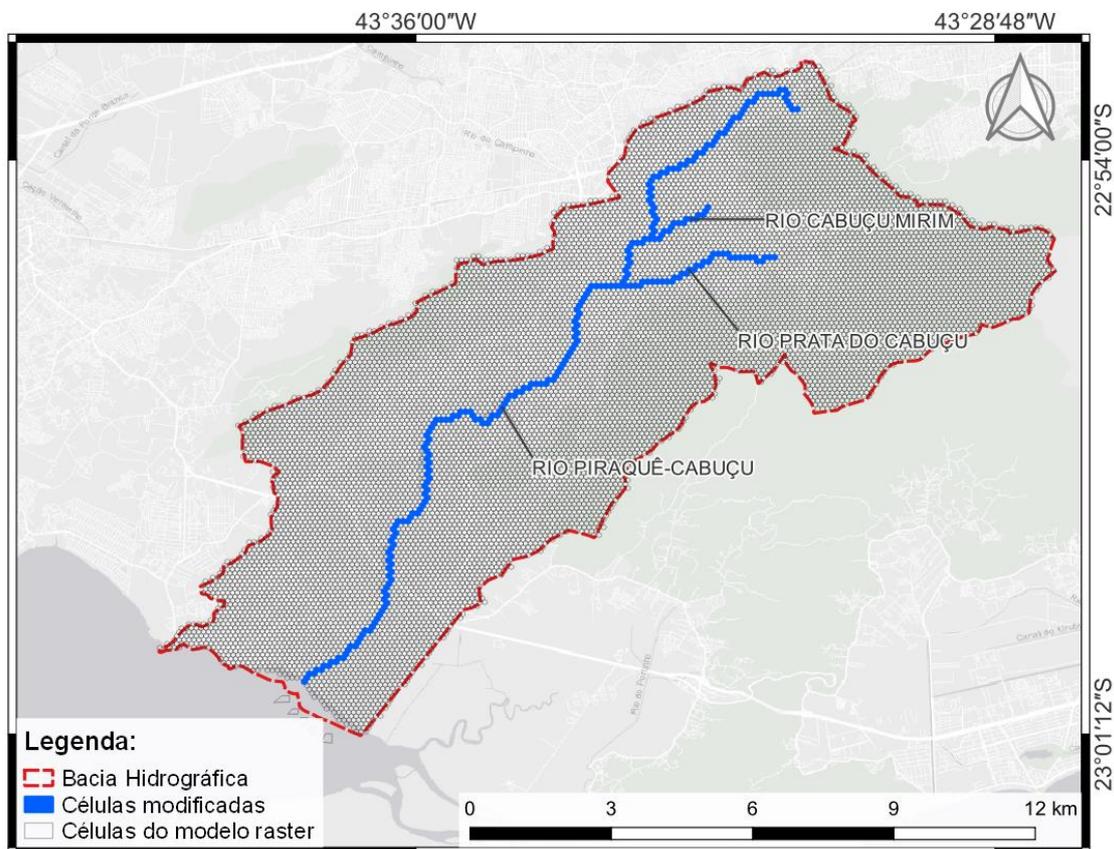


Figura 5.9 Células dos rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim

Apesar de ter sido realizado um tratamento das células que englobam os principais rios da bacia, tanto nos trechos canalizados como nos trechos naturais, não foi possível utilizar a mesma abordagem em outros trechos de drenagem e talvegues da bacia devido à falta de informações batimétricas e disparidade de dimensões entre a resolução horizontal adotada e a largura média dos canais.

Como destacado por HORRITT e BATES (2001a), a largura das ligações possui papel fundamental no comportamento do escoamento simulado. Áreas urbanas onde o escoamento se dá, majoritariamente, por trechos canalizados, passam a ter seu escoamento representado através de ligações com seção transversal quadrada e largura igual ao lado da célula. Pela fórmula de Manning, o escoamento no modelo é superestimado em função desta simplificação.

Um exemplo pode ser observado no trecho do Rio ABC, localizado em área urbanizada na margem direita do Rio Piraquê-Cabuçu, a jusante da Estrada da Matriz. É possível observar na Figura 5.10 que o canal ocupa cerca de 7% da área da célula que o engloba. Portanto, a cota de elevação do canal não possui impacto significativo no cálculo da cota de fundo da célula. além disso, a largura da ligação entre as células é cerca de 10 vezes superior à largura média do canal, facilitando a troca de vazões entre as células.

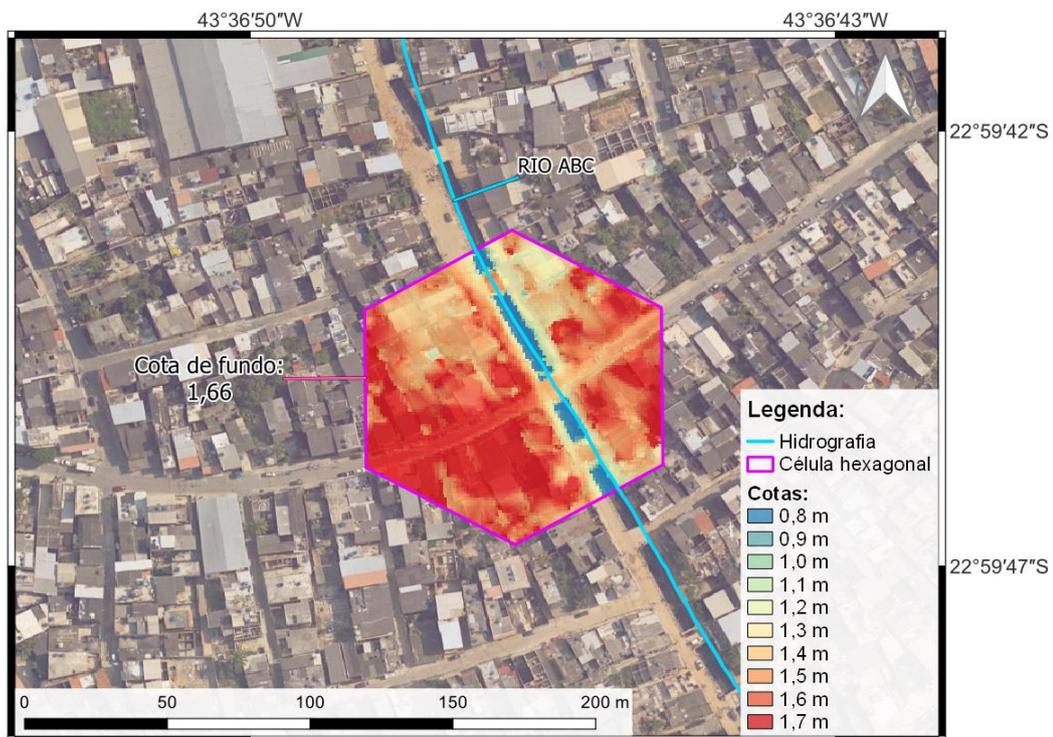


Figura 5.10 Exemplo de cota de fundo de célula hexagonal no Rio ABC

5.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO

A montante, a bacia é cercada por divisores de água, portanto, não são consideradas condições de contorno nesta região. A partir dos dados topográficos da bacia, nota-se que a área onde se localiza o trecho final do Rio Piraquê-Cabuçu consiste em uma região de baixas elevações, portanto, espera-se que as variações do nível d'água da baía de Sepetiba apresentem impactos significativos no comportamento das manchas de inundação da bacia. Sendo assim, a baía de Sepetiba foi representada no modelo como uma espécie de sumidouro, com cota de fundo e área de armazenamento suficientes para comportar todo o volume escoado durante o evento simulado, mas com nível d'água definido pela condição de contorno.

Para o evento de calibração, a variação do nível d'água da baía de Sepetiba disposto na Figura 5.11, com resolução temporal de 15 minutos, foi fornecido para o presente trabalho pela equipe técnica do LAC/UFRJ.

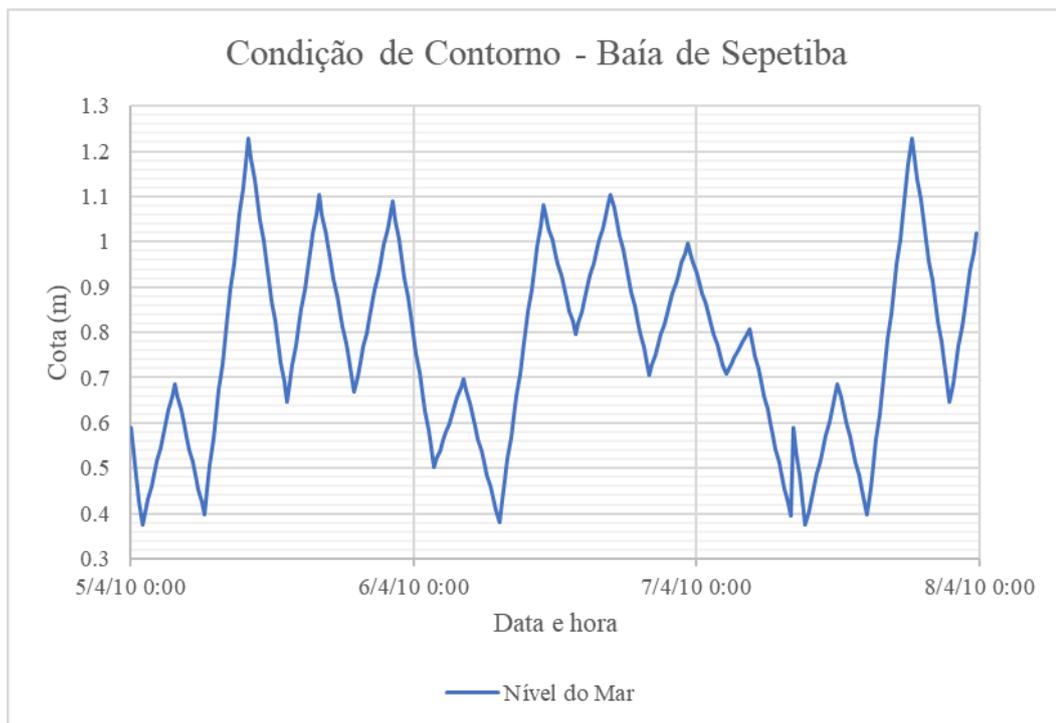


Figura 5.11 Variação do nível do mar para o evento de calibração

Para a realização das simulações relativas às chuvas de 10, 25 e 50 anos de recorrência, a condição de contorno que tem como finalidade representar o nível do mar na baía de Sepetiba assumiu valor constante de 0,5 metros. O valor adotado corresponde ao nível médio da preamar de sizígia para a baía de Sepetiba, de acordo com a RIO-ÁGUAS (2019).

5.5 CALIBRAÇÃO - CHUVA DE ABRIL DE 2010

O evento hidrológico escolhido para calibrar o modelo foi o ocorrido entre os dias 05 e 07 de abril de 2010, onde chuvas intensas atingiram o Estado do Rio de Janeiro, deixando feridos, mortos e desabrigados (GLOBO, 2010). O Sistema Alerta Rio, sistema de alerta de chuvas intensas e de deslizamentos em encostas da cidade, conta com uma rede de 33 estações telemétricas espalhadas por todas as regiões do município que coletam dados relativos a eventos hidrológicos com intervalos de 15 minutos. O evento ocorrido em abril de 2010 foi registrado em três estações pluviométricas no entorno da bacia: Campo Grande, Bangu e Guaratiba (Figura 5.12) possibilitando a sua utilização como evento de calibração do presente estudo. Cabe o destaque para duas estações pluviométricas próximas à região de estudo que atingiram valores expressivos durante o evento, a estação de Campo Grande, que atingiu a marca de 138,6 mm em 24 horas, e a de Guaratiba, que marcou 110,8 mm no mesmo intervalo de tempo. A Figura 5.13 apresenta a distribuição temporal das medições realizadas pelas estações durante o evento.

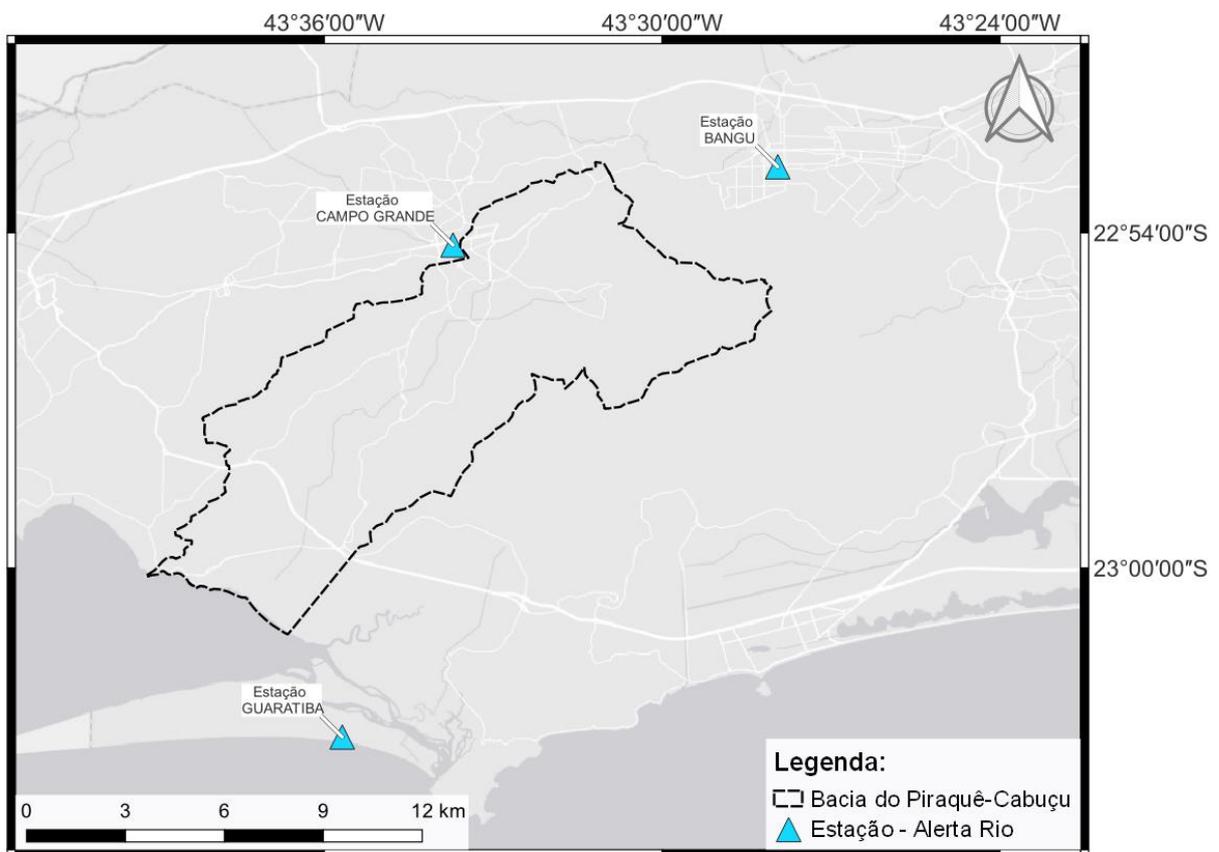


Figura 5.12 Localização dos postos pluviométricos

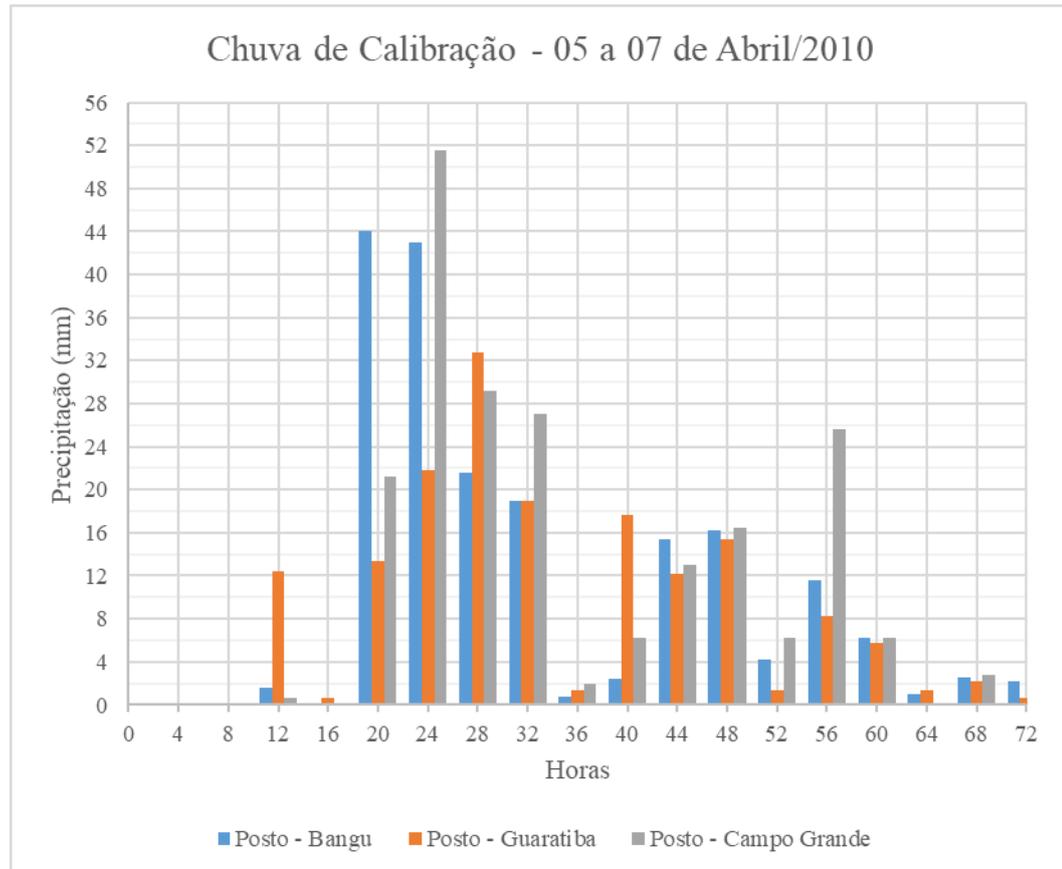


Figura 5.13 Precipitação do evento de calibração (ALERTA RIO, 2010)

De acordo com NKWUNONWO *et al.* (2020), um dos problemas enfrentados durante a etapa de calibração de modelos consiste na falta de instrumentos e/ou dados disponíveis para a própria calibração. Como não há, até o momento, série histórica de registros de vazões do rio Piraquê-Cabuçu, optou-se pela calibração a partir da mancha de inundação do modelo disposta no mapa da Figura 5.14, elaborado pela Fundação Rio-Águas e fornecido para o presente trabalho pela equipe técnica do LAC-UFRJ. Cabe ressaltar que a delimitação das manchas possui como base de dados as reclamações e registros de moradores locais, não apresentando atributos temporais ou de nível d'água.

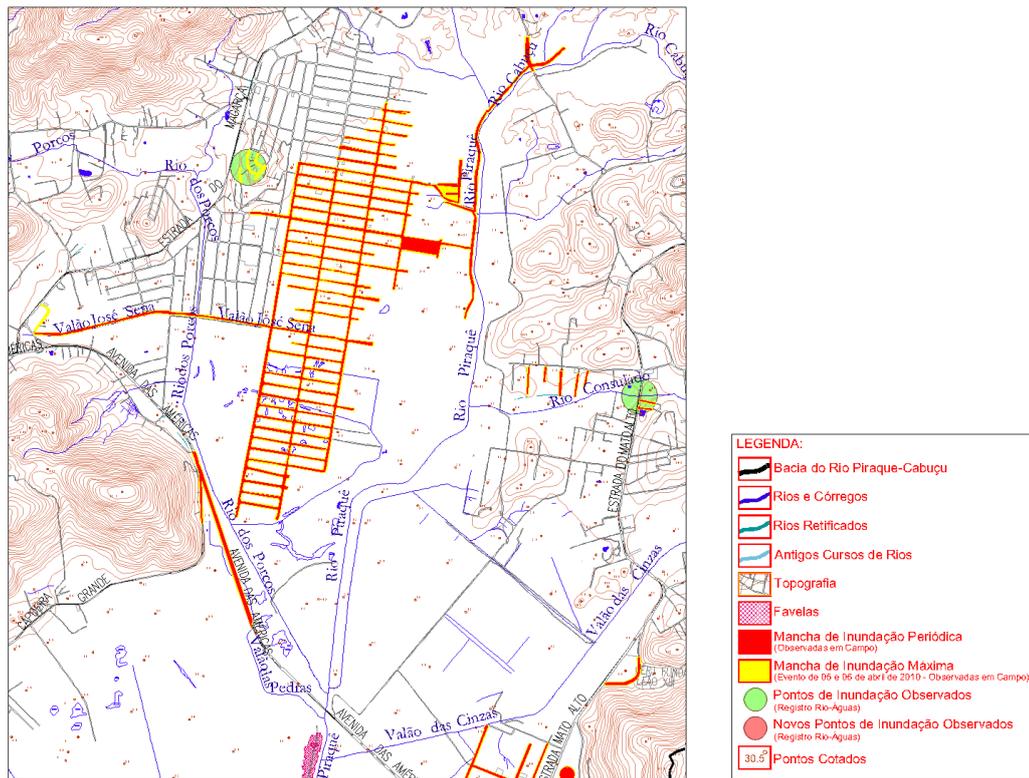


Figura 5.15 Mancha de inundação no Jardim Maravilha após o evento de abril de 2010 (RIO-ÁGUAS,2010)

Para a aplicação da metodologia descrita no subcapítulo 0, foram descartadas as células que não apresentam nenhuma porcentagem de ocupação urbana, dado que as manchas dispostas na Figura 5.14 foram estabelecidas a partir de observações em campo apenas no meio urbano, além das células de rios, em função do procedimento descrito no subcapítulo 5.3. Sendo assim, dentre as células restantes, as que tocam e/ou englobam as manchas dispostas na Figura 5.14 representam a área inundada pelo evento de calibração. A Figura 5.16 apresenta a disposição das células que foram usadas no processo de calibração, com destaque para a região do Jardim Maravilha, que apresenta maior área de ocorrência de inundação, de acordo com a Figura 5.14.

Em função da metodologia utilizada para a demarcação das manchas de inundação observadas após o evento de calibração, a mancha de inundação resultante do modelo consiste nas células que apresentam nível d'água máximo superior a 10cm.

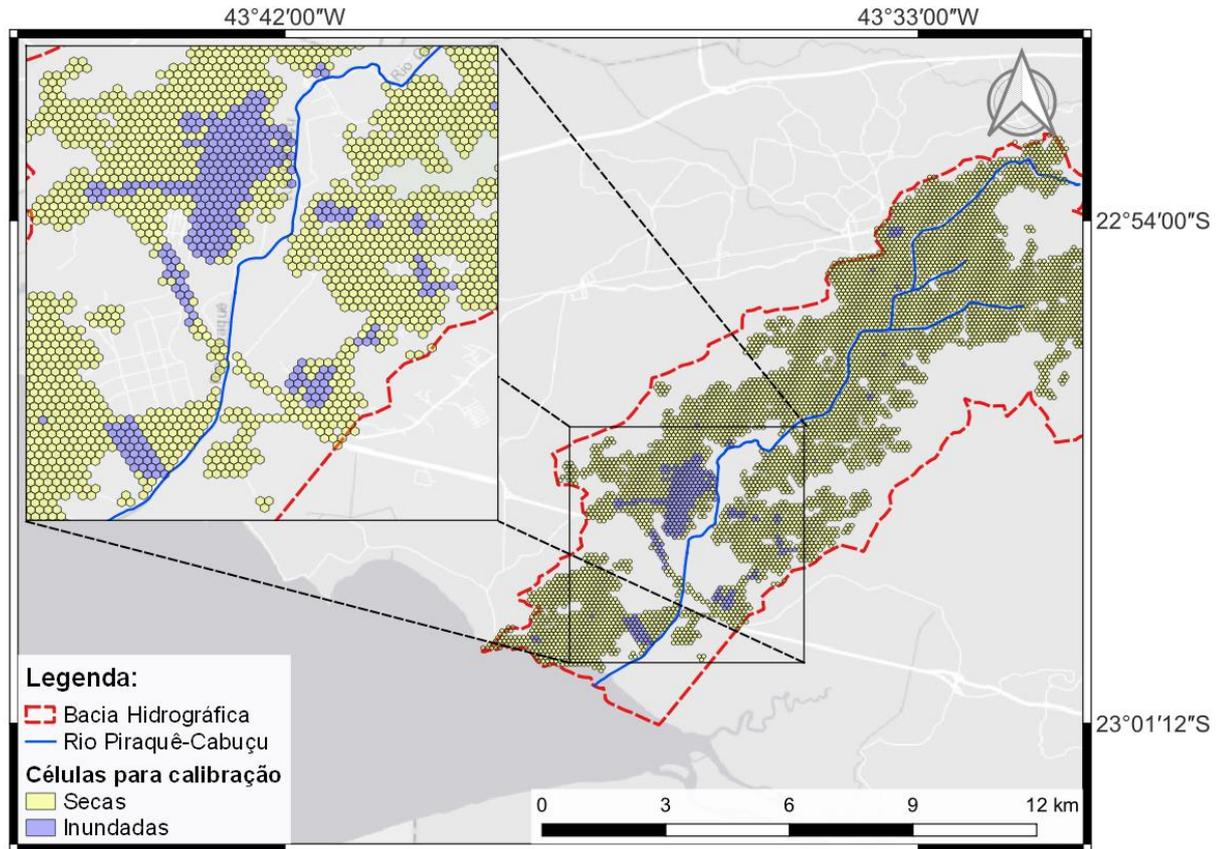


Figura 5.16 Células para calibração do modelo

Como descrito por MIGUEZ (2001), a etapa de calibração aborda uma série de ajustes e hipóteses simplificadoras com o objetivo de tornar o modelo um espelho do fenômeno real a ser representado. No presente estudo, além de ajustes pontuais de coeficientes de escoamento, rugosidade, larguras de ligações e cotas de fundo, a alteração com maior impacto consiste no rebaixamento das células dos rios Piraquê-Cabuçu, Prata do Cabuçu e Cabuçu Mirim com base nas informações batimétricas disponíveis.

Ao final da etapa de ajuste de coeficientes, foram realizadas simulações com chuvas de 10, 25 e 50 anos de tempo de recorrência com objetivo de avaliar a mancha máxima de inundação resultante destes eventos, identificando os principais pontos de alagamento da bacia.

6 RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do modelo Raster acoplado ao MODCEL para representação do escoamento superficial da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, foram analisados todos os resultados obtidos ao longo do processo de calibração através do cálculo de índices de desempenho de forma a embasar a definição dos potenciais e limitações do emprego da metodologia utilizada no presente trabalho. Ao longo deste processo, foram realizadas diversas correções, ajustes e testes de sensibilidade, porém, é possível subdividir o processo de calibração em etapas, que marcam 5 os resultados principais obtidos:

1. Simples transformação automática dos dados topográficos e de uso do solo para uma grade de células de escoamento com resolução horizontal previamente definida, gerando o Modelo 1;
2. O tratamento das células do Rio Piraquê-Cabuçu e ajuste de coeficientes de ligação, de escoamento, cotas de elevação e singularidades da bacia englobam as rodadas de número 3 a 17, gerando o Modelo 2;
3. A terceira etapa consiste no tratamento das células dos rios Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim e engloba as rodadas 18 a 22, chegando ao Modelo 3;
4. A quarta etapa consiste no ajuste das condições de contorno, que teve como resultado o Modelo 4;
5. A quinta e última etapa contempla a correção das larguras das ligações geradas automaticamente pela interface do MODCEL, resultando no Modelo 5.

De forma complementar, foram aplicadas chuvas 10, 25 e 50 anos de recorrência, calculadas a partir da equação IDF definida pela Fundação Rio-Águas para a região de estudo. Cabe ressaltar que o tempo de concentração da bacia foi estabelecido através da aplicação de uma chuva de intensidade constante com duração suficiente para contemplar a vazão máxima no hidrograma de saída da bacia. A finalidade destas simulações consiste na identificação das regiões da bacia com maior suscetibilidade a inundações frente a eventos de cheias, de forma a subsidiar o processo de tomada de decisões no que diz respeito ao direcionamento de ações estruturais e não-estruturais para auxiliar a população local frente ao risco de desastres.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos ao longo do estudo, divididos em duas etapas: calibração e suscetibilidade a inundações.

6.1 CALIBRAÇÃO

O presente subcapítulo tem como objetivo expor as manchas máximas de inundação resultantes de quatro principais rodadas de simulação, além da discussão acerca dos índices de desempenho calculados de forma a embasar a definição das principais características da metodologia adotada.

6.1.1 Modelo 1

A primeira rodada de simulação foi realizada atribuindo o evento hidrológico ao modelo gerado pela simples conversão dos pixels do raster em células de escoamento, com coeficientes de escoamento, rugosidade e cotas de fundo médias das áreas englobadas por cada célula (Modelo 1). As manchas máximas de inundação resultantes da simulação podem ser vistas na Figura 6.1.

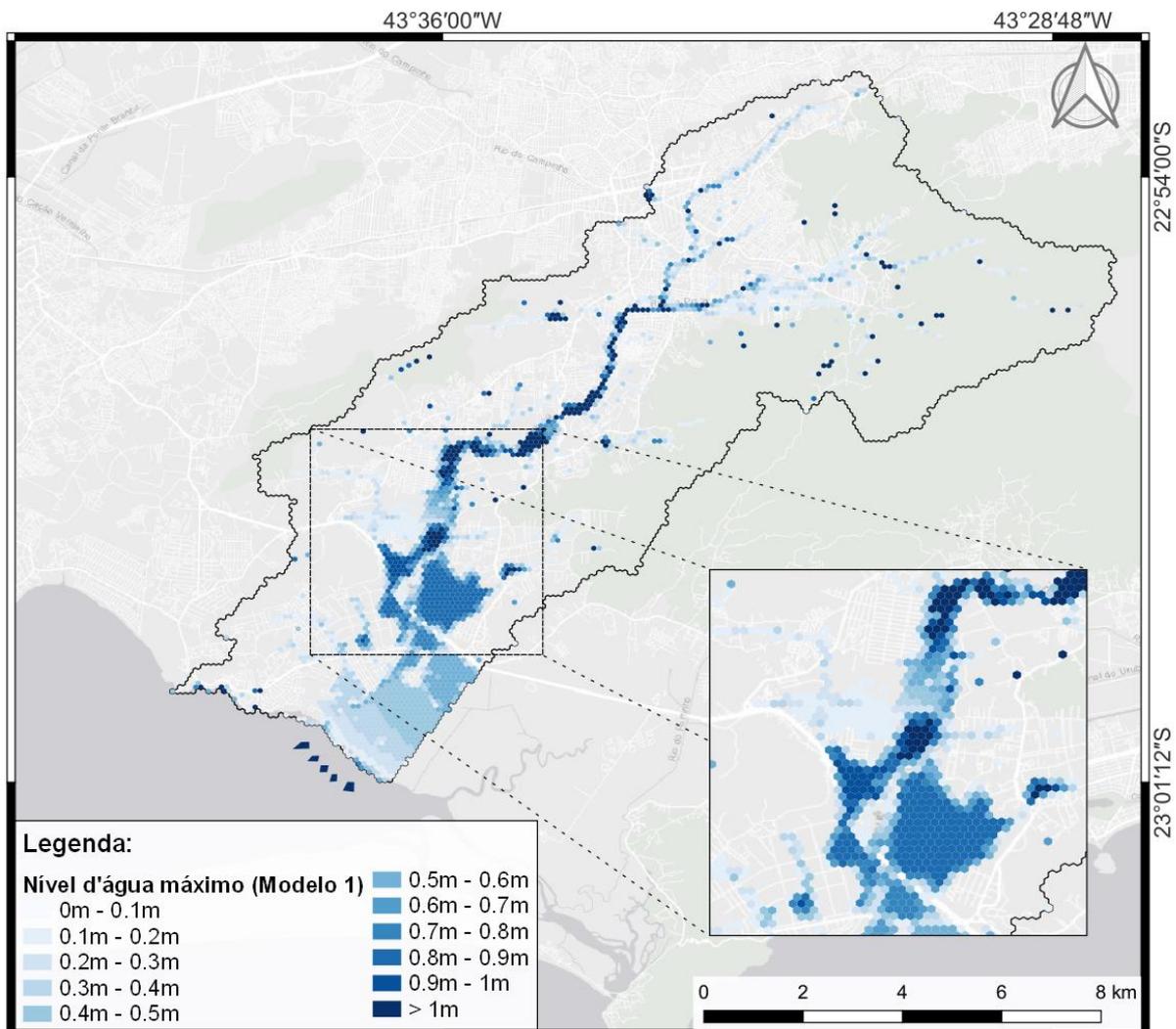


Figura 6.1 Mancha máxima de inundação do Modelo 1

A metodologia de calibração adotada no presente trabalho consiste na comparação pixel a pixel com o limite de 10cm de lâmina d'água para diferenciar as células alagadas das secas. Portanto, a Figura 6.2 apresenta as células que compõe a análise pixel a pixel, enquanto os índices de desempenho estão dispostos na Tabela 6.1.

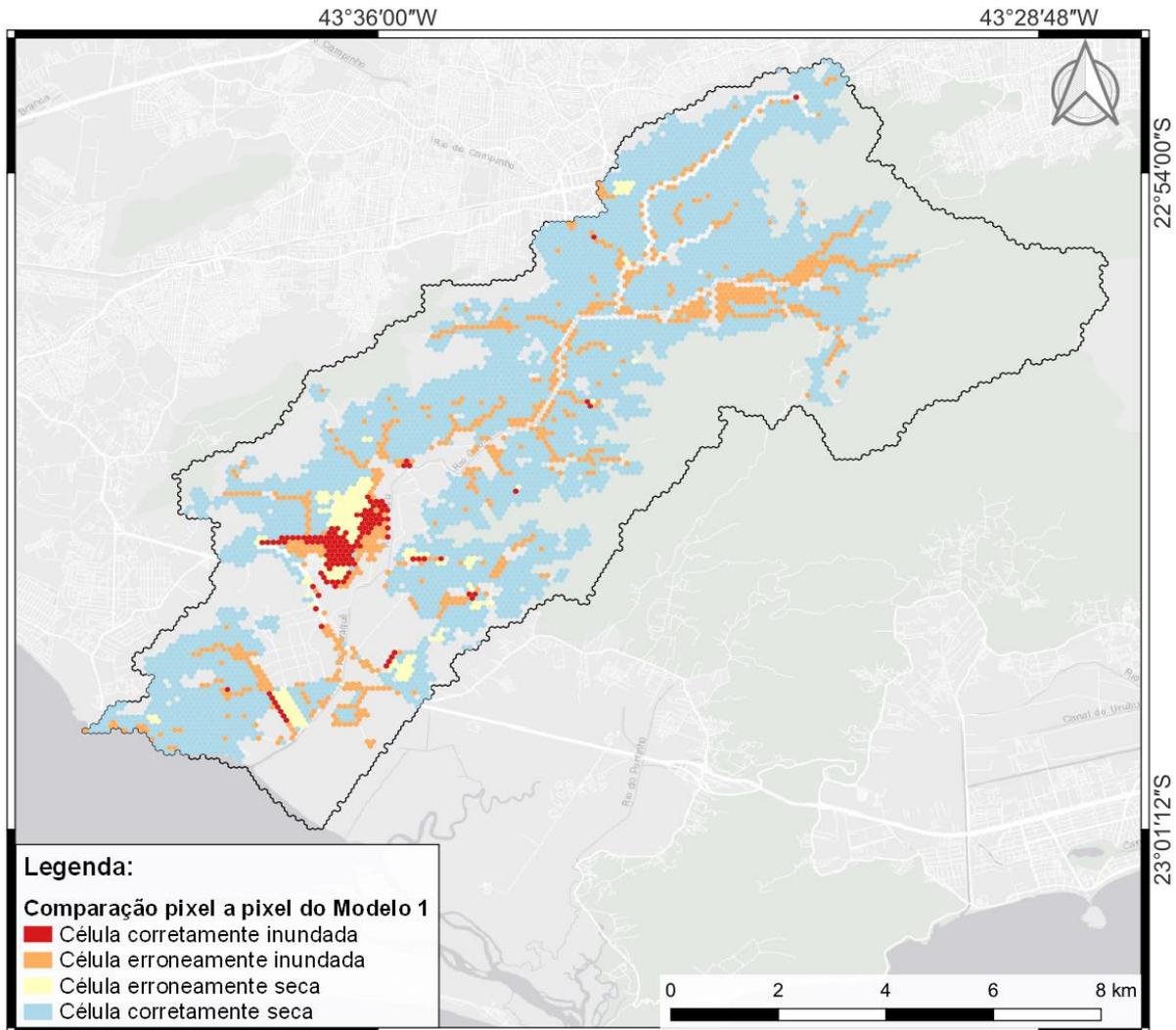


Figura 6.2 Comparação pixel a pixel do Modelo 1

Tabela 6.1 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 1

Índice De Desempenho	Valor
PC	0,819
ISC	0,114
POD	0,416
TAF	0,864
BIAS	3,053

6.1.2 Modelo 2

Conforme sugerido por diversos autores que desenvolveram trabalhos e estudos envolvendo a modelagem do tipo raster, foi realizado um tratamento das células que compõe o principal canal da bacia em função das dimensões das células de escoamento que compõe a grade do modelo. A partir do modelo inicial, foi realizado o rebaixamento das células do Rio Piraquê-Cabuçu conforme a metodologia descrita no capítulo 3. Além disso, foram realizadas alterações pontuais com o objetivo de aferir maior representatividade ao escoamento superficial simulado pelo modelo, como:

- Elevação das células da Avenida das Américas para impedir o escoamento sobre a rodovia;
- Ajuste dos coeficientes de escoamento superficial das células do Rio Piraquê-Cabuçu;
- Definição do coeficiente de Manning para as ligações entre as células do Rio Piraquê-Cabuçu para os dois tipos de canal: em concreto e terreno natural, levando em consideração a existência de obras de arte especiais (OAEs) ao longo do rio;
- Ligações entre planície e Rio Piraquê-Cabuçu passaram a ser representadas como um vertedor;
- Ajuste manual da cota das ligações nas margens do Rio Piraquê-Cabuçu, a montante da Avenida das Américas, de forma a representar os diques existentes no local, ilustrados na Figura 6.3;

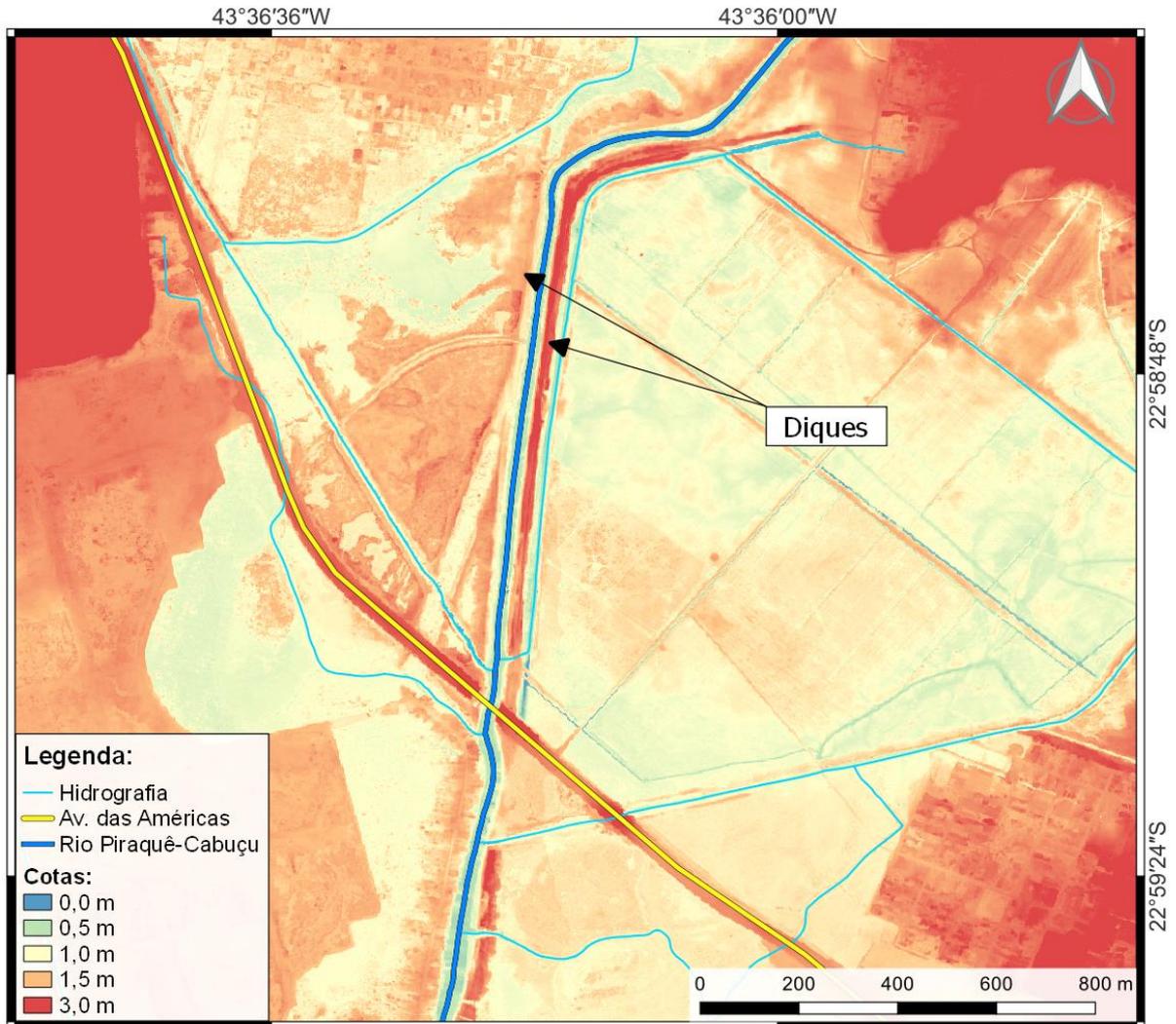


Figura 6.3 Diques existentes nas margens do Rio Piraquê-Cabuçu

- Ajuste de coeficientes das células e ligações localizadas na região do Jardim Maravilha.

Cabe ressaltar que tais modificações foram realizadas ao longo de 16 rodadas de simulação do evento de calibração até chegar ao Modelo 2, cujos resultados estão dispostos na Figura 6.4. Os índices de desempenho de simulação podem ser vistos na Tabela 6.2, enquanto a comparação pixel a pixel está disposta na Figura 6.5.

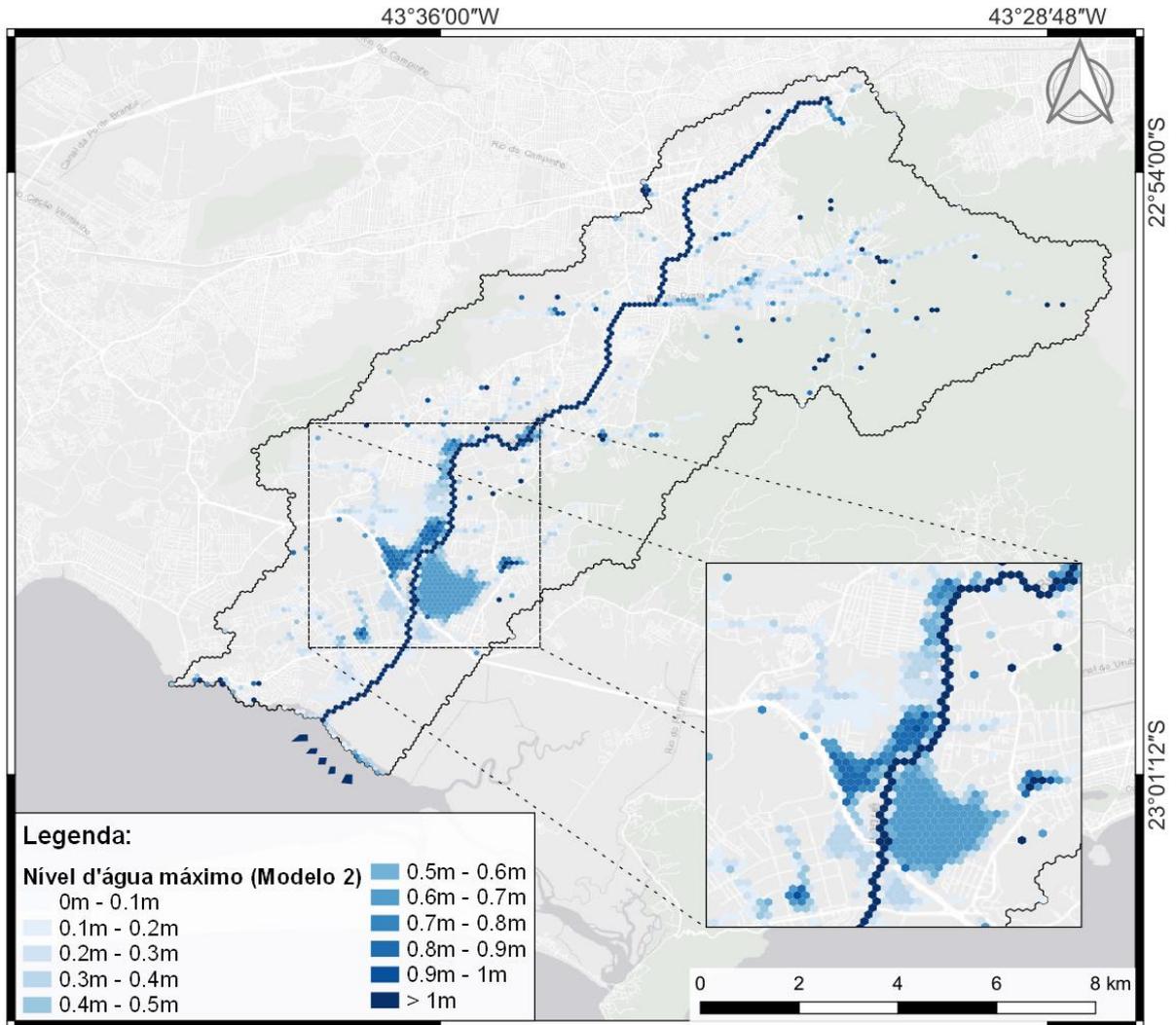


Figura 6.4 Mancha máxima de inundação do modelo com Rio Piraquê-Cabuçu rebaixado

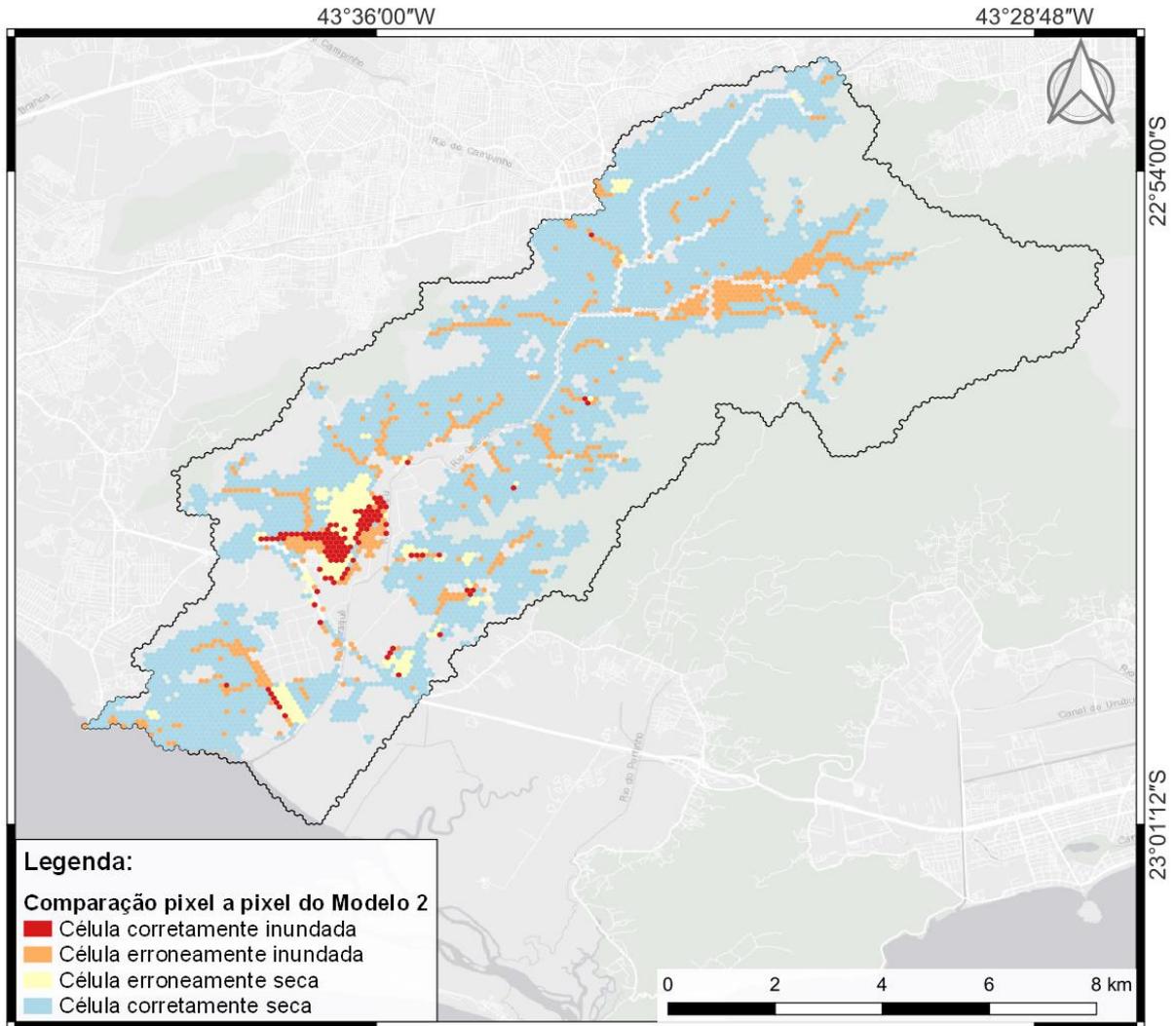


Figura 6.5 Comparação pixel a pixel do Modelo 2

Tabela 6.2 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 2

Índice De Desempenho	Valor
PC	0,843
ISC	0,113
POD	0,356
TAF	0,858
BIAS	2,500

Com o rebaixamento das células do Rio Piraquê-Cabuçu, notou-se uma redução da mancha máxima de inundação, principalmente nas células que margeiam o principal corpo hídrico da bacia. Este resultado era esperado, uma vez que a diferença de cotas entre as células do rio e suas vizinhas aumentou, dificultando o fluxo de água do rio para a planície.

Em relação aos índices de desempenho, foi observada uma redução de cerca de 18% da taxa de tendência (BIAS), que é determinada pela razão entre as células inundadas pelo modelo

sobre as células inundadas observadas, ou seja, houve uma redução do superdimensionamento da mancha máxima de inundação.

6.1.3 Modelo 3

Dada a disponibilidade de dados batimétricos dos Rios Prata do Cabuçu e Cabuçu Mirim, foi realizado o rebaixamento das células que o englobam de forma análoga ao procedimento realizado para representar o Rio Piraquê Cabuçu ao longo de novas 3 rodadas de simulação. A mancha máxima de inundação resultante do Modelo 3 está disposta na Figura 6.6. A Figura 6.7 ilustra os resultados da comparação pixel a pixel, enquanto os índices de desempenho estão dispostos na Tabela 6.3.

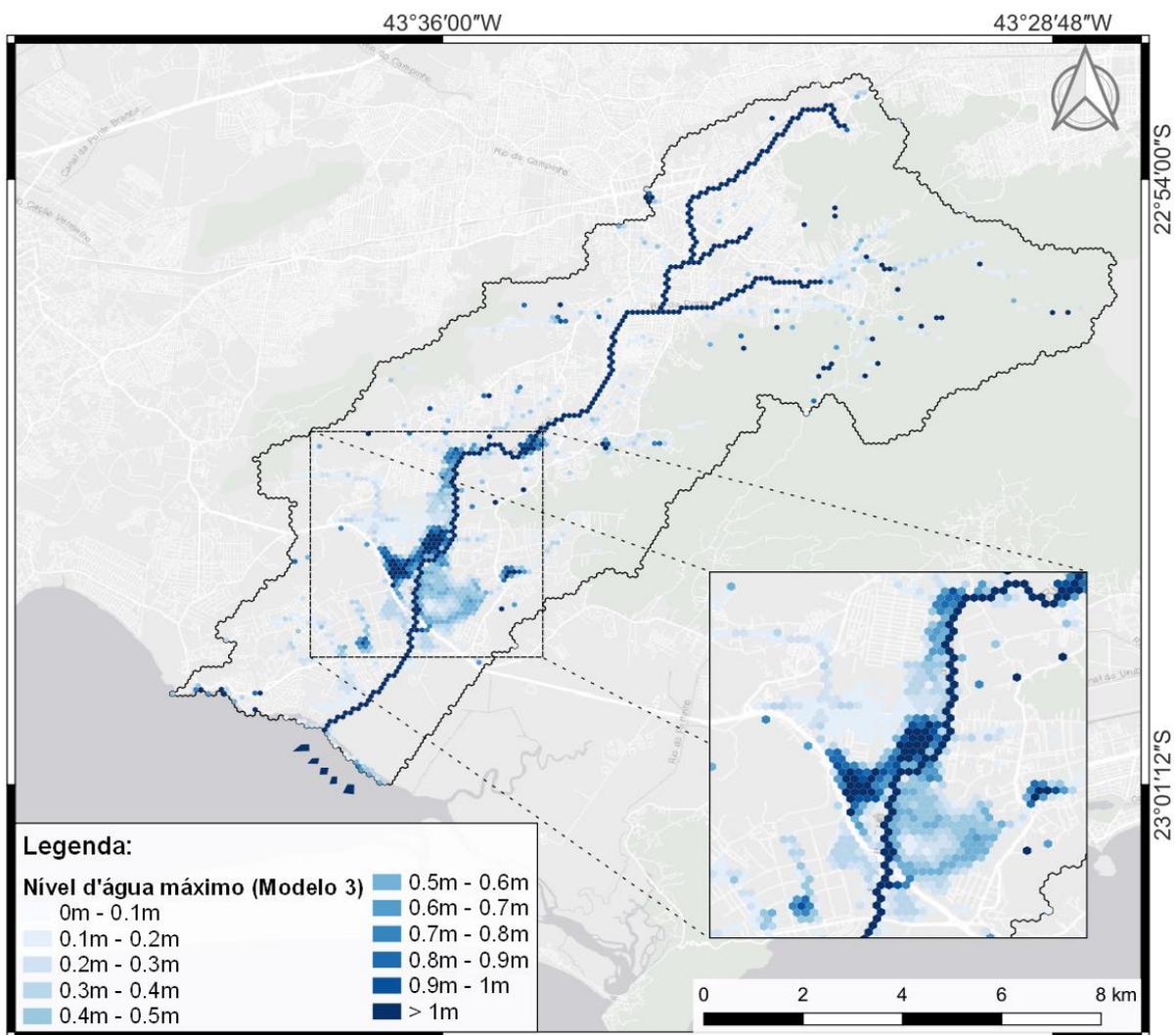


Figura 6.6 Mancha máxima de inundação do Modelo 3

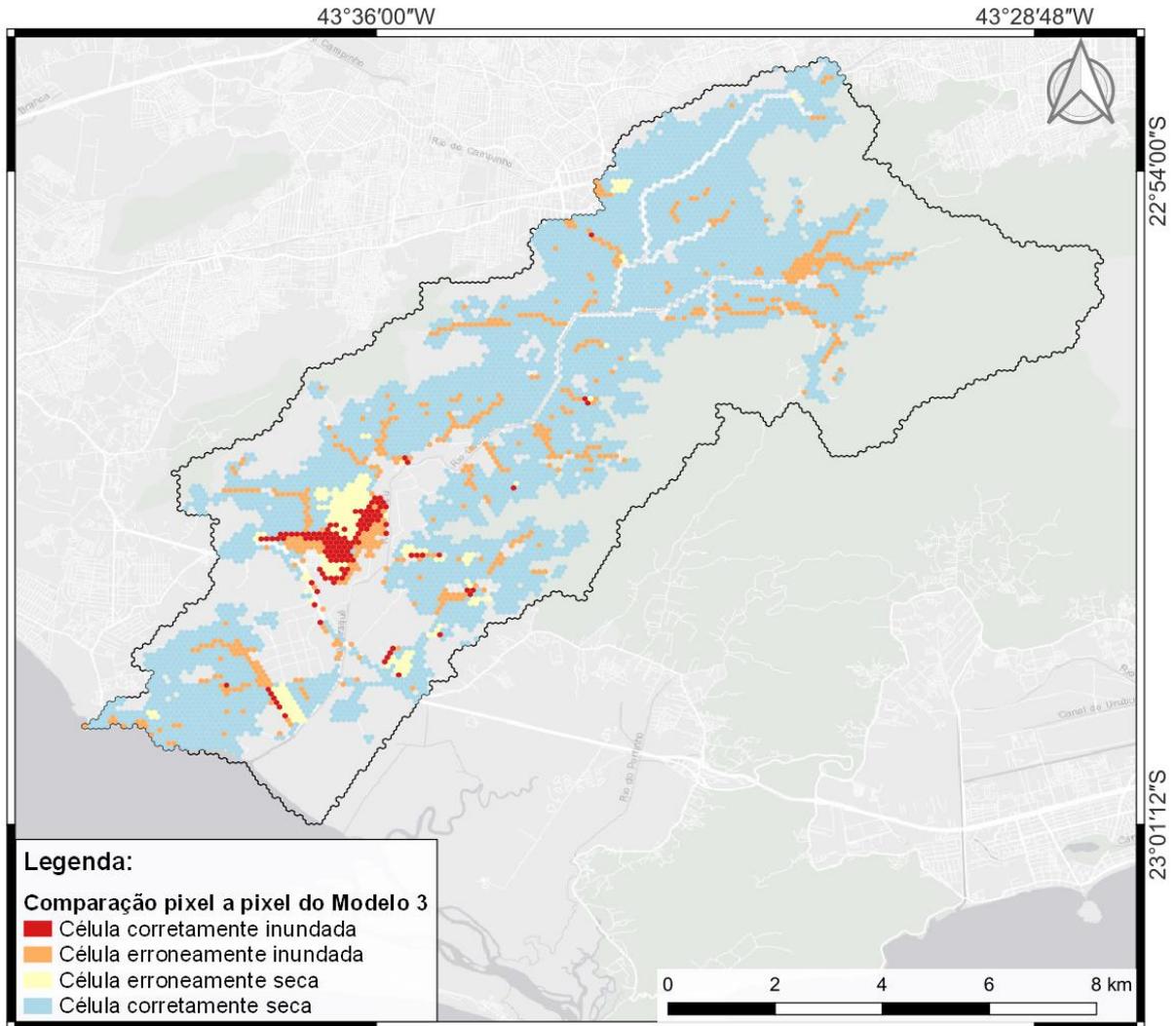


Figura 6.7 Comparação pixel a pixel do Modelo 3

Tabela 6.3 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 3

Índice De Desempenho	Valor
PC	0,859
ISC	0,135
POD	0,391
TAF	0,829
BIAS	2,288

6.1.4 Modelo 4

A Baía de Sepetiba possui impacto no comportamento hidrodinâmico do escoamento da bacia do Rio Piraquê-Cabuçu em função da localização geográfica da mesma, além da declividade média do seu trecho de jusante. Sendo assim, o nível do mar na Baía de Sepetiba foi introduzido no modelo como uma condição de contorno de nível, variável no tempo. A

mancha de inundação resultante e a comparação pixel a pixel estão dispostas, respectivamente, nas Figura 6.8 e Figura 6.9. Os índices de desempenho podem ser vistos na Tabela 6.4.

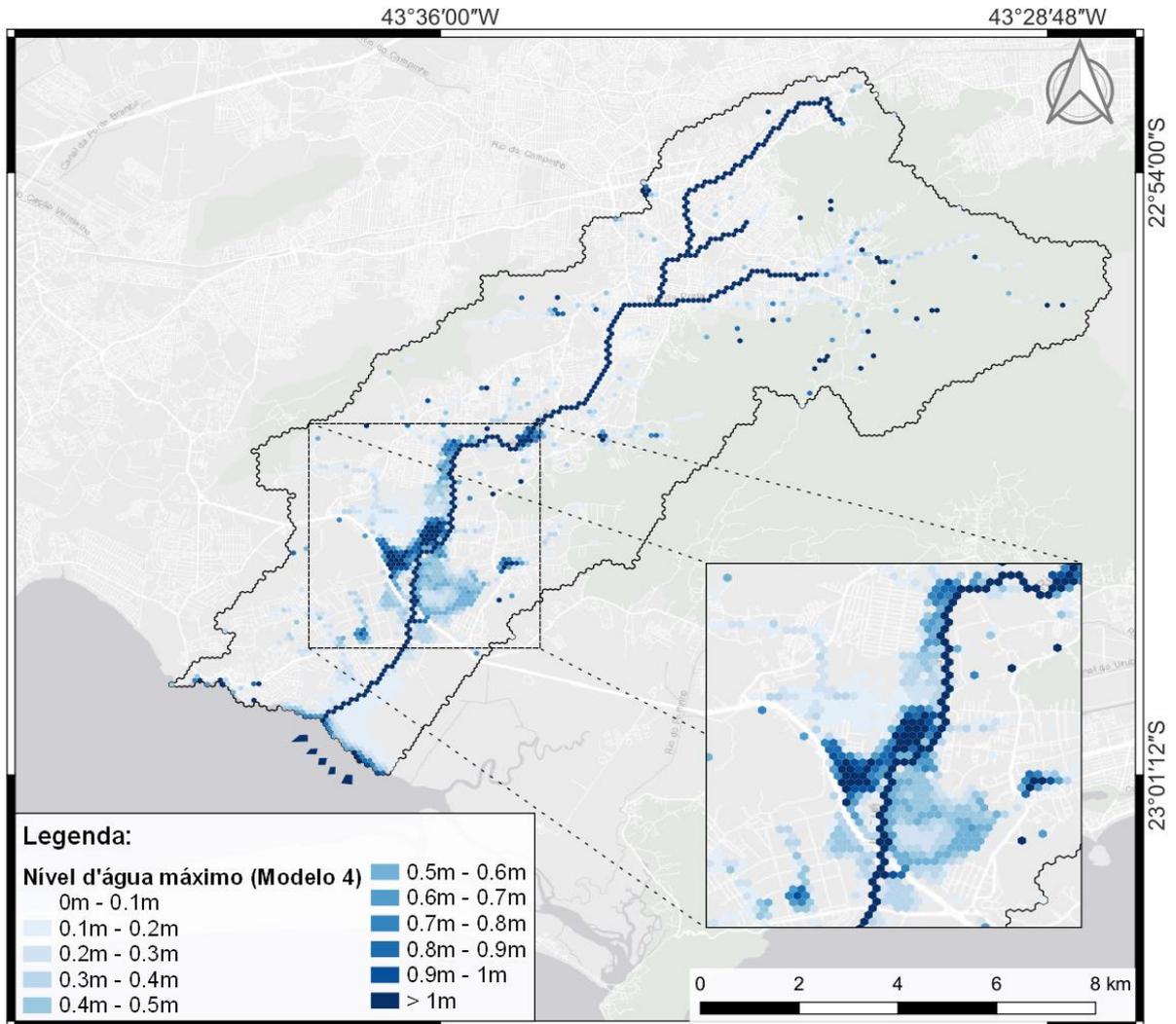


Figura 6.8 Mancha máxima de inundação do Modelo 4

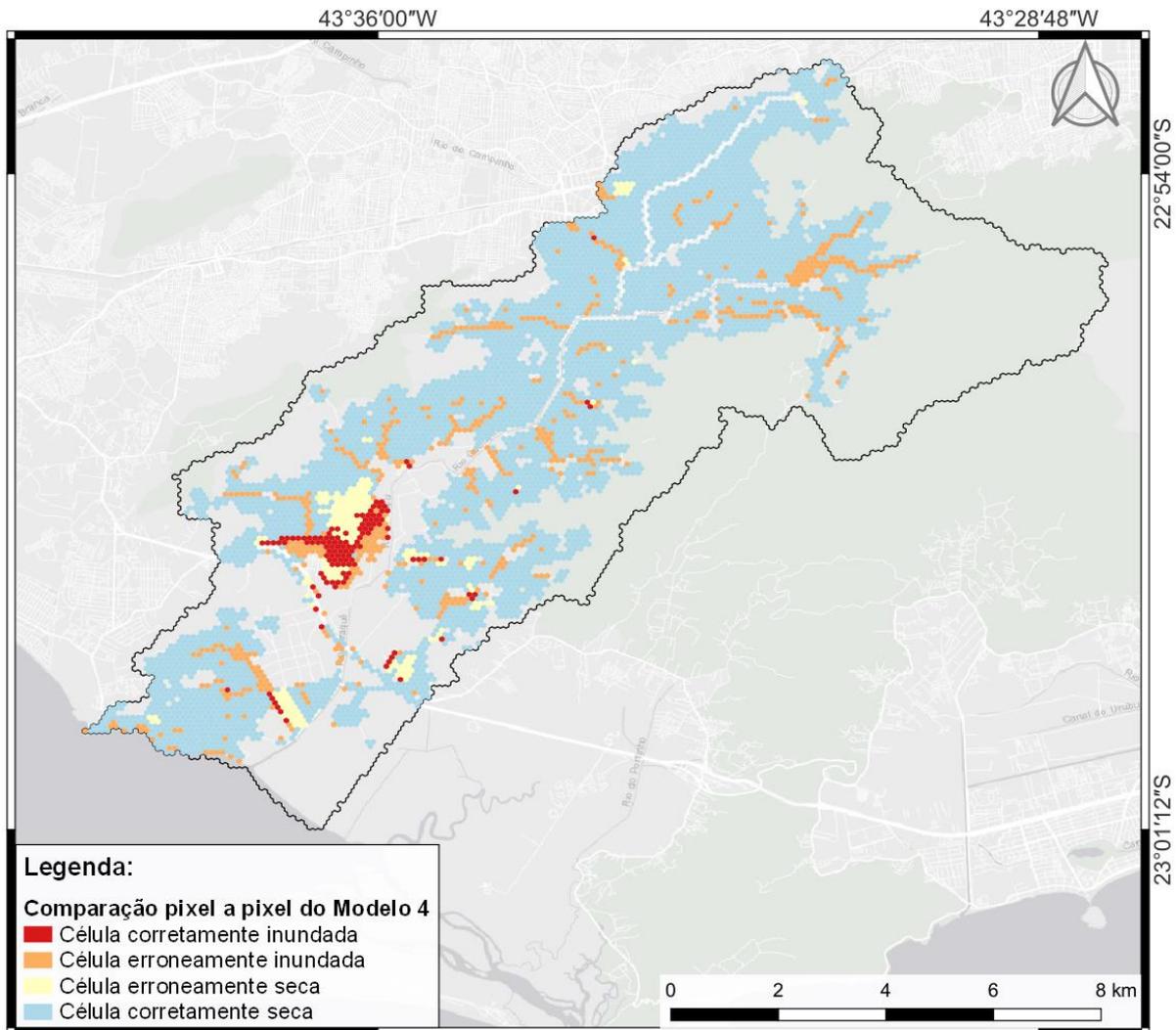


Figura 6.9 Comparação pixel a pixel do Modelo 4

Tabela 6.4 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 4

Índice De Desempenho	Valor
PC	0,858
ISC	0,134
POD	0,391
TAF	0,831
BIAS	2,309

As simulações dos Modelos de 1 a 3 foram realizadas considerando o nível do mar constante, portanto, era esperado que a introdução da condição de contorno a jusante da bacia provocasse maiores variações nas células litorâneas do modelo, como pode ser visto na Figura 6.10. Como grande parte da área que apresentou variação de nível d'água máximo não é urbanizada, não foram observadas mudanças expressivas no cálculo dos índices de desempenho.

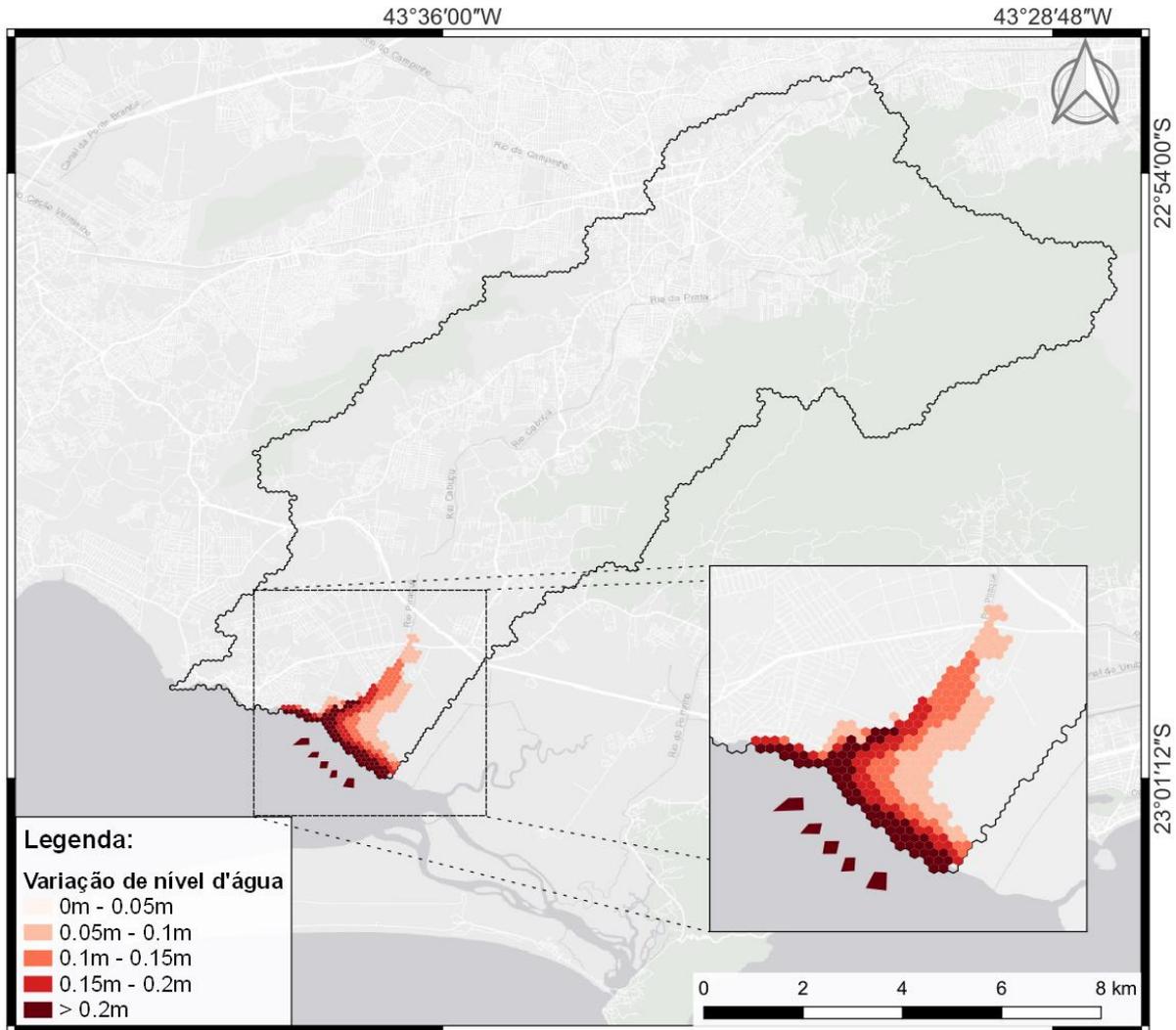


Figura 6.10 Variação do nível d'água máximo após a introdução da condição de contorno

6.1.5 Modelo 5

O último ajuste consiste na correção da geometria das ligações entre as células de planície do modelo, visto que a dimensão atribuída à largura das ligações corresponde a cerca de 103 metros. Porém, o hexágono regular gerado pela interface do MODCEL a partir de um arquivo ASCII proveniente de um Modelo Digital do Terreno em formato raster, com resolução horizontal de 90 metros, possui 60 metros de lado.

Entretanto, de forma a atribuir maior representatividade às ligações entre células urbanas, partindo da premissa de que o escoamento superficial nestas células se dá pelas ruas e calçadas, a largura das ligações entre células completamente urbanizadas foi definida como 10 metros. A Figura 6.11 apresenta a disposição das ligações contempladas pelo ajuste explicitado no presente item.

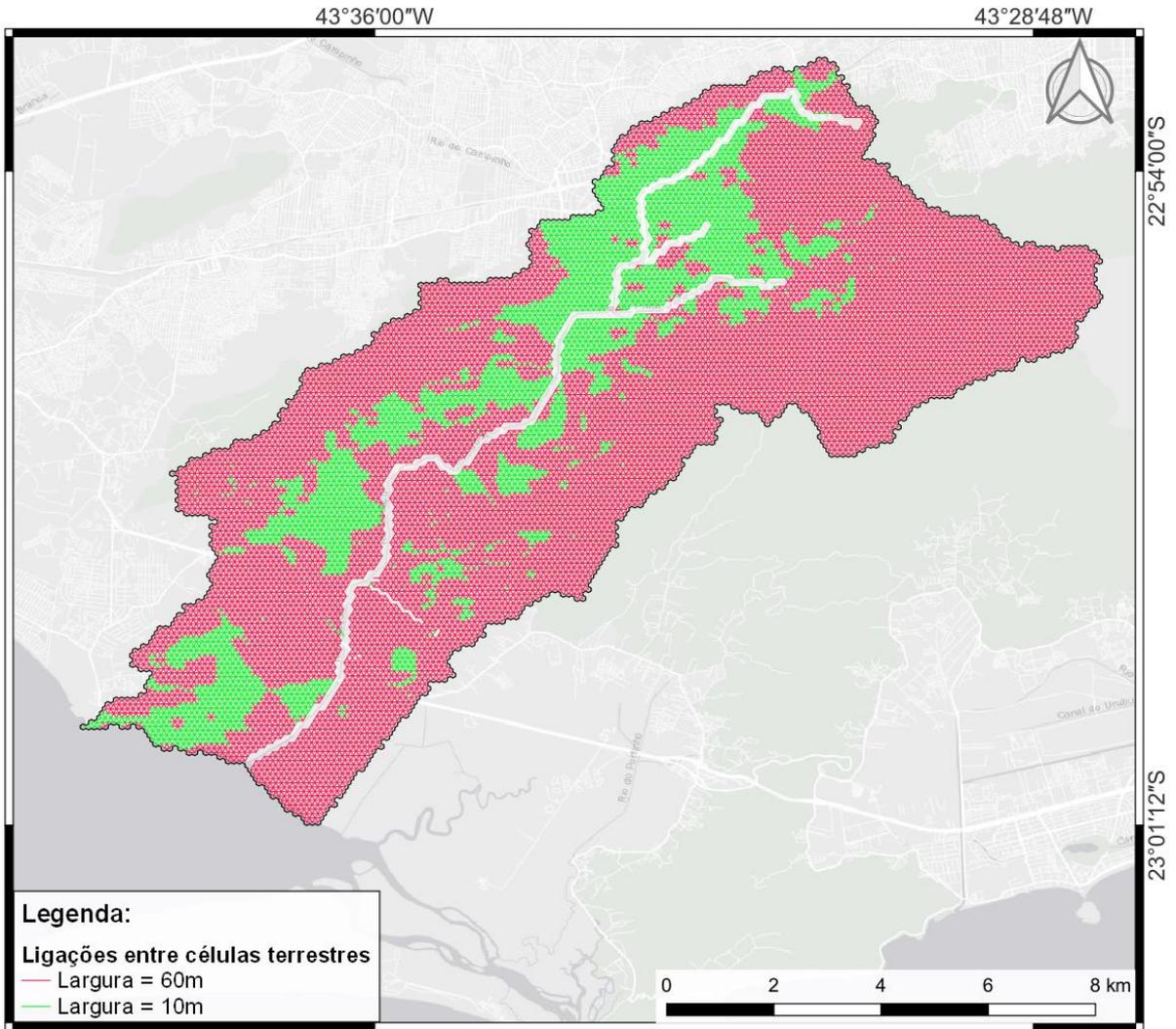


Figura 6.11 Ligações ajustadas para o Modelo 5

A mancha de inundação resultante da simulação do Modelo 5 e a comparação pixel a pixel estão dispostas, respectivamente, nas Figura 6.12 e Figura 6.13. Os índices de desempenho podem ser vistos na Tabela 6.5.

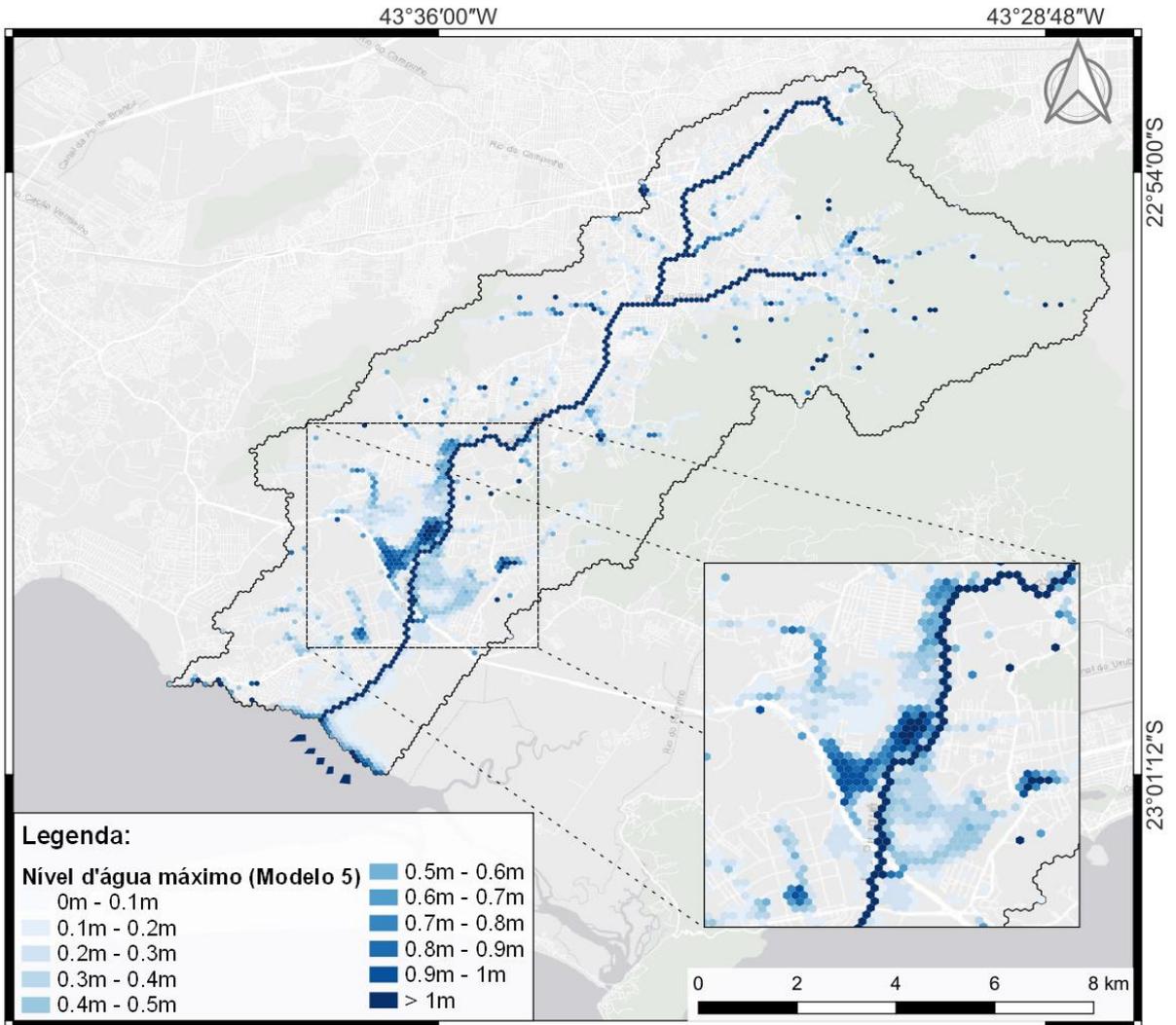


Figura 6.12 Mancha máxima de inundação do Modelo 5

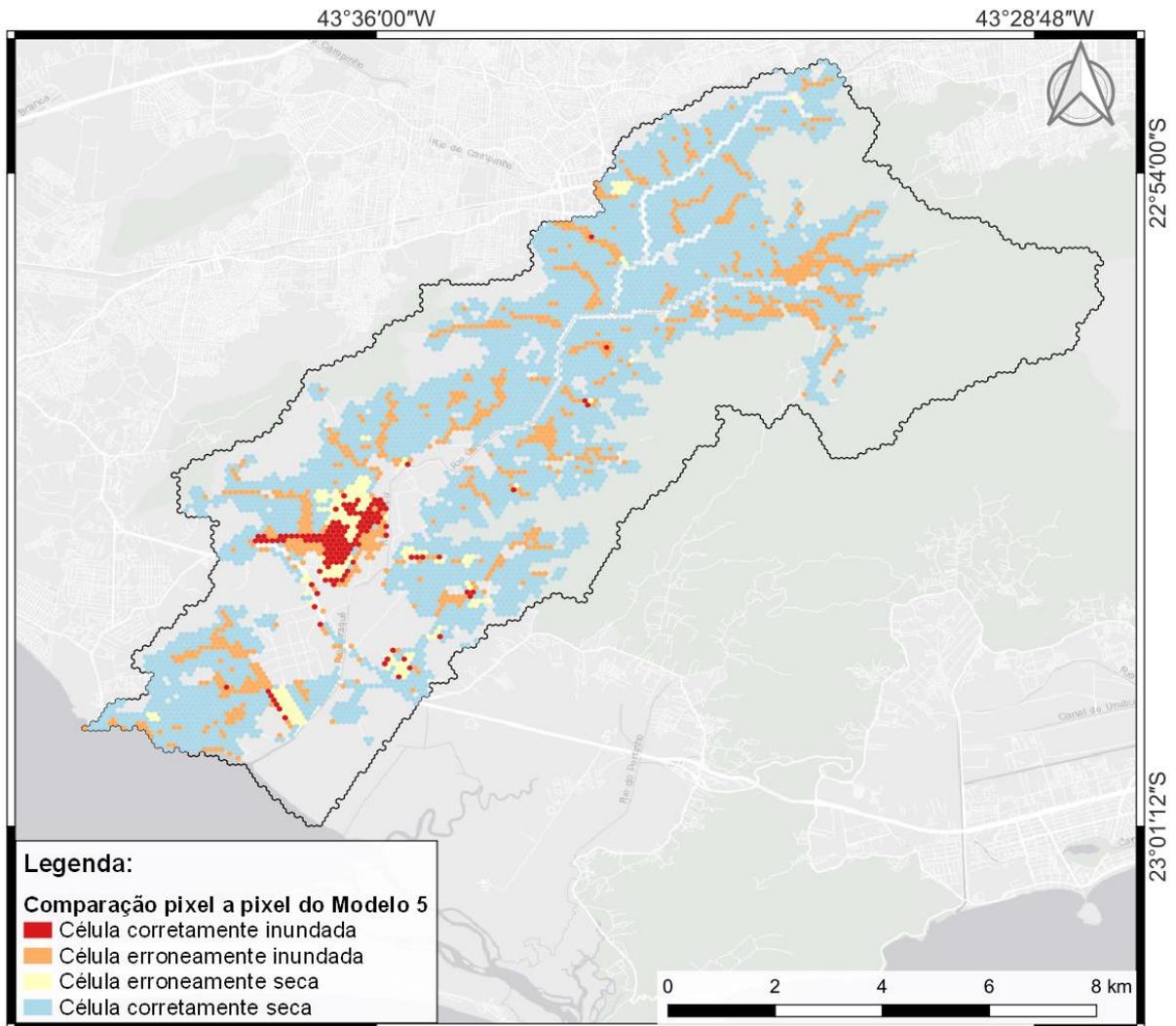


Figura 6.13 Comparação pixel a pixel do Modelo 5

Tabela 6.5 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 5

Índice De Desempenho	Valor
PC	0,801
ISC	0,112
POD	0,447
TAF	0,870
BIAS	3,428

A Tabela 6.6 apresenta resumidamente os índices de desempenho calculados para os Modelos 1 a 5 com o objetivo de apresentar a variação dos mesmos conforme os ajustes foram aplicados.

Tabela 6.6 Resultados da comparação pixel a pixel do Modelo 5

Índice De Desempenho	Modelo				
	1	2	3	4	5
PC	0,819	0,843	0,859	0,858	0,801

ISC	0,114	0,113	0,135	0,134	0,112
POD	0,416	0,356	0,391	0,391	0,447
TAF	0,864	0,858	0,829	0,831	0,870
BIAS	3,053	2,500	2,288	2,309	3,428

A metodologia de calibração adotada pelo presente estudo, restrita à comparação pixel a pixel, é considerada rígida por PAZ (2010) por não levar em consideração as formas e feições das manchas de inundação, tampouco o comportamento espaço-temporal delas. Portanto, não eram esperados altos índices devido às dimensões envolvidas no presente estudo. Porém, o cálculo dos índices é útil para embasar a análise de resultados do presente trabalho. Apesar dos baixos valores de índices de desempenho, os resultados encontrados corroboram com a mancha de inundação utilizada como parâmetro de calibração no que diz respeito ao foco de inundações situado na região do Jardim Maravilha. Em função da resolução horizontal do modelo, singularidades com pequenas extensões, mas com impactos significativos no comportamento do escoamento superficial da bacia como diques e muros não foram contemplados pelo modelo raster. Sendo assim, dado que as possíveis alterações e ajustes compatíveis com a escala adotada no modelo foram realizadas, o processo de calibração foi dado como finalizado. Desconsidera-se, ainda, possíveis erros ou simplificações no levantamento das áreas alagadas, que podem possuir vieses tanto positivos, quanto negativos, dependendo da metodologia de aquisição das informações. Algumas áreas apontadas como inundadas no evento de 2010 possuem cotas elevadas, declividades expressivas, caminhos para fluxos de escoamentos e não apresentam corpos hídricos próximos, indicando um possível erro de classificação. Outra característica importante na classificação de áreas alagadas é a consideração de toda uma rua como alagada, mesmo ruas que possuem grande diferenças de cotas ao longo de seu traçado.

6.1.6 Análise de resultados

De forma a embasar as conclusões referentes às características da metodologia utilizada no presente trabalho, faz-se útil a análise de cada um dos índices de desempenho descritos na Tabela 3.4.

O primeiro índice a ser abordado corresponde à Proporção Correta (PC), definida como a razão entre as células corretamente calculadas (secas ou inundadas) sobre o total de células do modelo, que para o presente estudo, são 11977. Em um primeiro momento, os resultados de PC obtidos ao longo das rodadas de calibração dispostos na Figura 6.14 parecem satisfatórios. Porém, TAYEFI *et al.* (2007) destacam que para o caso de bacias de área muito superior à área inundada, o índice PC pode não ser adequado, uma vez que sua formulação leva em

consideração as células corretamente simuladas como secas. No presente estudo, as células corretamente simuladas como secas representam mais de 80% do total de células utilizadas no processo de calibração. Sendo assim, os elevados valores de PC eram esperados (0,819 para o modelo inicial e 0,801 para o modelo final), mas não são suficientes para definir a eficiência do modelo.

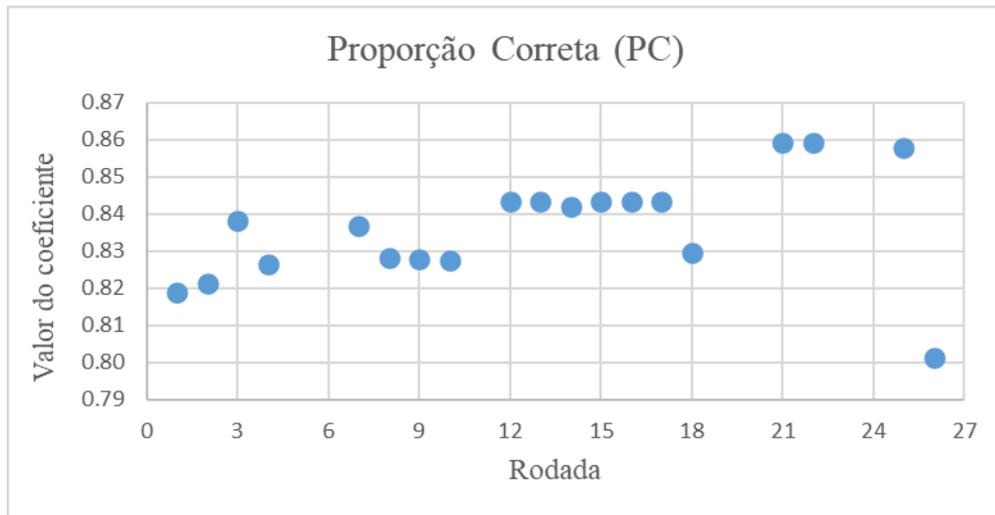


Figura 6.14 Evolução do índice de Proporção Correta (PC)

Devido ao elevado número de células secas, TAYEFI *et al.* (2007) fazem uso do Índice de Sucesso Crítico (ISC) de forma a contornar este problema e atingem valores entre 0,45 e 0,58 para um modelo de escoamento de células calibrado a partir da extensão da mancha de inundação resultante de um evento hidrológico. PAZ (2010) comenta que o Índice de Sucesso Crítico fornece uma análise mais completa dos modelos do tipo raster, uma vez que leva em consideração os erros relacionados à superestimativa e subestimativa, premiando os acertos de inundação. Para o presente estudo, o ISC não ultrapassa em nenhuma das simulações o valor de 0,2, o que corresponde a um baixo desempenho. A evolução temporal dos resultados de ISC ao longo das rodadas de simulação componentes da etapa de calibração está disposta na Figura 6.15.

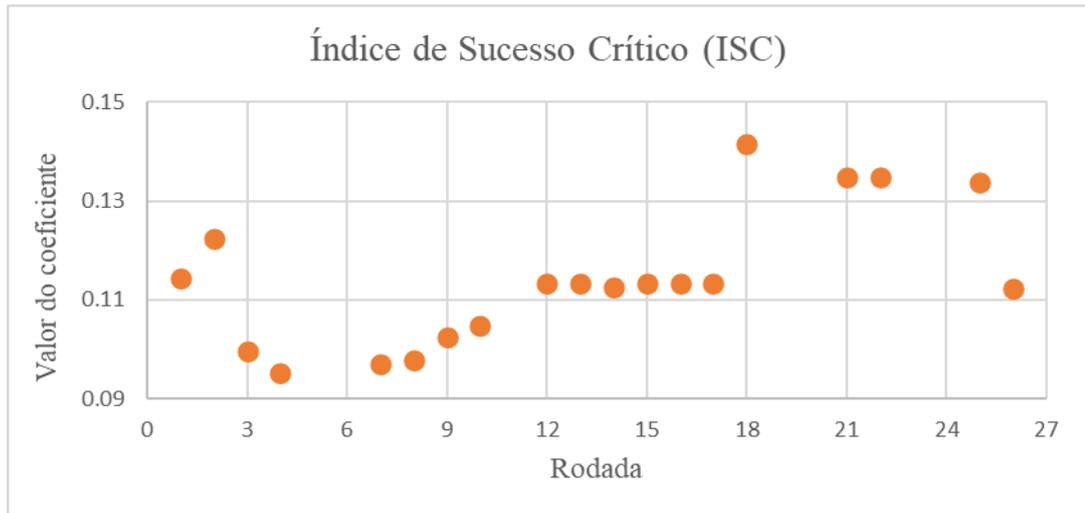


Figura 6.15 Evolução do Índice de Sucesso Crítico (ISC)

Em relação à Probabilidade de Detecção (POD), que representa a quantidade de células corretamente inundadas sobre a quantidade de células inundadas observadas em campo, há pouca variação: de 0,416 para 0,447. De forma a identificar as principais células erroneamente calculados como secas, foi feita uma análise do mapa de mancha de inundações utilizado como parâmetro de calibração de forma conjunta com o MDT utilizado como base de dados topográficos e os resultados do Modelo 5. Foi identificada a delimitação da mancha de inundação observada pela Rio-Águas em pontos altos do Jardim Maravilha. Portanto, supõe-se que tais localidades ficaram inundados devido a singularidades locais, negligenciadas pelo modelo raster devido a escala horizontal. A evolução temporal dos resultados de POD ao longo das rodadas de simulação componentes da etapa de calibração está disposta na Figura 6.17.

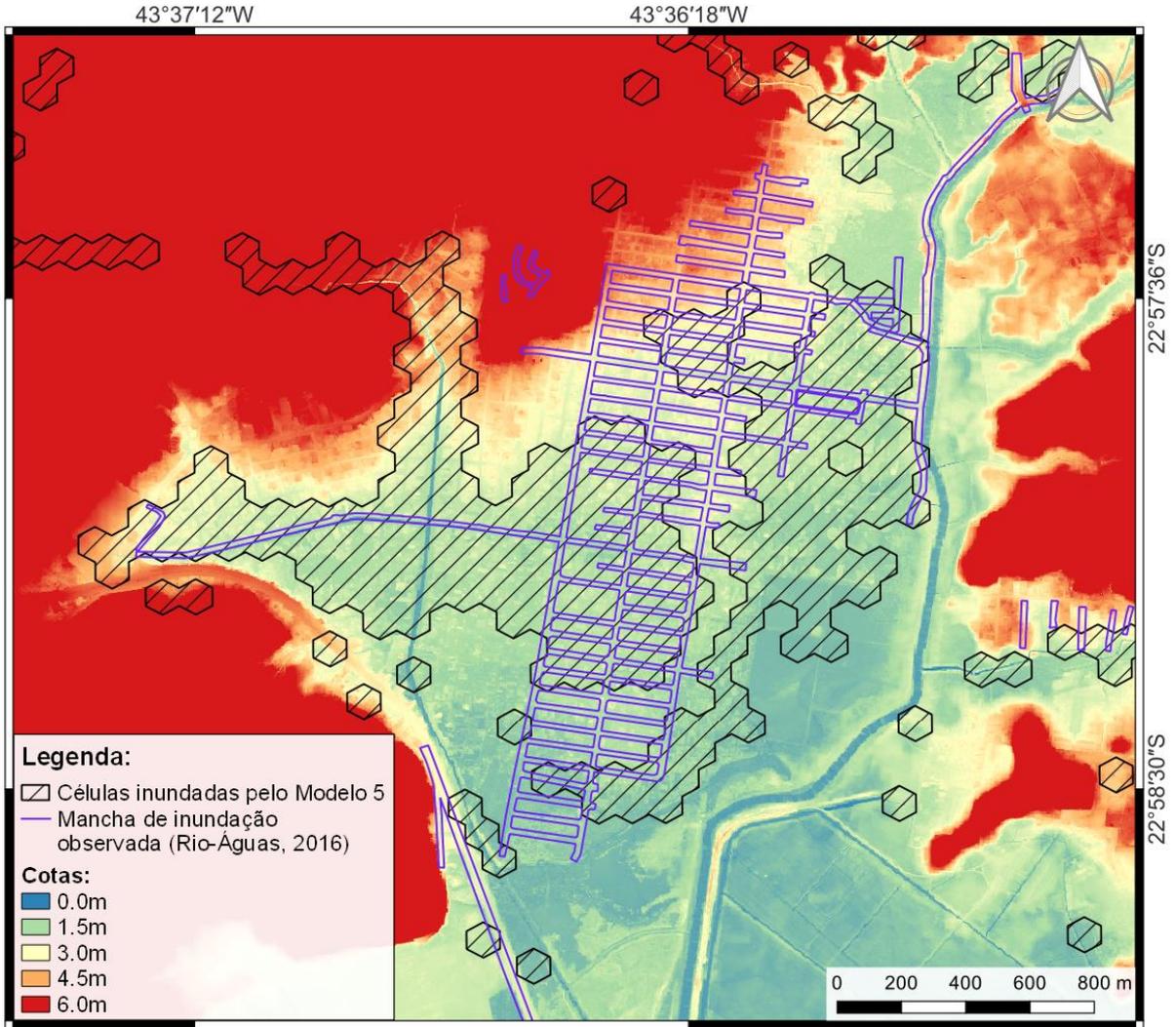


Figura 6.16 Análise da mancha de inundação no Jardim Maravilha

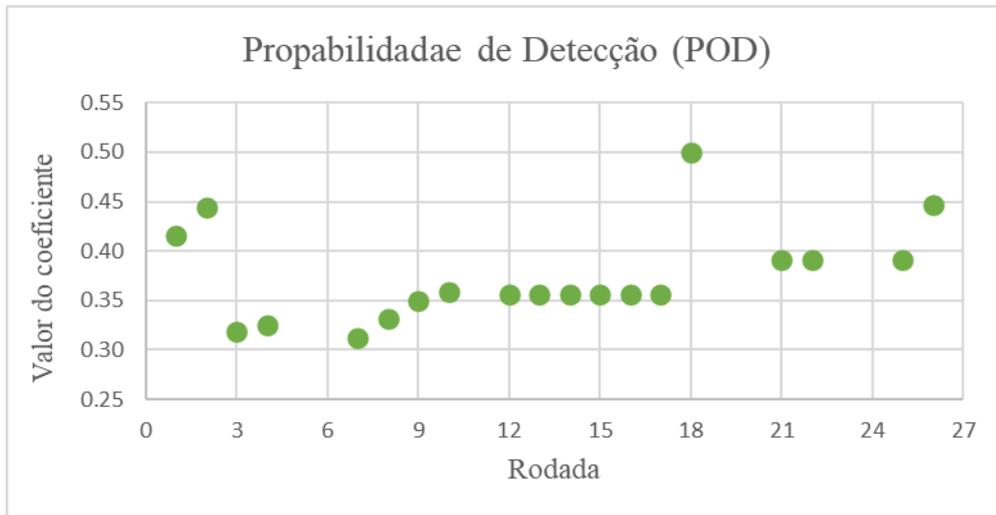


Figura 6.17 Evolução do índice de Probabilidade de Detecção (POD)

Os altos valores de Taxa de Alarme Falso (TAF) e Taxa de Tendência (BIAS) representam um superdimensionamento da mancha máxima de inundação calculada pelo modelo. Grande parte das células erroneamente inundadas estão localizadas caminhos de escoamento superficial da bacia e áreas de várzea. No total são 954 células erroneamente simuladas como inundadas para o Modelo 5, sendo a maioria representativa dos trechos de drenagem e canais da bacia. A inundação destas células pode ser explicada pela própria simplificação utilizada pela metodologia no que diz respeito à definição de cota de fundo das células da malha, exemplificada no capítulo 3. O volume de água que escoava através do canal acaba sendo distribuído por toda a área célula em função da simplificação da metodologia utilizada no presente estudo no que diz respeito a definição das cotas de fundo das células. Além disso, conforme ressaltado por HAILE e RIENTJES (2005), foram notados pontos inundados isolados, provavelmente decorrentes da supressão dos caminhos de escoamento da bacia em função da resolução adotada.

A evolução temporal das Taxas de Alarme Falso e de Tendência ao longo das rodadas de simulação estão dispostas nas Figuras 6.14 e 6.15. Nota-se que as variações mais bruscas ocorrem após o tratamento das células que compõe os principais corpos hídricos da bacia (rodadas 3 e 18). Portanto, é possível afirmar que o rebaixamento das células provoca uma diminuição do superdimensionamento da mancha de inundação resultante da simulação.

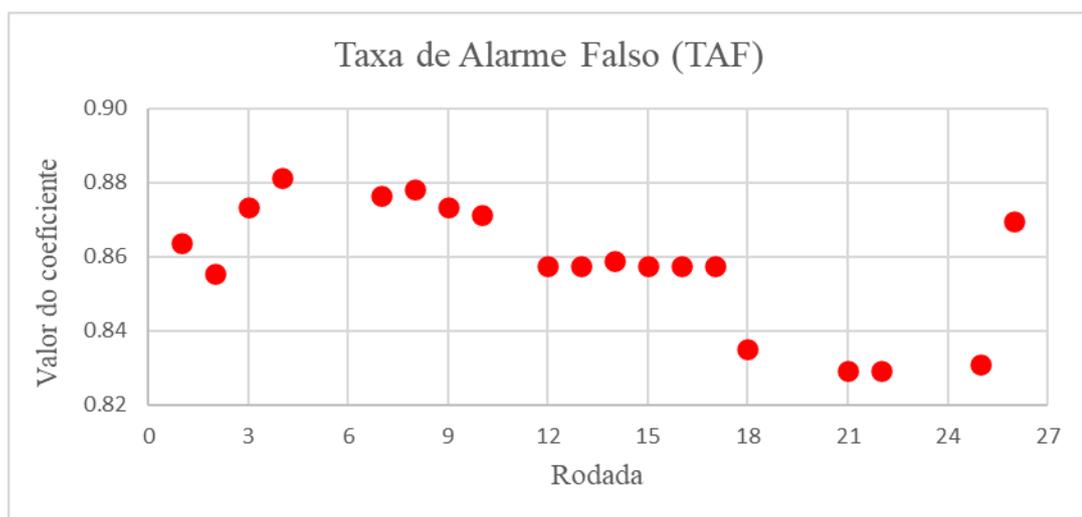


Figura 6.18 Evolução da Taxa de Alarme Falso (TAF)

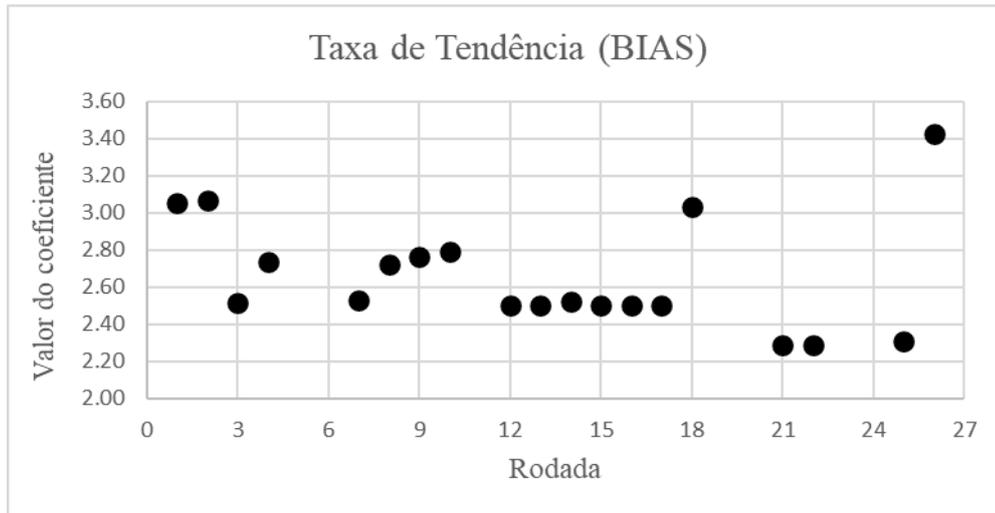


Figura 6.19 Evolução da Taxa de Tendência (BIAS)

De forma a permitir uma comparação visual entre os resultados obtidos, a Figura 6.20 apresenta as manchas de inundação das cinco principais rodadas de simulação abordadas ao longo do presente capítulo. É possível observar a expressiva redução da mancha de inundação, principalmente na área de montante da bacia, decorrente do rebaixamento das células dos rios Prata do Cabuçu, Cabuçu Mirim e Piraquê-Cabuçu, o que dificultou a troca de vazões entre canal e planície.

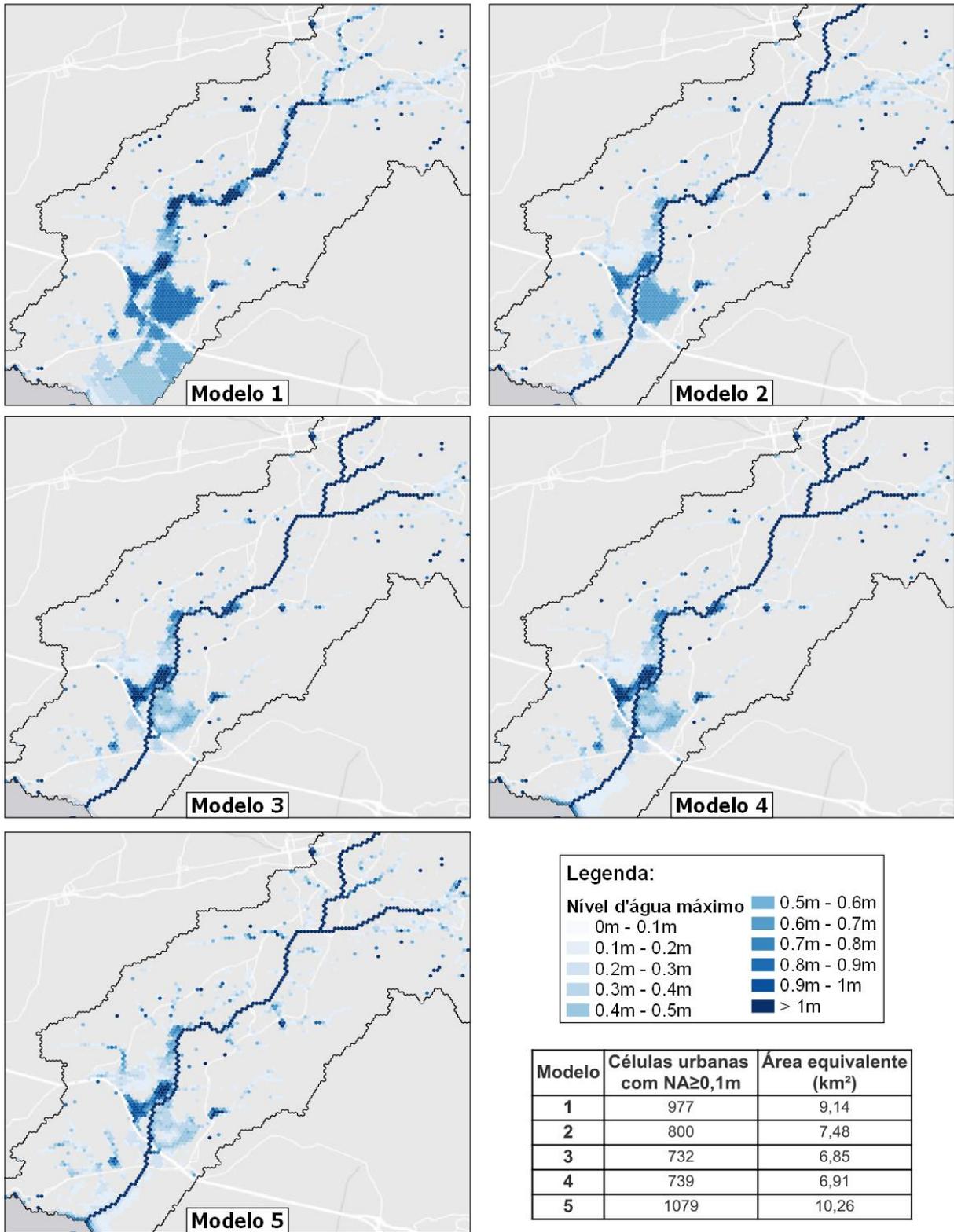


Figura 6.20 Comparativo entre os Modelos 1, 2, 3, 4 e 5

A diferença de resultados observada entre os Modelos 4 e 5 corrobora com as observações feitas por HERRITT e BATES (2001a) no que diz respeito à importância das

dimensões das ligações no comportamento do escoamento superficial. A redução da seção transversal dificultou a troca de vazões entre as células de planície do modelo, resultando em uma redução dos valores de nível d'água máximos calculados para a área do Jardim Maravilha, como ilustrado na Figura 6.21. Além disso, o Modelo 5 apresentou a maior Taxa de Tendência, o que corresponde a uma superestimativa da mancha de inundação.

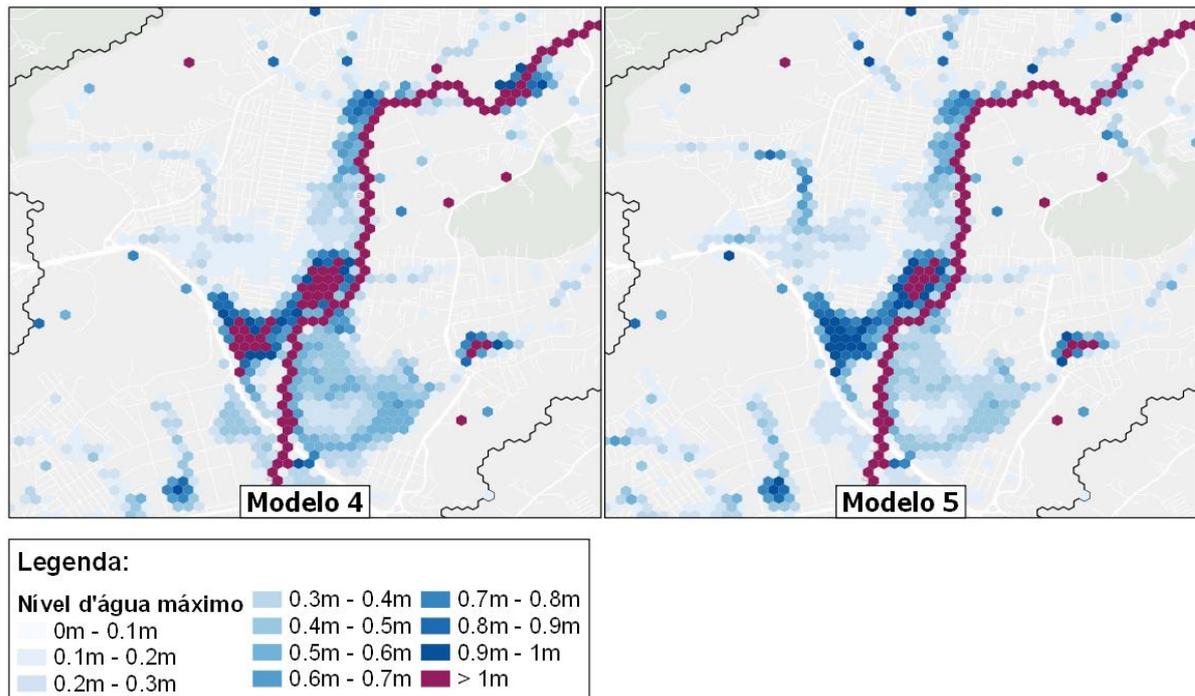


Figura 6.21 Mancha de inundação no Jardim Maravilha para os Modelos 4 e 5

6.2 MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES

Este subcapítulo apresenta os mapas de manchas máximas de inundação para os três cenários diferentes e uma análise quantitativa das células atingidas pelo evento de cheia, de forma a subsidiar a comparação entre os diferentes tempos de recorrência.

Para a definição da intensidade pluviométrica relacionada aos tempos de recorrência de 10, 25 e 50 anos, foi aplicada uma precipitação constante de duração infinita no Modelo 3, de forma a viabilizar a estimativa do tempo de concentração da bacia. A curva S, observada na Figura 6.22, corresponde à vazão de saída do Rio Piraquê-Cabuçu e apresenta declividade tendendo a zero quando toda a bacia hidrográfica passa a contribuir para a vazão de saída. Sendo assim, o tempo de concentração da bacia foi estimado em 12 horas.

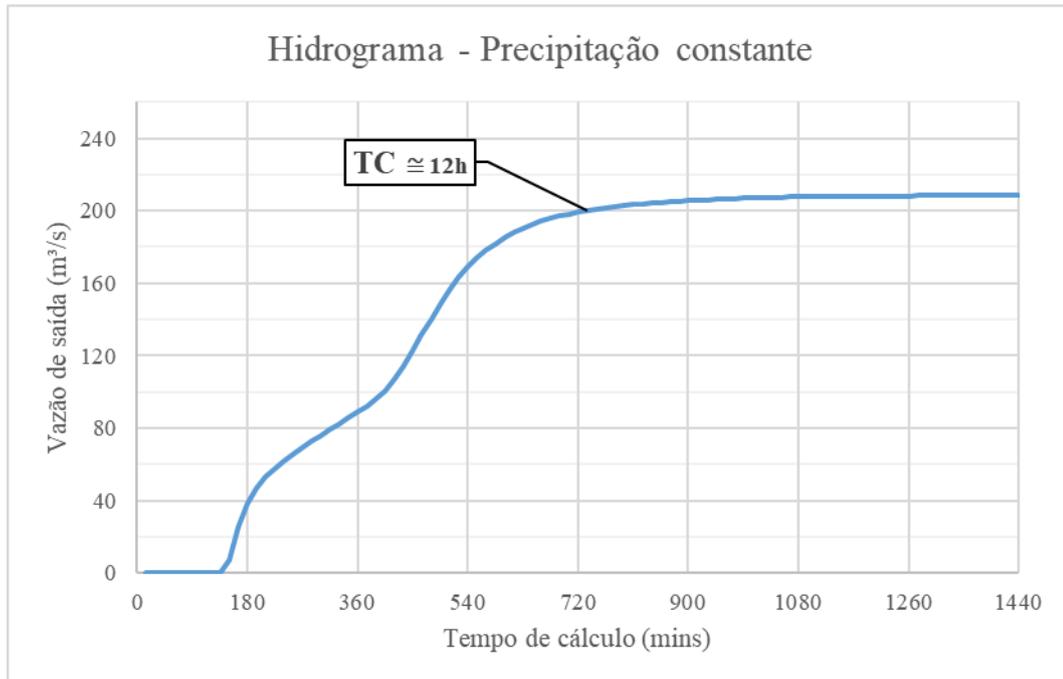


Figura 6.22 Hidrograma para determinação do tempo de concentração

Em posse do tempo de concentração, foi possível estabelecer a intensidade pluviométrica correspondente às chuvas de 10, 25 e 50 anos de recorrência a partir da equação IDF disposta no subcapítulo 4.4.3. Em virtude da dimensão espacial da bacia, optou-se pela desagregação temporal das chuvas de projeto através de blocos alternados, descrito por CHOW *et al.* (1988), como recomendado pela RIO-ÁGUAS (2019).

Foi estabelecida a duração de 1080 minutos (18 horas) para a chuva de projeto, subdividida em 36 intervalos de 30 minutos. Os valores de precipitação resultantes da distribuição temporal da chuva estão dispostos na Tabela 6.7, enquanto a Figura 6.23 ilustra estes mesmos valores de forma gráfica.

Tabela 6.7 Precipitação de projeto para 10, 25 e 50 anos de recorrência

Intervalo (min)	Precipitação - TR10 (mm)	Precipitação - TR25 (mm)	Precipitação - TR50 (mm)
0-30	1,79	2,11	2,39
30-60	1,87	2,20	2,50
60-90	1,96	2,31	2,61
90-120	2,05	2,42	2,74
120-150	2,16	2,55	2,89
150-180	2,29	2,70	3,05
180-210	2,43	2,87	3,25

210-240	2,60	3,06	3,47
240-270	2,80	3,30	3,74
270-300	3,04	3,58	4,06
300-330	3,34	3,94	4,46
330-360	3,72	4,39	4,97
360-390	4,24	4,99	5,66
390-420	4,96	5,85	6,63
420-450	6,08	7,17	8,13
450-480	8,09	9,54	10,81
480-510	12,97	15,29	17,33
510-540	49,75	58,67	66,47
540-570	19,79	23,34	26,45
570-600	9,88	11,65	13,20
600-630	6,92	8,16	9,24
630-660	5,45	6,43	7,29
660-690	4,56	5,38	6,10
690-720	3,96	4,67	5,29
720-750	3,52	4,15	4,70
750-780	3,18	3,75	4,25
780-810	2,91	3,43	3,89
810-840	2,69	3,18	3,60
840-870	2,51	2,96	3,35
870-900	2,36	2,78	3,15
900-930	2,22	2,62	2,97
930-960	2,10	2,48	2,81
960-990	2,00	2,36	2,68
990-1020	1,91	2,25	2,55
1020-1050	1,83	2,16	2,44
1050-1080	1,76	2,07	2,35

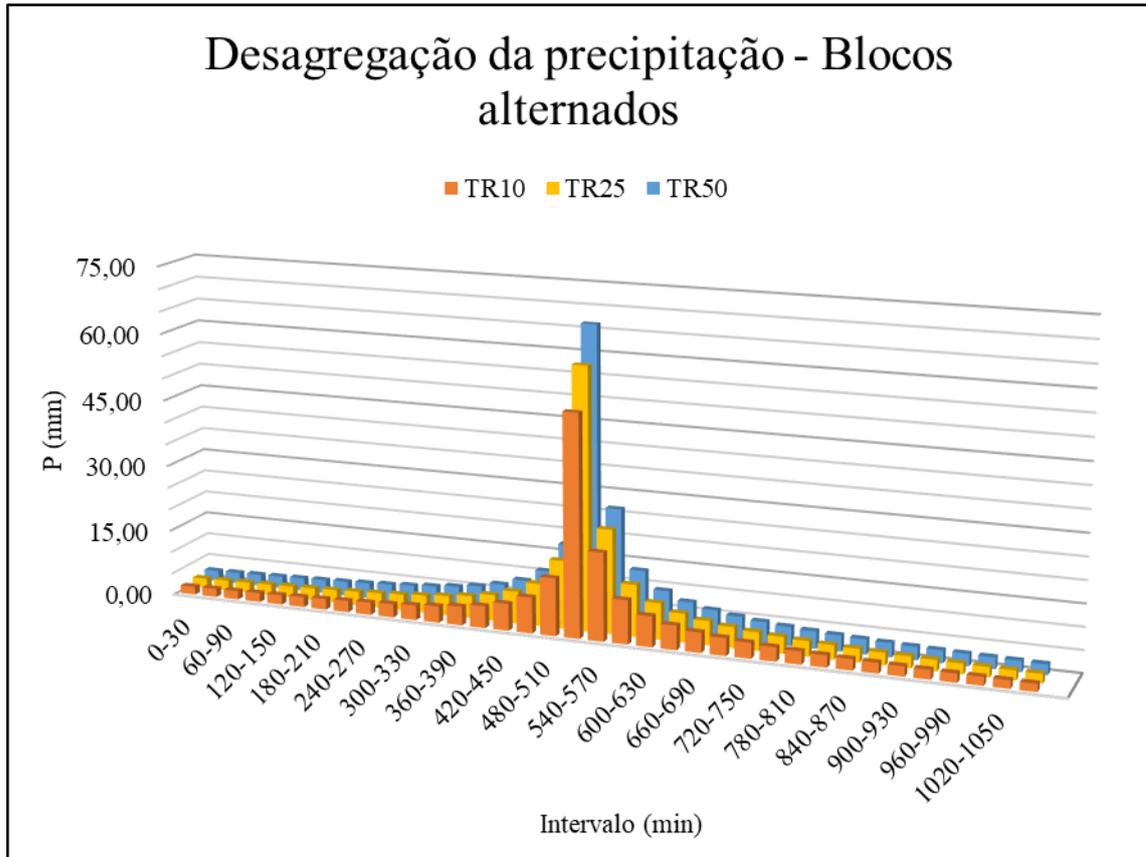


Figura 6.23 Chuva de projeto – TRs 10, 25 e 50

De forma a explicitar quantitativamente os resultados obtidos, a Tabela 6.8 apresenta os valores referentes à vazão de pico do exutório da bacia, mancha de inundação e nível d'água médio para as células da malha hexagonal que apresentam alguma porcentagem de ocupação urbana, descartando os rios e áreas não ocupadas.

Tabela 6.8 Análise de inundações para chuvas de TR10, TR25 e TR50

TR	Q _{máx} (m ³ /s)	Mancha de inundação*		Nível d'água médio*	
		Número de células	Área ocupada (km ²)	Geral	Células inundadas
10	66,15	1860	17,40	0,14	0,36
25	73,49	2091	19,56	0,17	0,39
50	80,37	2288	21,40	0,19	0,42

*Considerando apenas células com algum grau de ocupação urbana

Restringindo a área de análise apenas à região do Jardim Maravilha, não são observadas grandes variações em relação a extensão horizontal da mancha de inundação, que apresenta um crescimento de 10% entre as chuvas de 10 e 50 anos de recorrência. Porém, nota-se um aumento

de 47% do nível médio das lâminas máximas das células inundadas, conforme indicado na Tabela 6.9. A Figura 6.24 apresenta as manchas de inundação para cada TR utilizado na análise.

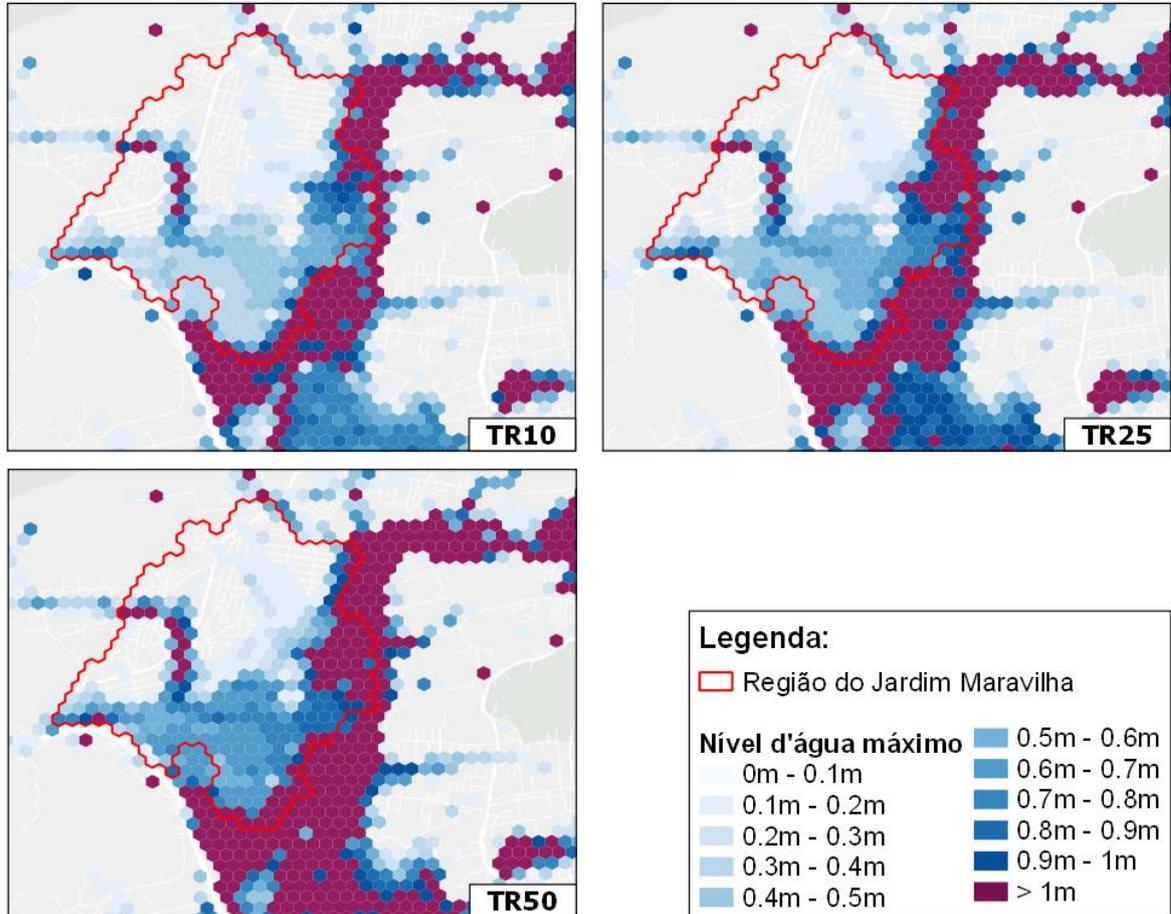


Figura 6.24 Mancha de inundação no Jardim Maravilha para TR10, TR25 e TR50

Tabela 6.9 Inundação no Jardim Maravilha para chuvas de TR10, TR25 e TR50

TR	Jardim Maravilha		NA médio (m)
	Número de células inundadas	Área ocupada (km ²)	
10	296	2,77	0,34
25	311	2,91	0,42
50	326	3,05	0,50

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a utilização do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL) acoplado a um modelo Raster para representar o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Piraquê-Cabuçu, situada na zona oeste do Rio de Janeiro (RJ), de forma a identificar as áreas com maior risco de inundação na região, além de destacar as características da metodologia escolhida através dos resultados encontrados ao longo do trabalho. Foi realizada uma revisão bibliográfica acerca das equações matemáticas que formam os pilares da modelagem hidrodinâmica, além da descrição das principais metodologias utilizadas para modelagem de cheias encontradas em trabalhos acadêmicos, destacando a aplicabilidade de cada em função das suas simplificações, premissas, limitações e potenciais.

7.1 CONCLUSÕES

Um dos desafios relacionados à aplicação do modelo hidrodinâmico do tipo *Quasi-2D-Raster* consiste na definição da resolução horizontal da malha de células, buscando encontrar um equilíbrio entre o custo computacional associado e a boa representação das nuances topográficas da bacia. A conversão automática das informações altimétricas em uma grade de células de escoamento configura um potencial do modelo raster desenvolvido no presente trabalho, possibilitando a criação de diversas malhas com diferentes dimensões de células rapidamente. Porém, este procedimento carrega uma série de incertezas e simplificações e, portanto, faz-se necessária a análise dos resultados obtidos de forma a avaliar a aplicabilidade desta metodologia para cada caso.

Mesmo tendo acesso a um Modelo Digital do Terreno com um alto nível de detalhamento (1,0 metro de resolução horizontal), o arquivo raster definido como base do modelo apresenta pixels de 90m de largura, valor elevado quando comparado aos demais encontrados na revisão bibliográfica. O rearranjo das informações topográficas do MDT foi necessário devido ao custo computacional associado às simulações com malhas detalhadas para bacias do porte da Bacia do Rio Piraquê-Cabuçu, com 109 km² de área de drenagem. Este procedimento teve como consequências o negligenciamento de diversas estruturas pontuais que influenciam no escoamento superficial da bacia, além da supressão de canais de drenagem de dimensões muito inferiores à área das células. Sendo assim, é possível concluir que a aplicação da metodologia apresentada neste estudo em grandes bacias possui uma limitação relacionada

ao custo computacional associado à discretização da malha de células. Entretanto, espera-se que o custo computacional seja cada vez menor com o passar dos anos, viabilizando a utilização de malhas cada vez mais refinadas.

A bacia do Rio Piraquê-Cabuçu possui área de drenagem com mais de 100 km², extenso histórico de alagamentos, ocupação urbana historicamente desordenada pela população de baixa renda, além de planos de intervenções públicas, principalmente na região do Jardim Maravilha, e não dispõe de estação fluviométrica cadastrada na base de dados HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA) com registros históricos de cota e/ou vazão do Rio Piraquê-Cabuçu. Esta ausência de dados dificulta o processo de calibração de modelos hidrodinâmicos na região, fazendo com que modeladores façam uso de parâmetros de calibração de baixa precisão, como foi o caso do utilizado no presente estudo. Portanto, evidencia-se uma limitação não relacionada a metodologia de modelagem, mas à região escolhida como estudo de caso. De forma a complementar o esforço acadêmico no sentido do desenvolvimento de estudos de alternativas para solucionar os problemas relacionados a inundações na região, é necessária uma maior colaboração dos órgãos públicos para medir e disponibilizar dados históricos que possam subsidiar a calibração e desenvolvimento de estudos e projetos voltados para melhorias e prevenção de inundações na região.

O processo de calibração do modelo passou por diversas alterações durante suas mais de 20 rodadas de simulação com o objetivo de aproximar cada vez mais a mancha de inundação calculada da mancha utilizada como parâmetro de calibração. Ao longo desta etapa, foi observada uma característica da metodologia utilizada que pode ser considerada um potencial: a facilidade da alteração de coeficientes de uma grande quantidade de células com características similares com auxílio de um *software* de geoprocessamento, abrindo diversas possibilidades de simulação no que diz respeito ao uso e ocupação do solo da região, como por exemplo, a simulação de cenários com ocupações urbanas futuras. Sendo assim, esta abordagem pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar o direcionamento de ações voltadas para o desenvolvimento urbano da região.

A partir das manchas de inundação resultantes das rodadas de simulação, além do cálculo dos índices de desempenho, nota-se que o tratamento das células dos principais corpos hídricos da bacia configura o ajuste com impacto mais expressivo em relação ao escoamento superficial do modelo. Tanto no primeiro momento, em que apenas o Rio Piraquê-Cabuçu foi rebaixado, como no segundo momento, em que os Rios Prata do Cabuçu e Cabuçu-Mirim tiveram suas células tratadas, foram observadas melhorias em todos os índices de desempenho,

além da redução visível da extensão da mancha de inundação. Sendo assim, conclui-se que, para o modelo desenvolvido no presente estudo, a adoção de uma abordagem para a representação das células da planície e outra para as células dos principais canais da região apresentou resultados satisfatórios. Esta afirmação corrobora com as recomendações encontradas em diversos estudos voltados para a aplicação da modelagem hidrodinâmica do tipo raster, principalmente para modelos com células de dimensões muito superiores às do canal principal da bacia, conforme apresentado na revisão bibliográfica do presente estudo. Ressalta-se que mais corpos hídricos poderiam ter sido tratados da mesma forma, buscando um aperfeiçoamento da representação dos escoamentos fluviais, porém, considerou-se suficiente a representação final para possibilitar a análise comparativa dos resultados.

Tendo realizado todos os ajustes compatíveis com a escala da grade de células, não foram obtidos bons resultados no que diz respeito aos índices de desempenho utilizados para caracterizar o modelo, que indicaram um superdimensionamento da mancha de inundação, principalmente nas zonas próximas às margens dos maiores corpos hídricos da bacia. Porém, deve-se levar em consideração a rigidez da análise pixel a pixel, a imprecisão da metodologia utilizada para a delimitação dos parâmetros de calibração e a elevada resolução horizontal adotada pelo modelo, que teve como consequência a supressão de caminhos preferenciais de escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas. Realizando uma análise sob outra perspectiva, é possível afirmar que o Modelo 5 obteve sucesso no que diz respeito à identificação dos caminhos preferenciais de escoamento superficial da bacia, dado que grande parte das células identificadas como inundadas correspondem à hidrografia da bacia do Rio Piraguê-Cabuçu.

Apesar de superdimensionadas, as manchas de inundação calculadas desde o Modelo 1 até o 5 indicam as áreas de risco frente a eventos de cheia, sendo as maiores lâminas situadas na área mais críticas da bacia: do Jardim Maravilha, área urbanizada da bacia com extenso histórico de alagamentos e desastres relacionados a eventos hidrológicos extremos. O processo de calibração e tratamento das células dos principais canais da bacia tiveram como consequência principal a redução da extensão horizontal da mancha calculada, entretanto, o primeiro modelo, gerado em um curto intervalo de tempo, sem necessidade de interpretação prévia do fenômeno a ser representado ou da área de estudo por parte do modelador, tendo como dados de entrada apenas informações topográficas e de uso do solo da região de estudo, já apresentava resultados satisfatórios no que diz respeito à localização das manchas de inundação. Portanto, a metodologia contemplada no presente estudo apresentou resultados

satisfatórios e configura uma ferramenta útil para o mapeamento das áreas com maior risco de inundação através de um processo que demanda pouco tempo de modelagem.

Por fim, cabe ressaltar que o levantamento de áreas inundáveis disponibilizado pela prefeitura e utilizado para a calibração do modelo desenvolvido no presente estudo não dispõe de técnica referenciada, portanto, não é possível avaliar a precisão das informações utilizadas como parâmetros de calibração, uma vez que não há informações sobre a metodologia utilizada para definição das mesmas.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Por fim, recomenda-se, para estudos futuros:

- Realizar uma adaptação no cálculo dos índices de desempenho de forma a desconsiderar as células correspondentes aos talwegues da bacia, partindo da premissa que as mesmas seriam calculadas como inundadas em virtude da resolução horizontal do raster utilizado;
- Determinar a cota de fundo das células do modelo através de outra metodologia de cálculo, como por exemplo: adotar a menor cota englobada pela célula;
- Avaliar a utilização de outras metodologias de representação dos principais rios da bacia;
- Modelagem da bacia adotando uma resolução horizontal para cada sub-bacia, de forma a contemplar com maior detalhamento as áreas de interesse sem aumentar consideravelmente o custo computacional associado, a partir de uma análise multi-escalar e com malha não estruturada;
- Analisar os valores de velocidade e vazão calculados para a calha fluvial;
- Realizar simulações com diferentes usos e ocupações do solo, buscando representar os impactos da urbanização da região de estudo no comportamento hidrodinâmico da bacia;
- Realizar simulações de cenários que contemplem as variações climáticas previstas para o futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., *et al.*, 2013, Köppen's climate classification map for Brazil, **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6
- ARCEMENT, G. J., SCHNEIDER, V. R., 1989, Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. **United States Geological Survey Water-Supply Paper**, n. 2339,
- BAPTISTA, M. B., CARDOSO, A. S., 2013, Rios E Cidades: Uma Longa E Sinuosa História, **Revista da Universidade Federal De Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 124-153.
- BARNARD, T., BARNARD, T. E., KUCH, A. W., *et al.*, 2007, Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage. **Contemporary Modeling of Urban Water Systems**, cap. 18, pp. 343-365.
- BARROS, F. C., 2020, **Análise das dinâmicas socioambientais da bacia hidrográfica do rio Piraquê-Cabuçu, Zona Oeste do município do Rio de Janeiro**, Dissertação de Mestrado, UERJ. Rio de Janeiro.
- BATES, P.D., DE ROO, A.P., 2000, A simple-based model for flooding inundation simulation, **Journal of Hydrology**, v. 236, 54-77
- BEFFA, C., CONNELL, R.J., 2001, Two-Dimensional Flood Plain Flow, I: model description, **Journal of Hydrologic Engineering**, vol. 6, nº 5, pp. 397-405
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S., HUNTER, W. G., 2005, **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. 2ª ed. Hoboken, John Wiley & Sons.
- CEPED/UFSC, 2022, **Atlas Digital de Desastres Naturais**. Disponível em: < atlas.ceped.ufsc.br>. Acesso em 17/12/2022.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W., 1988, **Applied Hydrology**, McGraw-Hill.
- CONNELL, R.J.; PAINTER, D.J.; BEFFA, C., 2001, Two-Dimensional Flood Plain Flow, II: Model Validation, **Journal of Hydrologic Engineering**, vol. 6, nº 5, pp. 406-415
- CUNGE, J.A., HOLLY Jr., F.M.; VERWEY, A., 1980, **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**, Pitman Advanced Publishing Program.
- GLOBO, 2019, Moradores do jardim maravilha sofrem com as consequências da chuva. Disponível em: < <https://globoplay.globo.com/v/7528515/>>. Acesso em: 21/12/2022.
- GLOBO, 2010, Enchentes no Rio – 2010 – Memória Globo. Disponível em: <<https://memoriaglobo.globo.com/jornalismo/coberturas/enchentes-no-rio-2010/>>. Acesso em 08/03/2022.
- GORN, S., BEMER, R.W., GREEN, J., 1963, American Standard Code for Information Interchange, **Communications of the ACM**, v. 6, n. 8, p. 422-426

HAILE, A.T., RIENTJES, T.H., 2005, Effects of LIDAR DEM resolution in flood modelling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras, **Workshop Laser scanning 2005**, Enschede, Holanda, 168-173.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH)/ AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), **HIDROWEB – Sistemas de Informações Hidrológicas**. Disponível em < www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em 20/09/2022.

HIRABAYASHI, Y., MAHENDRAN, R., KOIRALA, S., et al., 2013, Global flood risk under climate change, **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 816-821.

HORRIT, M.S., BATES, P.D., 2001, Effects on a spatial resolution on a raster based model of flood flow, **Journal of Hydrology** **253**, p. 239-249.

HORRIT, M.S., BATES, P.D., 2001, Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach, **Hydrological Processes**, v. 15, 825-842

HUNTER, N. M., BATES, P. D., HORRITT, M. S., et al., 2007, Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review, **Geomorphology**, v. 90, n. 3, pp. 208-225.

HUNTER, N., HORRIT, M., BATES, P., et al, 2005, An Adaptive time step solution for raster-based cell modelling of floodplain inundation, **Advances in Water Resources**, v.28, n. 9, p. 975-991.

LIVI, C.P., 2004, **Fundamentos de Fenômenos de Transporte: Um Texto para Cursos Básicos**, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

MIGUEZ, M. G., 2001, **Modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas**, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MIGUEZ, M. G., BATTEMARCO, B. P., SOUSA, M. M., et al., 2017, Urban Flood Simulation Using MODCEL- An Alternative Quasi-2D Conceptual Model, **Water**, v. 9, n. 45, p. 1-28.

NKWUNONWO, U.C., WHITWORTH, M., BAILY, B., 2020, A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries, *Scientific African*, v. 7, e00269.

PAZ, A. R. 2010, **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**, tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre.

POPESCU, I. 2014, **Computational Hydraulics: Numerical Methods and Modelling**, Londres, IWA.

REZENDE, O.M., 2018, **Análise Quantitativa Da Resiliência A Inundações Para O Planejamento Urbano: Caso Da Bacia Do Canal Do Mangue No Rio De Janeiro**, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

REZENDE, O.M.; MIGUEZ, M.G.; VERÓL, A.P., 2013, Manejo de Águas Urbanas e sua Relação com o Desenvolvimento Urbano em Bases Sustentáveis Integradas – Estudo de Caso dos Rios Pilar-Calombé, em Duque de Caxias/RJ, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 18, n. 2, pp. 149-163

RIBEIRO, N. F., Rios Urbanos e as Relações do/no Espaço Livre (Estudo de Caso Bacia do Rio Piraguê-Cabuçu, Zona Oeste do Rio de Janeiro), Dissertação de mestrado, PPGAU/UFF, Niterói.

RIO-ÁGUAS, 2019, **Instruções Técnicas Para Elaboração De Estudos Hidrológicos E Dimensionamento Hidráulico De Sistemas De Drenagem Urbana**, Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas- Rio-Águas, Secretaria Municipal de Obras, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RIO DE JANEIRO, PDMAP, 2012, **Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro**, Prefeitura do Rio de Janeiro – Rio Águas.

ROSMAN, P. C. C., 2001, Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: SILVA, R. C. V. (Comp.), **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, Rio de Janeiro: ABRH. Cap. 1, p. 1-161.

SOARES, A. K., DA SILVA, S. S., SANTOS, L. P. S., *et al.*, 2016, Ocupação De Áreas Inundáveis E Medidas Adotadas Para Minimizar Alagamentos: Estudo De Caso Do Setor Gentil Meiréles, Goiânia-GO, **Blucher Engineering Proceedings**, v. 3, n. 2, p. 544-551.

SOUSA, M.M., 2010, **Comparação de Ferramentas de Modelagem Unidimensional e Quasi-bidimensional, Permanente e Não Permanente, em Planejamento e Projetos de Engenharia Hidráulica**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SOUSA M. M., 2017, **Avaliação Comparativa de Metodologias de Modelagem Hidráulica 2D E seu Impacto na Interpretação E Avaliação de Ondas de Cheia**, Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SOUSA, M. M., MIGUEZ, M. G., OLIVEIRA, A. K. B., *et al.*, 2018, Uso de modelo raster para simulação de áreas urbanas: potenciais e limitações. In: XII ENAU, Maceió. **Anais do XII Encontro Nacional de Águas Urbanas**.

SOUSA, M.M., OLIVEIRA, A. K. B., REZENDE, O. M., MAGALHÃES, P. M. C., JACOB, A. C. P., MAGALHÃES, P. C., MIGUEZ, M. G., 2022, Highlighting The Role Of The Model User And Physical Interpretation In Urban Flooding Simulation, **Journal of Hydroinformatics**, v. 24, n. 5, p. 976-991.

WILKS, D.S., 2011, **Statistical Methods In The Atmospheric Sciences**, Academic Press.