

ANÁLISE QUANTITATIVA DA RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES PARA O  
PLANEJAMENTO URBANO: CASO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE  
NO RIO DE JANEIRO

Oswaldo Moura Rezende

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2018

ANÁLISE QUANTITATIVA DA RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES PARA O  
PLANEJAMENTO URBANO: CASO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE  
NO RIO DE JANEIRO

Oswaldo Moura Rezende

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Marcelo Gomez Miguez, D.Sc.

---

Prof. Ana Lúcia Nogueira de Paiva Britto, Docteur

---

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento, Docteur

---

Prof. Paulo Canedo de Magalhães, Ph.D.

---

Prof. Emilio Lèbre La Rovere, Docteur

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 2018

Rezende, Osvaldo Moura

Análise Quantitativa da Resiliência a Inundações para o Planejamento Urbano: Caso da Bacia do Canal do Mangue no Rio de Janeiro / Osvaldo Moura Rezende – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXII, 260 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 251 - 260.

1. Manejo Sustentável de Águas Pluviais. 2. Medidas de Controle de Inundações Distribuídas. 3. Gestão do Risco de Inundações. I. Miguez, Marcelo Gomes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

"Ora, o verde representa a esperança, o rosa representa o amor,  
como o amor pode não combinar com a esperança?"  
Angenor de Oliveira

À minha filha, Alice,  
com amor e esperança.

## **Agradecimentos**

Entre os anos de 2012 e 2016, desenvolvi boa parte das atividades que culminaram na publicação da presente tese. Porém, desde o meu ingresso na Universidade Federal do Rio de Janeiro, obtive o apoio, a amizade e o incentivo de inúmeras pessoas que passaram em minha vida. Muitas, de passagem, outras tantas, ainda companheiras próximas de viagem. A todas essas pessoas, agradeço os momentos em que, muitas vezes sem saber, estavam contribuindo de alguma forma à minha formação, como profissional, como engenheiro, como cidadão, como ser humano.

Agradeço especialmente ao cidadão brasileiro, contribuinte, que suporta um sistema de ensino e pesquisa de excelência, mesmo em um país tão desigual em oportunidades. Sistema o qual permitiu que toda a minha formação profissional e acadêmica fosse gratuita e de alta qualidade, me mantendo em contato com o estado da arte da engenharia.

Agradeço a toda a minha família, sempre ao meu lado em momentos de decisões delicadas durante esses anos, tanto em minha vida pessoal quanto profissional.

Aos meus grandes amigos, orientadores e colegas professores Marcelo Gomes Miguez e Paulo Canedo de Magalhães, por uma amistosa caminhada profissional, sem se afastar de conselhos pessoais durante muitos momentos de reflexão e de obstáculos, um especial agradecimento.

Entre pontos positivos de amadurecimento dos últimos anos, preciso agradecer imensamente à mãe de minha filha Alice, Juliana Martins Bahiense, por todo seu envolvimento em me mostrar a verdadeira consistência do amor paterno, o qual precisa ser alimentado e nutrido dia a dia, em uma eterna espiral ascendente de dedicação. Obrigado por tudo. Metade do pai que sou, devo a você.

Ao grande amigo, com o qual tive o prazer de fundar e desenvolver a empresa AquaFluxus, Matheus Martins, pela amizade e parceria profissional, aos trancos e barrancos, mas com uma especial relação de carinho e admiração, um muito obrigado.

A minha amiga Ana Caroline Pitzer, pelo círculo de amizade que construímos e que tanto me amparou em momentos difíceis, um especial agradecimento e um pedido de desculpas por tantos vacilos ao longo dessa nossa amizade que assumiu também uma produtiva

relação profissional, com nosso trabalho lado a lado na AquaFluxus. Muito obrigado por não desistir de mim, ainda, rrsrrs.

Um agradecimento a minha amiga Luiza Ribeiro, parceira antiga das pegadas de projeto sem hora para terminar. Valeu pela demonstração de garra e comprometimento, tanto com nossos primeiros trabalhos no LHC/UFRJ, como posteriormente, juntos também na AquaFluxus. Muito obrigado pelas puxadas de orelha também, exigindo minha dedicação a esse trabalho.

Aos amigos de trampo do LHC/UFRJ, um agradecimento pela parceria do dia a dia, pela dose extra de zoeira diária, pelos cafés sem fim. Entre tantos colegas de trabalho, sempre há aqueles que se tornam grandes amigos. Valeu meus camaradas Antonio Krishnamurti e Francis Miranda, pelos profundos papos filosóficos de bar, pelas quebradeiras e pequenos acidentes de percurso, mas sobretudo, pela amizade verdadeira, construída na empatia, no amor e na parceria. Aos queridos amigos, prof. Virgílio Noronha, Isaac Balster e Bruna Battemarco, pelo companheirismo.

Um agradecimento especial a uma parceira especial, que acompanhou e torceu pelo sucesso desse trabalho, sempre me motivando nas horas do desespero e me criticando nas horas de construção de ideias. Muito obrigado Anna Beatriz Franco, por seu carinho.

A minha amiga “ufrjotana” de longa data, Aline Veról, valeu mesmo por todo o incentivo que me deu, em toda a jornada da pós-graduação no PEC/COPPE/UFRJ. Aos bate-papos descontraídos no café e às conversas sérias sobre a vida e a carreira, muito obrigado pela companhia.

Agradeço às pessoas do LHC/UFRJ que passaram por meu trabalho diretamente, desde o início, na fase de montagem das bases de dados que permitiram as avaliações propostas na pesquisa, em especial Isadora Tebaldi e Guilherme, e nas fases intermediárias que já começavam a apresentar resultados positivos, com muito apoio de Flavia Sipres e Laurent Feu. A Luciana Guimarães, um muito obrigado pelo empenho em toda a fase de calibração do modelo. Agradeço também a Franklin Sobrinho, pelo sempre apoio e gentileza para resolver os empecilhos burocráticos da universidade.

Agradeço, especialmente, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro à minha pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE QUANTITATIVA DA RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES PARA O  
PLANEJAMENTO URBANO: CASO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE  
NO RIO DE JANEIRO

Oswaldo Moura Rezende

Fevereiro/2018

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Programa: Engenharia Civil

O problema das enchentes urbanas ainda é, em muitos casos, tratado como uma consequência direta do excesso de chuva, sem considerar o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema interdependente e sem considerar as suas interfaces com o próprio desenvolvimento da ocupação do território. A abordagem tradicional implica em continuadas intervenções localizadas e corretivas, pós eventos, exigindo investimentos cada vez maiores para implantação de estruturas capazes de comportar o aumento de vazões gerado pela urbanização, com consequentes transtornos para a própria área urbana já instalada. Esses esforços não evitaram que inundações continuem a provocar grandes prejuízos em todo o mundo, indicando a necessidade de uma mudança na estratégia de manejo das águas pluviais, passando de uma análise custo-benefício simplificada das obras estruturais de controle de enchentes para uma abordagem de gerenciamento do risco aplicado a um plano de manejo de águas pluviais, com a internalização do risco residual, considerando as diversas incertezas inerentes ao processo de formação das cheias, como as mudanças climáticas e o próprio desenvolvimento urbano. A presente pesquisa aplica o gerenciamento de risco de inundações para análise da eficiência de projetos como ferramenta essencial para o planejamento do território e avaliação da resiliência urbana.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

QUANTITATIVE ANALYSIS OF FLOOD RESILIENCE FOR URBAN PLANNING:  
CASE OF THE CANAL DO MANGUE IN-RIO DE JANEIRO

Oswaldo Moura Rezende

February/2018

Advisor: Marcelo Gomes Miguez

Department: Civil Engineering

Urban flooding is still, in many cases, treated as a straight consequence of excess rainfall, without considering the watershed functioning as an interdependent system and its interfaces with the development of the territory occupation. The traditional approach implies continuous localized and corrective interventions, post-events, requiring increasingly large investments for the implementation of structures able to accommodate the increased runoff generated by urbanization, with consequent disturbances to the urban area already installed. These efforts have not prevented floods from continuing to cause major damage worldwide, indicating the need for a change in stormwater management strategy from a simple cost-benefit analysis of structural flood control measures to a risk management approach applied to a stormwater management plan, with residual risk internalization, regarding uncertainties inherent in flooding process, such as climate change and urban development. The present research applies flood risk management to analyze the efficiency of urban drainage interventions as an essential tool for territory planning and urban resilience evaluation.



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	2
1.2	MOTIVAÇÃO .....	3
1.3	HIPÓTESES DE TRABALHO .....	7
1.4	METODOLOGIA GERAL .....	7
<b>2</b>	<b>BASE TEÓRICA</b> .....	<b>10</b>
2.1	MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM AMBIENTES URBANOS .....	15
2.1.1	<i>Abordagens da Drenagem Urbana</i> .....	15
2.1.2	<i>Sustentabilidade na Drenagem Urbana</i> .....	20
2.1.3	<i>Cidades Sensíveis à Água</i> .....	28
2.2	AS CIDADES E O RISCO DE INUNDAÇÕES .....	31
2.2.1	<i>O Desenvolvimento Urbano e sua relação com as Águas Pluviais</i> .....	32
2.2.2	<i>Risco: uma palavra, muitos significados</i> .....	42
2.2.3	<i>Risco de inundações</i> .....	45
2.2.4	<i>Risco Residual</i> .....	53
2.2.5	<i>Resiliência às Inundações</i> .....	55
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA</b> .....	<b>63</b>
3.1	SISTEMA DE MODELAGEM MATEMÁTICA.....	64
3.2	ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE DE RESILIÊNCIA ÀS INUNDAÇÕES .....	69
3.2.1	<i>Índice de Risco de Cheia</i> .....	69
3.2.2	<i>Escala de Resiliência</i> .....	72
3.2.3	<i>Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES</i> .....	74
3.3	APLICAÇÃO DO IRES A UMA BACIA URBANA.....	90
3.3.1	<i>Critério de Cenários Futuros</i> .....	91
3.3.2	<i>Critério Multieventos</i> .....	93
3.4	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....	96
3.5	PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA EM BACIAS URBANAS.....	98
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO: A BACIA DO CANAL DO MANGUE – BCM, RJ ...</b>	<b>104</b>
4.1	BREVE HISTÓRICO SOBRE A BCM.....	106
4.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BCM .....	111
4.2.1	<i>Caracterização Geológica, Geomorfológica e Pedológica</i> .....	113

4.2.2	<i>Relevo</i> .....	115
4.2.3	<i>Vegetação</i> .....	116
4.2.4	<i>Clima</i> .....	117
4.2.5	<i>Fluviomorfologia</i> .....	117
4.3	CARACTERÍSTICAS SÓCIOECONOMICAS E AMBIENTAIS DA BCM .....	121
4.4	ÁREAS DE INUNDAÇÃO RECORRENTES .....	130
4.5	PROJETOS DE CONTROLE DE INUNDAÇÕES NA BCM .....	131
4.5.1	<i>Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue – PBCM</i> ....	137
4.5.2	<i>Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP/RJ</i> .....	140
4.6	MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DA BCM.....	147
4.6.1	<i>Revisão da Base de Dados da BCM</i> .....	148
4.6.2	<i>Calibração e Validação do Modelo da BCM</i> .....	151
4.6.3	<i>Domínio de modelagem e domínio de interesse</i> .....	164
4.7	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS .....	166
4.7.1	<i>Condição C0 – Bacia sem intervenções</i> .....	172
4.7.2	<i>Condição C1 – Bacia com intervenções concentradas</i> .....	178
4.7.3	<i>Condição C2 – Bacia com intervenções distribuídas</i> .....	189
4.7.4	<i>Cenários futuros com mudanças climáticas</i> .....	201
4.7.5	<i>Análise comparativa entre os cenários simulados</i> .....	203
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO IRES À BCM .....</b>	<b>212</b>
5.1	MAPEAMENTO ESPACIAL DO IRES .....	212
5.1.1	<i>Subíndice de risco à capacidade de resistência - SiR</i> .....	212
5.1.2	<i>Subíndice de risco à capacidade de recuperação material - SiC</i> .....	216
5.1.3	<i>Subíndice de risco à manutenção do funcionamento -SiF</i> .....	223
5.1.4	<i>Índice de Resiliência às Inundações da BCM</i> .....	233
5.2	APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE CENÁRIOS FUTUROS .....	235
5.3	APLICAÇÃO DO CRITÉRIO MULTIEVENTOS.....	237
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CENÁRIOS SIMULADOS .....	243
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>244</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>251</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – FOTOGRAFIA HISTÓRICA DE INUNDAÇÃO NO CANAL DO MANGUE, COM ESTAÇÃO LEOPOLDINA AO FUNDO. FONTE: AGÊNCIA O GLOBO, 11/01/1966.....	6
FIGURA 2.1 – PARADIGMAS NA ABORDAGEM SOBRE OS SISTEMAS DE MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....	14
FIGURA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÕES .....	18
FIGURA 2.3 – AUMENTO DA INTEGRAÇÃO E SOFISTICAÇÃO DA GESTÃO DA DRENAGEM URBANA AO LONGO DO TEMPO (ADAPTADO DE FLETCHER <i>ET AL.</i> , 2015) .....	20
FIGURA 2.4 – EVOLUÇÃO DA RELAÇÃO DAS CIDADES COM AS SUAS ÁGUAS URBANAS (BROWN <i>ET AL.</i> , 2008, ADAPTADO DE VERÓL, 2013) .....	26
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS DIVERSAS ABORDAGENS DO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS, SEGUNDO ABRANGÊNCIA CONCEPTUAL (FLETCHER <i>ET AL.</i> , 2015). .....	27
FIGURA 2.6 – BALANÇO HÍDRICO PARA UMA CIDADE SENSÍVEL À ÁGUA, SEGUNDO O WSUD.ORG.....	29
FIGURA 2.7 – GERENCIAMENTO INTEGRADO DO CICLO DA ÁGUA (ADAPTADO DE CIRIA, 2013).....	31
FIGURA 2.8 – VARIAÇÃO POPULACIONAL NO BRASIL, POR DÉCADA (FONTE DE DADOS: IBGE) .....	33
FIGURA 2.9 – OCORRÊNCIA DE DESASTRES NATURAIS, POR TIPO, ENTRE 1995 E 2015. (CRED, 2015) .....	33
FIGURA 2.10 – PESSOAS AFETADAS POR DESASTRES DE ORIGEM CLIMÁTICA (1995 – 2015) – FONTE: CRED, 2015 .....	34
FIGURA 2.11 – PESSOAS MORTAS POR TIPO DE DESASTRE (1995 – 2015). FONTE: CRED, 2015 .....	34
FIGURA 2.12 – EFEITOS DA URBANIZAÇÃO (ADAPTADO DE HALL, 1986).....	38
FIGURA 2.13 – NÚMERO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO REGISTRADOS E PREJUÍZOS ESTIMADOS TOTAIS NO MUNDO, ENTRE OS ANOS DE 1950 E 2017. FONTE DE DADOS: EM-DAT - <i>THE EMERGENCY EVENTS DATABASE</i> .....	41
FIGURA 2.14 – A EVOLUÇÃO DA PRÁTICA DO GERENCIAMENTO DO RISCO (SAYERS <i>ET AL.</i> , 2013).....	42
FIGURA 2.15 - MAPA DE PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES PARA UM HORIZONTE DE 50 ANOS (AQUAFLUXUS, 2014, ACERVO TÉCNICO). .....	47
FIGURA 2.16 – COMPONENTES DO RISCO (ZONENSEIN, 2007) .....	48

FIGURA 2.17 – AS COMPONENTES DO RISCO DE INUNDAÇÕES (ADAPTADO DE SAYERS ET AL, 2013).....	49
FIGURA 2.18 – ESCALAS DE PLANEJAMENTO PARA O GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES.....	51
FIGURA 2.19 – CICLO DO GERENCIAMENTO DE RISCO (ADAPTADO DE BARA E BRÖNNIMANN, 2011). .....	52
FIGURA 2.20 – REDUÇÃO DE RISCO EM CONSEQUÊNCIA DA ADOÇÃO DE MEDIDAS DE PROTEÇÃO CONTRA INUNDAÇÕES. (ADAPTADO DE SUFRI, 2011) .....	54
FIGURA 2.21 – MEDIDA DE RESILIÊNCIA, SEGUNDO TEMPO DE RECUPERAÇÃO (ADAPTADO DE LIAO, 2012) .....	56
FIGURA 2.22 – ABORDAGEM CONCEITUAL DA RESILIÊNCIA NA ENGENHARIA E NA ECOLOGIA (ADAPTADO DE LIAO, 2012) .....	57
FIGURA 2.23 – MUDANÇA DE PARADIGMA DO CONTROLE DE INUNDAÇÕES PARA A RESILIÊNCIA.....	59
FIGURA 3.1 – ETAPAS DE MODELAGEM DE UMA REGIÃO HIPOTÉTICA (MIGUEZ, 2001)..	68
FIGURA 3.2 – COMPOSIÇÃO GERAL DO IRES .....	77
FIGURA 3.3 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE EXPOSIÇÃO DE EDIFICAÇÕES ( <i>I<sub>e</sub></i> ) .....	78
FIGURA 3.4 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE EXPOSIÇÃO DE INFRAESTRUTURA ( <i>I<sub>ei</sub></i> ) .....	79
FIGURA 3.5 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE PROFUNDIDADE DE ALAGAMENTO, REFERENTE AO PERIGO. ....	80
FIGURA 3.6 – RESULTADOS DE TESTE DE PERDA DE ESTABILIDADE (RESCDAM. 2003) .	85
FIGURA 3.7 – NORMALIZAÇÃO DE <i>IFV</i> SEGUNDO O FATOR DE VELOCIDADE <i>FV</i> . .....	85
FIGURA 3.8 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE ATENDIMENTO POR TRANSPORTES SOBRE TRILHO. ....	88
FIGURA 3.9 – NORMALIZAÇÃO DOS PERÍODOS DE ALAGAMENTO, SEGUNDO AS CLASSES T1, T2 E T3.....	89
FIGURA 3.10 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE DIFICULDADE DE ACESSO DE AJUDA <i>Ida</i> .....	90
FIGURA 3.11 – ESQUEMA DE CÁLCULO DO IRES INTEGRAL, COM USO DA METODOLOGIA MULTIEVENTO.....	95
FIGURA 3.12 – ESQUEMA DE REPRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	97
FIGURA 3.13 – FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVA DA RESILIÊNCIA ÀS INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS, COM USO DO IRES.....	103

FIGURA 4.1 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	105
FIGURA 4.2 – IMAGEM CARTOGRÁFICA DO RIO DE JANEIRO EM 1567, MOSTRANDO OS PRINCIPAIS RIOS DA REGIÃO NORTE DESAGUANDO EM UM BRAÇO DA BAÍA DE GUANABARA, CONHECIDO COMO SACO DE SÃO DIOGO. FONTE: COLEÇÃO DO ENGENHEIRO JORGE ACHNOOR .....	106
FIGURA 4.3 – IMAGEM CARTOGRÁFICA DO RIO DE JANEIRO EM 1902/1906, APRESENTANDO PARTE DA CONFIGURAÇÃO ATUAL DO CENTRO DO RIO DE JANEIRO, COM SACO DE SÃO DIEGO CONFINADO NO CANAL DO MANGUE. FONTE: COLEÇÃO DO ENGENHEIRO JORGE ACHNOOR .....	107
FIGURA 4.4 – REPRESENTAÇÃO FIGURATIVA DA REGIÃO PORTUÁRIA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, NO ANO DE (A) 1500 E NO ANO (B) 2000. (SMU-RJ) .....	108
FIGURA 4.5 – ÁREA ATERRADA NA REGIÃO PORTUÁRIA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, DESTACADA EM AMARELO. (SMU-RJ) .....	109
FIGURA 4.6 – LOCALIZAÇÃO DAS OCUPAÇÕES IRREGULARES POR FAVELAS NA BACIA DO CANAL DO MANGUE, MAJORITARIAMENTE EM ÁREAS DE ENCOSTA. ....	110
FIGURA 4.7 – REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CANAL DO MANGUE .....	113
FIGURA 4.8 – RELEVO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	116
FIGURA 4.9 – PRINCIPAIS RIOS DA BACIA DO CANAL DO MANGUE .....	118
FIGURA 4.10 – DIVISÃO ADMINISTRATIVA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, NA REGIÃO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE, SEGUNDO IPP.....	122
FIGURA 4.11 – MAPA SOCIOECONÔMICO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	123
FIGURA 4.12 – TIPOLOGIA DOS DIVERSOS USOS DO SOLO ENCONTRADOS NA BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	124
FIGURA 4.13 – URBANIZAÇÃO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	125
FIGURA 4.14 – MAPA DE DENSIDADE DOMICILIAR NA BACIA DO CANAL DO MANGUE...	126
FIGURA 4.15 – DIMENSÕES COMPONENTES DO ÍNDICE DE BEM-ESTAR URBANO (RIBEIRO & RIBEIRO, 2013).....	127
FIGURA 4.16 – ÍNDICE DE BEM-ESTAR URBANO (IBEU) PARA A BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	128
FIGURA 4.17 – MAPEAMENTO DO INDICADOR DE EXISTÊNCIA DE BOCA-DE-LOBO NA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	129
FIGURA 4.18 – MAPEAMENTO DE ÁREAS COM REGISTROS DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO.	131
FIGURA 4.19 – ANTIGA FOTOGRAFIA DO CANAL DO MANGUE, NO FINAL DO SÉCULO XIX. .....	132

FIGURA 4.20 – TRAÇADO DO TÚNEL EXTRAVASOR. (CLUBE DE ENGENHARIA, 2011)...	133
FIGURA 4.21 – LINHA TEMPORAL COM PRINCIPAIS EVENTOS DE INUNDAÇÃO, INVESTIMENTOS EM OBRAS PARA CONTROLE DAS ENCHENTES E MARCOS DA URBANIZAÇÃO NA BACIA DO CANAL DO MANGUE (MAGALHÃES, 2013). ....	136
FIGURA 4.22 – RESERVATÓRIO RJ1, NO RIO JOANA.....	142
FIGURA 4.23 – RESERVATÓRIO RJ3, NO RIO JACÓ. ....	142
FIGURA 4.24 – TRAÇADO DO DESVIO DO RIO JOANA, DESTACADO EM VERMELHO, COM DESAGUE INDEPENDENTE NA BAÍA DE GUANABARA. ....	143
FIGURA 4.25 – GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO MARACANÃ PARA O RIO JOANA, COM TRECHO DE REFORÇO ATÉ O LOCAL DO DESVIO PARA A BAÍA DE GUANABARA. ....	144
FIGURA 4.26 – RESERVATÓRIO RT-1 NO RIO TRAPICHEIROS .....	146
FIGURA 4.27 – RESERVATÓRIO RT-2 NO RIO TRAPICHEIROS, SOB A PRAÇA DA BANDEIRA .....	146
FIGURA 4.28 – DIVISÃO EM CÉLULAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CANAL DO MANGUE .....	149
FIGURA 4.29 – TELA DE TRABALHO DO MODCEL, COM CÉLULAS DESENHADAS, COM CADA COR REPRESENTANDO UM TIPO DE CÉLULA DO MODELO.....	150
FIGURA 4.30 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO UTILIZADAS PARA A CALIBRAGEM DO MODELO MATEMÁTICO DA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	152
FIGURA 4.31 – HIETOGRAMA MEDIDO NO EVENTO SELECIONADO PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO, COM INTERVALOS DE 30 MINUTOS.....	153
FIGURA 4.32 – HIETOGRAMA MEDIDO NO EVENTO SELECIONADO PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO, COM INTERVALOS DE 5 MINUTOS.....	154
FIGURA 4.33 – ADAPTAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES À DIVISÃO DE CÉLULAS DA BCM. ....	155
FIGURA 4.34 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	156
FIGURA 4.35 – VARIAÇÃO DA ONDA DE MARÉ NO POSTO ILHA FISCAL, NA BAÍA DE GUANABARA, DURANTE OS DIAS DE OCORRÊNCIA DOS EVENTOS ESCOLHIDOS PARA (A) CALIBRAÇÃO E (B) VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO. ....	158
FIGURA 4.36 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO J5 (RIO JOANA). EVENTO DE CALIBRAÇÃO.....	160
FIGURA 4.37 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO M11 (RIO MARACANÃ). EVENTO DE CALIBRAÇÃO.....	160

FIGURA 4.38 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO M27 (RIO MARACANÃ). EVENTO DE CALIBRAÇÃO.....	161
FIGURA 4.39 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO T2 (RIO TRAPICHEIROS). EVENTO DE CALIBRAÇÃO. ....	161
FIGURA 4.40 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO T14 (RIO TRAPICHEIROS). EVENTO DE CALIBRAÇÃO.....	162
FIGURA 4.41 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO C4 (RIO COMPRIDO). EVENTO DE CALIBRAÇÃO. ....	162
FIGURA 4.42 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO J5 (RIO JOANA). EVENTO DE VALIDAÇÃO. ....	163
FIGURA 4.43 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO M11 (RIO MARACANÃ). EVENTO DE VALIDAÇÃO. ....	163
FIGURA 4.44 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO T2 (RIO TRAPICHEIROS). EVENTO DE VALIDAÇÃO. ....	164
FIGURA 4.45 – NÍVEIS D'ÁGUA SIMULADOS E OBSERVADOS NO POSTO FLUVIOMÉTRICO C4 (RIO COMPRIDO). EVENTO DE VALIDAÇÃO. ....	164
FIGURA 4.46 – DOMÍNIOS DE MODELAGEM E DE INTERESSE PARA SIMULAÇÃO DE CHEIAS E AVALIAÇÃO DE RISCO. ....	166
FIGURA 4.47 – LOCALIZAÇÃO DO BAIRRO DO GRAJAU DENTRO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO POSTO SABÓIA LIMA.....	167
FIGURA 4.48 – HIETOGRAMAS DE PROJETO UTILIZADOS NOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO NA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	169
FIGURA 4.49 – EVENTO HIDROLÓGICO FUTURO COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA, CONSIDERANDO UM POSSÍVEL IMPACTO DO PROCESSO DE MUDANÇA CLIMÁTICA NO AUMENTO DO VOLUME DE CHUVAS INTENSAS. ....	170
FIGURA 4.50 – VARIAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA NA BAÍA DE GUANABARA, CONSIDERADA COMO CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS DE CHEIA NA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	170
FIGURA 4.51 – HIDROGRAMAS DE CHEIA NOS PRINCIPAIS RIOS E CANAIS DA BACIA DO CANAL DO MANGUE, RESULTANTE DE UMA CHUVA COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA. ....	174
FIGURA 4.52 – MANCHAS DE ALAGAMENTO PARA O CENÁRIO SEM INTERVENÇÕES NA BACIA – C0. ....	175

FIGURA 4.53 – MANCHA DE ALAGAMENTO RESULTANTE DA CHUVA COM RECORRÊNCIA ANUAL, AO LONGO DO CURSO DO RIO DOS URUBUS, ENTRE OS BAIROS DO ANDARÁI, VILA ISABEL E GRAJAÚ. ....	176
FIGURA 4.54 – MANCHA DE ALAGAMENTO PARA A REGIÃO DA PRAÇA DA BANDEIRA, EM DECORRÊNCIA DE UMA CHUVA COM 10 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA. ....	177
FIGURA 4.55 – FOTOGRAFIA DA RUA DO MATOSO FEITA DURANTE UM EVENTO DE INUNDAÇÃO, NO DIA 12/03/2016 (FOTO DIVULGADO EM O GLOBO < <a href="https://goo.gl/CMF79Q">HTTPS://GOO.GL/CMF79Q</a> >). ....	177
FIGURA 4.56 – LOCALIZAÇÃO DAS OBRAS PROPOSTAS NO PDMAP, PARA REDUÇÃO DOS RISCOS DE INUNDAÇÃO NA BACIA DO CANAL DO MANGUE, SOBRE A DIVISÃO DE CÉLULAS. ....	178
FIGURA 4.57 – LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA REPRESENTATIVA DO RESERVATÓRIO RJ-1, NO MODCEL. ....	179
FIGURA 4.58 – PADRÃO DE FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO RESERVATÓRIO RJ-1, PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 25 ANOS, PRECIPITANDO SOBRE A BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	180
FIGURA 4.59 – LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA REPRESENTATIVA DO RESERVATÓRIO RJ-3, NO MODCEL. ....	181
FIGURA 4.60 – PADRÃO DE FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO RESERVATÓRIO RJ-3, PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 25 ANOS, PRECIPITANDO SOBRE A BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	181
FIGURA 4.61 – LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA REPRESENTATIVA DO RESERVATÓRIO RT-1, NO MODCEL. ....	182
FIGURA 4.62 – PADRÃO DE FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO RESERVATÓRIO RT-1, PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 25 ANOS, PRECIPITANDO SOBRE A BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	183
FIGURA 4.63 – LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA REPRESENTATIVA DO RESERVATÓRIO RT-2, NO MODCEL. ....	184
FIGURA 4.64 – PADRÃO DE FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO RESERVATÓRIO RT-2, PARA UMA CHUVA COM TEMPO DE RECORRÊNCIA DE 25 ANOS, PRECIPITANDO SOBRE A BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	184
FIGURA 4.65 – TRAÇADO PROPOSTO NO PDMAP PARA O DESVIO DO CURSO DO RIO JOANA. ....	185



FIGURA 4.66 – HIDROGRAMAS DE CHEIA RESULTANTES DA CHUVA COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA NO INÍCIO E NO FIM DO TÚNEL DE DESVIO DO RIO JOANA.	186
FIGURA 4.67 – TRAÇADO PROPOSTO PARA GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO MARACANÃ PARA O RIO JOANA E SEU TRECHO COM REFORÇO DE GALERIA. ....	187
FIGURA 4.68 – HIDROGRAMAS DE CHEIA RESULTANTE DA CHUVA COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA NO RIO MARACANÃ NO TRECHO PROPOSTO PARA TRANSPOSIÇÃO. ....	188
FIGURA 4.69 – HIDROGRAMAS DE CHEIA PARA CHUVA COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA, NO RIO MARACANÃ E NO CANAL DO MANGUE, NAS CONDIÇÕES SEM INTERVENÇÃO (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1). ....	188
FIGURA 4.70 – MANCHAS DE ALAGAMENTO PARA O CENÁRIO COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS NA BACIA – C1. ....	189
FIGURA 4.71 – TRECHOS DA CONCEPÇÃO DO PROJETO DE REQUALIFICAÇÃO URBANA DO ENTORNO DO RIO TRAPICHEIRO (PAIVA, 2017). ....	191
FIGURA 4.72 – LOCALIZAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS PROPOSTOS NO PBCM (COPPETEC, 2000) CONSIDERADOS NO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO C2. ....	192
FIGURA 4.73 – LOCALIZAÇÃO DAS PRAÇAS MULTIFUNCIONAIS, COM RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS. ....	194
FIGURA 4.74 – PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA PRAÇA EDMUNDO REGO, COM RESERVATÓRIO DE DETENÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS (COPPETEC, 2013). ....	195
FIGURA 4.75 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DRENAGEM COM USO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL. ....	197
FIGURA 4.76 – ESQUEMA DE REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE PAVIMENTO PERMEÁVEL NO MODCEL. ....	198
FIGURA 4.77 – ÁREAS MAPEADAS PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM COM PAVIMENTO PERMEÁVEL. ....	198
FIGURA 4.78 – MANCHAS DE ALAGAMENTO PARA O CENÁRIO COM INTERVENÇÕES DISTRIBUÍDAS NA BACIA – C2. ....	200
FIGURA 4.79 – PROFUNDIDADE DE ALAGAMENTO POR CÉLULA, RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES DAS CONDIÇÕES C0, C1 E C2 PARA O CENÁRIO FUTURO COM MUDANÇAS CLIMÁTICAS – TR25 ANOS. ....	201
FIGURA 4.80 – MANCHAS DE INUNDAÇÃO RESULTANTES DO CENÁRIO FUTURO COM IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. ....	202

FIGURA 4.81 – PROFUNDIDADES DE ALAGAMENTO POR CÉLULA, RESULTANTES DA SIMULAÇÃO DAS CHUVAS COM 10 E 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA. ....	204
FIGURA 4.82 – PROFUNDIDADES DE ALAGAMENTO POR ÁREA, RESULTANTES DA SIMULAÇÃO DA CHUVA COM 10 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA. ....	205
FIGURA 4.83 – HIDROGRAMAS DE CHEIA NOS PRINCIPAIS RIOS E CANAIS DA BACIA DO CANAL DO MANGUE, RESULTANTE DE UMA CHUVA COM 25 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA, PARA OS CENÁRIOS SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). ....	206
FIGURA 4.84 – TEMPOS DE PERMANÊNCIA DOS ALAGAMENTOS COM DIFERENTES PROFUNDIDADES. ....	208
FIGURA 4.85 – MANCHAS DE INUNDAÇÃO RESULTANTES DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM A CHUVA DE TR25 ANOS. ....	209
FIGURA 4.86 – MANCHAS DE INUNDAÇÃO PARA AS TRÊS CONDIÇÕES DO SISTEMA DE DRENAGEM (C0, C1 E C2), NOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS ATUAL E FUTURO. ....	211
FIGURA 5.1 – COMPOSIÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA ( <i>SiR</i> ).....	212
FIGURA 5.2 – MAPA COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS INDICADORES DE EXPOSIÇÃO DE EDIFICAÇÕES ( <i>Ie</i> ) E DE INFRAESTRUTURA URBANA ( <i>Iei</i> ). ....	213
FIGURA 5.3 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE PROFUNDIDADE DE ALAGAMENTO ( <i>IH</i> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). TR25.....	214
FIGURA 5.4 – ESPACIALIZAÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À CAPACIDADE DE RESISTÊNCIA ( <i>SiR</i> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). TR25.....	215
FIGURA 5.5 – COMPOSIÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO MATERIAL ( <i>SiC</i> ).....	216
FIGURA 5.6 – MAPA COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS INDICADORES DE SUSCEPTIBILIDADE DAS EDIFICAÇÕES ( <i>IS</i> ) E DE PESSOAS VULNERÁVEIS ( <i>Ipv</i> ).....	217
FIGURA 5.7 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE VALOR RELATIVO ( <i>Ivr</i> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA COM TR25.....	218

FIGURA 5.8 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE FATOR DE VELOCIDADE ( <b>IFV</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA COM TR25.....	220
FIGURA 5.9 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE VULNERABILIDADE SOCIAL ( <b>Ivs</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA COM TR25...	221
FIGURA 5.10 – ESPACIALIZAÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO MATERIAL ( <b>SiC</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). TR25. ....	222
FIGURA 5.11 – COMPOSIÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À MANUTENÇÃO DO FUNCIONAMENTO ( <b>SiF</b> ).....	223
FIGURA 5.12 – MALHA VIÁRIA NA BACIA DO CANAL DO MANGUE E HIERARQUIZAÇÃO DAS VIAS, SEGUNDO CET-RIO. ....	224
FIGURA 5.13 – ÁREAS DE INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES DE METRÔ E DE TREM, COM RAIOS DE 500 E 1.000 METROS, NA BACIA DO CANAL DO MANGUE.....	225
FIGURA 5.14 – MAPA COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS INDICADORES DE HIERARQUIA VIÁRIA ( <b>Ihv</b> ) E DE NÃO ATENDIMENTO POR TRANSPORTE SOBRE TRILHOS ( <b>Inat</b> ). ....	226
FIGURA 5.15 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE FATOR DE PERMANÊNCIA ( <b>IFP</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA TR25. ....	228
FIGURA 5.16 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE RISCO À MOBILIDADE ( <b>IRM</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA TR25. ....	229
FIGURA 5.17 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DO CORPO DE BOMBEIROS NA BACIA DO CANAL DO MANGUE E SUAS RESPECTIVAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA, BASEADAS EM PROXIMIDADE ESPACIAL. ....	230
FIGURA 5.18 – ESPACIALIZAÇÃO DO INDICADOR DE DIFICULDADE DE ACESSO DE AJUDA ( <b>Ida</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). CHUVA TR25. ....	231
FIGURA 5.19 – ESPACIALIZAÇÃO DO SUBÍNDICE DE RISCO À MANUTENÇÃO DO FUNCIONAMENTO ( <b>SiF</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM	

INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). TR25. ....	232
FIGURA 5.20 – COMPOSIÇÃO DO ÍNDICE DE RESILIÊNCIA ÀS INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS – IRES. ....	233
FIGURA 5.21 – ESPACIALIZAÇÃO DO ÍNDICE DE RESILIÊNCIA ÀS INUNDAÇÕES EM BACIAS URBANAS ( <b>IRES</b> ), PARA OS TRÊS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO, SEM INTERVENÇÕES (C0) E COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS (C1) E DISTRIBUÍDAS (C2). TR25. ...	234
FIGURA 5.22 – ESTIMATIVA DA ESCALA DE RESILIÊNCIA NA BACIA DO CANAL DO MANGUE. ....	236
FIGURA 5.23 – COMPOSIÇÃO DO IRES INTEGRALIZADO, PARA A CONDIÇÃO C0 – SEM INTERVENÇÕES. ....	238
FIGURA 5.24 – COMPOSIÇÃO DO IRES INTEGRALIZADO, PARA A CONDIÇÃO C1 – COM INTERVENÇÕES CONCENTRADAS. ....	239
FIGURA 5.25 – COMPOSIÇÃO DO IRES INTEGRALIZADO, PARA A CONDIÇÃO C2 – COM INTERVENÇÕES DISTRIBUÍDAS. ....	240
FIGURA 5.26 – ESQUEMA DE CÁLCULO DO IRES INTEGRALIZADO ESPACIALMENTE, PARA UMA DADA CONDIÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM. ....	241
FIGURA 5.27 – IRES MÉDIO PONDERADO EM FUNÇÃO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DAS CHUVAS DE PROJETO, PARA AS CONDIÇÕES DO SISTEMA DE DRENAGEM NA BACIA DO CANAL DO MANGUE (C0, C1 E C2). ....	242
FIGURA 5.28 – DISTRIBUIÇÃO POR ÁREA NA BACIA DAS FAIXAS DE RESILIÊNCIA, PARA CADA CONDIÇÃO SIMULADA. ....	243
FIGURA 6.1 HIERARQUIA DE COMPOSIÇÃO DE INDICADORES E ÍNDICES, A PARTIR DO ADENSAMENTO DE INFORMAÇÕES. ....	246
FIGURA 6.2 – OBJETIVOS DA REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES EM INDICADORES, PARA DIFERENTES ESCALAS DE ADENSAMENTO (SHIELDS <i>ET AL</i> , 2002). ....	248

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – FASES DO DESENVOLVIMENTO DAS ÁGUAS URBANAS.....	17
TABELA 2.2 - PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS PRÉ-DETERMINADOS. ....	46
TABELA 2.3 – ABORDAGENS DA RESILIÊNCIA (ADAPTADO DE BATICA, 2015).....	58
TABELA 3.1 – VALORES DO INDICADOR DE ALTURA <b>IA</b> , RELACIONADOS À ALTURA DA EDIFICAÇÃO <b>H</b> . ....	83
TABELA 3.2 – CAPACIDADE MÉDIA DE REPOSIÇÃO <b>CR</b> , RELACIONADA À FAIXA DE RENDIMENTO.....	83
TABELA 3.3 – CLASSIFICAÇÃO DE <b>IFV</b> SEGUNDO CLASSES DE RISCO DE ARRASTE, RELACIONADAS COM O FATOR DE VELOCIDADE <b>FV</b> .....	85
TABELA 3.4 – NORMALIZAÇÃO DO INDICADOR DE HIERARQUIA VIÁRIA, <b>Ihv</b> .....	87
TABELA 3.5 – OFERTA DE ESTAÇÕES E INDICADOR DE ATENDIMENTO DE TRANSPORTE SOBRE TRILHO <b>Iatt</b> .....	87
TABELA 3.6 – NORMALIZAÇÃO DE <b>Iatt</b> SEGUNDO CLASSES DE ATENDIMENTO.....	88
TABELA 4.1 – CLASSIFICAÇÃO SOCIOECONÔMICA, SEGUNDO CRITÉRIO BRASIL .....	123
TABELA 4.2 – ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DO SISTEMA ALERTA RIO .....	151
TABELA 4.3 – ALTURAS TOTAIS DE CHUVA NOS POSTOS SELECIONADOS PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....	153
TABELA 4.4 – DEFINIÇÃO INICIAL DOS COEFICIENTES DE MANNING (RUGOSIDADE) PARA AS LIGAÇÕES HIDRÁULICAS ENTRE GALERIAS E CANAIS. ....	157
TABELA 4.5 – ALTURAS DE CHUVA DOS EVENTOS HIDROLÓGICOS PROPOSTOS.....	168
TABELA 4.6 – VAZÕES DE PICO RESULTANTES DA MODELAGEM DO PDMAP (2011) E DO MODCEL. ....	173
TABELA 4.7 – FUNCIONAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DE ENCOSTA SIMULADOS NO CENÁRIO C2, PARA UMA CHUVA COM 10 ANOS DE TEMPO DE RECORRÊNCIA. ....	193
TABELA 4.8 – RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO ASSOCIADOS A PRAÇAS URBANAS PROPOSTOS PARA O CENÁRIO C2.....	196
TABELA 4.9 – IMPACTO DO CENÁRIO FUTURO NO AUMENTO DE ÁREAS ALAGADAS EM CADA UMA DAS CONDIÇÕES SIMULADAS (C0, C1 E C2).....	210
TABELA 5.1 – VALORES DE IRES MÉDIO PARA A BACIA DO CANAL DO MANGUE, NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS, PARA CADA CONDIÇÃO DA REDE DE MACRODRENAGEM SIMULADA (C0, C1 E C2).....	235

TABELA 5.2 – VALORES INTEGRALIZADOS DO IRES, PARA AS CONDIÇÕES DO SISTEMA DE DRENAGEM NA BACIA DO CANAL DO MANGUE SIMULADAS.....	242
TABELA 5.3 – FAIXAS DE RESILIÊNCIA .....	243

# 1 Introdução

Historicamente, o problema das enchentes urbanas foi tratado como uma consequência direta do excesso de chuva, sem se considerar, necessariamente, o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema interrelacionado e interdependente. Esta visão levou a engenharia a buscar soluções locais, intervindo no efeito provocado pelas precipitações na bacia urbanizada, ou seja, na adequação do sistema de drenagem às novas vazões geradas pós-urbanização.

Com esta abordagem, os projetos convencionais de controle de enchentes buscavam o aumento da capacidade dos rios e canais em drenar mais rapidamente as águas pluviais, isto é, o sistema de drenagem deveria atender às mudanças geradas pelo processo de urbanização nos hidrogramas naturais da bacia, que, pelo aumento da impermeabilização do solo, acentua e antecipa o pico do hidrograma de cheia. Em um ciclo reativo, novos padrões de escoamento, alterados pelo continuado crescimento urbano, passam a exigir novas intervenções para readequação da rede de drenagem.

Essa visão convencional da mera adaptação do sistema de drenagem aos padrões de escoamento das águas pluviais modificados pelo processo de urbanização e alteração do uso do solo ainda é frequentemente adotada, principalmente nos países periféricos como o Brasil. Nesta linha, grandes investimentos são destinados a obras de controle de enchentes sem a devida consideração das diversas relações entre as parcelas do ciclo hidrológico e do funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema. Como consequência, o poder público é obrigado a realizar recorrentes intervenções para adequar o sistema de drenagem às novas vazões de cheia, modificadas pela alteração do uso e ocupação do solo, devido a um processo de urbanização desordenado e sem planejamento.

Portanto, compreender a maneira pela qual o processo de urbanização age sobre as inundações é muito importante para um planejamento urbano adequado. A combinação de medidas estruturais e não-estruturais, integradas aos planos diretores, e o uso de estruturas da paisagem urbana com funções hidráulicas, permite uma composição capaz de lidar com os problemas de inundação urbana de forma sustentável (MIGUEZ *et al.*, 2005).

Mais recentemente, com o foco da gestão urbana voltado para a busca de cidades mais resilientes e adaptativas, frente às ameaças de um futuro cada vez mais incerto, tal configuração de medidas e ações se apresenta ainda com forte viés condutor para uma solução capaz de se manter robusta, reduzindo danos, e flexível, possibilitando a adaptação a possíveis novos padrões de impacto.

Apesar do crescimento da preocupação acerca do correto tratamento das águas urbanas, frente às alterações provocadas pelo processo de desenvolvimento urbano, eventos de inundações continuam a provocar grandes prejuízos em todo o mundo, mesmo nos países centrais, onde já há um avanço considerável na gestão das cidades em direção à sustentabilidade. Este quadro indica a necessidade de uma mudança na estratégia de gerenciamento das inundações, passando de uma simples análise custo-benefício das obras estruturais de controle de enchentes para uma abordagem de gerenciamento do risco das inundações, aplicado à um plano de manejo de águas pluviais, de forma a internalizar o risco residual. Para isto, devem ser consideradas as diversas incertezas inerentes ao processo de formação das cheias, como as mudanças climáticas e o desenvolvimento urbano.

Este novo desafio é abordado no presente trabalho, buscando oferecer alternativas práticas de análise que possam dar suporte ferramental ao planejamento do território, no intuito de considerar o manejo de águas pluviais como fator de estruturação do espaço, oferecendo soluções mais resilientes.

## **1.1 Objetivos**

A presente pesquisa tem como objetivo principal desenvolver e aplicar uma ferramenta de mensuração da resiliência urbana às inundações, para demonstrar seu potencial de suporte ao processo de decisão na fase de planejamento de projetos de redução de inundações. A partir desta ferramenta, propõe um processo metodológico que possibilita demonstrar possíveis vantagens da articulação do gerenciamento integrado de risco de inundações com o planejamento territorial da cidade, contrapondo duas concepções de intervenções na rede de drenagem urbana (concentrada e distribuída) de uma bacia com ocupação consolidada. Os seguintes objetivos específicos são considerados:

- ✓ Conceituar a concepção do manejo sustentável de águas pluviais, da gestão integrada do risco de inundações e do projeto urbano sensível à água, buscando suas possíveis inter-relações.



- ✓ Analisar o comportamento hidrológico e hidrodinâmico de uma bacia hidrográfica sujeita a profundos impactos no uso e ocupação do solo devido ao processo de urbanização, com uso de ferramenta computacional para modelagem matemática.
- ✓ Construir uma base de dados georreferenciada para a bacia hidrográfica em estudo, para uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão, facilitando a análise das áreas mais suscetíveis aos problemas de inundação e avaliação do efeito de possíveis intervenções no sistema.
- ✓ Avaliar diferentes cenários de projeto, elaborados a partir de concepções tradicionais e sustentáveis da gestão das águas pluviais, quantificando seus impactos em termos de redução dos riscos de inundações, a partir da aplicação de um índice de risco.
- ✓ Desenvolver uma ferramenta de mensuração da resiliência urbana às inundações, distribuída no espaço, denominada Índice de Resiliência a Inundações em Bacias Urbanas – IRES.
- ✓ Elaborar um processo metodológico de aplicação da ferramenta de mensuração da resiliência (IRES), replicável e que possibilite a avaliação de múltiplas concepções de projetos.
- ✓ Avaliar os efeitos da consideração de medidas distribuídas de drenagem urbana, integradas ao desenho urbano, no possível aumento da resiliência da cidade contra os problemas de inundação, internalizando o risco residual à gestão do sistema de águas pluviais.

## 1.2 Motivação

A abordagem de projeto para o controle de inundações vem passando por inúmeras modificações, deixando de ocupar um lugar secundário no planejamento das cidades para se tornar um importante componente da estrutura urbana. Assim, a visão tradicional **reativa** aos problemas é substituída por uma abordagem **proativa**, considerando as interrelações entre o ambiente natural e o construído. Essa mudança de paradigma encontra lugar no novo conceito de “Cidades Sensíveis à Água” (*Water Sensitive Urban Design – WSUD*), no qual parte-se do princípio que o planejamento urbano deve ser integrado à gestão, proteção e conservação do ciclo hidrológico natural.

Tradicionalmente, um projeto de controle de inundações passa por um encadeamento lógico com início nos estudos hidrológicos, para análise de valores extremos, seguindo-se pela seleção de uma chuva ou vazão de projeto, pela elaboração de um sistema estrutural capaz de suportar essa vazão de projeto e, por fim, pela implementação da solução definida em projeto (PLATE, 2002). Porém, sempre haverá risco de ocorrência de uma falha na estrutura de proteção contra as inundações ou de um evento hidrológico superior à chuva de projeto considerada, denominado como risco residual. A não consideração desse resíduo do risco leva a uma falsa percepção de segurança, que acaba por propiciar o incremento de situações de risco no desenvolvimento urbano. Ou seja, a sensação de segurança (que, por construção, é sempre uma segurança parcial), pode levar pessoas e estruturas para áreas de risco residual, aumentando em muito a exposição aos perigos potenciais, quando da ocorrência de falhas.

Handmer (2001) ressalta que mesmo após a adoção de políticas de controle e prevenção de inundações, com uso de proteções estruturais e iniciativas de gestão do território sensíveis às inundações, a permanência de um grande risco residual foi percebida por extensivos e frequentes eventos de inundações ocorridos na Europa ao longo dos anos 1990.

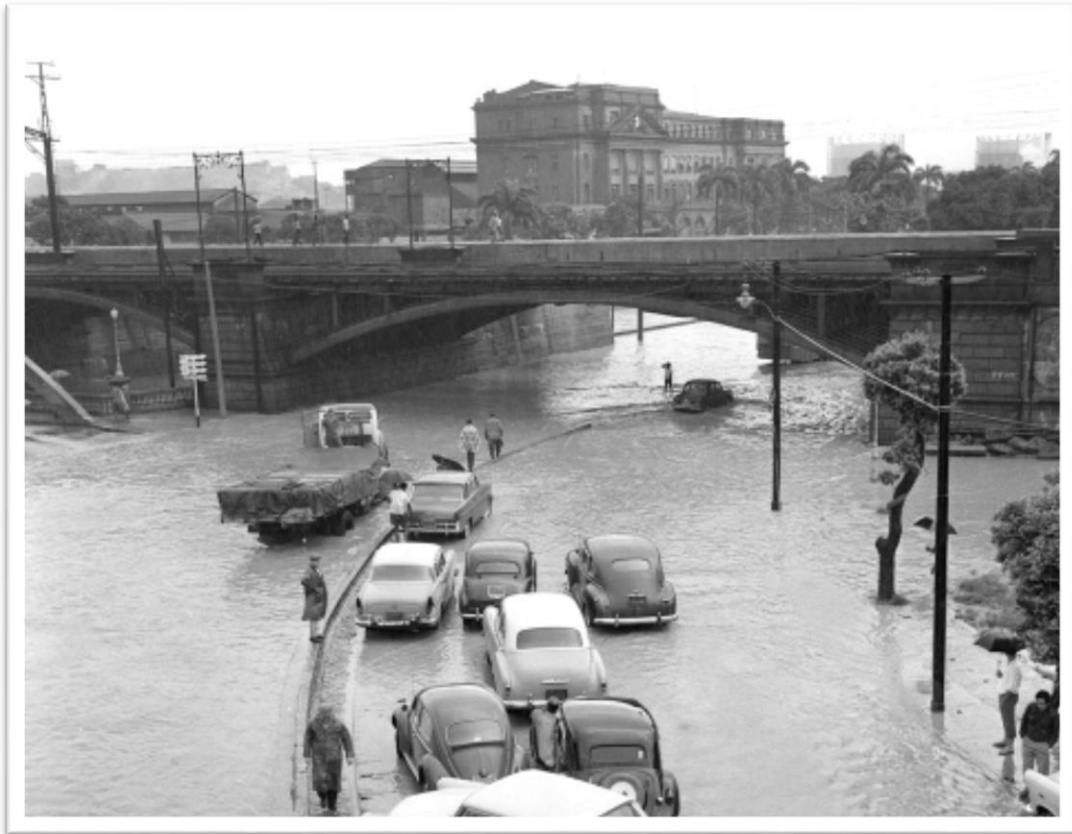
Há, notoriamente, um grande aumento nos riscos de inundação, seja pela ocupação ilegal de áreas suscetíveis a alagamentos, seja por erros de planejamento sobre a ocupação do solo ou pelos impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico. Um novo modelo de planejamento urbano poderá reduzir esses impactos, criando uma relação mais harmoniosa entre os ambientes natural e construído, melhorando a qualidade de vida da população, pela criação de uma cidade mais saudável e redução dos gastos públicos. Nessa direção, para alcançar tais resultados, em todo o mundo, há uma mudança na estratégia de **defesa contra as inundações** para uma de **gestão do risco de inundações** (PENDER e NÉELZ, 2007).

Bacias com extenso processo histórico de ocupação e frequentes problemas de inundação fazem parte das regiões metropolitanas brasileiras. Com um território propício à ocorrência de inundações e alagamentos, a baixada litorânea do estado do Rio de Janeiro se apresenta como um interessante estudo de caso para avaliação do relacionamento instável entre águas e cidades. A bacia do Canal do Mangue, por apresentar problemas de inundações críticos desde o início do processo de expansão urbana da cidade do Rio de Janeiro, foi objeto de inúmeros estudos e projetos para mitigação desses problemas, sendo o mais

expressivo e completo o Plano da Bacia do Canal do Manguê – PBCM (COPPETEC, 2000), elaborado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Este estudo utilizou a ferramenta de modelagem computacional MODCEL para realização das simulações das cheias fluviais e alagamentos resultantes de falhas da drenagem na região.

A bacia hidrográfica do Canal do Manguê possui seu exutório na região portuária da cidade do Rio de Janeiro, apresentando importância institucional e de mobilidade urbana muito grandes para a cidade como um todo. Esta região foi ocupada com implementação de aterros em áreas de manguezais, com objetivo inicial de criar vias de acesso às regiões de São Cristóvão e Tijuca. O processo de ocupação gerou áreas densamente povoadas em regiões planas e baixas, desfavoráveis aos escoamentos pluviais e com áreas de encostas muito íngremes a montante, característica propícia à formação de cheias rápidas, com reduzido tempo de concentração.

Historicamente conhecida por graves eventos de inundações (Figura 1.1) com grandes consequências, a bacia do Canal do Manguê foi objeto de propostas com diferentes alternativas de intervenções estruturais e não estruturais. Estas alternativas, no entanto, não se mostraram capazes de resolver os problemas existentes da bacia como um todo, falhando sistematicamente ao longo do tempo. A avaliação dessas propostas em um contexto de gerenciamento do risco de inundações integrado ao planejamento urbano da cidade, considerando aspectos da resiliência, é o enfoque deste trabalho.



**Figura 1.1 – Fotografia histórica de inunda o no Canal do Mangue, com Esta o Leopoldina ao fundo. Fonte: Agência o Globo, 11/01/1966**

“Esta cidade, que ainda   maravilhosa,  
Tão cantada em verso e prosa,  
Desde os tempos da vov .  
Tem um problema, cr nico renitente,  
Qualquer chuva causa enchente,  
Não precisa ser tor .  
Basta que chova, mais ou menos meia hora,  
  batata, não demora, enche tudo por a .  
Toda a cidade   uma enorme cachoeira,  
Que da Praça da Bandeira,  
Vou de lancha a Catumbi.  
Que maravilha, nossa linda Guanabara,  
Tudo engui a, tudo p ra,  
Todo o trânsito engarrafa.  
Quem tiver pressa, seja velho ou seja moço,  
Entre n’água até o pescoço,  
E peça a Deus pra ser girafa.  
Por isso agora já comprei minha canoa,  
Pra remar nessa lagoa, toda a vez que a chuva cai,  
E se uma boa me pedir uma carona,  
Com prazer eu levo a dona,  
Na canoa do papai.”

Moreira da Silva

### **1.3 Hipóteses de Trabalho**

A pesquisa testa conceitos de drenagem urbana baseados em medidas de redução dos escoamentos superficiais distribuídas na bacia, as quais teriam potencial de integração ao planejamento do território das cidades. São considerados riscos associados aos projetos de controle de inundações com a internalização de parte do risco residual, a partir da avaliação de possibilidade de falha hidrológica do sistema, em ocorrência de eventos superiores ao nível de proteção de projeto. No estudo de caso, são contrapostos dois conjuntos de soluções, um com medidas mais concentradas, de grande porte, e outro com medidas de menor porte, distribuídas por toda a bacia.

Assim, a hipótese de trabalho sustentada nesta pesquisa busca mostrar que *o uso de uma ferramenta de mensuração da resiliência é capaz de fornecer subsídios ao processo de tomada de decisão, indicanco configurações de projeto com maior potencial de elevar a resiliência do sistema urbano a inundações.*

### **1.4 Metodologia Geral**

A pesquisa conta com uma revisão bibliográfica, buscando fundamentar as mudanças históricas na abordagem do risco de inundações até o presente estado da arte, levantando, também, experiências internacionais aplicadas em outros países, a fim de adaptar os conceitos à realidade brasileira.

Foi selecionada a bacia hidrográfica do Canal do Mangue, localizada na cidade do Rio de Janeiro, que apresenta grande relevância histórica e regional, para aplicação do estudo de caso, testando distintas técnicas para mitigação dos problemas de inundação. A adoção de uma bacia hidrográfica de referência permite testar as hipóteses conceituais e as propostas de trabalho, de forma a aprender com esta particularização e, assim, propor um processo metodológico para aplicação em outras bacias urbanas. É utilizada como ferramenta de apoio, o Modelo de Células de Escoamento, MODCEL, desenvolvido na UFRJ. Esse modelo é capaz de simular diferentes padrões de escoamento em toda a bacia, integrando as redes de macro e microdrenagem às planícies de inundação e à paisagem urbana, possibilitando uma análise espaço-temporal do fenômeno que leva em conta o funcionamento da bacia como sistema complexo, assim como as soluções propostas.

Com a bacia de estudo e a ferramenta de modelagem definidos, foi iniciada a revisão da base de dados do modelo matemático, elaborado para a bacia no âmbito do Plano da Bacia do Canal do Mangue – PBCM (COPPETEC, 2000).

O início da revisão teve por objetivo o georreferenciamento da base de dados, de forma a possibilitar a análise de risco de inundações da bacia, de acordo com diferentes cenários de simulação.

Juntamente com o processo de georreferenciamento da base de dados, foram revisadas as informações de entrada do modelo, como áreas de células, posicionamento estas e suas ligações, de acordo com a topografia e o desenho urbano da região.

Para validação e calibração do modelo matemático, foram escolhidos dois eventos de chuva ocorridos na bacia do Canal do Mangue, ajustando os parâmetros de modelagem de forma a se alcançar resultados de níveis d'água similares às medições disponíveis em postos fluviométricos da bacia.

Na etapa seguinte, já de posse de um modelo confiável capaz de reproduzir eventos de cheias fluviais na bacia, são elaborados cenários de simulação, abrangendo o diagnóstico de uma situação do sistema de drenagem sem intervenções, considerando uma configuração anterior às atuais obras que estão em curso na bacia, por ação da Prefeitura Municipal, e o prognóstico de soluções para os problemas de inundações existentes, baseadas em diferentes concepções de drenagem, desde a utilização de técnicas tradicionais *end of pipe*, até as mais recentes abordagens do manejo sustentável de águas pluviais.

Além disso, é desenvolvido um procedimento de mensuração e mapeamento da resiliência a inundações.

Dessa forma, o processo metodológico da pesquisa é o seguinte:

- i. Revisão bibliográfica dos temas abordados na pesquisa;
- ii. Definição da ferramenta de modelagem para aplicação nas simulações hidrológicas e hidrodinâmicas dos eventos pluviométricos na bacia de estudo;
- iii. Escolha da bacia hidrográfica para o estudo de caso e aplicação do modelo matemático;

- iv. Construção do modelo matemático para simulação de cheias na bacia hidrográfica de estudo;
- v. Calibração e validação do modelo matemático construído para a bacia hidrográfica de estudo;
- vi. Levantamento das informações socioeconômicas da bacia hidrográfica de estudo, de acordo com informações censitárias do IBGE;
- vii. Diagnóstico da situação atual de inundações na bacia hidrográfica de estudo;
- viii. Mapeamento do risco de inundações para a situação sem intervenções na bacia hidrográfica de estudo, com aplicação de índices multicritério;
- ix. Adaptação da base de modelagem para representação de projetos de controle de inundação desenvolvidos para a bacia em estudo, considerando medidas concentradas e distribuídas;
- x. Simulação de cenários de projeto para prognóstico do funcionamento do sistema hídrico durante eventos de magnitude superior ao tempo de recorrência da tormenta de projeto, de forma a internalizar o risco residual na avaliação dos benefícios de cada projeto;
- xi. Mapeamento do risco residual de inundações para cada cenário de projeto, com aplicação de índices multicritério;
- xii. Avaliação dos resultados e desenvolvimento de metodologia para avaliação da resiliência urbana a inundações, a partir da aplicação do Índice de Resiliência às Inundações em bacias Urbanas, adaptando e ampliando a metodologia apresentada por Tebaldi *et al* (2015) e Bertilsson e Wiklund (2015).
- xiii. Discussão final e considerações gerais sobre os resultados da pesquisa, com a consolidação de um procedimento metodológico para avaliação de projetos de drenagem e incremento de resiliência urbana, que pode ser replicado para outras bacias.

## 2 Base Teórica

Para sustentação e validação da hipótese de trabalho considerada nesta pesquisa, é apresentada, ao longo deste capítulo, uma revisão bibliográfica dos temas relacionados ao manejo de águas pluviais e risco de inundações, buscando contextualizar as diferentes abordagens dos projetos de drenagem de águas pluviais e apresentar o seu estado da arte. De forma geral, busca-se sobrepasar duas quebras de paradigma que podem ser percebidas durante a evolução do tratamento dos gestores urbanos sobre as águas pluviais urbanas. Uma primeira, que busca a incorporação de conceitos sustentáveis, o posicionamento proativo e a abordagem integrada de toda a bacia em detrimento da ação local e pontual, reativa e concentrada. Mesmo após o entendimento desta outra demanda no tratamento dos problemas relacionados às águas pluviais, o foco ainda mostra forte apelo ao aumento da resistência dos sistemas urbanos, buscando a redução de danos diretos por meio de ações estruturais de controle de inundações, ainda que sustentáveis.

Assim, surge a exigência de uma nova quebra de paradigma, que traz para o centro da discussão o reconhecimento da falência das estratégias de controle de inundações, redirecionando esforços para um melhor entendimento dos ciclos das enchentes e seus impactos. Desta forma, a abordagem deve buscar uma melhor adaptação dos sistemas urbanos aos eventos de cheia, com um posicionamento mais harmônico e passivo. Para este novo paradigma, utilizam-se os conceitos de gerenciamento de risco aplicado aos fenômenos das inundações em detrimento da simples tentativa de controle destes eventos.

Para Hale (2016), os paradigmas da gestão das águas pluviais são definidos como modelos conceituais dos sistemas de drenagem urbana, abrangendo as seguintes questões:

1. Quais problemas ou distúrbios visa abordar?
2. Quais são as causas assumidas desses problemas?
3. Quais soluções existem para esses problemas?
4. Quais restrições externas e locais aceleram ou impedem possíveis mudanças?

O conjunto de respostas a tais questionamento podem definir e enquadrar um paradigma na abordagem sobre os problemas advindos do manejo das águas pluviais. Neste presente trabalho, os paradigmas encontrados na evolução do tratamento das águas pluviais



urbanas são identificados em três grupos, a partir dos questionamentos sugeridos por Hale (2010), os quais são descritos a seguir.

### **Paradigma 1 → Controle e combate às inundações de forma pontual**

1. *Quais problemas ou distúrbios visa abordar?*

Problemas de sobrecarga nos sistemas de drenagem, com extravasamento de água em áreas urbanas. Busca a redução de danos e prejuízos às pessoas e bens expostos diretamente ao evento de inundação.

2. *Quais são as causas assumidas destes problemas?*

Subdimensionamento hidráulico da rede de drenagem, seja em escala da micro-drenagem ou macrodrenagem.

3. *Quais soluções existem para estes problemas?*

Aumento da capacidade hidráulica dos trechos sobrecarregados, substituindo os dispositivos ou alterando suas grandezas hidráulicas, sempre de forma pontual.

4. *Quais restrições externas e locais impedem ou aceleram possíveis mudanças?*

A utilização de ferramental técnico simplificado, incapaz de considerar o funcionamento integrado da bacia, e o foco na redução de danos locais, sem uma análise holística ou multidisciplinar, dificultam uma abordagem ampla dos problemas de inundação, limitando sempre a solução à adoção de medidas locais. A falta de capacitação e dinâmica de atualização tecnológica e de inovação atrasam possíveis avanços no campo técnico. Porém, a falha continuada dos sistemas adotados, mesmo com aumento substancial dos investimentos em adaptações da infraestrutura de drenagem, impulsionam pesquisas acerca de novas abordagens ao problema.

### **Paradigma 2 → Controle das inundações de forma distribuída e integrada em toda a bacia**

1. *Quais problemas ou distúrbios visa abordar?*

Problemas de sobrecarga nos sistemas de drenagem, com extravasamento de água em áreas urbanas. Busca reduzir os danos e prejuízos às pessoas e bens expostos tanto diretamente quanto indiretamente ao evento de inundação, assim como impactos ambientais aos sistemas naturais. Incorpora preocupações acerca da qualidade das águas pluviais.

2. *Quais são as causas assumidas destes problemas?*

A urbanização nociva, com a ocupação de áreas de risco, aumentando a exposição, e a alteração do ambiente natural, fortemente caracterizado pelo aumento da impermeabilização, gerando alto impacto potencial nas parcelas do ciclo hidrológico. O subdimensionamento hidráulico da rede de drenagem, seja em escala da microdrenagem ou macrodrenagem. A poluição difusa e o cruzamento das redes de drenagem e de esgotamento sanitário, no que concerne às preocupações com a qualidade das águas e dos corpos receptores, assim como a saúde do meio ambiente.

3. *Quais soluções existem para estes problemas?*

Adoção de técnicas compensatórias em drenagem urbana, que busca mitigar os efeitos negativos da urbanização no ciclo hidrológico. Aumento da capacidade hidráulica dos trechos sobrecarregados, quando não é possível controlar o excedente do escoamento superficial por meio de técnicas de armazenamento e infiltração da água de chuva.

4. *Quais restrições externas e locais impedem ou aceleram possíveis mudanças?*

Entraves políticos, com baixa atenção à necessidade de investimentos na área de redução de riscos às inundações, assim como a baixa capacidade técnica de órgãos públicos responsáveis pela gestão dos sistemas de manejo de águas pluviais urbanas, dificultam a incorporação de novos conceitos e técnicas já de domínio no ambiente acadêmico. A forte cultura de priorização de grandes obras também relegam a um segundo plano as ações não estruturais e estruturais de pequeno porte, distribuídas na bacia. A tendência na adoção de conceitos mais sustentáveis, impelida pelo forte apelo popular a cenários futuros pessimistas e a um crescimento cultural de uma maior consciência ambiental, apontam para uma vertente de crescimento do planejamento urbano mais sensível aos seus impactos potenciais nos sistemas naturais.

### **Paradigma 3 → Gestão dos riscos de inundação**

1. *Quais problemas ou distúrbios visa abordar?*

Falhas continuadas e recorrentes dos sistemas de infraestrutura urbana para organização dos escoamentos pluviais excedentes. Aumento da exposição de bens e pessoas aos danos potenciais das inundações urbanas, com significativo aumento de prejuízos.

2. *Quais são as causas assumidas destes problemas?*

Falta de planejamento urbano e controle sobre o uso do solo, assim como uma abordagem simplificada acerca dos eventos hidrológicos, a partir da definição de um tempo de recorrência de projeto sem a consideração de possíveis falhas estruturais da solução ou a ocorrência de eventos de magnitude superior ao adotado no dimensionamento das medidas, ou seja, negligenciando a parcela do risco residual no processo de planejamento dos sistemas de infraestrutura.

3. *Quais soluções existem para estes problemas?*

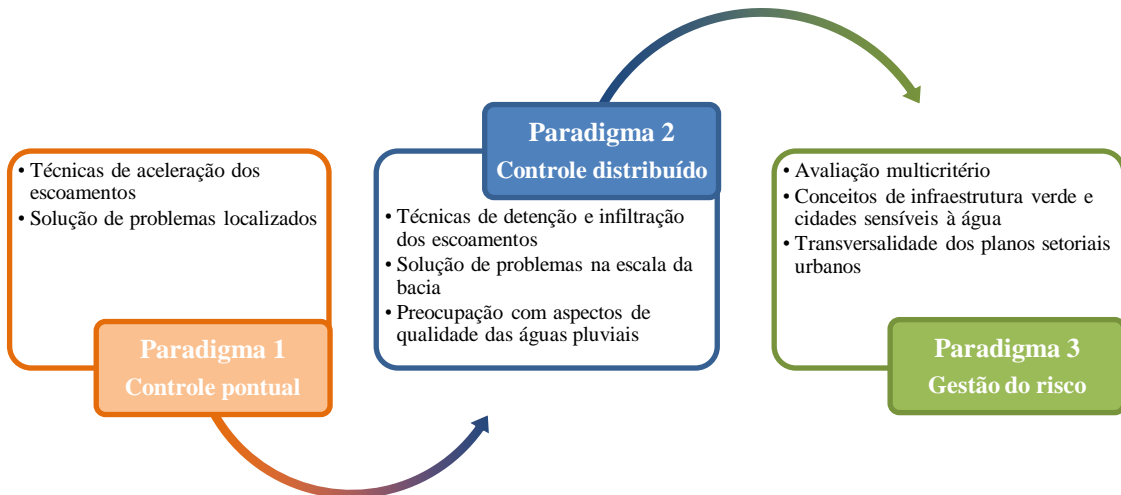
A incorporação de ferramentas de análise de risco, como o gerenciamento de risco, por meio da elaboração de estudos com indicadores e índices baseados em avaliação multicritério. A horizontalização do planejamento urbano, de forma a considerar as diversas interdependências entre os sistemas de infraestrutura, potencializando suas capacidades de funcionamento integrado e reduzindo potenciais impactos cruzados. De forma geral, as técnicas seguem o viés do manejo sustentável das águas pluviais, porém em uma escala maior de funcionamento e gerenciamento, adotando o conceito de áreas multifuncionais.

4. *Quais restrições externas e locais impedem ou aceleram possíveis mudanças?*

Ainda esbarram nos mesmos entraves do paradigma 2, com baixo interesse político e dificuldade técnica dos órgãos gestores. A adoção desse paradigma pela política atual ainda é dificultada por uma necessidade inerente de possuir um longo horizonte de planejamento, com garantia de continuidade das ações previstas em um plano de gerenciamento de riscos, assim como o aprendizado contínuo com a variabilidade natural dos fenômenos hidrológicos e possíveis adaptações urbanas a novas tendências de funcionamento das cidades. O aumento do empoderamento popular e a incorporação do controle social no planejamento urbano trazem para a tomada de decisões dos investimentos públicos um maior peso das reais demandas e desejos da população, naturalmente balizados pela busca da melhoria do bem estar social e ambiental.

A partir da distinção desses três paradigmas existentes na linha evolutiva da relação entre o manejo das águas pluviais e as cidades, podem ser identificadas duas quebras de paradigma, as quais representam o ponto de passagem entre as abordagens, com a incorporação de novas preocupações ao processo de planejamento do sistema de infraestrutura ur-

ba na como apresentado no esquema da Figura 2.1. O caminhar natural dessa evolução agrega valores na especificidade da abordagem, que vai desde o conhecimento de técnicas específicas até o delineamento de princípios gerais, e também expande a escala do foco principal de atuação, partindo da limitação à drenagem pluvial em si, até chegar à gestão do ciclo urbano da água (FLETCHER *et al.*, 2015).



**Figura 2.1 – Paradigmas na abordagem sobre os sistemas de manejo das águas pluviais.**

Segundo Hale (2016), a literatura sobre hidrologia e rios urbanos assume uma certa homogeneidade entre diferentes cidades, resultante de um caminho lógico no desenvolvimento dos sistemas urbanos de forma padronizada.

Historicamente, as cidades partiriam desde uma situação com a falta completa de uma infraestrutura dedicada às águas pluviais, passando por uma fase higienista com foco na rápida retirada dos escoamentos pluviais excedentes, no secamento de áreas úmidas e na impermeabilização dos solos (BRITTO, 2012), com uso de sistemas de esgotamento pluvial centralizados, posteriormente descentralizados, projetados para minimizar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico (ZHOU, 2014), até, por fim, assumir a incorporação de técnicas de infraestrutura verde, as quais buscam uma estratégia mais integrada entre os sistemas de drenagem urbana sustentáveis (SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems*) e a paisagem urbana, incorporando valores paisagísticos às intervenções (ELLIS, 2013).

## **2.1 Manejo de Águas Pluviais em Ambientes Urbanos**

De forma sucinta, nesse item são abordadas as especificidades sobre a relação entre as cidades e as águas pluviais ao longo do tempo, até a abordagem mais atual, com foco no ciclo hidrológico e na harmonização entre os eventos de inundações e o desenvolvimento da cidade.

### **2.1.1 Abordagens da Drenagem Urbana**

A abordagem tradicional dos problemas de inundações urbanas, geralmente, foca na readequação da rede de drenagem, prioritariamente através do aumento das dimensões das galerias existentes e da canalização e retificação da macrodrenagem, buscando acelerar o transporte das águas pluviais excedentes para longe do local de intervenção (KIRBY, 2005). Nesta linha, as autoridades realizam o aprimoramento da rede de drenagem urbana para assegurar que nenhuma área da cidade sofra com alagamentos durante eventos hidrológicos com tempo de recorrência inferior ao estipulado em projeto (KARNIB *et al.*, 2002), ou seja, apontam na direção do aumento da resistência da cidade contra as inundações.

Esta solução parece adequada em um primeiro momento, uma vez que apresenta-se capaz de transferir todo o excesso de água de uma região com problemas de inundação para áreas mais distantes e mais baixas da bacia, geralmente cumprindo os objetivos sanitários. Entretanto, a expansão da urbanização para regiões mais altas da bacia implica no aumento do volume de água gerado nessas áreas que alcançarão as regiões mais baixas, demandando novas intervenções na rede de drenagem para readequação de sua capacidade hidráulica, em resposta às novas vazões geradas.

Ao longo do tempo, a simples adaptação das dimensões da rede às novas condições de escoamento se torna um problema, requerendo áreas cada vez maiores, em um ambiente que, muitas vezes, já encontra-se densamente ocupado. Assim, novas soluções conduzem à necessidade de expropriação e relocação de moradias, o que acaba por tornar os trabalhos de reabilitação do sistema de drenagem inviáveis em muitos casos, tanto sob aspectos econômicos, quanto sociais.

Este contexto leva à necessidade de uma outra abordagem, mais compreensiva e sistêmica, capaz de prover sustentabilidade para o processo de controle de inundações urbanas. Assim, essa outra visão, baseada no conceito de drenagem sustentável, surge como uma quebra do antigo paradigma de aceleração dos escoamentos pluviais, e estabelece que os sistemas de drenagem devem ser projetados para minimizar os impactos da urbanização sobre os padrões naturais de escoamento, considerando aspectos quantitativos e qualitativos, para atingir objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no tempo e no espaço (MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010). Então, a gestão das águas pluviais surgiu como uma atividade de gestão de recursos naturais locais para mitigar o impacto social negativo da água de chuva (ROY *et al.*, 2008).

A prática moderna da drenagem urbana tem início nas cidades europeias, durante o século XIX. Segundo Burian *et al.* (1999), o desenvolvimento da drenagem urbana nos Estados Unidos, durante os séculos XIX e XX, pode ser agrupado em nove categorias:

1. Melhorias nos materiais, métodos construtivos e práticas de manutenção.
2. Uso do sistema de condução da água para remover as águas residuais.
3. Projeto detalhado do sistema de esgotamento.
4. Sistema de esgotamento unitário versus sistema com separação absoluta.
5. Identificação das doenças de veiculação hídrica.
6. Introdução do tratamento de águas residuais.
7. Avanços no campo da Hidrologia Urbana.
8. Avanços computacionais.
9. Consciência ambiental.

Desde a década de 70, o combate às enchentes vem passando por uma mudança de concepção, permitindo novas avaliações dos processos de inundação, visualizando toda a bacia como um sistema integrado e tratando o problema com conceitos de prevenção e harmonização e não apenas uma tentativa de controle e combate locais, nos quais as intervenções buscam soluções pontuais.

Tucci (2005) distribui a abordagem sobre as águas urbanas, quanto ao seu desenvolvimento histórico, em quatro fases principais: *Pré-Higienista*, *Higienista*, *Corretiva* e *Desenvolvimento Sustentável*. A Tabela 2.1 apresenta essas fases e suas principais características.

**Tabela 2.1 – Fases do desenvolvimento das águas urbanas**

FASE	CARACTERÍSTICA	CONSEQUÊNCIA
<i>Pré-Higienista:</i> Até início do séc. XX	Esgoto em fossas ou diretamente nas ruas, sem coleta ou tratamento	Epidemias e doenças com alta taxa de mortalidade
<i>Higienista:</i> Até os anos 1970	<i>Tout à l'égout</i> – Transporte do esgoto junto às águas pluviais, por canalização dos escoamentos.	Redução das doenças e da mortalidade, degradação dos corpos d'água, contaminação dos mananciais.
<i>Corretiva:</i> Entre 1970 e 1990	Sistema separador absoluto, tratamento dos esgotos, amortecimento dos escoamentos pluviais.	Melhoria da qualidade da água dos rios, poluição difusa, obras de grande impacto.
<i>Desenvolvimento Sustentável:</i> Após 1990	Tratamento do escoamento pluvial, preservação do sistema natural, integração institucional.	Conservação ambiental, melhoria da qualidade de vida, controle das inundações.

TUCCI (2005)

Walesh (1989, *apud* Canholi, 2005) cita a categorização dos projetos de controle das inundações em duas linhas principais, de acordo com o efeito esperado no escoamento das águas drenadas:

- ✓ **Conceito de canalização:** canalização convencional voltada à implantação de galerias e canais de concreto, retificação de traçado e aumento da declividade de fundo, com o objetivo de promover o rápido afastamento das águas.
- ✓ **Conceito de reservação:** utilização de reservatórios e outras medidas visando o aumento do tempo de concentração e redução da vazão de pico, i.e., o amortecimento da onda de cheia. Podem ser:
  - Em cada lote
  - No âmbito da sub-bacia – reservatórios com maiores volumes, capazes de armazenar volumes de uma área significativa da bacia.

- Retardamento na calha – conceito de conservação ou restauração ambiental do rio, aumento da rugosidade do canal, da sinuosidade através da restauração dos meandros do rio e restabelecimento da calha secundária.
- Derivação – utilização de *by pass*, visando à diminuição dos escoamentos em uma determinada rede de macrodrenagem.
- Utilização de diques e *polders*.

Assim, em linhas gerais, as soluções técnicas para o controle das inundações podem ser classificadas em duas correntes de pensamento: *Técnica convencional ou de canalização* e *Técnica preservacionista ou compensatória*, conforme esquema apresentado na Figura 2.2.

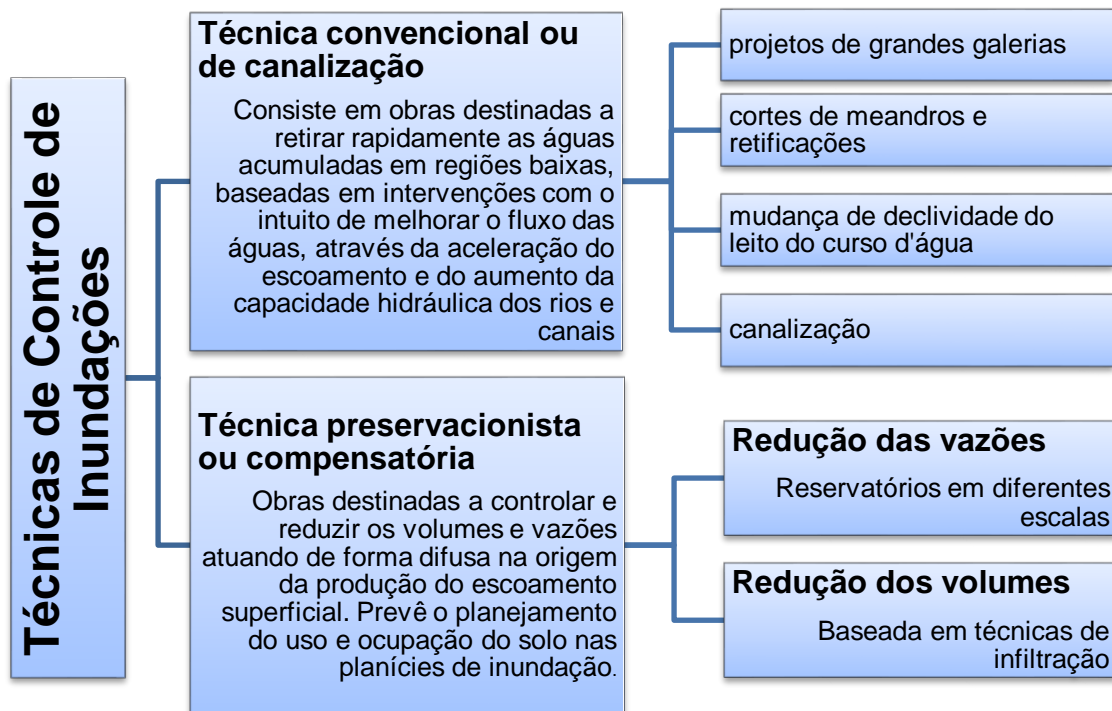


Figura 2.2 – Classificação das técnicas de controle de inundações

Os projetos de controle das cheias preveem tanto *medidas estruturais* como *não-estruturais*. *Medidas estruturais* são intervenções diretas nas calhas dos rios ou na paisagem urbana, como canalização, barragens, reservatórios, criação de parques longitudinais inundáveis, diques, reservatórios em praças ou lotes, entre outros. São consideradas medidas de controle e, geralmente, imprescindíveis para ações corretivas. São divididas em *extensivas*, quando possuem ação sobre a bacia, alterando a relação *precipitação x vazão*



e, desta forma, podemos classificá-la como **uma medida hidrológica**, e *intensivas*, quando possuem ação direta sobre o escoamento da água nos rios e canais, buscando alterar as condições hidrodinâmicas da onda de cheia, sendo assim, classificadas como **uma medida hidráulica**.

Segundo Miguez e Magalhães (2010), as “*medidas estruturais são fundamentais quando problemas de inundações estão instalados, no intuito de se reverter e controlar a situação existente*”. Por sua vez, as *medidas não-estruturais* são constituídas por ações indiretas, como zoneamento urbano (identificação das áreas alagáveis e restrições na legislação urbana), reservação de áreas para alagamento, preservação das várzeas, educação ambiental, sistemas de alerta, plano de resíduos sólidos, dentre outros. Essas medidas podem ser vistas como um aprendizado de convivência harmônica da sociedade com os eventos de enchentes, a partir do reconhecimento dos padrões naturais do ciclo hidrológico, tendo um caráter preventivo e complementar ao corretivo.

O desenvolvimento das técnicas utilizadas para tratamento dos problemas advindos da relação das águas pluviais com o meio urbano segue uma linha cronológica responsiva aos objetivos almejados pelo gerenciamento das cidades. Assim, a necessidade de novas soluções para atingir objetivos cada vez mais abrangentes resulta em maior sofisticação da gestão dos sistemas de manejo de águas pluviais, desde a implantação de redes de drenagem que visam o simples secamento das áreas urbanas, até o planejamento urbano e ambiental integrados que busca uma harmonização entre o desenvolvimento das cidades e o ciclo natural das águas pluviais.

Fletcher *et al.* propuseram uma linha do tempo que mostra a sofisticação da gestão da drenagem urbana segundo a incorporação de novos objetivos. Essa lógica de incorporação de objetivos pode ser vista na Figura 2.3.

O desenvolvimento do tratamento dado às águas pluviais no meio urbano possui uma forte ligação com o crescimento e ampla divulgação dos conceitos de sustentabilidade, que se popularizam a partir da década de 1970. A incorporação desses conceitos ao manejo das águas pluviais é objeto do próximo item.

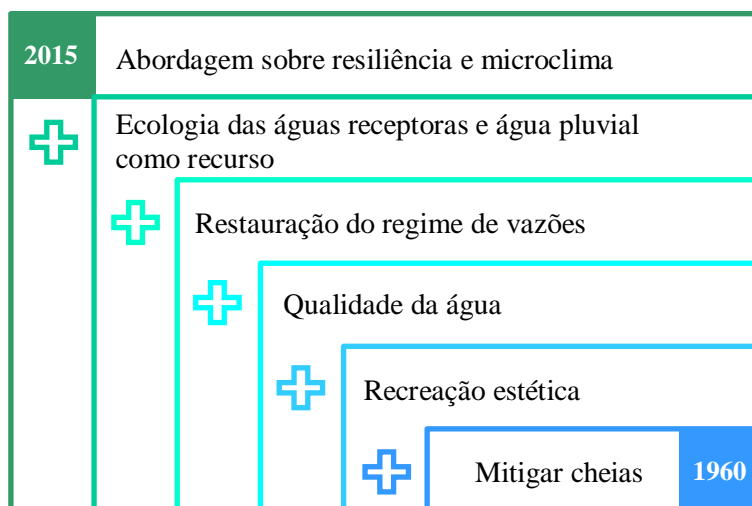


Figura 2.3 – Aumento da integração e sofisticação da gestão da drenagem urbana ao longo do tempo (Adaptado de FLETCHER *et al.*, 2015)

### 2.1.2 Sustentabilidade na Drenagem Urbana

Os projetos de drenagem urbana desenvolvidos convencionalmente, apesar de apresentarem-se num primeiro momento “tecnicamente” corretos, tendem a perder rapidamente sua eficiência, pois não atendem ao alto crescimento da demanda urbana por infraestrutura, na medida em que a cidade se desenvolve, necessitando de investimentos cada vez mais onerosos para permitir a continuação do funcionamento do sistema de drenagem. Esta situação agrava-se pela não existência ou não cumprimento dos planos de desenvolvimento urbano ou, ainda, pela falta de qualidade técnica dos planos já elaborados.

Basicamente, as intervenções previstas nos projetos de drenagem urbana e controle das enchentes resumem-se a ações emergenciais, esporádicas e definidas apenas após a ocorrência dos desastres (POMPÊO, 2000), além de atuarem pontualmente.

Esse cenário, baseado na simples e rápida retirada da água das áreas pavimentadas, com alto grau de impermeabilização, por meio de canalizações, apresenta-se insustentável e exige uma nova visão sobre o problema das inundações urbanas. Holz e Tassi (2007) sugerem que o sistema de drenagem atual deve preterir a solução da simples retirada, com a maior eficiência possível, das águas pluviais não infiltradas, provindas do aumento da impermeabilização do solo pelo processo de urbanização, substituindo-a por medidas que visam mitigar os impactos desse processo de impermeabilização, através da facilitação dos processos de infiltração e retenção das águas, no intuito de regenerar as condições hidrológicas de pré-urbanização. Destacam, porém, a importância da combinação do uso

das estruturas de drenagem tradicionais e não convencionais objetivando a otimização do sistema.

A quebra do antigo paradigma não deve aposentar todas as suas técnicas, mas sim adaptá-las a um novo uso, agregando ao conhecimento tradicional os recursos propostos como solução sustentável.

Burian *et al.* (1999) destacam a mudança ocorrida na perspectiva pública sobre a drenagem urbana, passando de uma reflexão tardia negligenciada para um sistema de obras públicas vital e como um importante componente de um sistema urbano sustentável. Canholi (2005) aponta a drenagem como um problema de abordagem regional e, segundo o autor, os problemas das inundações urbanas decorrem:

- da rápida expansão da população urbana;
- do baixo nível de conscientização do problema;
- da inexistência de planos de longo prazo;
- da utilização precária de medidas não estruturais;
- da manutenção inadequada dos sistemas de controle das inundações.

Pompêo (2000) enfatiza a necessidade de se pensar preventivamente as atividades relacionadas à atenuação das inundações, realçando o valor do planejamento aplicado aos projetos de controle das inundações. Neste contexto se insere a *abordagem ecossistêmica*, a qual representa a evolução do pensamento reativo do Plano Diretor de Drenagem convencional para um pensamento proativo e avançado, na forma de gestão do ambiente natural e construído, considerando-os como componentes interdependentes e integrados.

Uma abordagem ecossistêmica pode resultar em menores gastos, uma vez que busca diminuir a necessidade de ações complexas e custosas de remediação, enfatizando a orientação e o planejamento das decisões nas alterações do uso do solo. A abordagem ecossistêmica (*Ecosystem Approach*) é definida como:

“Uma abordagem ecossistêmica no planejamento do uso do solo propicia uma orientação precoce e sistemática das inter-relações entre os existente e potenciais usos do solo e a saúde dos ecossistemas ao longo do tempo. Essa aborda-

gem é baseada no reconhecimento que ecossistemas possuem limites de estresse, os quais podem ser ajustados antes que os ecossistemas se tornem irreversivelmente degradados ou destruídos.” (ONTARIO, 1993)

Essa publicação dos Ministérios do Ambiente e Energia e dos Recursos Naturais de Ontário enfatiza, ainda, a necessidade de se considerar com igualdade e, ao mesmo tempo, objetivos ecológicos, econômicos e sociais. Esta visão tem sido baseada no conceito de Desenvolvimento Sustentável, definido no *Relatório Brundtland* (1986), intitulado “Nosso Futuro Comum”, como sendo o “*desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades*”.

A partir desse conceito, foram desenvolvidas novas abordagens no campo da drenagem urbana, como os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (*SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems*) e as Melhores Práticas de Gerenciamento (*BMPs – Best Management Practices*), desenvolvidos na Europa e Estados Unidos, respectivamente, que buscam reproduzir, o mais próximo possível, as condições naturais de drenagem do local antes de sua urbanização.

AMEC (2001) define BMP como um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, considerando não somente preocupações com a quantidade de água, mas também aspectos de qualidade das águas (MIGUEZ, 2005). Pode-se dizer que esses sistemas são projetados tanto para gerenciar os riscos ambientais decorrentes das águas pluviais urbanas, como contribuir, sempre que possível, para uma melhoria ambiental e da qualidade de vida urbana.

Projetos de SUDS buscam reduzir os escoamentos superficiais através de estruturas de controle da água pluvial em pequenas unidades. Desta maneira, o controle dos escoamentos superficiais realizado na fonte diminui a necessidade de grandes estruturas de atenuação e controle na calha dos rios.

O *Manual de Sistema de Drenagem Urbana Sustentável*, publicado pela CIRIA (*Construction Industry Research and Information Association*) em 2007 descreve os principais componentes desse sistema:

- Faixas de filtração (*Filter strips*);
- Valas de infiltração (*Swales*);

- Bacias de infiltração (*Infiltration basins*);
- Bacias de retenção (*Wet ponds*);
- Bacias de detenção (*Extended detention basins*);
- Charcos artificiais ou Banhados construídos (*Constructed wetlands*);
- Trincheiras de filtração (*Filter drains*);
- Dispositivos de infiltração (*Infiltration devices*);
- Pavimentos permeáveis (*Pervious surfaces*);
- Telhados verdes (*Green roofs*).

Outro conceito que visa à sustentabilidade dos projetos de controle de inundações é o conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID – *Low Impact Development*), o qual, segundo Coffman *et al.*(1998) são projetos com objetivo de criar uma “paisagem funcional” capaz de incorporar características de projeto que buscam simular as funções de infiltração e armazenamento da bacia pré-urbanizada. Isso é feito através da redução da modificação do coeficiente curva-número (CN) característico do local, manutenção do tempo de concentração natural e incorporação de medidas de retenção distribuídas na bacia. Essas medidas acabam por reduzir a necessidade de instalação de estruturas de detenção para manter o volume e o pico de vazão do escoamento superficial. Projetos baseados no LID empregam um número de técnicas de projeto para reduzir as mudanças no CN ou no escoamento superficial. Com isso, é reduzida a necessidade de implantação de estruturas para manutenção do pico e do volume de água pluvial escoada superficialmente. Coffman *et al.*(1998) destacam os elementos da base de atuação do LID como sendo:

- **Curva-número (CN):** minimização das alterações no CN pós-desenvolvimento, através da redução de áreas impermeáveis e preservação da cobertura vegetal (áreas com alta capacidade de infiltração e armazenamento) para reduzir a necessidade de implantação de estruturas de detenção que visam manter o volume de escoamento superficial.

- **Tempo de Concentração (tc):** manutenção do tempo de concentração pré-urbanização no intuito de minimizar o aumento dos picos de vazão do escoamento superficial após a urbanização, através do alongamento dos caminhos dos escoamentos e aumento da rugosidade das superfícies.
- **Retenção:** proporcionar armazenamento por retenção da água pluvial para controle do pico e volume do escoamento superficial, a fim de manter o CN pré-urbanização, assim como para o controle de qualidade da água.
- **Detenção:** proporcionar um armazenamento adicional por detenção da água de chuva, se necessário, para manter o pico de vazão do escoamento superficial pré-urbanização e mitigar problemas de inundações existentes.

A urbanização implica em profundas alterações físicas no terreno natural, como o aumento de áreas impermeáveis, a implantação de novas vias de tráfego e o aterro de áreas baixas, as quais contribuem para a mudança nos padrões de drenagem e para a diminuição da retenção natural, e devem, portanto, “*ser acompanhadas de soluções de engenharia para a retenção artificial, estrategicamente planejadas, para a compensação da perda de retenção natural*” (D’ALTÉRIO, 2004).

Desta forma, a nova concepção dos projetos de drenagem visa uma integração com os planos de desenvolvimento urbano e a gestão da ocupação e uso do solo assim como o uso de técnicas preservacionistas. Essa visão propicia uma melhor abrangência temporal e espacial dos projetos de controle de inundações, uma vez que busca intervir não na consequência das grandes chuvas, mas nas causas das grandes inundações. Estratégias de manejo das águas pluviais são necessárias em diferentes níveis de decisão, tais como a escala política, regional ou local. Porém, todos eles devem estar conscientes sobre todas as possibilidades consideradas, bem como as principais consequências de cada decisão (BARBOSA *et al.*, 2012).

A mudança para uma visão sustentável das soluções em drenagem urbana exige um compromisso com as consequências futuras das decisões tomadas no presente, portanto as soluções devem ser flexíveis o bastante para permitir possíveis modificações e adaptações no decorrer do desenvolvimento urbano (CANHOLI, 2005).

Para se alcançar uma eficiência ótima do sistema de drenagem, é necessário que os subsistemas de micro e macrodrenagem sejam capazes de realizar suas funções plenamente, com a microdrenagem coletando e direcionando as águas dos lotes urbanos para a rede de macrodrenagem, que, por sua vez, deve comportar todo o volume de escoamento (TUCCI, 2007). Além disto, na medida em que se expande a urbanização pela bacia, os índices de impermeabilidade aumentam muito, o que pode significar um aumento de até seis vezes no volume de escoamento superficial na bacia, com cerca de 60% de área impermeável, em relação às condições rurais (LEOPOLD, 1968), obrigando a novas intervenções no sistema. Por isso, é de grande importância articular o planejamento da drenagem e do controle de inundações com o Plano Diretor Urbano, permitindo uma melhor projeção da ocupação e uso do solo futuros e, assim, levando a projetos com um maior tempo de validade (REZENDE, 2013).

Sob esta nova ótica, os projetos de drenagem urbana, em tese e sempre que possível, devem neutralizar os efeitos da urbanização, restabelecendo as condições hidrológicas da pré-urbanização, trazendo benefícios para a qualidade de vida e visando a preservação ambiental. Ao colocar como questão central de que forma a sociedade poderia criar um sistema de manejo de águas pluviais sustentável que proteja não só a propriedade e a saúde humana, mas também almeje a preservação do funcionamento natural de ecossistemas aquáticos, Roy *et al* (2008) sugere três premissas fundamentais para que um sistema realmente sustentável seja atingido:

1. O manejo sustentável das águas pluviais mantém a estrutura e o funcionamento naturais dos corpos d'água receptores.
2. Já existem tecnologias capazes de mimetizar o ciclo natural da água e reduzir o transporte de poluentes para jusante através da rede de drenagem.
3. O manejo sustentável das águas pluviais deve ser planejado e implementado na escala da bacia, de forma integrada.

Tendo por base as diferentes abordagens sobre o problemas de inundações urbanas, apresentadas no item 2.1.1 e os conceitos de sustentabilidade inseridos no processo de gerenciamento das águas pluviais urbanas, é possível fazer uma síntese do desenvolvimento da concepção do sistema de drenagem. Para isso, é transcrita aqui, de forma integral, a excelente sinopse da evolução da drenagem urbana apresentada por Veról (2013):

(...) pode-se interpretar a evolução da drenagem como construção sucessiva, a partir de um conceito básico: a substituição de medidas concentradas na condução de água por medidas que buscam recuperar alterações introduzidas pela urbanização. Assim, primeiro surge a necessidade de introduzir medidas de armazenamento e infiltração. Depois, estas medidas são integradas em uma mímica da hidrologia natural. Mais adiante, se expande o conceito para além da própria drenagem, procurando integrar as várias áreas do saneamento e a água como recurso, valorizando também a sua interação com a cidade, agregando valor a esta e gerando oportunidades de incremento de biodiversidade. Por fim, ainda com problemas de cheia permeando as cidades, o conceito sai do contexto exclusivamente técnico para uma esfera em que se busca um arcabouço maior, com desdobramentos sociais, econômicos, legais e institucionais. (VERÓL, 2013)

Brown *et al* (2008, *apud* VERÓL, 2013) elaboraram uma linha do tempo com a evolução do tratamento das águas urbanas, representando diferentes tipologias de cidades de acordo com a sua relação com as águas, a saber: a “Cidade do Abastecimento de Água”, a “Cidade do Esgotamento Sanitário”, a “Cidade Drenada”, a “Cidade dos Cursos d’Água”, a “Cidade do Ciclo Hidrológico” e a “Cidade Sensível à Água”. A Figura 2.4 apresenta essa linha do tempo.

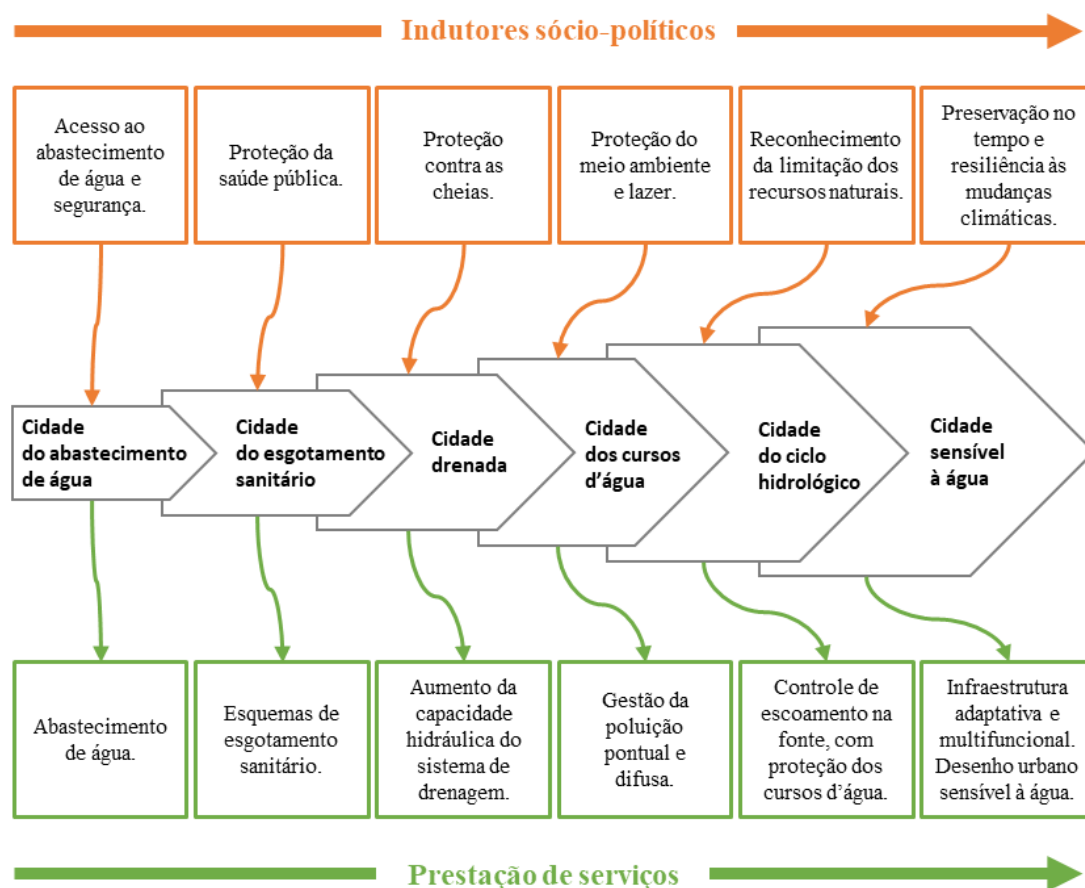
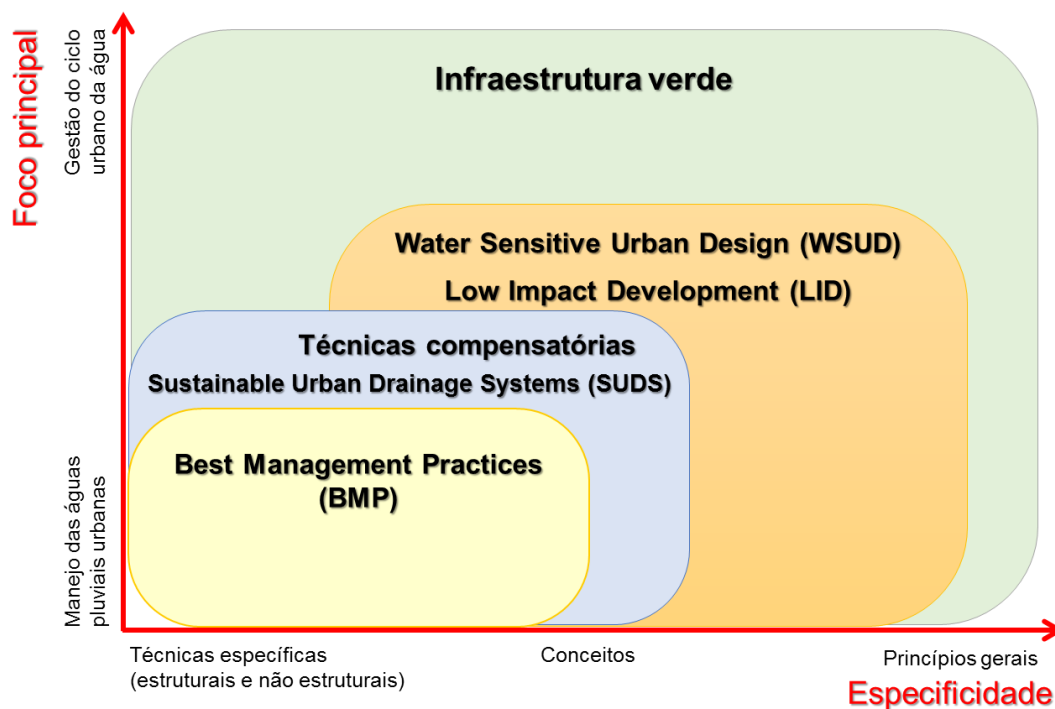


Figura 2.4 – Evolução da relação das cidades com as suas águas urbanas (BROWN *et al*, 2008, adaptado de VERÓL, 2013)



As diversas abordagens do planejamento urbano acerca dos sistemas de manejo das águas pluviais foram desenvolvidas com base em especificidades e focos de atuação, desde as Melhores Práticas de Gerenciamento (BMP – *Best management practices* – AMEC, 2001), passando pelas Técnicas Compensatórias (BAPTISTA *et al.*, 2005) e Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (CIRIA, 2007), a adoção de ações de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID – *Low Impact Development* – COFFMAN *et al.*, 1998), até chegar em uma concepção mais abrangente, baseada nos conceitos de Projetos Urbanos Sensíveis à Água (WSUD – *Water Sensitive Urban Design* – MELBOURNE WATER, 2004) e de infraestrutura verde (GI – *Green Infrastructure* – KEELEY, 2013). Fletcher *et al.* (2015) elaboraram um esquema de classificação dessas abordagens, apresentado na Figura 2.5, de acordo com a abrangência tanto do foco principal de atuação, quanto das especificidades consideradas nas soluções potenciais para o manejo das águas pluviais.



**Figura 2.5 – Esquema de classificação das diversas abordagens do manejo das águas pluviais, segundo abrangência conceptual (FLETCHER *et al.*, 2015).**

A concepção mais atual dos sistemas hídricos urbanos, ao menos em alguns países centrais, preconiza a preservação, sempre que possível, e a recuperação, sempre que necessária, do ciclo hidrológico natural, a sustentabilidade das soluções ao longo do tempo,

inserindo o conceito de resiliência no processo de tomada de decisões acerca do planejamento das infraestruturas urbanas, inserção de estruturas adaptativas e multifuncionais na paisagem urbana e, por fim, um desenho da cidade sensível à água.

Neste sentido, há uma forte tendência na integração entre as diversas disciplinas que abordam a gestão das cidades, com foco na Engenharia Hidráulica e Hidrológica e na Arquitetura e Urbanismo, agregando as ciências sociais e econômicas, biologia e outras. A necessidade de tal integração, com atuação na bacia hidrográfica como unidade de referência, pode ser compreendida na seguinte passagem:

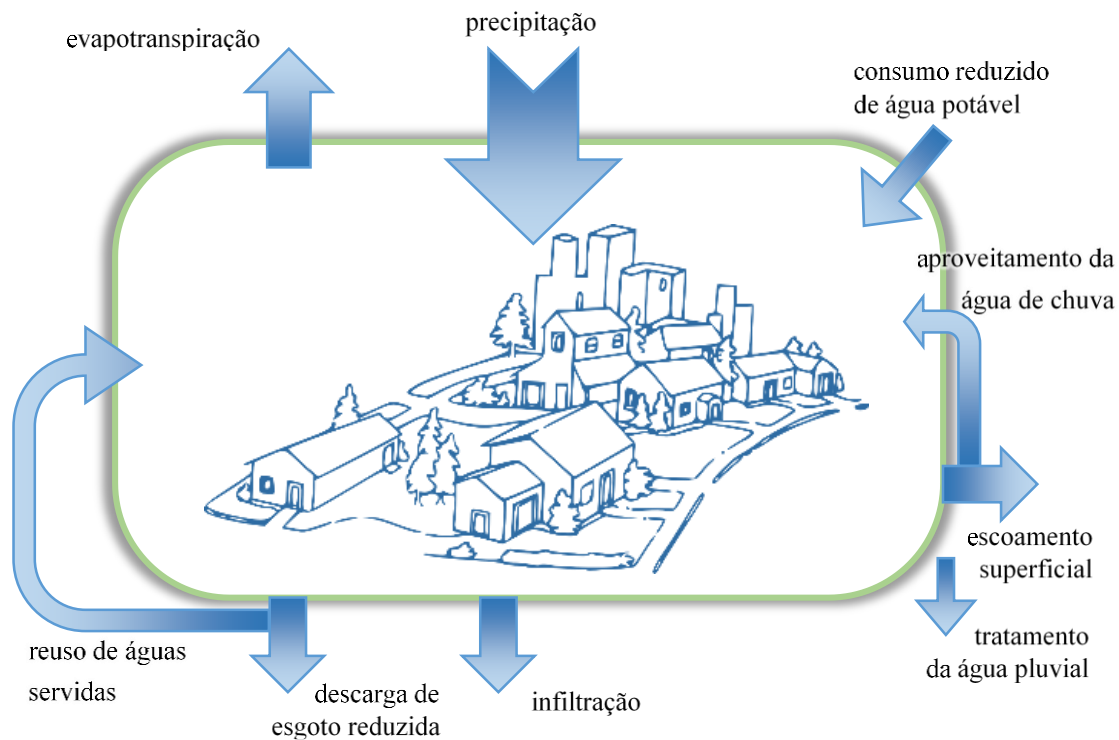
A conjugação das ações no tecido urbano, tendo o controle de uso do solo urbano como pano de fundo, e no corredor fluvial, com foco no rio como síntese do território, combinam esforços no caminho de uma construção mais sustentável para o funcionamento das cidades. (MIGUEZ *et al.*, 2016)

Dessa forma, faz-se necessário definir de forma mais detalhada o conceito de cidades sensíveis à água, para contextualizá-la dentro da hipótese dessa pesquisa.

### **2.1.3 Cidades Sensíveis à Água**

A concepção atual dos sistemas de manejo de águas pluviais e controle de inundações incorpora o conceito de resiliência, que implica em um planejamento do desenvolvimento das cidades que considere as diversas possibilidades de desastres naturais e as melhores formas de preparação para esses eventos, tornando as cidades não somente mais resistentes, mas, acima de tudo, mais harmônicas, com um funcionamento do ambiente construído que leve em consideração os ciclos naturais. Essa concepção ganha abrigo no conceito de Cidades Sensíveis à Água, ou WSUD (*Water Sensitive Urban Design*), ou seja, projetos urbanos “sensíveis” à água e ao ciclo hidrológico. O WSUD preconiza a construção de cidades em perfeita harmonia com o ciclo hídrico, em todas as suas parcelas, conforme pode ser visto na Figura 2.6. Na Austrália, onde surgiu primeiramente o conceito de WSUD, essa abordagem é definida como:

“...a integração do planejamento urbano com a gestão, proteção e conservação do ciclo hidrológico, garantindo que a gestão da água urbana seja sensível aos processos hidrológicos e ecológicos naturais” (*Greater Sydney Local Land Services – disponível em: <https://goo.gl/tTckRy>, acessado em 04/03/18*)



**Figura 2.6 – Balanço hídrico para uma cidade sensível à água, segundo o WSUD.org**

WSUD pode ser entendido como a integração do planejamento e desenvolvimento urbano com o gerenciamento, proteção e conservação do ciclo da água como um todo. *Melbourne Water* (2004) destaca como princípios chave para um projeto urbano sensível à água:

- ✓ **Proteger os sistemas naturais:** proteger e melhorar os sistemas hídricos naturais dentro dos empreendimentos urbanos;
- ✓ **Integrar o tratamento da água de chuva na paisagem:** utilização da água de chuva na paisagem, pela incorporação de corredores de uso múltiplo para maximizar o valor visual e recreacional da região;
- ✓ **Proteger a qualidade da água:** aprimorar a qualidade da água de drenagem pluvial dos empreendimentos urbanos lançada no ambiente receptor;
- ✓ **Reduzir o escoamento superficial e os picos de vazão:** reduzir os picos de vazão das áreas urbanas por meio do uso de medidas de retenção das águas pluviais e de redução de áreas impermeáveis;
- ✓ **Agregar valor, minimizando os custos de desenvolvimento:** reduzir os custos relativos à infraestrutura do sistema de drenagem dos empreendimentos.

O planejamento urbano sensível à água deverá considerar, para impetrar melhores resultados, as seguintes ações (MELBOURNE WATER, 2004):

1. Identificação das potencialidades de uso do solo, as condições existentes e as restrições locais;
2. Consideração do projeto pretendido e a função do empreendimento proposto;
3. Identificação dos prováveis impactos do empreendimento sobre o meio ambiente existente;
4. Combinação desses fatores com as tecnologias urbanas de projetos sensíveis à água mais adequadas, destinadas a alcançar um equilíbrio sustentável entre o empreendimento e o meio ambiente.

Para CIRIA (2013), WSUD é o processo de integração da gestão do ciclo hidrológico com o ambiente construído, através do planejamento e do desenho urbano. Tal processo é centralizado no conceito de “gerenciamento integrado do ciclo da água”, que considera as diversas interações entre os três principais componentes das águas urbanas: *abastecimento de água racional; redução da geração e tratamento das águas residuais e; redução e tratamento dos escoamentos superficiais.*

O gerenciamento integrado do ciclo da água passa a ser um condicionante para a gestão da cidade, que terá todo o seu processo de decisão centralizado na condição de sustentabilidade do ciclo hidrológico e uso racional da água no meio urbano, conforme esquema apresentado na Figura 2.7. De forma geral a abordagem WSUD:

(...) tenta integrar as ciências sociais e físicas em uma proposição de gerenciamento holístico para águas urbanas, considerando conjuntamente a oferta de água potável, os esgotos e a drenagem das águas pluviais, desde a escala do lote até a escala da bacia, envolvendo o desenho de edificações e da própria paisagem, alinhando medidas estruturais e não estruturais. (MIGUEZ *et al.*, 2015)

A busca por uma relação mais harmônica entre cidade e águas pluviais, preconizada no WSUD, requer, prioritariamente, uma abordagem que sustente avaliações multicenários, com o reconhecimento da possibilidade de falha das estruturas de “controle” e a organização do sistema urbano de forma a responder da melhor forma possível a essas falhas.

Nessa abordagem se insere o gerenciamento de risco de inundações, discutido ao longo dos próximos itens.

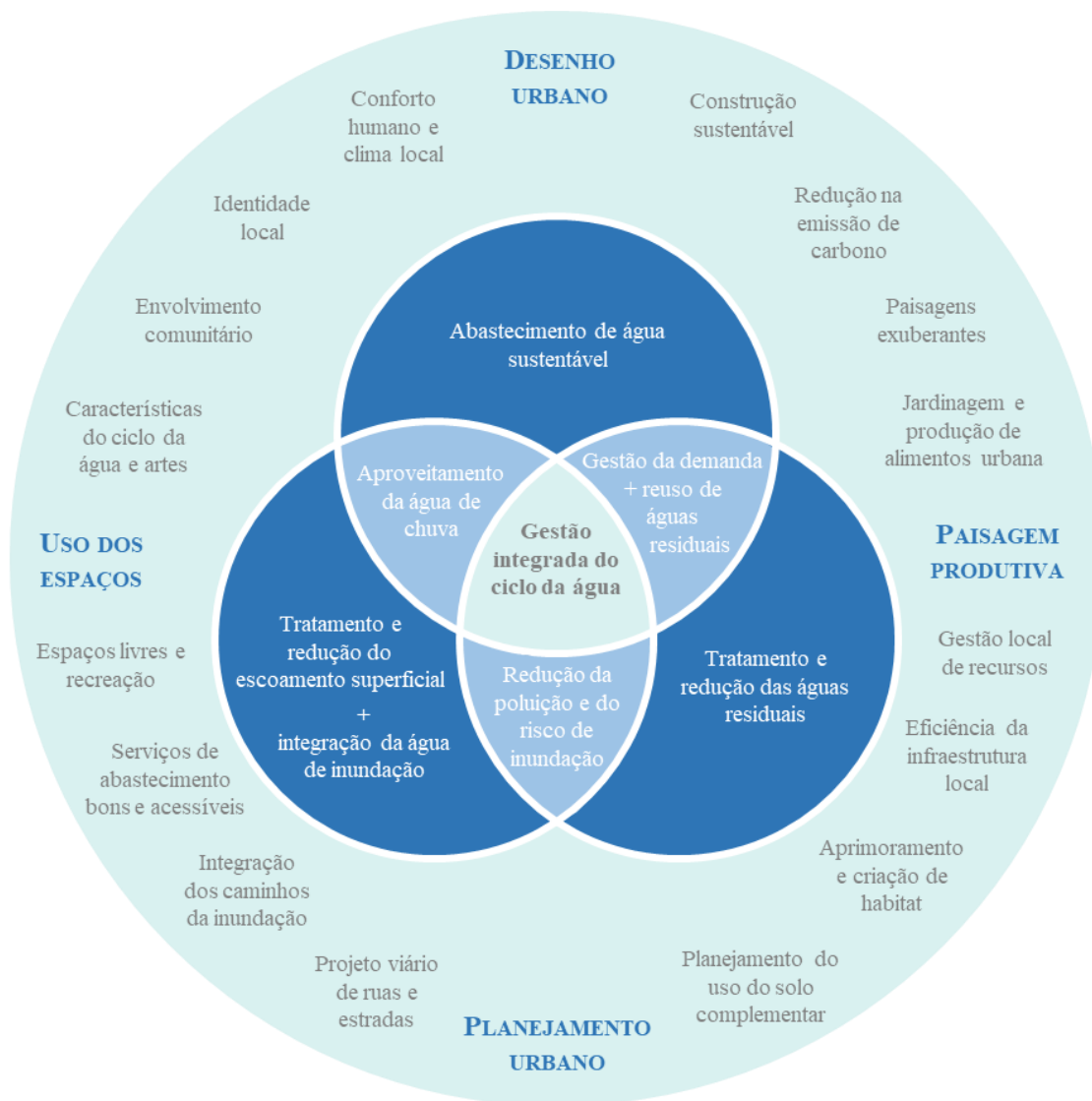


Figura 2.7 – Gerenciamento integrado do ciclo da água (adaptado de CIRIA, 2013).

## 2.2 As Cidades e o Risco de Inundações

“Existem perigos naturais, mas, a verdade é que não há nada de natural nos desastres. Nós sabemos que não podemos impedir um perigo de acontecer, mas podemos evitar que ele se transforme em um desastre e podemos mitigar os impactos, aprender sobre riscos, juntar as pessoas, rever nossas políticas e tornar nossas comunidades resilientes. Isso funciona, acredite!” (UNISDR, 2012, tradução do autor).

Neste item são apresentados conceitos sobre o risco, suas particularidades quando relacionado a inundações, incorporando o risco residual e a abordagem sobre a resiliência.

### **2.2.1 O Desenvolvimento Urbano e sua relação com as Águas Pluviais**

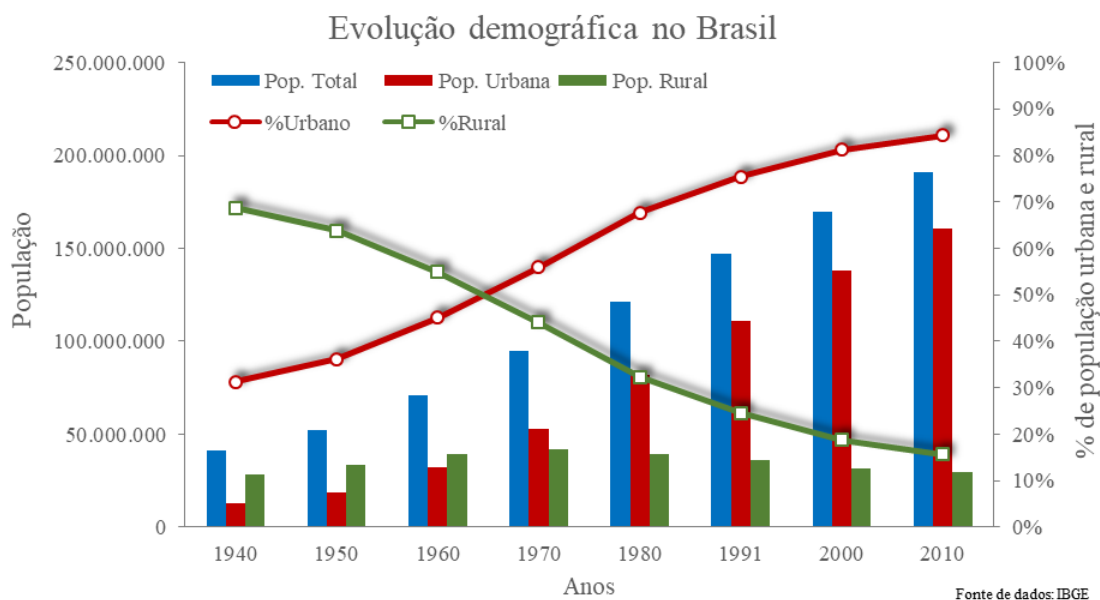
A evolução das civilizações levou a mudanças significativas no meio ambiente para a adaptação desta nova forma de organização social. Os corpos hídricos sempre foram um elemento importante para a constituição das comunidades, servindo para o abastecimento de água e o despejo de resíduos e, conseqüentemente, atraindo as pessoas para seu entorno.

Com a evolução das civilizações, estas começaram a adaptar os corpos hídricos para as suas necessidades e a ocupar o solo sem uma preocupação específica com as conseqüências indiretas oriundas de suas ações no meio ambiente. Este processo gerou mudanças que, muitas vezes, resultaram em algumas melhorias de imediato para as comunidades de entorno, mas prejuízos em longo prazo ou para a bacia hidrográfica como um todo. Atualmente, as conseqüências desta forma de ocupação e uso dos corpos hídricos vêm à tona na forma de inundações, deslizamentos de encostas, poluição dos corpos hídricos, desequilíbrio morfológico e dos ecossistemas como um todo.

Com a mudança na distribuição da população, migrando de um perfil rural para um perfil urbano, alavancada na era industrial, vários problemas de ocupação do solo urbano surgiram ou, mais especificamente, se intensificaram. Mais de 50% da população mundial vive atualmente em cidades e é esperado que a exposição dessas cidades às cheias cresça (WARD *et al.*, 2013). Segundo o último censo do IBGE (2010), a população urbana no Brasil já chega a 84% do total, como é possível observar no gráfico da Figura 2.8.

As inundações urbanas podem causar grandes perdas econômicas e sociais, produzindo impactos como riscos à saúde pública e perda de vidas humanas, alagamento de habitações, propriedades comerciais e industriais, com perdas econômicas públicas e privadas, alagamento de vias públicas, gerando engarrafamentos, interrupção de serviços, como abastecimento de água, fornecimento de energia e coleta de esgotos (MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010).

Os investimentos para intervenções de controle e mitigação das inundações urbanas são realizados pelo poder público e, geralmente, são bastante onerosos. Apesar disto, ainda há uma grande ausência de estudos de viabilidade técnica e econômica que apontem os melhores investimentos.



**Figura 2.8 – Variação populacional no Brasil, por década (Fonte de dados: IBGE<sup>1</sup>)**

Em seu relatório de desastres climáticos (CRED, 2015), a Organização das Nações Unidas – ONU aponta que 43% dos desastres naturais ocorridos entre os anos de 1995 e 2015 tiveram origem em eventos de inundações (Figura 2.9).



**Figura 2.9 – Ocorrência de desastres naturais, por tipo, entre 1995 e 2015. (CRED, 2015)**

<sup>1</sup> Instituto Brasileiro de Geografia Estatística – Dados dos Censos Demográficos. Disponíveis eletronicamente em: 1960-2010 - <<https://goo.gl/hWWKm4>>; 1950 - <<https://goo.gl/7ienP7>>; 1940 <<https://goo.gl/v9cifb>>; Taxas de urbanização 1940 e 1950 - <<https://goo.gl/5zDmZz>>.

Tais eventos, neste período, afetaram mais da metade (56% - Figura 2.10) de todas as pessoas que sofreram com algum desastre natural, matando cerca de um quarto delas (26% - Figura 2.11). Estes valores confirmam a grande importância dos investimentos em projetos para mitigação dos danos e prejuízos advindos das inundações.

### Pessoas afetadas por desastres de origem climática

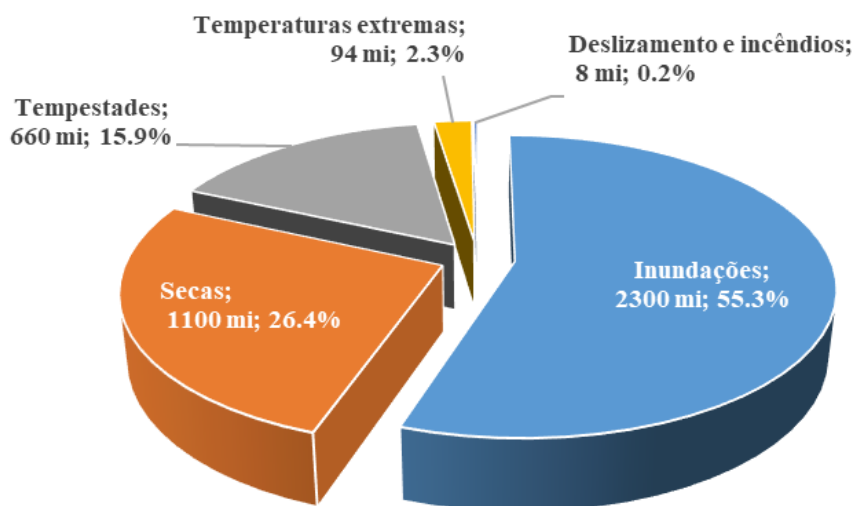


Figura 2.10 – Pessoas afetadas por desastres de origem climática (1995 – 2015) – Fonte: CRED, 2015

### Pessoas mortas por desastres de origem climática

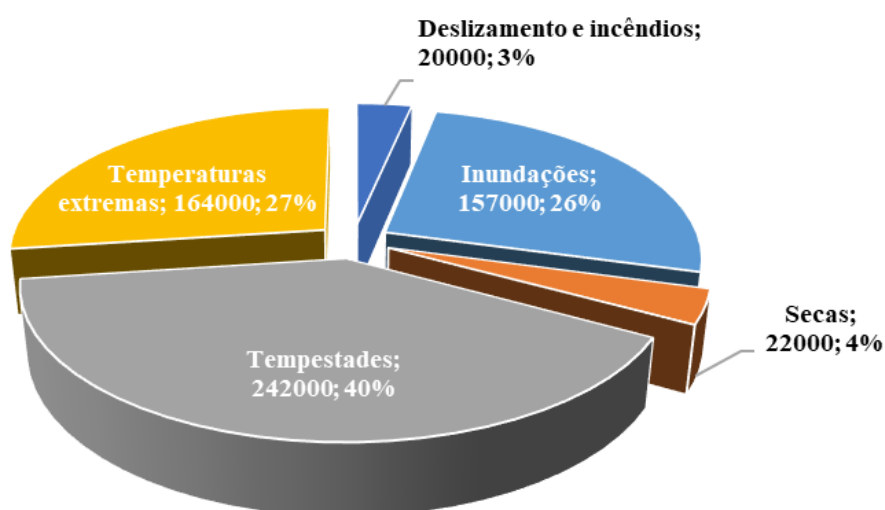


Figura 2.11 – Pessoas mortas por tipo de desastre (1995 – 2015). Fonte: CRED, 2015



Na medida em que a urbanização aumenta e se expande, ela ocupa as várzeas de inundação e impermeabiliza o solo, dificultando a infiltração da água pluvial e realocando essas águas para outros lugares mais baixos. A partir desta constatação, CANHOLI (2005) sustenta a abordagem da drenagem urbana como um problema de alocação de espaços. Ou seja, se há uma ocupação do espaço naturalmente alagável, as águas que ali deveriam estar, serão deslocadas para outras áreas, podendo resultar em inundações em locais anteriormente seguros.

Nas cidades, as modificações advindas deste processo de ocupação do solo tende a contribuir para a degradação dos recursos naturais. A remoção da cobertura vegetal é a primeira ação que o processo de ocupação produz. O desmatamento modifica o ciclo hidrológico de diversas formas: reduz a evapotranspiração, elimina a proteção do solo contra a erosão e a compactação, reduz a capacidade de infiltração do solo e elimina a interceptação vegetal.

As primeiras áreas a serem ocupadas são aquelas mais planas, próximas ao rio, por conta do fácil acesso e da facilidade de construção de habitações. Nesse local, também é fácil lançar ruas que, muitas vezes, acompanham o próprio curso do rio. A urbanização, então, se desenvolve a partir daí em direção às encostas (Miguez e Magalhães, 2010).

Após a abertura de espaço para a urbanização, com a retirada da vegetação, a impermeabilização das superfícies é o efeito seguinte da urbanização que modifica a resposta hidrológica da bacia, reduzindo a capacidade de infiltração desta, além de eliminar retenções, pela regularização das superfícies, e acelerar os escoamentos. A introdução de sistemas artificiais de drenagem, em resposta às demandas por ambientes construídos livres de alagamentos, se combina com o processo de impermeabilização, modificando significativamente o padrão de escoamentos, produzindo mais rápidas respostas dos escoamentos superficiais e ainda menores oportunidades de infiltração. Todo esse processo resulta em incremento de vazões de pico, redução de vazões de base, redução do tempo de concentração da bacia e perda de ecossistemas fluviais.

Um resultado prático frequentemente observado nas cidades é o agravamento do problema de cheias. Este problema se articula fortemente, portanto, com as questões de uso do solo. Fatores tipicamente urbanos, como o déficit habitacional, por exemplo, acabam

surgindo como agentes agravantes do problema, com a ocupação irregular de faixas marginais, que deveriam ser espaço do rio.

As cheias, por sua vez, são responsáveis pela degradação do ambiente urbano construído, interferindo sobre vários outros sistemas urbanos. Elas geram danos a edificações e a equipamentos urbanos, desvalorizam áreas sujeitas à inundação, geram perdas associadas à paralisação de negócios e serviços, interrompem a circulação de pedestres e de sistemas de transportes, são potenciais veículos de difusão de doenças, afetam e são afetadas pela coleta e disposição de esgotos e resíduos sólidos urbanos, dentre outros. O sistema se fragiliza, os riscos e os prejuízos crescem, aumenta a degradação.

Os impactos causados no ciclo natural da água pelo processo de urbanização de uma área ocorrem em todas as suas etapas de desenvolvimento, desde a fase de limpeza do terreno até a fase de implantação da rede de drenagem.

Leopold (1968) agrupa os impactos da urbanização causados na bacia hidrográfica em três grupos: *impactos na quantidade*, *impactos na qualidade* e *impactos no valor ambiental da bacia*. Um fator influente sobre todos esses grupos é a produção de sedimentos. O sistema hidrodinâmico tem suas características definidas, em parte, pela existência de sedimentos misturados à água, que ajudam a definir a morfologia dos corpos d'água. A produção de sedimentos em áreas urbanas tende a ser muito maior que em área não urbanizadas, principalmente pela existência de solo exposto em áreas de construção, o que leva ao desequilíbrio natural desses sistemas.

#### Impactos na quantidade

Uma alteração ocasionada pela urbanização, bem perceptível, é aquela causada no regime de escoamento dos rios, que está diretamente relacionada à porcentagem de área impermeável na bacia e à velocidade do escoamento através das planícies até os rios. A primeira depende do tipo do uso e ocupação do solo, enquanto a segunda depende da densidade, do tamanho e das características dos rios tributários e da existência de sistema de drenagem.

Mascarenhas *et al.*(2005) simulou os efeitos da urbanização em uma área com 360m<sup>2</sup>, considerando variações nas condições locais de uso e ocupação do solo, desde as condições de cobertura vegetal natural até a condição de impermeabilização de quase toda a

área. O resultado dessa avaliação, considerando um evento hidrológico com tempo de recorrência de 5 anos e duração crítica para toda a bacia, demonstrou um aumento no pico de vazão de cerca de 3,4 vezes devido à urbanização da área.

A variação do volume de escoamento superficial, além de impactar os picos de vazão nas cheias, também influencia o escoamento de base dos rios, pois grandes volumes de escoamento superficial diminuem a água disponível para renovação da umidade do solo e recarga do armazenamento de água subterrânea. Portanto, o aumento da impermeabilização do solo leva ao aumento do volume de escoamento superficial, que, por sua vez, aumenta os picos de cheia nas épocas de fortes chuvas e diminui a vazão de base nas épocas secas.

### Impactos na Qualidade

A introdução de efluentes de esgotos *in natura*, ou mesmo tratados em estações, nos rios é um grande agente de degradação dos corpos d'água. Essa introdução leva ao aumento da quantidade de nutrientes disponíveis, propiciando, assim, o crescimento de algas e bactérias, o que pode desequilibrar toda a biota aquática, levando, em casos extremos, à eutrofização do corpo d'água. Além disso, o uso agrícola também aumenta a quantidade de nutrientes nos rios, tanto pela existência de excrementos de animais, como pelo uso de fertilizantes comerciais nas lavouras.

Mesmo em uma situação com cobertura total e eficiente de tratamento dos esgotos urbanos, a lavagem da superfície urbanizada pelas chuvas carrega para os corpos d'água inúmeros tipos de poluentes, como combustíveis e óleos, e também uma quantidade razoável de carga orgânica, tendo impacto na qualidade da água.

### Impactos no valor ambiental (*amenities*)

Leopold (1968) destaca três principais fatores responsáveis pela deterioração do valor ambiental de uma bacia hidrográfica urbanizada:

- *Instabilidade do canal* → A mudança no regime de escoamento dos rios em áreas urbanas altera a estabilidade do canal, que tende a apresentar margens instáveis e sem vegetação, leito assoreado e com lodo, e acúmulo de sedimentos e detritos.

- *Acúmulo de lixo nos canais e nas planícies* → Latas, garrafas, plástico, resíduos de construção, e todo tipo de resíduo gerado nas cidades.
- *Desequilíbrio da biota aquática* → O aumento de nutrientes favorece o crescimento de algas, aumenta a turbidez da água e pode gerar odores desagradáveis. O aumento da turbidez e a diminuição do oxigênio dissolvido também reduzem a variedade de espécies aquáticas, como os peixes.

Hall (1986) elaborou um fluxograma, apresentado na Figura 2.12, com o processo de modificação da bacia, a partir de sua urbanização.

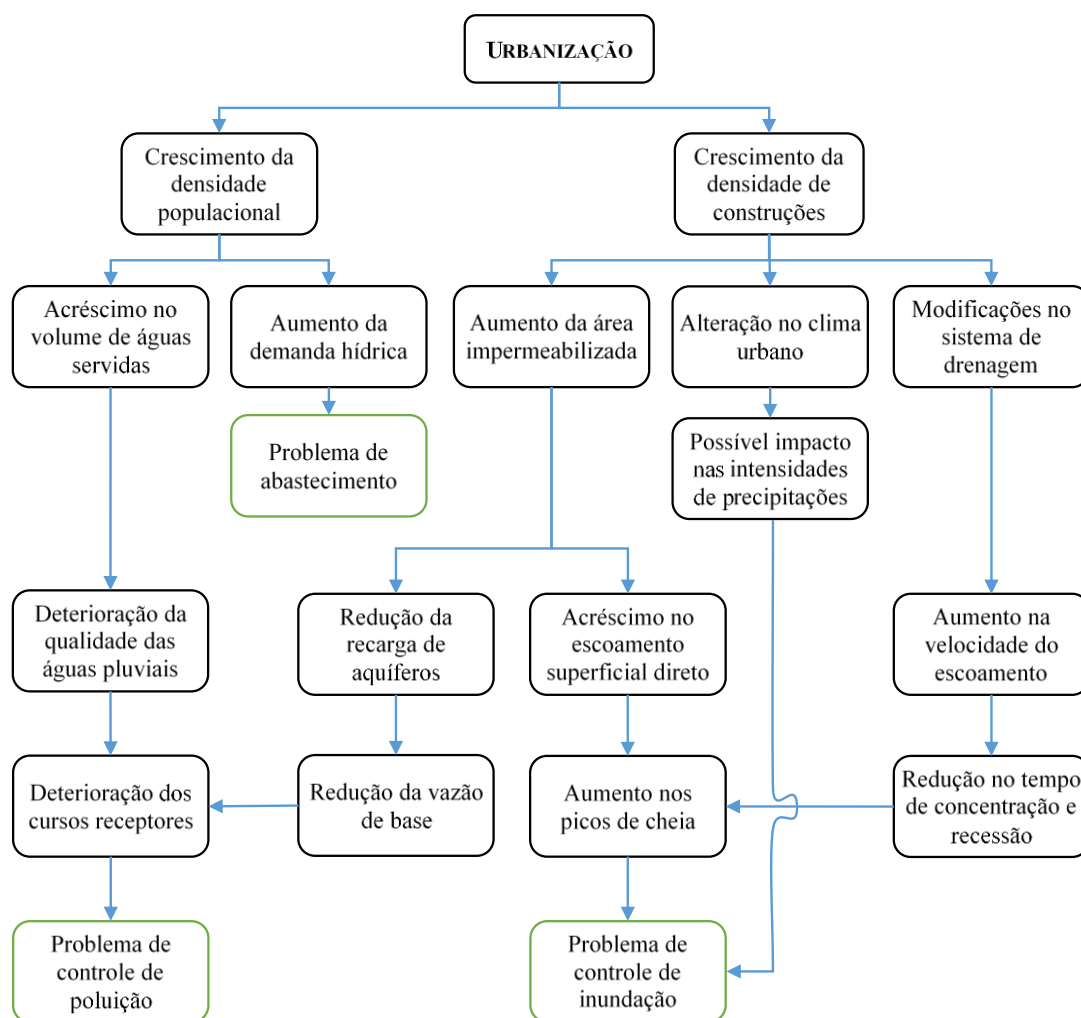


Figura 2.12 – Efeitos da Urbanização (adaptado de Hall, 1986).

Desde a publicação do Estatuto da Cidade, em 2001 (Lei Federal nº 10.257/01), a gestão urbana exige que o desenvolvimento das cidades brasileiras seja norteado por um Plano

Diretor Urbano, principal instrumento de planejamento municipal, o qual define as diretrizes da atuação do poder público e da iniciativa privada na construção dos espaços urbano e rural, na oferta de serviços públicos essenciais, visando assegurar melhores condições de vida para a população.

No âmbito do Plano Diretor, devem ser apresentadas leis de macrozoneamento e zoneamento do espaço, identificando e incentivando os principais usos potenciais de cada localidade do município. Seguindo uma de suas diretrizes, o plano deverá buscar a ordenação e controle do uso do solo, de forma a evitar a exposição da população a riscos de desastres. Assim, para muitas cidades que ocupam vales fluviais, um correto zoneamento para a gestão do risco de desastres naturais deve ser feito a partir do mapeamento das áreas inundáveis. Em 2007, o marco regulatório do saneamento no Brasil, marcado pela Lei Federal nº 11.445/07, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, estabelece a universalização dos serviços de saneamento, dentre os quais, a drenagem urbana, definida no artigo 3º desta lei com o seguinte texto:

drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas ( )

Cerca de 11 anos depois da publicação do Estatuto das Cidades, a partir da promulgação da Lei Federal nº 12.608/12, fica estabelecido que compete à União “instituir e manter cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos”. Os municípios enquadrados dentro desse cadastro têm obrigatoriedade em elaborar seus planos diretores, independente da população existente, o qual deverá apresentar conteúdo especial, abrangendo, entre outros:

- ✓ mapeamento contendo as áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos
- ✓ medidas de drenagem urbana necessárias à prevenção e à mitigação de impactos de desastres

O zoneamento das áreas de inundação deve ser feito a partir de um estudo do comportamento das cheias fluviais nas bacias hidrográficas do município. Esse estudo é, geralmente, realizado com auxílio de modelagem hidrológica-hidrodinâmica das bacias, com uso de modelos computacionais.

A realização desses estudos para uma cidade pode fornecer informações imprescindíveis para a definição das estratégias de ocupação das bacias, demarcando e hierarquizando regiões do município de acordo com o risco a que estão expostas e, ainda, indicando os prováveis benefícios de obras de controle de inundações, conforme o valor das áreas a serem protegidas.

A “eliminação” de riscos de inundações urbanas demandaria grandes e complexas intervenções estruturais no sistema de drenagem pluvial, tornando essa opção inviável economicamente. Mais do que isso, sempre haveria a possibilidade de ocorrência de um evento excepcional, maior que o máximo previsto. Portanto, a concepção de projetos de drenagem e controle de inundações visa proteger uma área de um evento hidrológico com um determinado risco aceitável, de acordo com os prejuízos potenciais desse evento.

Desta forma, “... para proteger a população, recomenda-se que estudos analisem qual deve ser a medida ou conjunto de medidas com maior eficiência frente aos benefícios e custos marginais e ao risco de inundação aceitável” (NAGEM, 2008).

Nagem (2008) propõe uma metodologia simplificada e prática para caracterizar os custos provenientes de um evento de inundação em uma bacia urbana no Brasil. A autora afirma que “é necessário que as informações utilizadas sejam de fácil obtenção e que demandem pouco recurso financeiro e tempo na fase de levantamento, mas que, por sua vez, permitam uma composição adequada da situação”.

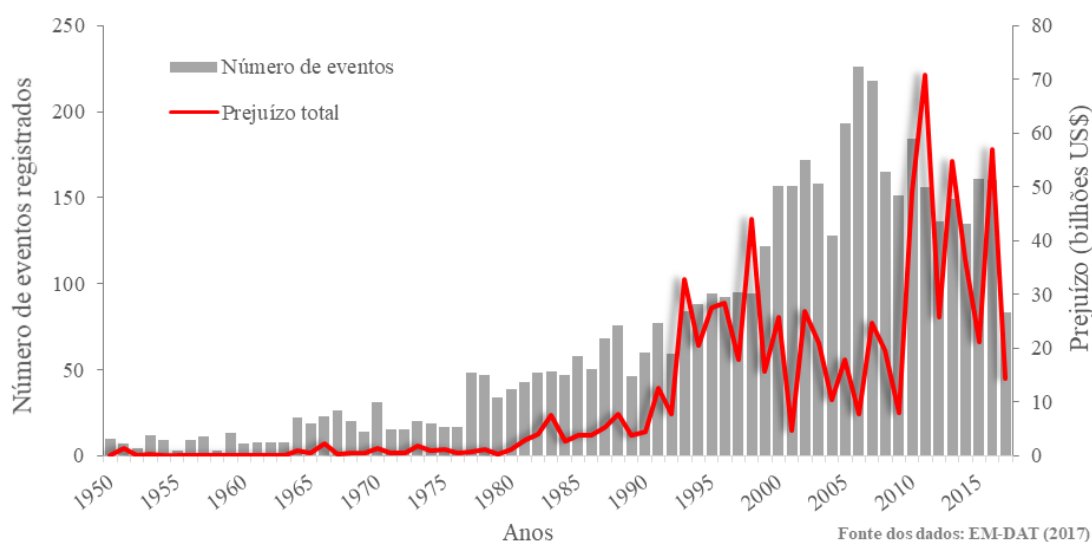
Atualmente, já é consenso a necessidade premente de se reduzir os impactos causados pelas inundações. Desde a decisão dos humanos em estabelecer comunidades fixas, a água foi objeto central das estratégias de sobrevivência das comunidades. As primeiras civilizações reconheceram a necessidade de convivência com as inundações, se adaptando ao ciclo natural das cheias.

Com o crescimento e desenvolvimento dessas comunidades, uma maior demanda por espaço se apresenta, sendo as planícies marginais aos rios vistas como mais apropriadas

para o estabelecimento de novos e maiores aglomerados, por sua posição estratégica, facilitando o próprio abastecimento de água para as pessoas, assim como permitindo uma maior produção de alimentos, com melhores técnicas de irrigação.

Porém, quanto mais cresciam as cidades, maior ficava a exposição aos danos potenciais das inundações, exigindo medidas de controle das cheias. Com o passar do tempo, maiores se tornaram as cidades e maiores intervenções para controle de cheias foram implementadas. Mesmo assim, os danos e prejuízos advindos dos eventos de inundação aumentavam continuamente e deveriam ser reduzidos de alguma forma. Novas técnicas para redução de danos e construções a prova de inundações passam a ser vistas como soluções.

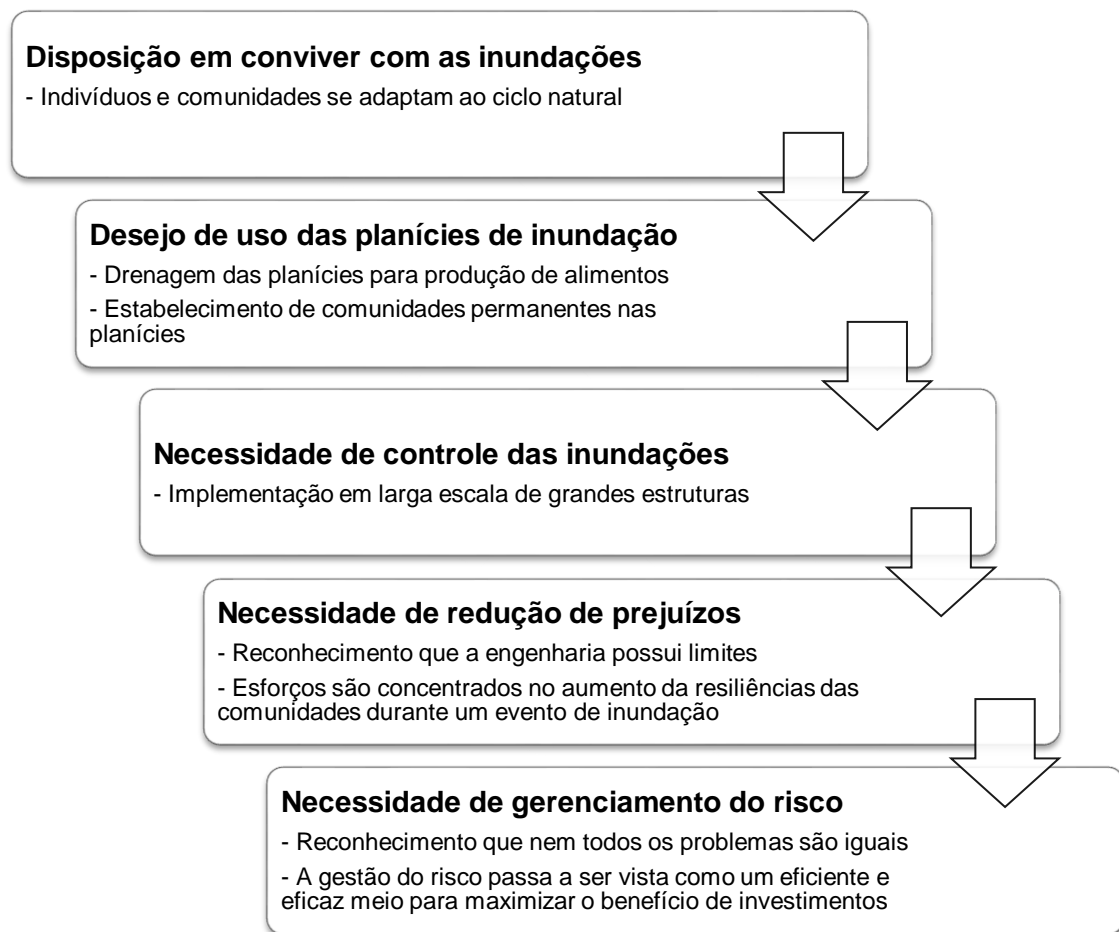
A percepção de que os prejuízos com as inundações vem aumentando significativamente (JHA *et al.*, 2012), como pode ser observado no gráfico da Figura 2.13, mesmo com maiores investimentos para controle das cheias e redução de seus danos potenciais, trouxe para a abordagem das inundações o gerenciamento de riscos.



**Figura 2.13 – Número de eventos de inundação registrados e prejuízos estimados totais no mundo, entre os anos de 1950 e 2017. Fonte de dados: EM-DAT - *The Emergency Events Database*<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> EM-DAT: *The Emergency Events Database* - Universite catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir –Disponível em: <www.emdat.be>. Acessado em: 29/10/2017.

Esse padrão evolutivo na ocorrência de eventos de inundações e nos prejuízos resultantes ressalta a necessidade de revisão nas formas de relacionamento entre a sociedade e as cheias. Sayers *et al* (2013) resumizam a evolução da relação entre os humanos e as inundações tendo início na disposição das comunidades em viver com as cheias, passando pelo desejo de uso das planícies de inundação, a necessidade de controle das cheias e redução de seus impactos até chegar, finalmente, na necessidade de gerenciar os riscos das inundações, como esquematizado na Figura 2.14.



**Figura 2.14 – A evolução da prática do gerenciamento do risco (SAYERS *et al*, 2013)**

### **2.2.2 Risco: uma palavra, muitos significados**

O conceito de risco possui uma infinidade de definições, dependendo da área disciplinar a que se aplica, podendo ser destacados os riscos econômicos, sociais, industriais, tecnológicos, naturais e ambientais. Zonensein (2007) relaciona as seguintes definições de risco para diferentes aplicações:



- ✓ Estatística → o risco está relacionado à probabilidade de ocorrência de um evento superior a um evento específico;
- ✓ Economia → o risco econômico relaciona-se com a volatilidade ou variabilidade de um esperado retorno financeiro, no âmbito de um investimento;
- ✓ Engenharia → o risco apresenta-se como função de duas variáveis: a *probabilidade de ocorrência* de um evento e os *danos potenciais* causados por esse evento.

Kelman (2003) levantou algumas definições de risco disponíveis na literatura, publicadas ao longo da década de 1990, apresentando as seguintes:

- ✓ Risco é definido como as perdas esperadas (de vida, pessoas afetadas, danos à propriedade e interrupção da atividade econômica) devido a um perigo particular para uma dada área em um tempo de referência. Baseado em cálculos matemáticos, o risco é o produto de perigo e vulnerabilidade (UM DHA, 1992, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco Total = Impacto do perigo X Elementos em Risco X Vulnerabilidade dos elementos em risco (UNESCO, *apud* BLONG, 1996).
- ✓ Risco = Perigo X Vulnerabilidade X Valor (da área ameaçada) / Prevenção (DE LA CRUZ-REYNA, 1996, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco é a exposição atual de alguma coisa de valor humano a um perigo e é, frequentemente, considerado como a combinação de probabilidade e perda (SMITH, 1996, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco = Probabilidade X Consequências (HELM, 1996, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco pode ser definido de forma simples como a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável, porém, pode ser melhor descrito como uma probabilidade de um perigo contribuir para um desastre potencial. Necessariamente, deve envolver a consideração da vulnerabilidade no perigo (STENCHION, 1997, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco é a probabilidade de perda, a qual depende de três elementos: perigo, vulnerabilidade e exposição. Caso qualquer um desses elementos aumente ou diminua, o risco aumenta ou diminui, respectivamente (CRICHTON, 1999, *apud* KELMAN, 2003).

- ✓ O Risco Total significa o número esperado de vidas perdidas, pessoas afetadas, danos à propriedade e interrupção de atividades econômicas devido à ocorrência de um fenômeno natural particular e, conseqüentemente, o produto do risco específico e elementos em risco. O Risco Total pode ser expressado como:  $\text{Risco}_{(\text{total})} = \text{Perigo} \times \text{Elementos em Risco} \times \text{Vulnerabilidade}$  (GRANGER *et al*, 1999, *apud* KELMAN, 2003).
- ✓ Risco é a combinação da possibilidade de um determinado evento com o impacto que esse evento poderia causar, caso ocorresse. Portanto, o risco possui dois componentes: a possibilidade (ou probabilidade) de um evento ocorrer e o impacto (ou consequência) associada à ocorrência desse evento. A consequência de um evento pode ser tanto desejável, quanto indesejável. Em alguns, mas não em todos os casos, uma medida única conveniente da importância do risco é dada por:  $\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$  (SAYERS *et al*, 2002).

Nos Estados Unidos da América, o *US Department of Homeland Security* (DHS), através de um plano nacional de proteção da infraestrutura (*NIPP - national infrastructure protection plan*), considera o risco em função da ameaça, vulnerabilidade e consequência (CIRIA, 2010):

$$\text{RISCO} = f(A, V, C)$$

Onde: A = **Ameaça**: evento com potencial de causar danos (perigo)

V = **Vulnerabilidade**: grau de susceptibilidade à perturbação

C = **Consequência**: impactos sociais, econômicos e ambientais de um evento

No Brasil, a CETESB (2011) classifica o risco como: “*Medida de danos à vida humana, resultante da combinação entre frequência de ocorrência de um ou mais cenários acidentais e a magnitude dos efeitos físicos associados a esses cenários*”.

Para a comunidade científica, a definição usualmente mais adotada é o risco sendo o produto de um perigo e suas consequências (ARONICA, 2013), como pode ser observado na grande maioria das definições supracitadas. Quando aplicado à gestão das inundações, o risco assume algumas particularidades, que serão discutidas no próximo item.

### 2.2.3 Risco de inundações

Considerando as diversas definições para o risco apresentadas no item 2.2.2, é necessário adotar uma interpretação para ser sustentada durante a pesquisa, garantindo que tal definição seja coerente com a temática em estudo (ZONEINSEIN, 2007), ou seja, as inundações urbanas.

A observação das definições de risco apresentadas mostra que, na maioria das interpretações, dois elementos se destacam como mais importantes: o *perigo* e a *consequência*. Desta forma, pode-se expressar o risco basicamente por:

$$\text{RISCO} = \text{PERIGO} \times \text{CONSEQUÊNCIA}$$

Para o campo dos estudos das inundações urbanas, o perigo será função da probabilidade de ocorrência da inundação, sendo que a consequência dependerá da magnitude da inundação, como a profundidade de alagamento, a velocidade dos escoamentos e a duração do evento e, ainda, da vulnerabilidade local, que será determinada por fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, os quais podem intensificar a susceptibilidade de uma dada comunidade aos impactos de determinado perigo (TINGSANCHALI, 2012).

Desta forma, neste trabalho, o risco de inundação é considerado como:

$$\text{Risco de inundação} = \text{probabilidade de ocorrência} \times \text{severidade das consequências}$$

Sendo a severidade das consequências da inundação dependente do quão vulnerável está a população em risco (CIRIA, 2010).

O perigo associado a um evento de cheia fluvial advém da ocorrência de uma chuva intensa, capaz de ocasionar escoamentos superficiais superiores à capacidade hidráulica da calha fluvial, resultando no extravasamento das águas para as planícies marginais que, quando ocupadas, caracterizam o evento de inundação.

Por sua vez, a ocorrência das chuvas pode ser associada a uma probabilidade, através de estudos estatísticos, definindo tempos de recorrência para diversos eventos de precipitação, que, por sua vez, relacionam-se com a frequência que esse evento pode ser igualado ou superado em um dado ano, conforme a equação (2.1).

$$TR = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

Onde: TR = tempo de recorrência em anos;

$f$  = frequência ou probabilidade de ocorrência em um determinado ano.

Na obras de engenharia para controle de inundações, é considerada a vida útil da estrutura para reconhecimento do risco associado à sua implantação durante esse período de tempo. Assim, a probabilidade de falha dessa estrutura será dada em função da ocorrência, durante o seu período de vida útil, de um evento com tempo de recorrência igual ou superior ao tempo de recorrência adotado para o seu projeto, de acordo com a equação (2.2).

$$p_{TR} = 1 - \left(1 - 1/TR\right)^n \quad (2.2)$$

Onde:  $p_{TR}$  = probabilidade de ocorrência do evento TR, durante  $n$  anos

TR = tempo de recorrência em anos;

$n$  = número de anos do período em análise.

Dessa forma, é possível avaliar probabilidades de ocorrência de distintos eventos com tempos de recorrência pré-determinados, para diferentes períodos de análise, dependendo da vida útil da estrutura ou do plano de gerenciamento de risco. A Tabela 2.2 apresenta alguns valores de probabilidade de ocorrência de eventos para diferentes períodos de tempo.

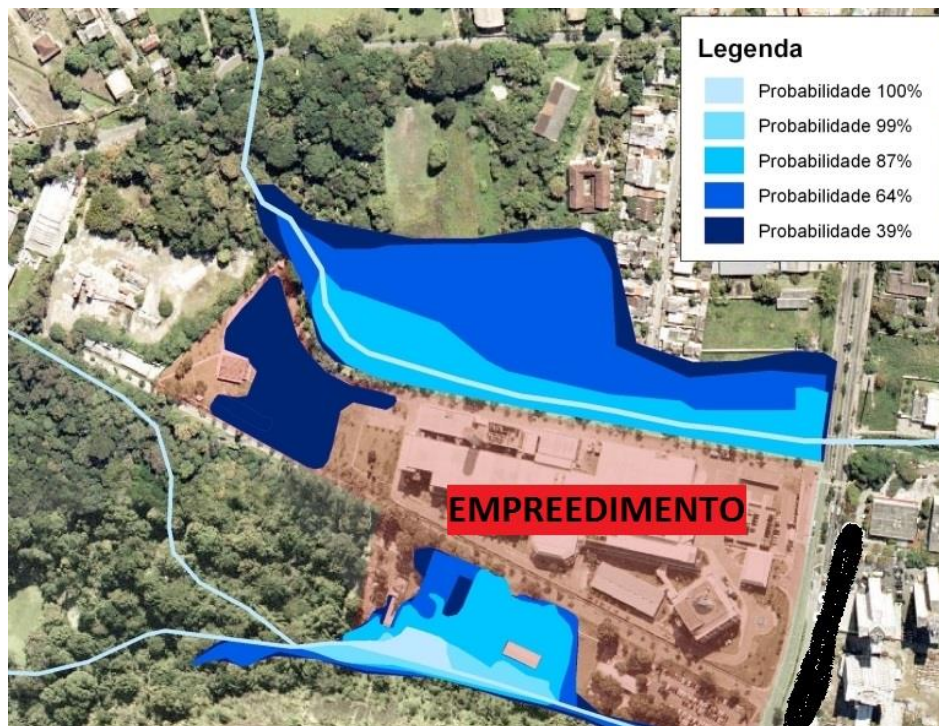
**Tabela 2.2 - Probabilidades de ocorrência de eventos pré-determinados.**

TR (anos)	Probabilidade de que o evento seja igualado ou exercido pelo menos uma vez em um período em anos de:				
	2	10	25	50	100
2	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,41	0,65	0,93	0,99	1,00
25	0,18	0,34	0,64	0,87	0,98
50	0,10	0,18	0,40	0,64	0,87
100	0,05	0,10	0,22	0,39	0,63

A aplicação desses cálculos em um estudo mais completo, considerando cenários de simulação matemática de eventos hidrológicos com diferentes tempos de recorrência, pode fornecer importantes informações para um programa de gestão de risco para as cidades e empreendimentos privados.

A partir do estudo das cheias fluviais resultantes de chuvas com diferentes tempos de recorrência, pode ser gerado um mapa de probabilidade de inundação. Nesse mapa são indicadas as áreas susceptíveis a inundações e a probabilidade de ocorrência para cada área, como pode ser observado no exemplo de mapeamento das probabilidades de alagamento durante um período de 50 anos apresentado na Figura 2.15.

O mapeamento de profundidades e extensões das inundações, com auxílio de modelagem hidrodinâmica, tem se tornado um componente essencial no gerenciamento de risco em diversos países (NEAL *et al*, 2013).



**Figura 2.15 - Mapa de probabilidades de ocorrência de inundações para um horizonte de 50 anos (AQUAFLUXUS, 2014, Acervo técnico).**

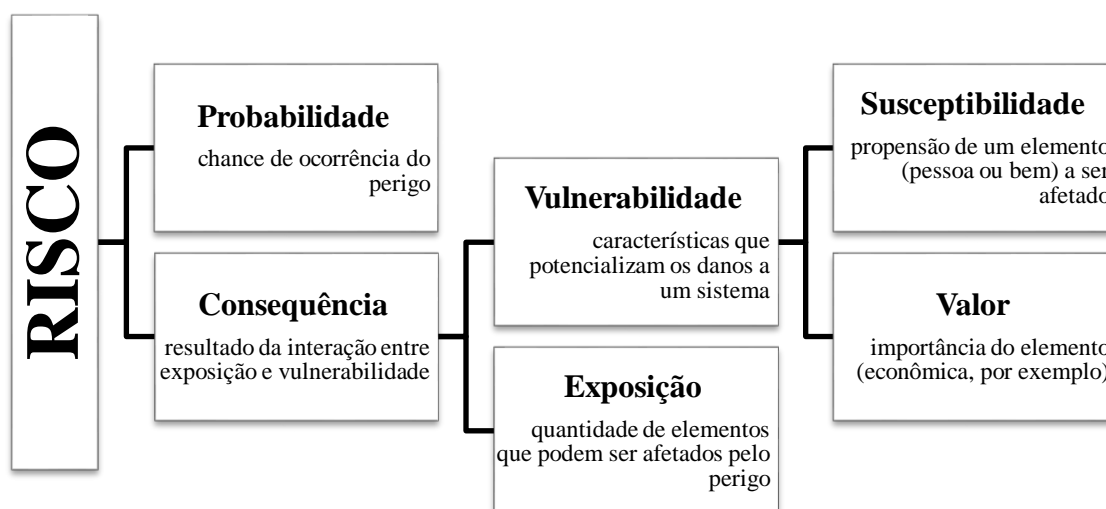
Esse mapa pode ser utilizado para hierarquizar diferentes usos do solo para cada área da bacia, considerando a probabilidade que ela poderá ser inundada. Nos casos de empreendimentos privados, o mapa possibilita a indicação dos locais mais indicados para uso mais nobres, como construções que não podem ser alagadas ou armazenagem de produtos de alto valor.

O cruzamento da informação da probabilidade de inundação com o valor dos bens expostos poderá ser utilizado como um bom indicativo para mensurar se a intervenção requerida para evitar a inundação da área terá benefício em termos econômicos. Porém, tais mapas de probabilidade não possuem informações suficientes para uma avaliação de prejuízos

mais acurada, pois não apresenta as profundidades de alagamento e velocidades de escoamento alcançados durante o evento de inundação, imprescindíveis para valorar o dano potencial do evento.

Dessa forma, para um maior entendimento dos impactos potenciais de uma inundação e seus consequentes prejuízos, após reconhecimento dos bens expostos ao risco de inundações, deve-se elaborar um estudo *de avaliação de vulnerabilidade*, realizado por intermédio de modelos matemáticos para a previsão dos impactos danosos às pessoas, às instalações e ao meio ambiente (CETESB, 2011).

De forma geral, os componentes do risco de inundações podem ser desmembrados conforme esquema apresentado na Figura 2.16.



**Figura 2.16 – Componentes do risco (ZONSEIN, 2007)**

Definido de forma clara o conceito de risco e todos os seus componentes, é possível criar uma referência para permitir a mensuração do risco de inundação, considerando diversos cenários, para avaliar a criticidade da situação atual de uma determinada região, por meio de um diagnóstico, assim como prever o efeito da implantação de medidas estruturais no sistema de drenagem para defesa das inundações.

De forma geral, a parcela relacionada à probabilidade de ocorrência de um evento com potencial de causar danos, o perigo, não é passível de intervenção para redução do risco de um determinado sistema. Por exemplo, não há meios possíveis de reduzir a probabilidade de ocorrência de um terremoto, sendo todo o esforço para a gestão do risco de terremotos voltado para a redução dos danos e da vulnerabilidade do sistema aos danos

potenciais de um tremos de terra. Porém, o risco de inundações possui uma particularidade que distingue sua conceituação da forma clássica da definição de risco, uma vez que o perigo, apesar de relacionado com a probabilidade de ocorrência de uma chuva intensa, é materializado por sua consequência, a inundação. Desta forma, o perigo na gestão do risco de inundações pode ser modificado, através de medidas estruturais de controle e mitigação das enchentes e, tradicionalmente, o foco da gestão do risco de inundações se concentra na redução da probabilidade de ocorrência das inundações, através de sistemas estruturais de defesa (SAYERS *et al*, 2013).

Considerando essa particularidade da gestão do risco de inundações, as componentes do risco podem se apresentar de uma forma mais completa, abrindo a parcela relacionada ao perigo, nesse caso, a inundação ocasionada pela ocorrência de uma chuva intensa. Adicionalmente, é inserido na equação do risco uma nova componente, relacionada à habilidade do sistema em se recuperar após um evento, chamada *resiliência*, que será tratada de forma mais detalhada ao longo desse trabalho. Essa forma de representação permite uma melhor percepção das possíveis ações para redução do risco, que podem vir a modificar tanto o perigo, através de medidas estruturais, como os danos, por meio da adoção de medidas de redução de exposição e de vulnerabilidade. O diagrama apresentado na Figura 2.17 expõe as componentes do risco de inundações, considerando esta perspectiva, destacando o posicionamento da resiliência.

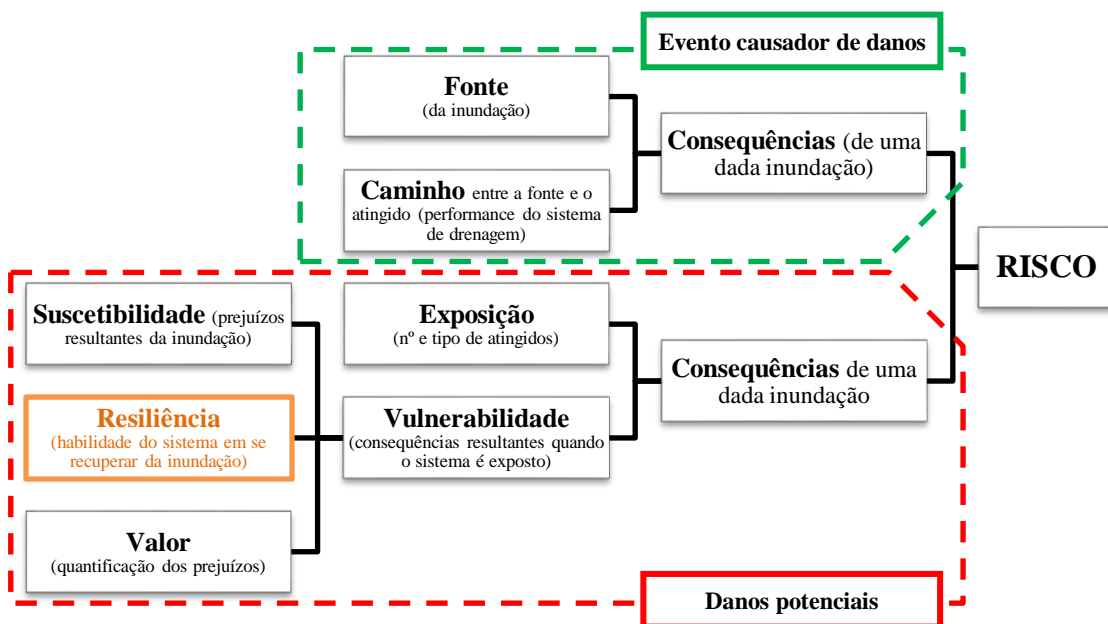


Figura 2.17 – As componentes do risco de inundações (Adaptado de SAYERS et al, 2013)

Os projetos para controle de inundações partem de um diagnóstico da situação atual, reconhecendo as áreas mais vulneráveis ou com maiores riscos de inundações e avaliam

diferentes intervenções para redução desses riscos, considerando como referência uma chuva com tempo de recorrência pré definida, geralmente 25 ou 50 anos, no caso brasileiro. O processo de decisão é finalizado definindo-se a intervenção com o maior benefício apresentado como a solução a ser implementada, ou seja, aquela que apresenta menor relação entre custo e redução de risco.

A adoção dessa linha de ação já se mostra como um avanço significativo, quando considerado o estado da prática encontrado nos projetos de drenagem e controle de inundações no Brasil, ainda, em sua grande maioria, apoiado em técnicas tradicionais de simples aumento da capacidade hidráulica do sistema para comportar os escoamentos superficiais excedentes gerados pelo processo de urbanização.

Porém, mesmo nos países com grande tradição de gerenciamento de risco, como a Inglaterra, que, em termos de ameaças relacionadas às inundações, posiciona-se entre as poucas nações do mundo que avaliaram e mapearam exaustivamente o perigo de inundação (CIRIA, 2010), episódios de grandes enchentes ainda desafiam as autoridades públicas, causando transtornos e prejuízos para a população. CIRIA (2010) destaca eventos de inundação nos anos de 1998, 2000, 2005, 2007 e 2009, os quais causaram perturbações generalizadas nos sistemas de infraestrutura. A permanência de eventos perturbadores dos sistemas antrópicos e ambientais mostra a natureza irredutível da incerteza em sistemas complexos e a consequente necessidade de se viver com possíveis mudanças e incertezas (BERKES, 2007).

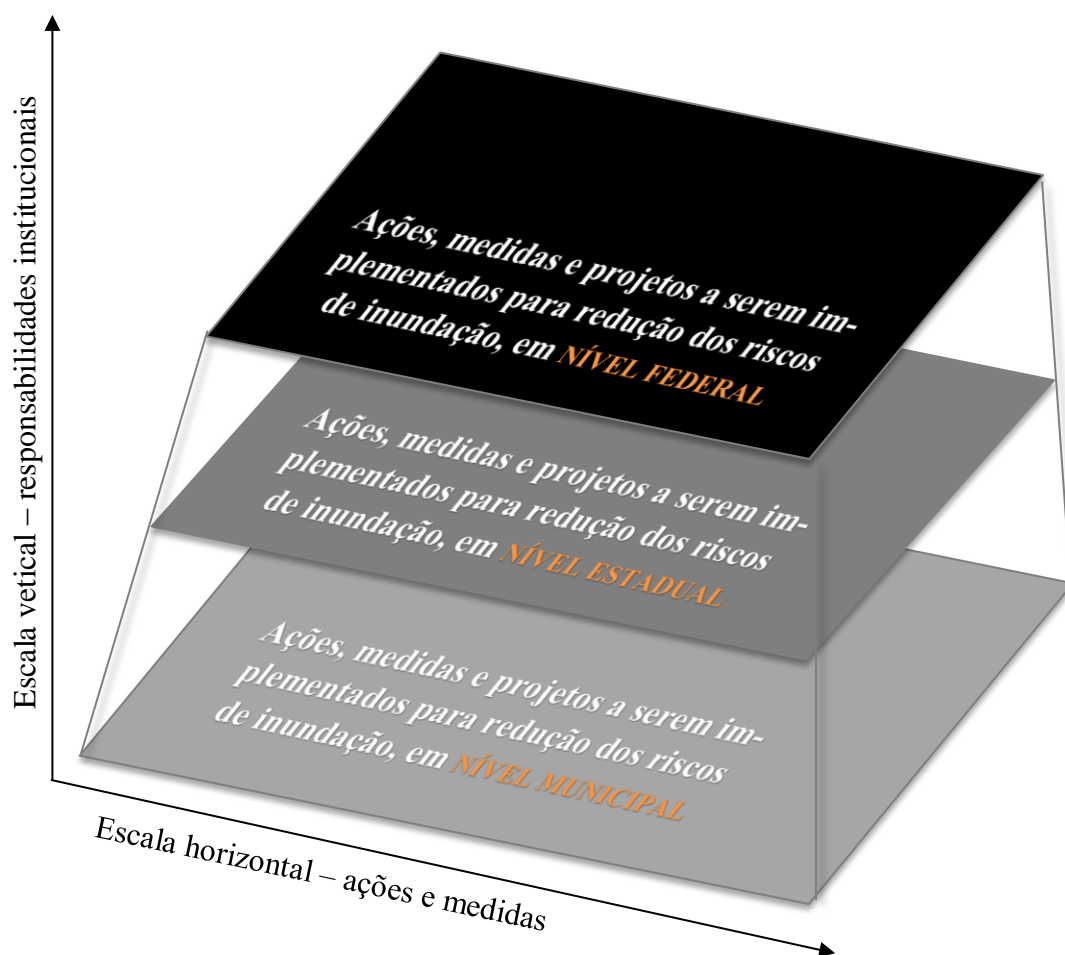
Desta forma, uma vez que o perigo apresenta-se como um evento inerente a determinada situação, não poderá ser controlado ou reduzido, porém, o risco é passível de ser gerenciado, alterando-se sua chance de ocorrência ou suas consequências (VERÓL, 2013). Portanto, ressalta-se que há uma necessidade de mudança na abordagem dos estudos acerca das inundações urbanas, passando de uma tentativa de controle das inundações para um gerenciamento de risco das inundações, através da *avaliação de risco*, definida como:

O processo pelo qual os resultados da estimativa de risco são utilizados para a tomada de decisão, por meio de critérios comparativos de risco, visando à definição da estratégia de gerenciamento do risco (CETESB, 2011).

Em um processo de gerenciamento de risco de inundações para o planejamento urbano, as estratégias de implementação de ações necessárias devem assumir tanto uma escala



horizontal, quanto vertical (BATICA, 2015). A escala horizontal abrange as ações, medidas e soluções disponíveis e adequadas ao sistema em análise, distribuídas entre as medidas estruturais e não estruturais, abordadas no item 2.1.1, enquanto na escala vertical, serão definidas as responsabilidades institucionais dentro do planejamento, distribuídas do nível federal ao nível municipal. O esquema da Figura 2.18 apresenta a configuração do gerenciamento de risco nas escalas horizontal e vertical.



**Figura 2.18 – Escalas de planejamento para o gerenciamento de risco de inundações.**

O gerenciamento de risco aplicado aos desastres naturais assume que os desastres não podem ser evitados, mas reduzidos. Se insere em um processo circular, retroalimentado pelo aprendizado contínuo com a ocorrência de eventos ao longo do tempo. Ou seja, é um processo de adaptação dinâmica, no qual se assume, *a priori*, que o sistema está sujeito a distúrbios e, dessa forma, são tomadas medidas de prevenção e redução de danos potenciais, por meio da redução da vulnerabilidade, e de limitação da extensão dos prejuízos. A Figura 2.19 apresenta esta abordagem circular do gerenciamento de risco.

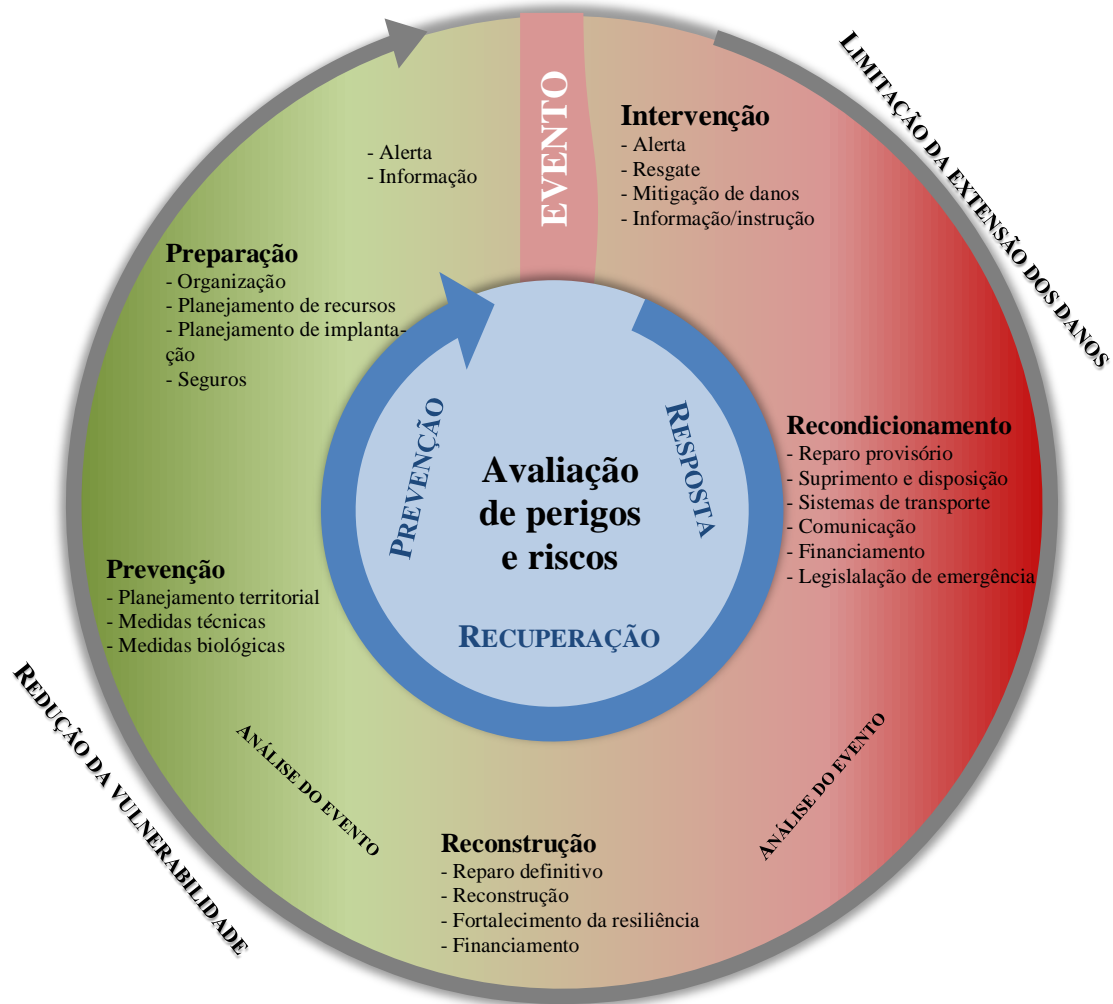


Figura 2.19 – Ciclo do gerenciamento de risco (adaptado de BARA e BRÖNNIMANN, 2011).

Mesmo em situações em que o gerenciamento de risco já se insere no planejamento dos sistemas urbanos, as tentativas de implementar ações de controle das inundações têm se mostrado cada vez mais ineficazes, criando ambientes urbanos altamente dependentes de complexas estruturas hidráulicas, as quais garantem um nível de proteção limitado ao tempo de recorrência do evento de projeto. Adicionalmente, tal abordagem tem como uma das consequências a indução à falsa percepção do risco, fazendo com que as cidades aumentem a exposição aos perigos da enchente, o que resultará no aumento do risco. Liao (2012) menciona que tais tentativas de controle resultam em danos aos ecossistemas fluviais e no aumento do risco de longo termo.

A aceitação de que as obras hidráulicas possuem um limite de proteção aos sistemas urbanos abre uma brecha para introdução do conceito de *risco residual* no gerenciamento de risco de inundações. Essa abordagem assume que os sistemas urbanos estarão sujeitos

a sofrer impactos de eventos de inundação, quaisquer que sejam as medidas adotadas para a sua eliminação. Dessa forma, discutimos a conceituação do *risco residual* para introduzi-lo na estratégia de gerenciamento de inundações proposta nessa tese.

#### 2.2.4 Risco Residual

Uma vez que os sistemas de proteção contra inundações possuem limitação em sua resistência, os bens existentes nas áreas protegidas estão expostos a um *risco residual* (FABER, 2006). Além de possíveis falhas estruturais e ocorrência de eventos de magnitude superior ao evento de projeto, podem, ainda, acontecer alterações nos padrões de variabilidade hidrológica, sendo a infraestrutura de controle de enchentes não mais confiável para mitigar problemas de inundações frente às incertezas do processo de mudanças climáticas (ZEVENBERGEN e GERSONIUS, 2007). O passo a ser dado em direção a criação e manutenção de cidades menos susceptíveis aos potenciais prejuízos advindos dos eventos de inundações é o reconhecimento e internalização desse *risco residual* no processo de decisão das estratégias a serem adotadas no manejo das águas pluviais e das cheias fluviais dentro da gestão urbana.

Portanto, nos estudos de avaliação de risco, é importante considerar a recomendação apresentada por CIRIA (2010):

**RISCO ZERO não é viável e nem desejável:** usualmente, é impossível e impraticável a eliminação do risco. O objetivo da mitigação do risco não é sua eliminação, mas buscar um adequado e justificável grau de *risco residual* (CIRIA, 2010, traduzido pelo autor).

O *risco residual* pode ser entendido como o risco devido à falha dos sistemas estruturais ou à ocorrência de uma cheia superior à considerada na fase de projeto (PLATE, 2002). Então, o risco residual será o risco mensurado após a implantação de medidas de redução, que deverá ser gerenciado por meio de um Programa de Gerenciamento de Risco (CETESB, 2011).

Outra definição para o *risco residual*, dada pela *Federal River Administration* da Áustria, considera a probabilidade de ocorrência de uma falha técnica ou humana em um sistema de proteção contra inundações dentro de um período específico de tempo, introduzindo o termo “risco acrescido” ou “sobre risco” (*increased risk*) para definir a probabilidade de ocorrência de eventos com magnitude superior ao evento de projeto (FABER, 2006).

O risco residual pode ser definido como:

(...) o risco remanescente após a implementação de medidas de gerenciamento e mitigação de riscos. Pode incluir, por exemplo, a previsão de danos potenciais em consequência de uma inundação com severidade superior a um evento com 100 anos de tempo de recorrência<sup>3</sup> (SAMULES e GOULDBY, 2009 – tradução do autor).

Medidas para proteção das áreas urbanas reduzem os riscos de inundação, porém, introduzem um incremento de risco associado à sua falha. Dessa forma, a redução do risco devido a implementação de medidas estruturais será resultado do risco atual menos o risco com projeto mais o incremento devido a falhas, como apresentado na Figura 2.20.



**Figura 2.20 – Redução de risco em consequência da adoção de medidas de proteção contra inundações. (Adaptado de SUFRI, 2011)**

Portanto, a pergunta a ser feita é: como considerar o *risco residual* no processo de decisão do gerenciamento das inundações? Mais recentemente, o conceito de *resiliência* foi adicionado como um novo componente ao gerenciamento dos sistemas de drenagem, que permitiu a internalização do risco residual no processo de avaliação e tomada de decisões para redução dos prejuízos causados pelas inundações. O presente trabalho aplica uma metodologia para internalização do risco residual à gestão das inundações, utilizando o conceito de resiliência, por meio da formulação de um índice. O termo resiliência possui aplicação em distintas disciplinas e apresenta características particulares quando considerado no âmbito das inundações urbanas, como discutido no próximo item.

---

<sup>3</sup> O valor do tempo de recorrência (TR) pode variar, dependendo da adoção do TR da cheia de projeto, a ser utilizado no dimensionamento das estruturas de controle e proteção contra as inundações.

### 2.2.5 Resiliência às Inundações

Quando aplicada a um sistema de infraestrutura particular, a resiliência pode ser entendida como a habilidade desse sistema em continuar provendo seus serviços essenciais quando ameaçado por um evento incomum, assim como sua habilidade em retornar para sua capacidade de operação normal após a ocorrência do evento.

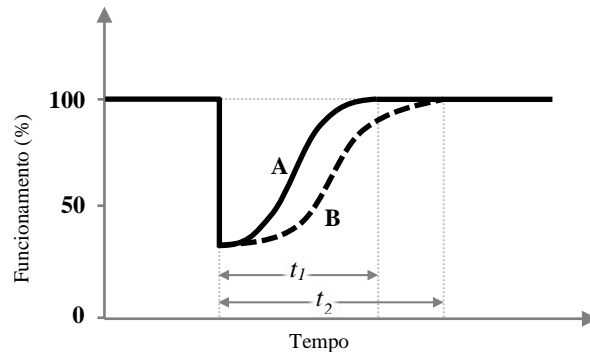
Como os fenômenos naturais possuem uma variabilidade temporal, a resiliência pode ser relacionada também com a capacidade de um sistema de se adaptar às possíveis mudanças futuras do ambiente, continuando a prover os serviços para que foi originalmente projetado (CIRIA, 2010).

Para a engenharia, a resiliência trata de distúrbios que podem ameaçar um sistema estrutural, comumente relacionada a baixas probabilidades de falhas ou, em caso de falha, na rápida recuperação de seus níveis de funcionamento (WANG e BLACKMORE, 2009), e, segundo Bruneau *et al* (2003), varia de acordo com quatro propriedades:

- **Robustez:** a força física para suportar uma perturbação sem a completa degradação funcional do sistema.
- **Redundância:** o quanto que os componentes do sistema são substituíveis.
- **Desenvoltura:** a capacidade de identificar problemas e mobilizar recursos necessários.
- **Rapidez:** capacidade de recuperação do sistema em um tempo hábil.

Apesar desta configuração mais abrangente, a medição tradicional da resiliência em sistemas de engenharia foca exclusivamente na habilidade de recuperação, considerando o tempo de retorno às funções originais, ou seja, quanto mais rápido esse tempo, maior é a resiliência do sistema.

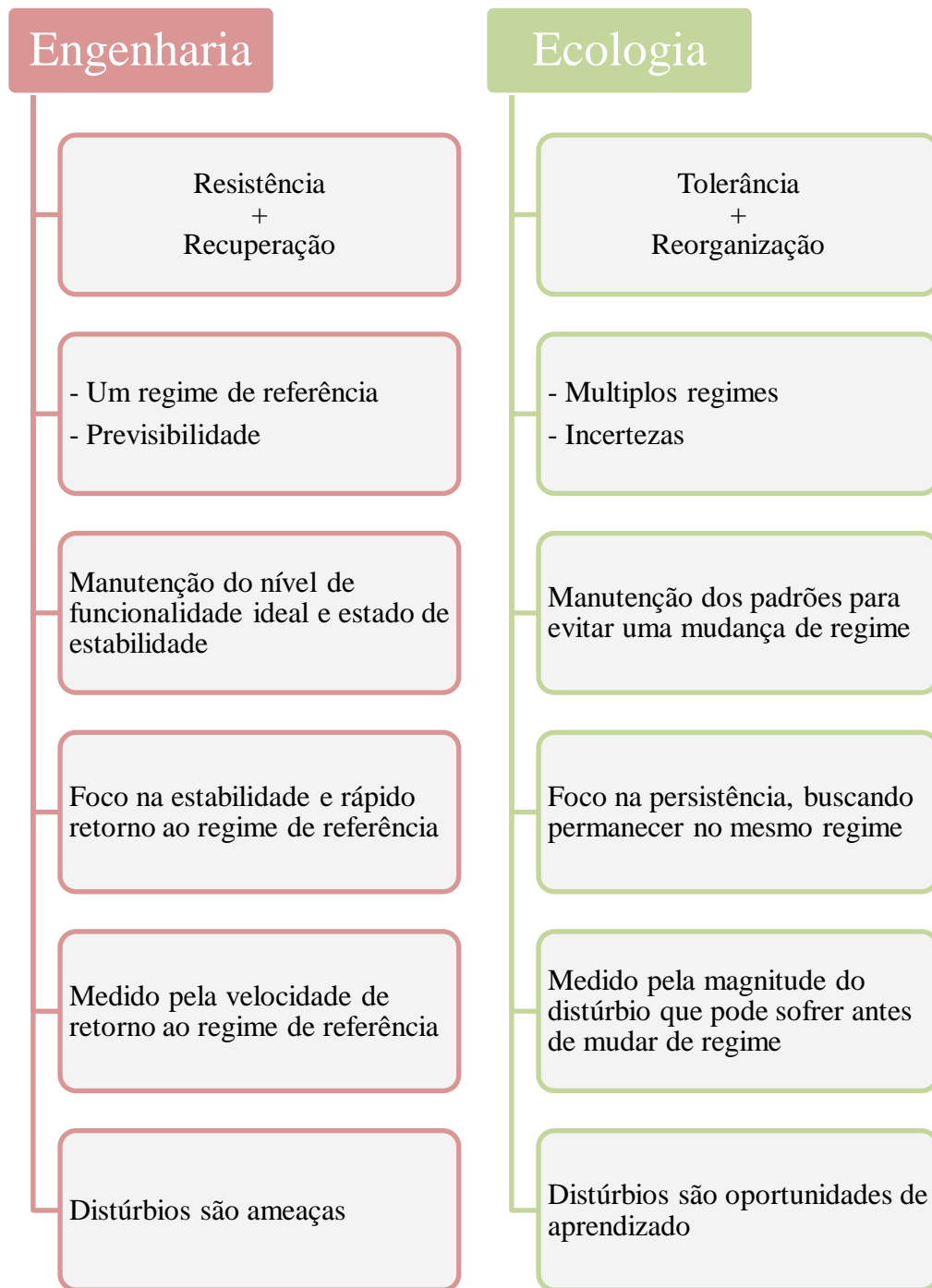
A Figura 2.21 apresenta um gráfico de um sistema colocado sobre estresse, mostrando o que seria a medida de resiliência, considerando o tempo de recuperação do funcionamento. Como  $t_1 < t_2$ , o sistema **A** apresenta uma maior resiliência que o sistema **B**.



**Figura 2.21 – Medida de resiliência, segundo tempo de recuperação (Adaptado de Liao, 2012)**

Na abordagem ambiental, a resiliência ecológica considera que os sistemas podem não apresentar um estado de equilíbrio único, mas assumem um equilíbrio dinâmico no qual a recuperação de um estresse pode levar o sistema a um outro estado de funcionamento, mas que garanta a sua sobrevivência (LIAO, 2012). Desta forma, a resiliência ecológica mede o grau de impacto que um sistema pode sofrer antes que necessite assumir um regime de funcionamento diferente (GUNDERSON e HOLLING, 2001). Nesta mesma publicação, D. Ludwig, em uma metáfora sobre *estabilidade* e *resiliência*, define o conceito de estabilidade como sendo a tendência de um sistema em regressar à sua posição de equilíbrio após um distúrbio, se aproximando muito com o conceito clássico de resiliência em engenharia.

Assim, pode-se perceber que muitas tentativas de trazer o conceito de resiliência para o planejamento do “controle das inundações” acaba por se limitar a uma busca pelo aumento da *estabilidade* dos sistemas de drenagem. Porém, nas planícies urbanizadas, sujeitas às inundações, as tendências socioeconômicas, o clima, o ambiente construído e os processos fluviais afetam a própria formação da inundação, em relações biunívocas, criando um padrão de desenvolvimento sem um estado de equilíbrio pré-definido. Desta forma, um planejamento baseado na busca por *estabilidade* se mostrará problemático quando confrontado com grandes escalas espaciais e temporais, nas quais os sistemas são inerentemente dinâmicos (CUMMING et al., 2005). Considerando, portanto, desastres relacionados aos processos de enchentes, o conceito de resiliência ecológica se mostra mais apropriado ao gerenciamento de riscos de inundação, uma vez que se apoia em um paradigma mais realista de multi-equilíbrio, focando pragmaticamente na *persistência* do sistema (LIAO, 2012). A Figura 2.22 apresenta as diferenças conceituais entre a abordagem da resiliência na engenharia e na ecologia, com base no regime de funcionamento de um dado sistema.



**Figura 2.22 – Abordagem conceitual da resiliência na engenharia e na ecologia (Adaptado de LIAO, 2012)**

Como as incertezas e a variabilidade são características inerentes aos sistemas fluviais, o foco em criar sistemas híbridos construído-natural mais resistentes ou simplesmente com a habilidade de se recuperar para as condições pré-desastre não aponta para a construção de cidades mais resilientes, uma vez que tais abordagens objetivam, no fim, a estabilidade do sistema, enquanto a resiliência deve ser um fim em si mesma (LIAO, 2012).

Quando consideramos um sistema urbano, dois elementos principais o descrevem: o ambiente construído e a população. Assim, para Batica (2015), a avaliação da resiliência de um sistema urbano deverá ser realizada a partir do conhecimento das características físicas da cidade e das características sociais de sua população. Este conjunto possibilitará a definição da vulnerabilidade do sistema, que poderá ser foco de atuação para aumento da resiliência. Considerando, ainda, um terceiro grupo de interesse, a resiliência pode ser definida particularmente para o meio socioambiental, que foca muito mais na capacidade adaptativa, de transformação e aprendizado inovativo (BATICA, 2015). A Tabela 2.3 apresenta uma breve diferenciação das abordagens da resiliência, segundo o sistema em análise.

**Tabela 2.3 – Abordagens da resiliência (Adaptado de BATICA, 2015)**

<b>Sistema</b>	<b>Característica</b>	<b>Foco</b>	<b>Contexto</b>
<b>Engenharia</b>	- Tempo de retorno; - Eficiência	- Recuperação - Estabilidade	Proximidade a um estado de equilíbrio.
<b>Ecossistêmica</b>	- Capacidade de absorção; - Suporte de choque; - Manutenção do funcionamento.	- Persistência - Robustez	Equilíbrio múltiplo, estabilidade das paisagens.
<b>Socioecológica</b>	- Interação entre distúrbio e reorganização; - Sustentação e desenvolvimento.	- Capacidade adaptativa; - Transformabilidade; - Aprendizado inovativo.	Resposta em sistema integrado, escalas cruzadas e interações dinâmicas.

Ao longo do desenvolvimento das cidades, o uso do solo foi adaptado para satisfazer as demandas da sociedade, sem haver uma preocupação com o ciclo hidrológico. Estas mudanças resultaram em sistemas altamente expostos e com baixa capacidade de absorção de impactos de grandes eventos. A busca pelo aumento da resistência como solução aos problemas das inundações tem se mostrado ineficiente em todo o mundo, até mesmo em países onde o gerenciamento do risco se mostra de certa forma avançado.

O quadro atual de contínuo aumento dos prejuízos causados por eventos de inundação exige uma nova mudança de paradigma na gestão das inundações urbanas, a qual deverá incentivar o reconhecimento das incertezas, incorporando a variabilidade ambiental no próprio processo de planejamento da cidade, de forma a possibilitar o contínuo aprendizado e progresso no tratamento das inundações. O esquema apresentado na Figura 2.23



ilustra essa configuração do atual paradigma do controle das enchentes e sugere uma alternativa de mudança, incorporando a abordagem da resiliência.



**Figura 2.23 – Mudanç a de paradigma do controle de inundações para a resiliência.**

Male (2009) define as infraestruturas resilientes como “os sistemas que serão capazes de sobreviver e fornecer bons serviç os em um futuro cada vez mais incerto”. Assim, a resiliência se apresenta como uma importante abordagem para um melhor entendimento da vulnerabilidade de um sistema, associada às consequências resultantes da exposição a um perigo.

Segundo Berkes (2007), a discussão da resiliência possui três importantes razões para o gerenciamento de riscos:

1. Permite uma avaliação holística de potenciais perigos em sistemas antrópico-naturais.
2. Enfatiza a habilidade do sistema em lidar com o perigo, absorvendo ou se adaptando ao distúrbio.
3. É uma abordagem prospectiva, voltada para o futuro, e ajuda a explorar opções estratégicas para lidar com a incerteza e possíveis mudanças futuras.

É importante diferenciar os conceitos de resiliência e de resistência às inundações, para que haja de fato uma mudança no foco de atuação do planejamento da cidade, com vistas à gestão das águas pluviais. CIRIA (2010) apresenta tais conceitos da seguinte forma:

- ✓ **Resiliência às inundações:** capacidade de um sistema, quando colocado em contato com um evento de inundação, em não sofrer danos, manter sua integridade estrutural e, onde houver interrupção da prestação do serviço, regressar à operação normal rapidamente, após recessão da enchente.
- ✓ **Resistência às inundações:** capacidade de um sistema, durante um evento de cheia, não sofrer inundação e manter sua operação normal continuamente, sem interrupção dos serviços essenciais a que se destina.

De forma muito similar, Liao (2012) define a resiliência urbana às inundações como a capacidade da cidade tolerar eventos de inundação e se reorganizar caso ocorram ruptura socioeconômica e danos físicos, assim como prevenir a perda de vidas e prejuízos e manter a sua identidade socioecômica. Esse autor apresenta algumas definições de resiliência baseadas na abordagem da engenharia encontradas na literatura, as quais podem ser vistas no Quadro 2.1, juntas a outras definições encontradas na literatura científica.

A teoria da resiliência sugere uma mudança de paradigma no gerenciamento das inundações, que deve focar na busca por resiliência em detrimento da simples manutenção da *estabilidade*, esta última feita por meio da implantação de medidas estruturais de controle de enchentes. Como as inundações passam a ser vistas como parte inerente da dinâmica urbana, a resiliência não pode ser encarada como uma resistência à inundação ou uma

recuperação para a situação pré-desastre, pois esses processos são meios para alcançar a *estabilidade* do sistema. Sendo a resiliência uma tendência para a sobrevivência, portanto, como já citado anteriormente, deve assumir uma concepção de um fim em si mesma (LIAO, 2012). Ou seja, a busca por resiliência no sistema urbano passa pela adoção de um processo contínuo e retro-alimentado, agregando valores de adaptação e harmonização.

**Quadro 2.1 – Definições do conceito de resiliência com viés da engenharia.**

<p>Comunidades sustentáveis e resilientes são definidas como sociedades estruturalmente organizadas para minimizar os efeitos de desastres e, ao mesmo tempo, possui a habilidade de se recuperar rapidamente, restaurando a vitalidade socioeconômica da comunidade.</p> <p style="text-align: right;">Tobin (1999)</p>
<p>Resiliência é a capacidade de prevenção ou mitigação de perdas e, caso o dano venha a ocorrer, manter as condições normais de vida o quanto possível e gerenciar a recuperação dos impactos sofridos.</p> <p style="text-align: right;">Buckle et al. (2000)</p>
<p>Cidades resilientes são capazes de resistir a impactos severos sem incorrer em uma situação de caos imediato ou sofrer danos permanentes e de se recuperar do impacto de desastres naturais.</p> <p style="text-align: right;">Godschalk (2003)</p>
<p>Resiliência é definido como a capacidade de um sistema em absorver uma perturbação e se reorganizar enquanto sofre modificações que permitam manter essencialmente o mesmo funcionamento, estrutura, identidade e respostas do sistema original.</p> <p style="text-align: right;">Walker <i>et al.</i> (2004)</p>
<p>Um ambiente construído resiliente deve ser concebido, locado, construído, operado e mantido de forma a maximizar a habilidade dos ativos construídos, dos sistemas de suporte (físicos e institucionais) e das pessoas que residem e trabalham nesse ambiente de resistir, se recuperar e mitigar os impactos de desastres extremos naturais ou induzidos pelos humanos.</p> <p style="text-align: right;">Bosher (2008)</p>
<p>A noção de resiliência engloba o planejamento pré-desastre e sistemas de alerta, procedimentos de emergência e reconstrução pós-desastre. Resiliência urbana engloba a ideia que cidades devem ser capazes de se recuperar rapidamente de desastres de maiores e menores magnitudes.</p> <p style="text-align: right;">Lamond and Proverbs (2009)</p>
<p>Resiliência representa a capacidade de um sistema, comunidade ou sociedade, exposta a riscos, em resistir, absorver, acomodar, se adaptar, transformar e se recuperar dos efeitos de um perigo em tempo útil e eficiente, inclusive através da preservação e restauração de suas estruturas e funções básicas essenciais, por meio do gerenciamento de riscos.</p> <p style="text-align: right;">UNISDR (2009)</p>

Três fatores podem ser considerados como pilares da sustentação de um sistema resiliente: *auto-organização*; *capacidade adaptativa*; e *redundância*. Quando esses conceitos são inseridos em uma abordagem de resiliência às inundações, podem ser descritos como:

- Auto-organização → capacidade de resposta local às inundações
- Capacidade adaptativa → ajustes em tempo hábil após cada inundação
- Redundância → redundância nos subsistemas, em todos os níveis

Assim, não é apenas a capacidade de conseguir ser persistente e robusto frente ao distúrbio que definirá um sistema como resiliente. A ocorrência de um distúrbio traz, além do impacto em si, uma oportunidade de recombinação de suas estruturas, de renovação, de criação de novas trajetórias (BATICA, 2015), ou seja, de adaptação a um novo funcionamento, o qual poderá responder de forma mais apropriada a distúrbios futuros. A abordagem sobre resiliência de sistemas urbanos às inundações que apoia a discussão deste trabalho se ampara em uma visão mais ampla, que incorpora aspectos da resiliência socioecológica, considerando a capacidade de absorção dos impactos das cheias com variabilidade anual. Para isso, a resiliência é avaliada a partir de uma integral, ao longo do tempo, dos riscos associados a diferentes probabilidades de ocorrência de eventos de cheias.

Porém, a avaliação se limita aos aspectos da infraestrutura urbana, abrangendo diretamente o sistema de drenagem pluvial e indiretamente os demais equipamentos urbanos e os sistemas habitacional e socioeconômico. O objetivo desta avaliação é fornecer uma fonte comparativa entre diversas possibilidades de atuação na bacia para mitigação dos riscos de inundação, a partir de uma abordagem sobre o aumento da resiliência do sistema, invertendo a lógica clássica do gerenciamento de riscos. Como resultado, chega-se a uma ferramenta de apoio a tomada de decisões capaz de fornecer, além de uma avaliação multicritério, uma visão espacializada dos efeitos das medidas e ações previstas ao processo de planejamento do território. Essa lógica de avaliação possibilita a internalização do conceito de cidades sensíveis à água ao processo de concepção do sistema urbano, uma vez que prioriza o aumento da resiliência, a qual, conceitualmente, se baseia na adaptabilidade do sistema com fins à harmonização da cidade com o ciclo das águas.

Ao longo do próximo capítulo, é apresentada a metodologia de construção desta ferramenta e sua forma de aplicação a um estudo de caso.

### 3 Estrutura metodológica para avaliação da resiliência

A abordagem clássica para escolha dos investimentos em medidas de redução dos riscos associados às inundações, como visto na discussão da literatura, apresentada no Capítulo 2, prioriza estruturas que afastam o perigo das áreas ocupadas, em detrimento de um planejamento de ações para harmonização da convivência entre as cidades e o ciclo das cheias. Essa estratégia não considera o risco residual e induz a uma falsa percepção do risco, levando a sociedade a se expor ainda mais aos danos potenciais de um evento extremo de inundação.

Medidas clássicas de aumento da capacidade hidráulica da rede de drenagem vem sendo substituídas por medidas que priorizam a infiltração e detenção dos escoamentos superficiais excedentes de chuvas intensas. Porém, a lógica ainda adota uma concepção de **controle** das enchentes, introduzindo grandes obras concentradas que buscam compensar os efeitos negativos da urbanização, esta que tende a impermeabilizar a superfície da bacia, aumentando a parcela de escoamento superficial do ciclo hidrológico. Em uma avaliação direta, considerando aspectos quantitativos de volume, tais medidas são capazes de contrapor a perda de capacidade de amortecimento natural da bacia.

Contudo, o sistema, muitas vezes, não passa por uma avaliação integrada, o que não permite observar o real funcionamento da bacia após a implantação dessas grandes estruturas, as quais, por se localizarem de forma concentrada, ainda dependem muito de uma rede de drenagem eficiente, com alta capacidade de condução hidráulica, deixando algumas áreas ainda expostas aos impactos negativos da aceleração dos escoamentos. Em alguns casos, a rede não recebe investimentos de melhoria e condicionamento, os quais são limitados pelo vultuoso custo de implantação de grandes reservatórios, resultando em um sistema ineficiente, no qual a água da chuva não alcança os locais de armazenamento, deixando a bacia vulnerável a alagamentos frequentes e desacreditando a população das soluções técnicas para controle das inundações.

A presente pesquisa introduz um método de avaliação de risco de inundações, aplicado a bacias urbanas, a partir de uma abordagem sobre a resiliência do sistema urbano, em uma inversão da lógica do gerenciamento de risco. Isto é realizado com uma concepção de busca por aumento da resiliência, em detrimento da redução do risco, que passa a ser uma consequência das ações propostas. Tal inversão permite a criação de uma abordagem mais

positivista à gestão urbana, que ganha metas e objetivos com finalidade de melhoria na relação *água de chuva – cidade*.

Em uma concepção tradicional da redução de risco, a decisão sobre as medidas e ações necessárias passam por uma tentativa de controle das enchentes, favorecendo a escolha por medidas estruturais de grande impacto. Quando há a inversão desta lógica, em uma busca pelo aumento da resiliência urbana, as soluções mais adequadas já se apresentam em uma forma distribuída, de baixo impacto e apoiadas na harmonização da convivência da cidade com as inundações.

Para elaborar uma estratégia de avaliação que considere aspectos da abordagem sobre a resiliência urbana às inundações, é aplicada uma metodologia baseada em mapeamento de inundações com uso de ferramenta de modelagem matemática, avaliação do risco com uso de análise multicritério e medição da resiliência de forma espacial considerando a ocorrência de multieventos.

Neste capítulo, são apresentadas as etapas metodológicas aplicadas ao desenvolvimento da pesquisa, iniciando pela construção de um modelo matemático capaz de representar os processos de escoamento das cheias em planícies urbanas complexas, até a aplicação de um índice de resiliência a cenários com distintos sistemas de macrodrenagem. Os cenários definidos para simulação das cheias buscam representar uma bacia com uma situação crítica do ponto de vista das inundações, sem medidas de controle e após a implantação de duas diferentes concepções de medidas de armazenamento da água de chuva excedente, uma de forma mais concentrada e outra distribuída na bacia.

### **3.1 Sistema de modelagem matemática**

Para a modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia hidrográfica de interesse é utilizado o Modelo de Células de Escoamento (MODCEL)<sup>4</sup>, capaz de simular diferentes cenários hidrológicos e hidráulicos. A seguir apresenta-se uma descrição sucinta da ferramenta baseada em Miguez (2001). Informações mais detalhadas podem ser encontradas

---

<sup>4</sup> MODCEL - Modelo de Células de Escoamento para Cálculo de Cheias Urbanas em Planícies de Inundação – (MIGUEZ, 2001; MASCARENHAS e MIGUEZ, 1994 e 2002; MASCARENHAS et al 2005)

em: Mascarenhas e Miguez (1994); Mascarenhas e Miguez (1998); Miguez e Mascarenhas (1999); Mascarenhas *et al.* (2000); Miguez (2003); Mascarenhas e Miguez (2002); COPPETEC (2003); Mascarenhas *et al.* (2005).

O MODCEL pode ser descrito como:

um modelo de células urbanas, que integra processos hidrológicos, observado em cada célula, a um modelo hidrodinâmico em *loop*, em uma representação espacial que interliga fluxo superficial, em canais e em galerias subterrâneas. Por exemplo, ruas podem agir como canais, calçadas como vertedores, edificações, estacionamentos e quarteirões podem funcionar como reservatórios de acumulação. (MIGUEZ, 2009)

O MODCEL é aplicado para modelagem hidrodinâmica de bacias sujeitas a enchentes. Esse modelo parte do princípio que a bacia pode ser representada por compartimentos interligados, formando uma rede bidimensional. Esses compartimentos são chamados de células de escoamento; assim, a bacia é subdividida em diferentes células interligadas entre si e o escoamento entre as células é calculado por equações hidráulicas unidimensionais definidas de acordo com o padrão topográfico e de urbanização da região, através de relações hidráulicas unidimensionais, *id est*, equações de vertedor, de orifício, de Saint-Venant, e outras.

A representação da natureza pode ser feita através de células isoladas ou formando um conjunto, a fim de representar a complexidade dos possíveis caminhos das águas em uma inundação. Um conjunto resumido de tipos de células pode eventualmente já fornece grande capacidade de representação, ao se pensar em suas possíveis associações. Porém, a definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, pode fazer grande diferença na tentativa de reproduzir a multiplicidade dos padrões de escoamento de um cenário urbano. Segundo Miguez (2001), as hipóteses de aplicação do modelo de células em bacias urbanas são:

1. A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento.
2. Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula é diretamente relacionado com o nível d'água no centro da célula.

3. Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior.
4. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas como, por exemplo, a Equação Dinâmica de Saint-Venant.
5. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
6. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
7. O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria.

O modelo de células de escoamento possui o seguinte conjunto tipo de células pré-definido:

- ✓ **de rio, ou canal**, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta;
- ✓ **de galeria**, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- ✓ **de planície**, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas;
- ✓ **de reservatório**, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluente.

A variação do volume d'água em uma célula  $i$ , em um intervalo de tempo  $t$ , é dada pelo balanço de massa nesta célula. Assim, em termos diferenciais, tem-se a equação da continuidade representada pela expressão (3.1).



$$A_{S_i} \cdot \frac{dZ}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (3.1)$$

- Onde: Q = vazão entre as células i e k, vizinhas entre si;  
 Z = cota do nível d'água no centro da célula i;  
 A = área superficial do espelho d'água na célula i;  
 P = vazão da parcela de chuva sobre a célula i disponível para escoamento;  
 t = variável independente relativa ao tempo.

As ligações são definidas pelo modelador de acordo com as características observadas pela análise topográfica e urbanística da região a ser modelada. Para representar os possíveis escoamentos na bacia durante um evento de inundação, o modelo de células dispõe dos seguintes tipos de ligações:

- ✓ Ligação Tipo-Rio
- ✓ Ligação Tipo-Planície
- ✓ Ligação Tipo-Transição Canal/Galeria (entrada e saída de galerias)
- ✓ Ligação Tipo-Galeria sob Pressão
- ✓ Ligação Tipo-Vertedouro
- ✓ Ligação Tipo-Orifício
- ✓ Ligação Tipo-Descarga de Galeria em Rios ou Canais Principais
- ✓ Ligação Tipo-Bueiros
- ✓ Ligação Tipo-Equação *cotaXdescarga* (estruturas especiais calibradas em modelo reduzido)
- ✓ Ligação Tipo-Bombeamento
- ✓ Ligação Tipo-Comporta FLAP

O processo de modelagem por células de escoamento inicia-se pela análise da região através de levantamentos e plantas topográficos, aerofotogrametrias, imagens de satélite e

visitas de campo, entre outras fontes de informações disponíveis. Com isso, faz-se a divisão da bacia em células de acordo com o padrão urbano e topográfico da área. Após essa divisão é necessário construir um esquema topológico que integra a rede de células, mostrando as suas interações com as células vizinhas e com as condições de contorno, localizadas nas fronteiras da área modelada. O esquema topológico apresenta a articulação das células e as possíveis interações entre elas, podendo cada célula possuir ligações com outras células de seu próprio grupo, de um grupo anterior ou posterior. A montagem desse esquema faz parte da entrada de dados para permitir a solução numérica do modelo. Na Figura 3.1 são apresentadas as etapas da modelagem hipotética de uma área, desde a topografia até a divisão por grupos.

A esta etapa segue-se a confecção dos arquivos de entrada necessários, que compreendem os dados e parâmetros de cada célula da divisão, suas ligações e as condições de contorno necessárias para a modelagem, assim como a chuva de projeto ou um evento medido.

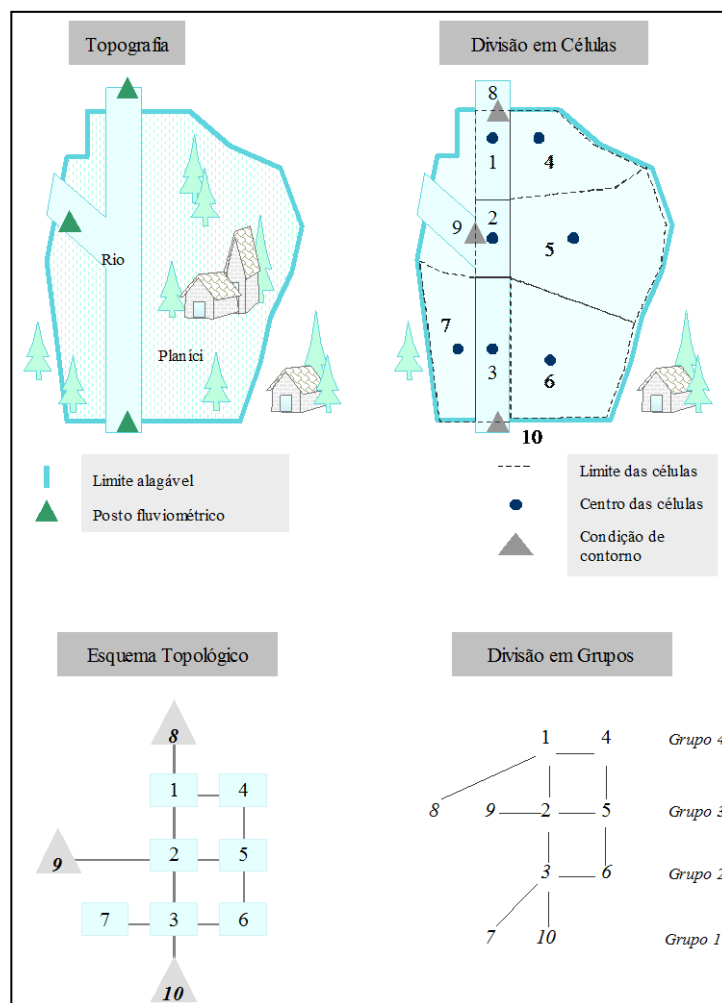


Figura 3.1 – Etapas de modelagem de uma região hipotética (MIGUEZ, 2001)

## **3.2 Elaboração de um Índice de Resiliência às Inundações**

A complexidade dos processos envolvidos no gerenciamento de risco e a necessidade de haver uma forma de avaliação comparativa entre cenários distintos demandam uma metodologia de avaliação para um diagnóstico urbano que compreenda aspectos do risco de inundações. Batica (2015) sugere que uma abordagem baseada em indicadores pode fornecer uma visão compreensiva acerca da vulnerabilidade e resiliência de uma cidade ou comunidade. Neste item, são apresentados dois estudos pregressos com uso de indicadores que inspiraram parte do desenvolvimento da metodologia proposta nesta pesquisa e o próprio índice de resiliência elaborado.

### **3.2.1 Índice de Risco de Cheia**

A avaliação da eficiência de projetos de controle de inundações pode ser realizada de diversas maneiras, sendo mais utilizado a análise custo-benefício. Com essa metodologia, é realizada uma estimativa orçamentária para um dado projeto, comparando esse valor com os benefícios advindos de sua implantação, que, por sua vez, representa de forma indireta o valor dos bens protegidos pela estrutura. Em outras palavras, o benefício de uma obra para controle de inundações será igual ao prejuízo potencial de uma cheia, caso ocorresse sem a obra, menos o custo de implantação das medidas de proteção.

Porém, como visto nos itens anteriores, nenhum projeto eliminará por completo as chances de ocorrência de um evento de inundação, havendo permanentemente um *risco residual* associado ao projeto.

Outra abordagem para tomada de decisões no campo do manejo das águas pluviais, principalmente no que tange o controle de inundações, é feita através do gerenciamento de riscos, que deve incorporar a análise custo-benefício, de forma mais sofisticada, internalizando prejuízos potenciais adversos, em caso de falhas do sistema. Portanto, é necessário haver uma metodologia uniforme para quantificação e mensuração do risco de inundações associado ao projeto proposto, que subsidiará a tomada de decisões sobre quais intervenções serão mais apropriadas para uma determinada bacia. Geralmente, são empregados índices para mensurar riscos.

Zonensein (2007) ressalta que para a construção de um índice aplicável, algumas observações devem ser consideradas, como o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e a possibilidade de espacialização do índice de risco de cheia (IRC):

Algumas restrições para a elaboração do índice envolvem a utilização de informações facilmente disponíveis e cálculos simples, tendo como consequência baixo custo de aplicação e maior aceitabilidade. Também é desejável que os resultados sejam apresentados de maneira inteligível, facilitando sua compreensão inclusive pelo público não especializado. Neste sentido, o uso de um SIG é bastante conveniente, dado que o índice será composto de variáveis relacionadas geograficamente, isto é, associadas a um ponto no espaço. Isso também vale para o resultado final, que pode ser representado através de um mapa de risco, que expõe a distribuição espacial do IRC. (ZONSEIN, 2007)

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foi realizada uma abordagem baseada no Índice de Risco de Cheia (IRC) elaborado por Zonensein (2007), que destaca que:

A formulação de um índice é dada pela equação matemática que traduz as relações entre os indicadores que o compõe. Ela resulta em uma estimativa quantitativa sobre o aspecto que se deseja medir. No caso do risco de inundação, portanto, a formulação deve ser reflexo da interação entre probabilidade de ocorrência de um evento perigoso – a chuva – e suas consequências estimadas.

A metodologia de aplicação do IRC é apresentada resumidamente nesse item.

O IRC é composto por dois sub-índices, que representam as propriedades da inundação:

- ✓ PI → probabilidade de ocorrência específica
- ✓ C → consequências

O produto ponderado desses sub-índices resulta no risco. Para diferenciar o efeito final no risco calculado, é associado um peso para cada um dos sub-índices ( $q_{pi}$  e  $q_c$ , respectivamente). Desta forma, o IRC será calculado pela equação (3.11).

$$IRC = PI^{q_{pi}} \cdot C^{q_c} \quad (3.2)$$

Onde: IRC → Índice de Risco de Cheia variável entre 0 (menor risco) e 100 (maior risco);

PI → sub-índice variável entre 0 e 100, relativo às propriedades da inundação para uma chuva de tempo de recorrência determinado;

C → sub-índice relativo às consequências da cheia, variável entre 0 e 100;

$q_{pi}$ ,  $q_c$  → pesos correspondentes às propriedades da inundação e às consequências, respectivamente, atribuídos em função da importância do sub-índice para o risco final. Para que a escala de variabilidade seja respeitada, os pesos devem obedecer as restrições apresentadas nas equações (3.3) e (3.4).

$$0 \leq q_{pi} ; q_c \leq 1,0 \quad (3.3)$$

$$q_{pi} + q_c \leq 1,0 \quad (3.4)$$

Por sua vez, cada sub-índice é composto por um somatório ponderado de indicadores, previamente normalizados, entre 0 e 100, conforme as equações (3.5) e (3.6).

$$PI = \sum_{i=1}^n I_i^{PI} \cdot p_i^{PI} \quad (3.5)$$

$$C = \sum_{j=1}^m I_j^C \cdot p_j^C \quad (3.6)$$

$I_i^{PI}$  → i-ésimo indicador, previamente normalizado, que compõe o sub-índice PI, variável entre 0 e 100

$I_j^C$  → j-ésimo indicador, previamente normalizado, que compõe o sub-índice C, variável entre 0 e 100

$n$  → número total de indicadores que compõe o sub-índice PI

$m$  → número total de indicadores que compõe o sub-índice C

$p_i^{PI}; p_j^C$  → pesos associados ao i-ésimo indicador do sub-índice PI e ao j-ésimo indicador do sub-índice C, respectivamente, atribuído em função de suas importâncias relativas. Devem atender às restrições das equações (3.7), (3.8) e (3.9).

$$0 \leq p_i^{PI}; p_j^C \leq 1,0 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i^{PI} = 1,0 \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^m p_j^C = 1,0 \quad (3.9)$$

Desta forma, a formulação geral para estimativa do IRC será dada pela equação (3.10).

$$\text{IRC} = \left( \sum_{i=1}^n I_i^{PI} \cdot p_i^{PI} \right)^{q_{pi}} \cdot \left( \sum_{j=1}^m I_j^C \cdot p_j^C \right)^{q_c} \quad (3.10)$$

Para aplicação do IRC, devem ser definidos indicadores representativos de fatores que causam ou potencializam os danos decorrentes das inundações. Os indicadores relativos às características da inundação estão relacionados às causas dos danos e à sua probabilidade de ocorrência, considerados no subíndice *Propriedades de Inundação* (PI). Já os indicadores que afetam a vulnerabilidade e a exposição são agrupados no sub-índice *Consequências* (C).

A seguir são apresentados os indicadores propostos por Zonensein (2007) para estimativa do Índice de Risco de Cheias (IRC).

✓ **Subíndice Propriedades da Inundação (PI)**

- $(I_{COT}^{PI})$  → COTA
- $(I_{FV}^{PI})$  → FATOR DE VELOCIDADE
- $(I_{FP}^{PI})$  → FATOR DE PERMANÊNCIA

✓ **Subíndice Consequências (C)**

- $(I_{DD}^C)$  → DENSIDADE DE DOMICÍLIOS
- $(I_R^C)$  → RENDA
- $(I_T^C)$  → TRÁFEGO
- $(I_{SI}^C)$  → SANEAMENTO INADEQUADO

### 3.2.2 Escala de Resiliência

A resiliência associada a um determinado plano de manejo de águas pluviais, a partir das medidas estruturais propostas para mitigação das inundações, pode ser definida como a capacidade do sistema de drenagem manter sua eficiência ao longo do tempo, sujeito às diversas incertezas ambientais em potencial, como aumento de áreas impermeáveis na

bacia devido à expansão da urbanização ou a alteração no regime de chuvas provocado por um quadro pessimista sobre as mudanças climáticas.

Dessa forma, é necessário sistematizar uma metodologia para mensuração da resiliência do conjunto de medidas propostos em um plano de manejo de águas pluviais, de forma a subsidiar o processo de tomada de decisão, fornecendo uma importante informação para comparar diferentes configurações de projeto.

Veról (2013) apresenta uma metodologia para mensurar a resiliência de projetos de controle de inundações, comparando o índice de risco de cheias (IRC) em duas situações de urbanização, uma atual e uma futura, considerando a saturação urbana da bacia. O resultado dessa comparação permite avaliar o quanto em eficiência um dado projeto perderá dentro de um período de tempo, considerando o crescimento da cidade até o seu limite de saturação.

Esse processo de mensuração foi denominado de “Escala de Resiliência”, a qual será estimada pela aplicação equação (3.11).

$$ER = P1 \cdot P2 \quad (3.11)$$

Com:  $ER$  = escala de resiliência, com valor entre 0 e 1

$P1$  = parcela 1, mede perda de eficiência da solução em uma situação futura

$P2$  = parcela 2, mede a eficiência da solução na situação futura

A parcela 1 ( $P1$ ) é calculada a partir da subtração do valor 1, ou seja, o valor de 100% de eficiência mantida, da parcela do IRC de projeto na situação futura menos o IRC de projeto na situação presente, dividido pelo IRC na situação presente. A equação (3.12) apresenta as componentes de  $P1$ .

$$P1 = 1 - \frac{(IRC_{Projeto}^{Futuro} - IRC_{Projeto}^{Presente})}{IRC_{Projeto}^{Presente}} \quad (3.12)$$

A parcela 2 ( $P2$ ) representa a redução hipotética do IRC, considerando um futuro *sem* e *com* implantação do projeto proposto, e é calculada pela relação entre o IRC sem projeto menos o IRC com projeto, ambos na situação futura, pelo IRC sem projeto na situação futura, de acordo com aplicação da equação (3.13).

$$P2 = \frac{IRC_{Sem\ Projeto}^{Futuro} - IRC_{Projeto}^{Futuro}}{IRC_{Sem\ Projeto}^{Futuro}} \quad (3.13)$$

O valor obtido para o projeto na *Escala de Resiliência* será mais resiliente quanto mais próximo de 1 for o resultado.

A metodologia apresentada por Veról (2013) fornece um valor representativo da resiliência para toda a bacia, não possibilitando uma visão espacial do efeito da implantação das medidas propostas. Assim, a aplicação deste método é adaptada e desenvolvida para avaliar de forma espacializada a resiliência de duas concepções de projetos de controle de inundações, baseado na distribuição espacial das intervenções.

### 3.2.3 Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES

O conceito de Risco possui uma variedade de definições, dependendo da área disciplinar a que se aplica. Pode ser entendido como a combinação da possibilidade de um determinado evento com o impacto que o mesmo poderia causar, caso se materializasse. Portanto, o risco possui dois componentes: a possibilidade (ou probabilidade) de um evento ocorrer e o impacto (ou consequência), associado à ocorrência desse evento (SAYERS et al, 2013).

O primeiro componente depende da fonte do risco, como exemplo as precipitações intensas e o processo de transformação dessas chuvas em vazões (e alagamentos). Já o segundo reflete a vulnerabilidade da população local exposta à inundação, sendo mais bem entendida através da consideração de três aspectos. (JHA et al, 2013). O primeiro aspecto é a *Exposição*, que representa a presença de bens e pessoas na área afetada, o segundo é a *Susceptibilidade*, em que a população e os objetos expostos são danificados durante um evento de cheia; o terceiro é o *Valor*, onde há a quantificação dos impactos monetários potenciais. Por fim, no sentido contrário à materialização do risco, surge o conceito da *Resiliência*, que será abordada adiante, e consiste na habilidade de absorver impactos e se recuperar de inesperados acontecimentos associados a desastres naturais (ver item 2.2.5, pág. 55).

A elevação da resiliência pode ser alcançada por meio de intervenções urbanísticas que considerem e respondam aos riscos ocasionados pelas cheias, minimizando-os. A construção de cidades mais resilientes às inundações pode ser feita a partir de técnicas que



racionalizam a relação da água com as edificações e com o espaço urbano. Desta forma, a resiliência terá relação com a adoção de medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais abordam obras de drenagem urbana, utilizando medidas de controle do escoamento nos lotes, paisagens multifuncionais e corredores verdes, por exemplo.

Além disso, os rios urbanos, como receptores das águas urbanas, também devem ser tratados de forma a resgatar sua relação com planícies de inundação e sua integração como o espaço urbano, incrementando suas qualidades ambientais, reinserindo o rio na paisagem e aproximando seu funcionamento de um comportamento mais natural. Já as medidas não estruturais se fundamentam na capacidade de harmonização de uma cidade com os eventos de cheia, como, por exemplo, a destinação de áreas para abrigo da população com potencial de ter suas casas alagadas e danificadas (SAMUELS e GOULDBY, 2009).

Pensando nisso, é proposta a criação de um índice para subsidiar o planejamento e projetos de soluções de drenagem urbana, adotando uma metodologia que parte do conceito de Risco e consolida um Índice de Resiliência (IRES), que representará o processo oposto. O IRES, inicialmente apresentado em Tebaldi *et al* (2015) e Bertilsson e Wiklund (2015), conjuga três subíndices, referentes a:

- Risco à capacidade de resistência do sistema
- Risco à capacidade de recuperação do sistema
- Risco à manutenção do funcionamento do sistema

Cada subíndice considera, em sua composição, indicadores relacionados ao perigo, abrangendo as profundidades máximas de alagamento, as velocidades de escoamento da água sobre as superfícies e o tempo de permanência da inundação.

Índices são instrumentos que agregam informações associadas a indicadores de distintas naturezas e significâncias, relacionando-os em um único valor representativo de uma situação real. Assim, é possível realizar comparações no espaço e no tempo, tornando-se uma ferramenta essencial de suporte à decisão de projeto (ZONENSEIN, 2007). Adicionalmente, indicadores apontam um nível ou estado e são capazes de estimar quantitativamente sua condição (social, econômica, física), com o objetivo de representar o sistema completo (PRATT *et al.*, 2004).

As propriedades de um índice (domínio, formulação e escala) influenciam fortemente na escolha dos indicadores (VERÓL, 2013). O IRES é um índice quantitativo multicritério que varia de 0 a 1, levando à necessidade de normalização e conversão a uma escala comum dos seus indicadores. O índice foi assim pensado para que, mesmo com a possibilidade de tais indicadores terem naturezas e unidade distintas, possam ser utilizados em comparação de situações complexas, segundo a sua formulação. Sua metodologia se baseia no conceito de minimização do risco, combinando seus componentes básicas de *perigo* e *vulnerabilidade*, consideradas no sentido contrário de sua materialização. Cada um dos três subíndices da formulação geral do IRES é construído a partir de indicadores de *exposição*, *vulnerabilidade* e *perigo*, distribuídos em três grupos de subíndices, os quais representam a capacidade de resistência do sistema, a capacidade de recuperação material após ocorrência do evento e a capacidade manter seu funcionamento durante a inundação, como demonstrado no organograma da Figura 3.2.

Cada componente do IRES é apresentada ao longo do texto.

- ➔  $Si_R$  - Subíndice de Risco à Capacidade de Resistência
  - $I_e$  - Indicador de Exposição de Edificações
  - $I_{ei}$  - Indicador de Exposição de Infraestrutura Urbana
  - $I_H$  - Indicador de Profundidade de Alagamento
- ➔  $Si_C$  - Subíndice de Risco à Capacidade de Recuperação Material
  - $I_{vr}$  - Indicador de Valor Relativo
    - $I_S$  - Indicador de Susceptibilidade das Edificações
  - $I_{vs}$  - Indicador de Vulnerabilidade Social
    - $I_{pv}$  - Indicador de Pessoas Vulneráveis
    - $I_{FV}$  - Indicador de Fator de Velocidade
- ➔  $Si_F$  - Subíndice de Risco à Manutenção do Funcionamento
  - $I_{RM}$  - Indicador de Risco à Mobilidade
    - $I_{hv}$  - Indicador de Hierarquia Viária
    - $I_{nat}$  - Indicador de Não Atendimento por Transportes sobre Trilhos
    - $I_{FP}$  - Indicador de Fator de Permanência
  - $I_{da}$  - Indicador de Dificuldade de Acesso de Ajuda

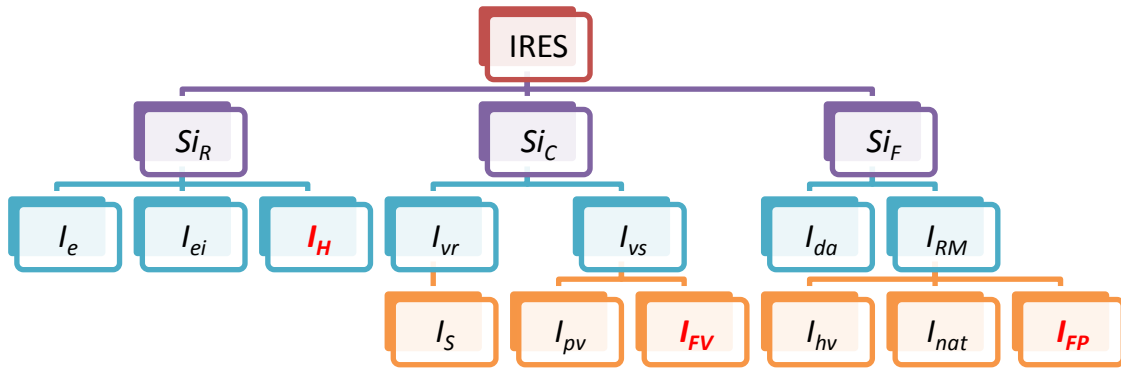


Figura 3.2 – Composição Geral do IRES

A seguir, é apresentada a formulação geral do IRES, equação (3.15), de seus subíndices e indicadores.

### Apresentação da formulação geral do IRES

$$IRES = a \cdot (1 - Si_R) + b \cdot (1 - Si_C) + c \cdot (1 - Si_F) \quad (3.14)$$

Os subíndices do IRES ( $Si_R$ ;  $Si_C$ ;  $Si_F$ ) representam parcelas de risco relacionadas a três *fatores de influência* para garantia da resiliência às inundações do sistema urbano: risco à capacidade de resistência; risco à capacidade de recuperação material; risco à manutenção do funcionamento; respectivamente. Como tais parcelas são construídas a partir da abordagem de avaliação de risco, a formulação geral do IRES computa o complemento do subíndice para o valor unitário, considerando a resiliência como um conceito que se manifesta no sentido inverso ao risco, ou seja, quanto maior a resiliência, menor o risco.

### Subíndice de Risco à Capacidade de Resistência - $Si_R$

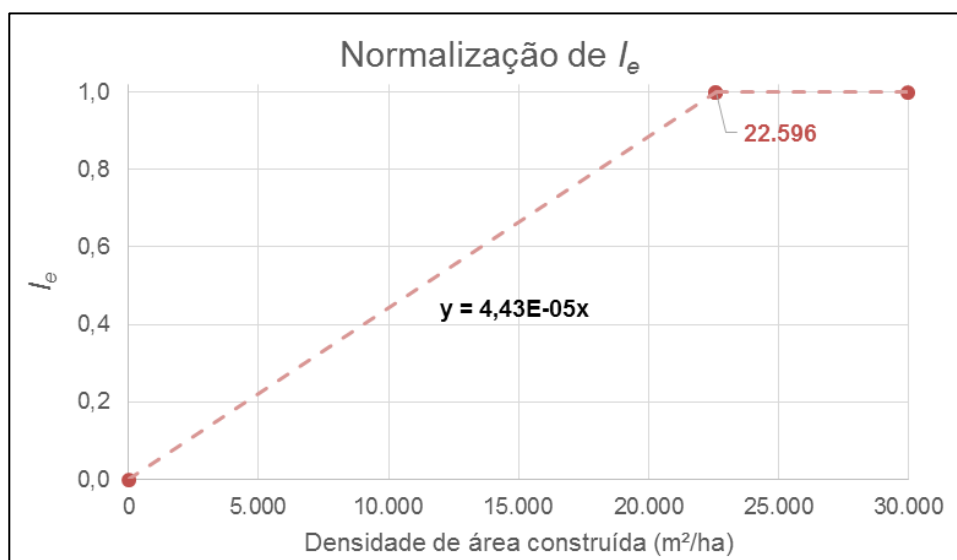
Representa a resistência ao dano, conforme o grau de exposição da população e dos bens existentes na bacia, relacionando a exposição de edificações e de infraestrutura urbana aos prejuízos potenciais de uma dada inundação. São utilizados três indicadores em sua formulação: exposição de edificações ( $I_e$ ); exposição da infraestrutura urbana ( $I_{ei}$ ); e profundidade de alagamento ( $I_H$ ). É calculado segundo a equação (3.15).

$$Si_R = [a \cdot (I_e^{n1}) + b \cdot (I_{ei}^{n2})] \cdot I_H^{n3} \quad (3.15)$$

Na equação (3.15),  $a$ ,  $b$ ,  $n1$ ,  $n2$  e  $n3$  são pesos associados a cada parcela. Note que as parcelas somadas referem-se à exposição, enquanto o perigo, representado pela profundidade de alagamento é um multiplicador. Assim, se não houver exposição ou se não houver alagamento este subíndice é anulado e a resiliência torna-se máxima. Por outro lado, a exposição de edificações ou de infraestrutura a uma dada inundação, já produz um valor para o subíndice.

- $I_e$  – INDICADOR DE EXPOSIÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Representado pela densidade de área construída, em  $m^2/ha$ , a qual pode indicar de forma indireta a exposição de pessoas em uma determinada área. Quanto maior a densidade, mais verticalizada são as construções, indicando uma maior ocupação, seja residencial ou comercial. Para a normalização do indicador, é considerado que a exposição máxima acontece no valor de densidade referente ao terceiro quartil de toda a amostra, de forma a reduzir possíveis “achatamentos” da escala de avaliação, devido à presença de valores extremos. Os demais valores são normalizados de forma linear, como apresentado no gráfico da Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Normalização do indicador de exposição de edificações ( $I_e$ )**

- $I_{ei}$  – INDICADOR DE EXPOSIÇÃO DE INFRAESTRUTURA URBANA

Representado pela densidade viária, em  $m/ha$ , esse indicador é uma medida indireta da exposição de infraestrutura urbana em uma determinada área. Ou seja, quanto maior a densidade de vias em uma região, haverá potencialmente uma maior cobertura de serviços

de infraestrutura, como abastecimento de água, esgotamento sanitário, iluminação pública, serviços por cabo, etc. Analogamente ao indicador  $I_e$ , foi realizada normalização dos valores considerando a exposição máxima como sendo o valor do terceiro quartil da amostra, como apresentado na Figura 3.4.

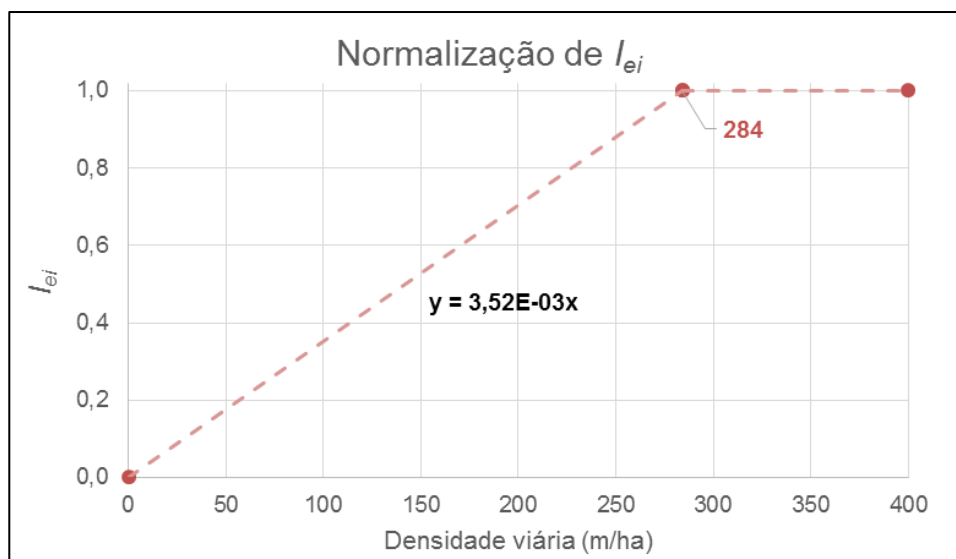


Figura 3.4 – Normalização do indicador de exposição de infraestrutura ( $I_{ei}$ )

- $I_H$  – INDICADOR DE PROFUNDIDADE DE ALAGAMENTO

Representado pela profundidade de alagamento máxima, esse indicador computa no subíndice a parcela relativa ao potencial de danos do evento de inundação avaliado, ou seja, representa a parcela referente ao perigo. Quanto maior a profundidade de alagamento, maior o dano potencial aos bens e pessoas expostos.

Tal indicador também é normalizado por uma profundidade de referência, adotada nesse estudo como sendo o valor de 1,30m, a partir da qual, é considerado um dano potencial máximo, representativo de dano muito significativo. Em seu extremo inferior, considera-se que alagamentos inferiores a 0,15m não possuem potencial de dano, resultando em um valor nulo para o indicador.

O intervalo entre esses valores extremos, dano máximo e dano insignificante, é normalizada uma curva exponencial, representativa do aumento do dano potencial na medida que são atingidos níveis d'água mais próximos do dano máximo. Esse valor implica em uma profundidade de alagamento de 0,80m dentro das edificações, em média, considerando um padrão de urbanização com 0,15m de meio-fio mais 0,35m entre a calçada e o interior das edificações. O gráfico da Figura 3.5 apresenta a normalização do  $I_H$ .

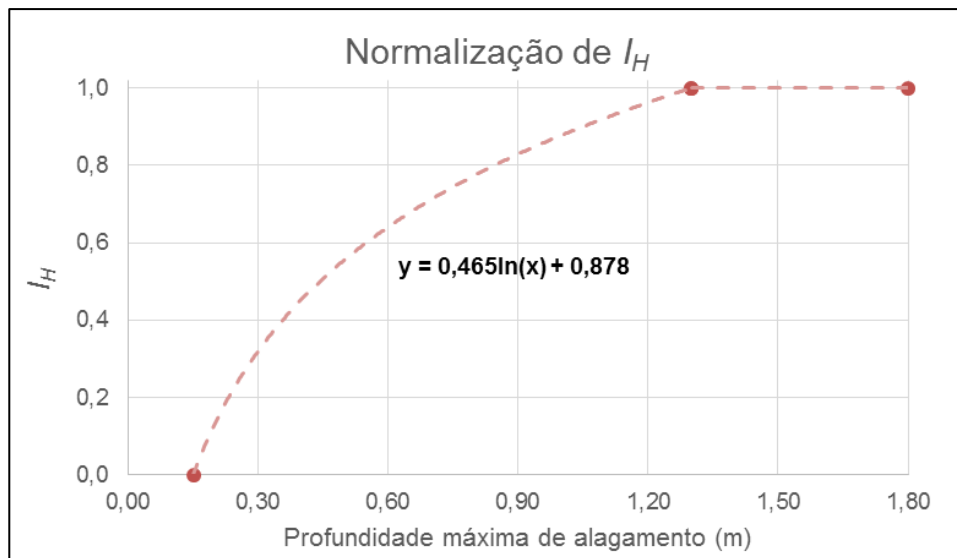


Figura 3.5 – Normalização do indicador de profundidade de alagamento, referente ao perigo.

#### Subíndice de Risco à Capacidade de Recuperação Material - $Si_C$

Representa uma parcela socioeconômica do risco de inundações, por meio de um indicador de *valor relativo*, o qual internaliza o perigo, representado pela profundidade de alagamento, relacionando-o com o dano potencial segundo a faixa de renda da população diretamente exposta à inundação.

Este subíndice introduz, ainda, um indicador de pessoas mais vulneráveis, representadas pela parcela da população com idade superior a 60 anos e inferior a 15 anos, relacionado a um indicador de perigo, representado pelo *fator de velocidade*, que indica o potencial de arraste de pessoas segundo o produto da velocidade de escoamento pela profundidade de alagamento.

Assim, sua formulação se apresenta na forma da Equação (3.16).

$$Si_C = (I_{vr} \cdot a) + (I_{vs} \cdot b) \quad (3.16)$$

Na equação (3.16),  $a$  e  $b$  são pesos relativos à importância de cada parcela na composição do subíndice.

- $I_{vr}$  – INDICADOR DE VALOR RELATIVO

Representa a capacidade de recuperação econômica de uma região frente aos danos de um dado evento de inundação. É calculada pela relação entre as perdas econômicas potenciais e capacidade de reposição desses danos, representada pela diferença entre a renda total e a despesa média de uma família. Tal diferença é estimada segundo dados da *Pesquisa de Orçamentos Familiares* – POF do IBGE (2002/2003), dependendo da faixa de rendimento.

Desta forma, pretende-se representar uma variável socioeconômica, equalizada de acordo com a relação entre o prejuízo potencial do evento e a classe econômica da população exposta, em detrimento da relação direta de dano monetário, permitindo avaliar não um prejuízo absoluto, mas a capacidade de recuperação do prejuízo sofrido. A formulação do indicador  $I_{vr}$  é dada pela Equação (3.17):

$$I_{vr} = \frac{(CRE + CRC) \cdot A_c \cdot I_S}{(12 \cdot RT \cdot CR)} \quad (3.17)$$

A parcela do numerador da equação do  $I_{vr}$  representa os danos potenciais às edificações e seus conteúdos em uma determinada região, para um dado evento de inundação. A parcela do denominador representa a capacidade de reposição da população exposta nessa região, dada pelo produto da renda total da região anualizada ( $12 \cdot RT$ ) pela relação entre renda e despesa média dados pelo IBGE, a qual representa a capacidade média de reposição ( $CR$ ). O cálculo de  $CR$  considera a diferença da renda e despesa média de uma região dividida pela renda total dessa região, representando o valor passível de uso para cobertura de danos não previstos. A seguir, são apresentadas as variáveis da equação (3.17).

$$CRE = [(0,5 \cdot CUB_E) \cdot PED] \rightarrow \text{Custo de danos à edificação} \quad (3.18)$$

$CUB_E \rightarrow$  Custo unitário básico da edificação, segundo classe econômica

$$PED = 0,0811 \cdot \ln(h) + 0,1338 \rightarrow \text{Porcentagem da edificação danificada, em função da altura } h \text{ de inundação} \quad (3.19)$$

$$CRC = [(0,5 \cdot CUB_C) \cdot PCD] \rightarrow \text{Custo de danos ao conteúdo das edificações} \quad (3.20)$$

$CUB_C \rightarrow$  Custo unitário básico do conteúdo, segundo classe econômica

$$PCD = 0,3878 \cdot \ln(h) + 0,3788 \rightarrow \text{Porcentagem do conteúdo danificado, em função da altura } h \text{ de inundação} \quad (3.21)$$

$A_c \rightarrow$  Área total construída na região em análise

$$I_S = \frac{\sum_{i=1}^n I_A}{n} \rightarrow \text{Indicador de susceptibilidade das edificações, representado pela altura média das edificações na região em análise} \quad (3.22)$$

$I_A \rightarrow$  Indicador de altura da edificação  $i$ , dado de acordo com a Tabela 3.1

$n \rightarrow$  Número total de edificações

$RT \rightarrow$  Renda mensal total da região em análise

$CR \rightarrow$  Capacidade média de reposição da região em análise, dada de acordo com a Tabela 3.2



**Tabela 3.1 – Valores do Indicador de Altura  $I_A$ , relacionados à altura da edificação  $H$ .**

Altura da Edificação $H$	Indicador de Altura $I_A$
$H < 5,0\text{m}$	1,00
$5,0\text{m} < H < 7,5\text{m}$	0,50
$7,5\text{m} < H < 10,0\text{m}$	0,33
$10,0\text{m} < H < 12,5\text{m}$	0,25
$H > 12,5\text{m}$	0,10

**Tabela 3.2 – Capacidade média de reposição  $CR$ , relacionada à faixa de rendimento.**

Faixa de rendimento	CR
Até R\$3.000,00	0,0000
De R\$3.000,00 a R\$4.000,00	0,0420
De R\$4.000,00 a R\$6.000,00	0,0768
Maior que R\$6.000,00	0,1996

As equações (3.19) e (3.21), relativas, respectivamente, às porcentagens da edificação e do conteúdo danificados ( $PED$  e  $PCD$ ), foram elaboradas com base nos estudos de Salgado (1995).

- $I_{vs}$  – INDICADOR DE VULNERABILIDADE SOCIAL

Representa uma parcela da vulnerabilidade social da região, relacionada com a porcentagem de pessoas potencialmente mais vulneráveis a eventos de inundações, sob o ponto de vista físico. Foi considerado o indicador de *pessoas vulneráveis*, tomando a proporção direta da parcela da população de determinada região que possui menos de 15 anos e mais de 60 anos, em relação à população total.

Este indicador é, ainda, relacionado com o indicador de *perigo*, representado aqui pelo *Fator de Velocidade*, por indicar diretamente potencial de arraste de pessoas durante uma inundação (REITER, 2000). De forma a considerar toda a população afetada, este indicador foi subdividido em duas parcelas, uma relativa à população vulnerável e outra relativa às demais pessoas. Cada parcela é relacionada, em um produtório, com um indicador de perigo específico, dentro da lógica do fator de velocidade, considerando que as pessoas mais vulneráveis possuem maior propensão aos impactos da inundação.

A formulação geral de  $I_{pv}$  é dada pela Equação (3.23).

$$I_{vs} = a \cdot \left[ (I_{pv})^{n1} \cdot (I_{FVv})^{n2} \right] + b \cdot \left[ (I_{pn})^{n3} \cdot (I_{FVn})^{n4} \right] \quad (3.23)$$

Na equação (3.23),  $a$ ,  $b$ ,  $n1$ ,  $n2$ ,  $n3$  e  $n4$  representam pesos relativos aos subindicadores de pessoas expostas e de perigo, representado pelo fator de velocidade, os quais são calculados pela aplicação das equações (3.24), (3.25), (3.26) e (3.27).

$$I_{pv} = \frac{N_{pv}}{P} \rightarrow \text{Indicador de pessoas vulneráveis} \quad (3.24)$$

$$I_{pn} = 1 - I_{pv} \rightarrow \text{Indicador de pessoas não vulneráveis} \quad (3.25)$$

$N_{pv}$   $\rightarrow$  Número de pessoas vulneráveis (idade menor de 15 e maior que 60 anos)

$P$   $\rightarrow$  População total na região em análise

$$I_{FVv} = 0,9743 \cdot \ln(FV) + 2,3308 \rightarrow \text{Indicador de fator de velocidade para} \quad (3.26)$$

pessoas vulneráveis

$$I_{FVn} = 1,0554 \cdot \ln(FV) + 1,3596 \rightarrow \text{Indicador de fator de velocidade para} \quad (3.27)$$

pessoas não vulneráveis

$$FV = V \cdot H \rightarrow \text{Fator de Velocidade, dado pelo produto da velocidade} \quad (3.28)$$

de escoamento  $V$  pela profundidade de alagamento  $H$

A normalização de  $I_{FV}$  considerou estudos progressos sobre estabilidade de pessoas expostas a escoamentos de água (RESCDAM, 2003), como apresentado no gráfico da Figura 3.6. Deste gráfico, foram elaboradas duas classificações de risco de perda de estabilidade para os grupos de pessoas vulneráveis e não vulneráveis (Tabela 3.3), segundo valores de  $FV$ , normalizada por função logarítmica, apresentada na Figura 3.7.

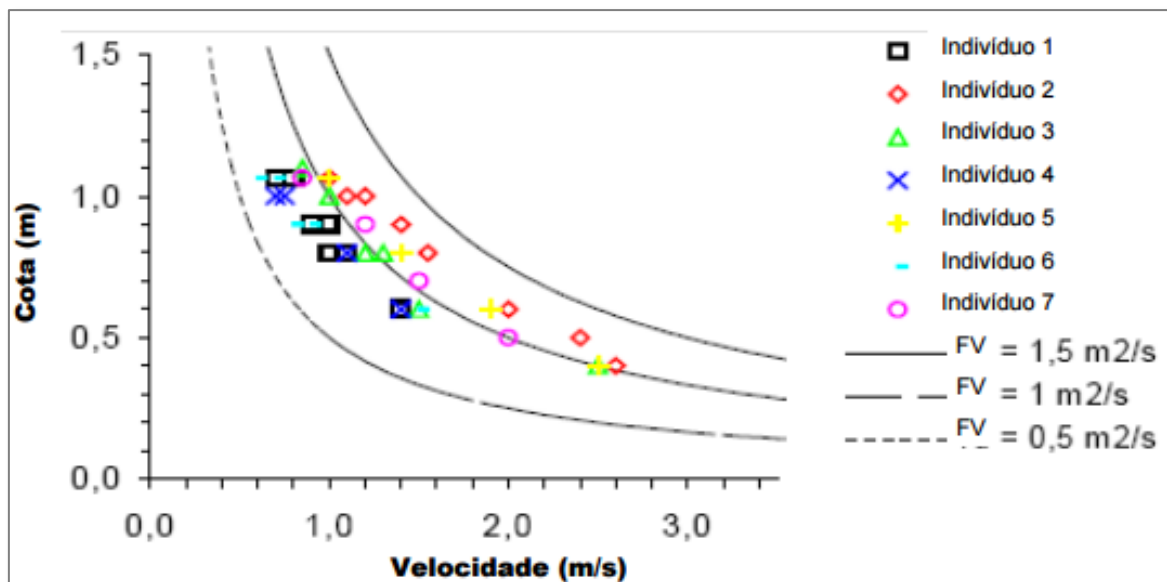


Figura 3.6 – Resultados de teste de perda de estabilidade (RESCDAM. 2003)

Tabela 3.3 – Classificação de  $I_{FV}$  segundo classes de risco de arraste, relacionadas com o Fator de Velocidade  $FV$ .

Pessoas vulneráveis				Pessoas não vulneráveis			
RISCO	FV	IFV	IFV <sub>v</sub>	RISCO	FV	IFV	IFV <sub>n</sub>
nulo	0,050	0,0	0,00	nulo	0,000	0,0	0,00
baixo	0,100	0,1	0,09	baixo	0,300	0,1	0,09
médio	0,175	0,6	0,63	médio	0,500	0,6	0,63
alto	0,250	1,0	1,00	alto	0,700	1,0	1,00

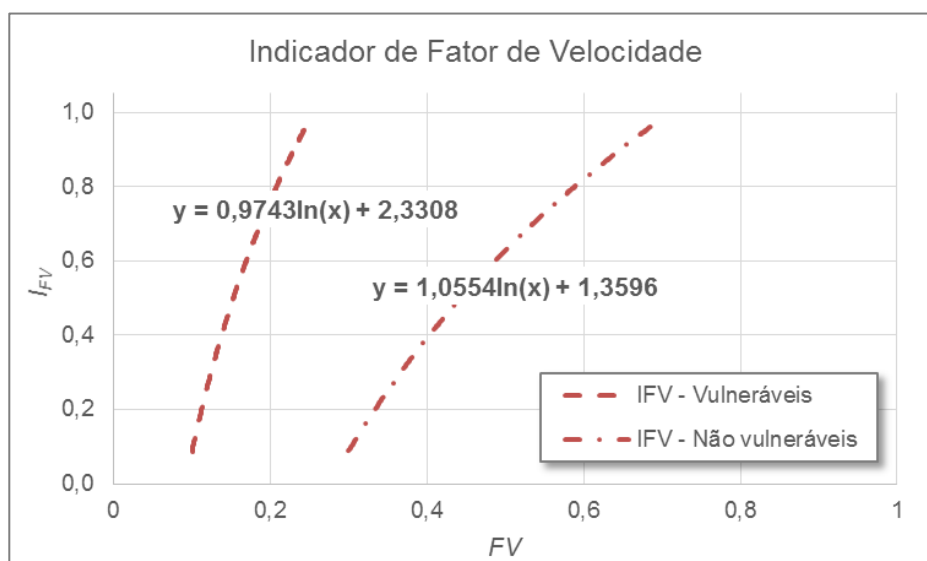


Figura 3.7 – Normalização de  $I_{FV}$  segundo o fator de velocidade  $FV$ .

## Subíndice de Risco à Manutenção do Funcionamento - $Si_F$

Representa a capacidade do sistema em continuar provendo parte de seus serviços, durante a ocorrência de um evento de inundação. Este subíndice considera o indicador de risco à mobilidade, representado pela relação entre indicadores de hierarquia viária e de não atendimento por transporte por trilho com o tempo de permanência do alagamento, indicando o grau de impacto da inundação no trânsito de automóveis e de pessoas. Também avalia o impacto no acesso de socorro, por meio da análise de alagamento nos quartéis dos bombeiros e de seu entorno, indicando potenciais dificuldades na organização de ações de emergência.

A formulação geral de  $Si_F$  é dada pela Equação (3.29).

$$Si_F = (I_{RM} \cdot a) + (I_{da} \cdot b) \quad (3.29)$$

Na equação,  $a$  e  $b$  são pesos relativos à importância de cada parcela na composição do subíndice.

- $I_{RM}$  – INDICADOR DE RISCO À MOBILIDADE

Representa o quanto o sistema de transporte é afetado por um evento de inundação, avaliando o grau de impacto sobre o trânsito de automóveis e de pessoas. Para isso, utiliza um indicador de hierarquia viária e um indicador de não atendimento por transportes de trilho, relacionando-os com um indicador de perigo de fator de permanência. O  $I_{RM}$  é dado pela Equação (3.30).

$$I_{RM} = [(I_{hv} \cdot a) + (I_{nat} \cdot b)]^{n1} \cdot [I_{FP}]^{n2} \quad (3.30)$$

Na equação,  $a$ ,  $b$ ,  $n1$  e  $n2$  são pesos relativos à importância de cada parcela na composição do subíndice.

$I_{hv}$  → Indicador de hierarquia viária, dado pela maior hierarquia de via encontrada dentro da área de análise, segundo os valores apresentados na Tabela 3.4. A hierarquia é uma informação da CET-Rio, órgão da Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro.

**Tabela 3.4 – Normalização do indicador de hierarquia viária,  $I_{hv}$ .**

Hierarquia	$I_{hv}$
1	1,00
2	0,94
3	0,77
4	0,50
5	0,11

$I_{nat}$  → Indicador de não atendimento por transporte sobre trilhos. Avalia a oferta de estações de metrô ou trem em raios de 1.000m e 500m, indicando os locais com maior cobertura desse serviço, que, indiretamente, apresentariam maiores possibilidades de continuidade de trânsito de pessoas durante eventos de inundação. Foram contabilizadas todas as estações de metrô e trem na bacia, demarcando as áreas de influência de cada uma delas, com raios de 1.000m e 500m.

O indicador  $I_{nat}$  é dado pelo complemento do indicador de atendimento, elaborado segundo um ranqueamento para a oferta de estações, conforme apresentado na Tabela 3.5. A formulação geral de  $I_{nat}$  é dada pela Equação (3.31).

$$I_{nat} = 1 - I_{att} \quad (3.31)$$

**Tabela 3.5 – Oferta de estações e indicador de atendimento de transporte sobre trilho  $I_{att}$ .**

Oferta de estações		$I_{att}$
Nulo	0	0,0
Ruim	2	0,4
Regular	3	0,6
Bom	4	0,8
Ótimo	6	1,0

Dentro das categorias de *oferta de estações*, foram, ainda, hierarquizadas subcategorias, considerando os raios de influência de cada estação disponível para acesso. Dessa forma, uma área com duas estações a 500m de distância possuem um indicador de atendimento maior que uma área com uma estação a 500m e outra a 1.000m de distância, apesar de ambas possuírem duas ofertas de estações.

A partir da hierarquização, os indicadores apresentados na Tabela 3.5 foram normalizados segundo uma equação logarítmica, totalizando 22 classes de atendimento, conforme apresentado na Tabela 3.6 e no gráfico da Figura 3.8.

Tabela 3.6 – Normalização de  $I_{att}$  segundo classes de atendimento.

Classe	Nº de estações a		Oferta de estações	$I_{att}$
	500m	1000m		
1	0	0	0	0,00
2	0	1	1	0,21
3	1	0	1	0,34
4	0	2	2	0,44
5	1	1	2	0,51
6	2	0	2	0,57
7	0	3	3	0,62
8	1	2	3	0,66
9	2	1	3	0,70
10	3	0	3	0,74
11	0	4	4	0,77
12	1	3	4	0,80
13	2	2	4	0,82
14	3	1	4	0,85
15	0	5	5	0,87
16	1	4	5	0,89
17	2	3	5	0,91
18	3	2	5	0,93
19	0	6	6	0,95
20	1	5	6	0,96
21	2	4	6	0,98
22	3	3	6	1,00

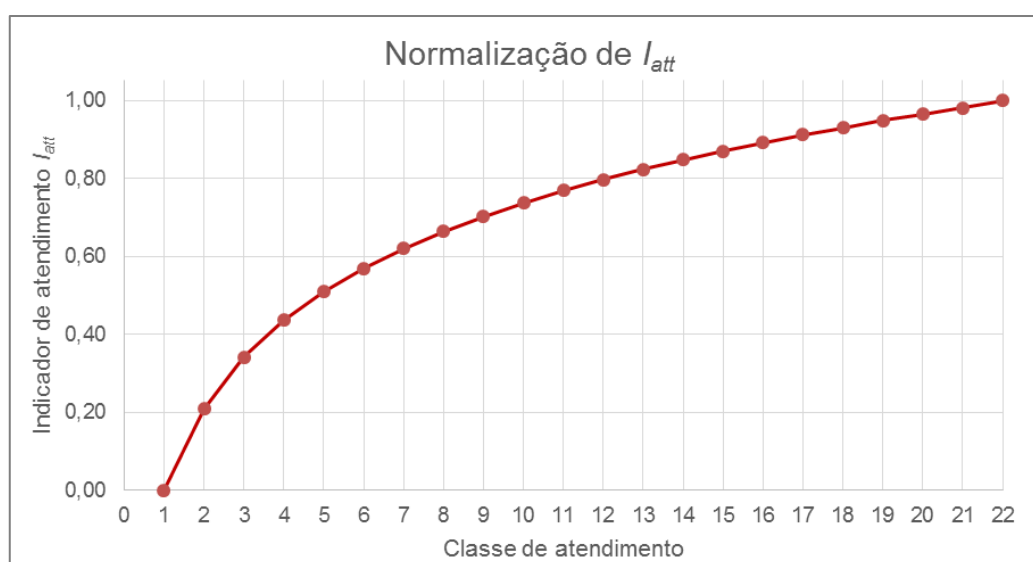


Figura 3.8 – Normalização do indicador de atendimento por transportes sobre trilho.

$I_{FP}$  → Indicador de perigo relativo ao fator de permanência. Esse indicador avalia, indiretamente, a capacidade de funcionamento da rede de drenagem de águas pluviais, avaliando períodos de alagamento de uma determinada região, segundo três classes de

profundidade: entre 10cm e 25cm (T1); entre 25cm e 50cm (T2); e acima de 50cm (T3). Os períodos de cada classe são normalizados segundo um tempo máximo para o qual é considerado o impacto máximo do alagamento, conforme gráfico apresentado na Figura 3.9. A definição do tempo de perigo máximo (T=1) para cada classe considera o impacto relativo para o sistema urbano, assim, para a classe T1, períodos de três horas teriam alto impacto para a mobilidade de pessoas, restringindo a passagem e aumentando a possibilidade de contágio de doenças veiculadas hidricamente. Para a classe T2, com alagamentos de até 50cm, calçadas são atingidas e o trânsito pode ser parcialmente afetado, tomando-se o período de 60 minutos como tempo suficiente para um alto impacto negativo. Para a classe T3, é considerado um período de 30 minutos, para o qual se daria impacto significativo no tráfego, com total interrupção, no caso de alagamentos superiores a 50cm.

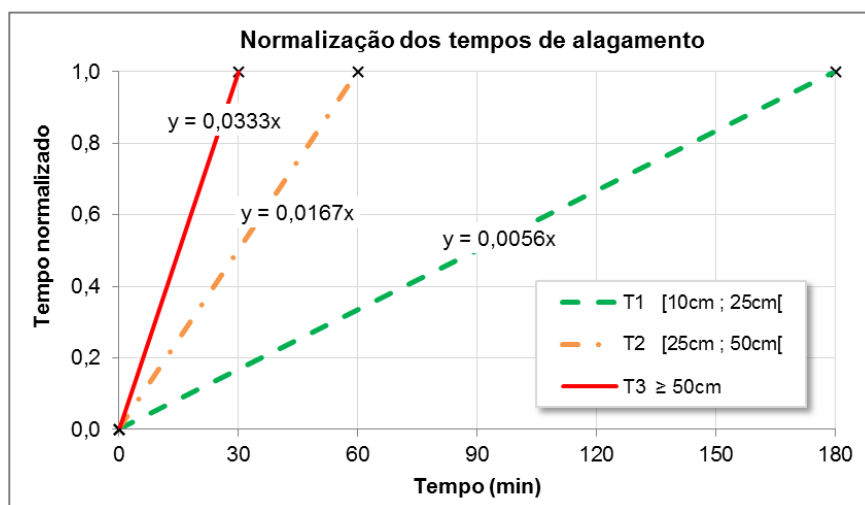


Figura 3.9 – Normalização dos períodos de alagamento, segundo as classes T1, T2 e T3.

- $I_{da}$  – INDICADOR DE DIFICULDADE DE ACESSO DE AJUDA

Representa, indiretamente, a dificuldade de determinada região em receber ajuda de equipe especializada. No presente estudo, por facilidade de acesso aos dados, são consideradas as instalações do Corpo de Bombeiros do Rio de Janeiro, existentes no interior da bacia do Canal do Mangue. Cada instalação recebeu uma área de influência, segundo uma distribuição geográfica por meio da aplicação do método dos Polígonos de Thiessen. As áreas de influência são penalizadas quanto ao acesso de ajuda de acordo com a profundidade de alagamento da área onde está instalado o Corpo de Bombeiros e de seu entorno. A normalização do indicador considera um impacto nulo para alagamentos até

15cm de profundidade e impacto máximo para alagamentos superiores a 50cm de profundidade, indicando o impedimento da saída de viaturas.

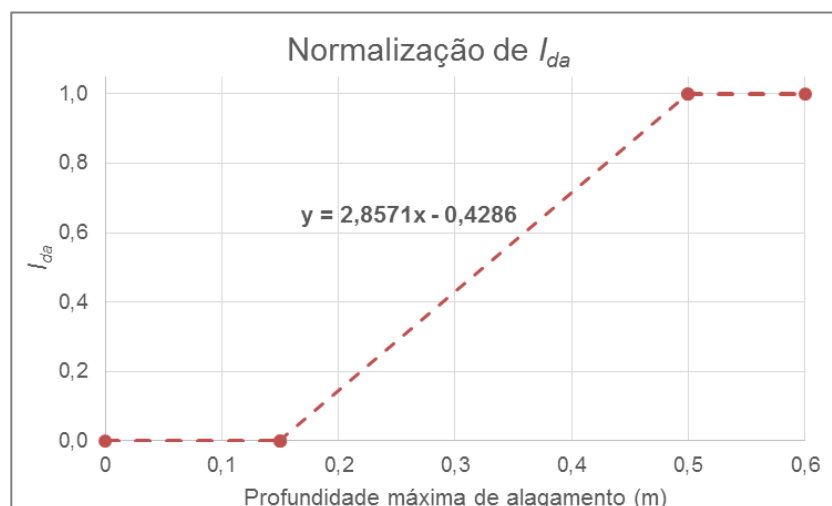


Figura 3.10 – Normalização do indicador de dificuldade de acesso de ajuda  $I_{da}$ .

### 3.3 Aplicação do IRES a uma Bacia Urbana

A resiliência de uma bacia urbana às inundações deve assumir uma característica de integral ao longo do tempo, conforme discutido ao longo do item 2.2.5 – Resiliência às Inundações. Portanto, a aplicação da metodologia do IRES a uma bacia não deve se limitar a um único evento, como é comumente realizado para mapeamento de risco de inundações.

A análise multievento permite a internalização do risco residual, uma vez que eventos com magnitude superior à chuva de projeto, considerada para dimensionamento das estruturas de proteção contra enchentes, comporão o valor final do índice de resiliência.

O risco residual se refere tanto à probabilidade de ocorrência de eventos superiores ao evento de projeto, quanto à possibilidade de ruptura das estruturas de controle. Porém, a avaliação do risco de falha dos dispositivos previstos em um planejamento do manejo das águas pluviais baseado no conceito da drenagem sustentável, com medidas distribuídas por toda a bacia, se mostra demasiadamente complexo, uma vez que demanda a análise de uma infinidade de combinações de falhas, tão maior quanto mais forem distribuídas as soluções técnicas.



Dessa forma, a avaliação da resiliência às inundações, por meio da aplicação do IRES, considera apenas a probabilidade de ocorrência de múltiplos eventos hidrológicos, assim como as incertezas sobre as consequências das mudanças climáticas.

A resiliência da bacia é, então, estimada a partir de duas metodologias distintas:

1. Critério de cenários futuros
2. Critério multieventos

As metodologias de avaliação da resiliência utilizadas nesta pesquisa são apresentadas nos próximos itens.

### **3.3.1 Critério de Cenários Futuros**

As infraestruturas resilientes são “*sistemas que serão capazes de sobreviver e fornecer bons serviços em um futuro cada vez mais incerto*” (MALE, 2009). Considerando essa afirmação, para avaliar a resiliência de sistemas de drenagem urbana às inundações, é aplicada a metodologia proposta por Vérol (2013), a qual considera a análise de cenários futuros (ver item 3.2.2- Escala de Resiliência, pág. 72). A resiliência de uma determinada bacia às inundações, nesta metodologia, é medida em uma escala que avalia a eficiência de um determinado conjunto de intervenções e a perda desta eficiência frente a um cenário futuro de modificação nos padrões de uso e ocupação do solo na bacia, baseado em um critério de redução de risco.

Considerando isso, adicionalmente à probabilidade de ocorrência de eventos com magnitude superior ao evento utilizado na fase de projeto, quando são definidas as ações para redução dos riscos de inundação, há as incertezas sobre a manutenção dos atuais padrões hidrológicos, relacionadas às mudanças climáticas em curso. Grande parte dos estudos para avaliações futuras do funcionamento de sistemas urbanos frente aos impactos das mudanças climáticas considera o cenário **RCP 4.5**, que representa um cenário de impacto mediano, com aumento de temperatura entre 0,9 e 2,0 graus Celsius, para o ano de 2040 (ZANETTI, 2016). Quando considerado o fim do século, esse aumento pode chegar até a 6 graus Celsius (MARENGO *et al.*, 2007).

Considerando que a variação encontrada nas taxas de precipitação tem um comportamento aproximadamente linear em relação à variação da temperatura atmosférica

(COLLINS et al., 2013), as estimativas sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas globais nos regimes de chuvas intensas apontam uma probabilidade de aumento entre 8% e 24% no volume das precipitações.

Para o caso de cidades costeiras, há ainda previsões de alteração nos níveis médios do mar (NMM), o que produzirá sensíveis impactos para os sistemas de drenagem dessas regiões. Projeções globais estimam que poderá haver elevações do NMM até o ano de 2100 entre 0,26m e 0,55m, em um cenário otimista, e entre 0,45m e 0,82m, em um cenário mais pessimista (IPCC, 2013). Para o Brasil, estima-se que o NMM sofra uma sobrelevação similar (PBMC, 2016), com um aumento mínimo superior 0,50m (SANTOS, 2017).

Tais mudanças stressarão o funcionamento das redes de drenagem implantadas com base em padrões e critérios hidrológicos e hidráulicos atuais, os quais não consideram possíveis impactos das mudanças climáticas. Para possibilitar uma avaliação da resiliência de um sistema urbano às inundações, do ponto de vista de capacidade de absorção de impactos futuros, é adaptada a lógica de cálculo da Escala de Resiliência (ver item 3.2.2) à estimativa do IRES.

Assim, a nova Escala de Resiliência será dada diretamente pelo IRES e não mais com aplicação do IRC (Índice de Risco de Cheias), utilizando, ainda, a mesma construção matemática proposta por Vérol (2013) acrescida de um sistema de pesos, baseada no produto de duas parcelas, referentes a *perda de eficiência da solução em uma situação futura (P1)* e a *eficiência da solução na situação futura (P2)*, conforme a equação (3.11), apresenta na página 73, que passa a se apresentar na forma da equação (3.32).

$$ER = P1^a \cdot P2^b \quad (3.32)$$

Com:  $ER$  = escala de resiliência, com valor entre 0 e 1

$P1$  = parcela 1, mede perda de eficiência da solução em uma situação futura

$P2$  = parcela 2, mede a eficiência da solução na situação futura

$a$  e  $b$  = pesos de cada parcela

A parcela 1 ( $P1$ ) é calculada a partir da subtração do valor 1, ou seja, o valor de 100% de eficiência mantida, da parcela do IRES de projeto na situação presente menos o IRES de projeto na situação futura, quando há expectativa de redução do índice, ocasionado por

uma situação adversa, dividido pelo IRES na situação presente. A equação (3.12 apresenta as componentes de  $P1$ .

$$P1 = 1 - \frac{(IRES_{Projeto}^{Presente} - IRES_{Projeto}^{Futuro})}{IRES_{Projeto}^{Presente}} \quad (3.33)$$

A parcela 2 ( $P2$ ) representa a aumento hipotético do IRES, considerando um futuro *com* e *sem* implantação do projeto proposto, e é calculada pela relação entre o IRES com projeto menos o IRES sem projeto, ambos na situação futura, pelo IRES com projeto na situação futura, por meio da aplicação da equação (3.34).

$$P2 = \frac{IRES_{Projeto}^{Futuro} - IRES_{Sem Projeto}^{Futuro}}{IRES_{Projeto}^{Futuro}} \quad (3.34)$$

O cenário futuro, para estimativa das parcela constituintes da nova Escala de Resiliência, proposta neste trabalho, considera um cenário de médio impacto das mudanças climáticas, com aumento de 0,50m do NMM e de 16% no volume de precipitações intensas, conforme discutido ao longo deste item.

### 3.3.2 Critério Multieventos

A partir da construção do modelo matemático para simulação de cheias na bacia, com uso do MODCEL (veja item 3.1- Sistema de modelagem matemática), são realizadas simulações para eventos hidrológicos com diferentes tempos de recorrência, desde chuvas ordinárias até tempestades extremas. Os tempos de recorrência adotados nesta pesquisa são: 01, 05, 10, 25, 50, 100, 500 e 1000 anos.

Para cada célula, os resultados modelados de profundidades de alagamento, velocidades de escoamento e tempo de permanência, são inseridos em uma planilha eletrônica para cálculo dos indicadores, subíndices e, por fim, do IRES. Essa atividade é realizada para cada cenário hidrológico. Assim, teremos oito (08) mapas da bacia com valores do IRES distribuídos espacialmente sobre a planície, um para cada evento hidrológico simulado.

O valores do IRES parciais são plotados em um gráfico contra a probabilidade de ocorrência do evento em um horizonte de 25 anos, considerando, portanto, um horizonte prático de planejamento. Para cada célula, a função do IRES é integrada, de forma a estimar

o IRES final, que considera a probabilidade de ocorrência de diversos eventos hidrológicos ao longo de um período de 25 anos. Ao final, é elaborado o mapa de resiliência da bacia, com o IRES integralizado para cada célula sobre todos os eventos simulados.

Uma vez que os impactos de eventos superiores ao evento utilizado para o dimensionamento do projeto são considerados neste processo de integração do IRES, pode-se concluir que parte do risco residual é internalizada na estimativa da resiliência da bacia, indo de encontro à discussão realizada no Capítulo 2 - Base Teórica.

O IRES integral é então calculado para todos os cenários propostos, permitindo uma comparação direta entre a resiliência às inundações de diferentes configurações de um sistema urbano.

O esquema apresentado na Figura 3.11 ilustra o processo de integração do IRES, para estimativa da resiliência às inundações em uma bacia, com uso da análise multievento.

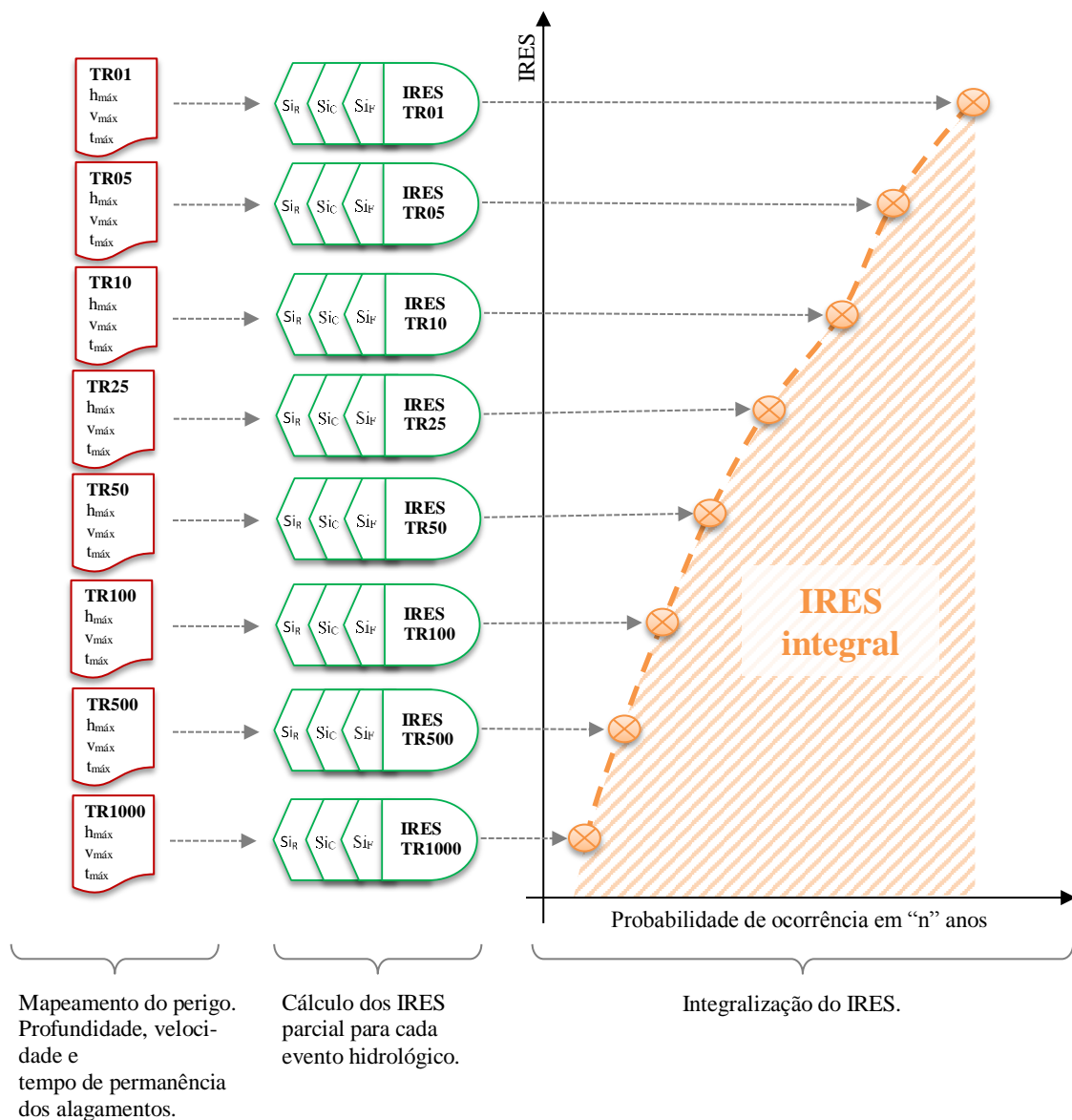


Figura 3.11 – Esquema de cálculo do IRES integral, com uso da metodologia multievento.

No gráfico da Figura 3.11:

- $h_{m\acute{a}x}$  = profundidade máxima de alagamento
- $v_{m\acute{a}x}$  = velocidade máxima de escoamento
- $t_{m\acute{a}x}$  = tempo de permanência do alagamento

### 3.4 Cenários de Simulação

A avaliação dos benefícios de um plano de intervenção em uma bacia para redução dos prejuízos decorrentes das inundações é realizada com base em prognósticos de cenários. A construção de cenários de simulação permite obter um conjunto de respostas da bacia a eventos de chuvas intensas de acordo com possíveis arranjos de intervenções no sistema de drenagem ou mesmo na configuração urbana da bacia.

A presente pesquisa é apoiada na hipótese de que um sistema urbano dotado de estruturas de amortecimento de menor porte, distribuídas pela bacia, apresenta maior resiliência às inundações que sistemas com grandes obras concentradas. A avaliação desta hipótese é realizada com a simulação de diversos cenários, construídos com apoio de modelagem matemática. Os cenários propostos visam disponibilizar o funcionamento do sistema de drenagem da bacia em resposta a diversos eventos hidrológicos, considerando três condições do sistema de infraestrutura de drenagem: **C0** - sem intervenções; **C1** - com intervenções concentradas; **C2** - com intervenções distribuídas.

O cenário sem intervenções (**C0**) considera as condições hidráulicas do sistema de drenagem da bacia sem quaisquer medidas de armazenagem temporária dos escoamentos excedentes das chuvas. A partir da construção de um modelo matemático que represente uma bacia urbana, são simuladas diversas chuvas de projeto, permitindo a avaliação do comportamento das cheias.

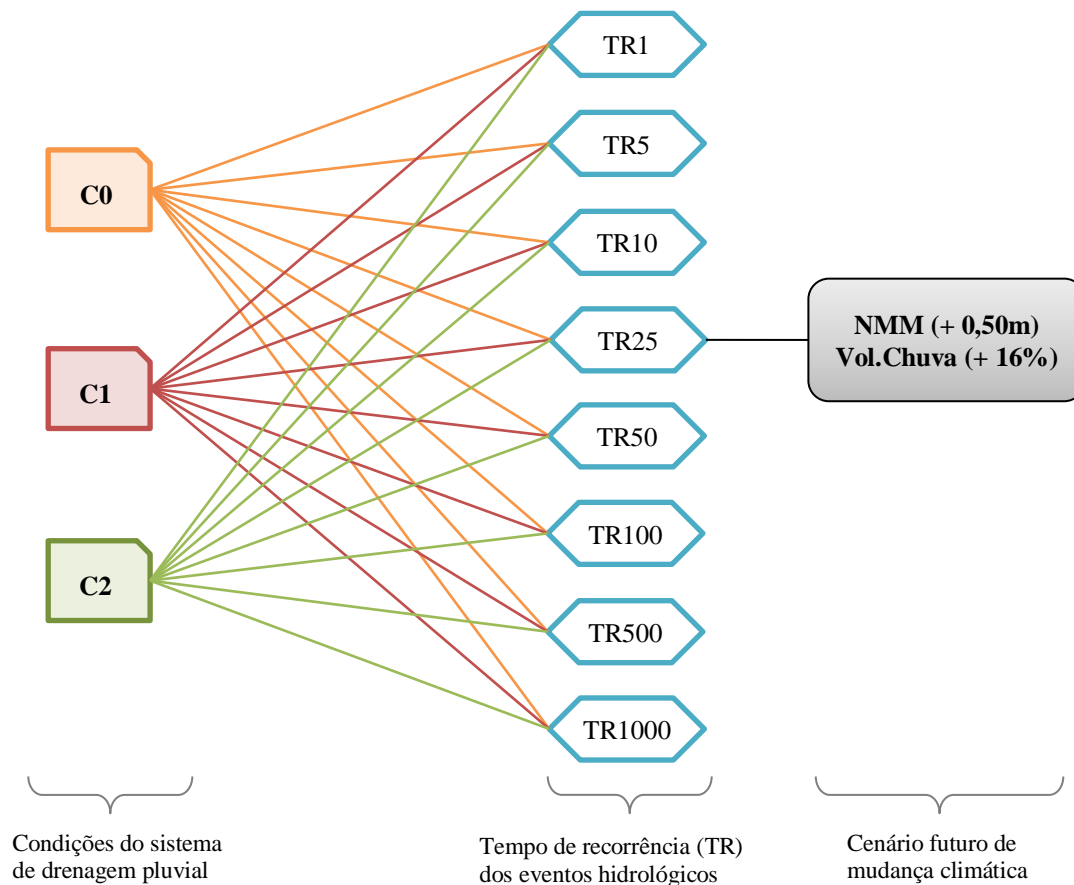
Posteriormente, o modelo matemático é adaptado para simular a introdução de grandes obras para retenção de águas pluviais (**C1**), localizadas estrategicamente para retirar parte dos escoamentos de cheia dos canais principais, reduzindo a vazão de pico e, assim, o estresse hidráulico de trechos com baixa capacidade de escoamento.

Por fim, uma segunda adaptação do modelo é realizada, agora, para introduzir diversas obras de retenção de menor porte (**C2**), distribuídas por toda a bacia, desde os pés das encostas, até a superfície urbana das planícies ocupadas. As intervenções buscam se adequar às medidas propostas em uma abordagem sustentável do manejo das águas pluviais.

A partir dos cenários de distintas condições do sistema de infraestrutura de drenagem pluvial (**C0**, **C1** e **C2**), são realizadas simulações de diversos cenários hidrológicos, considerando chuvas com diferentes tempos de recorrência, a fim de obter um conjunto de

simulações que abranja tanto eventos hidrológicos ordinários, quanto eventos extremos. São consideradas oito eventos hidrológicos, com chuvas de tempos de recorrência de 01, 05, 10, 25, 50, 100, 500 e 1000 anos.

Adicionalmente, para permitir a aplicação do Critério de Cenários Futuros (item 3.3.1), é construído um cenário com elevação do nível médio do mar (NMM) e aumento no volume de precipitação em eventos de chuvas intensas. Essa configuração visa testar o funcionamento do sistema de drenagem da bacia, com os dois conjuntos de intervenção propostos, em um possível cenário de mudança climática. A aplicação deste critério de análise da resiliência da bacia às inundações considera o evento pluviométrico com 25 anos de tempo de recorrência, adequando-se às diretrizes nacionais (BRASIL, 2012) para avaliações de rede de macrodrenagem. Dessa forma, a análise da resiliência da bacia às inundações é realizada a partir da avaliação dos resultados de 27 cenários de simulação, conforme esquema apresentado na Figura 3.12.



**Figura 3.12 – Esquema de representação dos cenários de simulação.**

### **3.5 Proposta metodológica para avaliação da resiliência em bacias urbanas**

Este item tem por objetivo apresentar, de forma organizada e reproduzível, a sequência lógica de procedimentos metodológicos para utilização das ferramentas de avaliação da resiliência às inundações em bacias urbanas, expostas neste trabalho. Desta forma, é proposto um manual rápido para orientar aplicações desta metodologia em outras bacias.

As ferramentas já proveem informações úteis e, em muitos casos, completas em si, para aplicações, por exemplo, no mapeamento dos resultados positivos de determinados conjuntos de intervenções para controle de inundações. Porém, uma visão de conjunto mostra-se de grande importância, de forma a fomentar uma abordagem sistêmica no processo de gerenciamento de risco das inundações.

Por conseguinte, destaca-se que o projeto deve ser orientado segundo uma lógica de risco e não apenas de redução de danos, internalizando o risco residual a partir da consideração de cenários hidrológicos com recorrência superior ao evento de projeto.

A seguir, são descritas as etapas necessárias para o desenvolvimento da avaliação da resiliência, segundo os dois critérios propostos neste trabalho, *critério de cenários futuros* e *critério multieventos*, a partir do uso do Índice de Resiliência de Inundações - IRES.

#### **1. Delimitação da bacia hidrográfica**

Definido o sistema urbano a ser avaliado, devem ser traçadas as bacias hidrográficas contribuintes ao sistema.

#### **2. Delimitação do domínio de modelagem**

Dentro da bacia hidrográfica, devem ser delimitadas as áreas que serão consideradas para a etapa de modelagem hidrodinâmica, ou seja, onde haverá respostas disponíveis para avaliação.

#### **3. Delimitação do domínio de interesse**

O domínio de interesse deve abranger todo o sistema urbano passível de mapeamento. Esta etapa é muito importante e deve ser realizada com cautela, pois a



definição errada dos limites do domínio de interesse pode excluir da análise áreas estratégicas ou vulneráveis, camuflando os resultados finais.

#### 4. Definição do sistema de modelagem

A aplicação dos critérios propostos nesta tese possibilitam tanto uma avaliação da resiliência de forma concentrada para toda a bacia, fornecendo um único valor de resiliência para todo o sistema, quanto de forma distribuída, fornecendo mapas de resiliência em todo o domínio de interesse. Dessa forma, a escolha do critério a ser aplicado implica na definição da ferramenta de modelagem, a qual deverá ser capaz de conduzir simulações de forma distribuída no espaço, considerando o escoamento sobre as planícies e, assim, fornecendo resultados de alagamento em todo o espaço urbano. Para uma melhor avaliação do sistema, é indicado o uso de sistemas de modelagem bidimensionais ou quasi-2D.

#### 5. Definição dos cenários de modelagem

A quantidade de cenários de modelagem dependerá do número de conjuntos de intervenções a ser avaliado. Cada cenário deve representar as condições do sistema de drenagem, as características urbanas da bacia e os eventos hidrológicos. O cruzamento destas condicionantes determina os cenários finais a serem simulados.

#### 6. Modelagem hidrológica

Esta etapa tem por objetivo estimar as chuvas de projeto, assim como os hidrogramas afluentes ao domínio de modelagem, que serão utilizados na etapa de modelagem hidrodinâmica. Devem ser considerados eventos de precipitação que abranjam tanto chuvas ordinárias, com alta frequência, até eventos extremos com alto tempo de recorrência.

#### 7. Modelagem hidrodinâmica

Uma vez definido a ferramenta de modelagem e os cenários de simulação, é elaborada a base de dados para a modelagem hidrodinâmica, considerando já as condições de contorno impostas por possíveis restrições de jusante e de hidrogramas de cheia provenientes de bacias contribuintes a montante. Esta etapa tem como

resultado as respostas das parcelas relacionados ao perigo, em eventos de inundação, para cada um dos cenários de simulação.

#### 8. Levantamento de informações socioeconômicas e ambientais

Esta etapa pode ser iniciada logo após a definição da bacia a ser estudada (etapa 1) ou mesmo após a delimitação do domínio de interesse (etapa 3), reduzindo a quantidade de informações a ser levantada e tratada, limitando-se apenas à área que será realmente avaliada. Diversos órgãos governamentais disponibilizam informações necessárias para o estudo, como distribuição de renda, densidade populacional e construída, uso e cobertura do solo, hierarquia viária, oferta de serviços públicos, etc.

#### 9. Composição dos indicadores independentes

Alguns dos indicadores propostos para composição do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES dependem apenas de informações sociais, econômicas e/ou ambientais, não sofrendo variações com a dinâmica das cheias. Tais indicadores podem ser elaborados logo após o mapeamento destas informações no domínio de interesse, compondo parte da parcela de vulnerabilidade da região. Caso haja previsão de simulação de cenários futuros com variação do uso do solo ou implementação de medidas adaptativa no sistema urbano, para aumento da resiliência às inundações, os indicadores já podem possuir seus valores atuais e futuros.

#### 10. Composição dos indicadores dependentes

Além dos indicadores com relação direta à parcela do perigo das inundações, referentes à profundidade máxima de alagamento, velocidade máxima de escoamento e tempo de permanência da inundação, há, ainda, uma série de indicadores socioeconômicos que sofrem variação de acordo com o comportamento da enchente avaliada. Dessa forma, tal conjunto de indicadores, tanto os de perigo, quanto os de vulnerabilidade dependentes dos resultados das cheias, serão compostos apenas após execução dos cenários de simulação, os quais darão os subsídios necessários.

## 11. Cálculo dos subíndices de risco

Após composição de todos os indicadores, independentes e dependentes, é possível calcular os subíndices de risco, divididos nos três grupos que se relacionam com a resiliência de um sistema: capacidade de resistir; capacidade de se recuperar; e capacidade de manter seu funcionamento.

## 12. Cálculo da resiliência às inundações

A partir dos subíndices de risco, são calculados os índices de resiliência (IRES) para cada cenário de simulação, com os diferentes tempos de recorrência adotados e condições do sistema de drenagem e padrões urbanos. Nesta etapa, são elaborados os mapas do IRES parcial, que representam a resiliência às inundações, de um ponto de vista estático, como resposta direta a um determinado conjunto de eventos hidrológicos.

## 13. Integralização do IRES ou aplicação da Escala de Resiliência

A resiliência às inundações deve assumir uma característica multitemporal, na qual compreende a resposta do sistema urbano a ocorrência de diversos eventos, internalizando o risco residual à avaliação e gerenciamento do risco, seja pela incorporação de cenários futuros com alteração nas variáveis do perigo ou da vulnerabilidade, ou pela avaliação de eventos hidrológicos superiores ao evento de projeto utilizado para dimensionamento das intervenções. Desta forma, nesta pesquisa, dois critérios de avaliação são propostos: *cenários futuros* e *multieventos*.

### 13.1. Critério de Cenários Futuros

Nesta lógica de avaliação, é considerada a ocorrência de um evento hidrológico intenso, definido por um tempo de recorrência (TR) de referência, em cenários futuros adversos, comparando o resultado do IRES com o cenário atual. A partir do mapeamento do IRES na bacia em cada cenário, atual e futuro, para o TR de referência adotado, é calculado o IRES médio da bacia. Os resultados do IRES médio para cada cenário é colocado como dados de entrada na Escala de Resiliência (ver item 3.3.1, pág. 91), que fornecerá um valor numérico para subsidiar a avaliação da performance de intervenções urbanas para mitigação das inundações, frente a possíveis estresses futuros ao sistema.

### 13.2. Critério Multieventos

A utilização deste segundo critério tem por objetivo a incorporação do risco residual à avaliação da resiliência, a partir da análise da resposta do sistema a diversos eventos hidrológicos, desde chuvas ordinárias a chuvas extremas. Como no critério de cenários futuros, pode ser encontrado um valor de resiliência único para a bacia, calculando a média do IRES para cada tempo de recorrência simulado. Com todos os valores calculados, é realizada a integral da função do IRES médio pela probabilidade de ocorrência dos eventos. Porém, este critério oferece ainda a possibilidade de um mapeamento espacial do IRES, integralizado no tempo, realizando o mesmo processo de cálculo da integral da função do IRES pela probabilidade de ocorrência dos eventos em cada unidade de avaliação do modelo.

Para um melhor entendimento do processo metodológico proposto, é apresentado, na Figura 3.13, um fluxograma de etapas para avaliação da resiliência às inundações em bacias urbanas, com uso do IRES.

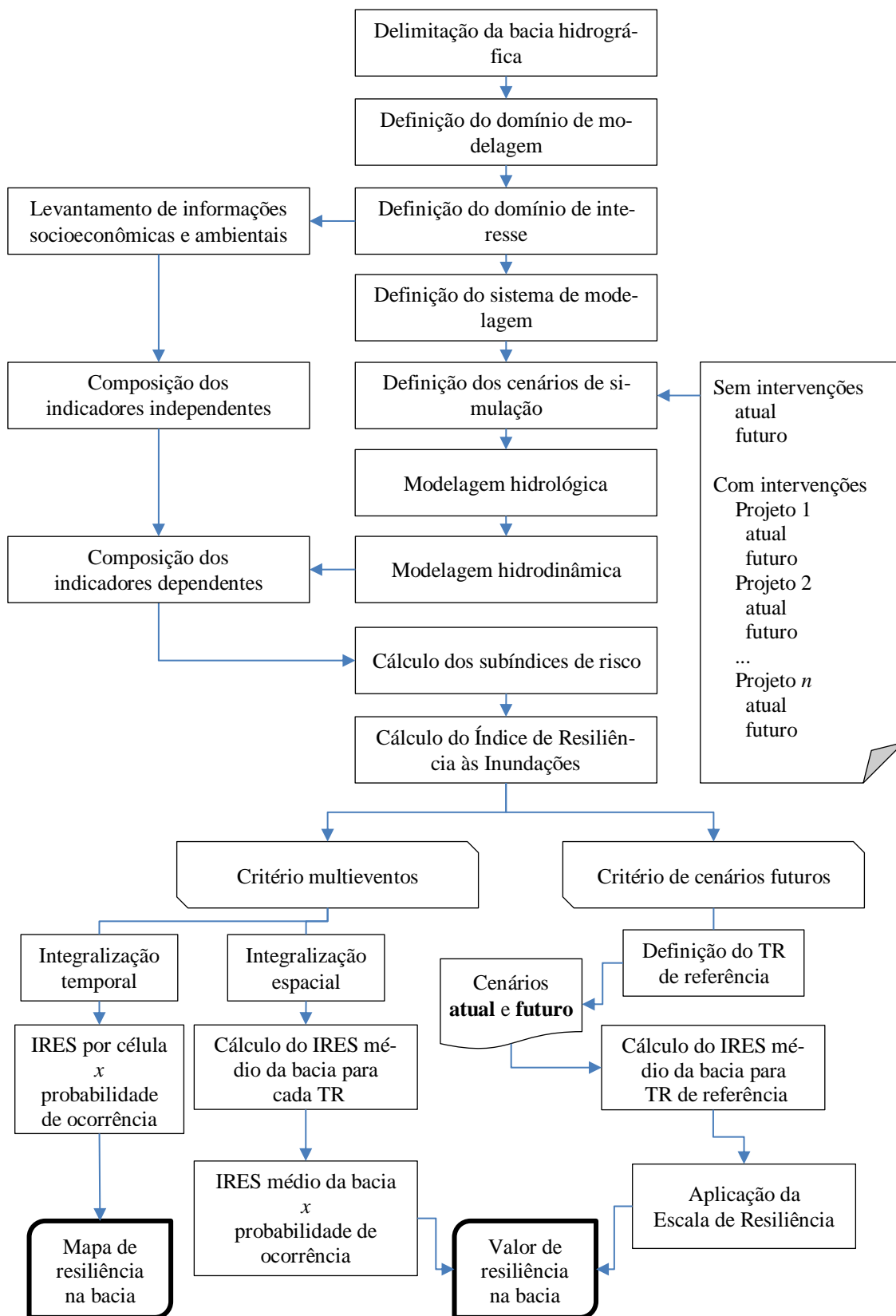


Figura 3.13 – Fluxograma de procedimentos para estimativa da resiliência às inundações em bacias urbanas, com uso do IRES.

## 4 Estudo de Caso: A Bacia do Canal do Mangue – BCM, RJ

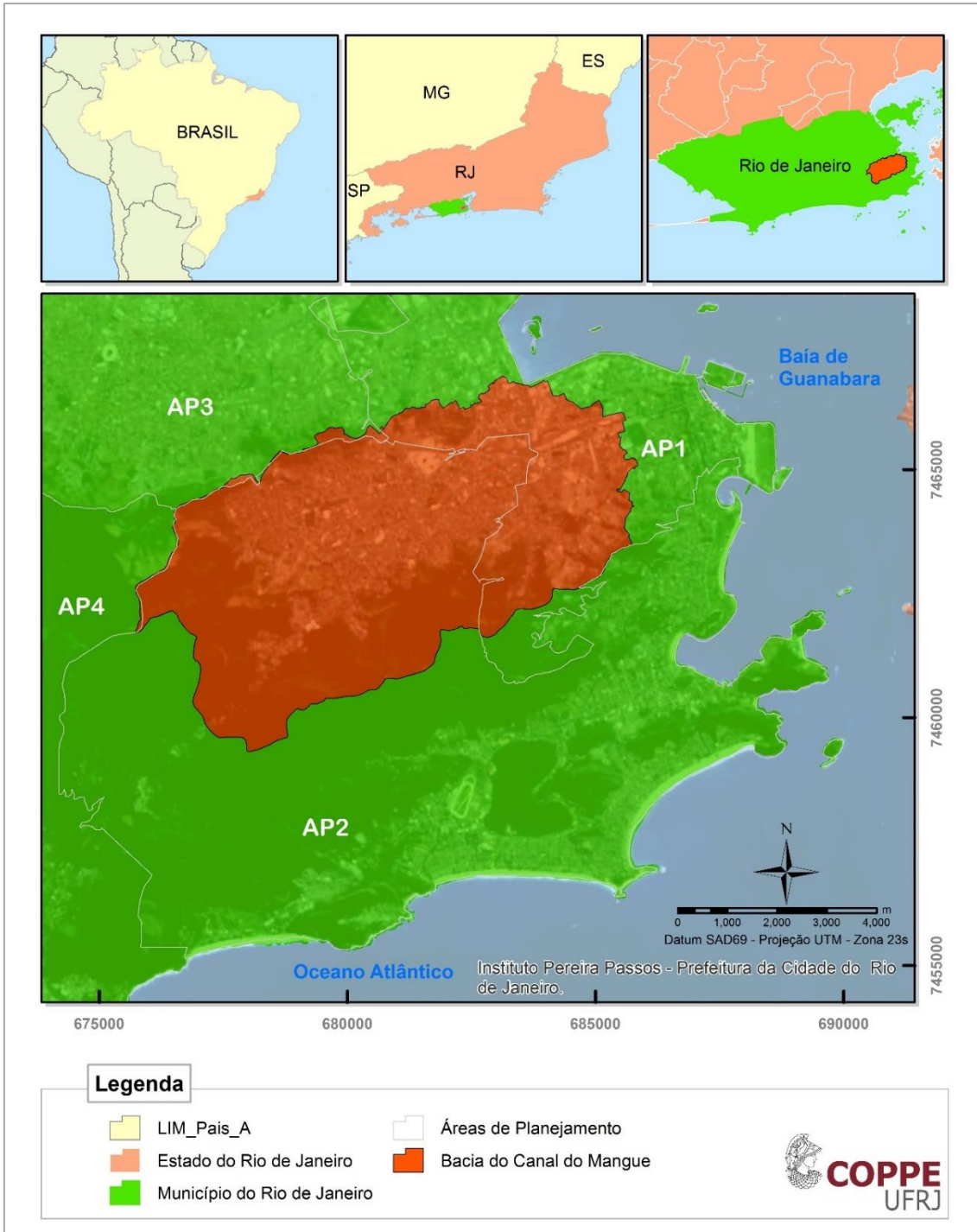
A Bacia do Canal do Mangue (BCM) está localizada na região central do município do Rio de Janeiro, com foz na Baía de Guanabara, aproximadamente nas coordenadas UTM 683589L 7466712S (Zona 23S). O mapa da Figura 4.1 apresenta a localização da BCM.

A escolha da BCM para estudo de caso teve como principais motivações:

- ✓ Importância geográfica, localizada entre e a zona central e norte da cidade do Rio de Janeiro, densamente ocupada e altamente modificada pelo processo de ocupação urbana;
- ✓ Importância histórica, apresentando graves problemas de inundação ao longo de toda a história de sua ocupação, sendo objeto de diversos estudos e projetos para mitigação e controle de inundações, abrangendo um dos ícones do tema de inundações urbanas no Rio de Janeiro, a Praça da Bandeira;
- ✓ Importância econômica, apresentando eixos viários de relevância para toda a cidade, os quais possuem alto potencial de impacto na geração de grandes congestionamentos durante chuvas intensas com interrupção de tráfego, assim como existência de diversos padrões e níveis de ocupação, como favelas e bairros nobres.

Inicialmente, foi extraído um resumo sobre a região da Bacia do Canal do Mangue baseado no *Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue* (COPPETEC, 2000), convênio com a Fundação Coppetec em conjunto com os técnicos da Rio-Águas, para traçar diretrizes e possíveis intervenções para mitigação do problema de inundações na bacia do Canal do Mangue.

O estudo de caso avalia questões relacionadas às diversas configurações potenciais de medidas de controle dos escoamentos na bacia, analisando sua distribuição espacial e o resultado de cada configuração para a resiliência da bacia a inundações, por meio da aplicação do IRES. A bacia encontra-se em um estado de ocupação consolidado, com pouca flexibilidade no que tange o zoneamento urbano para redução da exposição de bens e pessoas ao risco de inundações, sendo necessárias ações de controle baseadas em técnicas compensatórias de drenagem urbana.



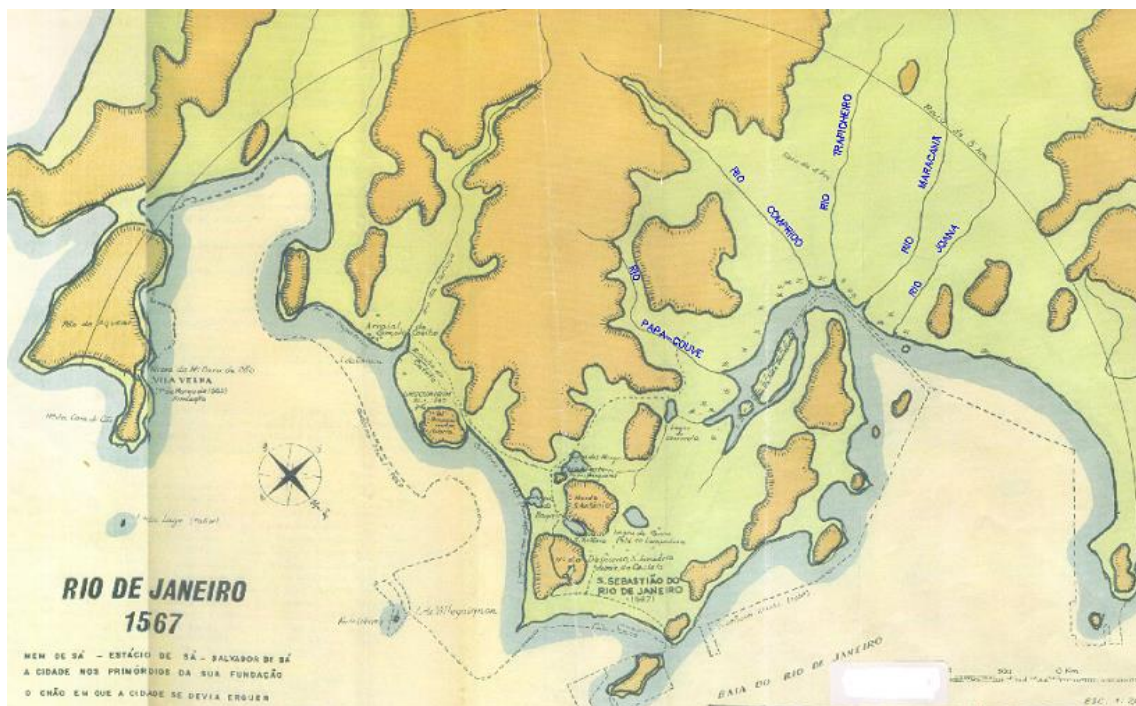
**Figura 4.1 – Mapa de localização da Bacia do Canal do Mangue.**

## 4.1 Breve Histórico sobre a BCM

A Cidade do Rio de Janeiro foi fundada com objetivo estratégico de defesa, para a criação de um posto avançado de controle colonial. Era assentada entre os morros Cara de Cão e Pão de Açúcar. Posteriormente, a cidade foi transferida para o então morro de São Januário (depois chamado morro do Castelo). Ali, o núcleo urbano ficava protegido entre pântanos e lagoas, dificultando possíveis ataques por terra.

Com o tempo, crescia a necessidade de se expandir a ocupação, principalmente para a região norte da cidade, onde seriam mais fáceis os acessos a estradas importantes que levavam ao interior do Brasil colonial.

Porém, um grande obstáculo se opunha a esse objetivo: o Saco de São Diogo, que era um “braço do mar” que adentrava o continente e recebia as águas dos rios Papa-Couve, Comprido, Trapicheiro, Maracanã e Joana, como pode ser observado na imagem da Figura 4.2. Todo o entorno dessa região era coberta por manguezais, o que, naquela época, era sinônimo de mau cheiro, doenças e insalubridade.



**Figura 4.2 – Imagem cartográfica do Rio de Janeiro em 1567, mostrando os principais rios da região norte desaguando em um braço da Baía de Guanabara, conhecido como Saco de São Diogo.**

**Fonte: Coleção do engenheiro Jorge Achnoor**



Assim, foi iniciada a empreitada para se configurar o Rio de Janeiro como o conhecemos hoje e a chegada da Família Real intensificou e acelerou esse processo. A estratégia de expansão urbana para o norte da Baía de Guanabara pode ser percebida pelo incentivo fiscal concebido pelo Império, que isentava a cobrança da Décima Urbana, uma espécie de IPTU, quem construísse nas áreas pantanosas, por um tempo proporcional ao tamanho do empreendimento.

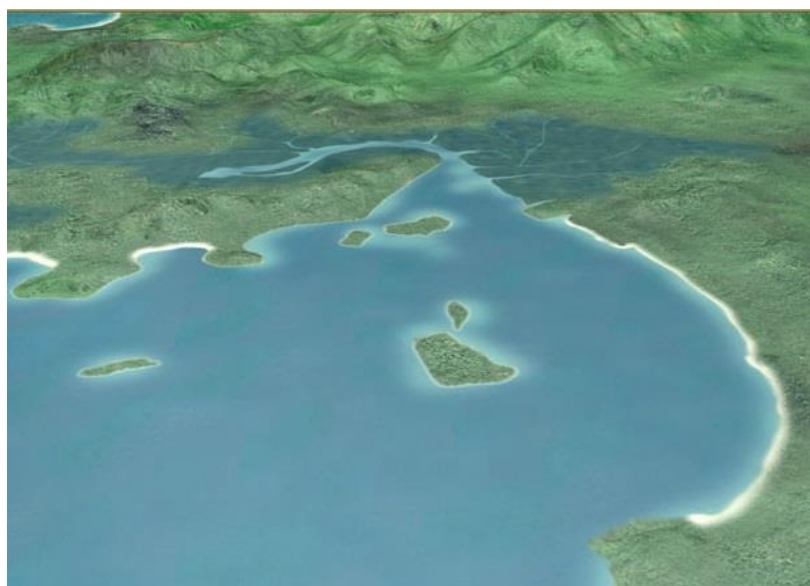
Também ajudou muito essa transformação, a importância da cidade como polo exportador e importador, tanto no ciclo do café como no ciclo do ouro, atraindo mais moradores através de oportunidades de emprego.

Como resultado, a cidade foi se expandindo em direção a o que hoje são os bairros do Catete, São Cristóvão, Tijuca, Vila Isabel e outros. Após uma série de aterros, canalizações e obras de macrodrenagem, a região passa a apresentar uma configuração totalmente diferente: os rios da região do Saco de São Diogo, que antes desaguavam diretamente no mar, passaram a ter que percorrer um trecho maior antes de chegar na Baía de Guanabara, confinados dentro do Canal do Mangue, em uma região muito baixa e controlada pela maré, como apresentado na Figura 4.3.



**Figura 4.3 – Imagem cartográfica do Rio de Janeiro em 1902/1906, apresentando parte da configuração atual do centro do Rio de Janeiro, com Saco de São Diogo confinado no Canal do Mangue.**  
Fonte: Coleção do engenheiro Jorge Achnoor

As imagens da Figura 4.4 apresentam uma representação artística da região portuária da cidade do Rio de Janeiro, nos anos de 1500 e no ano 2000, possibilitando visualizar a profunda alteração antrópica ocorrida nos sistemas hídricos da região onde hoje é a bacia do Canal do Mangue. A região da Bacia do Canal do Mangue foi uma das áreas com maior impacto de alteração antrópica ocasionada pelo processo de expansão urbana da cidade.



(a)



(b)

**Figura 4.4 – Representação figurativa da região portuária da cidade do Rio de Janeiro, no ano de (a) 1500 e no ano (b) 2000. (SMU-RJ<sup>5</sup>)**

---

<sup>5</sup> Secretaria Municipal de Urbanismo, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, *Evolução e Ocupação Urbana*. Disponível em: <portalgeo.rio.rj.gov.br/EOUrbana/>, acessado em: 20/08/2014.

O resultado desse processo de alteração antrópica da superfície e do sistema de drenagem naturais da bacia, visava criar áreas de desmontes e aterros para permitir a expansão da urbanização, tendo em vista o crescimento da Cidade do Rio de Janeiro. Isto levou a profundas modificações nos sistemas de escoamentos pluviais da bacia do Canal do Mangue, tanto superficiais quanto subterrâneos, principalmente nas áreas mais baixas, nos trechos finais dos corpos fluviais.

A imagem apresentada na Figura 4.5 mostra toda a área aterrada para a expansão da ocupação urbana da cidade, mostrando indícios claros do porquê da região ser tão sensível às inundações.



**Figura 4.5 – Área aterrada na região portuária da cidade do Rio de Janeiro, destacada em amarelo. (SMU-RJ<sup>6</sup>)**

Portanto, a atual configuração da bacia do Canal do Mangue (BCM) resultou das obras de recuperação de áreas de manguezais, brejos, lapas temporárias e alagadiços. Em tais terrenos de baixadas recuperadas se encontra grande parte da atual planície exutória do Canal do Mangue.

A nova configuração urbana, introduzida no início do século XX, reuniu os escoamentos fluviais de toda a bacia em um único canal artificial principal, que substituiu o antigo “braço de mar” conhecido como Saco de São Diego. Esse canal artificial, conhecido como

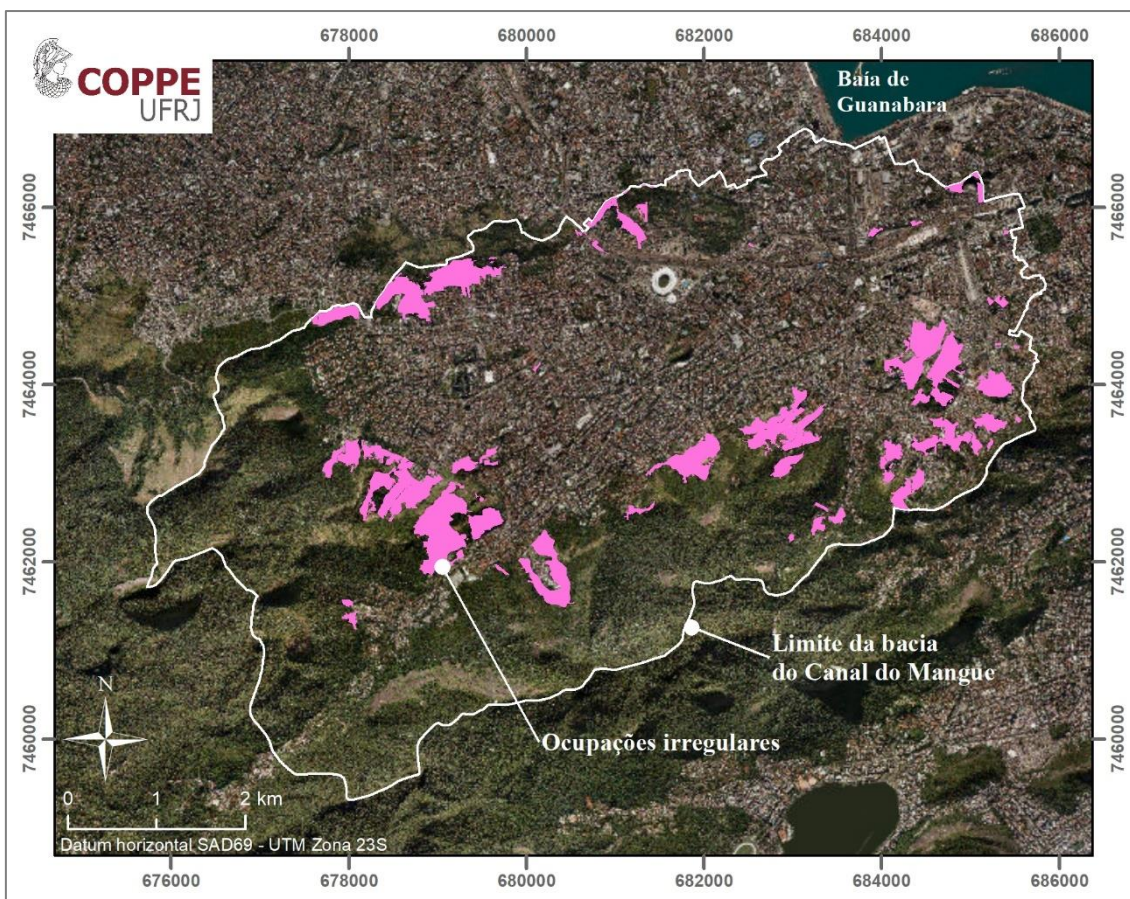
---

<sup>6</sup> Secretaria Municipal de Urbanismo, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, *Evolução e Ocupação Urbana*. Disponível em: <portalgeo.rio.rj.gov.br/EOUrbana/>, acessado em: 20/08/2014.

Canal do Mangue, passou a transportar as cheias fluviais para a Baía de Guanabara, próximo ao atual Cais do Porto.

Na ocorrência de pesadas precipitações, a nova conformação resultante dos trabalhos urbanísticos do início do século, passou a constituir sério problema ambiental, o qual cada vez mais se agravava com o desenvolvimento urbano e ocupacional das áreas de contribuição hídrica da bacia.

O intenso processo de urbanização do solo da bacia (excesso de impermeabilizações; capeamentos, etc.) e o traçado e demais características hidráulicas impostas aos Canais do Mangue, do Maracanã e aos demais afluentes, justamente em região das mais ocupadas e estratégicas para a circulação de pessoas e veículos, levaram à inevitável concentração de fortes vazões de enchentes aos dois principais canais acima referidos. Tal situação foi ainda mais afetada pela pesada favelização de áreas de encostas (Figura 4.6), aumentando as descargas hídricas de montante e o transportes de sólidos, material erodido do solo exposto e resíduos sólidos urbanos.



**Figura 4.6 – Localização das ocupações irregulares por favelas na bacia do Canal do Mangue, majoritariamente em áreas de encosta.**

Incrivelmente, podemos hoje descrever os principais problemas encontrados no sistema de drenagem da bacia do Canal do Mangue, no que concerne às inundações urbanas, reproduzindo o diagnóstico apresentado pelo Plano Agache na década de 1920 (BRITTO, 2012):

- ✓ As canalizações não foram realizadas sempre em espaços públicos, havendo trechos que cruzam propriedades privadas com edificações, que dificultam o acesso para reparações e manutenção;
- ✓ As dimensões e materiais utilizados na rede de drenagem variam conforme o período em que foram instaladas, gerando problemas de insuficiência hidráulica em determinados trechos, com seções transversais em partes da rede a jusante de diâmetro inferior que a montante, induzindo a obstruções;
- ✓ A obsolescência do sistema associada aos materiais de qualidade ruim empregados para construção da rede de drenagem;
- ✓ Operação precária da rede de drenagem;
- ✓ Sobrecarga da rede devido ao rápido escoamento superficial drenado pelas montanhas, que ainda transportam diversos detritos que obstruem as galerias e canais.

Adicionado a estes problemas, nos dias presentes, há ainda um forte vetor de adensamento urbano na bacia, com ocupações irregulares nas encostas e consolidação das edificações construídas sobre ou muito próximas aos cursos d'água, como mencionado no Plano Agache. Apesar de diversos investimentos para lidar com os problemas associados a essa configuração do sistema de drenagem, a rede tende a se apresentar cada vez mais obsoleta. Ao longo dos próximos itens, são apresentadas características gerais da bacia, assim como os principais planos de intervenção no sistema de drenagem.

## **4.2 Características Físicas da BCM**

A bacia hidrográfica do Canal do Mangue se localiza na zona norte da cidade do Rio de Janeiro e possui uma área de drenagem de 45,4 km<sup>2</sup>, apresentada na imagem da Figura 4.7. Tem como limite ao norte a bacia do Canal do Cunha, ao leste a Baía de Guanabara e a bacia do Centro, ao sul e oeste o maciço da Tijuca. Os principais cursos d'água da

bacia hidrográfica do Canal do Mangue são os rios Maracanã, Joana, Trapicheiros, Comprido e Papa-Couve, os quais têm suas nascentes no Maciço da Tijuca ou na Serra do Engenho Novo, e afluem para o Canal do Mangue que, por sua vez, deságua na Baía de Guanabara.

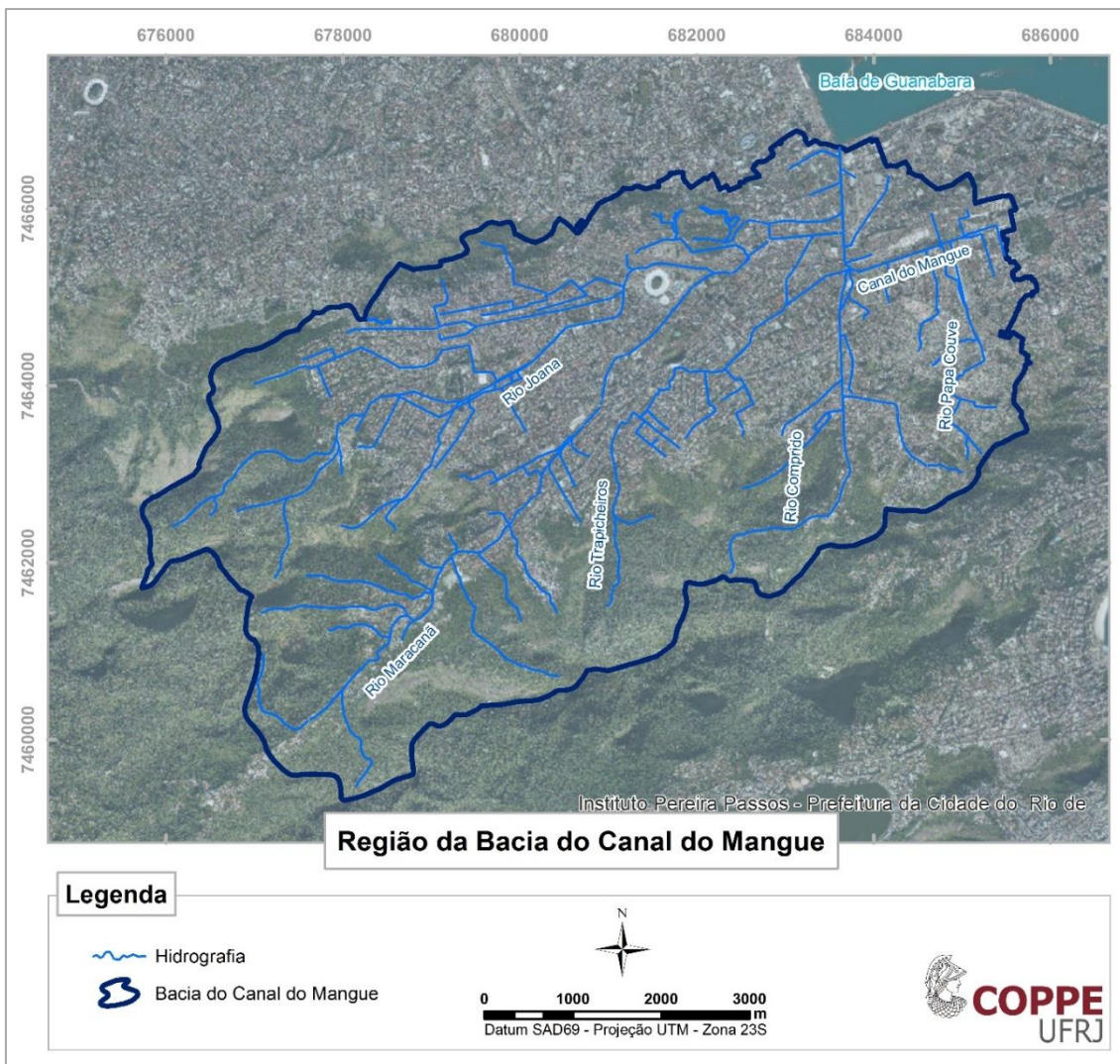
O **rio Maracanã** tem sua nascente junto à Pedra do Conde, na Floresta da Tijuca, na elevação de 730m, e percorre uma extensão de 8,5 km, até sua foz no Canal do Mangue. Até a região do largo da Usina ele recebe inúmeros afluentes, entre eles, o rio São João. Após o Largo da Usina o rio Maracanã percorre seu trecho urbano até sua foz no Canal do Mangue.

O **rio Trapicheiros** tem sua nascente próxima ao Alto do Sumaré, na Floresta da Tijuca, na elevação aproximada de 300 m, percorrendo a extensão de 5,9 km até sua foz no rio Maracanã. Em virtude da implementação de um extravasor, atualmente a vazão na foz do rio Trapicheiros é dividida entre o rio Maracanã e o Canal do Mangue.

O **rio Joana** tem sua nascente junto ao Pico do Andaraí Maior, na Floresta do Grajaú, na elevação de 600m. Ele é formado pelos rios Perdido e Jacó e percorre uma extensão total de 8,0 km até sua foz, no rio Maracanã.

O **rio Comprido** tem sua nascente em uma área de mata nativa localizada na Serra do Sumaré, junto ao Morro do Sumaré, na elevação 590 m. Este rio percorre uma extensão de 4,5 km até sua foz no Canal do Mangue.

O **rio Papa-Couve** tem sua nascente em uma área bastante antropizada localizada no morro do Catumbi. Ele percorre 2,9 km até sua foz no Canal do Mangue, dos quais 600 m correspondem à sua extensão em seção aberta.



**Figura 4.7 – Região da bacia hidrográfica do Canal do Mangue**

O canal do Mangue tem seu ponto inicial na Avenida Presidente Vargas, na altura da Rua Marquês de Sapucaí. Após percorrer uma extensão de 1400 m o canal apresenta uma curva acentuada de 90°, alterando seu curso em direção à Baía de Guanabara.

Ao todo, o Canal do Mangue percorre uma extensão de 2800 m. Ao longo de seu curso, o canal recebe como afluentes os rios Papa-Couve, Comprido e Maracanã, além do extravasor do rio Trapicheiros e inúmeras galerias.

#### **4.2.1 Caracterização Geológica, Geomorfológica e Pedológica**

Na região leste e sudoeste da bacia do Canal do Mangue encontra-se parte do o maciço cristalino denominado maciço da Tijuca, constituído predominantemente por rochas gnáissicas, pré-cambrianas, de constituição variada. As demais áreas da bacia estão localizadas na planície sedimentar da Guanabara.

A Floresta do Grajaú e Serra do Engenho Novo, onde está localizada a cabeceira do Rio Joana, possui formação geológica com uma distribuição homogênea de solos residuais e rocha, alternando espessuras inferiores e superiores a 2 m, mesclados com afloramentos rochosos do tipo maciços, além de uma extensa mancha de depósito de talus/colúvio e uma mancha de zonas de concentração de blocos.

Na cabeceira do rio Maracanã, junto à área da Floresta da Tijuca, há uma predominância de solo residual e rocha com espessura superior a 2 m, mesclado a pequenas manchas de solo residual e rocha com espessuras inferiores a 2 m. Também ocorrem afloramentos rochosos do tipo maciços e depósito de talus/colúvio.

Na cabeceira do rio Comprido e do rio Trapicheiro, junto à Floresta da Tijuca, nas proximidades da região da Serra do Sumaré, ocorre uma distribuição homogênea entre solos residuais e rocha com espessuras inferiores e superiores a 2 m, mesclados com afloramentos rochosos do tipo maciços. Há também uma extensa mancha de depósito de talus/colúvio e uma mancha de zonas de concentração de blocos.

Na cabeceira do rio Papa-Couve, junto ao Morro do Catumbi, encontra-se a formação geológica do tipo solo residual de topo e encosta com espessuras superiores a 2 m. As regiões de cabeceiras são ocupadas por áreas florestais, o que auxilia na manutenção destes solos.

Nas áreas de baixada, onde há ocupação urbana, ocorrem formações quaternárias de solos, com depósitos aluvionares, marinhos e eólicos. Nestas áreas, encontram-se dispersas pequenas elevações, onde é encontrado solo residual de topo e encosta com espessuras superiores a 2m.

Quanto à pedologia, estão presentes na bacia do Canal do Mangue os seguintes solos (EMBRAPA, 2004):

- ✓ Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico câmbico ou saprolítico + Argissolo Amarelo Eutrófico câmbico ou Léptico, ambos de textura média argilosa + Neossolos Litólico Eutrófico típico, com textura média ou média cascalhamento, Tb, substrato rochas gnáissicas, todos com A moderado;



- ✓ Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico ou abrupto + Argissolo Amarelo Distrófico típico ou abrupto + Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico típico ou abrupto, todos com textura média/argilosa e com A moderado;
- ✓ Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico câmbico ou típico + Latossolo Amarelo Distrófico câmbico ou típico, ambos com textura argilosa + Cambissolo Hálpico, Tb, Distrófico latossólico ou típico, textura argilosa ou média cascalhenta, substrato de rochas alcalinas ácidas + Neossólico Litólico Distrófico típico, textura média cascalhento ou média, Tb, substrato rochas alcalinas ácidas, todos com A moderado.

#### **4.2.2 Relevo**

O relevo da bacia do Canal do Mangue apresenta acentuados desnivelamentos nas regiões oeste e sudoeste, onde está localizado o Maciço da Tijuca. Estes desnivelamentos fazem fronteira com uma região de topografia menos acidentada e com relevo mais plano, onde ocorre a urbanização da bacia. Cerca de 45% da área da bacia corresponde a região onde o aclave é menor do que 10% e a cota inferior a 50 m. As encostas da bacia encontram-se ocupadas principalmente por florestas nativas ou replantadas ou por vegetação rasteira. No entanto, estas encostas também são ocupadas por comunidades, as quais contribuem fortemente para a instabilidade das mesmas. A Figura 4.8 apresenta um Modelo Digital de Terreno da bacia do Canal do Mangue, onde é possível observar nitidamente o Maciço da Tijuca, com suas íngremes encostas, e a região de baixada da bacia, praticamente plana.

As principais montanhas que formam o Maciço da Tijuca são: o Pico da Tijuca, a Pedra da Gávea, o Bico do Papagaio, o Pico da Cocanha, o Pico Tijuca Mirim, o Pico do Andaraí Maior e o Corcovado, onde se localiza o Cristo Redentor. Algumas dessas montanhas alcançam mais de 1000 m de altitude, e podem ser vistas de toda a cidade. Nas vertentes do Maciço da Tijuca nascem diversos cursos d'água que contribuem para as bacias da Baía de Guanabara, da Zona Sul e de Jacarepaguá.

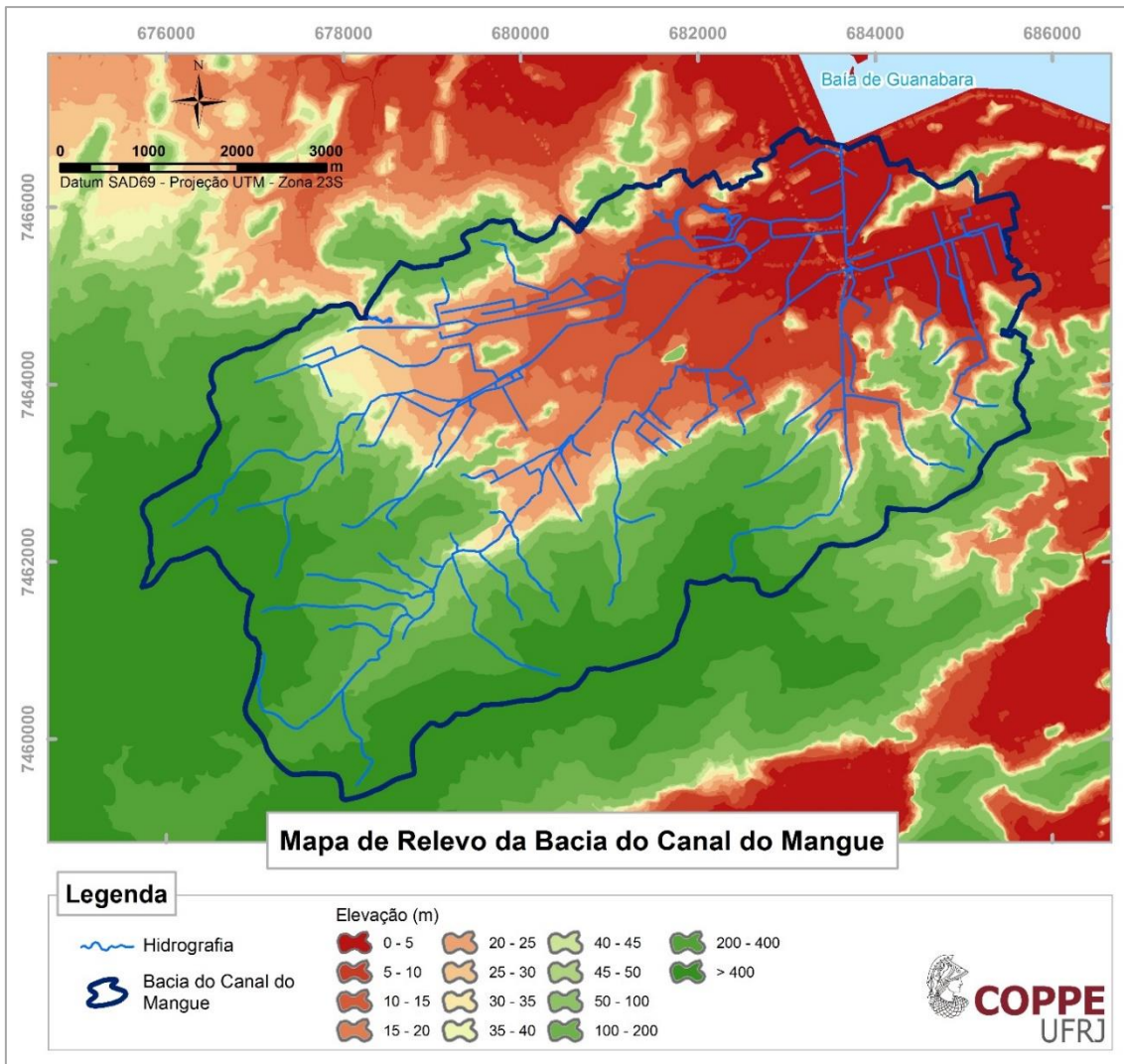


Figura 4.8 – Relevo da bacia do Canal do Mangue

### 4.2.3 Vegetação

A cobertura vegetal original da bacia era bastante rica em diversidade. Caracterizava-se pelo manguezal na parte mais baixa até as florestas das encostas dos morros, passando pela restinga alta característica deste tipo de transição. O manguezal rapidamente foi devastado pelo crescimento da cidade. Posteriormente a restinga alta também cedeu lugar às fazendas que ali se instalaram. Com o ciclo do café, inclusive algumas áreas de encostas da Cidade do Rio de Janeiro, como a região do Alto da Boa Vista, por exemplo, foram devastadas para o plantio. No século XIX, por ordem do Imperador, o Major Archer comandou um grupo de escravos que fizeram o reflorestamento de parte dessas encostas devastadas, onde hoje se localiza a Floresta da Tijuca. Atualmente, a cobertura vegetal da bacia se restringe às áreas de encostas e é protegida pelo Parque Nacional da Tijuca e pela Reserva Florestal do Grajaú.

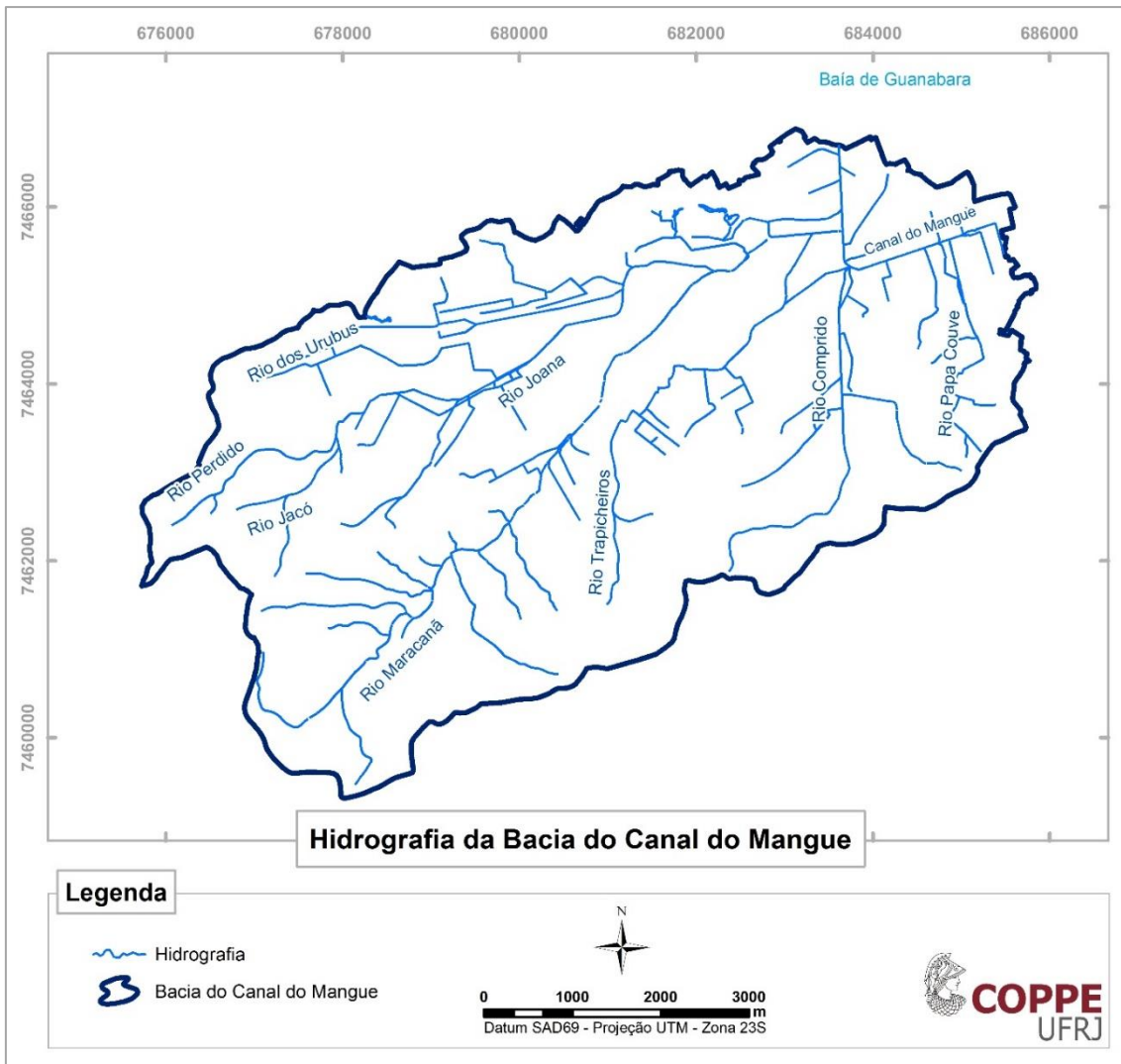
#### **4.2.4 Clima**

A bacia do Canal do Mangue, como todo o município do Rio de Janeiro, classifica-se na região térmica Tropical Úmida e está sujeita aos efeitos de sistemas frontais e de linhas de instabilidade. Estes, por sua vez, podem ser alterados pela ação de efeitos locais relacionados ao relevo. Os efeitos orográficos podem ser notados ao se observar que as precipitações médias mensais durante os meses chuvosos variam de 120mm, no posto Benfca, até 190mm, na estação Capela Mayrink, sendo crescentes com o aumento a altitude do posto.

As condições climáticas são fortemente influenciadas pela atuação do Anticiclone Tropical Atlântico que ocorre, na maior parte do ano, próximo à costa do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Trata-se de um núcleo de alta pressão, ar úmido e pouca nebulosidade, o que proporciona elevadas temperaturas. Estas geram grandes índices de evaporação que, agregados à influência marítima, representada pela Corrente do Brasil, constituída de águas quentes junto à costa, são responsáveis pela ocorrência de chuvas convectivas, principalmente nos finais de tarde do verão. Este tipo de fenômeno atmosférico é caracterizado por grande intensidade e efeito local e ocasiona graves consequências para áreas de riscos e para a drenagem urbana. A temporada de chuvas convectivas acontece, normalmente, de novembro a abril e é neste período que é registrado o maior número de ocorrências de enchentes na cidade. A região está também sujeita à passagem de frentes frias, ocasionadas pelo deslocamento de massas polares oriundas do Círculo Polar Antártico, mais frequentes no período do inverno. Este fenômeno é responsável por precipitações de menor intensidade, porém de longa duração e maior abrangência regional, sendo mais influente na drenagem sub-superficial do que na drenagem superficial.

#### **4.2.5 Fluviomorfologia**

Neste item é apresentada a caracterização física das principais sub-bacias (Figura 4.9) da bacia do Canal do Mangue, que são: Bacia do rio Joana; Bacia do rio Maracanã; Bacia do rio Trapicheiro; Bacia do rio Comprido e; Bacia do rio Papa-couve.



**Figura 4.9 – Principais rios da bacia do Canal do Mangue**

**BACIA DO RIO JOANA** (Área de drenagem = 11,9km<sup>2</sup>)

O rio Joana nasce junto ao Pico do Andaraí Maior, na Reserva Florestal do Grajaú, na altitude aproximada de 600m, no bordo oeste da BCM. Denomina-se rio Perdido em seu estirão inicial. Após confluência com o rio Jacó, vindo de vertente vizinha ao sul, passa a chamar-se Joana. Acima da confluência com o Jacó, a bacia do Joana é quase toda ocupada por mata nativa densa e vegetação arbustiva com gramíneas.

Descendo o Grajaú, o curso d'água torna-se uma galeria urbana percorrendo área muito antropizada, vindo a reaparecer como canal aberto na confluência das ruas Barão de Mesquita e Maxwell, no Andaraí, já tendo recebido o rio Andaraí, vindo do morro e favela do mesmo nome. Deste ponto em diante desce o Joana recebendo as águas de drenagem dos bairros do Andaraí, Santa Isabel e parte da Tijuca, bem como da Serra do Engenho Novo,

até um pouco antes do cruzamento com a linha ferroviária da Supervia, junto à UERJ, onde ele volta a correr capeado. Sua foz é na confluência com o rio Maracanã, em frente à Estação de São Cristóvão, na cota 1,63m, após fluir por 7900m.

#### BACIA DO RIO MARACANÃ (Área de drenagem = 11,7km<sup>2</sup>)

Apesar do rio Maracanã drenar uma área menor que a área de drenagem do rio Joana, é um curso d'água mais extenso, com 8,5km de comprimento. Ele nasce junto à Pedra do Conde, na Floresta da Tijuca, com cota aproximada de 730m, de onde desce percorrendo a Reserva Florestal da Tijuca até atingir o Largo da Usina, aproximadamente na cota 80m, recebendo afluentes de ambas as margens no seu estirão superior, entre eles o rio São João. A partir daí, o rio corre em calha mais aprofundada, com alturas acima de 4,00m, em região de fundo rochoso e com muros laterais em alvenaria de pedra, drenando os bairros da Usina e Muda adjacentes a vertentes montanhosas muito arborizadas e ainda pouco antropizadas, até os Morros do Borel e Formiga. Deste trecho em diante, os riscos ambientais se intensificam significativamente pela ocupação humana. Nessa região é que ele recebe, na Muda, os rios Agostinho e Cascata, dois de seus mais importantes afluentes pela margem direita.

Por volta da cota 20,00m, o rio, já com pouca declividade e totalmente revestido, passa a ser margeado pela Avenida Maracanã, na Tijuca, até a sua foz, na confluência com o Joana, em frente à Estação de São Cristóvão.

O rio Maracanã, ao mesmo tempo que é o mais extenso curso d'água natural da BCM, curiosamente é o que apresenta menor índice de capeamento: dos seus 8,5km, apenas 720m, aproximadamente, correspondem a galerias subterrâneas.

#### BACIA DO RIO TRAPICHEIRO (Área de drenagem = 6,1km<sup>2</sup>)

O rio Trapicheiro é o principal eixo de drenagem do bairro da Tijuca. Ele nasce na Reserva Florestal da Tijuca (cota 300m), abaixo do Alto do Sumaré e a meia altura das vertentes da Serra do Sumaré, ao sul da confluência das ruas Uruguai e Conde de Bonfim.

Suas nascentes são muito pouco antropizadas, apesar de compreendidas entre as comunidades dos Complexos da Formiga e Salgueiro. A cobertura florística dessa região, na quase sua totalidade, é por mata nativa densa. A antropização maior do curso d'água é a partir da rua Henry Ford, onde o rio torna-se uma galeria que só vai reaparecer como

trecho aberto, salvo em trechos isolados (o maior deles atrás da Praça Saens Peña), na rua Heitor Beltrão com Marques de Valença, ao lado da Igreja São Francisco Xavier. Entre esse ponto e a rua Henry Ford, o rio é integralmente mutilado de sua natureza fluvial original, com mudanças abruptas na forma das seções e na direção do leito, embocaduras e cruzamentos hidráulicamente inadequados, passagens sob edificações, endicamentos nas margens, assoreamento e deposição de lixo na calha, etc. Nesse trecho, ele drena os Morros do Salgueiro e Turano, à sua direita.

Finalmente o rio volta a percorrer longo trecho capeado após seu cruzamento com a rua Prof. Gabizo (próximo à Praça Afonso Pena), só reaparecendo como canal à céu aberto após a passagem ao lado da Praça da Bandeira e seu cruzamento, logo à frente, sob a ponte ferroviária da Supervia. Daí em diante, o Trapicheiro segue aberto até novo cruzamento ferroviário sob o terminal de Estação da Leopoldina, de onde, mais uma vez contraído e capeado, flui para seu deságue no Canal do Maracanã, à rua Francisco Eugênio, com cota do fundo -0,37m, após fluir por 5900m.

Deve-se dizer que antes de passar pela Praça da Bandeira, atrás do Instituto de Educação, há um grande extravasor do rio Trapicheiro, que passa enterrado sob a rua Barão de Iguatemi, a linha do Metrô e o Viaduto dos Pracinhas, até seu deságue no Canal do Mangue, ao lado do rio Comprido. De fato, o leito histórico do rio Trapicheiro é o que corresponde a esse braço direito que se inicia sob a rua Barão de Iguatemi.

Como se vê, o rio Trapicheiro possui desenho complexo e não planejado, sendo profundamente antropizado nos 3900m de seu estirão final mais urbanizado da Tijuca e Praça da Bandeira.

#### BACIA DO RIO COMPRIDO (Área de drenagem = 5,8 km<sup>2</sup>)

O rio Comprido é o que drena o bairro do mesmo nome, também parte do Estácio (margem direita) e da Tijuca (margem esquerda). Nasce na Serra do Sumaré, junto ao Morro do Sumaré, aproximadamente na cota 590m, em área de mata nativa. Já na cota 150m, se nota a pesada ação antrópica de comunidades que se estabeleceram às suas margens. Desse ponto para baixo, o curso d'água desce a Serra do Sumaré até encontrar a avenida Paulo de Frontin que o margeia até seu deságue no Canal do Mangue, abaixo do Viaduto dos Pracinhas. Junto à avenida Paulo de Frontin o rio corre quase sempre aberto, num

desenho reto, em canal revestido. Após fluir por 4500m, o curso d'água encontra o Canal do Mangue na cota -0,56m.

Há uma galeria extravasora na margem direita do rio Comprido, uns 200m abaixo do cruzamento com a rua João Paulo II. Esse duto extravasor segue paralelo ao trecho capeado final do rio principal, e seus deságues se dão lado a lado no Canal do Mangue.

#### BACIA DO RIO PAPA-COUVE (Área de drenagem = 1,8km<sup>2</sup>)

Essa é a menor bacia dos maiores cursos d'águas naturais que afluem ao Canal do Mangue. Ele já nasce em região antropizada, no Morro do Catumbi, logo abaixo da rua Almirante Alexandrino (na cota 160m), em Santa Teresa. De fato, esta bacia acha-se praticamente toda urbanizada, correspondendo ao bairro do Catumbi. Sua região afluente é ao sul, no Complexo da Favela do Catumbi, onde ele nasce.

Após percorrer cerca de 600m como um canal aberto e ambientalmente degradado, na confluência com a rua Eliseu Visconti ele se torna praticamente uma galeria de águas pluviais, e assim permanece até o deságue no Canal do Mangue, na cota 0,28m, a uns 200m a oeste do Monumento ao Zumbi, na avenida Presidente Vargas. Sua extensão total é de 2900m.

Há um duto extravasor no rio Papa-Couve, junto à sua passagem pela rua Frei Caneca. Esse extravasor segue paralelo ao curso d'água original e deságua no Canal do Mangue cerca de 200m a jusante do deságue do rio principal.

### **4.3 Características Sócioeconômicas e ambientais da BCM**

O processo histórico de ocupação do Rio de Janeiro reservou as áreas mais planas e mais próximas a centros econômicos a uma parcela com maior poder aquisitivo da população, deixando, como opção, a ocupação das encostas para as famílias com maior vulnerabilidade social. Na bacia do Canal do Mangue não foi diferente e nota-se, muito nitidamente, a separação entre a cidade formal, estabelecida na parte mais baixa da bacia, e informal, espalhada pelos morros e encostas, como observado por Mamede *et al.* (2015):

Com a ocupação das margens destinada à parte mais abastada da sociedade local, a população de baixa renda inicia a ocupação das encostas de forma precária que, ocorrida desordenadamente e somada às medidas de urbanização do

entorno, resultam, atualmente, em problemas frequentes com as cheias dos principais rios. As favelas proliferaram e ocupam boa parte das encostas em resposta à valorização da terra trazida por implementos e melhorias no sistema de drenagem (...) (MAMEDE *et al.*, 2015).

Diversos bairros da zona norte e alguns do centro fazem parte da bacia do Canal do Mangue, como pode ser visto no mapa apresentado na Figura 4.10.



**Figura 4.10 – Divisão administrativa da cidade do Rio de Janeiro, na região da bacia do Canal do Mangue, segundo IPP.**

No ano de 2010, a composição socioeconômica dos habitantes da região da bacia do Canal do Mangue se enquadra, em sua maioria, entre as classe B e C, segundo o Critério Brasil (ABEP, 2012) apresentado na Tabela 4.1.

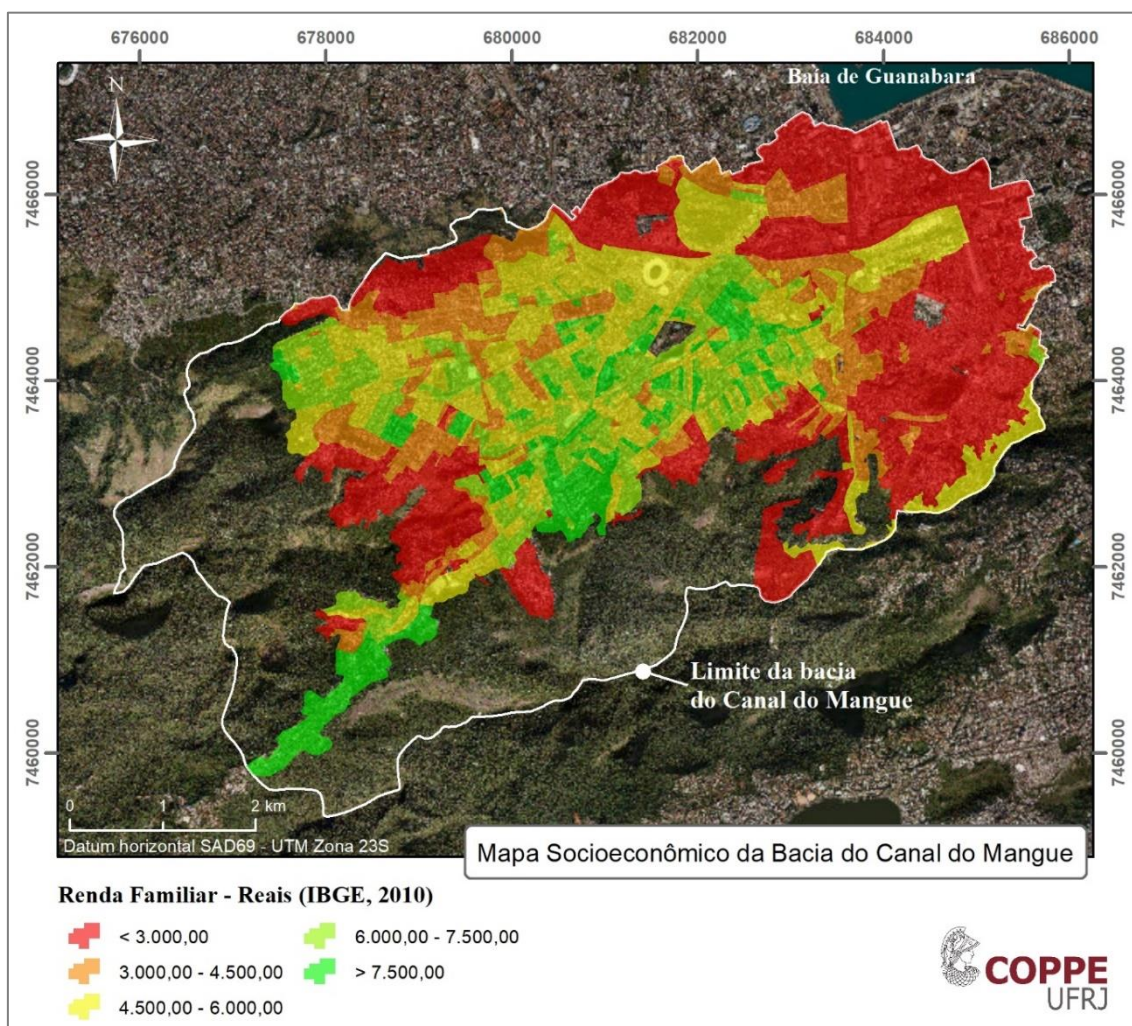


**Tabela 4.1 – Classificação socioeconômica, segundo Critério Brasil**

<b>Classe</b>	<b>Renda (R\$)</b>
A	10.672,00
B1	4.418,00
B2	2.565,00
C1	1.541,00
C2	1.024,00
DE	595,50

ABEP 2012 c/ base LSE 2010

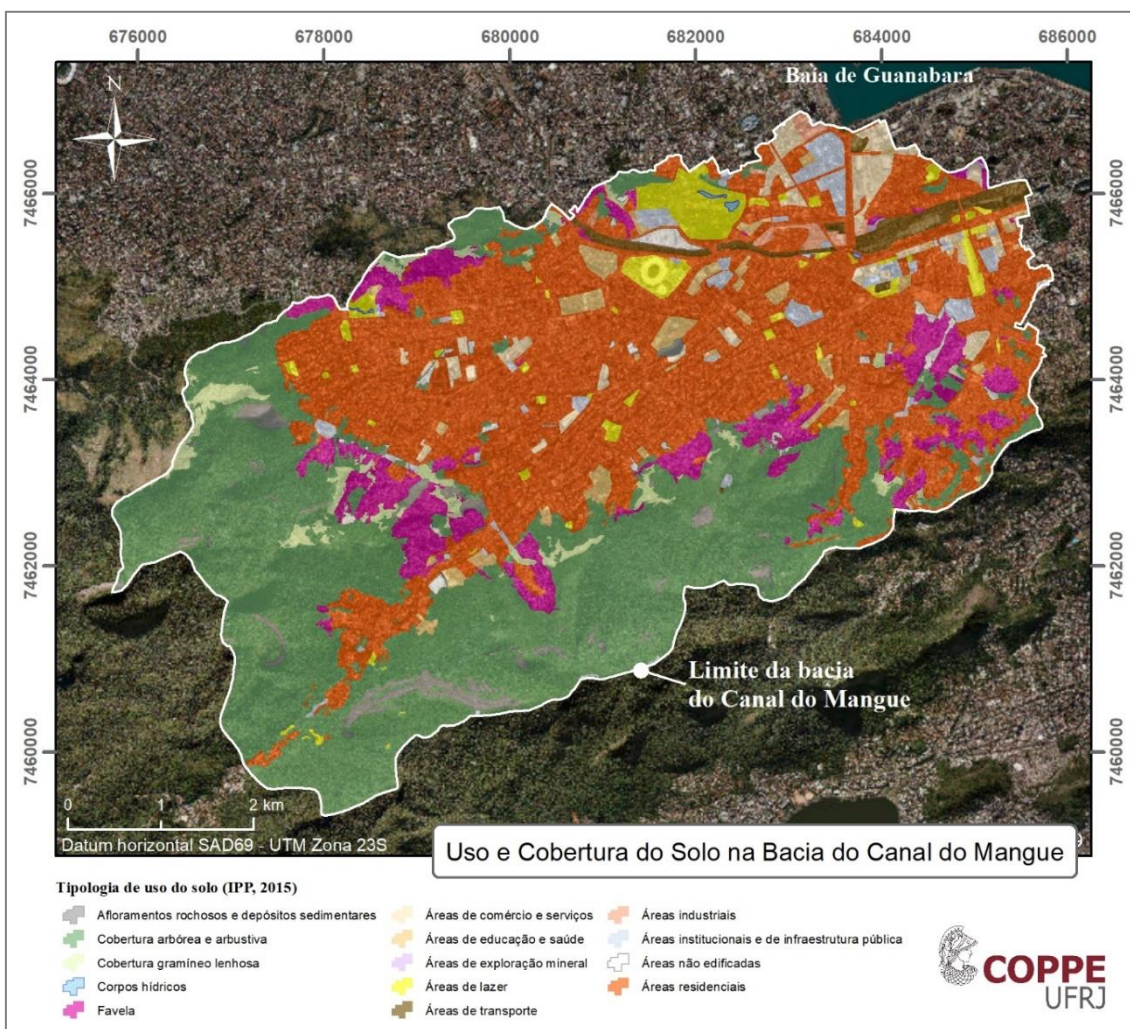
A distribuição socioeconômica é apresentada no mapa da Figura 4.11, que mostra a distribuição de renda familiar na bacia e permite observar a tendência de ocupação das áreas de encosta por famílias de menor renda.



**Figura 4.11 – Mapa socioeconômico da bacia do Canal do Manguê.**

A bacia, apesar de ocupar uma parte da região central e portuária da cidade do Rio de Janeiro, se apresenta com um uso do solo tipicamente residencial, com cerca de 79% de sua área coberta por áreas residenciais.

O intenso processo de ocupação resultou na supressão da maior parte da floresta existente na bacia, restando apenas cerca de 18% de cobertura vegetal, distribuídas entre cobertura arbórea e arbustiva e cobertura gramíneo lenhosa. Os aglomerados subnormais ocupam uma área de aproximadamente 1% do território total da bacia. Esse padrão de ocupação pode ser visto no mapa de uso do solo, apresentado na Figura 4.12.

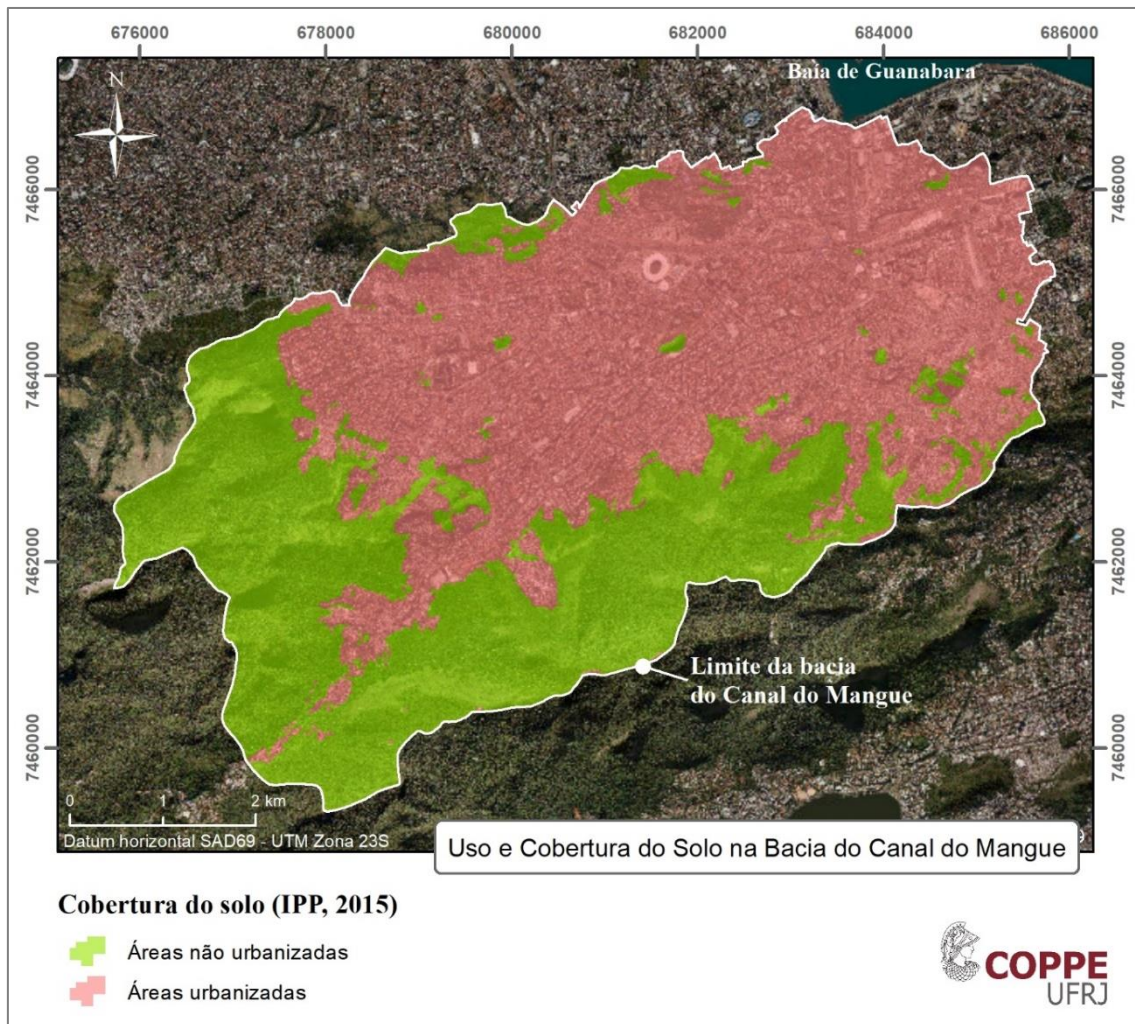


**Figura 4.12 – Tipologia dos diversos usos do solo encontrados na bacia do Canal do Mangue.**

Esse intenso processo de ocupação transformou a bacia em uma região majoritariamente urbana, com um índice de urbanização de 81%, concentrado nas áreas mais planas. O

remanescente florestal, encontrado nas encostas, localiza-se em regiões de alta declividade, favorecendo um escoamento superficial muito rápido, com pouca capacidade de amortecimento e retenção da água de chuva precipitada em eventos hidrológicos intensos.

O mapa da Figura 4.13 apresenta a situação de urbanização da bacia do Canal do Manguê.



**Figura 4.13 – Urbanização da bacia do Canal do Manguê**

Na área urbana, ocupada majoritariamente para uso residencial, como observado anteriormente (Figura 4.12), a bacia apresenta alta densidade de ocupação, representado por um grande número de unidades multifamiliares. A densidade domiciliar média da bacia apresenta um valor de 515 domicílios/ha, segundo informações do IBGE (2010), porém, com cerca metade das áreas ocupadas por unidades habitacionais apresentando densidades entre 150 e 422 domicílios/ha.

As informações de densidade domiciliar na bacia do Canal do Manguê estão apresentadas no mapa da Figura 4.14.

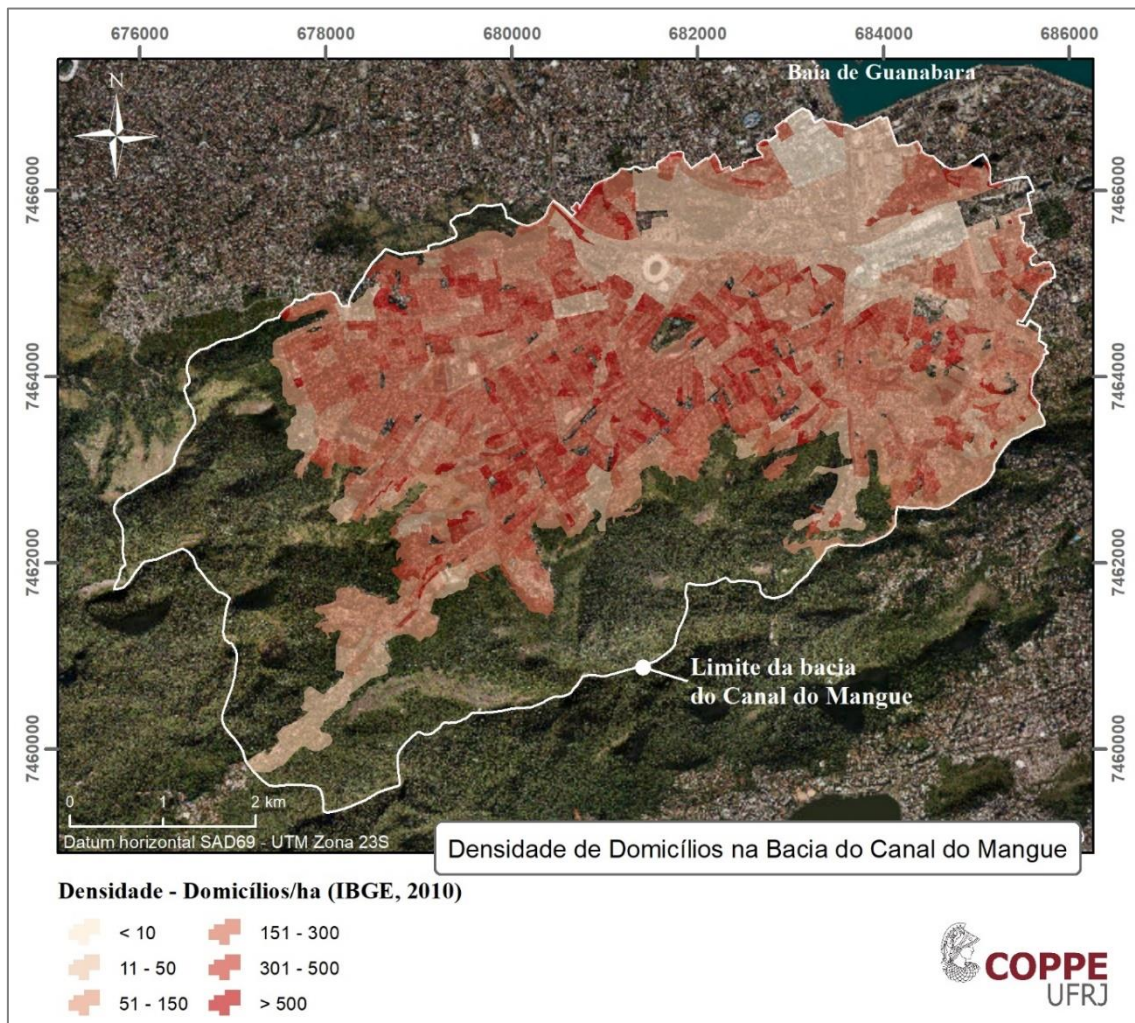
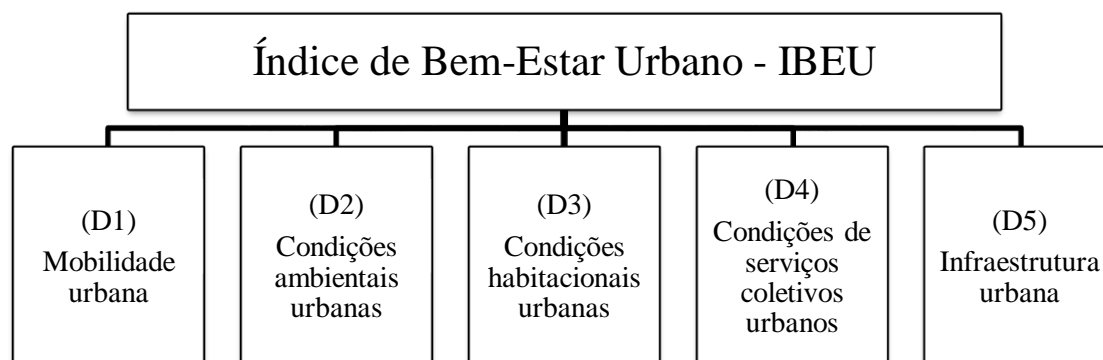


Figura 4.14 – Mapa de densidade domiciliar na bacia do Canal do Manguê.

Em 2013, o Observatório das Metrôpoles publicou um estudo apresentando um índice para medir o bem-estar urbano nas diversas cidades brasileiras. O índice considera as informações do Censo demográfico (IBGE, 2010), compreendendo cinco dimensões, também representadas por subíndices: *mobilidade urbana*, *condições ambientais urbanas*, *condições habitacionais urbanas*, *atendimento de serviços coletivos urbanos* e *infraestrutura urbana*, como apresentado na Figura 4.15. Segundo Ribeiro & Ribeiro (2013):

Todas essas dimensões foram definidas considerando as propriedades necessárias do espaço urbano que podem possibilitar condições coletivas de vida para seus habitantes. Ou seja, todas essas dimensões têm em comum a possibilidade

de serem compreendidas a partir das condições urbanas que favorecem maior ou menor bem-estar para seus residentes (RIBEIRO & RIBEIRO, 2013).



**Figura 4.15 – Dimensões componentes do Índice de Bem-Estar Urbano (RIBEIRO & RIBEIRO, 2013).**

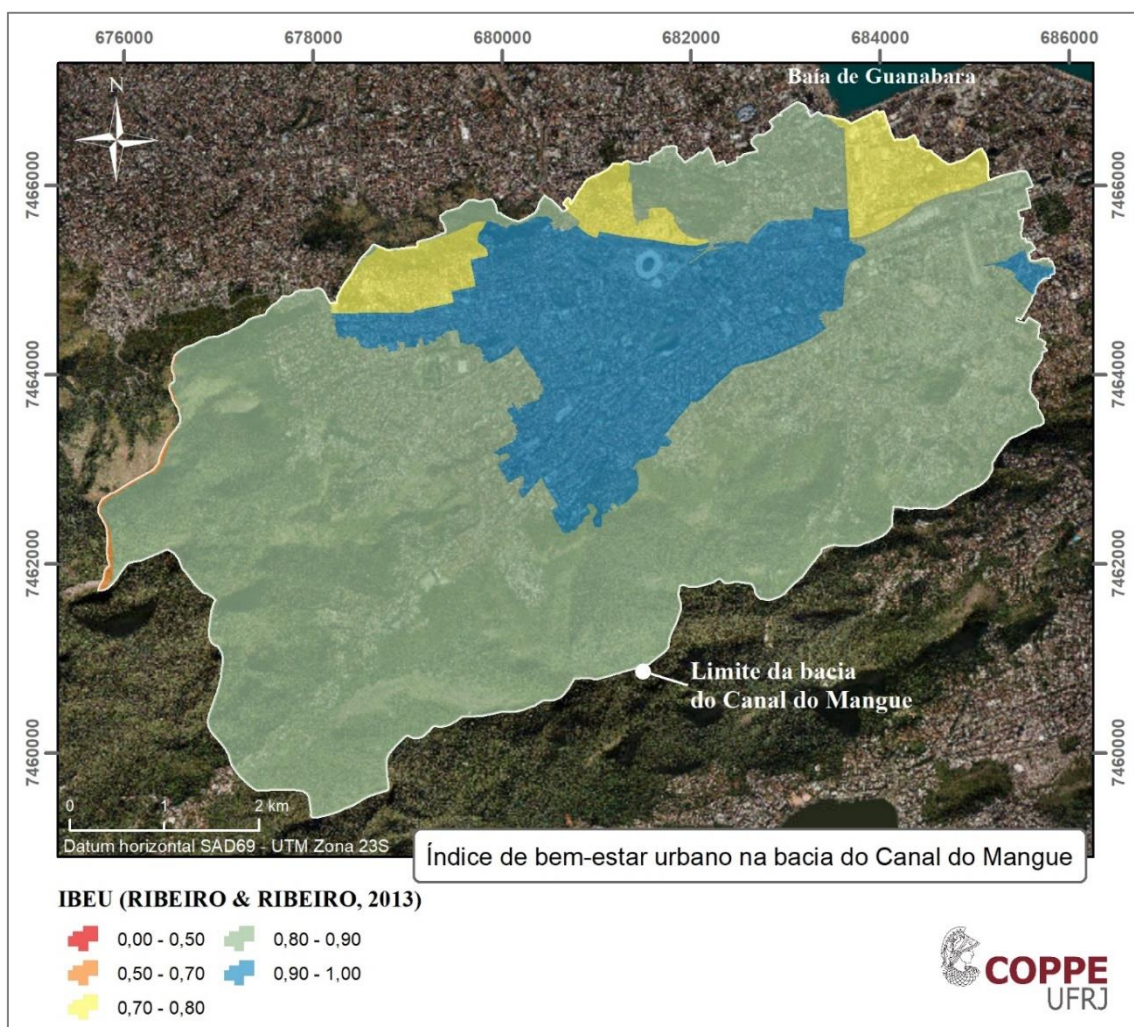
A bacia do Canal do Mangue apresenta bons indicadores para o IBEU, variando entre 0,70 e 1,00. Quanto mais próximo de 1,00, melhores são as condições de vida no meio urbano em análise. Este resultado positivo reflete as informações do censo, que, em muitos casos, passam uma ideia de uma situação melhor que a encontrada localmente, como, por exemplo, as informações de coleta de esgotos sanitários e existência de redes de drenagem. Nestes casos, muitos moradores não sabem definir se seu esgoto realmente vai para uma rede formal de esgotamento sanitário ou se está conectado a uma rede de drenagem pluvial. No caso desta última, é levantada a existência de bocas-de-lobo e meio-fio, não havendo qualquer distinção quanto ao seu real funcionamento.

Os indicadores utilizados em cada dimensão, segundo Ribeiro & Ribeiro (2013), são:

- ✓ *A dimensão de mobilidade urbana (D1) foi concebida a partir do indicador de deslocamento casa-trabalho.*
- ✓ *A dimensão de condições ambientais urbanas (D2) foi concebida a partir de três indicadores: arborização do entorno dos domicílios, esgoto a céu aberto no entorno dos domicílios e lixo acumulado no entorno dos domicílios.*
- ✓ *A dimensão de condições habitacionais urbanas (D3) foi compreendida por quatro indicadores: aglomerado subnormal, densidade domiciliar, densidade morador/banheiro e material das paredes dos domicílios.*

- ✓ A dimensão de atendimento de serviços coletivos urbanos (D4) foi concebida a partir de quatro indicadores: atendimento adequado de água, atendimento adequado de esgoto, atendimento adequado de energia e coleta adequada de lixo.
- ✓ A dimensão de infraestrutura urbana (D5) foi compreendida por sete indicadores: Iluminação pública, pavimentação, calçada, meio-fio/guia, bueiro ou boca de lobo, rampa para cadeirantes e logradouros.

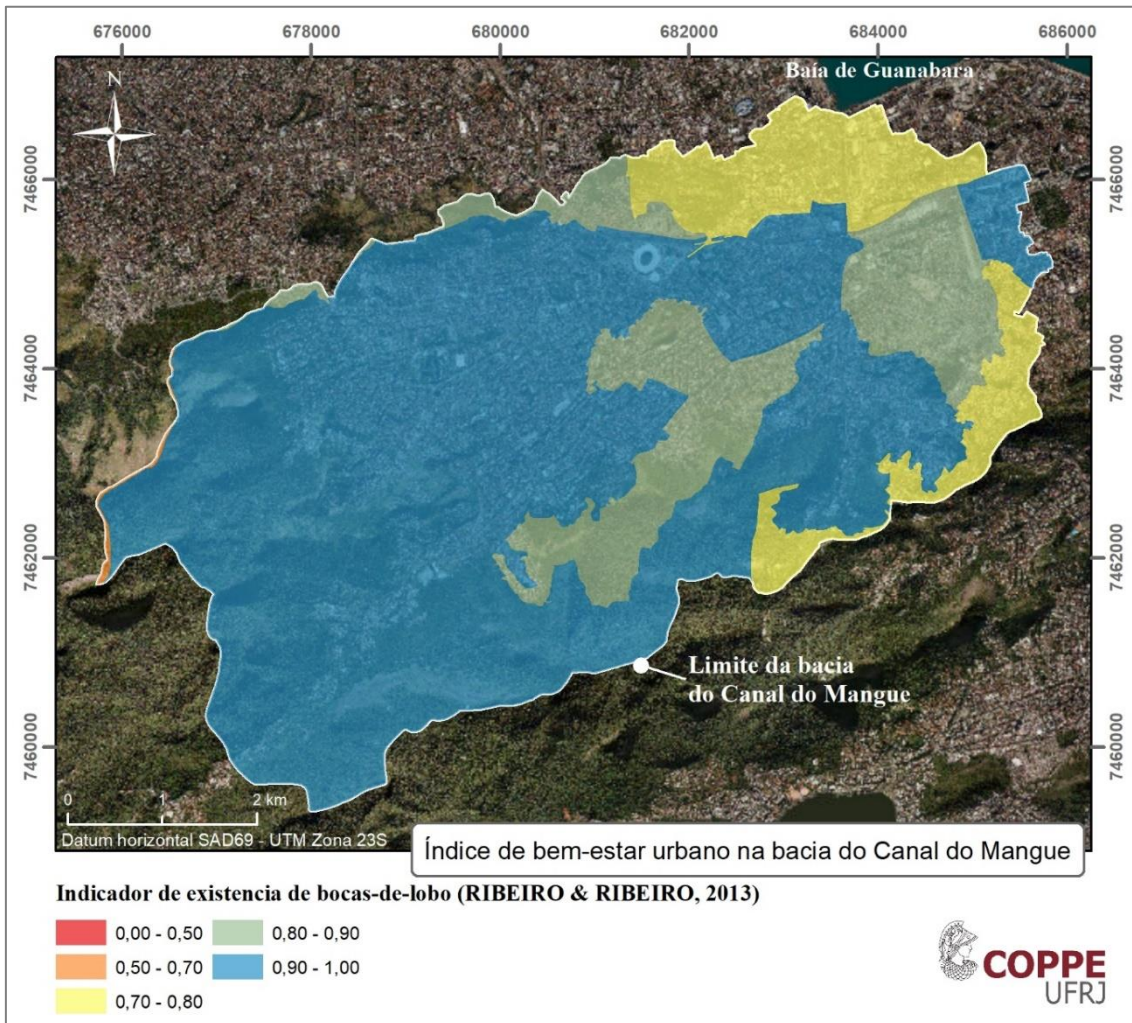
A Figura 4.16 apresenta o mapeamento do índice de bem-estar urbano (IBEU) aplicado à bacia do Canal do Mangue.



**Figura 4.16 – Índice de Bem-Estar Urbano (IBEU) para a bacia do Canal do Mangue.**

Avaliando-se especificamente o indicador de existência de bocas-de-lobo, que deveria indicar as condições de fornecimento de serviço de drenagem urbana de águas pluviais, é possível observar o alto nível de cobertura que a bacia do Canal do Mangue apresenta,

apesar das péssimas condições de funcionamento da rede de microdrenagem, com ocorrência de frequentes alagamentos espalhados pela baía, mesmo durante eventos de cheia sem extravasamento dos canais principais.



**Figura 4.17 – Mapeamento do indicador de existência de boca-de-lobo na bacia do Canal do Mangue.**

As informações socioeconômicas são muito importantes para conhecimento de parte da vulnerabilidade às inundações na bacia, reconhecendo que as características de exposição, representada pela densidade domiciliar, e vulnerabilidade socioeconômica, representada pela renda familiar, influenciarão diretamente o potencial de danos e prejuízos em decorrência de uma eventual inundação.

Assim, adicionalmente ao conhecimento da situação socioeconômica da bacia, é necessário conhecer quais são as áreas mais propensas a sofrer alagamentos durante eventos de chuvas intensas. As inundações se apresentam como um forte vetor de degradação, tanto urbana, quanto ambiental, afetando diretamente o bem-estar da população na bacia.

#### **4.4 Áreas de Inundação Recorrentes**

No âmbito do Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Rio de Janeiro, foi elaborado um mapa de inundações incluindo relatos posteriores à chuva de 5 e 6 de abril de 2010, a qual foi responsável pelo alagamento de diversos pontos, causando grandes transtornos e muitos prejuízos, deixando a cidade parada por um dia.

A Figura 4.18 apresenta o mapeamento de áreas com recorrência de alagamento na bacia, registrados pela Prefeitura Municipal. Segundo o PDMAP (2010), os pontos mais críticos são:

- ✓ Rio Maracanã
  - Área que se estende do Estádio do Maracanã até a foz do rio Joana;
  - Região da Rua Uruguai;
  - Região a jusante do Shopping Tijuca.
  
- ✓ Rio Trapicheiros
  - Região da Praça da Bandeira;
  - Região entre as ruas Prof. Gabizo e Gonçalves Crespo.
  
- ✓ Canal do Mangue
  - Região que se estende da foz dos rios Trapicheiros e Comprido até a foz do rio Maracanã;
  - Região entre as ruas Júlio do Carmo e Av. Salvador de Sá.
  
- ✓ Rio Comprido
  - Região da Rua do Matoso;
  
- ✓ Rio Joana
  - Entre a Rua São Francisco Xavier e Av. Prof. Manoel de Abreu.



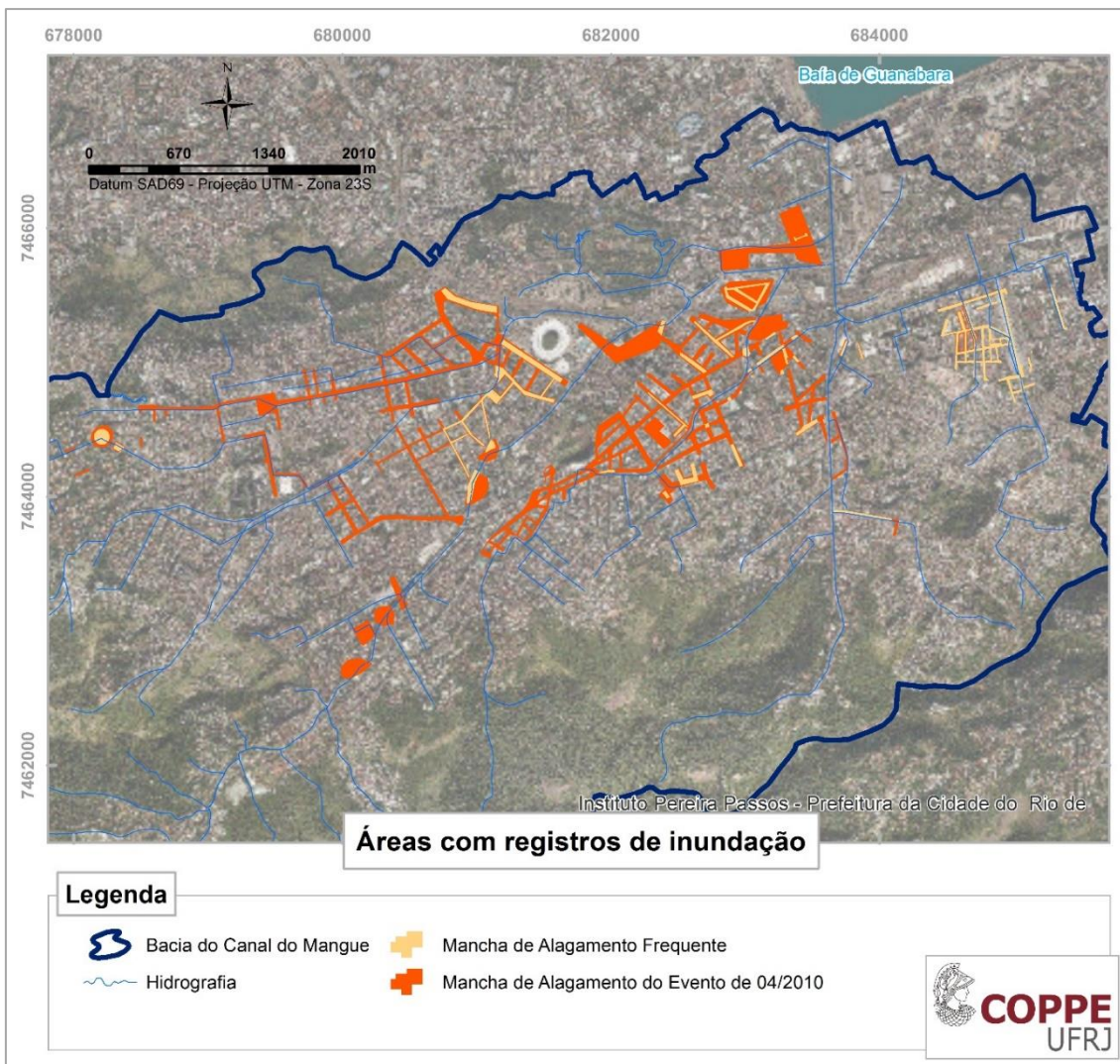


Figura 4.18 – Mapeamento de áreas com registros de eventos de inundação.

## 4.5 Projetos de Controle de Inundações na BCM

Por sua importância histórica e geográfica, a bacia do Canal do Mangue foi objeto de inúmeros estudos e projetos para mitigação dos graves problemas de inundações existentes, desde a grande obra responsável por secar o Saco de São Diogo e a Lagoa da Sentinela, próxima ao Campo de Santana, por meio da construção do próprio Canal do Mangue, em 1857, ligando o mar ao Rossio Pequeno, onde hoje fica a atual Praça Onze (PDMAP, sem ano), visto na histórica imagem fotográfica da Figura 4.19. Originalmente, a embocadura do mangue do Saco de São Diogo apresentava cerca de 500 metros de largura, variando, ao longo do trecho que adentrava o continente, larguras de 70 a 100 metros (MATTOS, 2004).



**Figura 4.19 – Antiga fotografia do Canal do Mangue, no final do Século XIX.**

No final do século XIX, entre os anos 1875 e 1876, dois relatórios técnicos foram elaborados pela comissão de melhorias, composta por três engenheiros nomeados pelo imperador, entre eles, Francisco Pereira Passos, que viria a ser prefeito do Rio de Janeiro entre os anos de 1902 e 1906. Nestes relatórios havia indicações do uso de reservatórios nos pés das encostas como solução para reduzir a velocidade com que a água drenada pelas montanhas chegam na planície urbanizada, sendo uma das principais propostas, a desobstrução do Canal do Mangue e sua extensão até o pé da Serra do Andaraí, onde deveria haver um reservatório para receber e retardar as águas drenadas pela serra, que seriam canalizadas antes de chegar ao reservatório (BRITTO, 2012).

Porém, durante a Reforma Passos, as medidas adotadas foram a retificação dos rios Joana, Comprido e Maracanã, com um forte viés higienista de aceleração dos escoamentos. Na década de 1920, o Plano Agache retoma estas ideias passadas de criar reservatórios nas encostas dos morros, para controlar a descida da água. O Plano Agache apresentou uma inédita solução de conjunto para o problema das enchentes, tendo como medidas intervenções nas bacias hidrográficas, construção de dispositivos hidráulicos nas encostas, construção de reservatórios nas vertentes, proteção do solo e recomposição da cobertura vegetal, construção e conservação de rede de coletores.

No entanto, com a Revolução de 1930, o Plano Agache foi revogado e a problemática da drenagem urbana caiu novamente no esquecimento do poder público. Os planos urbanísticos que se seguiram não enfatizaram estas questões e a situação continuou a se agravar. Houve enchentes de grande magnitude e muitas perdas em 1966, 1988, 1996, 1998 e 2010.

Uma grande intervenção prevista para mitigar os problemas de inundações da bacia do Canal do Mangue é o projeto do Túnel Extravasador, que funcionaria a partir da interceptação das águas de cheia das calhas dos rios Joana, Maracanã, Trapicheiros, Macacos, transportando-as para despejo final em mar aberto, no costão do Vidigal.

Com esse traçado, o túnel seria utilizado para mitigar inundações tanto na Zona Norte, como na Zona Sul, reduzindo alagamentos recorrentes na Gávea e no Jardim Botânico. O túnel chegou a ter sua implantação iniciada, em 1973, tendo cerca de 1,5km de seu traçado concluído. A Figura 4.20 apresenta o traçado proposto para o Túnel Extravasador.



**Figura 4.20 – Traçado do Túnel Extravasador. (Clube de Engenharia, 2011)**

Entre os principais estudos para mitigação do problemas de inundações na bacia do Canal do Mangue, dois se destacam:

- ✓ Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue – PBCM
- ✓ Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP/RJ

Tais estudos serão avaliados dentro da ótica do gerenciamento integrado de risco de inundações, permitindo uma comparação entre duas abordagens distintas para o controle de cheias.

Enquanto o PBCM priorizava intervenções distribuídas na bacia, através do *Método de Regularização Espacial de Vazões* (URBONAS, 1999), o PDMAP/RJ concentra, na bacia do Canal do Mangue, as medidas de controle em grandes reservatórios, estrategicamente posicionados para armazenar as águas de cheia escoadas nas calhas dos principais canais da bacia.

As pesquisadoras Ianic Biagate Lourenço e Cristiane Ramos Magalhães elaboraram uma linha temporal sobrepondo marcas históricas de grandes eventos de inundação (MAGALHÃES, 2013), investimentos em obras de drenagem e controle de enchentes e marcos do desenvolvimento urbano na bacia do Canal do Mangue, apresentada na Figura 4.21. Esta linha do tempo demonstra o aumento no número de eventos ao longo dos séculos, mesmo havendo esforços concentrados em grandes obras. São destacados 2 eventos no século XVIII, 6 eventos no século XIX, 20 eventos durante o século XX e 9 eventos apenas nos 13 primeiros anos do século XXI.

Este aumento vertiginoso no número de eventos de inundação é uma consequência clara de um processo de urbanização sem o correto planejamento para harmonização da cidade com o ciclo de enchentes, principalmente por se tratar de uma região com alta susceptibilidade à ocorrência de inundações. A expansão da urbanização, com consequente aumento da exposição e da impermeabilização da bacia, somada a uma série de intervenções de cunho higienista e, em muitos casos, sem qualidade técnica, resultaram em uma zona urbana densa, localizada em uma região susceptível à ocorrência de alagamentos e com uma rede de drenagem com baixa eficiência, intensificando o processo natural de enchentes. menções sobre a

No Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro, instituído pela Lei Complementar nº 111, em 1º de fevereiro de 2011 (RIO DE JANEIRO, 2011), há menções sobre os problemas de inundações na cidade, estabelecendo diretrizes para redução de seus danos, como a indicação de avaliação técnica para ocupação de áreas frágeis sujeitas às inundações, zoneamento ecológico dessas áreas e

controle do uso e ocupação dos fundos de vale, além de incentivar o uso de técnicas compensatórias em drenagem urbana. Como destaque à bacia do Canal do Mangue, é indicado o controle de enchente em sua região no mapa 14 do plano<sup>7</sup>, que apresenta a temática Saneamento Ambiental.

Nos próximos itens são apresentados os dois planos diretores elaborados para a bacia do Canal do Mangue.

---

<sup>7</sup> Disponível em <<https://goo.gl/tRN9uT>>, acessado em: 04/03/2018.

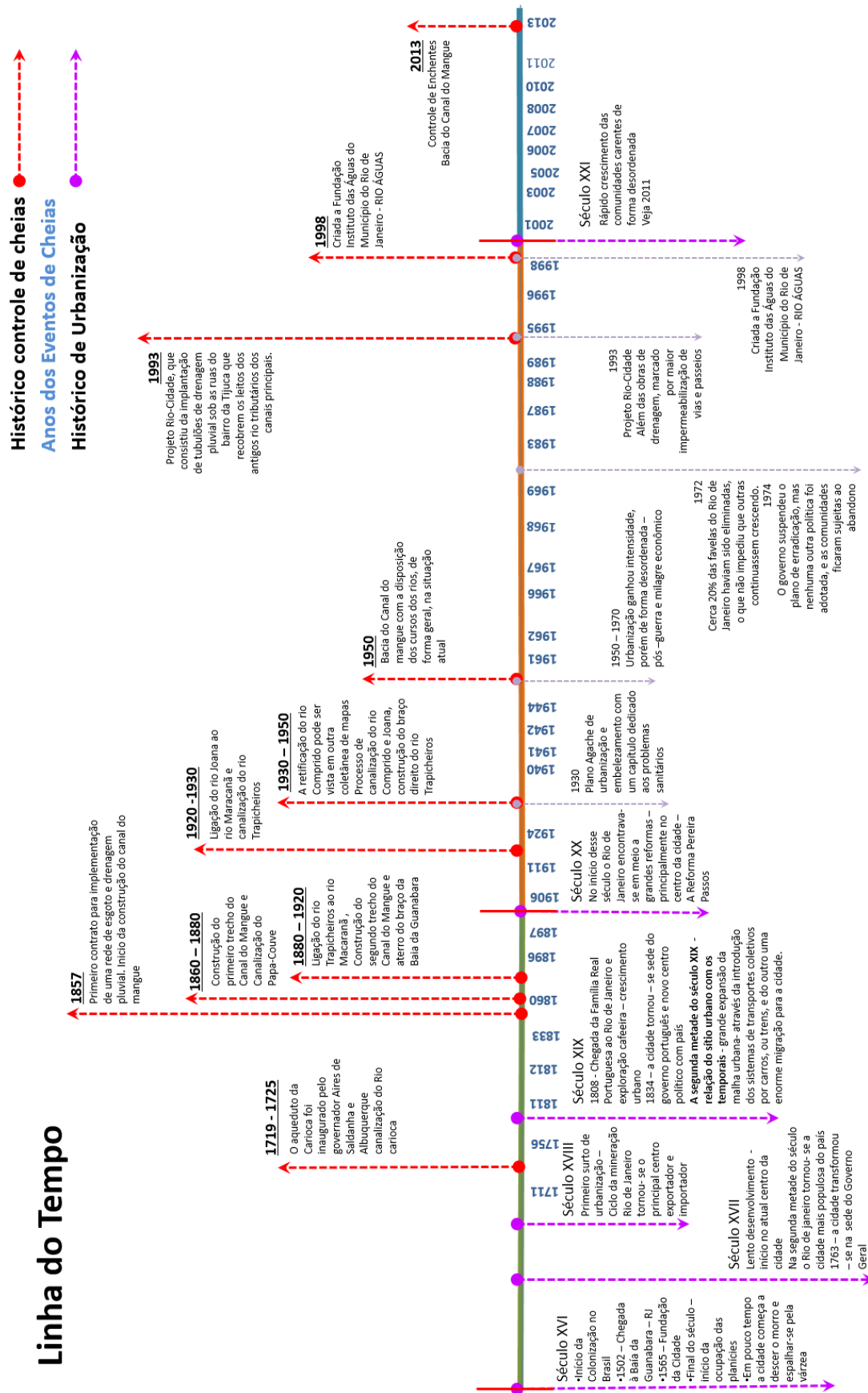


Figura 4.21 – Linha temporal com principais eventos de inundação, investimentos em obras para controle das enchentes e marcos da urbanização na bacia do Canal do Mangue (MAGALHÃES, 2013).

#### 4.5.1 Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue – PBCM

A concepção inicial para controle das inundações na bacia do Canal do Mangue, baseada no Método de Regularização Espacial de Vazões, visa, através de obras e atuações espacialmente distribuídas, em vários locais, não necessariamente na rede de micro ou macrodrenagem, se atuar no controle dos deflúvios de escoamento superficial de chuva. Sua implementação se dá através de dois mecanismos:

- ✓ Aumento da infiltração de chuva.
- ✓ Aumento da retenção superficial de chuva e atraso de sua propagação a jusante.

As intervenções propostas pelo BCM podem ser subdivididas em três categorias:

1. **Ações de reflorestamento:** o reflorestamento é uma das ações mais eficientes no controle de enchentes numa bacia hidrográfica, aumentando as taxas de infiltração básicas, além de incrementar a retenção superficial de chuva, contribuindo para diminuir os deflúvios de cheia e, conseqüentemente, os picos dos hidrogramas fluviais.
2. **Ações de correção de singularidades:** atuações na rede de macrodrenagem ou a ela adjacentes, visando a melhoria de sua capacidade de vazão ou da eficiência de captação dos deflúvios nas ruas ou logradouros vizinhos.
3. **Ações de atenuação de cheias:** obras cujo função principal é de minimizar a vazão máxima proveniente do escoamento superficial da chuva na área de drenagem respectiva, estritamente dentro do contexto do Método de Regularização Espacial de Vazões. Outro efeito pretendido é o de atrasar o tempo de ocorrência desse pico de cheia atenuado.

A seguir, são apresentadas as ações para correção das singularidades e para atenuação das cheias.

##### 4.5.1.1 Ações de correção de singularidades

- ✓ Obras de Correção no rio Trapicheiro atrás da Praça Saens Peña

- alargamento de um curto trecho ( $\cong 80\text{m}$ ) de galeria do rio Trapicheiro entre a rua General Roca e a entrada do rio num estirão a céu aberto atrás da Praça Saens Peña
- reconstrução de 2 pequenas pontes (das ruas Carlos de Vasconcelos e Soares da Costa)
- alargamento e o aprofundamento da calha aberta do rio nesse estirão, até o cruzamento com a rua Conde de Bonfim
- ✓ Alargamento da Galeria do rio Joana entre a ruas Bambuí e Paula Brito
  - uniformizar a seção (seção dupla de  $2,70\text{mH} \times 1,00\text{mV}$ ) desde a rua Bambuí até o cruzamento com a galeria da rua Paula Brito
- ✓ Alargamento do braço esquerdo do rio Trapicheiro em seu estirão final
  - a triplicação da seção do rio Trapicheiro num estirão de aproximadamente  $100\text{m}$  de comprimento, do cruzamento ferroviário atrás do pátio da Estação da Leopoldina até o deságue no Canal do Maracanã, à rua Francisco Eugênio
- ✓ Obras na região da Praça da Bandeira
  - rebaixamento de  $2,0\text{m}$  na Praça da Bandeira ( $4000\text{m}^2$  de área) e a construção de 3 poços de alívio próximos
- ✓ Correções de seções de escoamento
  - remoção de diversas tubulações de serviço que obstruem o fluxo em importantes seções de escoamento da rede de macrodrenagem
- ✓ Remoção de lixo e sedimentos na rede de macrodrenagem
- ✓ Construção de muretas laterais no rios Joana, Maracanã e Comprido
  - Joana: Abaixo da rua São Francisco Xavier, até o cruzamento com a av. Radial Oeste, atrás do Estádio do Maracanã



- Maracanã: Abaixo da rua Prof. Eurico Rabelo até a laje de capeamento no encontro com a galeria do rio Joana, em frente à Estação de São Cristóvão e abaixo da rua Uruguai até a Praça Varnhagen
- Estirão de 150m de comprimento, a montante da laje de travessia da rua do Bispo

#### **4.5.1.2 Ações de atenuação de cheias**

Foram projetadas vinte e uma intervenções de atenuação de cheias para o controle inicial das enchentes na BCM, conforme relacionadas a seguir (sendo A a área de drenagem controlada pela estrutura). As 21 Intervenções irão controlar uma área de bacia hidrográfica de cerca de 1.735ha, ou seja, 41,3% da área total (4.200ha) da bacia do Canal do Mangue.

##### ✓ Sub-bacia do Rio Trapicheiro

- Intervenção Alto-Trapicheiro - A = 142ha
- Intervenção Poço dos Esquilos - A = 55ha
- Intervenção Colégio Batista - A = 202 ha
- Intervenção Hospital Evangélico - A = 30ha
- Intervenção Bom Pastor - A = 60ha
- Intervenção Valparaíso - A = 4,5ha
- Intervenção Chacrinha - A = 20ha
- Intervenção Villa-Lobos - A = 7ha

##### ✓ Sub-bacia do Rio Maracanã

- Intervenção Alto-Maracanã - A = 238ha
- Intervenção São João - A = 72,7ha
- Intervenção Cachambi - A = 54,5ha

- Intervenção Agostinho - A = 105 ha
  - Intervenção Cascata - A = 71ha
  - Intervenção Médio-Maracanã - A = 771ha
- ✓ Sub-bacia do Rio Joana
- Intervenção Jacó - A = 109,5ha
  - Intervenção Perdido - A = 149,35ha
  - Intervenção Urubús/Recanto do Trovador - A = 103,2ha
  - Intervenção Ferreira Pontes - A = 8ha
  - Intervenção Andaraí - A = 110ha
- ✓ Sub-bacia do Rio Comprido
- Intervenção Alto-Rio Comprido - A = 112ha
  - Intervenção Bananas - A = 48ha

#### **4.5.2 Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP/RJ**

Na fase inicial de elaboração do Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro, foi realizado um estudo de alternativas para a redução do risco de inundações na bacia hidrográfica do Canal do Mangue. As alternativas de intervenção propostas visam adequar as condições de escoamento na bacia, buscando solucionar os problemas de inundação a partir de suas causas e considerando as possibilidades de intervenção disponíveis para a bacia. Na macrodrenagem, essas alternativas são a implantação de reservatórios, o reforço de galerias e canais e o desvio de cursos d'água.

A implantação de reservatórios tem o objetivo de amortecer os picos dos hidrogramas e retardar o tempo de concentração da bacia hidrográfica, permitindo que as vazões de projeto se adéquem às capacidades de escoamento dos canais da macrodrenagem. A reservação artificial é feita através de reservatórios de detenção, que armazenam os volumes de água durante os eventos de cheia de maior intensidade e devolvem estes volumes ao curso

d'água em condições adequadas à capacidade da calha. Essa devolução pode ser por meio de gravidade – reservatórios *in line* – ou por meio de bombeamento – reservatórios *off line*.

O reforço de galerias e canais tem o objetivo de aumentar a capacidade do canal, constituindo uma alternativa hidráulica cuja viabilidade depende da disponibilidade de área para implantação, que não deve gerar incremento de vazões a jusante, o que agravaria o problema de inundações em bacias vizinhas.

Foi considerada, ainda, a mudança do exutório de cursos d'água atualmente localizados nos canais de macrodrenagem da bacia para a baía, sendo o desvio desses cursos d'água também uma alternativa de intervenção. As intervenções propostas foram modificadas ao longo do desenvolvimento do plano, mas, para fins de aplicação da presente pesquisa, foi considerado o conjunto de intervenções apresentado no documento *Memorial descritivo das intervenções para controle de inundações na bacia hidrográfica do Canal do Manguê – Reservatórios de Detenção* (PDMAP, 2011).

#### **4.5.2.1 Alternativas de intervenção na Bacia do Rio Joana**

As alternativas propostas para a solução dos problemas de inundação nesta bacia são a implantação de dois reservatórios, reforço de galerias e o desvio do curso do rio Joana para a Baía de Guanabara, o que melhoraria o escoamento nos trechos de jusante do rio Maracanã e Canal do Manguê.

Está prevista a implantação de um reservatório *off line* no estacionamento do supermercado Boulevard, localizado na Avenida Engenheiro Otacílio Negrão, conforme apresentado na Figura 4.22. Esse reservatório, **RJ1**, com 32 metros de profundidade, terá um volume de 143.000m<sup>3</sup>, armazenando as vazões afluentes da bacia contribuinte de montante, cuja área de drenagem é aproximadamente 8 km<sup>2</sup>.

O segundo reservatório, chamado RJ-3, será construído no pátio de Furnas, no Alto Grajaú, e será implantado no Rio Jacó, um dos formadores do Rio Joana, conforme imagem apresentada na Figura 4.23. Localizado entre a região de altas declividades e a baixada, terá um volume de 50.000 m<sup>3</sup> e a função de amortecer as vazões provenientes do trecho de cabeceira que atingem a área de urbanização consolidada, aliviando a calha do rio Joana no trecho a jusante.



Figura 4.22 – Reservatório RJ1, no rio Joana.

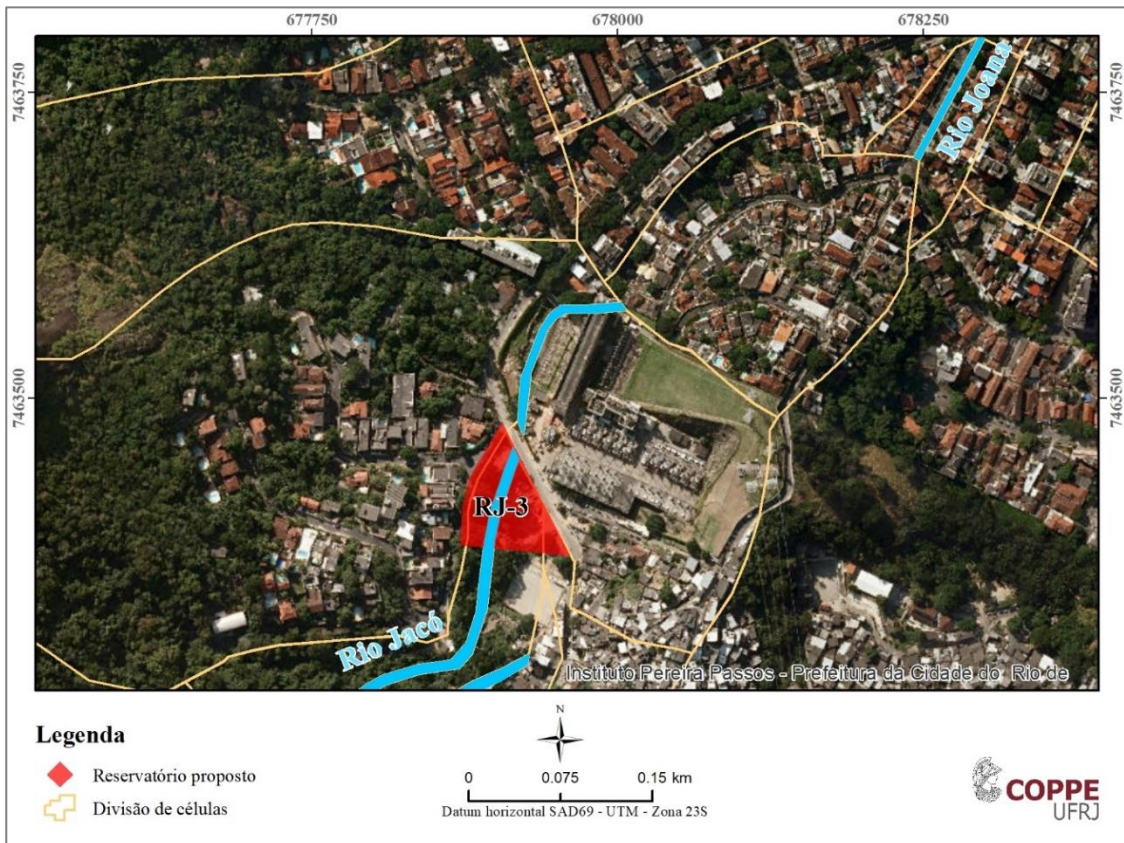


Figura 4.23 – Reservatório RJ3, no rio Jacó.

O desvio do curso do rio Joana, com mudança do seu exutório do rio Maracanã para a Baía de Guanabara, tem como objetivo aliviar a afluência de vazões ao trecho final do rio Joana, permitindo um melhor aproveitamento da calha do rio Maracanã a jusante da foz do rio Joana, melhorando o escoamento na parte de jusante do rio Maracanã. Essa intervenção foi proposta pela primeira vez em 1993 e, desde então, busca-se a melhor alternativa de traçado para o desvio.

Nos estudos realizados para o PDMAP, o traçado tem início no cruzamento da Avenida Professor Manoel de Abreu com a Rua Felipe Camarão, seguindo em galeria até a travessia da linha férrea. Em seguida, o desvio segue em túnel e, ao longo da Rua São Cristóvão até o deságue na Baía de Guanabara, volta a ser feito em galeria, conforme imagem apresentada na Figura 4.24.

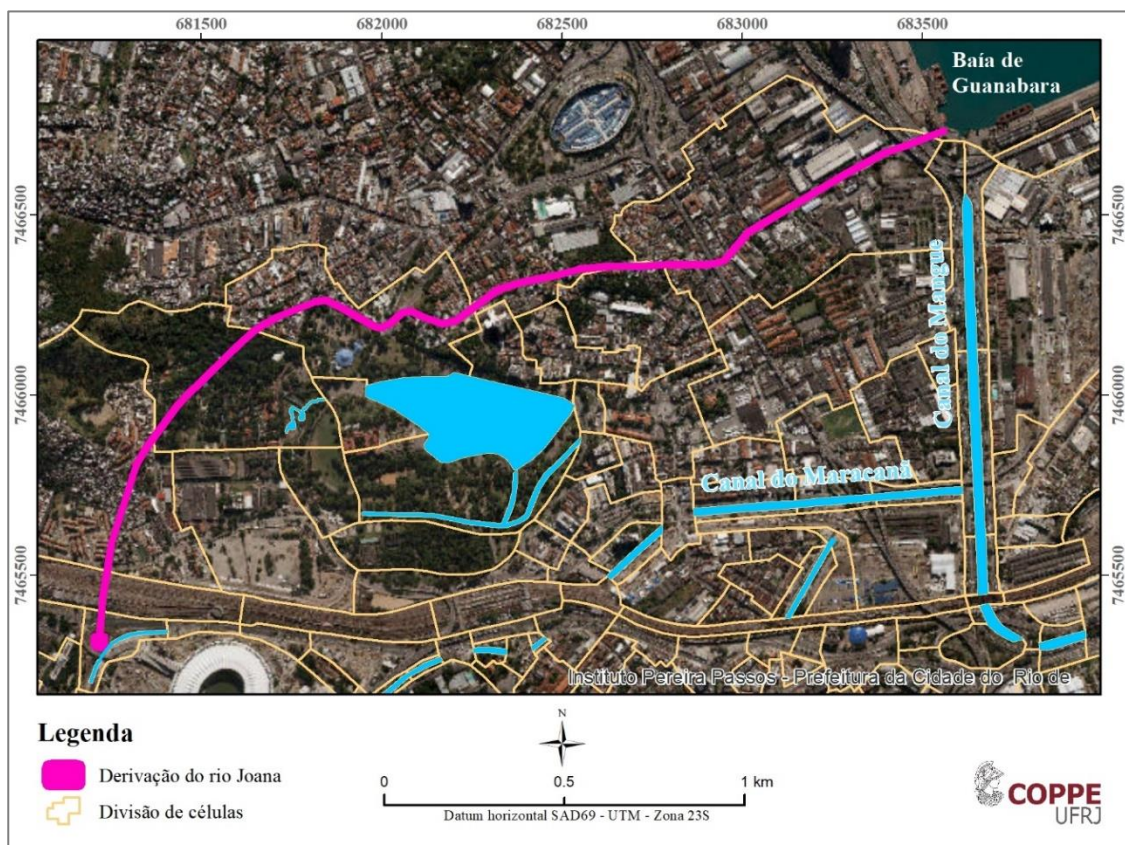


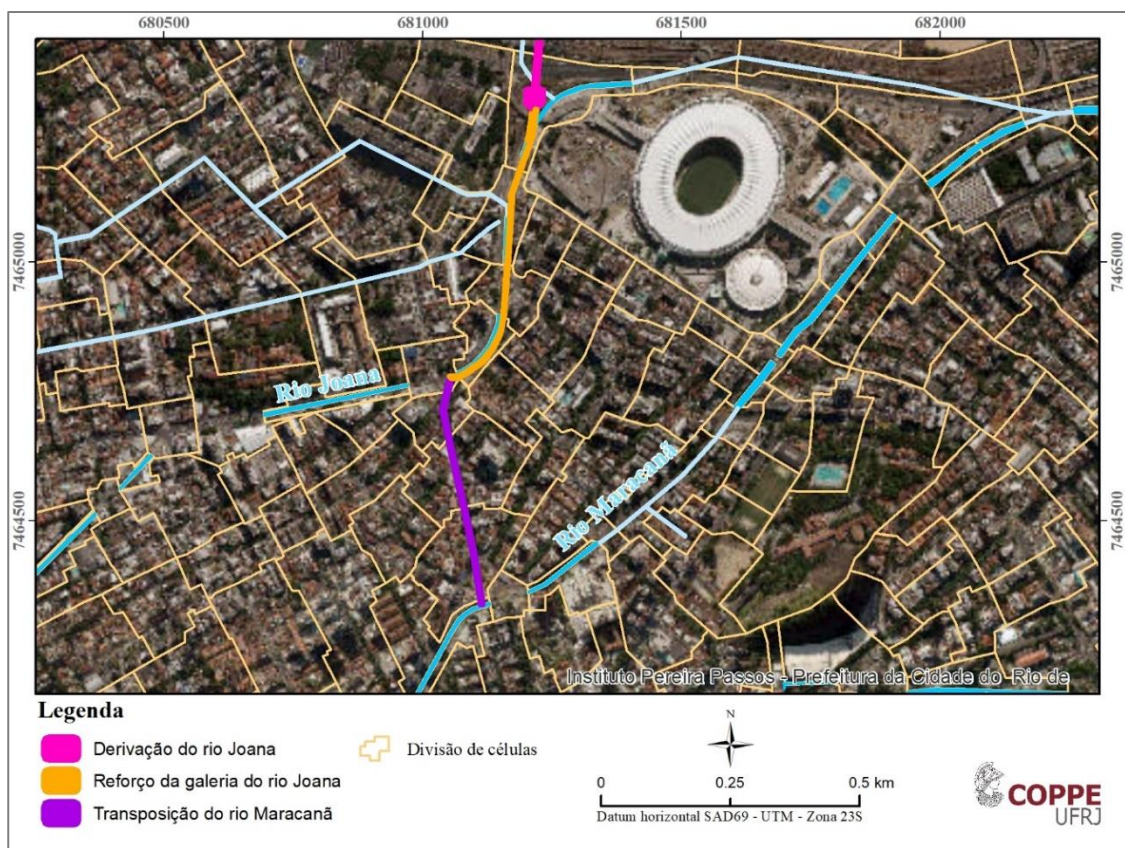
Figura 4.24 – Traçado do desvio do rio Joana, destacado em vermelho, com deságue independente na Baía de Guanabara.

#### 4.5.2.2 Alternativas de intervenção na Bacia do Rio Maracanã

A alternativa proposta para a mitigação dos problemas de inundação nesta bacia é a implantação de uma galeria de derivação conectando o Rio Maracanã ao desvio projetado para o Rio Joana, através de uma galeria ao longo da Rua Felipe Camarão.

A galeria de transposição do rio Maracanã possui cerca de 470 metros, capacidade de vazão de 40 m<sup>3</sup>/s e inicia-se na Avenida Maracanã, desembocando na galeria de reforço do Rio Joana, que segue até o canal de desvio para a Baía de Guanabara.

Essa medida tem a função de reduzir as vazões afluentes aos trechos mais baixos do Rio Maracanã, direcionando a vazão excedente para o sistema de desvio do Rio Joana para a Baía de Guanabara.



**Figura 4.25 – Galeria de transposição do rio Maracanã para o rio Joana, com trecho de reforço até o local do desvio para a Baía de Guanabara.**

#### 4.5.2.3 Alternativas de intervenção na Bacia do Rio Trapicheiros

As alternativas propostas para a solução dos problemas de inundação nesta bacia são a implantação de dois reservatórios e o reforço de galerias a jusante.

Está prevista a implantação de um reservatório de retenção *off line* no estacionamento do supermercado Extra, localizado na Rua Heitor Beltrão. Terá cerca de 25 metros de profundidade e volume de 70.000 m<sup>3</sup>. Esse reservatório, chamado RT-1 – Extra (Figura 4.26), terá a função de amortecer os picos de cheia que atingem a Praça da Bandeira e o braço direito do Rio Trapicheiros, no trecho da Rua Barão de Iguatemi até o Canal do Mangue.

O segundo reservatório, chamado RT-2 (Figura 4.27), deverá ser construído na Praça da Bandeira e terá uma profundidade de 17 metros e volume de 18.000 m<sup>3</sup>. Como a área disponível para construção do reservatório é reduzida, sua função seria auxiliar na drenagem local, já que a região é baixa e sofre com frequentes inundações. A contribuição da drenagem local retida seria direcionada posteriormente para o Rio Trapicheiros, cujo curso não seria interligado ao reservatório. Nesse trecho, o rio deverá ter a galeria já existente reforçada, de forma a possibilitar a veiculação das vazões afluentes. Visando aliviar a calha do Canal do Mangue no trecho próximo à foz do Rio Comprido, que já se encontra sobrecarregada e constitui outro ponto de inundação observado, o reforço das galerias do trecho de jusante do Rio Trapicheiros deverá buscar o escoamento pelo seu braço esquerdo.

As principais intervenções previstas no Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro (PDMAP) podem ser resumidas em:

- quatro reservatórios de detenção, localizados em diferentes pontos da bacia;
- uma transposição entre os rios Maracanã e Joana;
- uma derivação do rio Joana para a Baía de Guanabara.

Além dessas grandes intervenções, são previstas pequenas correções e reforços nos canais e galerias existentes.



Figura 4.26 – Reservatório RT-1 no Rio Trapicheiros

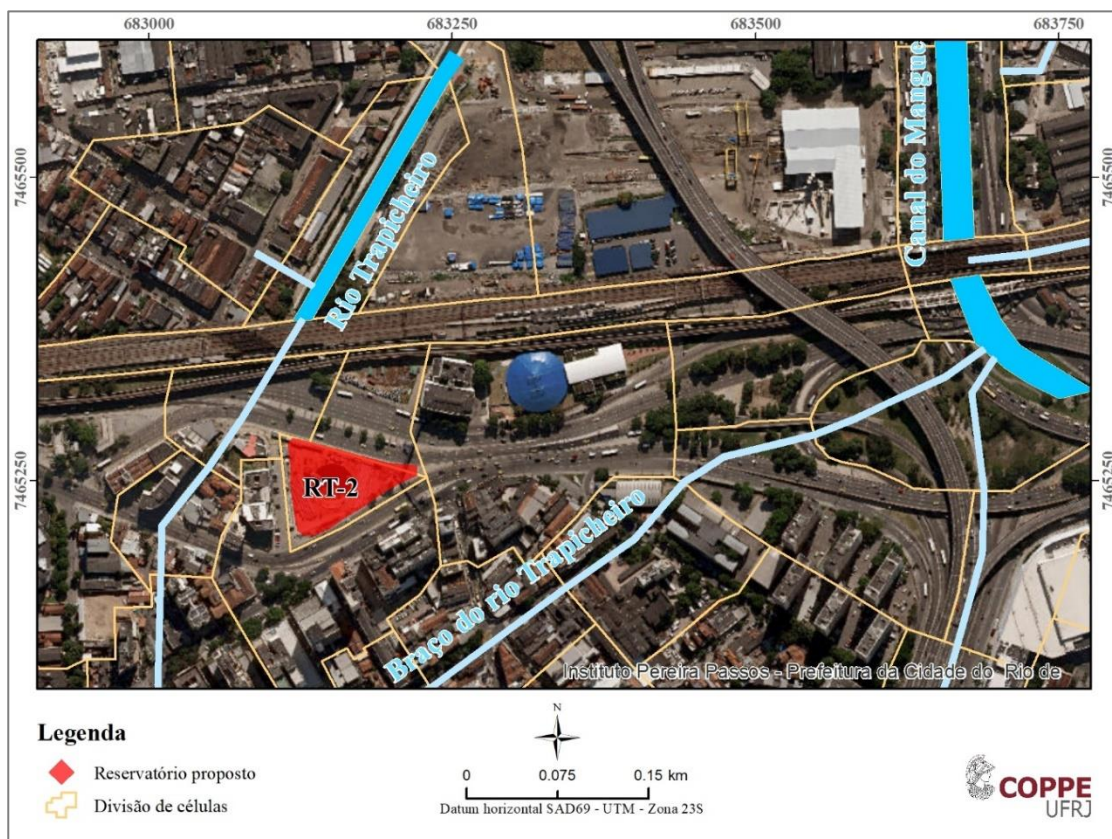


Figura 4.27 – Reservatório RT-2 no Rio Trapicheiros, sob a Praça da Bandeira



## 4.6 Modelagem Hidrológico-hidrodinâmica da BCM

A escolha do Modelo de Células de Escoamento para realizar as simulações hidrológico-hidrodinâmicas na bacia do Canal do Mangue foi feita baseada na sua capacidade em representar toda a bacia hidrográfica funcionando em conjunto, de forma conexa. Essa característica do MODCEL possibilita uma avaliação integrada do padrão das cheias fluviiais resultantes de chuvas espacialmente distribuídas, além de permitir a análise de intervenções distribuídas na bacia.

No âmbito do *Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue* (COPPETEC, 2000), foi construído um complexo e robusto modelo matemático para representar a bacia do Canal do Mangue, abrangendo toda a sua área. Tal modelo pretendia avaliar a situação atual em que se encontrava o sistema de macrodrenagem da bacia, testando possíveis intervenções para a mitigação dos problemas de inundação existente. Este estudo agregou um conjunto estruturado de informações, avaliações e dados diversos sobre a bacia do Canal do Mangue (BCM), a ponto de permitir a sua utilização eficiente como área-piloto para estudos de drenagem em todo o Município do Rio de Janeiro (COPPETEC, 2000).

O processo de modelagem resultou em uma base com mais de 1.000 células, representativas dos rios, canais, grandes galerias, encostas e planícies da bacia do Canal do Mangue. Na época do desenvolvimento do modelo, as divisões de células foram realizadas sobre as cartas aerofotogramétricas da cidade do Rio de Janeiro, em papel. Porém, diversos projetos e pesquisas realizadas na bacia do Canal do Mangue utilizaram a base de dados do modelo matemático desenvolvido, havendo algumas iniciativas de digitalização do material.

Normalmente, tais estudos se concentravam em sub-bacias, com detalhamento mais localizado. Desde a construção do modelo, portanto, não houve um trabalho sistematizado de revisão da base de dados, a partir da digitalização da divisão original da bacia em células, com sobreposição à imagens de satélite da região, permitindo um ajuste mais acurado na áreas e no levantamento das informações físicas de cada células, assim como em suas ligações. Além disso, mais recentemente, o MODCEL vem sofrendo contínuas revisões, com alterações na forma de entrada de dados e introdução de novos tipos de ligação, para representar um maior número de possibilidades de escoamentos na paisagem

urbana. Tais modificações demandaram uma revisão nos parâmetros de modelagem, assim como irão permitir novas estratégias de representação, caso haja necessidade.

Após digitalização, foi iniciado um trabalho de georreferenciamento da base de dados, de forma a se facilitar o próprio processo de modelagem (levantamento de dados e pós processamento dos resultados), assim como permitir uma melhor aplicação da metodologia de análise de risco, baseada na proposta por Zonensein (2007) e adaptada para composição do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES. Foi, então, realizado um dedicado trabalho de revisão e adaptação da base original.

#### **4.6.1 Revisão da Base de Dados da BCM**

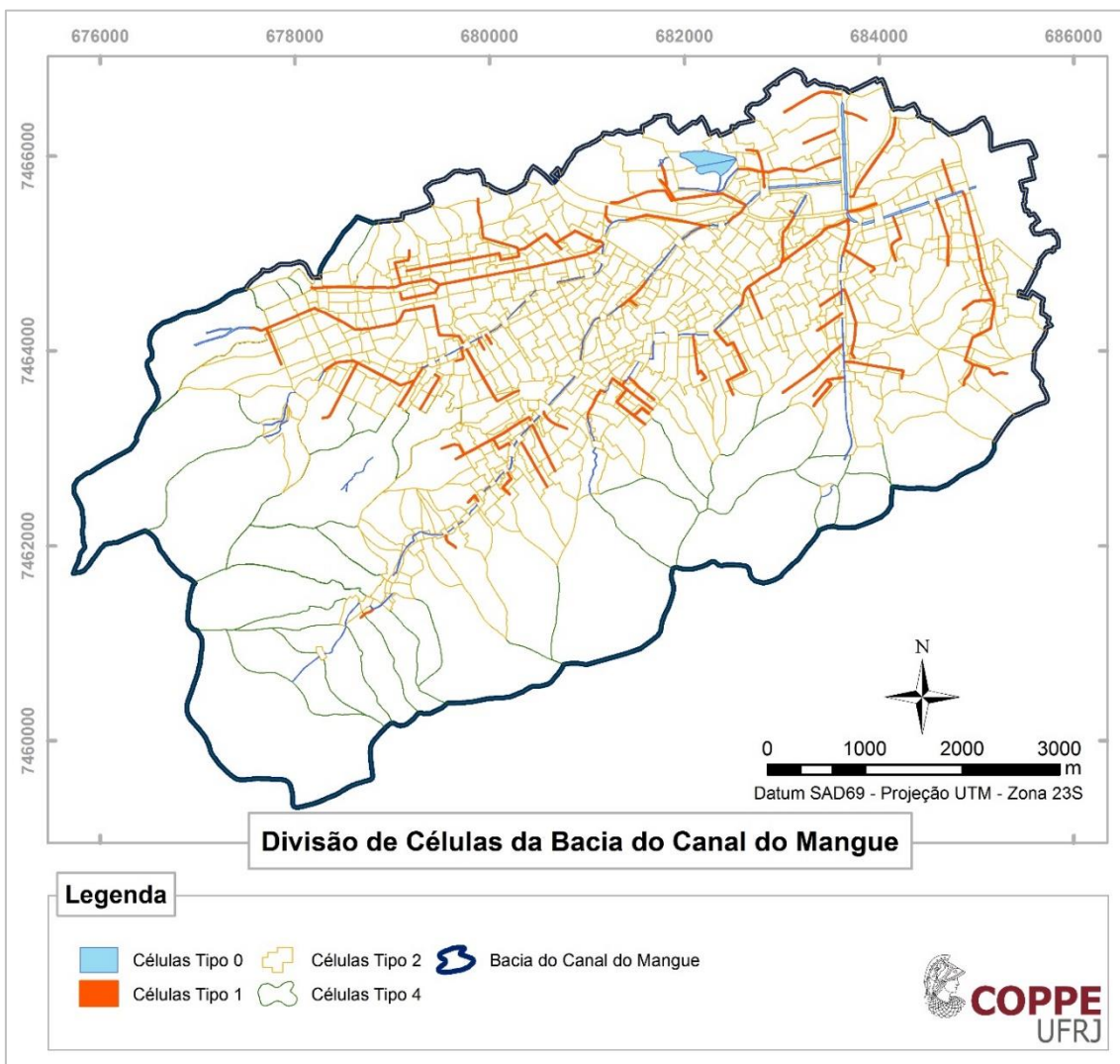
A primeira revisão da base de dados do modelo construído para a bacia do Canal do Mangue resultou, inicialmente, em um modelo com 1.025 células de escoamento com a seguinte divisão:

- ✓ 85 células de rios e canais (*tipo 0*)
- ✓ 206 células de galerias de drenagem (*tipo 1*)
- ✓ 692 células planícies (*tipo 2*)
- ✓ 42 células de encostas (*tipo 4*)

O contínuo aprimoramento da ferramenta de modelagem, o MODCEL, possibilitou novas formas de representação dos trechos da rede de drenagem em galeria.

Foi criada uma nova ligação com melhor aproximação das seções hidráulicas retangulares fechadas e as galerias passaram a ser representadas por uma curva *cota X área*, possibilitando a consideração do enchimento da galeria até o extravasamento para a superfície, representado por ligações que simulam a troca de vazões por bocas de lobo. Desta forma, a troca de vazão entre as galerias passa a considerar o escoamento sob pressão, mesmo antes de haver o extravasamento para a superfície. Para esta configuração, as células *tipo 1* (galerias) foram transformadas em células *tipo 3* (reservatório), de forma a representar a variação do volume da galeria, por meio de uma curva *cota x área* com quatro pontos, formando dois retângulos prismáticos, um primeiro referente ao volume da galeria em si e outro superior, com menor volume, referente às visitas do trecho de galeria.

Outra adaptação da base de dados se deu durante o processo de calibração do modelo, que será apresentado posteriormente. Com vistas a representar melhor o processo de abstração inicial nas encostas da bacia, as células de encosta (*tipo 4*) foram transformadas em células de reservatório (*tipo 3*), rebaixando o primeiro ponto da curva *cota x área* para um nível que garantisse a laminação da chuva em volume equivalente à abstração de cerca de 10% da altura de chuva. Após preenchimento desse reservatório, o escoamento superficial se inicia normalmente. Esta configuração visa representar os processos do ciclo hidrológico referentes à parcela de abstração inicial da bacia, muito condicionada ao uso e cobertura do solo. A abstração inicial tem por característica retirar do sistema um volume inicial da chuva, o qual é utilizado para preencher a retenção da chuva na cobertura vegetal e depressões do terreno, assim como a saturação do solo. A divisão em células de escoamento da bacia hidrográfica do Canal do Mangue é apresentada na Figura 4.28.

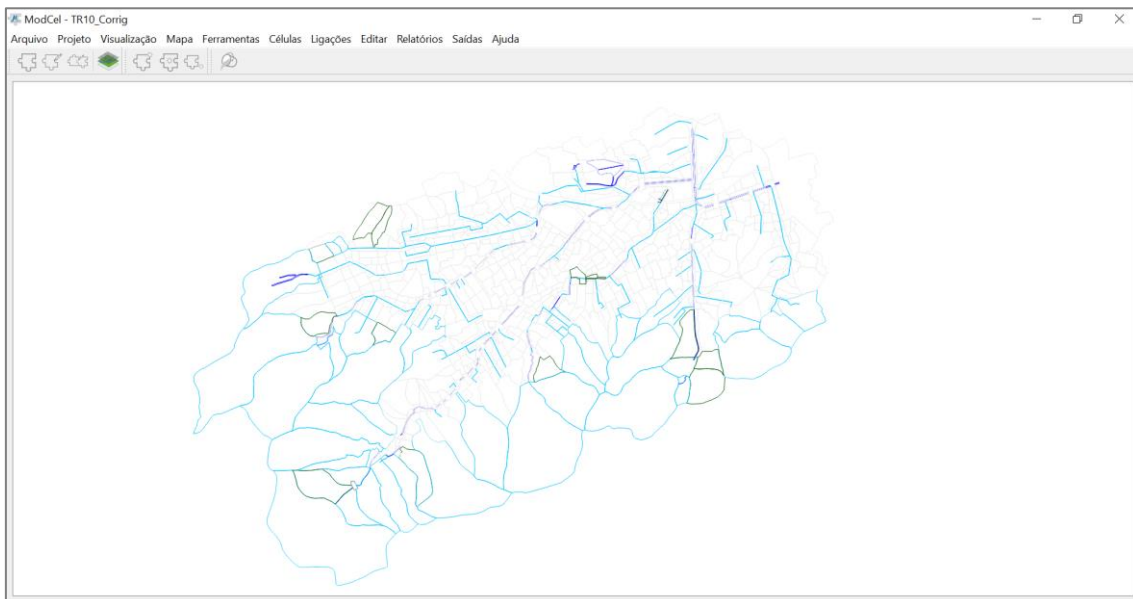


**Figura 4.28 – Divisão em células da bacia hidrográfica do Canal do Mangue**

Com tal configuração, após primeiros testes para a calibração, a base final de modelagem do Canal do Mangue passou a contar com 1.036 células, sendo:

- ✓ 100 células de rios e canais (*tipo 0*)
- ✓ 204 células de galeria (*tipo 3*)
- ✓ 681 células de planície urbanizada (*tipo 2*)
- ✓ 35 células de encosta (*tipo 3*)
- ✓ 16 células de ecosta (*tipo 4*)

Após o georreferenciamento da base e a revisão das informações de entrada, foi realizada a leitura da base de dados pela nova interface de uso do MODCEL, que permite uma melhor usabilidade do sistema, em ambiente *windows*. A Figura 4.29 apresenta uma captura da tela de trabalho do MODCEL, com as células devidamente desenhadas e carregadas com as informações pertinentes à modelagem. A partir do carregamento da interface, todo o trabalho de alteração e/ou adaptação da base de dados de modelagem passa a ser realizada diretamente no MODCEL, não havendo mais necessidade de uso da base em GIS.



**Figura 4.29 – Tela de trabalho do MODCEL, com células desenhadas, com cada cor representando um tipo de célula do modelo.**

Com a base de dados revisada, foi realizado o trabalho de calibração e validação do modelo matemático. Esse processo busca reproduzir eventos medidos, de modo a ajustar o comportamento do modelo às particularidades da bacia em estudo e verificar a validade do ajuste feito na representação de um outro evento.

O próximo item apresenta o processo de calibração e validação do modelo construído para simulação de eventos de cheia na bacia do Canal do Mangue.

#### 4.6.2 Calibração e Validação do Modelo da BCM

As informações necessárias para essa etapa, alturas de chuva e medições de nível d'água em trechos dos rios principais, foram obtidas do Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Alerta Rio<sup>8</sup>), o qual conta com uma rede de 33 estações pluviométricas, espalhadas por todas as regiões do município do Rio de Janeiro. Estas estações disponibilizam dados em tempo real, a cada 15 minutos.

Na bacia do Canal do Mangue, sete estações monitoram as chuvas, apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Estações de monitoramento do Sistema Alerta Rio**

Estação	Localização			UTM (SAD69 Zona 23)	
	Latitude	Longitude	Cota (m)	X	Y
Tijuca	-22,93194°	-43,22167°	340	682.358.108	7.462.941.416
Santa Teresa	-22,93167°	-43,19639°	170	684.951.792	7.462.971.838
Grajaú	-22,92222°	-43,26750°	80	677.639.269	7.463.809.403
Saúde	-22,89806°	-43,19444°	35	685.225.564	7.466.721.923
Alto da Boa Vista	-22,96583°	-43,27833°	355	676.494.085	7.459.222.483
São Cristóvão	-22,89667°	-43,22167°	25	682.404.960	7.466.817.174
Tijuca/Muda	-22,93278°	-43,24333°	31	680.136.137	7.462.851.843

<sup>8</sup> Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro. Fundação GEO-RIO. Disponível em: <[http://alertario.rio.rj.gov.br/?page\\_id=2](http://alertario.rio.rj.gov.br/?page_id=2)>, acessado em: 25/08/2014.

Foram selecionada cinco estações (Santa Tereza, Grajaú, Saúde, Alto da Boa Vista, Tijuca/Muda) para utilização no processo de calibragem do modelo, as quais possuíam informações de evento pluviométrico ocorrido no ano de 2000, utilizado para calibração. Adicionalmente, foram consideradas mais duas estações, instaladas no âmbito do *Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue* (COPPETEC, 2000). As estações Defesa Civil e Andaraí. A Figura 4.30 apresenta a localização das estações utilizada para a calibragem e validação do modelo.



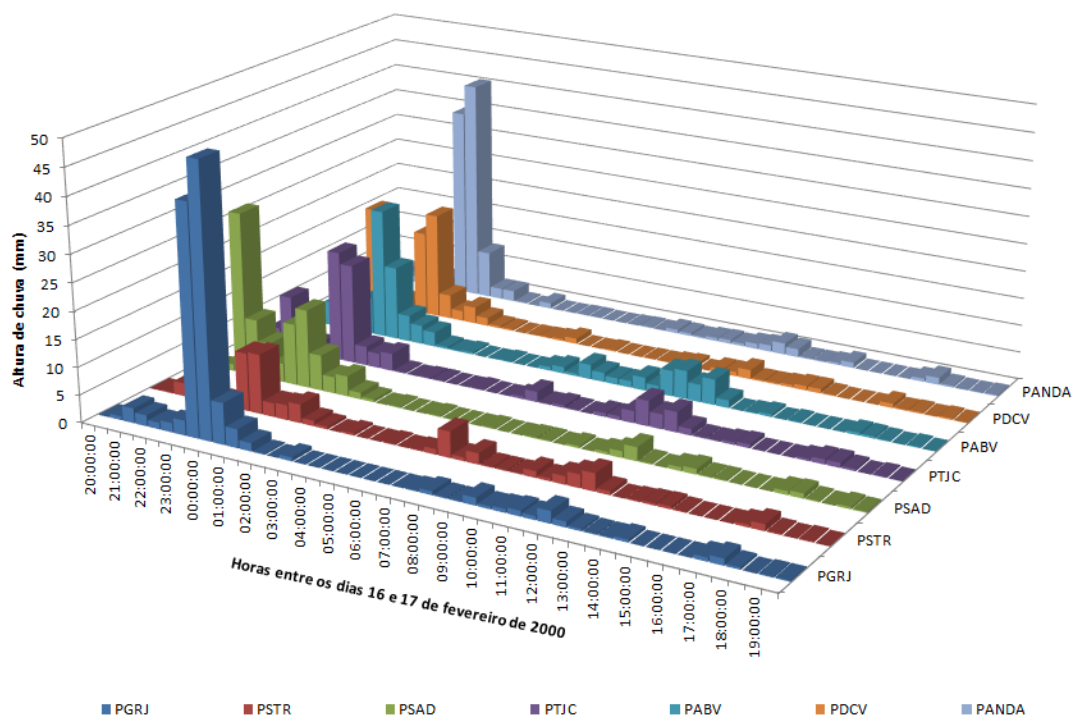
**Figura 4.30 – Localização das estações de monitoramento utilizadas para a calibragem do modelo matemático da Bacia do Canal do Mangue.**

Foi escolhido o evento hidrológico ocorrido entre às 20h00min do dia 16 de fevereiro e às 19h30min do dia 17 de fevereiro de 2000 para o processo de calibração. Para a validação do modelo construído, foi selecionado o evento ocorrido entre às 22h30min do dia 19 de março e às 03h30min do dia 20 de março de 2000. A Tabela 4.3 apresenta as alturas totais de chuva medidas em cada posto.

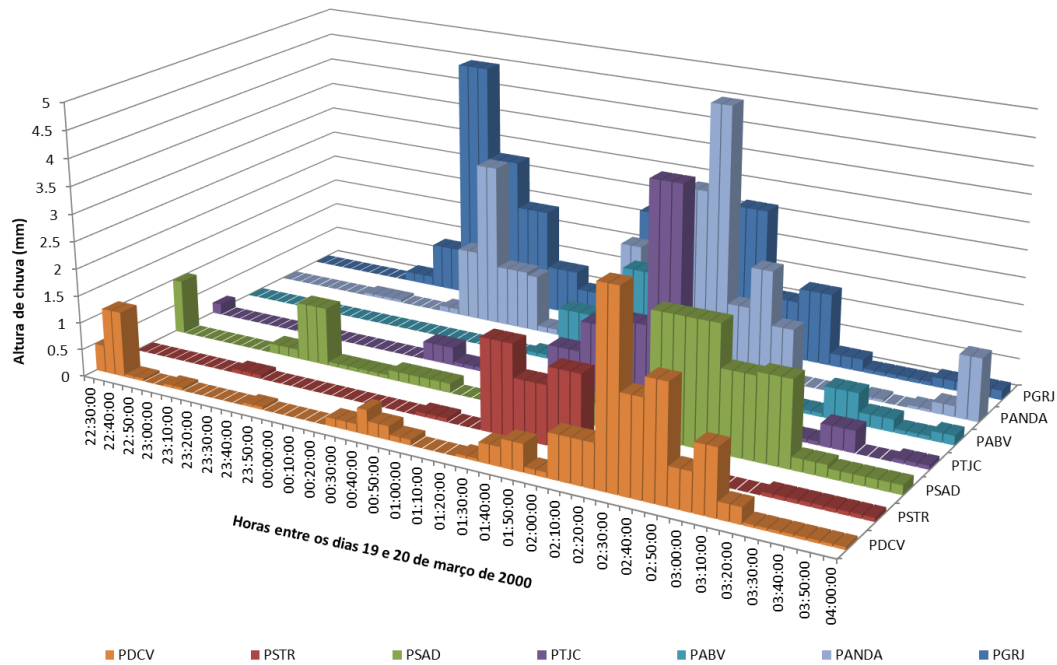
**Tabela 4.3 – Alturas totais de chuva nos postos selecionados para calibração e validação do modelo**

Posto Sigla	Grajaú PGRJ	Santa PSTR	Saúde PSAD	Tijuca PTJC	Alto PABV	D. Civil PDCV	Andaraí PANDA
<b>Calibração</b>	127.4	66.9	103.1	92.3	101.5	88.9	113.6
<b>Validação</b>	66.78	13.89	35.62	35.42	15.79	29.5	50.05

A Figura 4.31 apresenta as alturas de chuva do evento para calibração, em intervalos de 30 minutos. A Figura 4.32 apresenta as alturas de chuva do evento para validação, em intervalos de 5 minutos.



**Figura 4.31 – Hietograma medido no evento selecionado para CALIBRAÇÃO do modelo matemático, com intervalos de 30 minutos.**



**Figura 4.32 – Hietograma medido no evento selecionado para VALIDAÇÃO do modelo matemático, com intervalos de 5 minutos.**

Inicialmente, para a espacialização da chuva medida em cada posto na bacia do Canal do Mangue, foi aplicado o Método dos Polígonos de Thiessen para estimativa das áreas de influência de cada estação pluviográfica. A partir da aplicação desse método, as áreas de influência foram adaptadas para corresponder à divisão de células da bacia, como pode ser observado na imagem da Figura 4.33.

Os níveis d'água nos rios e canais da bacia do Canal do Mangue, resultantes da simulação do evento hidrológico considerado para a calibragem, foram comparados com dados de medição em postos fluviométricos implantados durante a elaboração do *Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue* (COPPETEC, 2000). Tais postos fluviométricos estão apresentados na imagem da Figura 4.34.



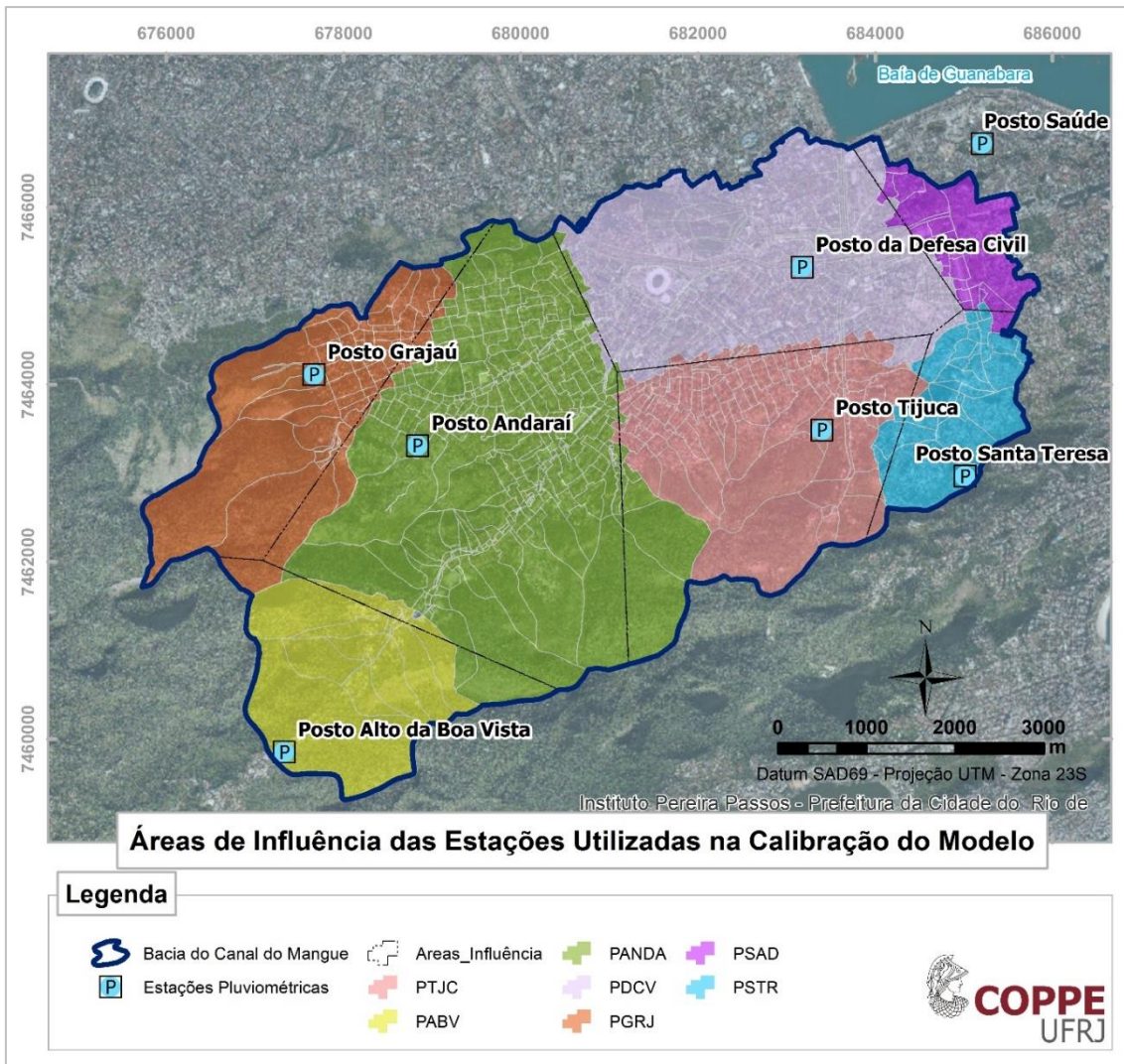
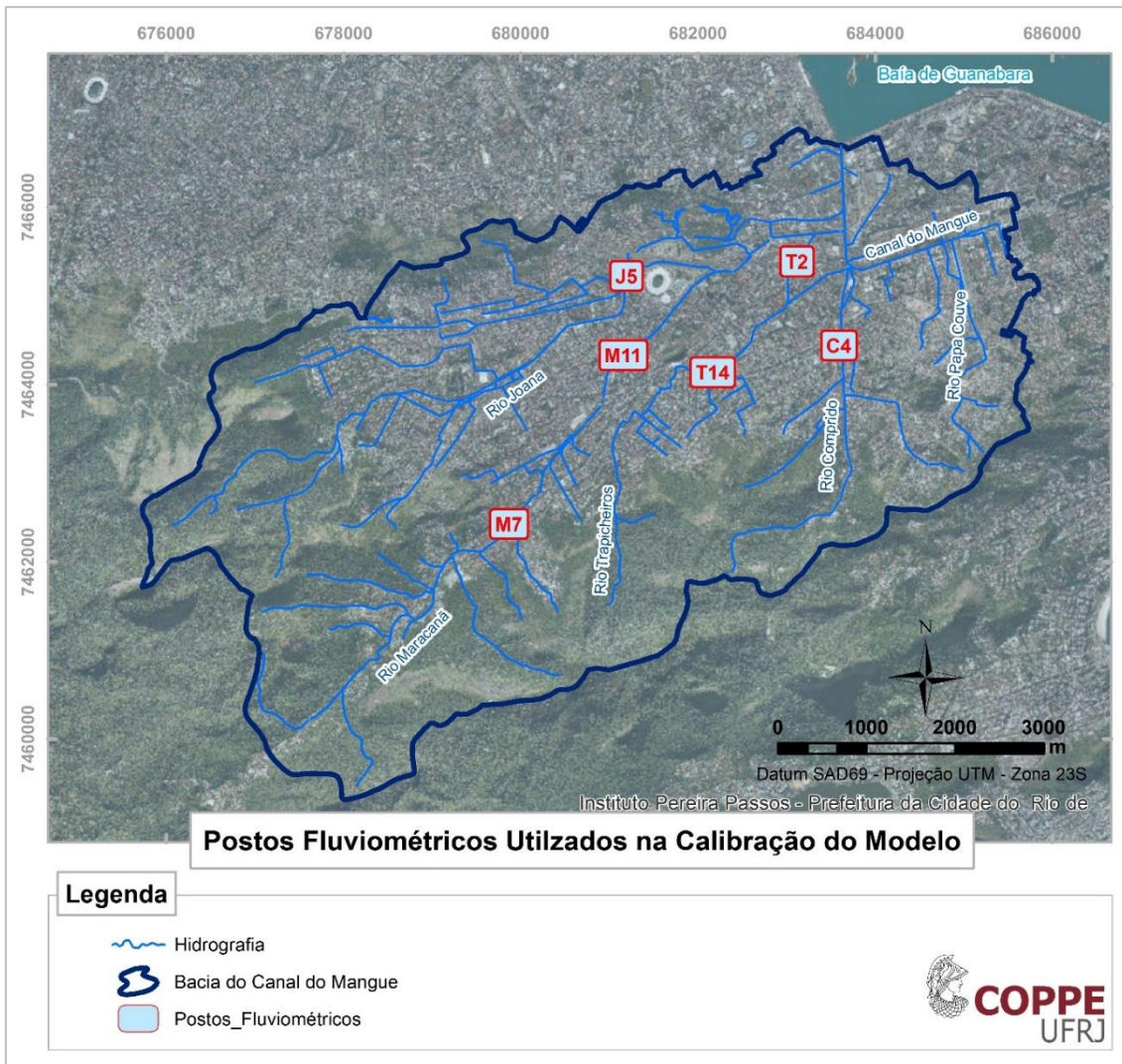


Figura 4.33 – Adaptação das áreas de influência das estações à divisão de células da BCM.



**Figura 4.34 – Localização dos postos fluviométricos utilizados para a calibração do modelo matemático.**

A primeira tentativa de calibração do modelo utiliza valores de literatura para os diversos parâmetros de entrada. Os principais parâmetros de calibração no sistema de modelagem com uso do MODCEL são os coeficientes de escoamento superficial e de Manning, além de outros parâmetros hidráulicos associados a equações clássicas utilizadas nas diversas ligações existentes no modelo, como orifícios e vertedores.

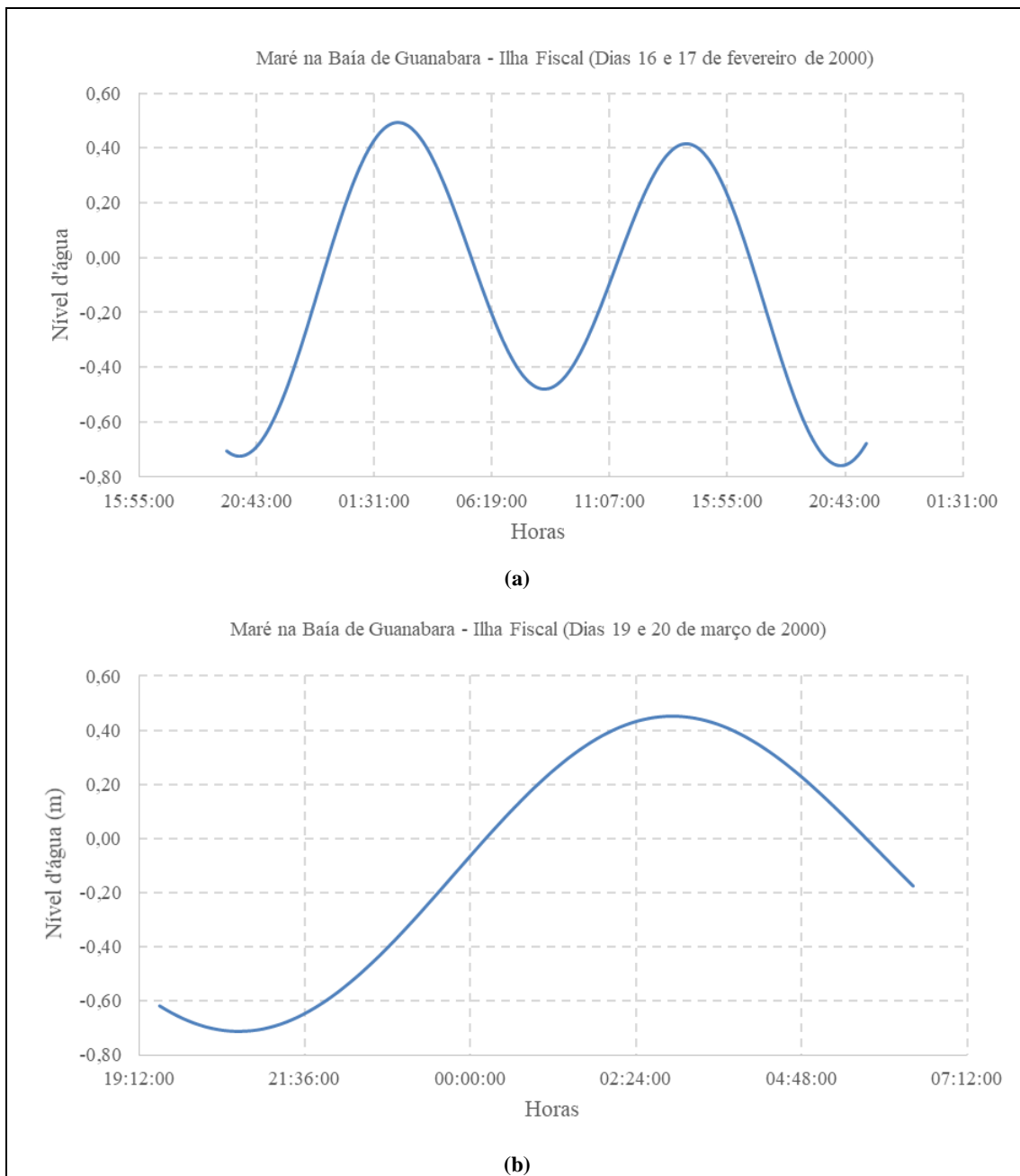
O coeficiente de escoamento superficial foi definido de acordo com a observação do uso e cobertura do solo existentes na bacia, diferenciando áreas urbanas e áreas florestadas. Para os coeficientes de Manning, utilizado nas ligações entre células de canais e galerias, foi aplicada metodologia de definição proposta por Te Chow (1959), majorando os valores segundo as condições apresentadas no trecho em análise, como presença de irregularidades no leito, mudanças bruscas na seção, existência de curvas acentuadas ou vegetação

na calha. Os demais coeficientes foram considerados com valores padrão da hidráulica clássica. A tabela apresenta os coeficientes de Manning iniciais definidos para as ligações entre canais abertos e entre galerias.

**Tabela 4.4 – Definição inicial dos coeficientes de Manning (rugosidade) para as ligações hidráulicas entre galerias e canais.**

<b>Tipo de ligação</b>	<b>Característica</b>	<b>Coefficiente de Manning</b>
Saídas, entradas ou entre galerias	Retilíneo, sem restrições	0,017
	Existência de curva suave	0,037
	Existência de curva acentuada	0,061
	Existência de mais de uma curva	0,074
	Confluência de galerias	0,092
Entre canais abertos	Retilíneo, sem restrições	0,015
	Existência de curva suave	0,039
	Existência de ponte	0,060
	Existência de curva acentuada / ponte com curva suave	0,070
	Existência de curva acentuada mais ponte	0,078

Para simulação dos efeitos de remanso ocasionados pelas maré na Baía de Guanabara, foram consideradas as alturas de maré do posto da Ilha Fiscal, ocorridas no mesmo horário dos eventos de calibração e validação do modelo. Os níveis d'água de maré nos dias destes eventos foram estimados com auxílio do módulo de previsão de marés do *software* SisBaHiA<sup>®</sup>. Os resultados, utilizados como condições de contorno na modelagem hidrodinâmica, podem ser vistos na Figura 4.35.



**Figura 4.35 – Variação da onda de maré no posto Ilha Fiscal, na Baía de Guanabara, durante os dias de ocorrência dos eventos escolhidos para (a) calibração e (b) validação do modelo matemático.**

Após simulação do cenário de calibração, os resultados de nível d'água são confrontados com os valores medidos, variando-se, então, os coeficientes dentro de uma faixa aceitável fisicamente, para que a forma e o pico dos cotogramas se aproximassem ao máximo. Posteriormente, é simulado o evento escolhido para a validação do modelo. A partir da observação dos resultados, novas alterações nos coeficientes são realizadas, de forma a se alcançar a melhor configuração, considerando as respostas de ambas as simulações, tanto para a calibração, quanto para a validação.

Os resultados finais do processo de calibração, considerados satisfatórios, podem ser vistos nos gráficos das figuras:

- ✓ Figura 4.36 → Calibração no Posto fluviométrico J5, no rio Joana
- ✓ Figura 4.37 → Calibração no Posto fluviométrico M11, no rio Maracanã
- ✓ Figura 4.38 → Calibração no Posto fluviométrico M27, no rio Maracanã
- ✓ Figura 4.39 → Calibração no Posto fluviométrico T2, no rio Trapicheiro
- ✓ Figura 4.40 → Calibração no Posto fluviométrico T14, no rio Trapicheiro
- ✓ Figura 4.41 → Calibração no Posto fluviométrico C4, no rio Comprido

Analogamente, são apresentados os gráficos de cotograma para os postos de validação, que diferem um pouco das medições existentes para a calibração. O conjunto de medições disponíveis e as respostas alcançadas com as simulações se apresentaram de forma satisfatória.

- ✓ Figura 4.42 → Validação no Posto fluviométrico J5, no rio Joana
- ✓ Figura 4.43 → Validação no Posto fluviométrico M11, no rio Maracanã
- ✓ Figura 4.44 → Validação no Posto fluviométrico T2, no rio Trapicheiro
- ✓ Figura 4.45 → Validação no Posto fluviométrico C4, no rio Comprido

### Joana (J5)

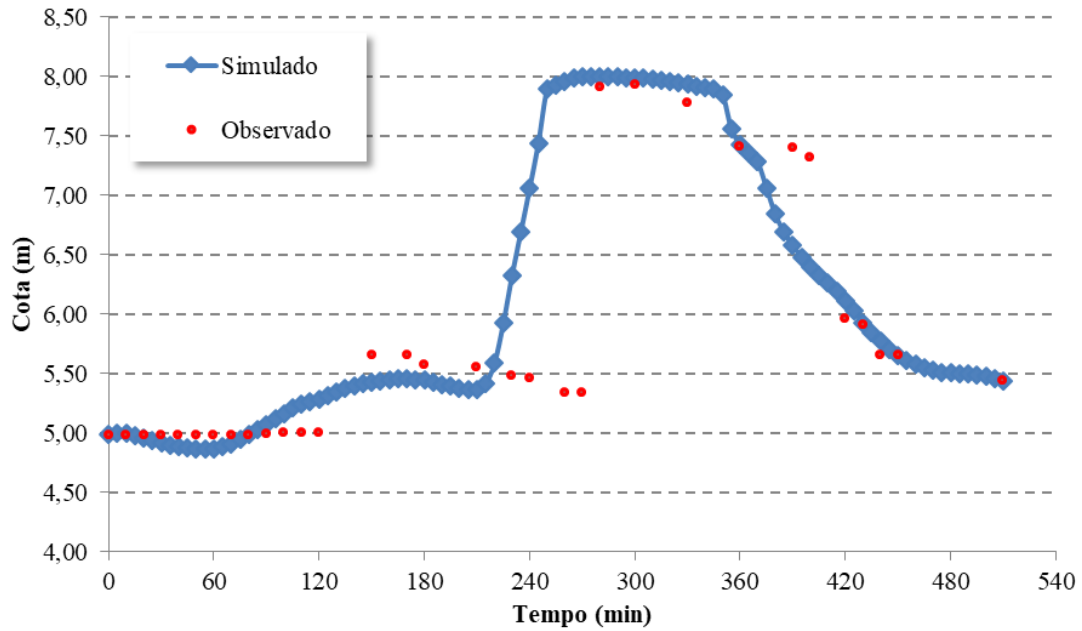


Figura 4.36 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico J5 (Rio Joana).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.

### Maracanã 1 (M11)

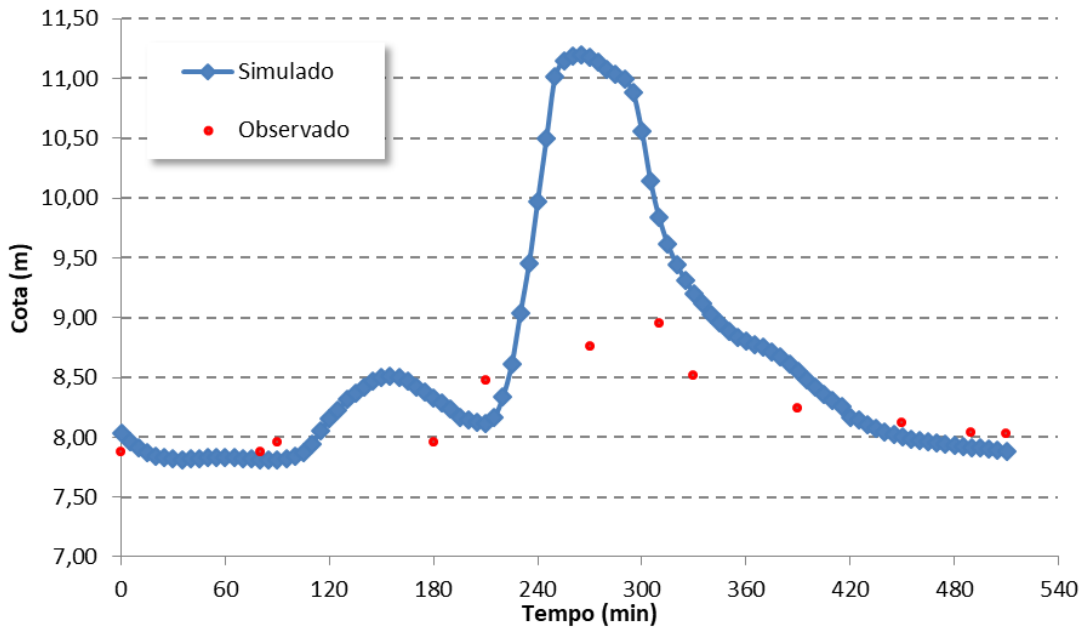


Figura 4.37 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico M11 (Rio Maracanã).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.

### Maracanã 2 (M27)

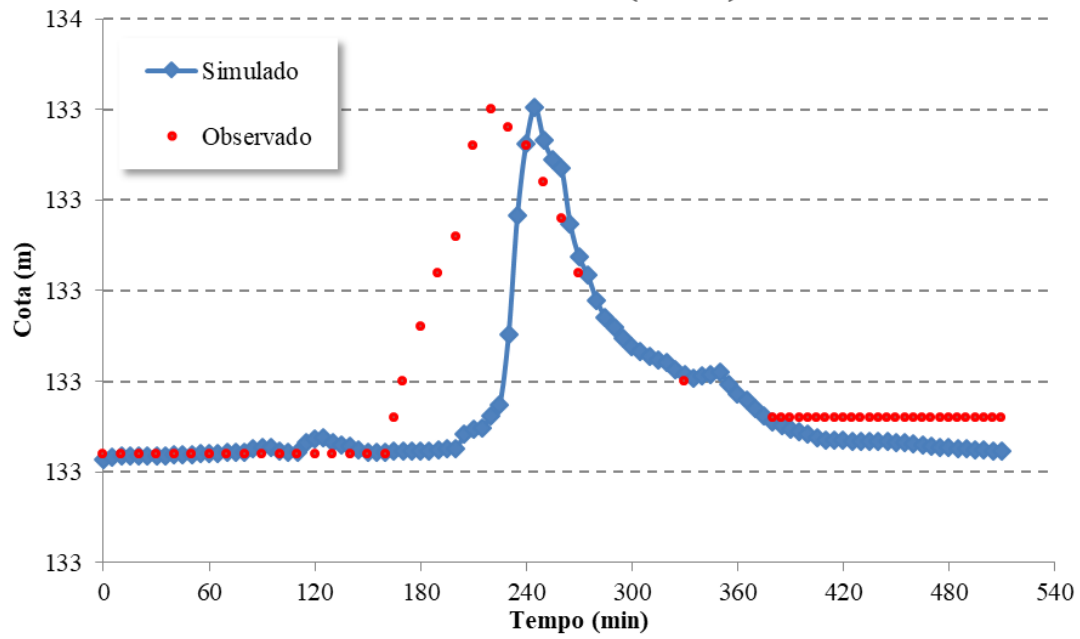


Figura 4.38 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico M27 (Rio Maracanã).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.

### Trapicheiro 1 (T2)

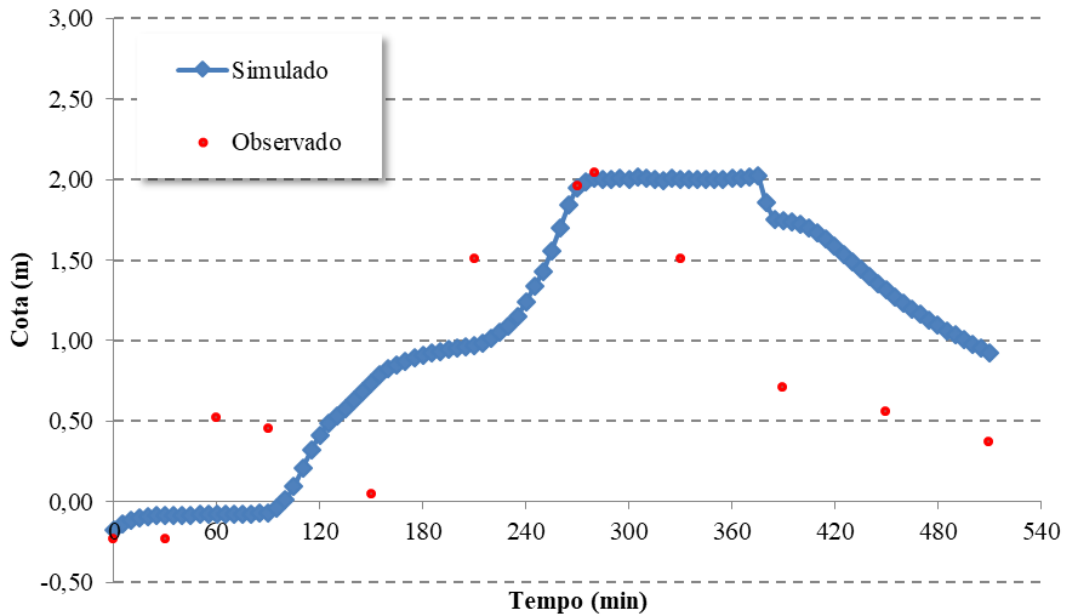


Figura 4.39 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico T2 (Rio Trapicheiros).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.

### Trapicheiro 2 (T14)

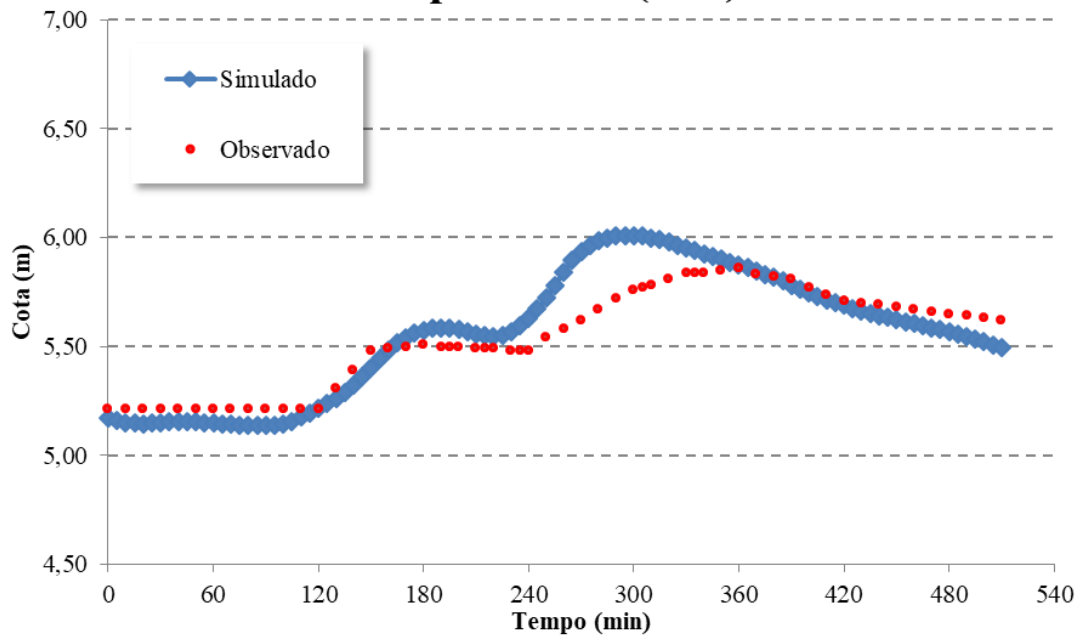


Figura 4.40 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico T14 (Rio Trapicheiros).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.

### Comprido (C4)

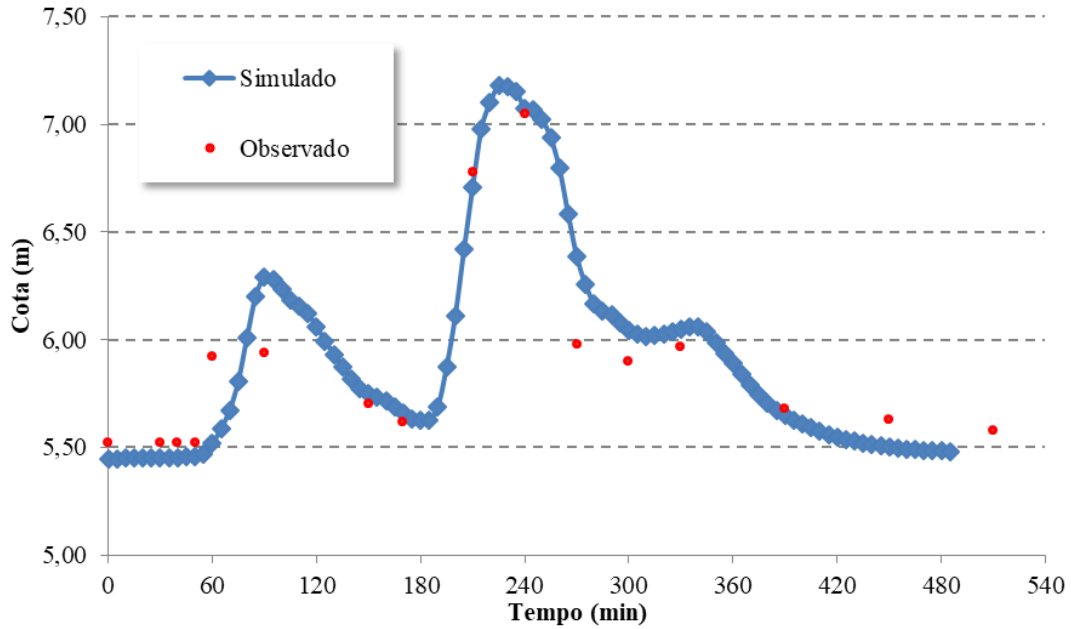


Figura 4.41 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico C4 (Rio Comprido).  
EVENTO DE CALIBRAÇÃO.



### Joana (J5)

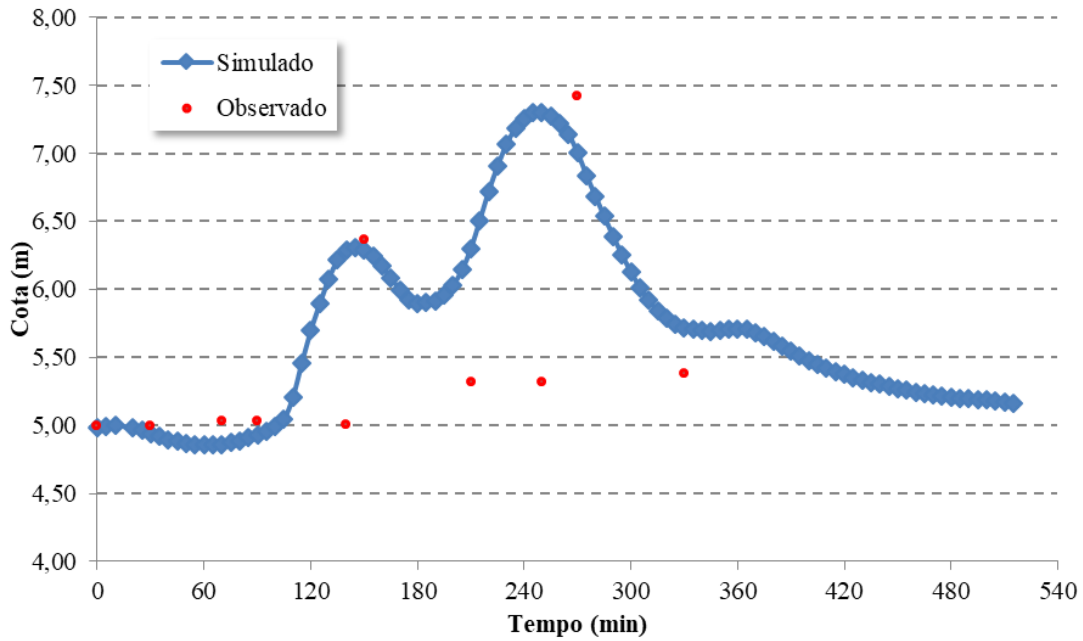


Figura 4.42 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico J5 (Rio Joana).  
EVENTO DE VALIDAÇÃO.

### Maracanã 1 (M11)

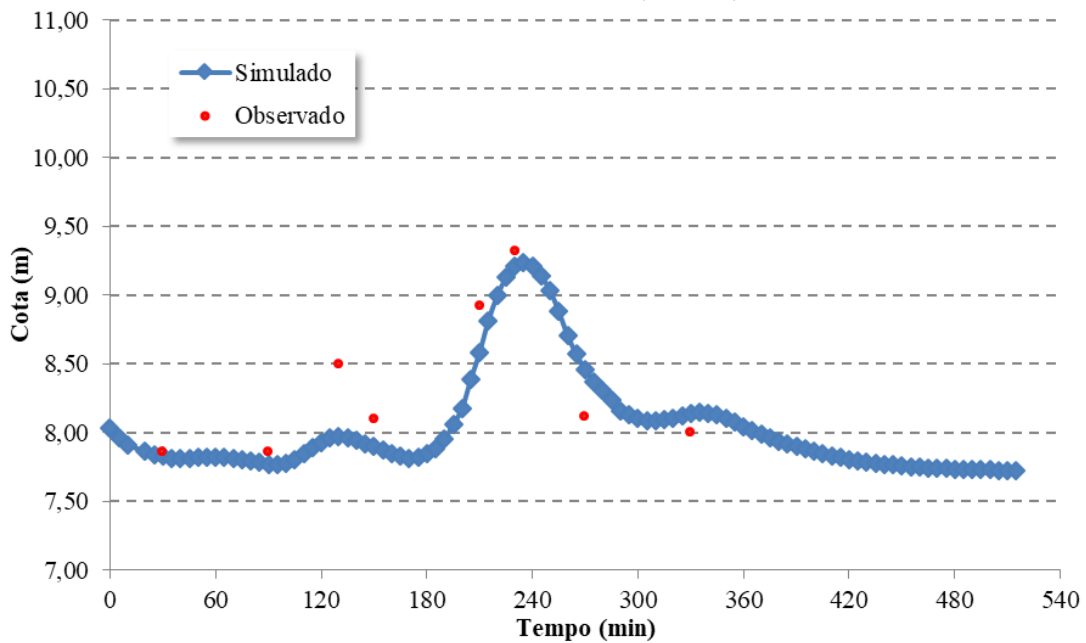
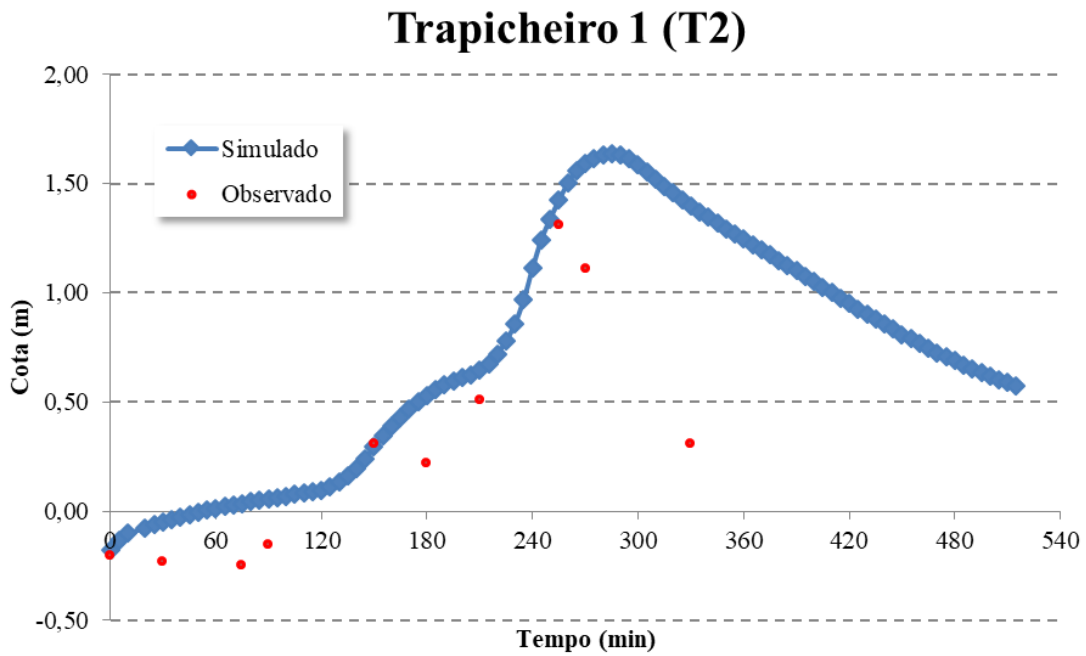
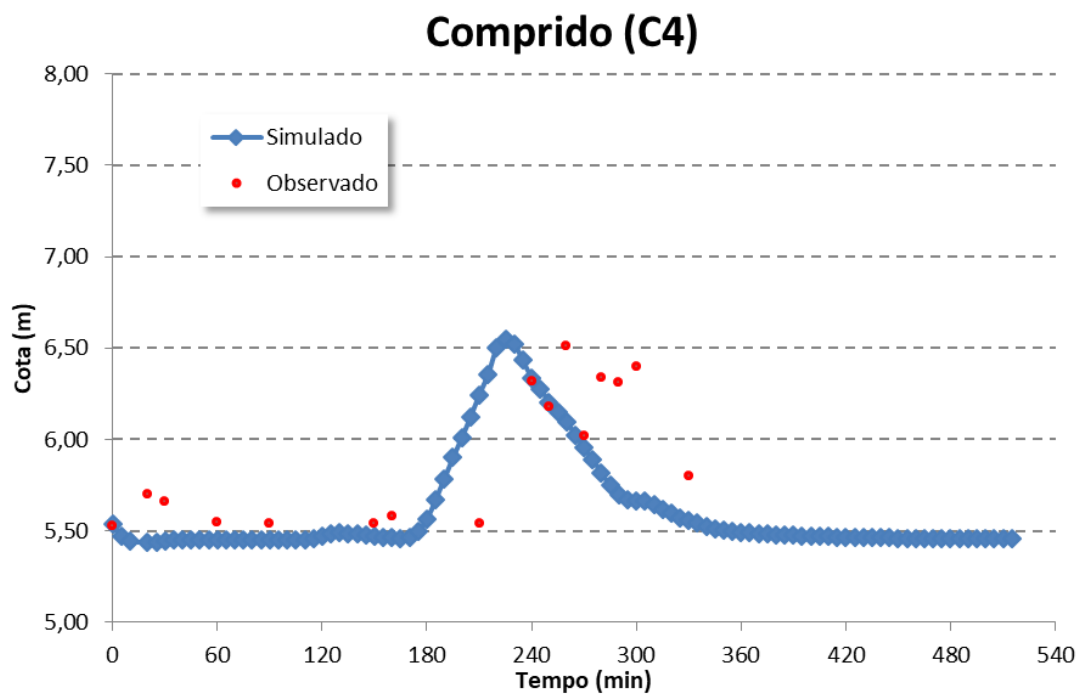


Figura 4.43 – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico M11 (Rio Maracanã).  
EVENTO DE VALIDAÇÃO.



**Figura 4.44** – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico T2 (Rio Trapicheiros).  
EVENTO DE VALIDAÇÃO.



**Figura 4.45** – Níveis d’água simulados e observados no Posto Fluviométrico C4 (Rio Comprido).  
EVENTO DE VALIDAÇÃO.

#### 4.6.3 Domínio de modelagem e domínio de interesse

Em estudos de modelagem matemática para simulação hidrodinâmica, inicialmente, é definido o domínio de modelagem, no qual são efetuados os cálculos hidráulicos para estimativa dos níveis d'água e vazões. O domínio de modelagem deve cobrir toda a área de interesse, para permitir a análise e avaliação dos resultados nos locais desejados. É indicada, ainda, uma expansão deste domínio para além da área de interesse, de forma a afastar possíveis propagações de erros advindos das condições de contorno.

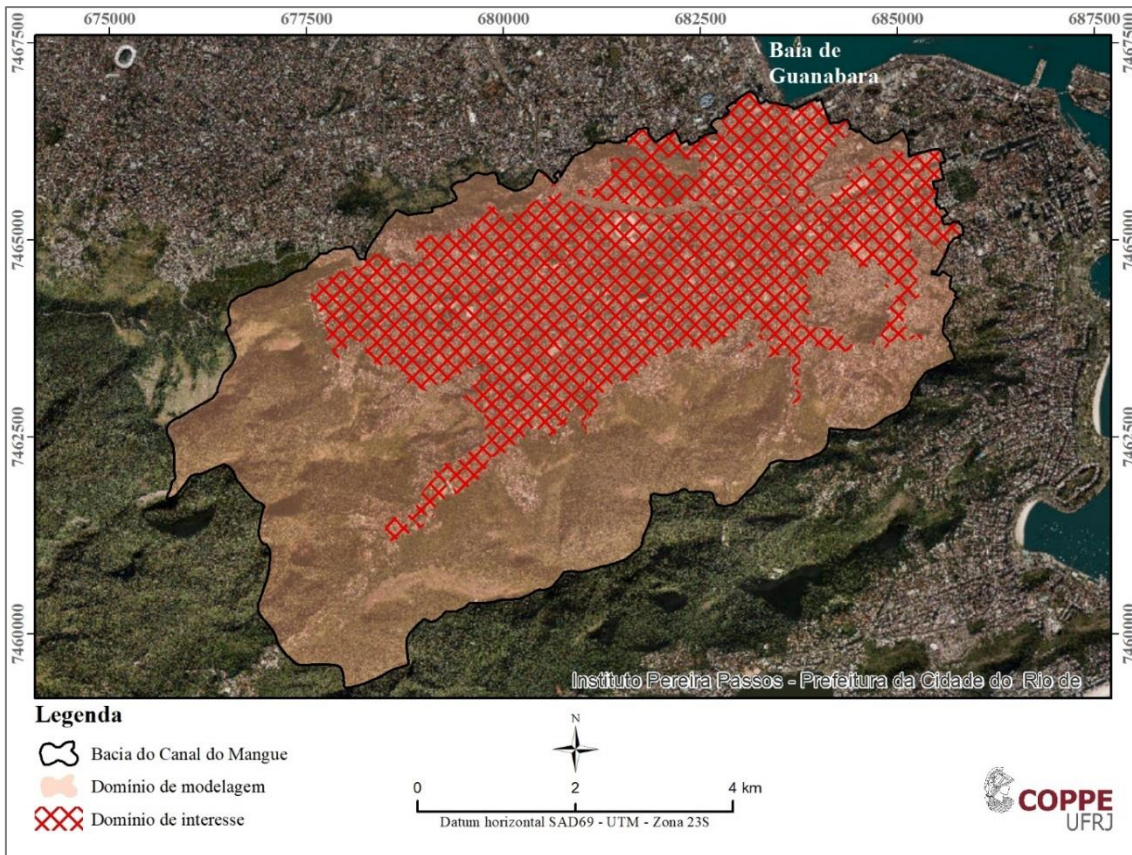
No caso da modelagem de cheias, duas áreas são muito importantes: a região a ser modelada hidrodinamicamente, ou seja, onde haverá respostas de níveis d'água e vazões, e a região das bacias contribuintes, onde serão gerados os hidrogramas de cheia afluentes à área de interesse para avaliação das enchentes.

Como o MODCEL é um modelo matemático que incorpora tanto um módulo hidrológico, quanto um módulo hidrodinâmico, toda a bacia foi discretizada em células de escoamento, não necessitando do uso de uma ferramenta de modelagem hidrológica de apoio. Assim, o domínio de modelagem abrange a totalidade da bacia do Canal do Mangue.

Porém, considerando o objetivo do estudo de modelagem, que busca analisar o comportamento das enchentes e avaliar o impactos das inundações nas áreas urbanas da bacia, é criado um subdomínio, denominado de domínio de interesse, o qual recebe um detalhamento mais criterioso.

O domínio de interesse abrange apenas as planícies propensas a sofrer alagamentos em consequência da ocorrência de eventos hidrológicos intensos. Com essa configuração de análise, são excluídas as áreas de encosta da bacia, ressaltando, porém, que tais áreas fazem parte da modelagem hidrológica hidrodinâmica para todos os cenários simulados, sendo desconsideradas apenas para avaliação dos resultados concernentes aos impactos diretos das inundações.

O domínio de interesse abrange um total de 680 células, que representa 65% de todo o domínio de modelagem. A Figura 4.46 apresenta um mapa com o contorno desses domínios, aplicados ao estudo de cheias na bacia do Canal do Mangue.



**Figura 4.46 – Domínios de modelagem e de interesse para simulação de cheias e avaliação de risco.**

## 4.7 Simulação dos cenários

Os cenários de simulação, definidos no item 3.4, consideram as condições hidráulicas do sistema de macrodrenagem da bacia do Canal do Mangue e eventos hidrológicos com diferentes tempos de recorrência, além de um evento futuro que considera impactos das mudanças climáticas com aumento do volumes de chuvas intensas e sobrelevação do nível médio do mar (NMM). O cruzamento das condições definidas com os eventos naturais resulta em um total de 27 cenários de simulação (ver item 3.4, pág. 96), os quais serão apresentados ao longo deste item.

Inicialmente, para o estudo de cenários de simulação, foram definidos os eventos hidrológicos, adotando-se um total de oito tempos de recorrência, desde frequências ordinárias (1 ano), até extremamente raras (1.000 anos). Estes eventos hidrológicos para simulação dos cenários foram estimados com base nas instruções técnicas da Rio-Águas (RIO DE JANEIRO, 2010). Com base nestas diretrizes, foram calculadas as intensidades e alturas de chuva para todos os tempos de recorrência, utilizando as equações de chuvas intensas

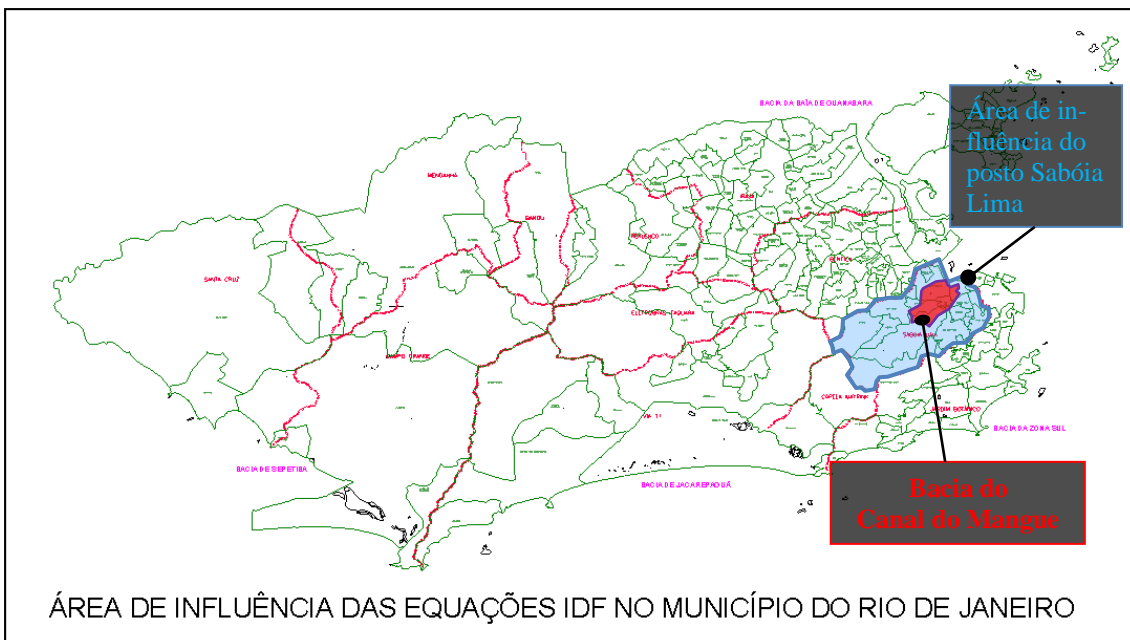
(IDF) indicadas para o município do Rio de Janeiro. A chuva é estimada pela equação (4.1).

$$i = \frac{a \cdot TR^b}{(t + c)^d} \quad (4.1)$$

Na qual:

- ✓  $i$  = intensidade pluviométrica em mm/h;
- ✓  $TR$  = tempo de recorrência em anos;
- ✓  $t$  = tempo de duração da precipitação em minutos.
- ✓  $a, b, c$  e  $d$  são valores dos coeficientes definidos conforme área de influência.

O estudo de caso em questão, situado no bairro do Grajaú, está localizado dentro da área de influência do posto pluviométrico da **estação Sabóia Lima**, como ilustrado na Figura 4.47. Para esse posto, os coeficientes da equação IDF são:  $a = 1.782$ ;  $b = 0,17$ ;  $c = 16,6$ ;  $d = 0,841$



**Figura 4.47 – Localização do Bairro do Grajaú dentro da área de influência do Posto Sabóia Lima**

Aplicando-se a relação IDF dada pela equação (4.1), com os coeficientes do Posto Sabóia Lima, tem-se a equação (4.2).

$$i = \frac{1.782 \cdot TR^{0,17}}{(t + 16,6)^{0,841}} \quad (4.2)$$

Para a definição do tempo de duração da precipitação de projeto, é considerado o tempo de concentração da bacia, de forma a se considerar uma chuva com capacidade de gerar os maiores picos de vazão. O tempo de concentração da bacia do Canal do Mangue foi estimado por meio da aplicação da fórmula de George Ribeiro, resultando em um tempo de 180 minutos.

Definida a duração da chuva de projeto, o evento é distribuído temporalmente, com o objetivo de possibilitar uma avaliação integral da bacia hidrográfica, a partir da simulação de precipitações críticas para diversas sub-bacias. Para isso, a chuva foi subdividida em 06 intervalos iguais de 30 minutos, totalizando um evento com 180 minutos de duração. A distribuição temporal da chuva considerou o método dos blocos alternados (TUCCI, 2004).

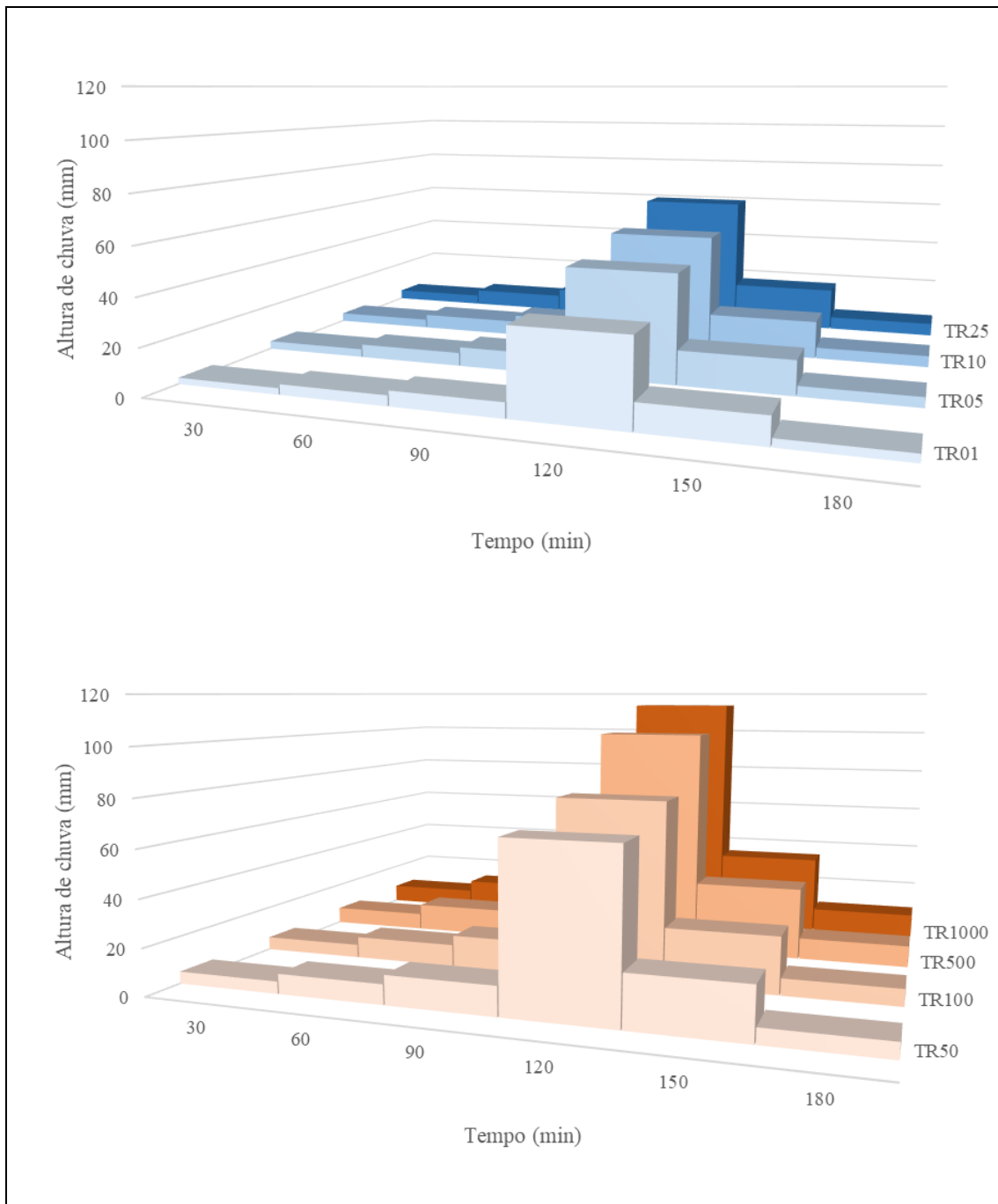
A Tabela 4.5 apresenta as alturas de chuva dos eventos hidrológicos utilizados nas simulações dos cenários propostos para avaliação das cheias na bacia do Canal do Mangue, desde chuvas mais frequentes, com tempos de recorrência (TRs) entre 01 e 25 anos, até eventos extremos, com TRs entre 50 e 1.000 anos. Estes eventos são apresentados graficamente na Figura 4.48.

**Tabela 4.5 – Alturas de chuva dos eventos hidrológicos propostos.**

T (min)	Alturas de chuva, em mm, para os diferentes tempos de recorrência adotados							
	TR01	TR05	TR10	TR25	TR50	TR100	TR500	TR1000
<b>30</b>	2,65	3,49	3,93	4,59	5,16	5,81	7,64	8,59
<b>60</b>	4,34	5,70	6,42	7,50	8,44	9,49	12,48	14,04
<b>90</b>	6,31	8,29	9,33	10,90	12,27	13,80	18,14	20,41
<b>120</b>	35,22	46,30	52,09	60,87	68,48	77,05	101,30	113,96
<b>150</b>	11,16	14,67	16,50	19,28	21,69	24,41	32,09	36,10
<b>180</b>	3,29	4,33	4,87	5,69	6,41	7,21	9,48	10,66
<b>TOTAL</b>	<b>62,97</b>	<b>82,78</b>	<b>93,14</b>	<b>108,84</b>	<b>122,45</b>	<b>137,76</b>	<b>181,11</b>	<b>203,76</b>

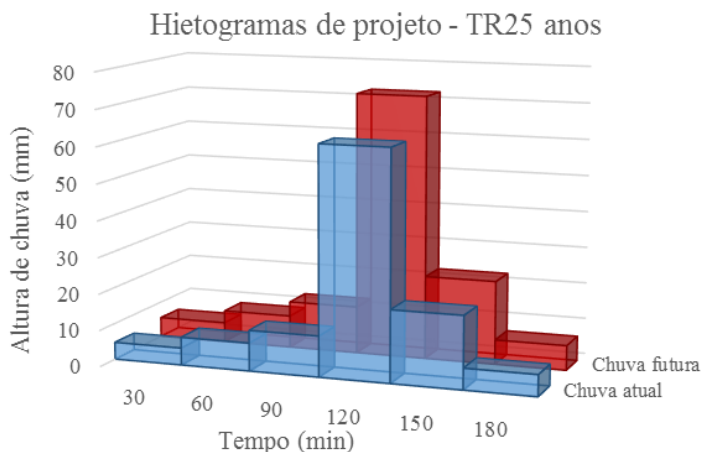
O evento hidrológico para análise de cenário futuro, considerando os impactos das mudanças climáticas, é estimado com o incremento de 16% nos valores encontrados para a chuva de projeto com 25 anos de tempo de recorrência. O hietograma de projeto deste evento pode ser visto na Figura 4.49, comparado ao evento atual, apresentando também

a tabela com os valores de altura ao longo do tempo, majorados pelo incremento considerado.



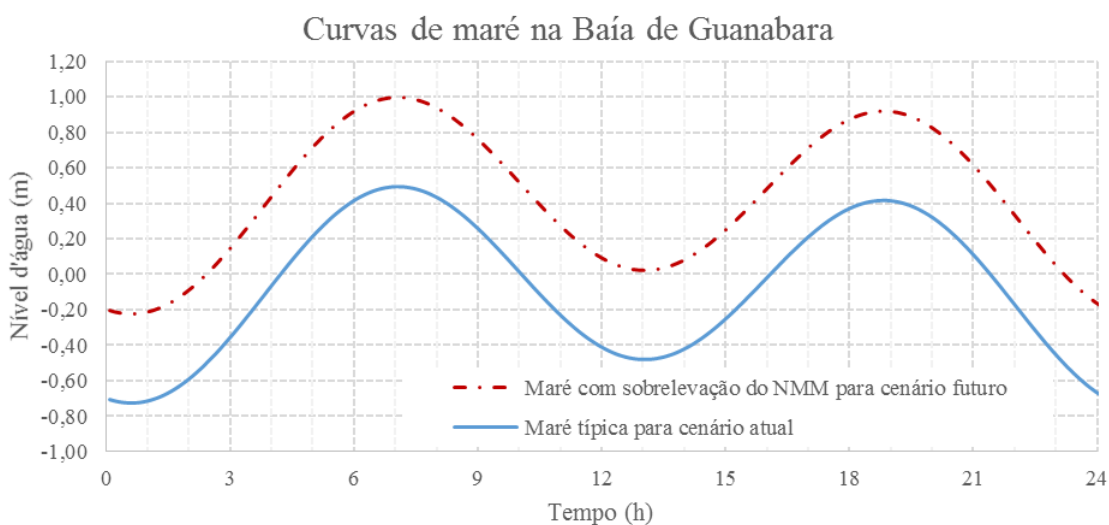
**Figura 4.48 – Hietogramas de projeto utilizados nos cenários de simulação na bacia do Canal do Mangue.**

T (min)	TR25 futuro
30	5,32 mm
60	8,70 mm
90	12,65 mm
120	70,61 mm
150	22,37 mm
180	6,61 mm
<b>TOTAL</b>	<b>126,25 mm</b>



**Figura 4.49 – Evento hidrológico futuro com 25 anos de tempo de recorrência, considerando um possível impacto do processo de mudança climática no aumento do volume de chuvas intensas.**

Para a condição de contorno do modelo que simula a onda de maré na Baía de Guanabara, foi mantida a variação de níveis d'água utilizadas no evento de calibração do modelo matemático, que apresenta níveis máximos próximos 0,50m. A avaliação de um potencial cenário futuro com impacto das mudanças climáticas sobre o nível médio do mar (NMM) é realizada a partir do incremento da sobrelevação de 0,50m à onda de maré. As condições de contorno, atual e futura com aumento do NMM, são apresentadas no gráfico da Figura 4.50.



**Figura 4.50 – Variação do nível d'água na Baía de Guanabara, considerada como condição de contorno para simulação dos eventos de cheia na bacia do Canal do Mangue.**

O estudo do funcionamento da bacia do Canal do Mangue, frente à ocorrência dos eventos hidrológicos descritos, considera três condições para o sistema de drenagem de águas



pluviais, como apresentado no item 3.4 (pág. 96): C0 - *sem intervenções*; C1 - *com intervenções concentradas*; C2 - *com intervenções distribuídas*.

Essa configuração de análise tem por objetivo avaliar os diferentes comportamentos do risco residual na bacia, caracterizado pela ocorrência de eventos hidrológicos com tempo de recorrência superiores ao definido para dimensionamento do sistema. Como o modelo utilizado, o MODCEL, permite uma análise espacial da bacia, simulando tanto o escoamento dentro dos canais e galerias, quanto sobre a superfície urbana, áreas da bacia onde os efeitos das intervenções não são sentidos também são consideradas na análise dos riscos.

Para representação das condições do sistema de drenagem da bacia do Canal do Manguê nos cenários de simulação, são consideradas as intervenções propostas nos dois principais planos de manejo de águas pluviais existentes para a região, o PDMAP e o PBCM, descritos no item 4.5 - Projetos de Controle de Inundações na BCM.

O PBCM (ver item 4.5.1, pág. 137) apresenta uma série de medidas de reservação das águas excedentes das chuvas em estruturas de detenção localizadas nos sopés das encostas da bacia, atenuando as vazões que afluem para as áreas mais planas, onde está localizada quase que a totalidade da ocupação urbana. Adicionalmente, foram considerados reservatórios instalados em praças urbanas, dentro do conceito de paisagens multifuncionais, seguindo os padrões de projeto apresentados no estudo “*Modelagem Matemática de Cheias Urbanas, Através de Células de Escoamento, como Ferramenta na Concepção de Projetos Integrados de Combates às Enchentes*” (COPPETEC, 2003). De forma a integrar medidas de baixo impacto para compensação dos efeitos negativos da impermeabilização da bacia, dentro de uma abordagem de drenagem sustentável, também foram introduzidos, na proposta de intervenções distribuídas, sistemas de pavimentos permeáveis em grandes estacionamentos. Tais estruturas possuem reservatórios preenchidos com brita abaixo da camada de pavimento permeável, mimetizando a capacidade natural de armazenagem e abstração inicial da bacia.

Por sua vez, o PDMAP (ver item 4.5.2, pág. 140) assume características de medidas concentradas, propondo a construção de quatro grandes reservatórios na bacia, uma transposição de curso do rio Maracanã para o rio Joana e uma derivação deste último rio para criação de uma foz diretamente na Baía de Guanabara, independente do canal do Manguê.

Vale ressaltar que as medidas consideradas neste estudo se diferem das estruturas construídas e em fase de construção na bacia, representando a proposta original do plano, disponibilizada pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, as quais são apresentadas nos seguintes documentos do *Memorial descritivo das intervenções para controle de inundações na bacia hidrográfica do Canal do Mangue*:

- ✓ Obras de desvio do rio Joana e derivação do rio Maracanã – **RA0027.RA.054** (04/2011)
- ✓ Reservatórios de detenção – **RA0027.RA.066-2** (08/2011)

Nos próximos itens, serão apresentados os cenários de simulação, suas premissas de modelagem e seus resultados.

#### **4.7.1 Condição C0 – Bacia sem intervenções**

Após a etapa de calibração e validação do modelo matemático construído para simulação dos eventos de cheia na bacia do Canal do Mangue, foram simulados os nove eventos pluviométricos propostos para avaliação da resiliência às inundações da bacia, compostos por oito tempos de recorrência mais um cenário futuro com aumento no volume de chuva devido às mudanças climáticas.

A configuração do sistema de drenagem da bacia foi considerado conforme consta no cadastro da rede de macrodrenagem realizado no âmbito do PBCM. Alterações nos canais ou galerias que ocorreram após a realização deste cadastro não são consideradas no modelo matemático elaborado. Desta forma, os resultados encontrados não representam um diagnóstico da situação atual da bacia do Canal do Mangue, mas uma situação hipotética, relativa a um passado existente. Este cenário serve de base para os dois cenários de projeto, que terão as intervenções propostas em plano inseridas nesta base de modelagem.

Os resultados para análise constam de séries temporais de níveis d'água e tempos de alagamento em cada célula do modelo, assim como as velocidades e vazões de escoamento em cada par de células. Estes resultados representam a parcela do perigo na avaliação de risco a inundações. Uma avaliação das vazões escoadas nos principais canais da bacia evidencia a péssima condição do sistema de drenagem, com vazões de pico bem inferiores ao potencial de produção de escoamentos de uma bacia deste porte.

Nos hidrogramas resultantes da modelagem de cheias da bacia com o MODCEL, são observados picos de cheia bem inferiores aos picos de vazão resultantes da modelagem matemática aplicada pelo PDMAP (2011), a qual não considera o extravasamento dos rios e canais. Os resultados de pico de vazão para ambas modelagens são apresentados na Tabela 4.6.

A Figura 4.51 apresenta os hidrogramas de cheia nos principais canais da bacia, resultantes da simulação da chuva com 25 anos de tempo de recorrência, com uso do MODCEL. Esse resultado mostra a importância da consideração dos efeitos de amortecimento provocados pelo extravasamento de água das calhas dos rios e canais durante eventos de cheias.

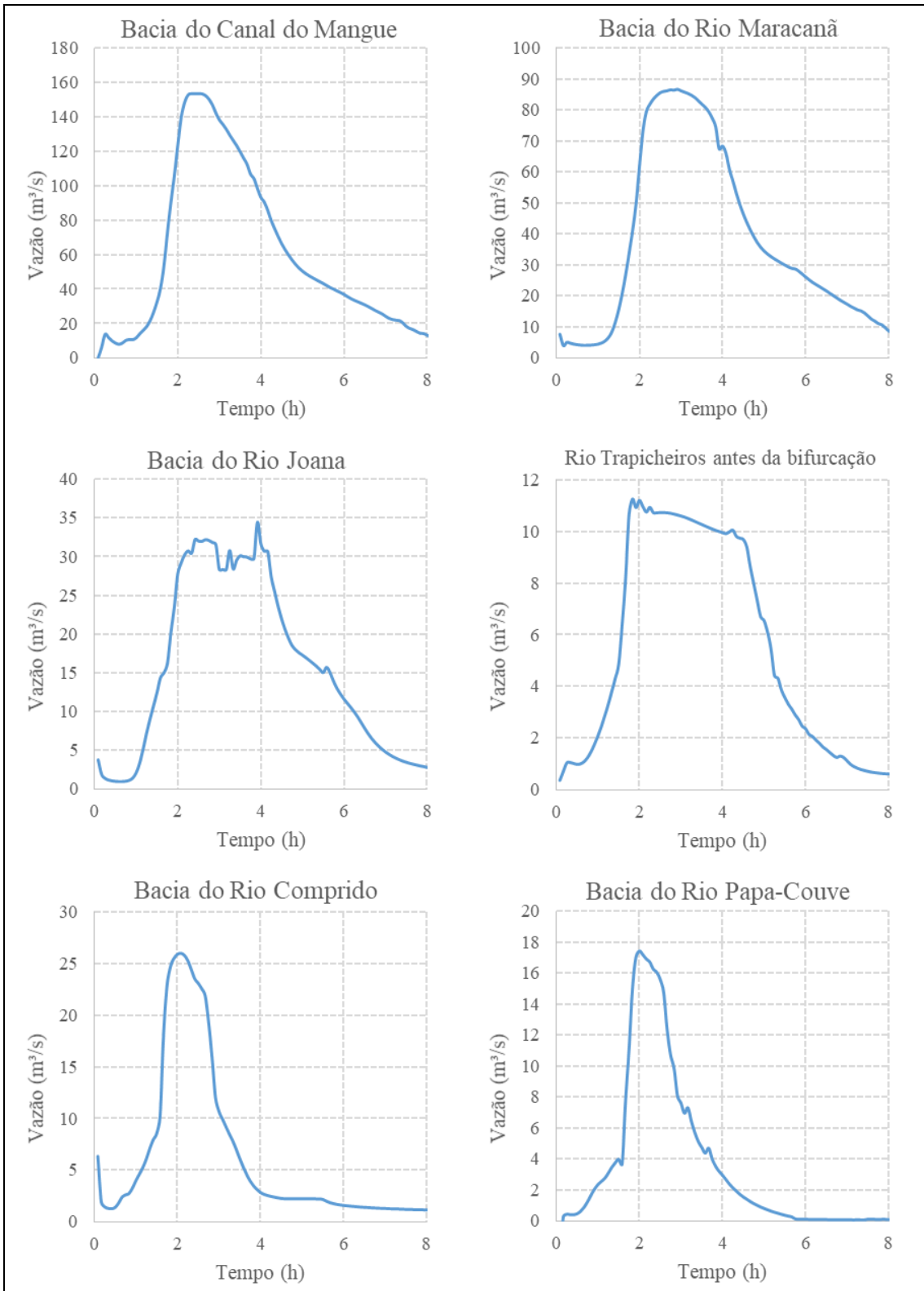
**Tabela 4.6 – Vazões de pico resultantes da modelagem do PDMAP (2011) e do MODCEL.**

Bacia	Vazões de pico (m <sup>3</sup> /s) - TR25 anos		
	PDMAP (2011)	MODCEL	Diferença
Canal do Mangue	320,50	153,50	52%
Rio Maracanã	180,00	86,63	52%
Rio Joana	106,00	34,42	68%
Rio Trapicheiros, antes da bifurcação	45,00	11,26	75%
Rio Comprido	N/A	26,00	-
Rio Papa-Couve	N/A	17,42	-

N/A –valores não apresentados

A Figura 4.47 apresenta as manchas de inundação resultantes das simulações de cada evento pluviométrico. A persistência de muitas áreas alagadas com pequenas profundidades, mesmo em resposta a eventos de baixo tempo de recorrência, pode ser resultado da não consideração da rede de microdrenagem no modelo. Foram simuladas as galerias com 1,0 metro de diâmetro ou dimensões superiores, a fim de representar os escoamentos na rede subterrânea de maior magnitude.

Uma situação crítica pode ser observada ao longo do curso do rio dos Urubus, que atravessa os bairros do Grajaú, Andaraí e Vila Isabel. O curso do rio, todo em galeria subterrânea, não comporta as vazões drenadas pela encosta do Grajaú e da superfície urbana, apresentando uma seção quadrada de 1,0m de lado. Em seu trecho final, próximo à confluência com o rio Joana, as profundidades de alagamento já superam 0,50m, mesmo para chuvas ordinárias, com recorrência anual. A Figura 4.48 apresenta um detalhe dessa região.



**Figura 4.51 – Hidrogramas de cheia nos principais rios e canais da bacia do Canal do Mangue, resultante de uma chuva com 25 anos de tempo de recorrência.**

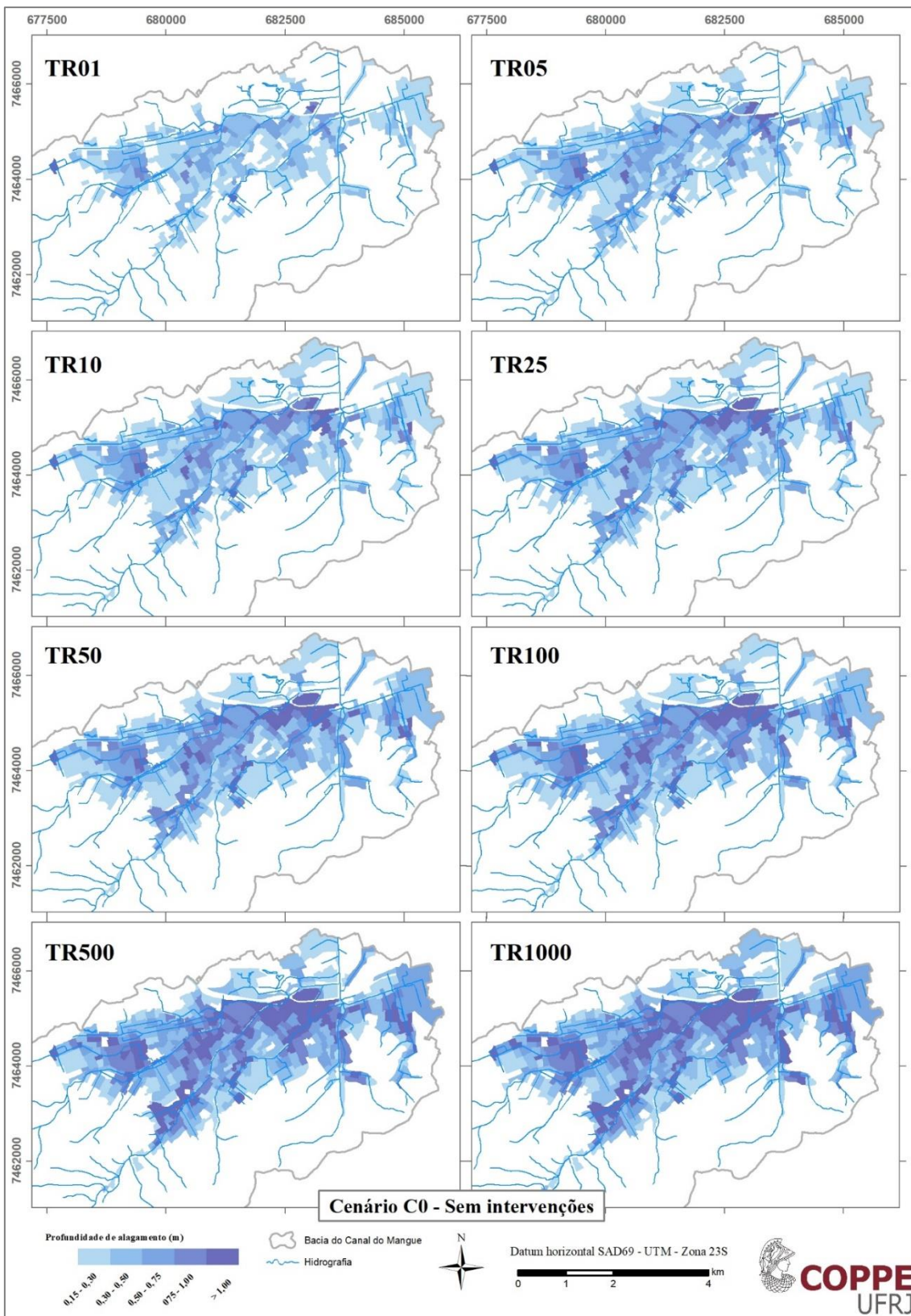
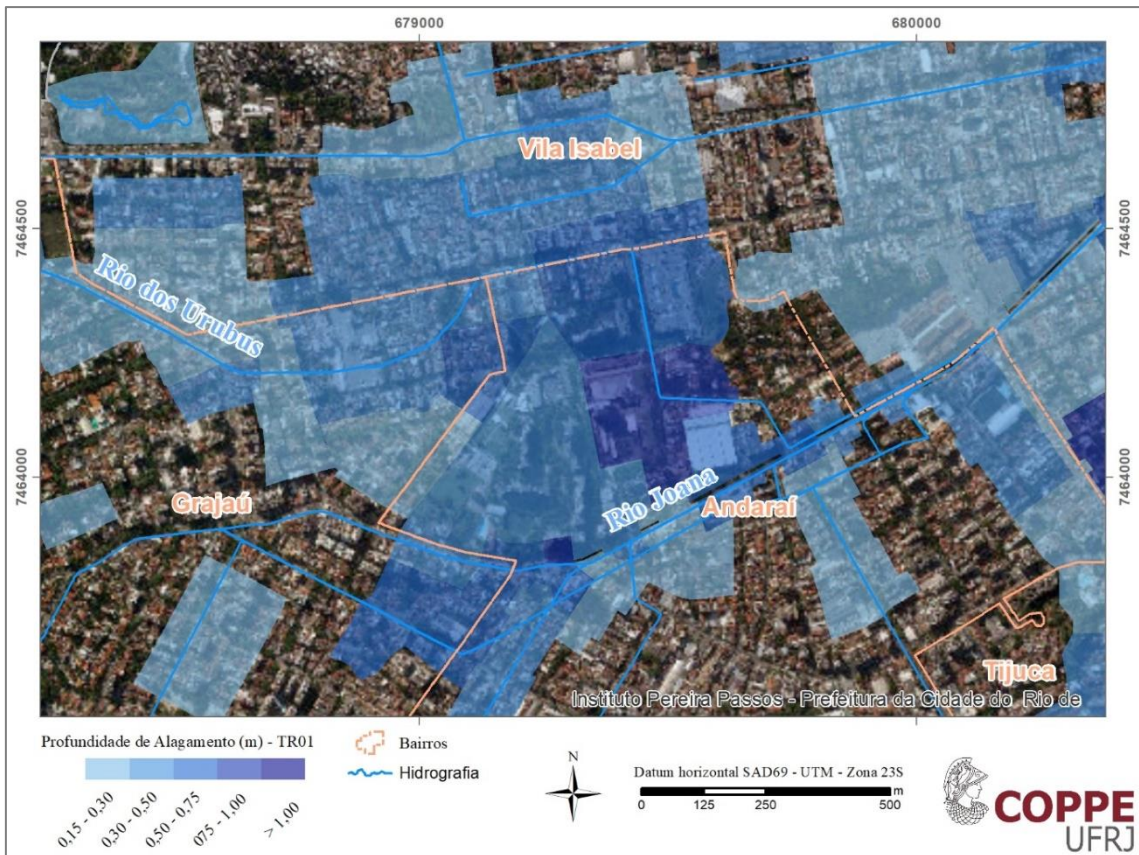


Figura 4.52 – Manchas de alagamento para o cenário sem intervenções na bacia – C0.



**Figura 4.53 – Mancha de alagamento resultante da chuva com recorrência anual, ao longo do curso do rio dos Urubus, entre os bairros do Andaraí, Vila Isabel e Grajaú.**

Outra região crítica da bacia se encontra nas proximidades da Praça da Bandeira, que apresenta alagamentos com profundidades de cerca de 1,0m em decorrência de chuvas com cinco anos de tempo de recorrência, como pode ser observado na Figura 4.54. Este resultado é corroborado por inúmeros eventos de inundação na bacia. As ruas do Matoso e Pereira de Almeida apresentam profunda sensibilidade a alagamentos, com episódios de empilhamento de carros em decorrência da alta profundidade alcançada no local.

Esta alta propensão a sofrer alagamentos drásticos pode ser visualizada na fotografia da Figura 4.55, que apresenta a rua do Matoso completamente submersa em decorrência de um evento de chuva intensa ocorrido no dia 12 de março de 2016. Neste evento, foi registrado na região da Tijuca, pelo Sistema Alerta Rio (<http://alertario.rio.rj.gov.br>), uma altura de precipitação de cerca de 105mm, em um período de 3,25h. Tais valores caracterizam um evento pluviométrico com tempo de recorrência entre 15 e 20 anos.

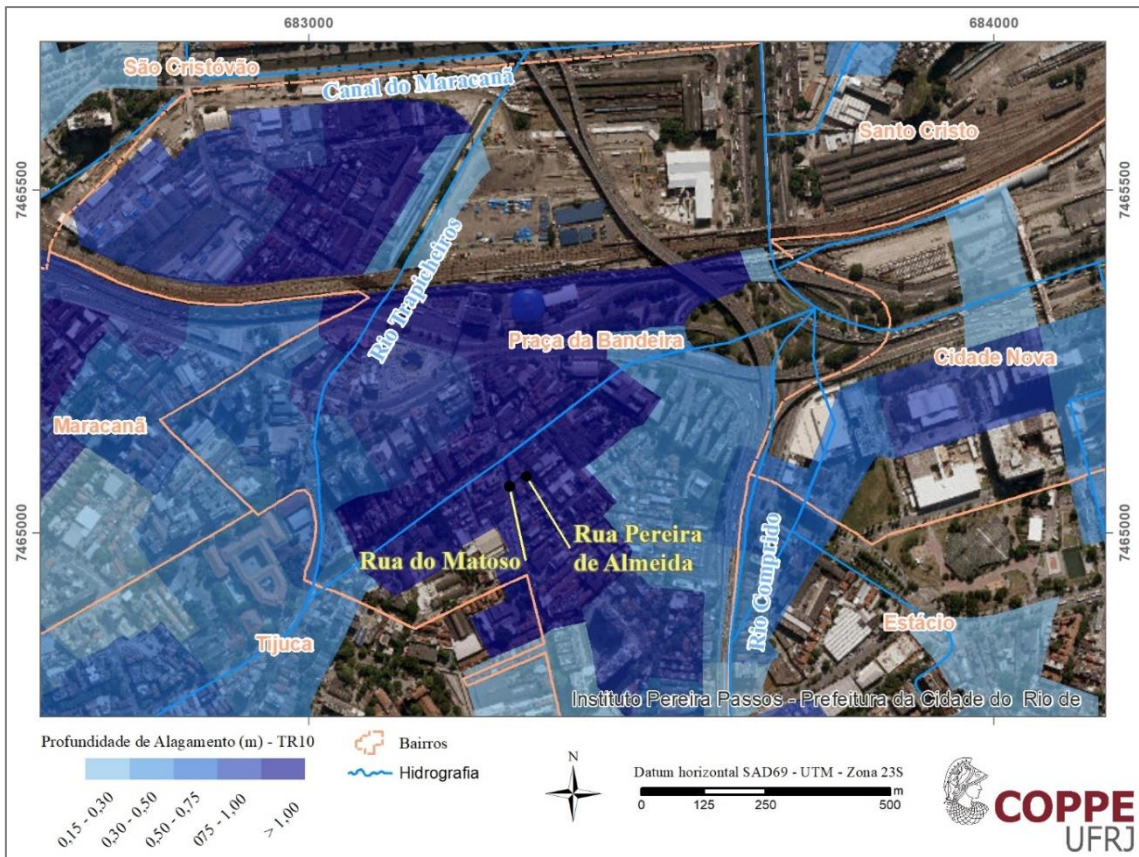


Figura 4.54 – Mancha de alagamento para a região da Praça da Bandeira, em decorrência de uma chuva com 10 anos de tempo de recorrência.



Figura 4.55 – Fotografia da rua do Matoso feita durante um evento de inundação, no dia 12/03/2016 (Foto divulgado em O Globo <<https://goo.gl/cMf79q>>)

#### 4.7.2 Condição C1 – Bacia com intervenções concentradas

O cenário de intervenções concentradas para redução dos danos das inundações considera as obras propostas pelo Plano Diretor de Manejo das Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro, o PDMAP, apresentado em maiores detalhes no item 4.5.2 (pág. 140).

De forma geral, as intervenções se limitam à implantação de quatro grandes reservatórios ao lado dos rios Trapicheiros e Joana, mais uma transposição do rio Maracanã para o rio Joana e o desvio do curso deste último rio para a Baía de Guanabara.

As intervenções propostas pelo PDMAP foram incorporadas na base de modelagem por meio da criação de novas células de escoamento, as quais visam representar o funcionamento das estruturas. A Figura 4.56 apresenta a bacia com a divisão de células e o posicionamento das novas células inseridas para simular as obras propostas. Cada alteração é detalhada posteriormente.

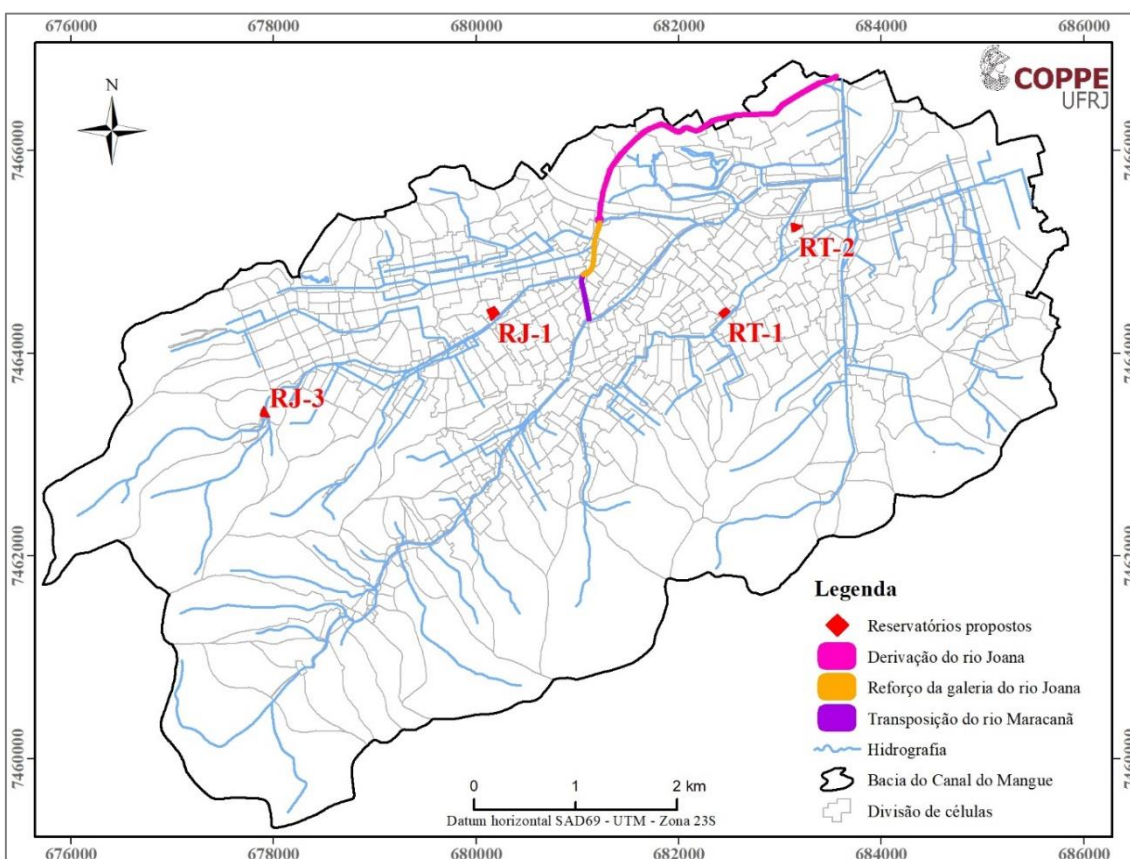


Figura 4.56 – Localização das obras propostas no PDMAP, para redução dos riscos de inundação na bacia do Canal do Mangue, sobre a divisão de células.



## Reservatório RJ-1

A estrutura de detenção RJ-1, prevista para instalação no Boulevard Shopping Car, na avenida Eng. Otacílio Negrão de Lima, no curso médio do rio Joana, possui 143.000m<sup>3</sup> de volume útil.

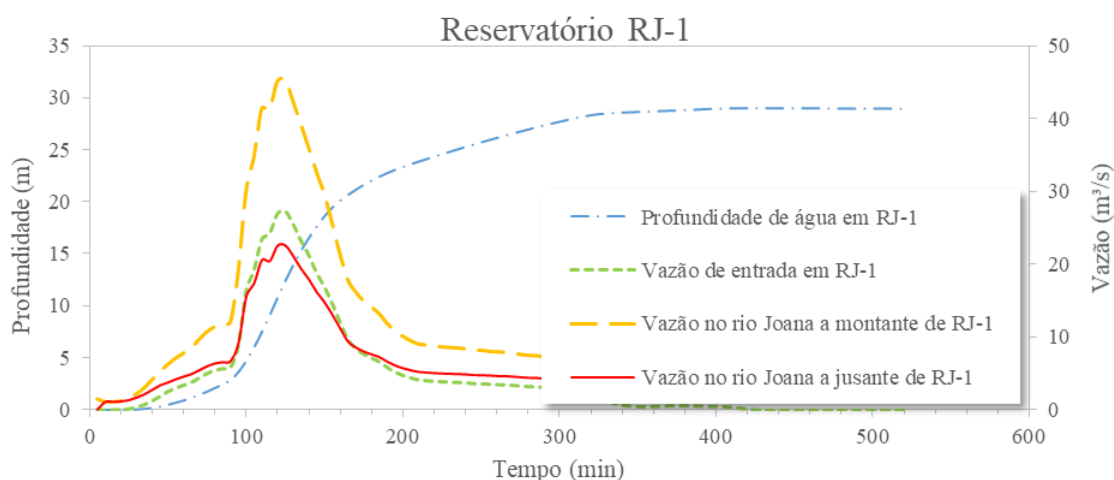
A sua representação no MODCEL foi feita pela inserção de uma nova célula com área de 4.880,50m<sup>2</sup> e 28,80m de profundidade, totalizando um volume de armazenagem total de cerca de 140.000m<sup>3</sup>, conforme o dispositivo proposto no plano.

A estrutura de entrada é representada por um ligação tipo-vertedor entre a célula do rio Joana e uma célula de apoio, que se conecta com o reservatório. O vertedor possui uma largura de 4,0m e a crista está posicionada 0,30m acima da cota de fundo do rio. Tais dimensões foram definidas para otimizar o funcionamento do reservatório, buscando que seu volume fosse aproveitado ao máximo durante a ocorrência de uma chuva com 25 anos de tempo de recorrência. A Figura 4.57 apresenta a localização da célula do reservatório RJ-1.



Figura 4.57 – Localização da célula representativa do reservatório RJ-1, no MODCEL.

O funcionamento do reservatório RJ-1 apresenta um resultado muito positivo, reduzindo o pico de vazões na calha do rio Joana para o trecho de jusante em cerca de 50%, quando simulado um evento hidrológico com 25 anos de tempo de recorrência. Este padrão pode ser observado na Figura 4.58.



**Figura 4.58 – Padrão de funcionamento hidráulico do reservatório RJ-1, para uma chuva com tempo de recorrência de 25 anos, precipitando sobre a bacia do canal do Mangue.**

### Reservatório RJ-3

Para aliviar as vazões drenadas de parte da encosta do Grajaú, é prevista a estrutura de reservação RJ-3, localizada no curso do rio Jacó, um dos formadores do rio Joana. A localização prevista para instalação do reservatório fica em uma área logo a montante da Central Elétrica Rio de Janeiro – Substeção Grajaú, entre as ruas Borda do Mato e Marianópolis (Figura 4.59). A capacidade de armazenagem do reservatório é de 50.000m³.

A representação do reservatório RJ-3 no MODCEL é feita com a criação de uma nova célula, com 2857,15m² de área e 17,50m de profundidade, totalizando um volume útil de 50.000m³, como previsto no PDMAP. O rio Jacó flui livremente para o interior do reservatório, de forma a garantir o uso máximo da estrutura de reservação. Ressalta-se que esta configuração não se apresenta como melhor opção de operação, uma vez que demandaria o bombeamento contínuo de água do interior do reservatório, mesmo durante chuvas muito fracas. O reservatório RJ-3 também apresenta excelente eficiência de amortecimento, com uma redução no pico de vazão do rio Joana de 67%, para a chuva com 25 anos de tempo de recorrência, como pode ser visto na Figura 4.60.

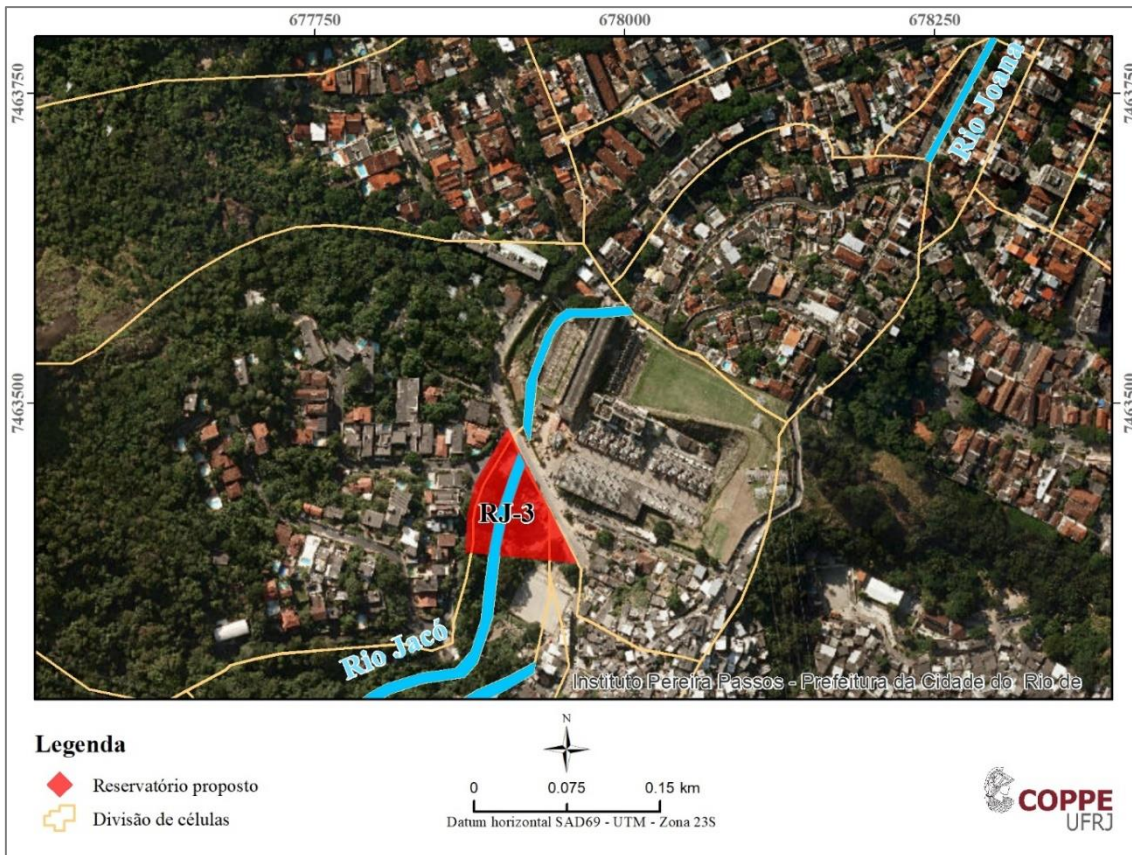


Figura 4.59 – Localização da célula representativa do reservatório RJ-3, no MODCEL.

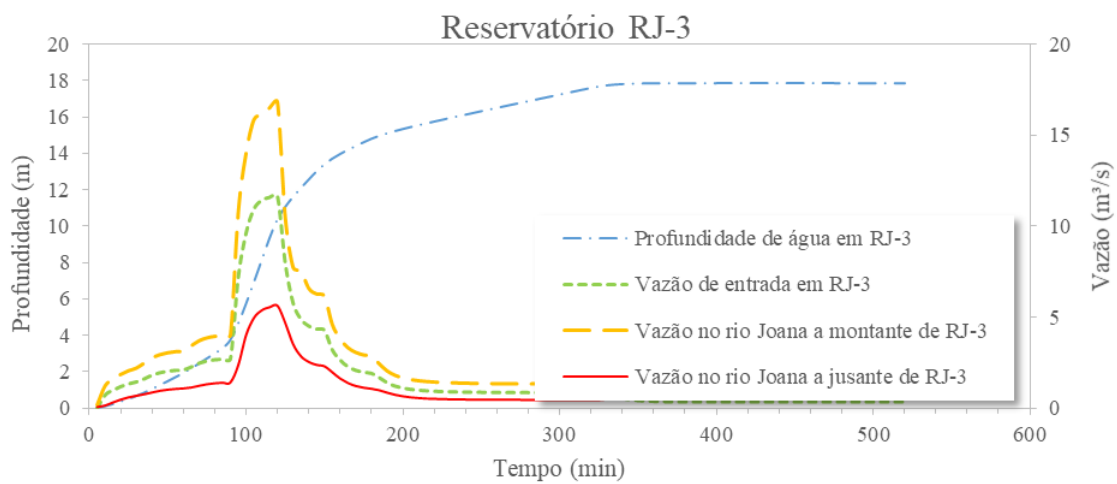


Figura 4.60 – Padrão de funcionamento hidráulico do reservatório RJ-3, para uma chuva com tempo de recorrência de 25 anos, precipitando sobre a bacia do canal do Mangue.

## Reservatório RT-1

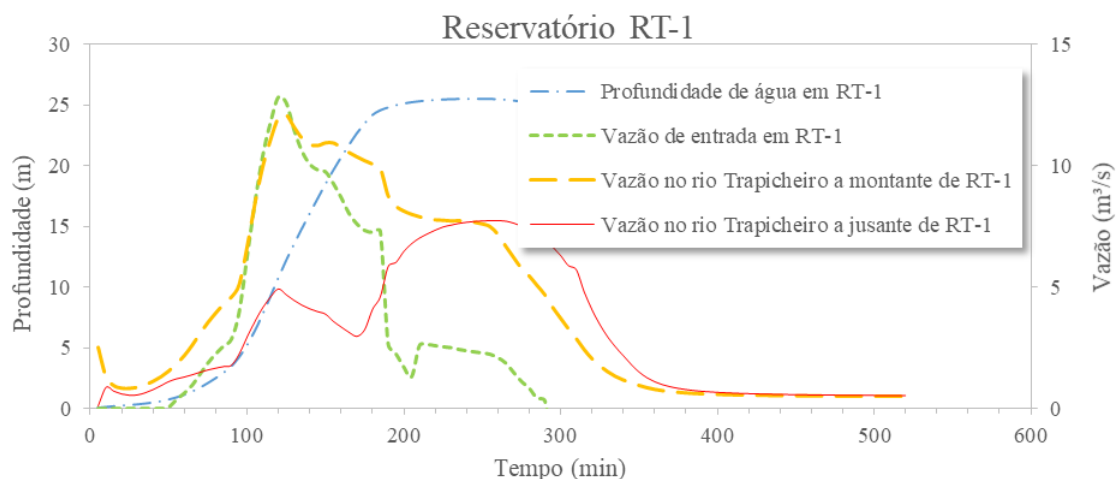
Previsto para implantação na bacia do rio Trapicheiros, o reservatório RT-1 possui volume de 70.000m<sup>3</sup>. Sua localização fica no estacionamento do supermercado Extra, que possui fundos para a avenida Heitor Beltrão, onde está o curso do rio Trapicheiro. A Figura 4.61 apresenta o local de implantação do reservatório.

Foi inserida uma nova célula no MODCEL, com área 3.181,80m<sup>2</sup> e profundidade de 22m, totalizando um volume útil de 70.000m<sup>3</sup>, representando o reservatório RT-1 proposto no plano. O reservatório possui uma conexão hidráulica por vertimento, com largura de 4,00m e crista com cota 0,40m acima da cota de fundo da calha do rio Trapicheiro. Analogamente às demais estruturas, tal configuração foi otimizada para um melhor funcionamento do reservatório.



**Figura 4.61 – Localização da célula representativa do reservatório RT-1, no MODCEL.**

O reservatório RT-1 apresenta um bom amortecimento da cheia no rio Trapicheiro, com uma redução de pico de vazão de 36%, quando considerado um evento com 25 anos de tempo recorrência. Esse amortecimento é apresentado na Figura 4.62.



**Figura 4.62 – Padrão de funcionamento hidráulico do reservatório RT-1, para uma chuva com tempo de recorrência de 25 anos, precipitando sobre a bacia do canal do Mangue.**

### Reservatório RT-2

Para aliviar uma das regiões mais afetadas pelas inundações na bacia do Canal do Mangue, é proposta, no PDMAP, o reservatório RT-2, localizado na Praça da Bandeira (Figura 4.63). Tal reservatório, com volume de 18.000m<sup>3</sup>, terá como principal objetivo captar as águas de drenagem da bacia local, ou seja, da rede de microdrenagem do entorno da praça, reduzindo as altas lâminas de alagamento que se concentram nessa região.

No MODCEL, esse reservatório é representado por uma célula com 1135,60m<sup>2</sup> e profundidade de 15,85m, totalizando os 18.000m<sup>3</sup> previstos no projeto. A afluência das águas pluviais ao dispositivo de retenção é representada por ligações *tipo-boca de lobo* entre a célula do reservatório e todas as células superficiais vizinhas. Conforme previsto em projeto, há uma conexão entre o reservatório e o braço esquerdo do rio Trapicheiros, por onde as águas armazenadas serão evacuadas.

Este reservatório tem por objetivo principal a redução do acúmulo de água de chuva sobre a superfície do entorno da Praça da Bandeira. A reservação de parte da água que chove sobre a bacia local ocasiona um amortecimento das vazões que chegaria ao curso do rio Trapicheiro, como pode ser visto na Figura 4.64. Como este trecho já se localiza em uma área muito baixa e bem próxima à influência do Canal do Mangue, os impactos sobre a hidrodinâmica do rio Trapicheiros não são significativos, mas há uma grande redução nas profundidades de alagamento do entorno da Praça da Bandeira.

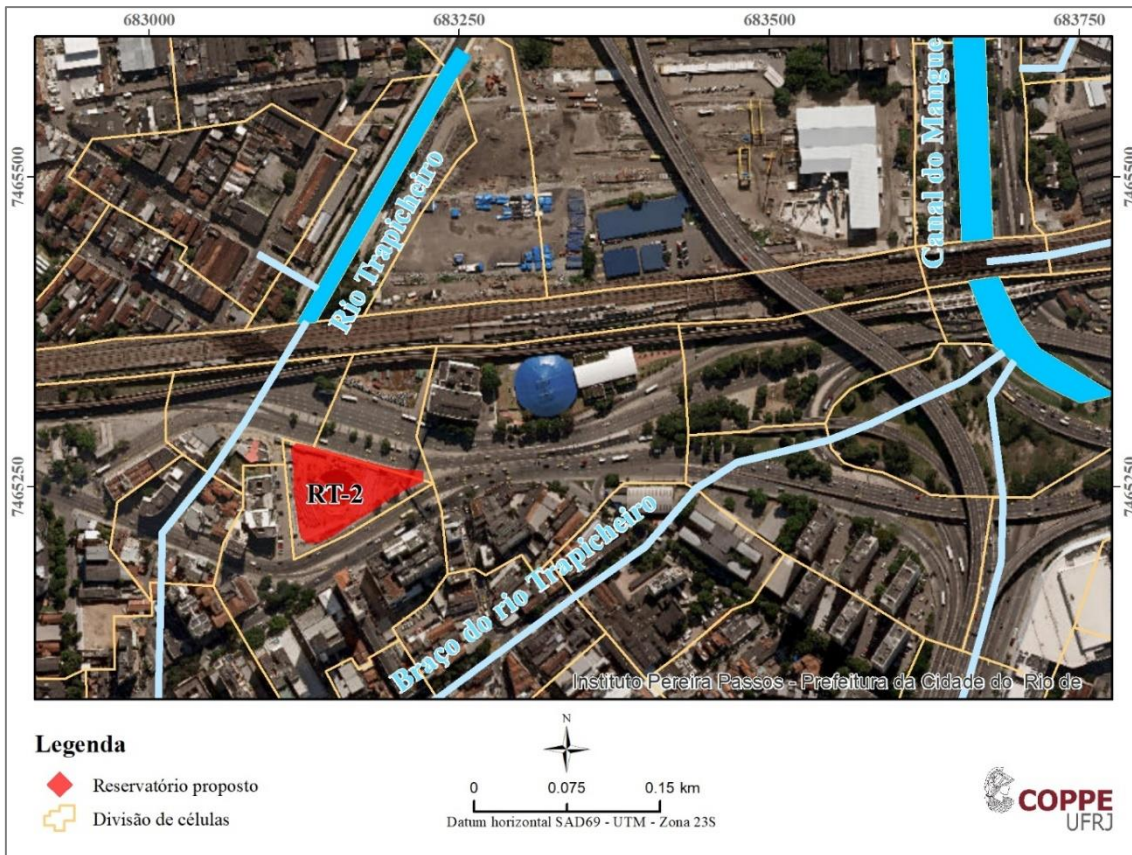


Figura 4.63 – Localização da célula representativa do reservatório RT-2, no MODCEL.

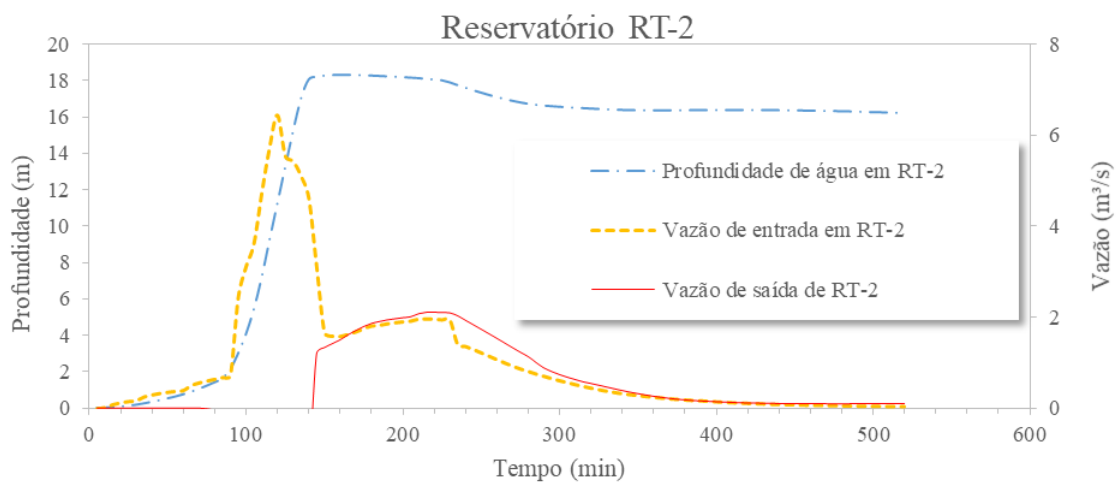


Figura 4.64 – Padrão de funcionamento hidráulico do reservatório RT-2, para uma chuva com tempo de recorrência de 25 anos, precipitando sobre a bacia do canal do Mangue.

## Desvio do rio Joana

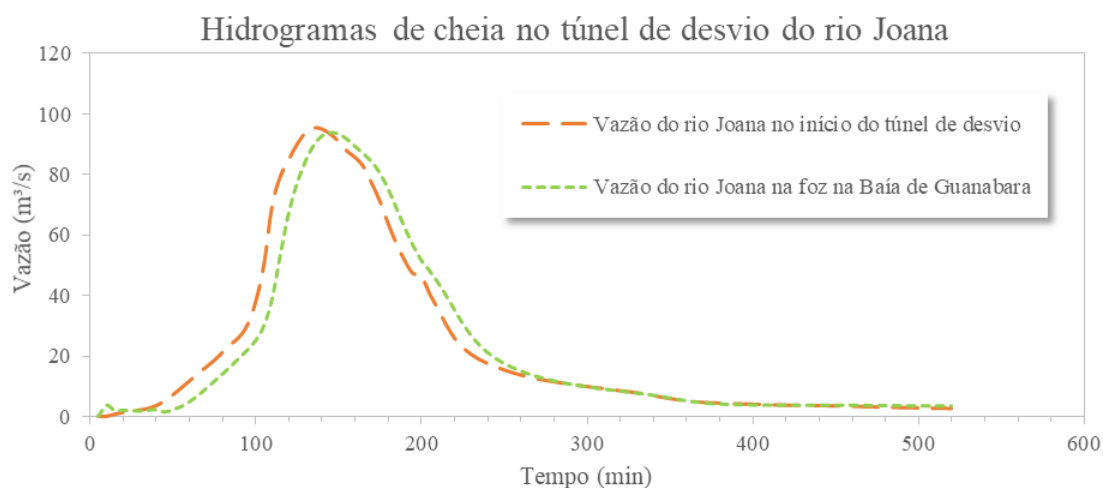
A desconcentração de volumes de água na calha do Canal do Mangue é uma das principais intervenções previstas para a bacia, com excelente impacto positivo na hidráulica do sistema. O desvio do curso do rio Joana tem início na praça Pres. Emílio Garrastazu Médici e final na Baía de Guanabara, próximo à atual foz do Canal do Mangue. O desvio foi projetado em túnel, com uma seção transversal média de 38m<sup>2</sup>.

A representação do túnel de derivação do rio Joana no MODCEL foi feita por meio da inserção de 21 novas células, representando as galerias projetadas. O traçado do desvio pode ser visto sobreposto à divisão de células da região na Figura 4.65.

Com a implantação do desvio mais a transposição de vazões do rio Maracanã, o rio Joana passa a escoar uma vazão de pico de 95m<sup>3</sup>/s, lançada diretamente na Baía de Guanabara. A Figura 4.66 apresenta os hidrogramas de entrada no túnel de desvio e em sua foz, na baía.



Figura 4.65 – Traçado proposto no PDMAP para o desvio do curso do rio Joana.



**Figura 4.66 – Hidrogramas de cheia resultantes da chuva com 25 anos de tempo de recorrência no início e no fim do túnel de desvio do rio Joana.**

### **Transposição do rio Maracanã e galeria de reforço do rio Joana**

Na configuração da bacia, sem as intervenções propostas nos planos, já há a ocorrência de transposição entre as bacias dos rios Maracanã e Joana. Porém, os escoamentos ocorrem de forma indesejada, sobre a superfície urbana, ocasionando danos e prejuízos à cidade. Assim, aproveitando o aumento esperado da capacidade hidráulica do rio Joana, após implementação do túnel de desvio de seu curso, é proposta a instalação de uma galeria conectando o curso do rio Maracanã à calha do rio Joana, sob a rua Felipe Camarão, onde já ocorre a transposição pelo extravasamento das águas do rio Maracanã, que escoam sobre esta rua até alcançar o rio Joana.

Esta galeria, composta por duas células de 3,00m x 2,50m, tem início no trecho do rio Maracanã próximo à praça Varnhagem, passando sob a Rua Felipe Camarão até alcançar o Rio Joana, na Av. Prof. Manoel de Abreu. A galeria de transposição é representada no MODCEL pela inserção de 04 novas células, que se interligam por meio de ligações *tipo-galeria*.

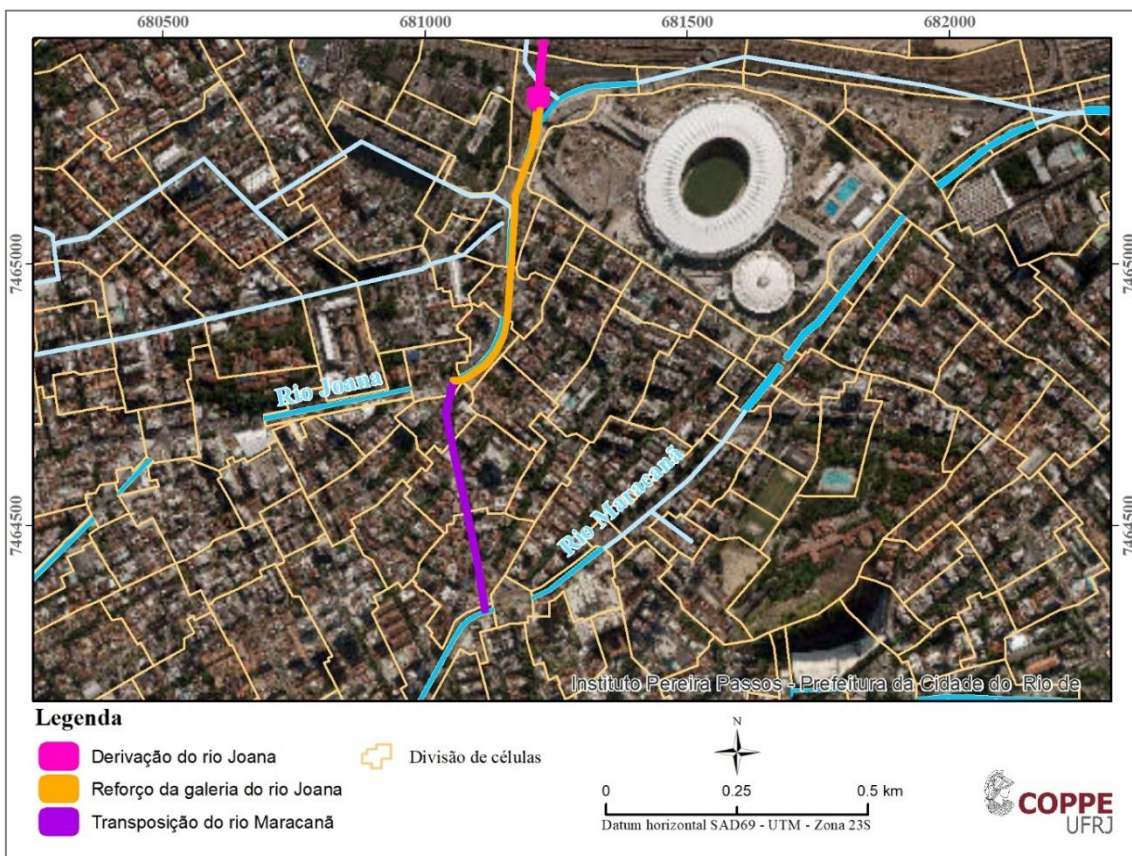
Para possibilitar a passagem da vazão de cheia transposta da bacia do rio Maracanã, há a previsão de construção de uma galeria de reforço em um trecho do rio Joana, entre a rua Felipe Camarão, onde chega a galeria de transposição, e o local do desvio de seu curso. Este reforço tem por objetivo evitar transpobordamentos da calha do rio Joana, ocasionados pelo aumento das vazões escoadas no trecho, com a soma de parte das vazões de cheia da bacia do rio Maracanã.



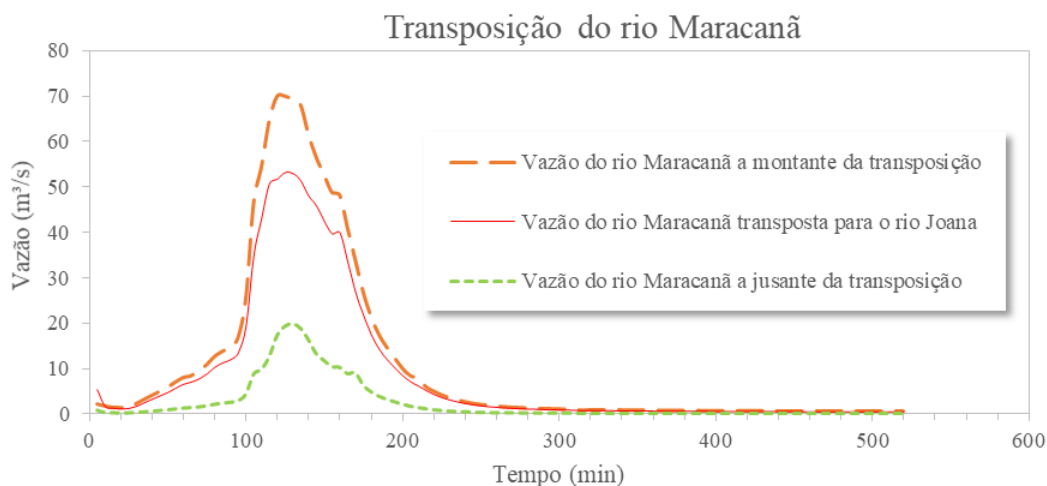
Analogamente ao desvio do rio Joana e à transposição do rio Maracanã, a representação da galeria de reforço do trecho do rio Joana no MODCEL se dá pela inserção de 07 células, conectadas por ligações *tipo-galeria*. Esta galeria de reforço é paralela à galeria do rio Joana existente e possui seção 5,00m x 2,50m.

O mapa da Figura 4.67 apresenta o traçado proposto para a galeria de transposição do rio Maracanã e o trecho do rio Joana que deverá receber uma galeria de reforço.

A transposição tem um grande impacto na redução de vazões que escoam pela calha do rio Maracanã para o trecho de jusante. O pico da vazão transposta ultrapassa os 50m<sup>3</sup>/s, reduzindo a vazão de pico para jusante do rio Maracanã em 72%. Esses resultados podem ser observados nos hidrogramas apresentados na Figura 4.68. Com essa vazão extra, a calha do rio Joana passa a escoar as águas de cheia com o trecho reforçado, até encontrar o túnel de desvio.

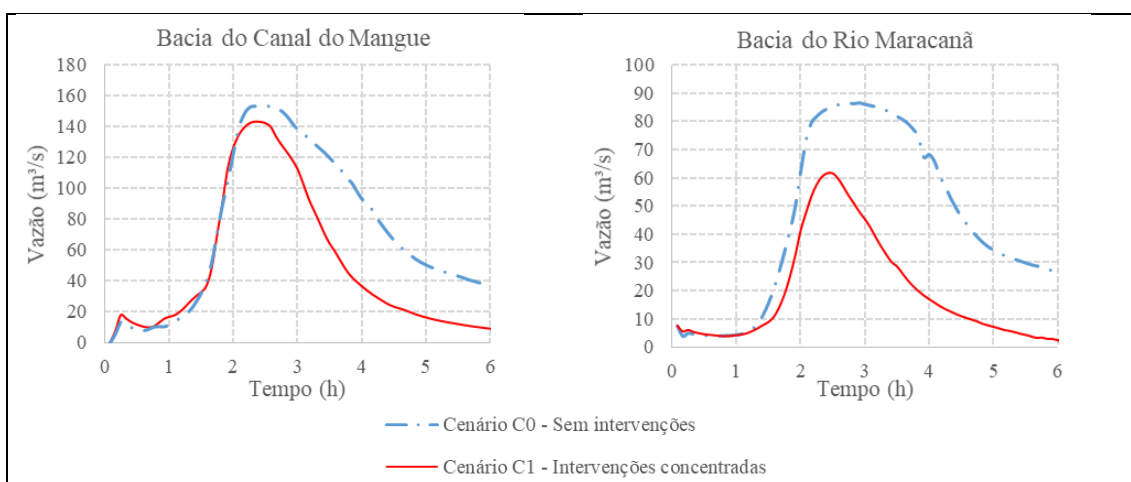


**Figura 4.67 – Traçado proposto para galeria de transposição do rio Maracanã para o rio Joana e seu trecho com reforço de galeria.**



**Figura 4.68 – Hidrogramas de cheia resultante da chuva com 25 anos de tempo de recorrência no rio Maracanã no trecho proposto para transposição.**

As intervenções propostas no cenário de medidas concentradas (C1), tem um efeito de redução significativo nas vazões de cheia do sistema, ocasionado, principalmente, pela introdução do desvio do curso do rio Joana. A redução na vazão de pico do rio Maracanã chega a quase 30%, enquanto que a vazão final do Canal do Mangue apresenta uma redução de apenas 7%, porém, com uma significativa redução no volume do hidrograma. Parte dessa redução resulta da simulação dos reservatórios sem a consideração do retorno da água armazenada, a qual seria, na concepção do PDMAP, bombeada para os canais após o final do evento. Esse padrão de comportamento pode ser observado na Figura 4.69. As manchas de inundação resultantes deste cenário são apresentadas na Figura 4.70.



**Figura 4.69 – Hidrogramas de cheia para chuva com 25 anos de tempo de recorrência, no rio Maracanã e no Canal do Mangue, nas condições sem intervenção (C0) e com intervenções concentradas (C1).**

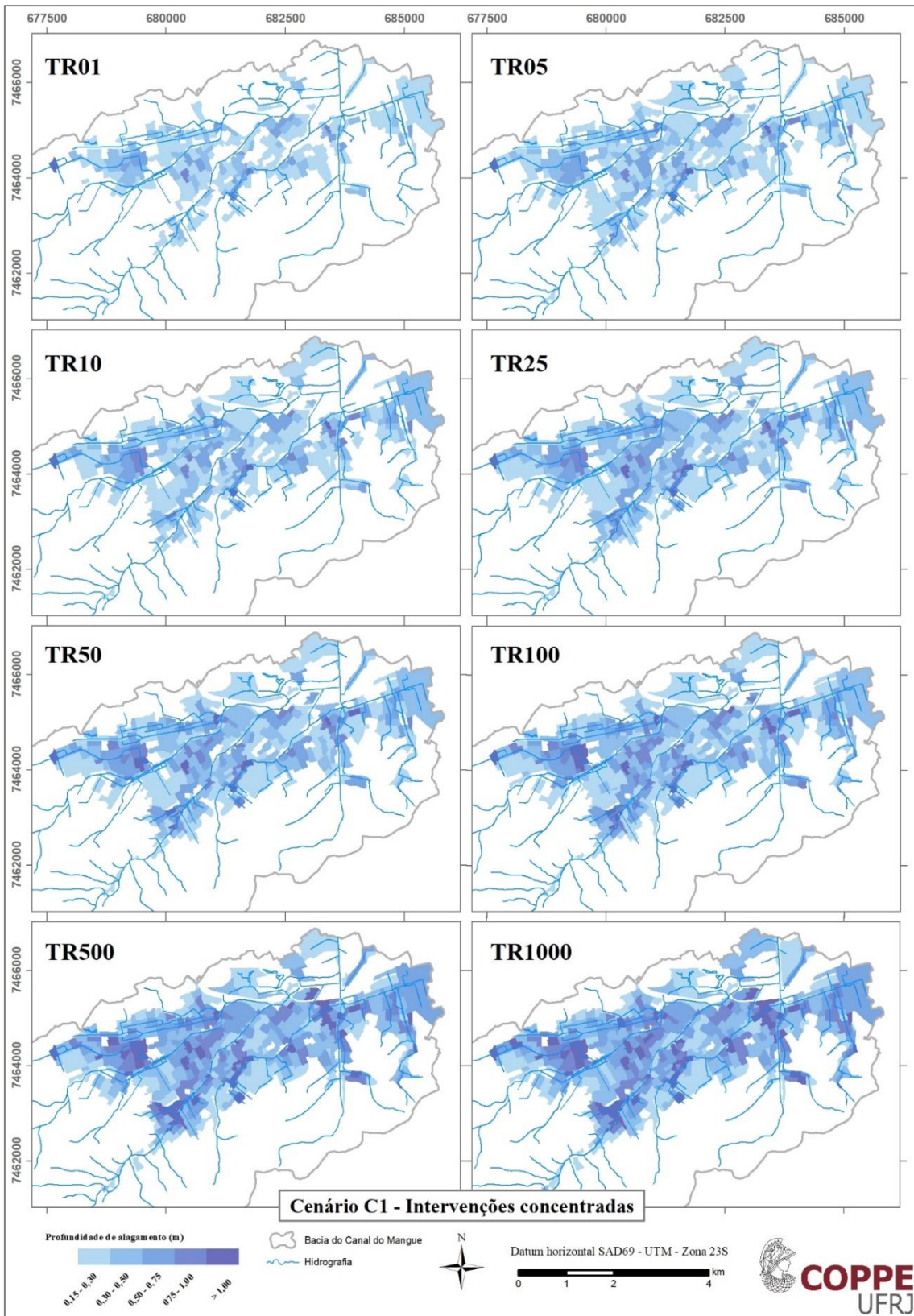


Figura 4.70 – Manchas de alagamento para o cenário com intervenções concentradas na bacia – C1.

#### 4.7.3 Condição C2 – Bacia com intervenções distribuídas

O cenário de intervenções distribuídas para redução dos danos das inundações considera as obras propostas pelo *Plano Diretor de Enchentes da Bacia do Canal do Mangue*, o PBCM, apresentado em maiores detalhes no item 4.5.1.

O plano, que previa, entre outras intervenções, a construção de diversos reservatórios nos pés das encostas da bacia, foi complementado por uma série de estudos realizados no Laboratório de Hidráulica Computacional da COPPE/UFRJ, entre pesquisas acadêmicas e projetos. Assim, para uma maior diversificação das ações propostas para redução dos riscos de inundação na bacia, as intervenções do PBCM foram complementadas com a proposição de implantação de reservatórios de detenção associados a praças urbanas, dentro do conceito de paisagens multifuncionais. Além dos reservatórios nas encostas e em praças urbanas, é considerado também a instalação de sistemas de drenagem com pavimento permeável em grandes estacionamentos e áreas abertas impermeabilizadas. Complementarmente, foi inserida uma intervenção no rio Trapicheiro, que prevê a abertura de trechos em galeria, entre as ruas General Roca e São Francisco Xavier, a qual estaria associada a uma requalificação urbana de seu entorno. Tal medida corrige uma falha histórica no curso do rio, que escoava neste trecho em uma galeria subdimensionada, atravessando terrenos privados, o que dificulta a sua manutenção. A concepção do projeto de abertura deste trecho do rio Trapicheiro foi idealizada por Paiva (2017). A Figura 4.71 apresenta uma prancha com parte da concepção deste projeto de requalificação do entorno do rio Trapicheiro.

Por fim, foi considerada a construção do novo eixo de drenagem proposto no PDMAP, composto pela galeria de transposição do rio Maracanã, reforço de galeria no trecho do rio Joana e desvio deste até a Baía de Guanabara. Esta obra foi incorporada ao projeto de intervenções distribuídas por adotar uma lógica de descentralização de vazões, a qual vai de encontro a uma abordagem mais sustentável, buscando devolver ao rio Joana uma foz independente, sem entrar na discussão de qual seria o melhor traçado e método construtivo para sua implementação.

A seguir, será discutida cada intervenção proposta e seus impactos no funcionamento do sistema de drenagem da bacia.

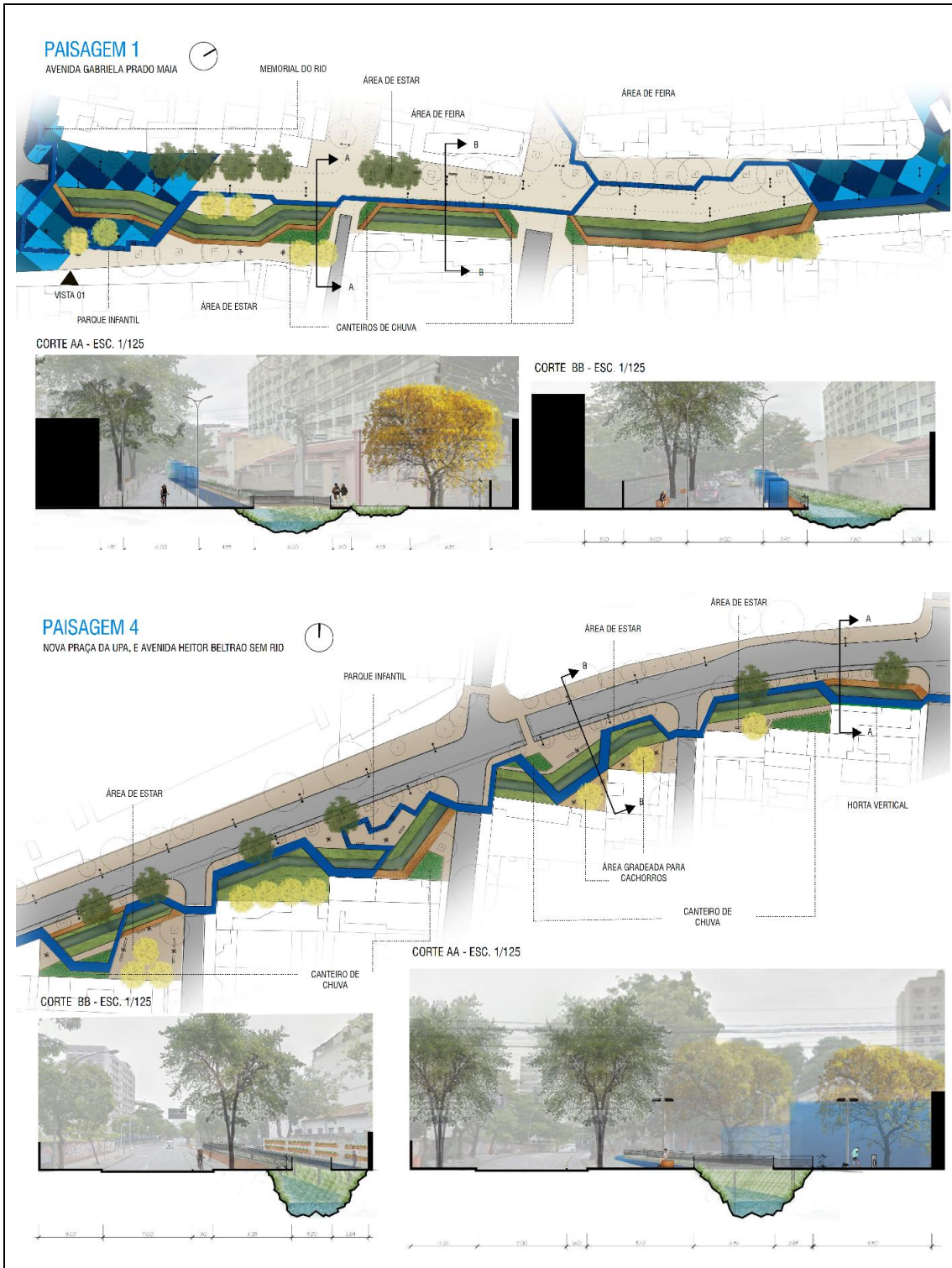
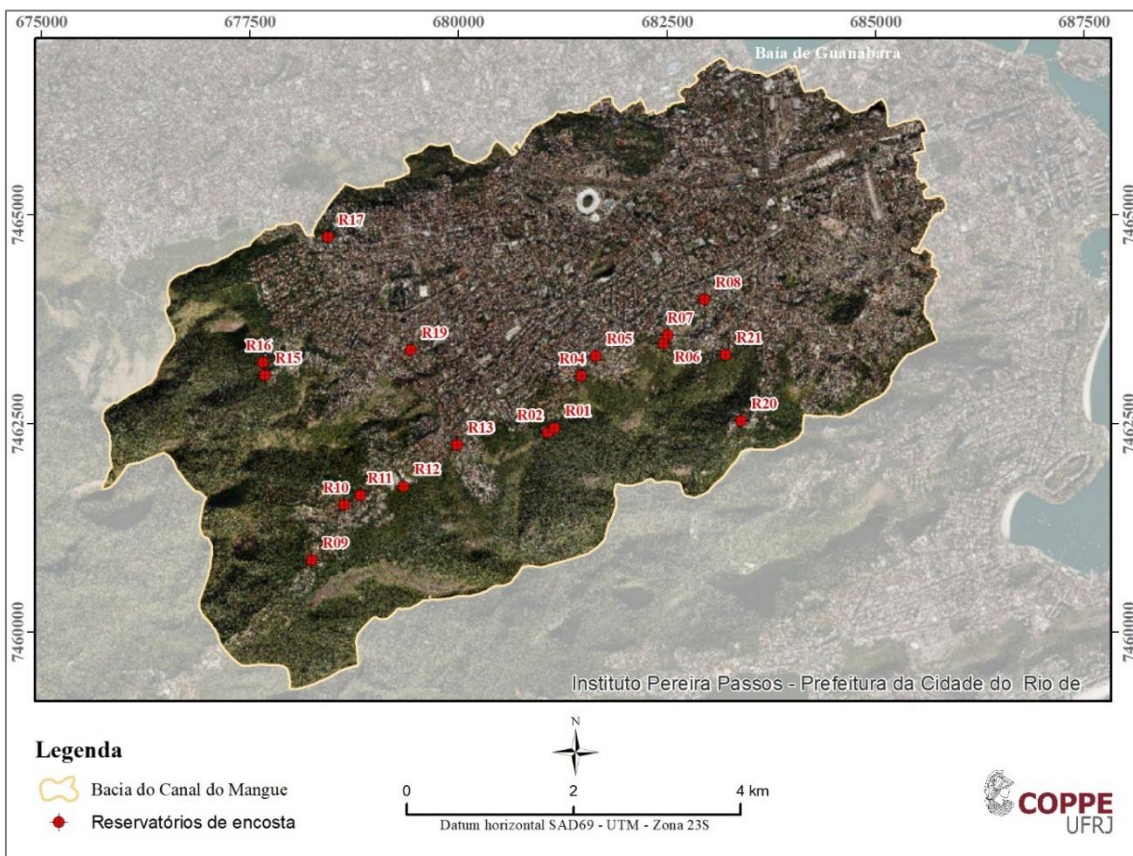


Figura 4.71 – Trechos da concepção do projeto de requalificação urbana do entorno do rio Trapi-cheiro (PAIVA, 2017).

## Reservatórios de encosta

A incorporação dos reservatórios de encosta ao sistema de drenagem da bacia do Canal do Mangue foi realizada com base nos projetos apresentados por COPPETEC (2000), no qual foram propostas a construção de 21 estruturas de amortecimento das vazões de drenagem das encostas (ver item 4.5.1, pág. 137). Ressalta-se que no âmbito do PBCM, os reservatórios foram dimensionados com uma chuva de projeto de 10 anos de tempo de recorrência.

Após avaliação dos projetos, foram descartadas as intervenções que apresentavam baixa eficiência de amortecimento, resultando em um conjunto de 18 reservatórios, distribuídos conforme apresentado no mapa da Figura 4.72. Cada reservatório foi inserido na base de modelagem como uma nova célula ou um conjunto de células, dependendo da complexidade da estrutura.



**Figura 4.72 – Localização dos reservatórios propostos no PBCM (COPPETEC, 2000) considerados no cenário de simulação C2.**

Cada reservatório foi simulado separadamente, variando o dispositivo de descarga para otimizar o funcionamento da estrutura de detenção. A Tabela 4.7 apresenta os volumes

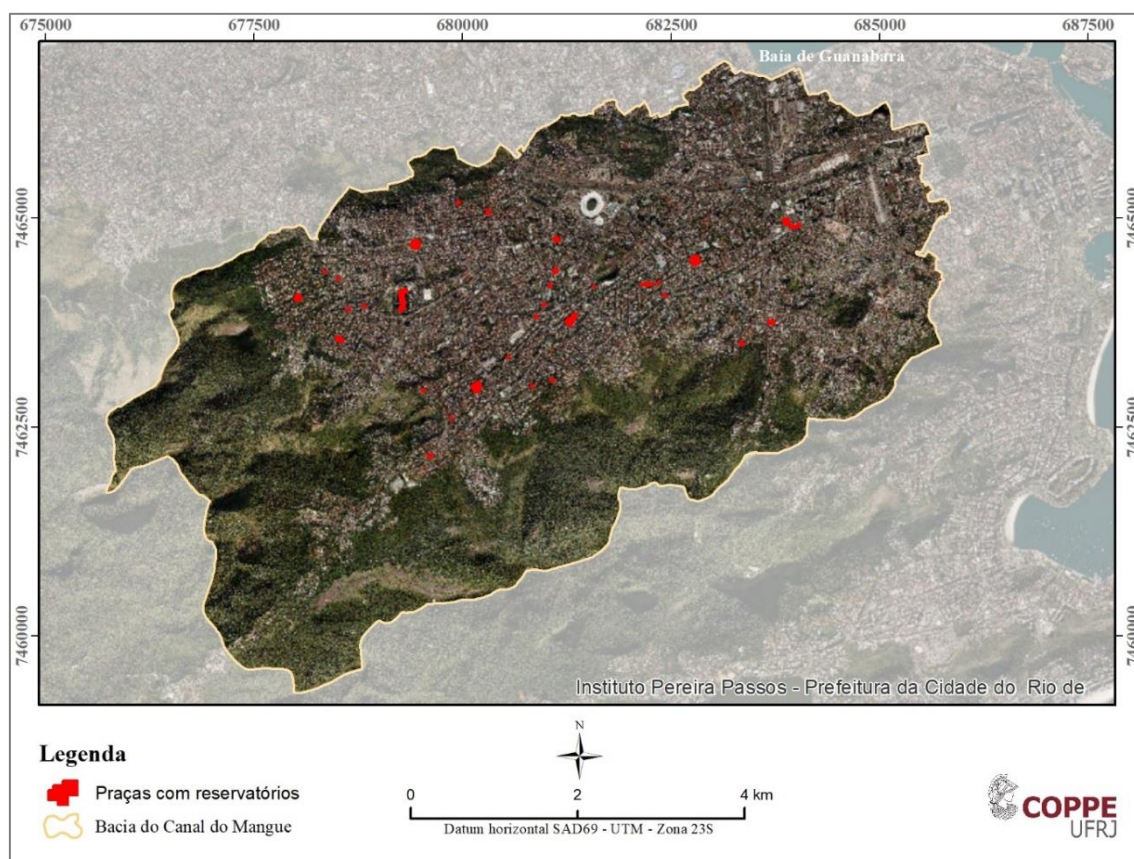
de armazenamento e os resultados finais das simulações, com o efeito de amortecimento de cada dispositivo, considerando a chuva de projeto com 10 anos de tempo de recorrência, compatível com o evento de projeto utilizado no dimensionamento original das estruturas.

**Tabela 4.7 – Funcionamento dos reservatórios de encosta simulados no cenário C2, para uma chuva com 10 anos de tempo de recorrência.**

<b>n°</b>	<b>Projeto</b>	<b>Volume de útil (m³)</b>	<b>Vazão afluente (m³/s)</b>	<b>Vazão efluente (m³/s)</b>	<b>Amortecimento</b>
<b>R01</b>	<b>Projeto Alto Trapicheiros</b>	7.716 m³	6,29	3,21	49%
<b>R02</b>	<b>Projeto Poço dos Esquilos</b>	13.942 m³	2,41	0,75	69%
<b>R04</b>	<b>Projeto Evangélico</b>	12.939 m³	0,97	0,19	80%
<b>R05</b>	<b>Projeto Bom Pastor</b>	28.673 m³	5,04	1,11	78%
<b>R06</b>	<b>Projeto Valparaíso</b>	9.168 m³	0,35	0,04	89%
<b>R07</b>	<b>Projeto Chacrinha</b>	4.790 m³	1,44	0,59	59%
<b>R08</b>	<b>Projeto Villa-Lobos</b>	2.232 m³	1,48	0,37	75%
<b>R09</b>	<b>Projeto Alto Maracanã</b>	14.471 m³	9,75	4,58	53%
<b>R10</b>	<b>Projeto São João</b>	5.289 m³	4,17	1,16	72%
<b>R11</b>	<b>Projeto Cachambi</b>	2.380 m³	2.14	0,96	55%
<b>R12</b>	<b>Projeto Agostinho</b>	4.643 m³	6,01	4,05	33%
<b>R13</b>	<b>Projeto Cascata</b>	5.496 m³	6,12	5,47	11%
<b>R15</b>	<b>Projeto Jacó</b>	16.680 m³	4,38	2,00	54%
<b>R16</b>	<b>Projeto Perdido</b>	11.175 m³	6,14	2,65	57%
<b>R17</b>	<b>Projeto Urubus-Trovador</b>	32.290 m³	8,76	2,37	73%
<b>R19</b>	<b>Projeto Andaraí</b>	24.023 m³	14,04	7,61	46%
<b>R20</b>	<b>Projeto Alto Comprido</b>	3.669 m³	8,33	7,05	15%
<b>R21</b>	<b>Projeto Bananas</b>	4.286 m³	3,70	1,85	50%
<b>Total</b>		<b>203.860</b>	<b>89,38</b>	<b>46,01</b>	<b>49%</b>

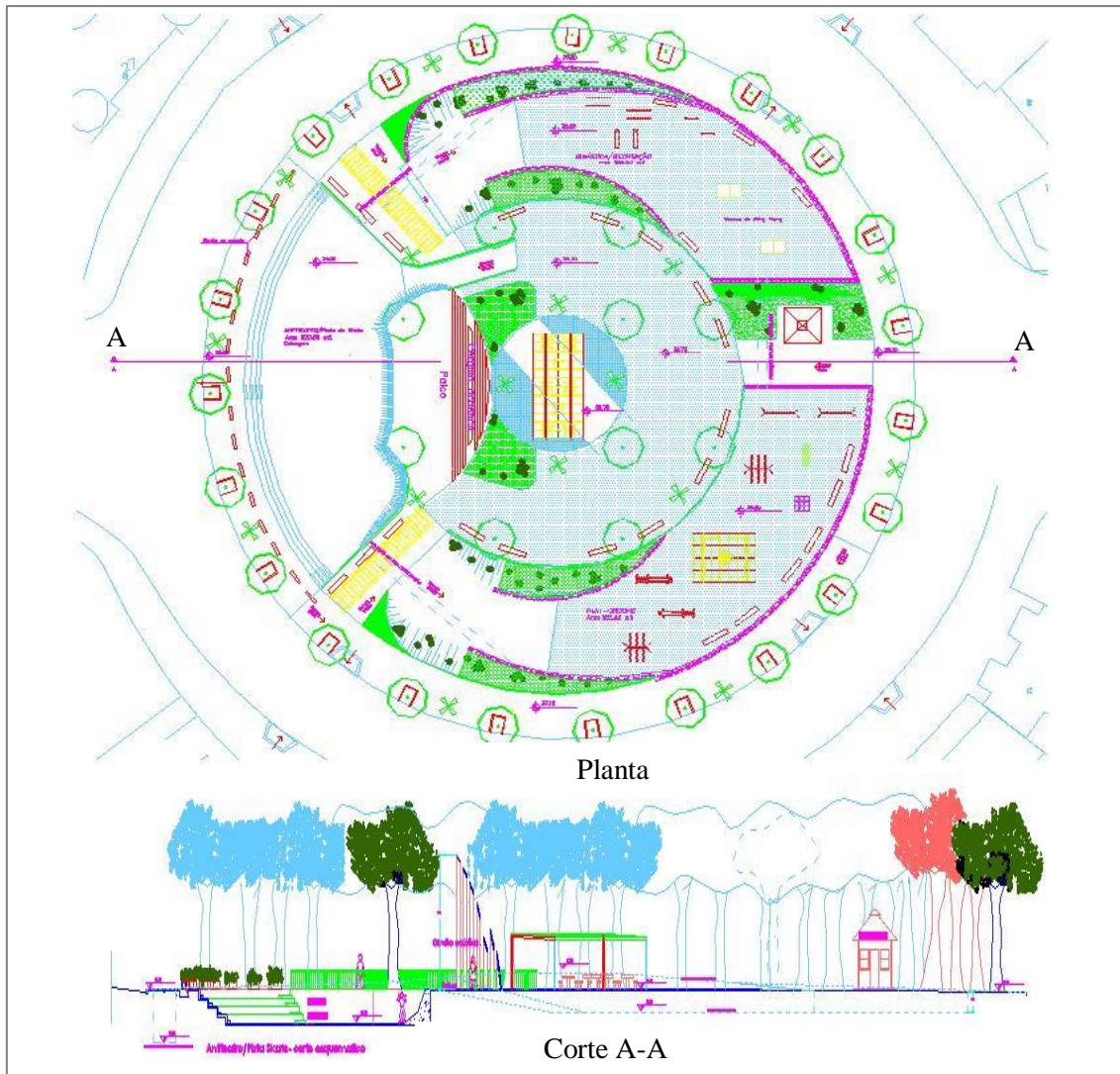
## Reservatórios de praças

A proposta de instalação de reservatórios de detenção em praças segue a abordagem feita por COPPETEC (2003), que apresentou um estudo de modelagem com o detalhamento de projeto para adaptação de algumas praças na bacia do rio Joana, com vistas a instalação de reservatórios de detenção de águas pluviais. A partir destes projetos, foram mapeadas praças com áreas livres em toda a bacia do Canal do Mangue, levantando as áreas de cada praça e estimando-se, por observação visual de imagens de satélite, a área potencial para receber um reservatório. Com essa área, foram definidos os volumes de cada reservatório, variando as profundidades entre 1,0m e 1,5m. Além das três praças projetadas por COPPETEC (2003), foram incorporadas ao cenário C2, mais 28 reservatórios em praças, localizados conforme mapa apresentado na Figura 4.73, totalizando 31 praças multifuncionais. A Figura 4.74 reproduz um dos projetos propostos anteriormente, localizado na Praça Edmundo Rego, no bairro do Grajaú.



**Figura 4.73 – Localização das praças multifuncionais, com reservatórios de detenção das águas pluviais.**





**Figura 4.74 – Projeto de implantação da Praça Edmundo Rego, com reservatório de detenção de águas pluviais (COPPETEC, 2013).**

Uma lista com todas as intervenções propostas em praças e as principais características dos reservatórios é apresentada na Tabela 4.8.

A incorporação das praças multifuncionais, associadas à reservatórios de detenção, adiciona à bacia uma capacidade extra de reservação de águas pluviais de 120.697m<sup>3</sup>.

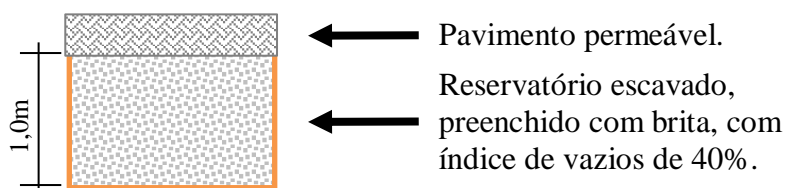
**Tabela 4.8 – Reservatórios de detenção associados a praças urbanas propostos para o cenário C2.**

	Código	Nome	Área total (m <sup>2</sup> )	Volume útil (m <sup>3</sup> )	Sistema	Entrada	Descarga
Rio Joana	7171	Praça Edmundo Rego	4.478	2.915	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,40m
	7186	Praça Nobel	4.651	3.981	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,40m
	7525	Praça Niterói	5.256	3.727	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,40m
	7010	Largo do Verdum	625	430	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7008	Praça Prof. Francisco Dauria	765	498	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7065	Praça Barão de Drumont	7.812	4.850	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,40m
	7762	Praça Malvino Reis	465	372	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7375	Praça Duílio Barros Beltrão	615	492	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7787	Praça Tobias Barreto	1.658	1.326	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,40m
	7219	Praça do Tijolinho	10.550	6.857	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=0,30m
	7763	Praça Irmã Maria Martha	410	246	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
Rio Maracanã	7477	Praça prof. Pinheiro Guimarães	1.386	5.544	macrodrenagem	8xd=1,00m	Orifício de fundo - 2xd=0,60m
	7443	Largo prof. Gondim Neto	490	441	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=0,60m
	7960	Praça Tabatinga	550	495	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=1,00m
	7442	Praça Comendador Xavier de Brito	10.210	26.444	macrodrenagem	10xd=1,00m	Orifício de fundo - 3xd=1,00m
	7599	Praça Barão de Corumbá	470	376	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,10m
	7108	Praça São Charbel	665	465	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7551	Praça Lamartine Babo	1.560	1.170	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=0,30m
	7562	Shopping Tijuca Montante	1.341	3.889	macrodrenagem	3xd=1,00m	Orifício de fundo - d=1,00m
	7561	Shopping Tijuca Jusante	1.170	3.512	macrodrenagem	3xd=1,00m	Orifício de fundo - d=1,00m
	7542	Praça Varhagem	2.500	9.750	macrodrenagem	4xd=1,00m	Orifício de fundo - d=1,00m
Rio Trapicheiro	7283	Praça Gabriel Soares	1.784	1.338	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7580	Praça San Pena	9.505	15.686	macrodrenagem	3xd=1,20m	Orifício de fundo - d=1,00m
	7574	Praça Hilda	556	500	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7815	Praça Carlos Paoleira	3.295	2.142	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7685	Largo São Maron	906	590	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7759	Praça Afonso Pena	10.675	10.410	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=0,30m
Rio Comprido	7816	Largo da Segunda-Feira	657	525	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - d=0,30m
	7834	Praça Del Vecchio	2.074	1.660	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 3xd=0,30m
	7095	Praça Condessa Paulo de Frontin	2.264	2.547	microdrenagem	vertimento	Orifício de fundo - 2xd=0,30m
	7973	Praça do Estácio	37.182	7.518	macrodrenagem	3xd=1,20m	Orifício de fundo - d=1,00m

## Reservatórios em sistemas de pavimento permeável

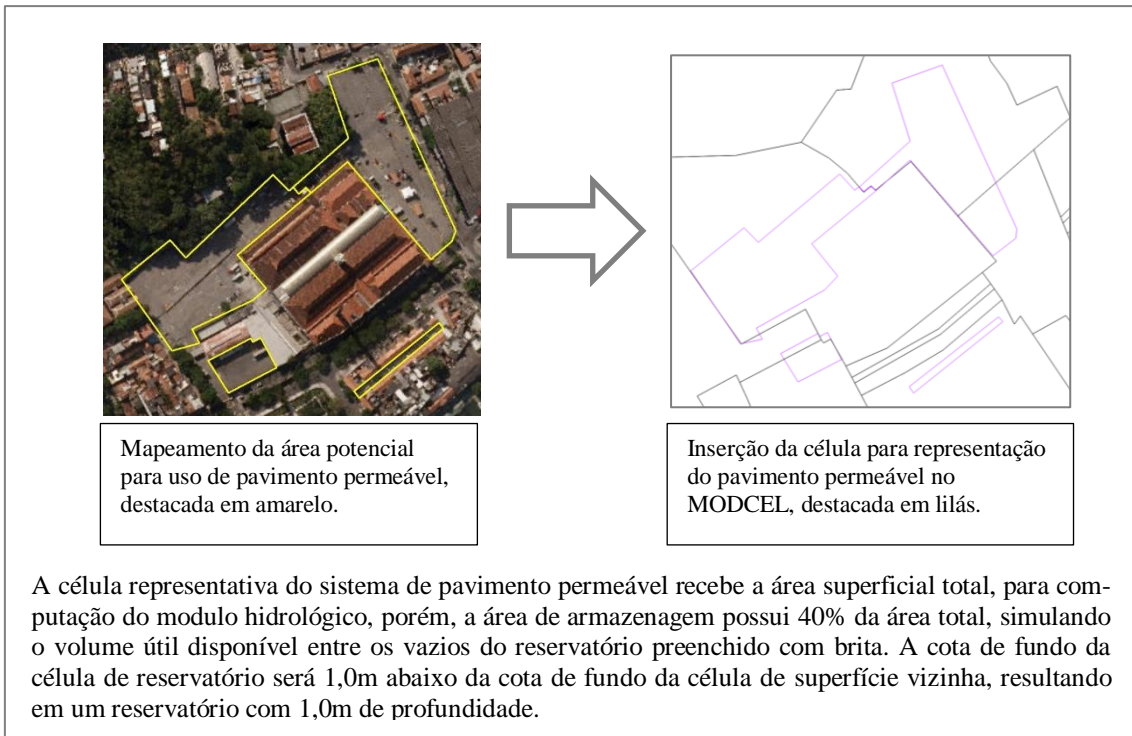
Com o objetivo de complementar as propostas de descentralização e distribuição dos dispositivos de retenção de águas pluviais, foi incorporada às propostas de intervenção no cenário C2 o uso de sistemas de drenagem com pavimento permeável. Tais sistemas utilizam o conceito de reservatório de armazenagem de água, instalados sob uma camada de pavimento permeável e preenchidos com material granular. Tais dispositivos têm como foco de atuação a redução das vazões de pico nas redes de microdrenagem, sendo de grande relevância para bacias altamente impermeabilizadas e com rede de drenagem antigas e obsoletas, como é o caso da bacia do Canal do Mangue.

Estes dispositivos são propostos em grandes áreas de estacionamento, calçadas e áreas livres impermeabilizadas. A inserção dos reservatórios associados a pavimentos permeáveis no MODCEL é feita pela incorporação de novas células, com área equivalente à área passível de receber a estrutura. Porém, tais células recebem uma área de armazenagem equivalente a 40% de sua área superficial, de forma a computar o volume útil para reservação da água de chuva, considerando, assim, o preenchimento do reservatório com brita. Os reservatórios possuem uma profundidade padrão de 1,0m, como apresentado na Figura 4.75.

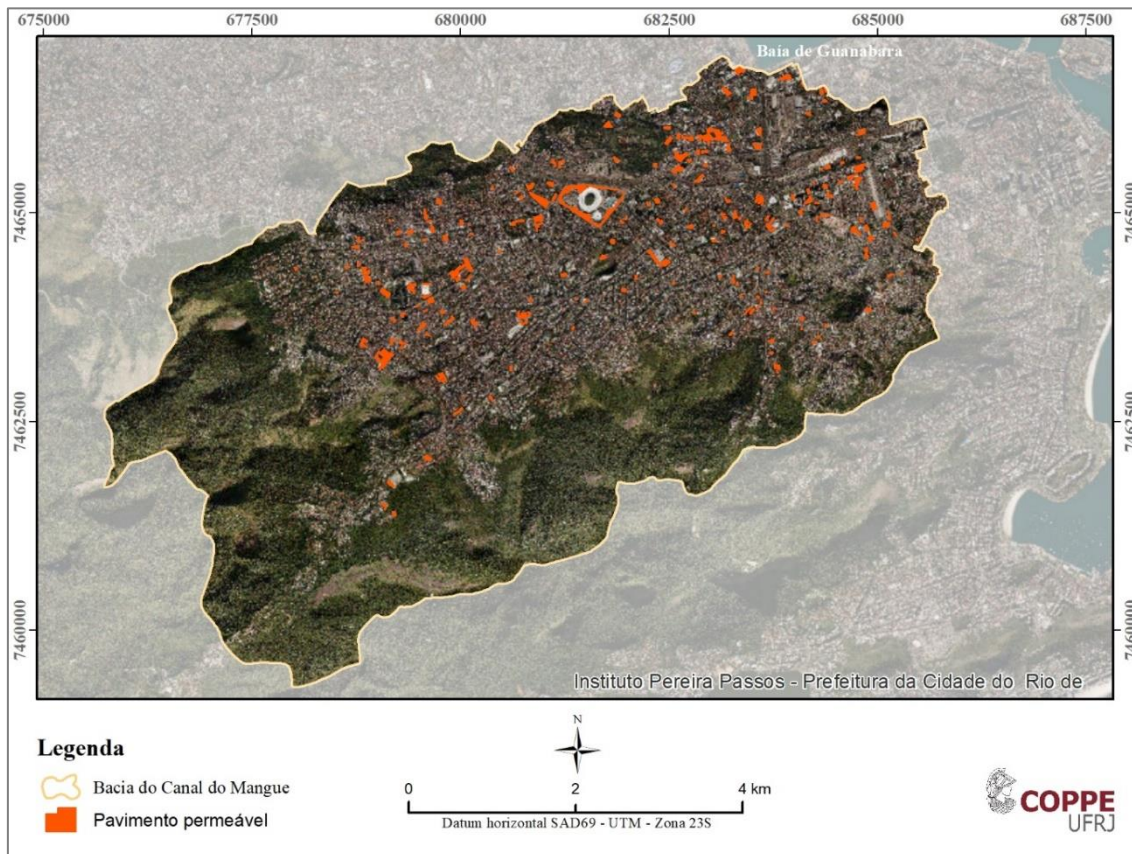


**Figura 4.75 – Desenho esquemático do sistema de drenagem com uso de pavimento permeável.**

A Figura 4.76 apresenta um esquema da incorporação dos sistemas de pavimento permeável à base de modelagem. No total, das áreas mapeadas, 47,9ha foram consideradas aptas para instalação de sistemas de drenagem com uso de pavimentos permeáveis, pouco mais de 1% da área total da bacia do Canal do Mangue. Tais áreas podem ser visualizadas no mapa da Figura 4.77. Considerando a capacidade de armazenagem no reservatório de brita do sistema de pavimento permeável, com 40% de índice de vazios, o volume total incrementado na capacidade de armazenamento de águas pluviais da bacia é de 191.777m<sup>3</sup>.



**Figura 4.76 – Esquema de representação dos sistemas de pavimento permeável no MODCEL.**



**Figura 4.77 – Áreas mapeadas para instalação de sistemas de drenagem com pavimento permeável.**

Após inserção de todas as propostas de intervenção para controle das águas pluviais de forma distribuída na bacia do Canal do Mangue, foram mapeados os perigos relacionados com os eventos de inundações, identificando as profundidades de alagamento, as velocidades de escoamento e os tempos de permanência do alagamento. Tais informações são subsídios para os indicadores e índices propostos neste trabalho, com objetivo de avaliar a resiliência da bacia às inundações.

A Figura 4.78 apresenta as manchas de alagamento resultantes de cada cenário hidrológico, que possuem chuvas com tempos de recorrência de 1, 5, 10, 25, 50, 100, 500 e 1.000 anos.

A observação das áreas inundadas mostra que há um bom efeito de redução das profundidades de alagamento de forma generalizada, em toda a superfície mapeada, dentro da área de interesse. A redução é mais acentuada para tempos de recorrência baixos, em grande parte devido à inserção dos sistemas de pavimentos permeáveis, os quais possuem ação mais significativa em eventos com menor volume de precipitação. Como a escala de modelagem não assume as redes de microdrenagem, parte dos escoamentos que antes ocorriam na superfície, preenchem os reservatórios dos pavimentos permeáveis.

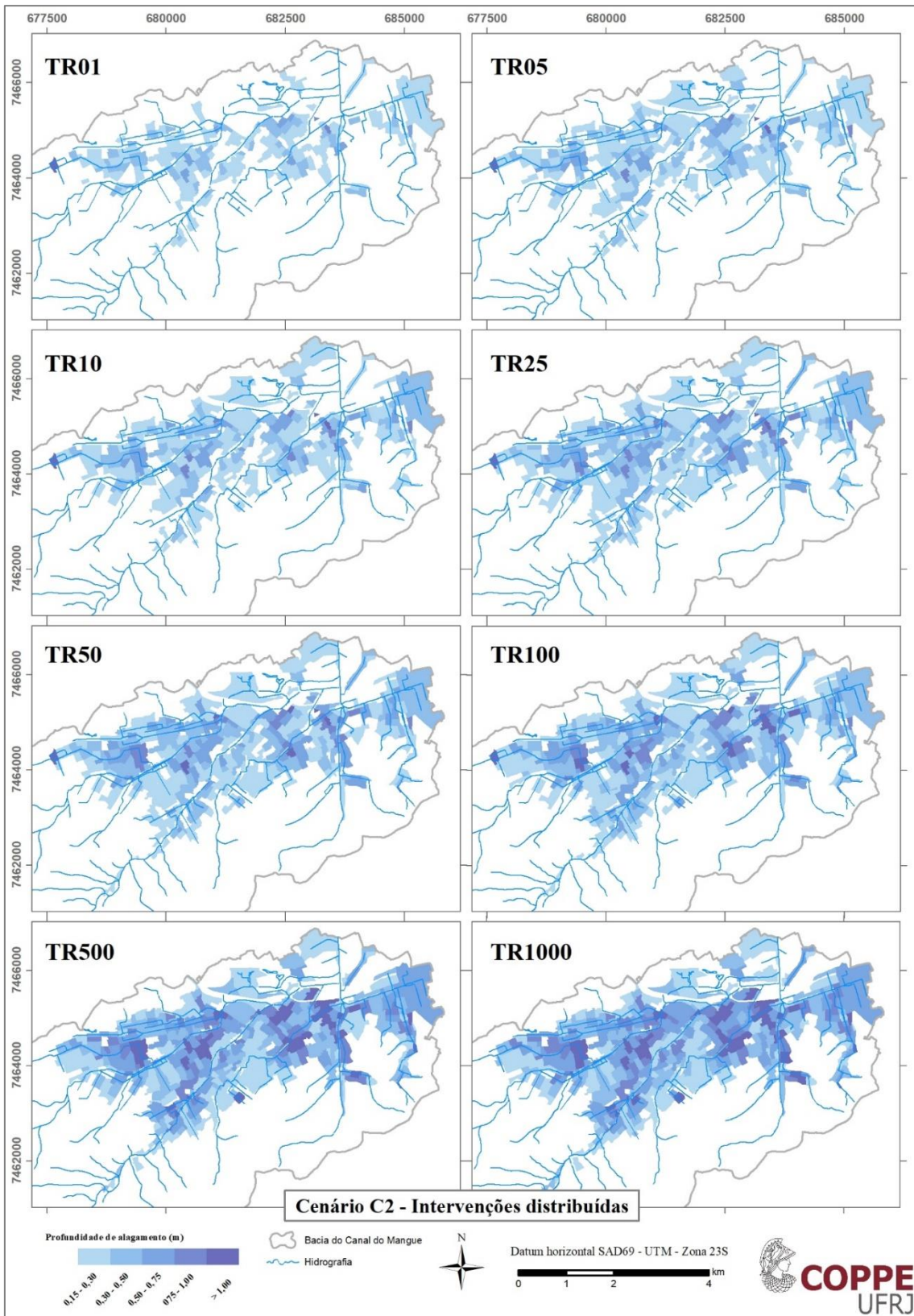
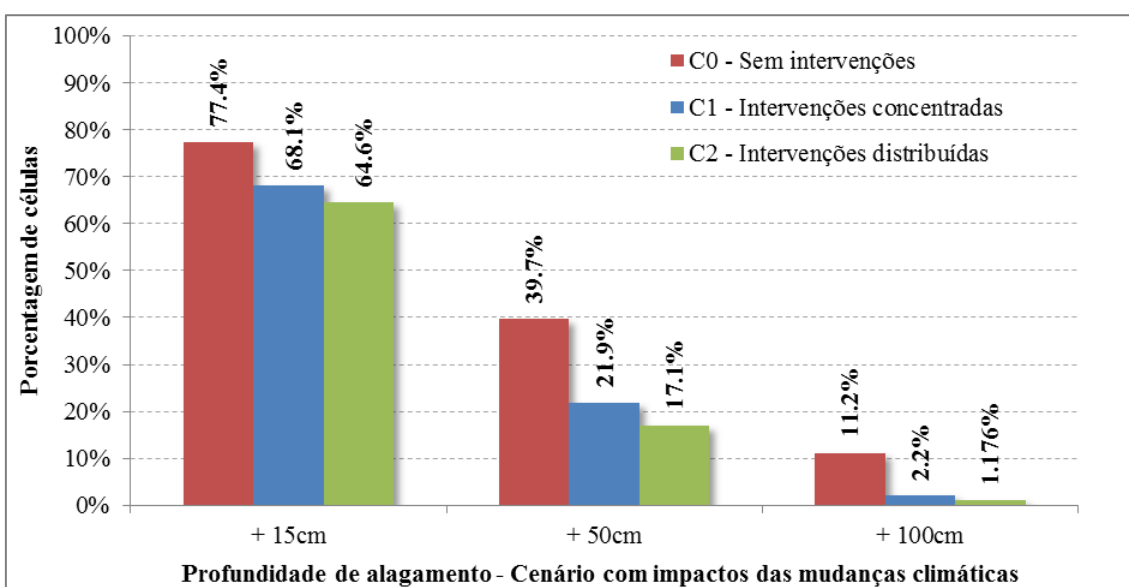


Figura 4.78 – Manchas de alagamento para o cenário com intervenções distribuídas na bacia – C2.

#### 4.7.4 Cenários futuros com mudanças climáticas

Os cenários futuros foram simulados considerando o evento pluviométrico com 25 anos de tempo de recorrência. A altura da chuva de projeto foi majorada em 16%, representando o aumento médio no volume das chuvas em decorrência das mudanças climáticas (ver Figura 4.49, pág. 170), e a curva de maré foi considerada com uma sobrelevação de 0,50m no nível médio do mar - NMM (ver Figura 4.50, pág. 170).

As mudanças consideradas ocasionam impactos no número de áreas alagadas, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.79, que apresenta os percentuais das células alagadas com diferentes profundidades resultantes da simulação do cenário futuro, com aumento do volume de chuva e sobrelevação do NMM.



**Figura 4.79 – Profundidade de alagamento por célula, resultantes das simulações das condições C0, C1 e C2 para o cenário futuro com mudanças climáticas – TR25 anos.**

Na Figura 4.80 são apresentadas as manchas de inundação, com as profundidades de alagamento em cada célula do domínio de interesse, para as três condições do sistema de drenagem, considerando o cenário futuro de chuva e maré, com os possíveis impactos de mudanças climáticas.

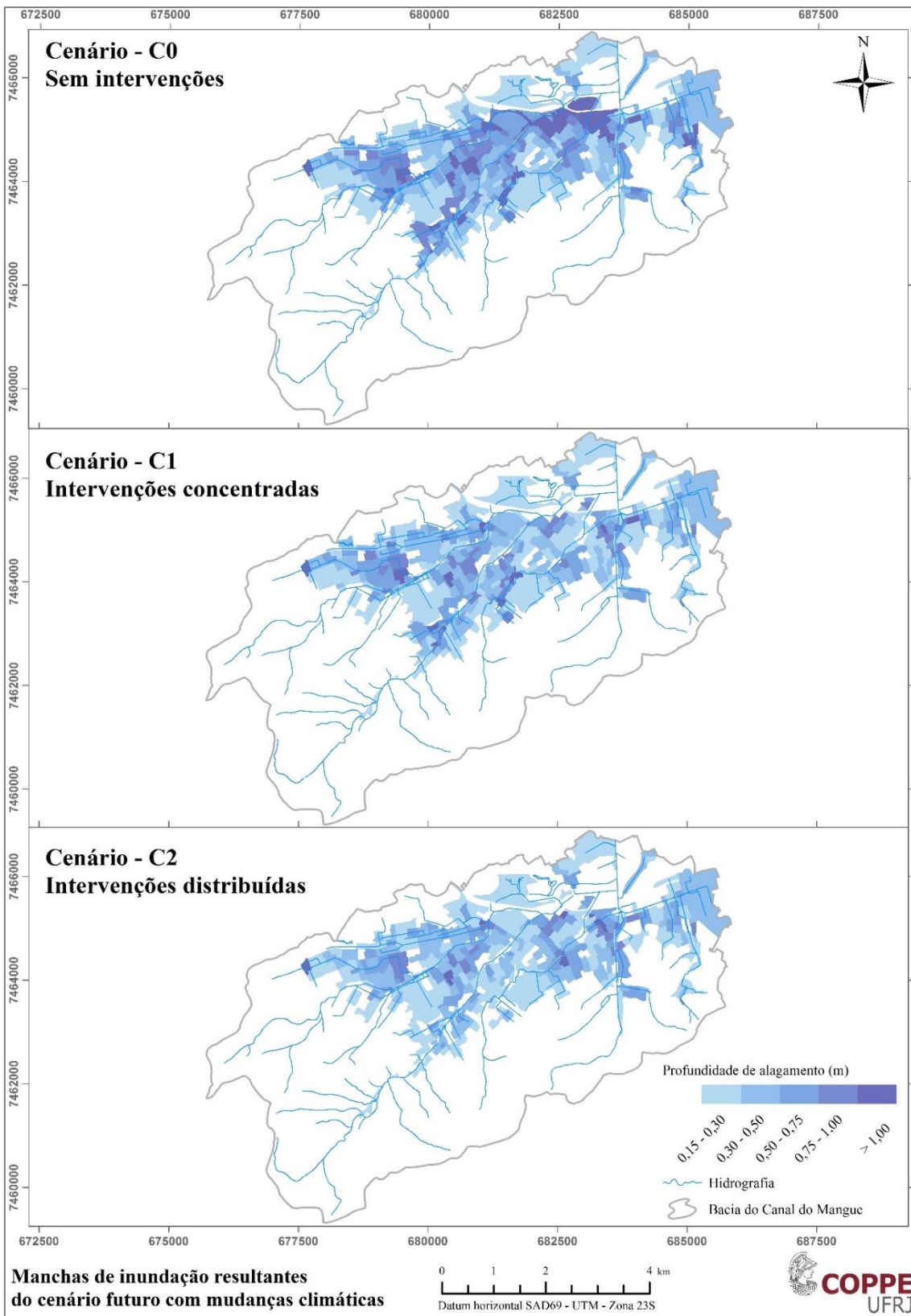


Figura 4.80 – Manchas de inundação resultantes do cenário futuro com impacto das mudanças climáticas.



#### **4.7.5 Análise comparativa entre os cenários simulados**

As intervenções propostas em ambos cenários simulados buscam a otimização do funcionamento do sistema de drenagem da bacia do Canal do Mangue, por meio da inserção de dispositivos de retenção das águas pluviais. O objetivo principal é reduzir os picos de vazão na rede existente, que se apresenta obsoleta e com problemas estruturais, diminuindo, assim, os extravasamentos dos rios e canais do sistema e as profundidades máximas de alagamento nas áreas ocupadas.

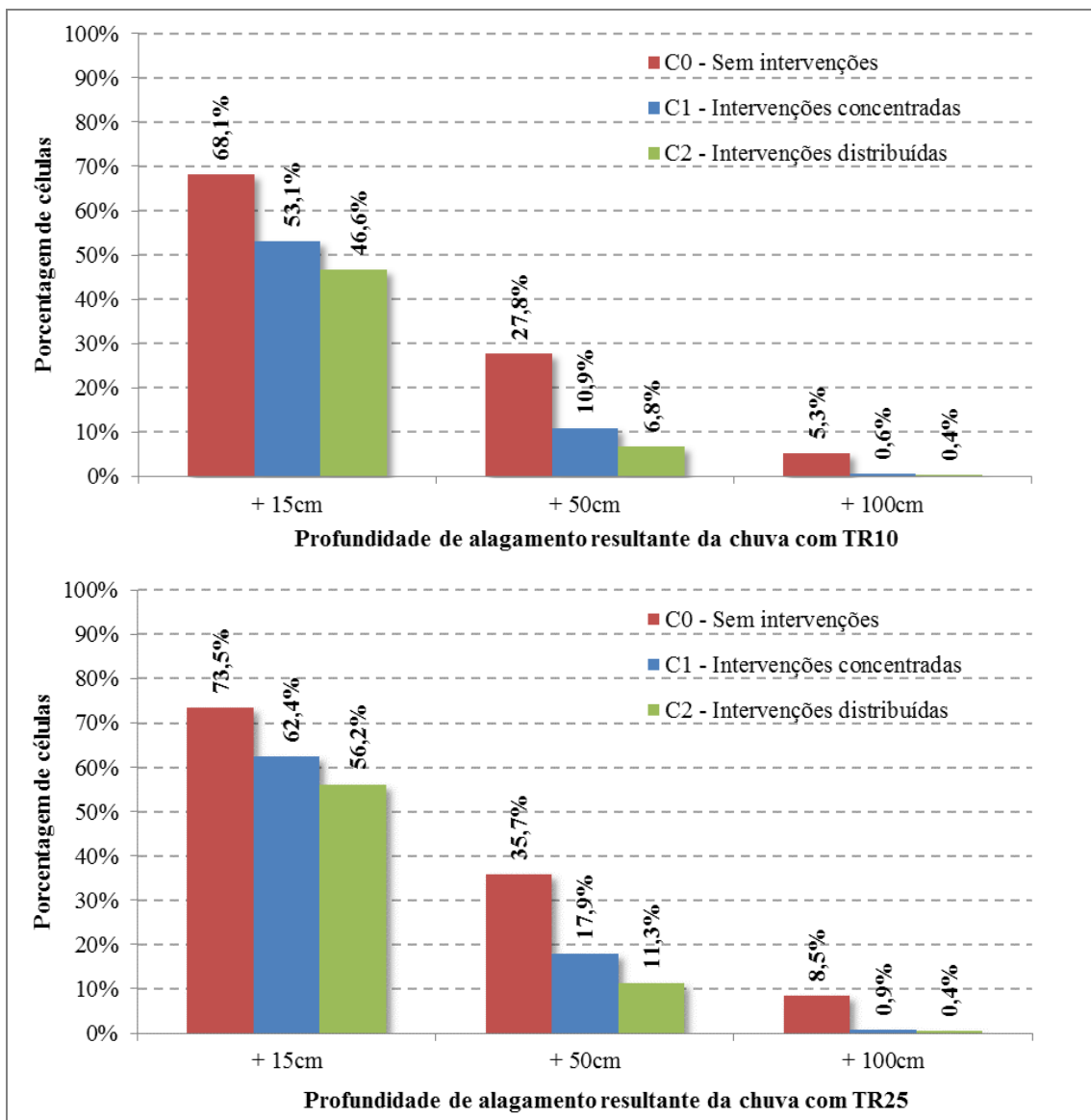
A situação de alta propensão a ocorrência de inundações da bacia do Canal do Mangue é confirmada pelos resultados das simulações do cenário C0, que mostram a abrangência dos problemas de alagamento. Para uma chuva com 10 anos de tempo de recorrência, compatível com a capacidade de projeto de sistemas de microdrenagem, a bacia apresenta mais de dois terços (68,1%) das células da área de interesse com profundidades de alagamento superiores a 15cm, situação em que já se iniciam problemas de tráfego e circulação de pedestres. Profundidades acima de 50cm, quando já podem ser observados possíveis danos a edificações e equipamentos urbanos, cobrem quase um terço destas células (27,8%), para este mesmo evento pluviométrico. Alagamentos com mais de 100cm de profundidade, que já provocam danos ao conteúdo das construções, majorando os prejuízos potenciais do evento de inundação, cobrem cerca de 5% das células, no cenário C0 com a chuva de 10 anos.

A implementação das obras de retenção propostas nos cenários C1 e C2 reduzem sensivelmente os alagamentos acima de 50cm, resultantes da chuva com 10 anos de tempo de recorrência, que passam a ser observados em 10,9% e 6,8% das células da área de interesse, respectivamente para cada cenário. Foram ainda contabilizadas as células que apresentaram profundidades superiores a 100cm, com alta possibilidade de danos e prejuízos. As intervenções propostas reduziram em cerca de 90% o número de células afetadas com esses alagamentos mais severos, passando a representar menos de 1% das células da área de interesse, para ambos os cenários com intervenções.

Em chuvas com 25 anos de tempo de recorrência, as profundidades de alagamento superiores a 15cm são observadas em 73,5% das células da área de interesse, enquanto em 35,7% são encontradas profundidades acima de 50cm. Alagamentos críticos, acima de

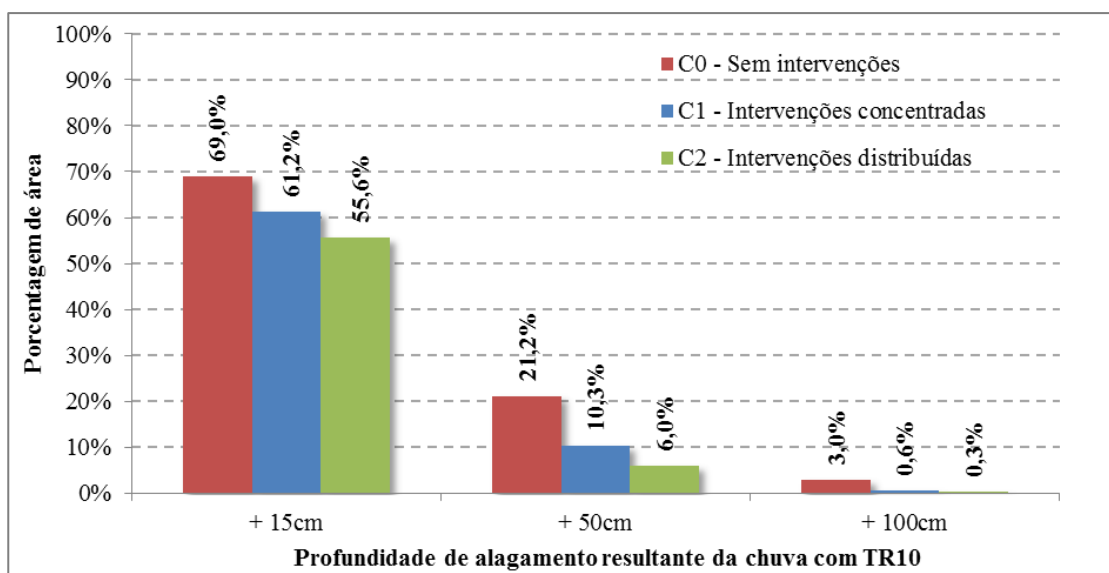
100cm, atingem 8,5% das células, com esta chuva. As intervenções propostas nos cenários C1 e C2 também reduzem estas profundidades.

A Figura 4.81 apresenta os percentuais de células alagadas com diferentes profundidades, para cada um dos cenários simulados, considerando as chuvas com 10 e 25 anos de tempo de recorrência.



**Figura 4.81 – Profundidades de alagamento por célula, resultantes da simulação das chuvas com 10 e 25 anos de tempo de recorrência.**

Para uma melhor avaliação da capacidade de redução dos danos potenciais decorrentes das inundações, foram mapeadas as áreas alagadas, com a mesma lógica anterior, assumindo profundidades superiores a 15cm, 50cm e 100cm. Os resultados não diferem de forma significativa da avaliação realizada por células, os quais podem ser observados no gráfico da Figura 4.82, considerando o tempo de recorrência de 10 anos.

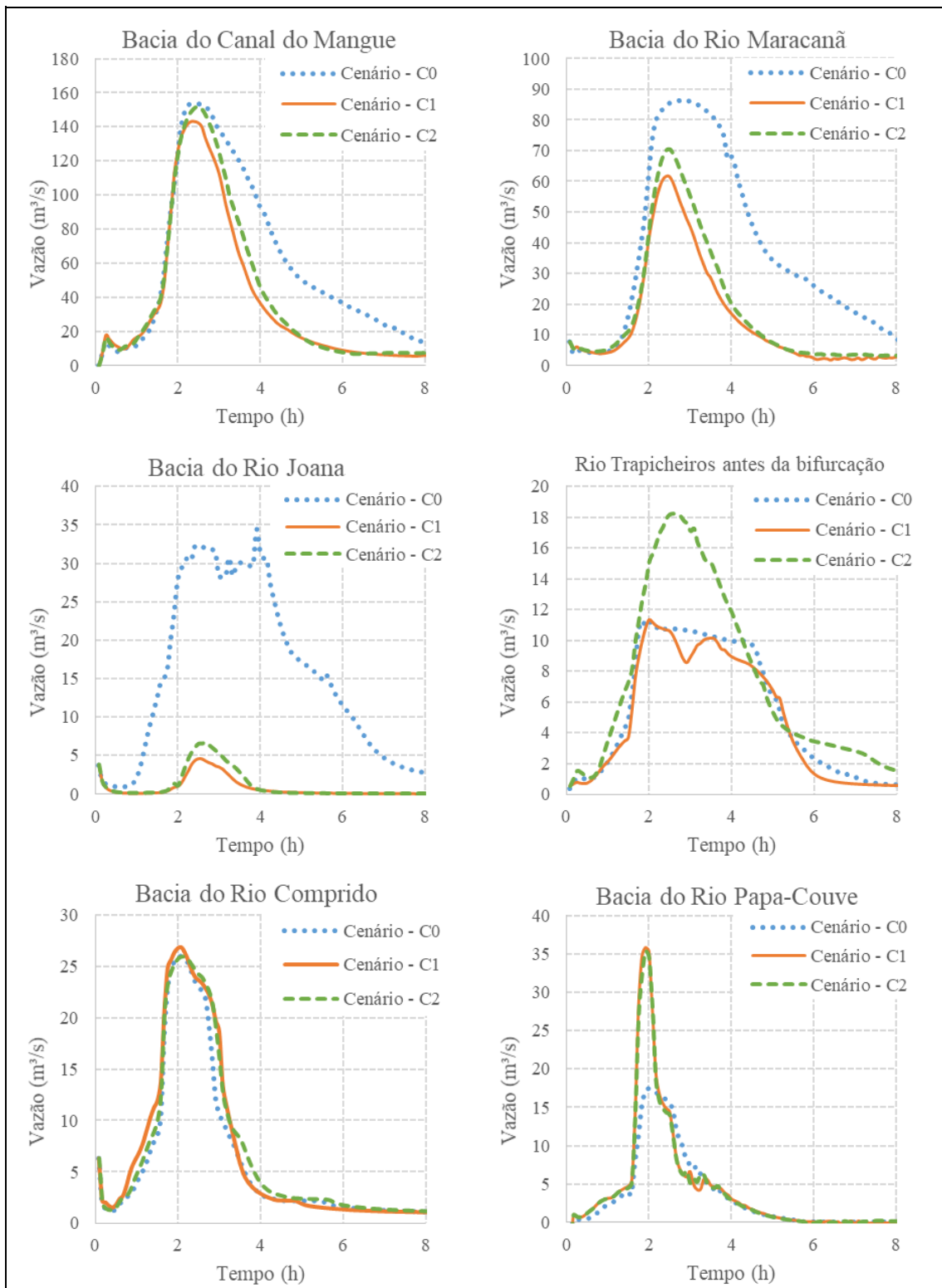


**Figura 4.82 – Profundidades de alagamento por área, resultantes da simulação da chuva com 10 anos de tempo de recorrência.**

As intervenções propostas nos cenários de projeto provocam alterações também nos hidrogramas de cheia, como podem ser observadas nos gráficos apresentados na Figura 4.83. Quando considerada toda a bacia do Canal do Mangue, o pico de vazão na Baía de Guanabara não sofre alteração significativa, havendo maior impacto no volume de cheia escoado.

Na bacia do rio Trapicheiros, considerando uma seção do rio antes de sua bifurcação, próximo à Praça da Bandeira, não há variação significativa no hidrograma resultante do cenário com intervenções concentradas (C1), porém, no cenário com as intervenções distribuídas (C2), há um aumento de cerca de 60% na vazão de pico. Esse resultado se deve, principalmente, à intervenção de requalificação de um trecho do rio Trapicheiro, a montante da Avenida São Francisco Xavier (ver item 4.7.3, pág. 189), que considera a abertura de um trecho em galeria subdimensionada.

Na bacia do rio Papa-Couve há impacto com aumento no pico de vazão, para os dois cenários de projeto (C1 e C2), devido à consideração de uma limpeza das galerias deste rio, no trecho mais próximo ao Canal do Mangue.



**Figura 4.83 – Hidrogramas de cheia nos principais rios e canais da bacia do Canal do Mangue, resultante de uma chuva com 25 anos de tempo de recorrência, para os cenários sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2).**

Outra característica que potencializa os danos e prejuízos causados por eventos de inundação é o tempo de permanência em que certa área fica alagada acima de uma determinada profundidade. Essa característica representa uma das parcelas do perigo, juntamente

com a profundidade máxima de alagamento e a velocidade máxima do escoamento na superfície.

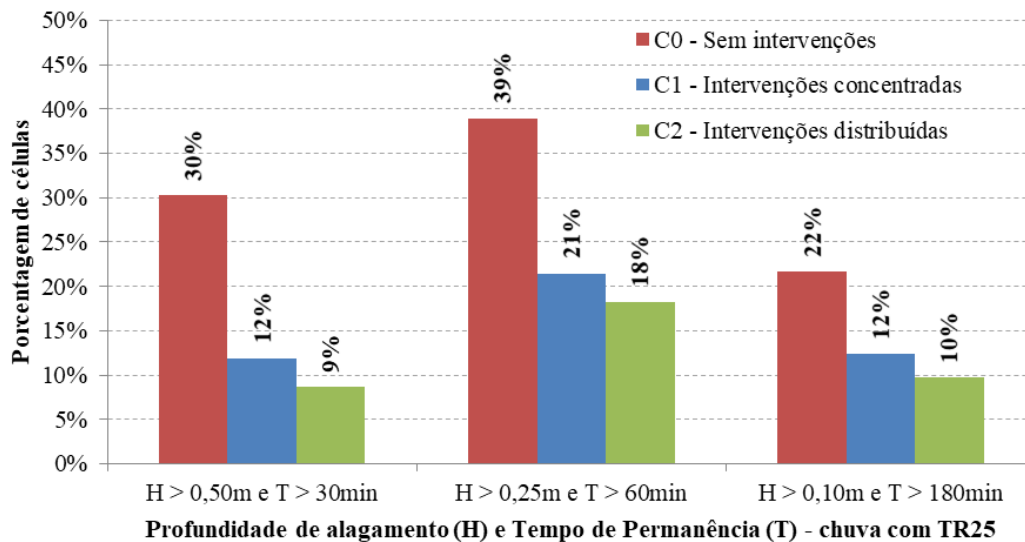
Os resultados de tempo de permanência foram analisados e comparados entre os cenários com (C0) e sem (C1 e C2) intervenções, baseando-se nos critérios de avaliação de risco apresentado na concepção do IRES, para o *indicador de perigo relativo ao fator de permanência*  $I_{FP}$  (ver pág. 89). Neste indicador, são considerados três classes de profundidade: entre 10cm e 25cm (T1); entre 25cm e 50cm (T2); e acima de 50cm (T3). Com isto, foi contabilizado o número de células em que houve uma permanência de alagamento em um período superior ao tempo de impacto crítico: maior que 180min, 60min e 30min, respectivamente para cada classe de profundidade.

Os cenários de intervenções (C1 e C2) obtiveram um excelente resultado quanto à redução dos tempos de alagamento, tendo impacto direto na resiliência da bacia, uma vez que a capacidade em retornar ao funcionamento normal o mais rápido possível é uma das principais características de um sistema resiliente.

As intervenções concentradas (C1) reduziram em 60% as células que apresentam alagamentos superiores a 50cm durante mais de 30min, enquanto que o cenário com intervenções distribuídas (C2) obteve uma redução de 74% no número destas células. Os alagamentos com essas características são os mais críticos, capazes de gerar grandes transtornos para a mobilidade na bacia, interrompendo por completo o trânsito em vias e causando danos e prejuízos à infraestrutura.

No gráfico da Figura 4.84 são apresentados os resultados comparativos de tempos de permanência dos alagamentos, para os três cenários, considerando a chuva com 25 anos de tempo de recorrência. É possível observar que os piores índices de permanência são encontrados na classe de profundidade entre 25cm e 50cm. Para esta classe, áreas alagadas por mais de 60min possuem alto potencial de impacto na circulação da bacia, reduzindo a velocidade dos automóveis e até mesmo inviabilizando o seu deslocamento.

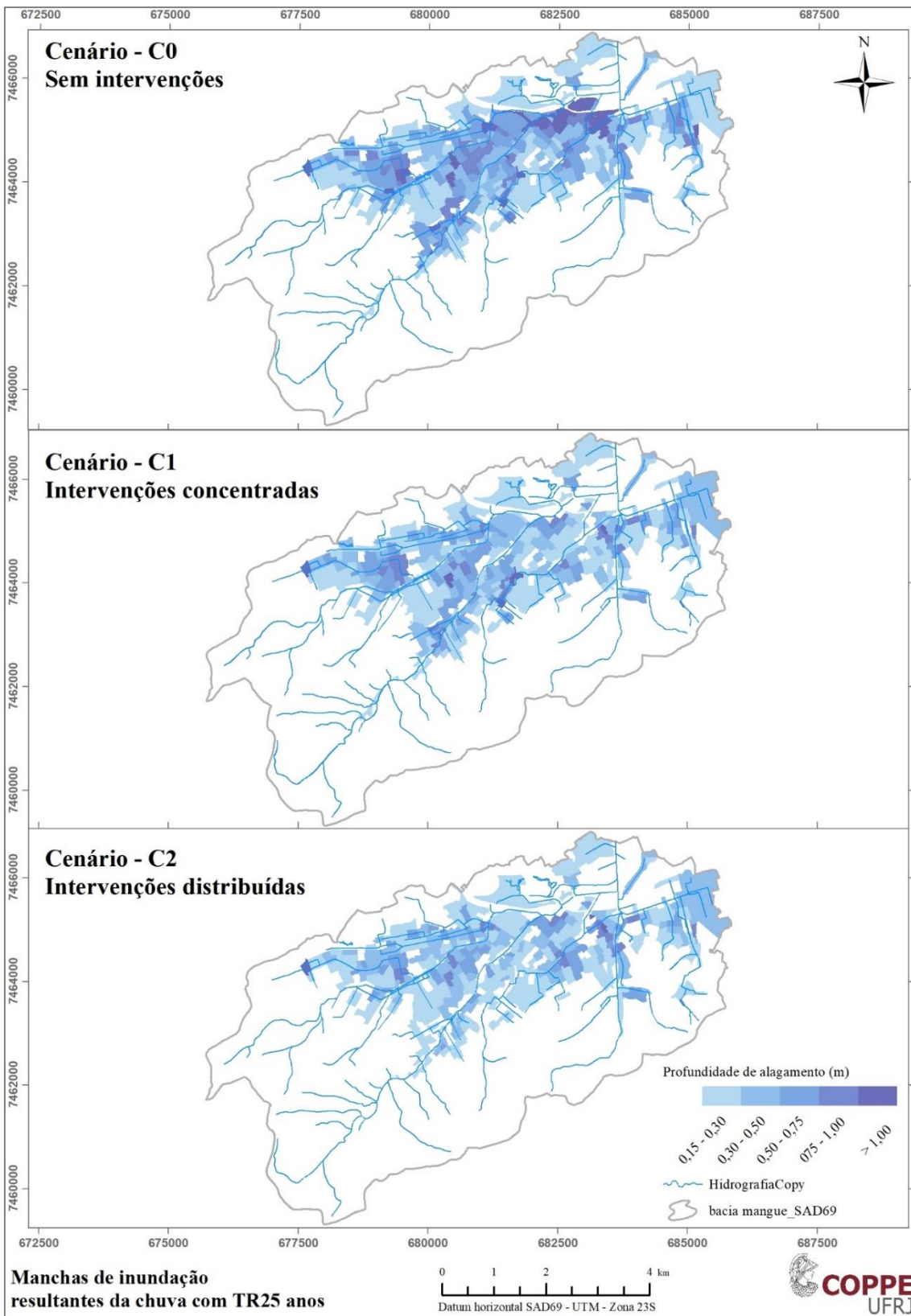
Os cenários de projeto reduzem um pouco menos (C1) e um pouco mais (C2) da metade das células que apresentam essa configuração de alagamento, restando, ainda, cerca de um quinto das células com tempo de permanência crítico.



**Figura 4.84 – Tempos de permanência dos alagamentos com diferentes profundidades.**

O risco relativo à mobilidade durante os eventos de chuva considera a sobreposição espacial destes resultados com a hierarquia viária existente na bacia. A análise deste conjunto permite observar os pontos mais sensíveis quanto à capacidade de locomoção das pessoas durante um evento de inundação. Quanto menos vias importantes forem afetadas por menos tempo, mais resiliente será a bacia.

Para facilitar a observação do efeito das intervenções propostas em cada cenário de projeto, as manchas de inundação resultantes da simulação da chuva com 25 anos de tempo de recorrência para todas as condições do sistema de drenagem (C0, C1, C2) são apresentadas na Figura 4.85.



**Figura 4.85 – Manchas de inundação resultantes dos cenários de simulação com a chuva de TR25 anos.**

O impacto das mudanças climáticas, considerando o aumento do volume de chuvas e sobrelevação do nível médio do mar, resulta em um aumento das áreas alagadas na bacia,

como pode ser observado na Tabela 4.9, que apresenta a porcentagem de células alagadas para cada uma das condições (**C0**, **C1** e **C2**), nos cenários atual e futuro. Apesar de, em um primeiro momento, o impacto do cenário futuro, medido em aumento relativo das células alagadas, se apresentar maior para a condição de projeto com medidas distribuídas, a porcentagem final de células alagadas ainda se mostra inferior ao cenário com a condição de projeto com medidas concentradas. Para as profundidades superiores a 50cm, quando já ocorrem impactos significativos na mobilidade na bacia e danos à infraestrutura, o cenário **C2** apresenta 22% menos células alagadas em relação ao cenário **C1**.

**Tabela 4.9 – Impacto do cenário futuro no aumento de áreas alagadas em cada uma das condições simuladas (C0, C1 e C2)**

Condição	Alagamento	Atual	Futuro	Aumento
<b>C0</b> Sem intervenção	> 15cm	73,53%	77,35%	5%
	> 50cm	35,74%	39,71%	11%
	> 100cm	8,53%	11,18%	31%
<b>C1</b> Com medidas concentradas	> 15cm	62,35%	68,09%	9%
	> 50cm	17,94%	21,91%	22%
	> 100cm	0,88%	2,21%	150%
<b>C2</b> Com medidas distribuídas	> 15cm	56,18%	64,56%	15%
	> 50cm	11,32%	17,06%	51%
	> 100cm	0,44%	1,18%	167%

Os resultados de alagamento para cada uma das condições, tanto no cenário atual, quanto no futuro, podem ser observados de forma espacializada nos mapas de inundação da Figura 4.86, ressaltando as áreas que sofrerão agravamento dos alagamentos em um eventual futuro com mudanças climáticas.

A avaliação dos fatores relacionados ao perigo das inundações, profundidade máxima de alagamento, velocidade máxima de escoamento superficial e tempo de permanência, deve levar em consideração os danos e prejuízos potenciais de cada uma dessas características da inundação. Neste trabalho, é proposta a avaliação por meio da aplicação do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas, o IRES, o qual cruza tais fatores com características socioambientais e urbanas da região em estudo. No próximo capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação do IRES à bacia do Canal do Mangue – BCM.



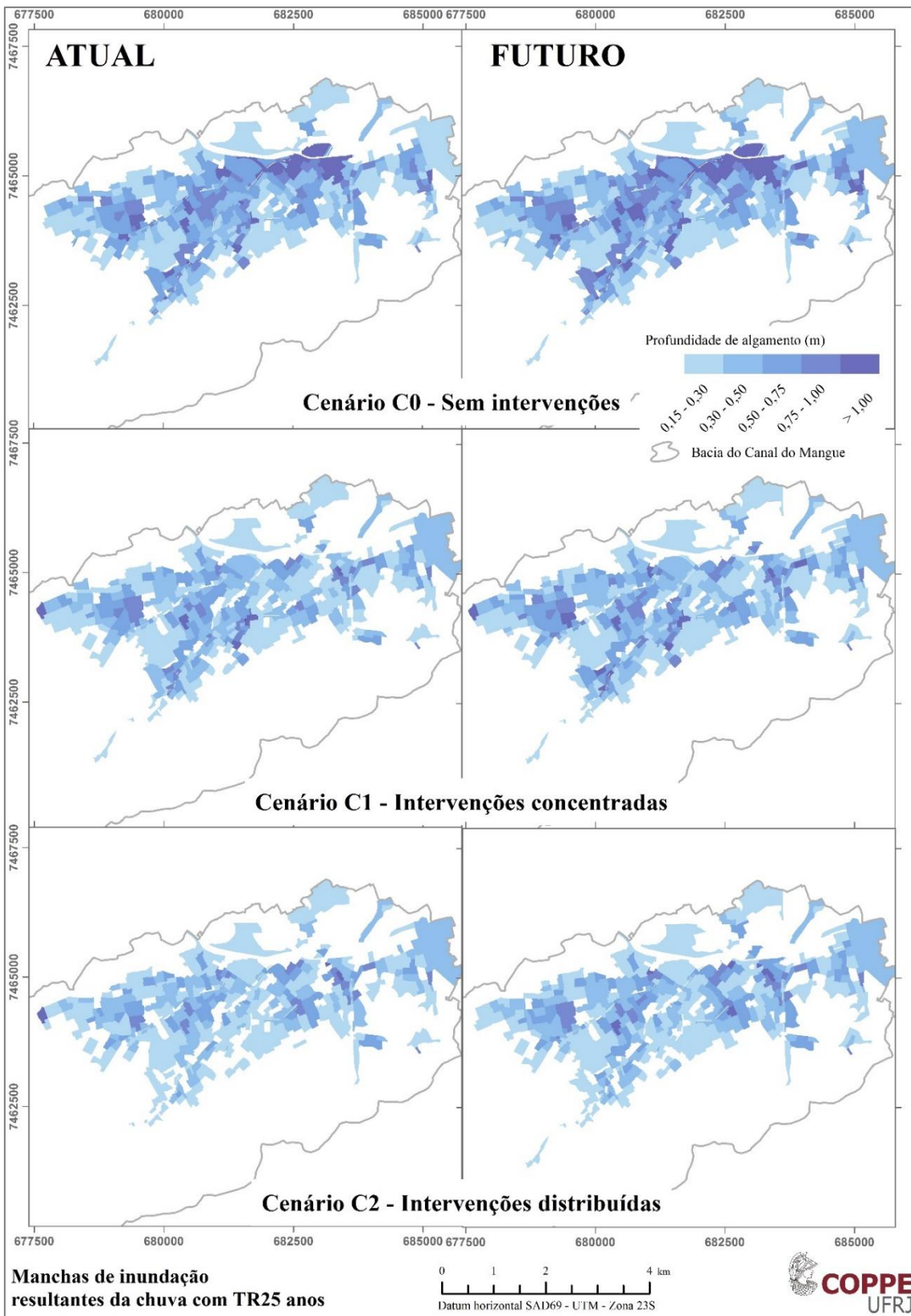


Figura 4.86 – Manchas de inundação para as três condições do sistema de drenagem (C0, C1 e C2), nos cenários climáticos atual e futuro.

## 5 Resultados da aplicação do IRES à BCM

A partir dos perigos relacionados às inundações, mapeados com os resultados das simulações hidrológico-hidrodinâmicas, referentes à profundidade máxima de alagamento, à velocidade máxima de escoamento superficial e ao tempo de permanência da inundação, e das vulnerabilidades socioambientais, são calculados os indicadores e índices necessários para estimativa do IRES, conforme apresentado no item 3.2.3 (pág. 74). Este item apresenta a discussão dos resultados da aplicação do IRES à bacia do Canal do Mangue.

### 5.1 Mapeamento espacial do IRES

A espacialização do IRES considera a célula da base de modelagem do MODCEL como unidade de referência, havendo um valor do índice para cada célula da área de interesse. Esta espacialização permite uma avaliação integrada das inundações e de possíveis conjuntos de intervenções para redução de riscos, indicando quais áreas são mais sensíveis aos danos das inundações e quais locais são mais beneficiados pelas estruturas propostas.

Os resultados da aplicação do IRES na bacia do Canal do Mangue é apresentado para o evento pluviométrico com 25 anos de tempo de recorrência, compatível com a exigência para projetos de macrodrenagem.

#### 5.1.1 Subíndice de risco à capacidade de resistência - $Si_R$

A resitência, no contexto do IRES, é medida em função da capacidade do sistema urbano de não sofrer danos, frente a um evento de inundação. Para composição do  $Si_R$ , é considerada a exposição das edificações ( $I_e$ ) e da infraestrutura urbana ( $I_{ei}$ ) aos danos potenciais da enchente, representada pela profundidade máxima de alagamento ( $I_H$ ), conforme esquema da Figura 5.1

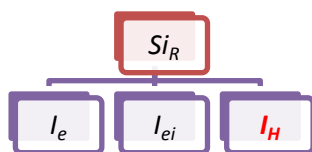
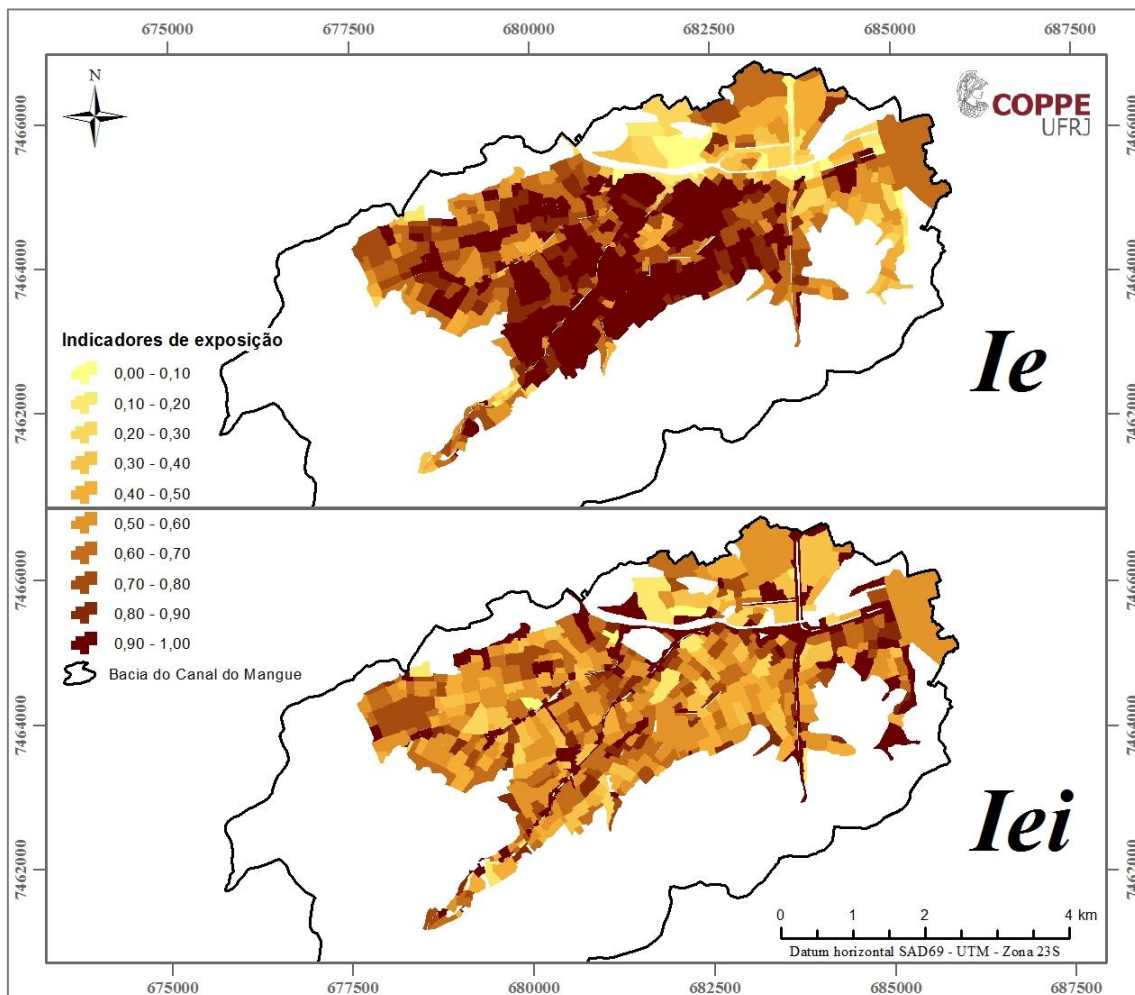


Figura 5.1 – Composição do Subíndice de risco à capacidade de resistência ( $Si_R$ ).

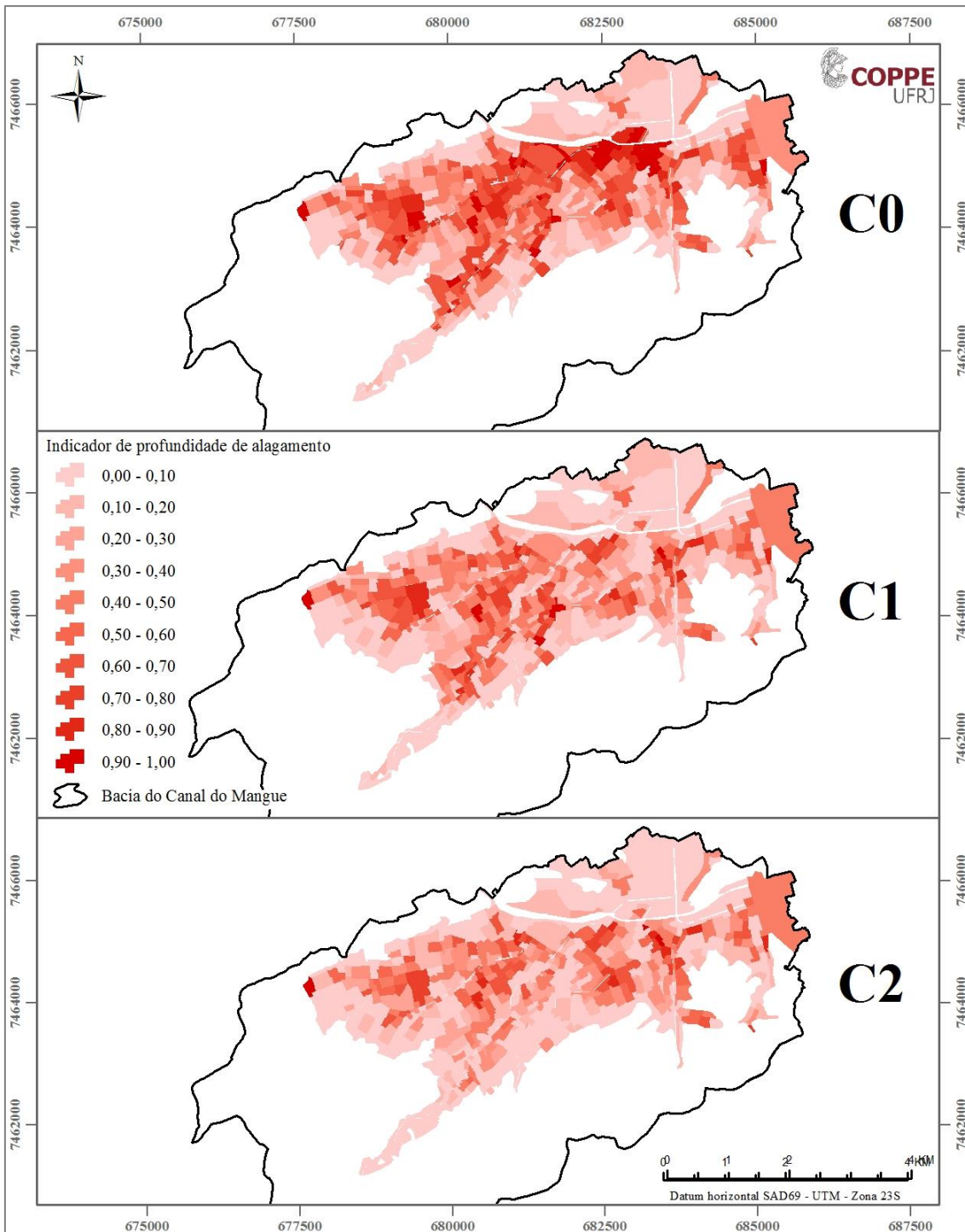
A exposição é estimada com base em informações urbanas da região, tomando a densidade de área construída e viária como indicadores do potencial de dano exposto. Assim, quanto mais densa a área, mais bens e pessoas estarão expostos aos perigos das enchentes.

Os indicadores de exposição, por dependerem unicamente do padrão urbano da região, não sofrem variação com o evento pluviométrico ou com a condição do sistema de drenagem. Dessa forma, tais indicadores são constantes para todos os cenários. A Figura 5.2 apresenta a distribuição espacial do  $I_e$  e do  $I_{ei}$  na bacia do Canal do Mangue. As informações foram obtidas junto à Gerência de Informações Urbanísticas da Prefeitura do Rio de Janeiro.



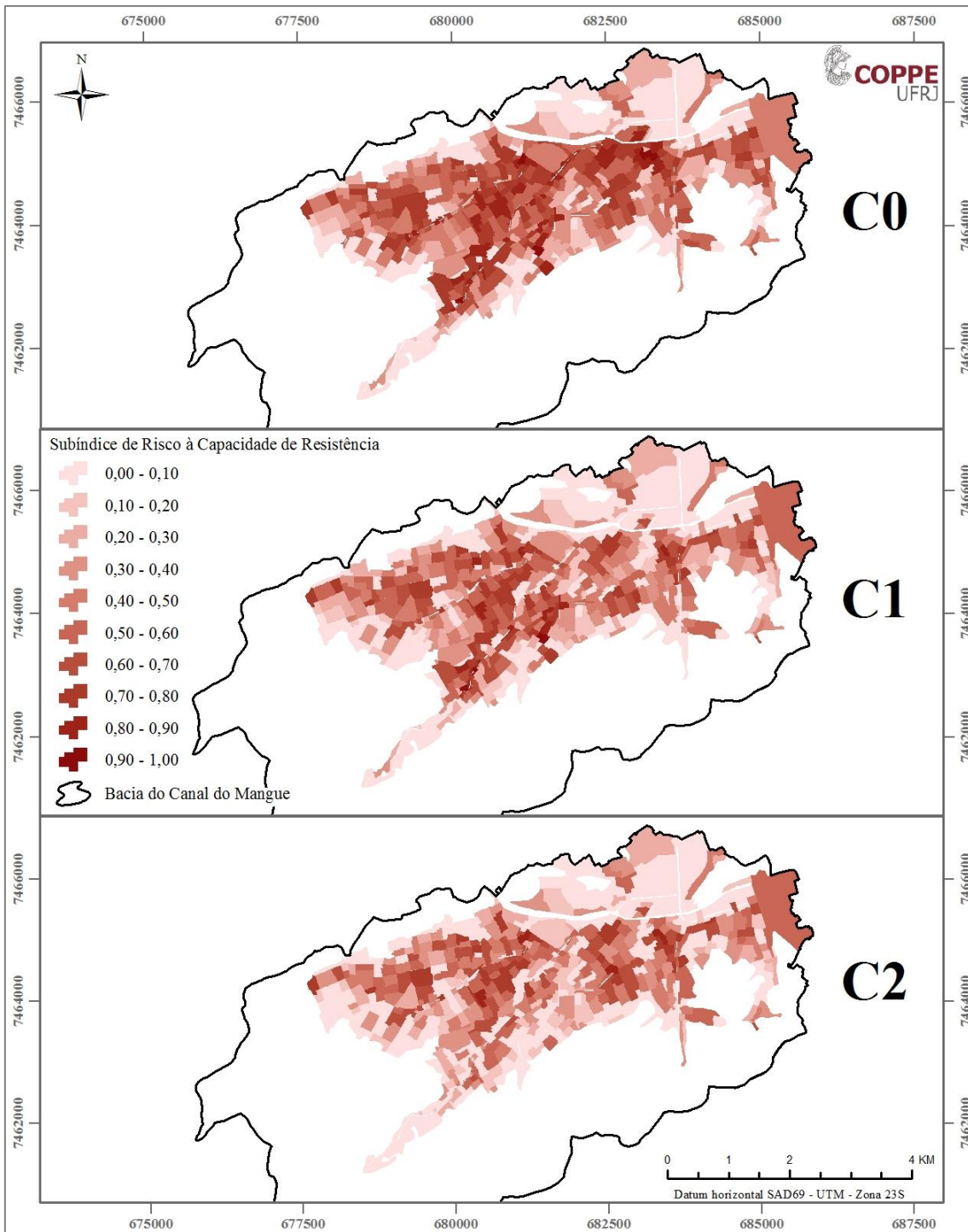
**Figura 5.2 – Mapa com distribuição espacial dos indicadores de exposição de edificações ( $I_e$ ) e de infraestrutura urbana ( $I_{ei}$ ).**

Os indicadores de exposição são cruzados com o indicador de perigo, representado, neste subíndice, pelo *Indicador de Profundidade de Alagamento* ( $I_H$ ). Os mapas da Figura 5.3 apresentam a espacialização do perigo para cada cenário de simulação, considerando a chuva com TR25 anos. Estes mapas mostram o impacto das intervenções propostas, com uma sensível redução nos indicadores de perigo por toda a bacia. Para o cenário C2, a redução se mostra mais esparsa, em decorrência da maior distribuição das medidas de retenção das águas pluviais.



**Figura 5.3 – Espacialização do Indicador de Profundidade de Alagamento ( $I_H$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). TR25.**

Por fim, os indicadores são combinados, segundo a equação (3.15), resultando no mapa do *Subíndice de Risco à Capacidade de Resistência* ( $Si_R$ ) apresentado na Figura 5.4.



**Figura 5.4 – Espacialização do Subíndice de Risco à Capacidade de Resistência ( $Si_R$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). TR25.**

### 5.1.2 Subíndice de risco à capacidade de recuperação material - $Si_C$

Com o objetivo de relativizar o risco baseado em um critério socioeconômico, este subíndice corrige uma tendência da avaliação de risco tradicional em priorizar áreas com ocupação de classes de renda mais alta, uma vez que, normalmente, utiliza o valor exposto diretamente na composição do risco.

O  $Si_C$  compreende duas componentes. Uma relativa à vulnerabilidade econômica ( $I_{vr}$ ), levando em consideração a classe econômica da população exposta e sua respectiva capacidade de recuperação frente a prejuízos potenciais decorrentes de inundações, os quais são relativizados pela susceptibilidade aos danos, dada pelo indicador de susceptibilidade das edificações ( $I_S$ ). A outra componente é relativa à vulnerabilidade social ( $I_{vs}$ ), a qual considera a porcentagem da população exposta que é mais propensa a sofrer danos, dada pelo produto entre o *Indicador de Pessoas Vulneráveis* ( $I_{pv}$ ) e o indicador de perigo relativo ao Fator de Velocidade ( $I_{FV}$ ). Essa composição é apresentada na Figura 5.5.

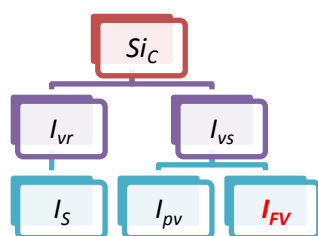
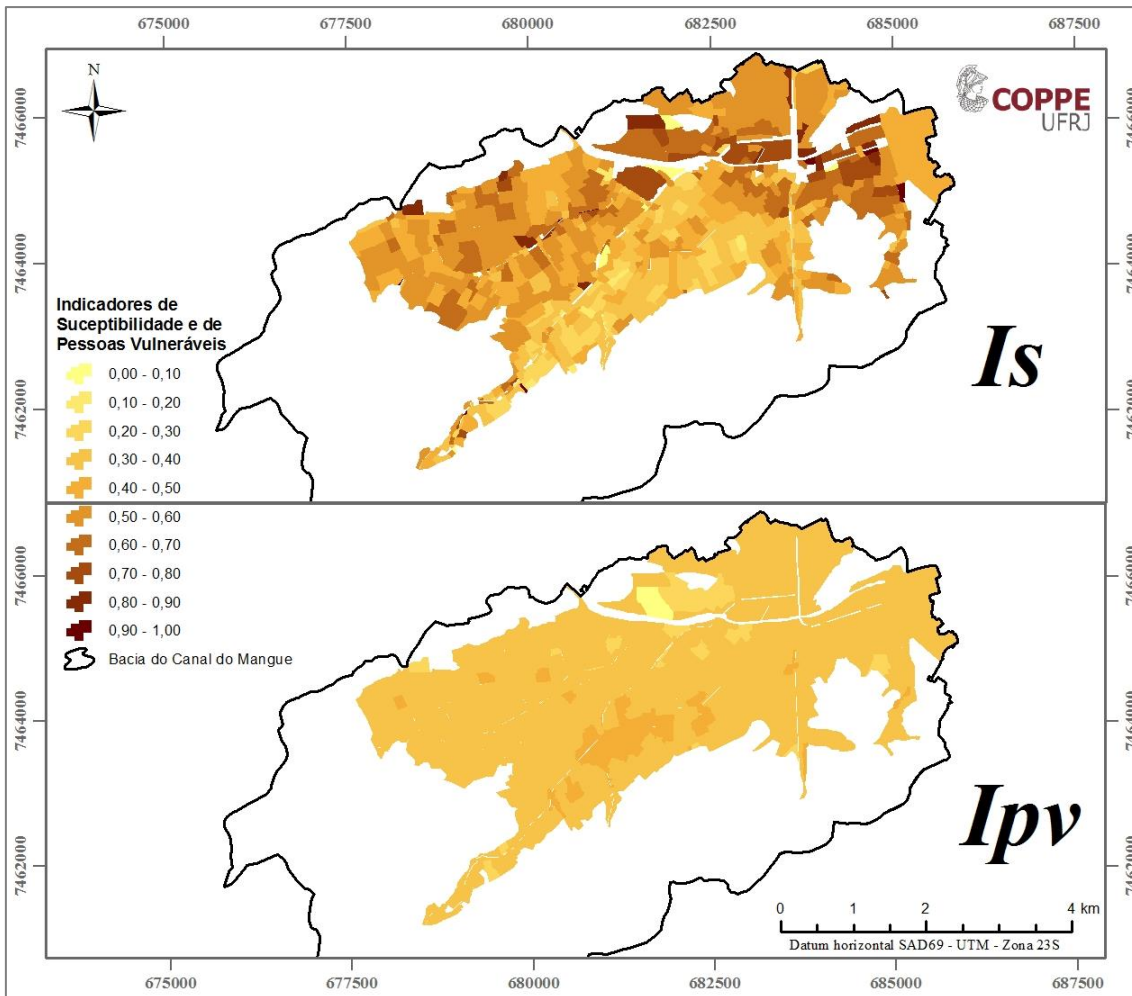


Figura 5.5 – Composição do Subíndice de risco à capacidade de recuperação material ( $Si_C$ ).

O *Indicador de Susceptibilidade das Edificações* ( $I_S$ ) considera, de forma indireta, o número de pavimentos médio de uma determinada área, sendo mais susceptível quanto mais baixo for a altura média das edificações. Assim, o  $I_S$  independe dos eventos de chuva e das condições da rede de drenagem. As informações sobre a altura das edificações na bacia do Canal do Mangue foram obtidas junto ao Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos – IPP.

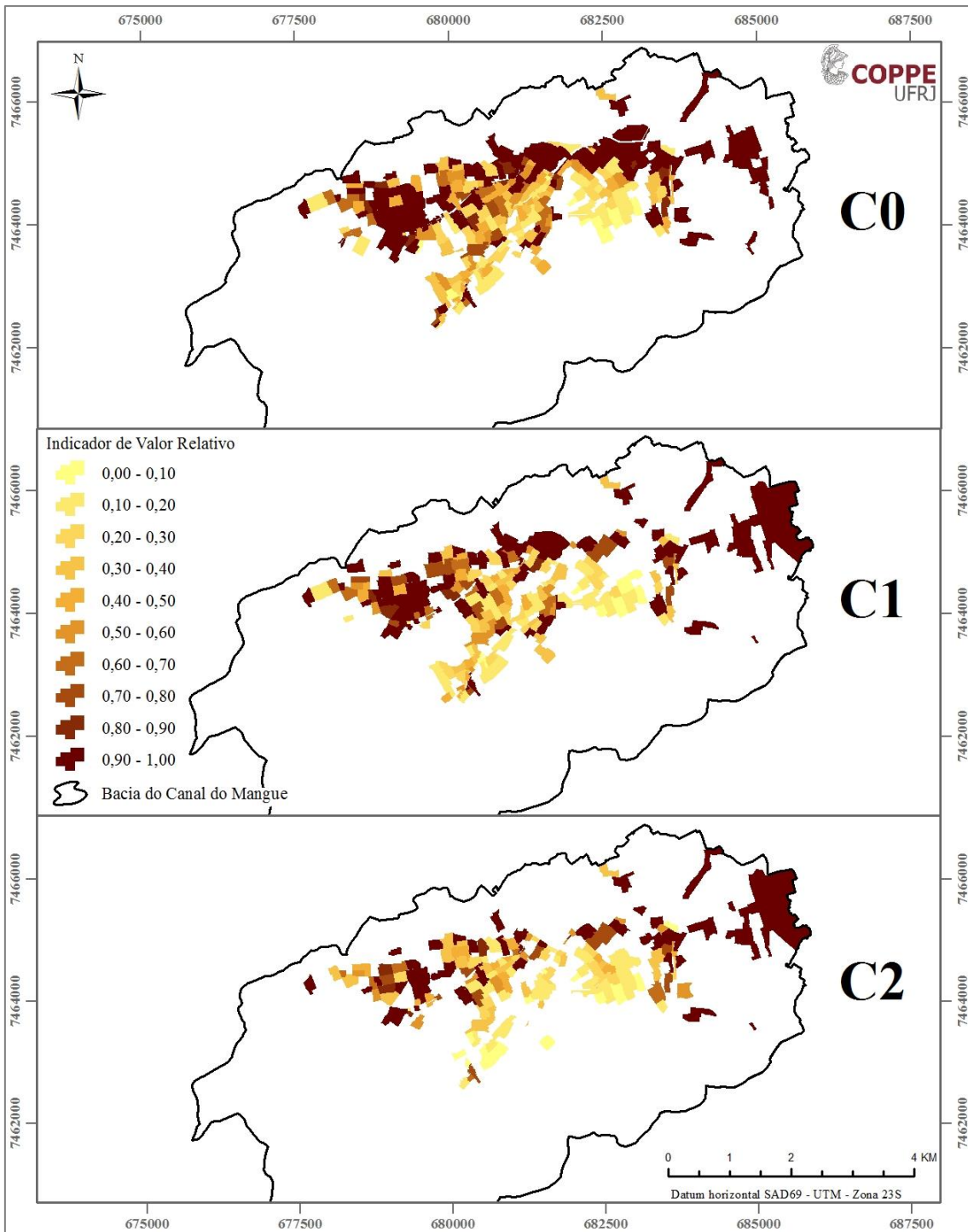
O índice de pessoas vulneráveis também assume essa característica, dependendo apenas da composição etária da população de determinada região. Estas informações advêm do banco de dados do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010).

A espacialização dos indicadores  $I_S$  e  $I_{pv}$  na bacia do Canal do Mangue são apresentadas nos mapas da Figura 5.6, os quais se mantêm para todos os cenários de simulação.



**Figura 5.6 – Mapa com distribuição espacial dos indicadores de susceptibilidade das edificações ( $I_s$ ) e de pessoas vulneráveis ( $I_{pv}$ ).**

O indicador de susceptibilidade é utilizado como um fator de correção do *Indicador de Valor Relativo* ( $I_{vr}$ ), o qual estima, com base nas informações econômicas (classes de renda) do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2010), a capacidade de recuperação média de uma determinada região em face do impacto dos prejuízos potenciais de um evento de inundação. Este valor é estimado a partir da capacidade de poupança, dada pela diferença entre o rendimento e as despesas médias, por cada classe de rendimento monetário. O  $I_{vr}$  ainda considera em seu cálculo uma parcela relativa ao perigo, representado pela profundidade máxima de alagamento. Tal parcela é utilizada para estimativa do prejuízo potencial da inundação em determinada região, por meio da aplicação de curvas *altura X prejuízo*. A composição final deste indicador, especializado na bacia do Canal do Manguê, é apresentada nos mapas da Figura 5.7, para todos as condições do sistema de drenagem (C0, C1 e C2).



**Figura 5.7 – Espacialização do Indicador de Valor Relativo ( $I_{vr}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva com TR25.**

Para a estimativa da vulnerabilidade social, baseada na propensão das pessoas em sofrer danos durante um evento de inundação, é considerada a parcela do perigo relativa ao Fator de Velocidade ( $I_{FV}$ ), que influencia a capacidade de arraste do escoamento.



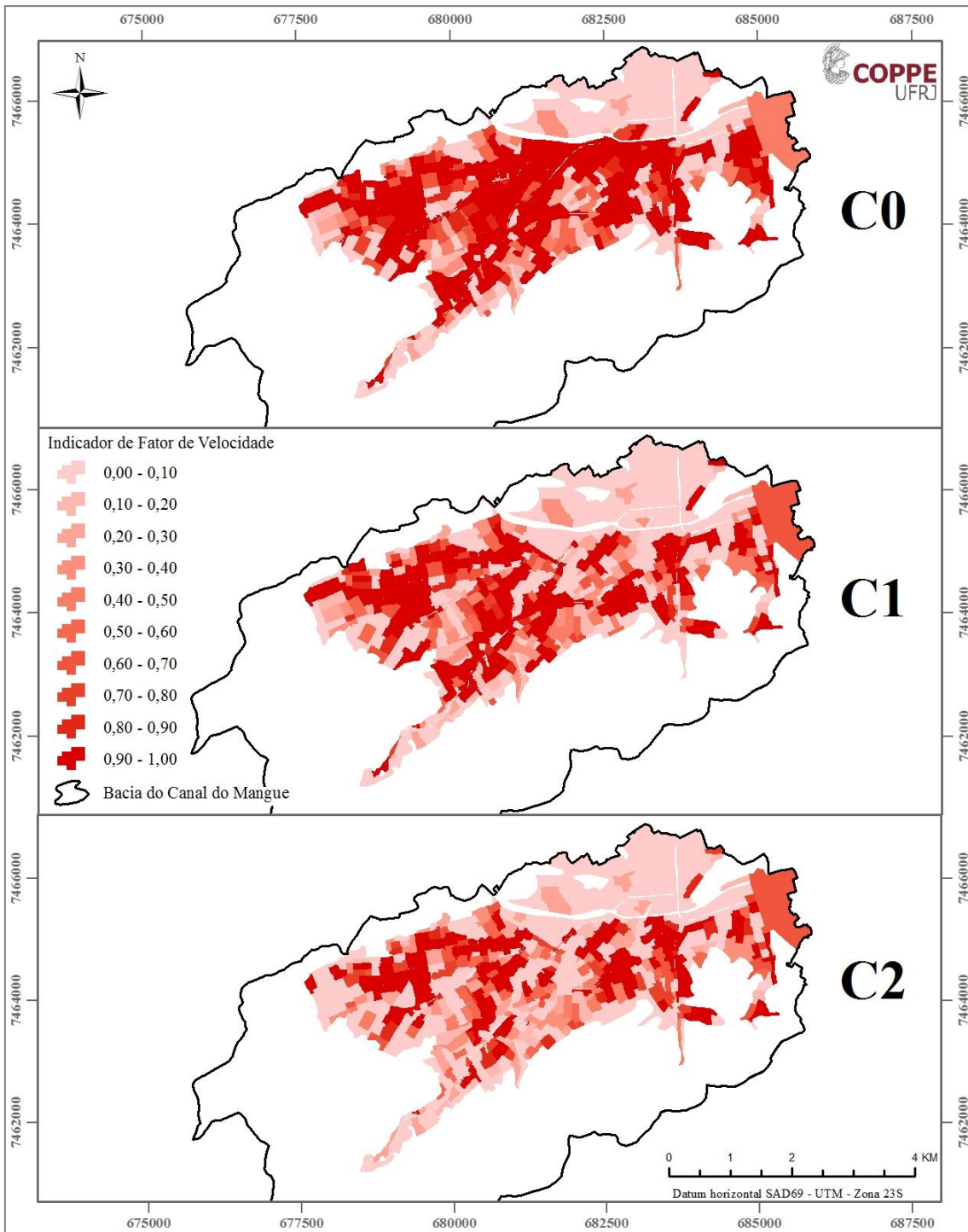
O fator de velocidade é dividido em dois grupos, afetando de forma mais intensa o grupo de pessoas vulneráveis, representado pela população mais jovem, menos que 15 anos, e mais idosa, mais que 60 anos.

Para efeito de representação, é apresentado o  $I_{FV}$  das pessoas vulneráveis, resultante da chuva com 25 anos de tempo de recorrência, para as três condições do sistema de drenagem da bacia, o qual pode ser visto espacializado nos mapas da Figura 5.8.

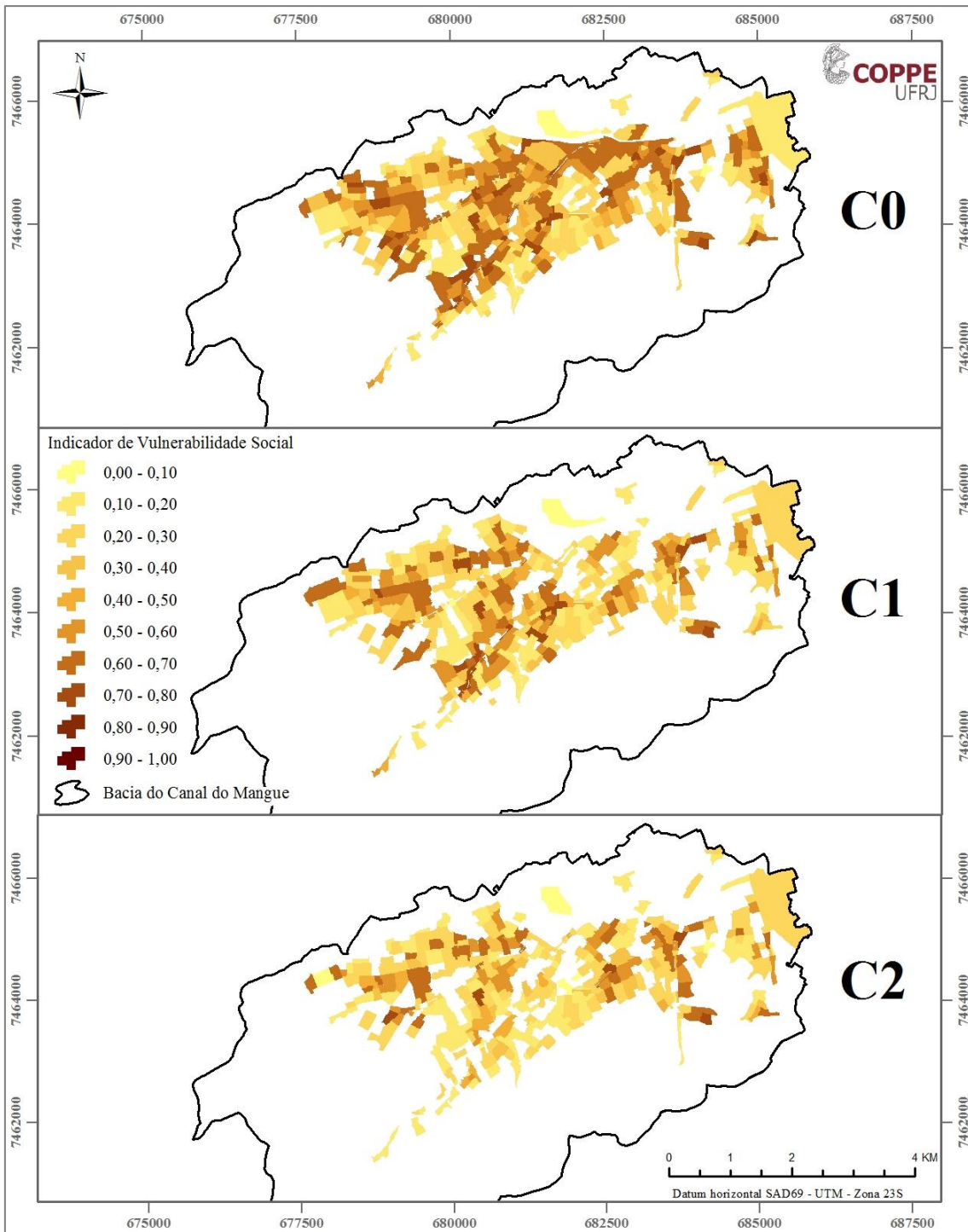
A composição dos indicadores de Fator de Velocidade ( $I_{FV}$ ) e de pessoas vulneráveis ( $I_{pv}$ ) resulta no *Indicador de Vulnerabilidade Social* ( $I_{vs}$ ), que representa a propensão de uma população residente em uma determinada região em sofrer danos durante um evento de inundação. Os resultados do  $I_{vs}$  espacializados, para todas as condições do sistema de drenagem simuladas (**C0**, **C1** e **C2**), são apresentados nos mapas da Figura 5.9.

Por fim, os indicadores de valor relativo ( $I_{vr}$ ) e de vulnerabilidade social ( $I_{vs}$ ), que representam o viés socioeconômico do índice, compõem o *Subíndice de Risco à Capacidade de Recuperação Material* ( $Si_C$ ). Os resultados espacializados na bacia do Canal do Mangue deste segundo subíndice é apresentado nos mapas da Figura 5.10.

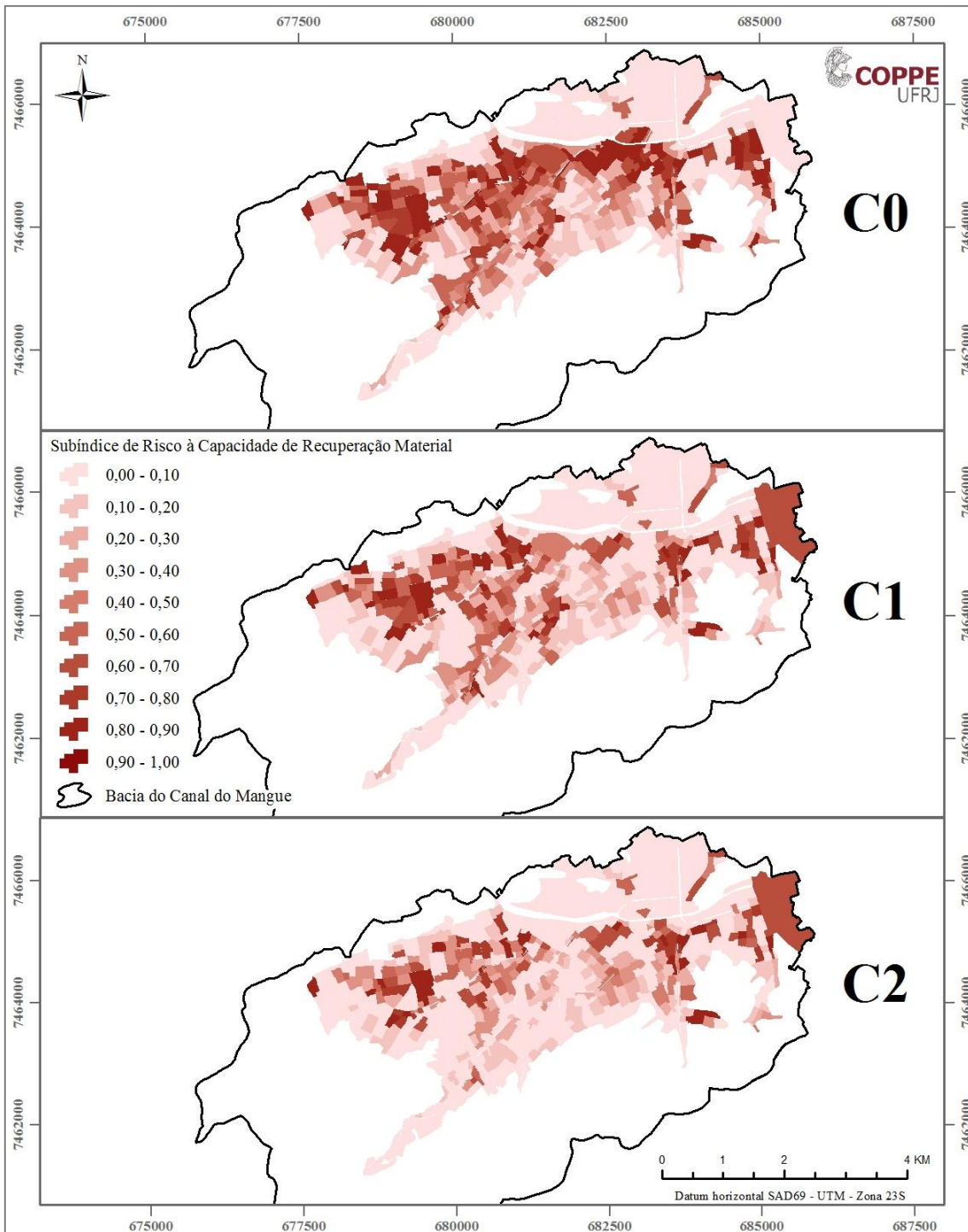
Como impacto das intervenções propostas nos cenários de projeto, é possível observar que há considerável redução do risco, para ambos cenários, tanto com medidas concentradas, como distribuídas. Porém, neste segundo caso, os resultados se apresentam mais espacializados, em consequência da maior distribuição das obras.



**Figura 5.8 – Espacialização do Indicador de Fator de Velocidade ( $I_{FV}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva com TR25.**



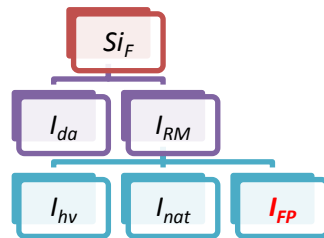
**Figura 5.9** – Espacialização do Indicador de Vulnerabilidade Social ( $I_{vs}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva com TR25.



**Figura 5.10 – Espacialização do Subíndice de Risco à Capacidade de Recuperação Material ( $Si_C$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). TR25.**

### 5.1.3 Subíndice de risco à manutenção do funcionamento - $Si_F$

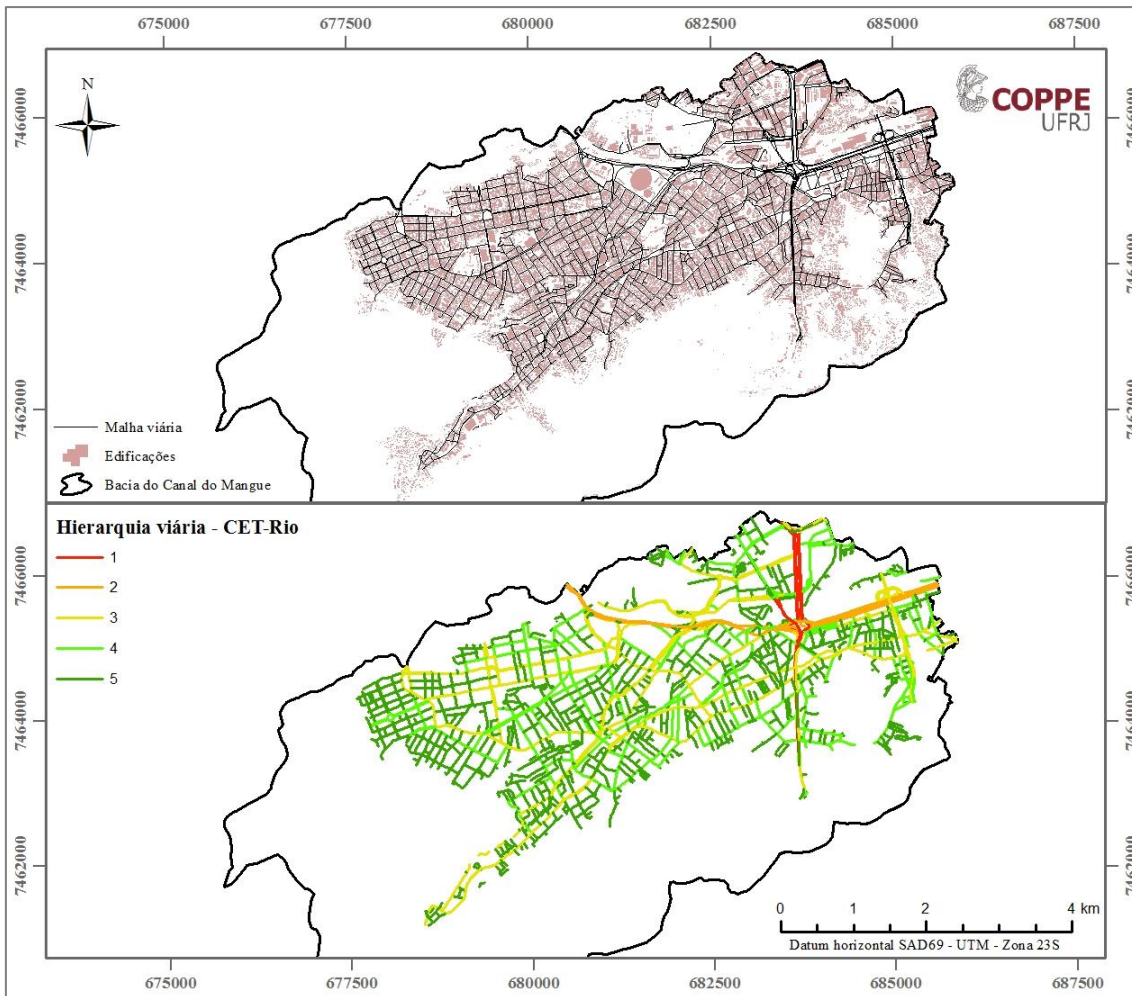
A terceira parcela do IRES avalia a capacidade do sistema em prover um funcionamento mínimo de suas funções durante a ocorrência de um evento de inundação. O  $Si_F$  é composto por dois indicadores: um relacionado à dificuldade de haver uma oferta eficiente de auxílio à população afetada durante o evento, representado pelo *Indicador de Dificuldade de Ajuda* ( $I_{da}$ ); outro que se relaciona com o risco de ruptura da mobilidade, representado pelo *Indicador de Risco à Mobilidade* ( $I_{RM}$ ), o qual, por sua vez, é composto por três subindicadores, que representam a importância de vias expostas à inundação (*Indicador de Hierarquia Viária* -  $I_{hv}$ ), a área da bacia não atendida por transporte sobre trilhos (*Indicador de Não Atendimento de Transportes sobre Trilhos* -  $I_{nat}$ ) e, por fim, a parcela relativa ao perigo da inundação que mais afetaria a continuidade do funcionamento da bacia, relativa ao tempo em que determinada área permanece submersa (*Indicador de Fator de Permanência* -  $I_{FP}$ ). O esquema da Figura 5.11 apresenta a composição do  $Si_F$ .



**Figura 5.11 – Composição do Subíndice de risco à manutenção do funcionamento ( $Si_F$ ).**

Os indicadores de hierarquia viária ( $I_{hv}$ ) e de não atendimento por transporte sobre trilhos ( $I_{nat}$ ) são dependentes apenas de características relativas ao sistema de transporte, não sofrendo variação de acordo com o evento de inundação. Dessa forma, para todos os cenários hidrológicos, tais indicadores permanecem constantes.

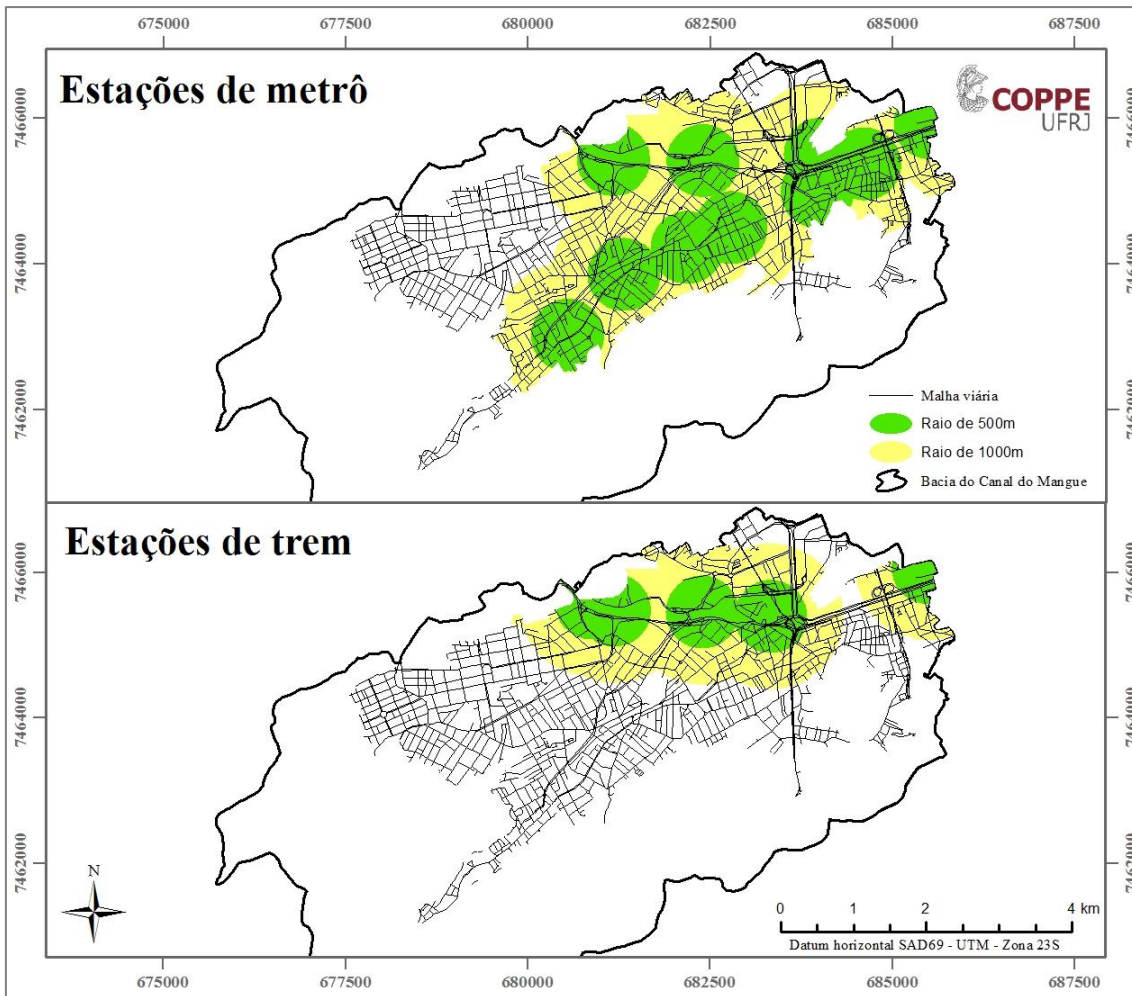
O  $I_{hv}$  toma por base a distribuição da malha viária na bacia, dando maior peso segundo a hierarquia das vias, ou seja, quanto mais importante a via de circulação, maior será o risco para o funcionamento da bacia caso ela seja atingida por um alagamento. A Figura 5.12 apresenta a malha viária da bacia do Canal do Mangue e a classificação hierárquica das vias, utilizada para construção do indicador. Para cada célula do domínio de interesse, são mapeadas as vias existentes em seus limites, tomando a via de maior hierarquia como representante da célula, a qual comporá o valor do indicador de hierarquia viária.



**Figura 5.12 – Malha viária na bacia do Canal do Mangue e hierarquização das vias, segundo CET-Rio.**

Outro fator levado em consideração na estimativa do risco à manutenção do funcionamento está relacionado à oferta de transporte sobre trilhos, o qual tende a possuir menor possibilidade de ruptura de operação durante eventos de inundação, oferecendo, assim, uma alternativa para a mobilidade da população durante e após o evento.

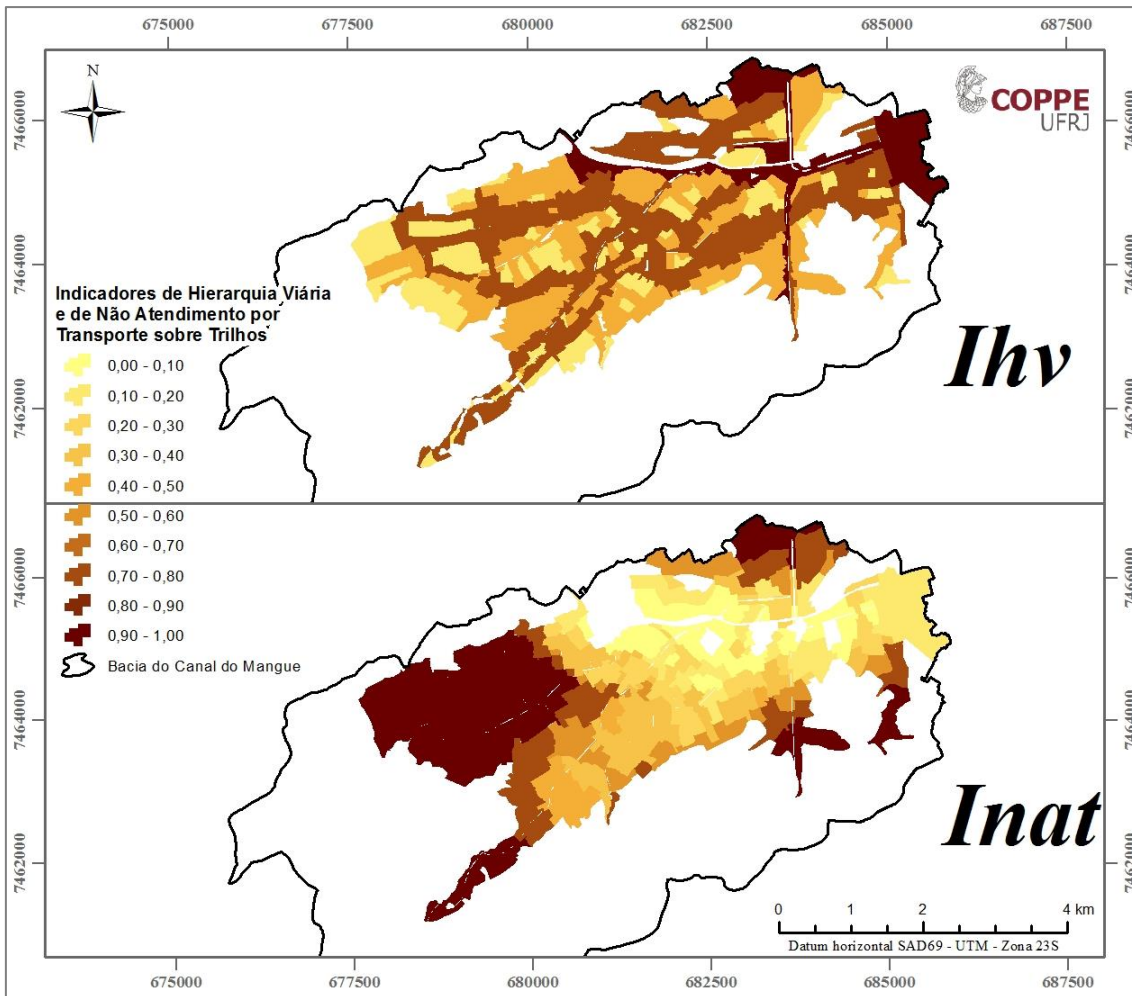
São, então, levantadas as estações de metrô e de trem existentes no entorno da bacia do Canal do Mangue. Após posicionadas em mapa georreferenciado, são demarcadas as áreas circunscritas com raios de 500 e 1.000 metros, centradas em cada uma das estações. A partir da sobreposição dessas áreas, é possível escalar a oferta de transportes sobre trilhos, baseando-se na facilidade de acesso a uma ou mais estações. Na Figura 5.13 são apresentados os mapas com as áreas de influência de cada estação, de metrô e de trem.



**Figura 5.13 – Áreas de influência das estações de metrô e de trem, com raios de 500 e 1.000 metros, na bacia do Canal do Mangue.**

Com as informações acerca da mobilidade na bacia, considerando as vias urbanas e a oferta de transporte sobre trilhos, são estimados os indicadores  $I_{hv}$  e  $I_{nat}$ , os quais compõem uma parcela do risco à mobilidade, frente a eventos de inundações.

A Figura 5.14 apresenta a distribuição espacial destes indicadores, possibilitando a observação que o risco tenderá a ser majorado quando um alagamento atingir as células com maior hierarquia viária e menor oferta de transportes sobre trilhos. Essa composição é muito importante para a lógica da resiliência, uma vez que sugere a possibilidade de haver um planejamento do setor de transportes com objetivo de redução do risco de ruptura do sistema durante a ocorrência de um evento de inundação urbana.



**Figura 5.14 – Mapa com distribuição espacial dos indicadores de hierarquia viária ( $I_{hv}$ ) e de não atendimento por transporte sobre trilhos ( $I_{nat}$ ).**

Uma vez levantadas as características relacionadas à vulnerabilidade do sistema de mobilidade na bacia do Canal do Mangue, são mapeados os perigos advindos das inundações. No caso da capacidade de continuar a prover os serviços urbanos da bacia, a parcela do perigo que mais afeta essa capacidade é o tempo de permanência do alagamento.

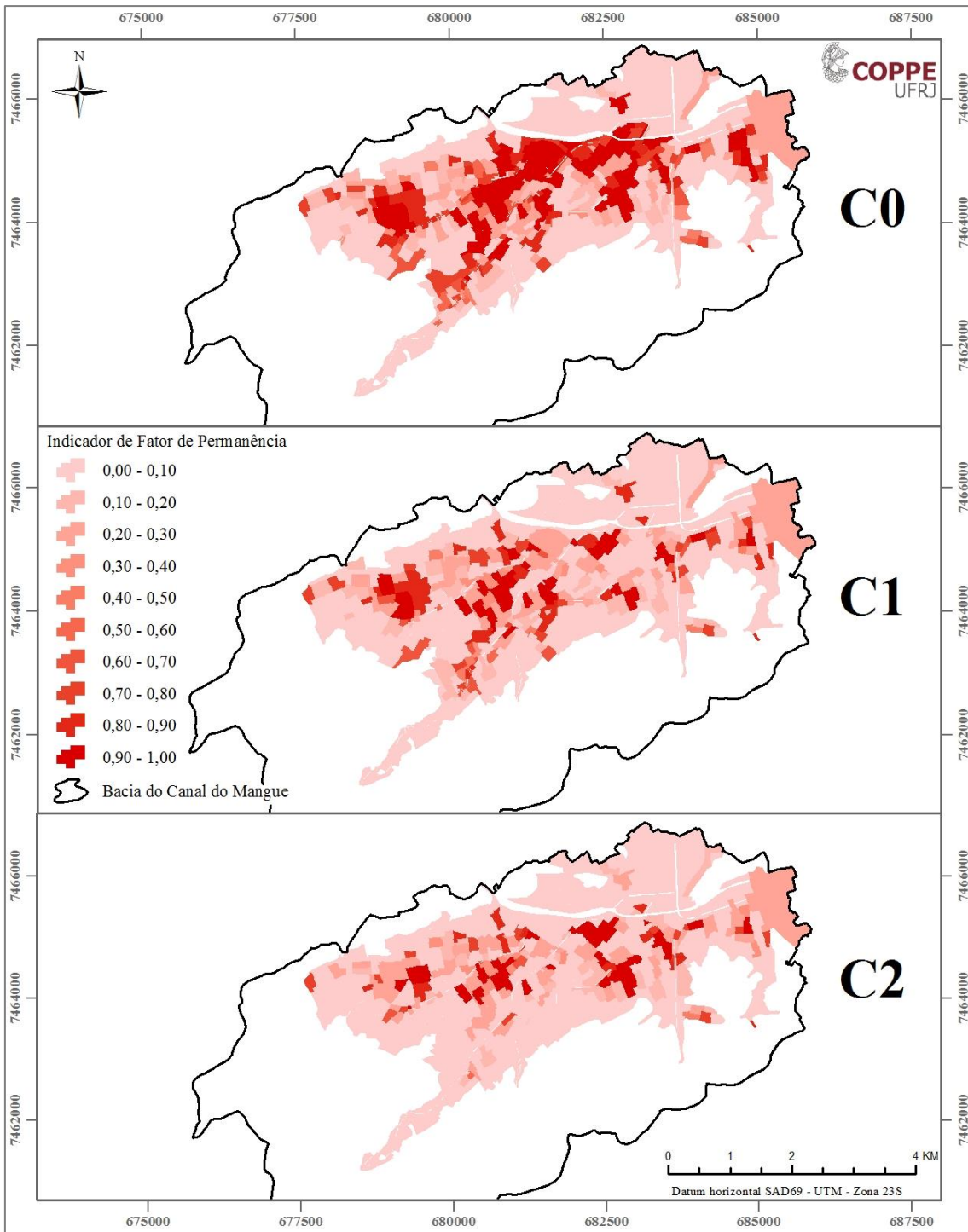
Locais com pequenas profundidades de alagamento não representam grandes riscos, mas, caso permaneçam por muito tempo, tendem a piorar a situação, elevando riscos de acidentes e dificultando a mobilidade de pessoas. Da mesma forma, locais com profundidades de alagamento mais expressivas já causam grandes transtornos em períodos relativamente curtos de permanência, impedindo a fluidez do tráfego e gerando grandes congestionamentos, podendo paralisar por completo uma região. Esta parcela do perigo é representada pelo *Indicador de Fator de Permanência* ( $I_{FP}$ ), o qual é apresentado na Figura 5.15.



A superposição dos indicadores  $I_{hv}$ ,  $I_{nat}$  e  $I_{FP}$  permite observar as áreas mais frágeis quanto à possibilidade de ruptura dos serviços de mobilidade de uma determinada bacia, compondo o *Indicador de Risco à Mobilidade* ( $I_{RM}$ ).

Como não há proposição de medidas de adaptação do sistema de transporte, as variações no  $I_{RM}$  se devem aos efeitos de redução dos tempos de alagamento em consequência da implantação dos reservatórios de detenção de águas pluviais, simulados nos cenários **C1** e **C2**.

A espacialização do  $I_{RM}$  é apresentada na Figura 5.16, na qual é possível observar o efeito da implantação das obras previstas em cada cenário de intervenção. No cenário C2, com medidas distribuídas, o impacto na redução do risco é mais expressivo, garantindo uma melhor espacialização dos efeitos positivos da implantação dos reservatórios.



**Figura 5.15 – Espacialização do Indicador de Fator de Permanência ( $I_{FP}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva TR25.**

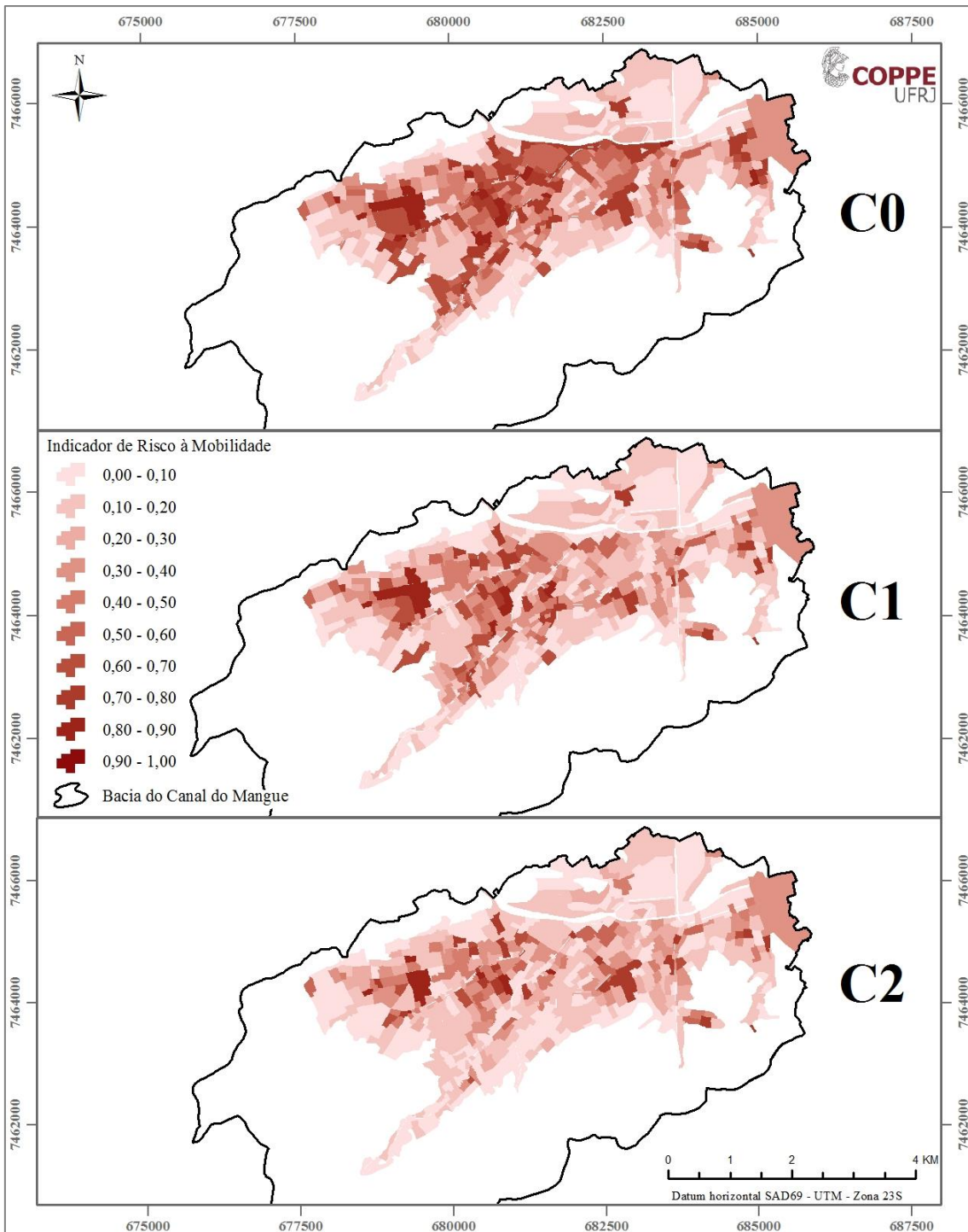
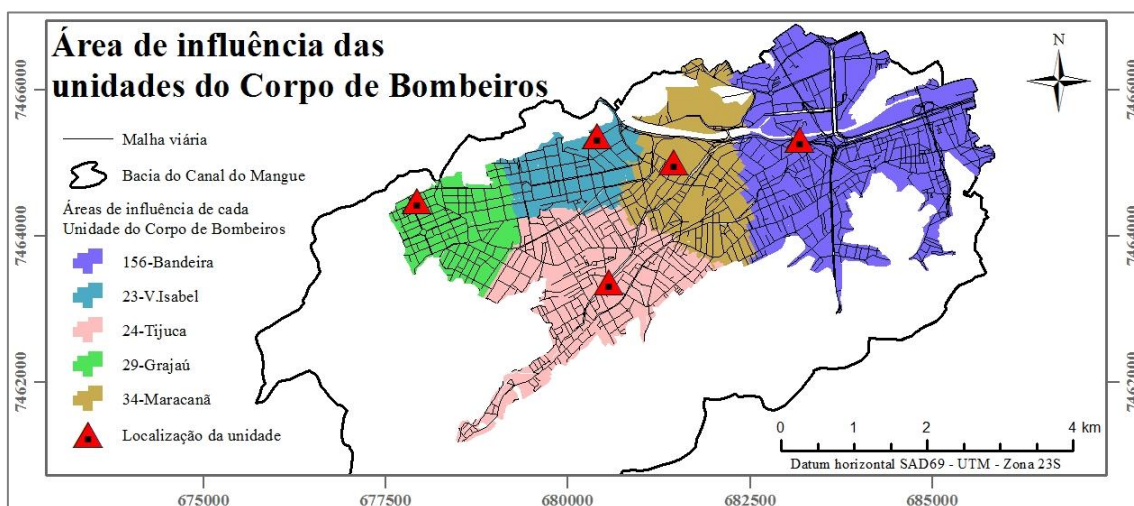


Figura 5.16 – Espacialização do Indicador de Risco à Mobilidade ( $I_{RM}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva TR25.

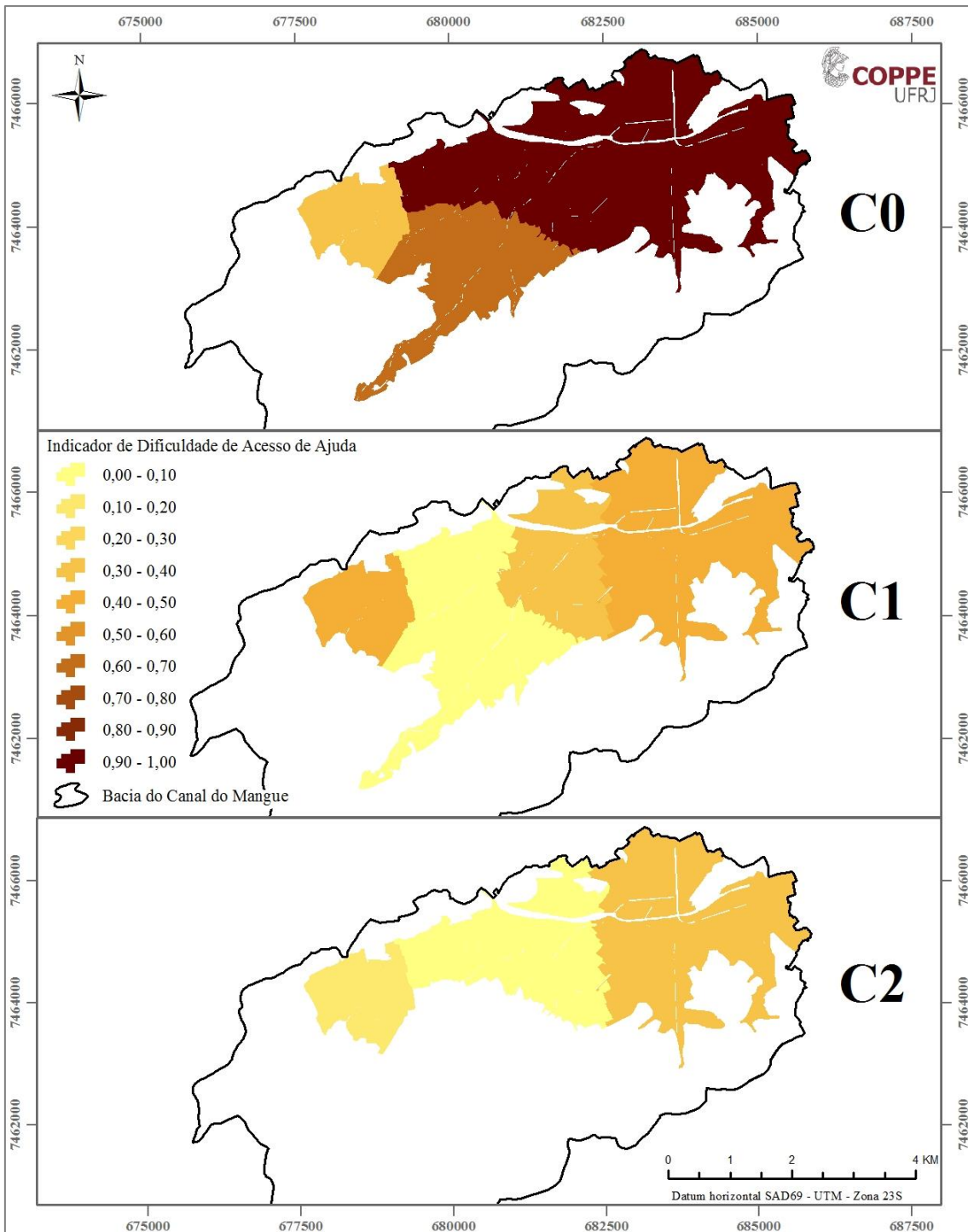
Ainda concernente à capacidade de manutenção de suas funções básicas, uma bacia deve possuir uma boa cobertura de oferta de serviços de apoio de emergência, os quais possibilitam que haja uma resposta mais eficaz e eficiente, quando há a ocorrência de um evento crítico de inundação. Na proposta da presente pesquisa, é formulado o *Indicador de Dificuldade de Acesso de Ajuda ( $I_{da}$ )*, que mede o impacto das inundações no sistema de apoio de emergência, representado pelas unidades operacionais do Corpo de Bombeiros Militar existentes na bacia do Canal do Mangue. As profundidades de alagamento no local e no entorno dos Bombeiros são avaliadas, para classificar a dificuldade em realizar o apoio. A Figura 5.17 apresenta a localização das unidades do Corpo de Bombeiros existentes na bacia do Canal do Mangue e suas áreas de influência, estimadas em critério de proximidade espacial.



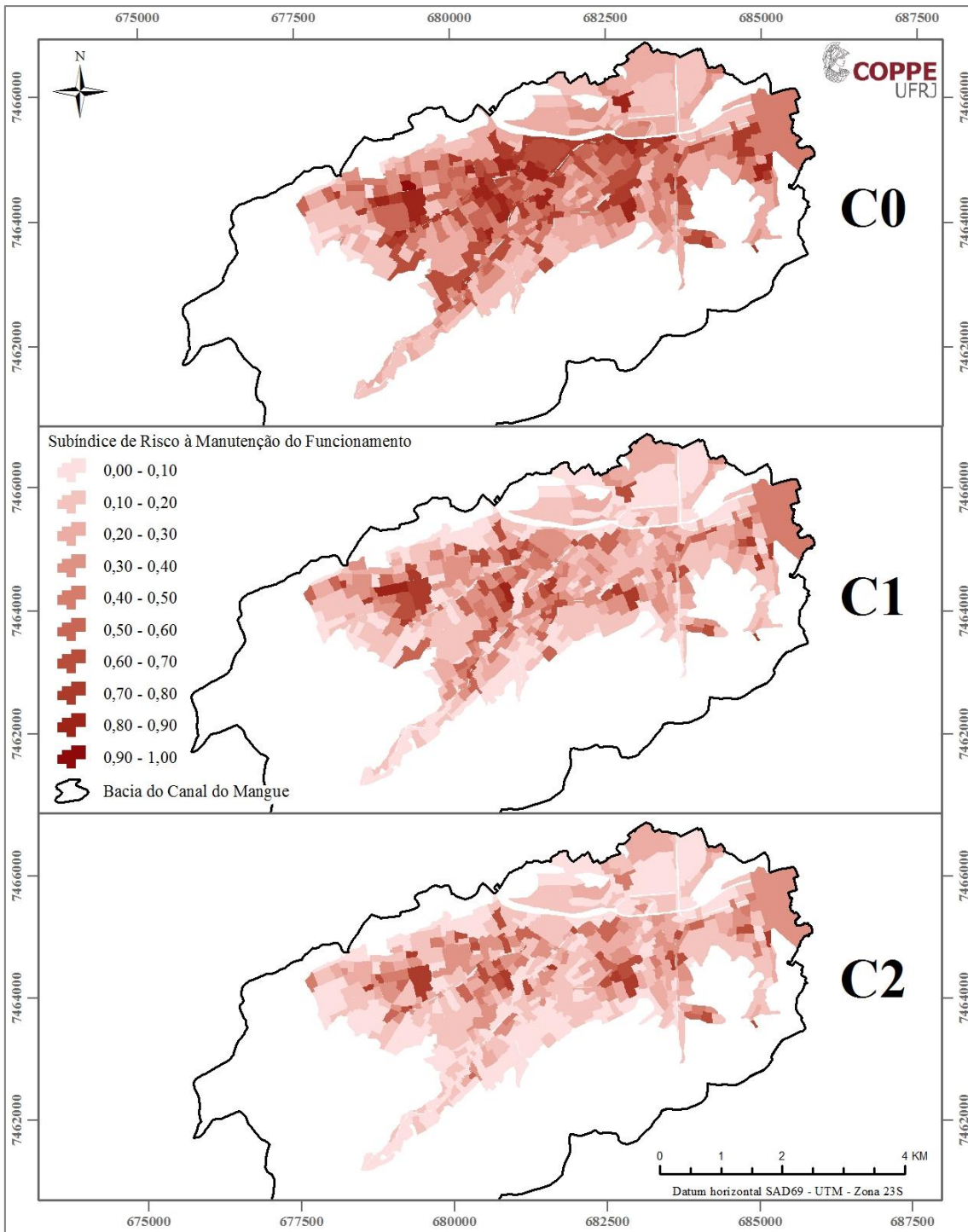
**Figura 5.17 – Localização das unidades do Corpo de Bombeiros na bacia do Canal do Mangue e suas respectivas áreas de influência, baseadas em proximidade espacial.**

Como a dificuldade do atendimento de emergência depende da profundidade de alagamento nos locais onde estão instaladas as unidades do Corpo de Bombeiros, o indicador  $I_{da}$  varia de acordo com o cenário de simulação, dependendo das condições da rede de drenagem e da intensidade de precipitação. Na Figura 5.18 são apresentados os resultados do  $I_{da}$  espacializados na bacia do Canal do Mangue, para cada uma das condições da rede de drenagem simuladas, considerando a chuva com 25 anos de tempo de recorrência.

A sobreposição destes indicadores resulta no Subíndice de Risco à Manutenção do Funcionamento ( $Si_F$ ), apresentado de forma espacializada para a bacia do Canal do Mangue na Figura 5.19.



**Figura 5.18** – Espacialização do Indicador de Dificuldade de Acesso de Ajuda ( $I_{da}$ ), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). Chuva TR25.



**Figura 5.19 – Espacialização do Subíndice de Risco à Manutenção do Funcionamento ( $Si_F$ ), para três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). TR25.**

#### 5.1.4 Índice de Resiliência às Inundações da BCM

A resiliência, como abordada nas discussões realizadas ao longo da revisão bibliográfica deste trabalho, insere-se no gerenciamento do risco como uma característica de contraponto às fragilidades do sistema urbano frente aos impactos potenciais das inundações. Dessa forma, para mensurar a resiliência às inundações, este trabalho propõe a aplicação da lógica da estimativa do risco, calculando, a partir de seu complemento, o valor da resiliência. Conforme apresentado no item 3.2.3 (pág. 74), o Índice de Resiliência às Inundações – IRES é composto pelo inverso dos subíndices de risco ( $Si_R$ ,  $Si_C$  e  $Si_F$ ), tendo a relação hierárquica apresentada na Figura 5.20.

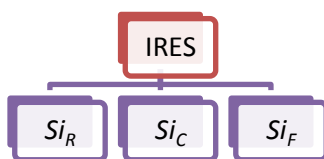


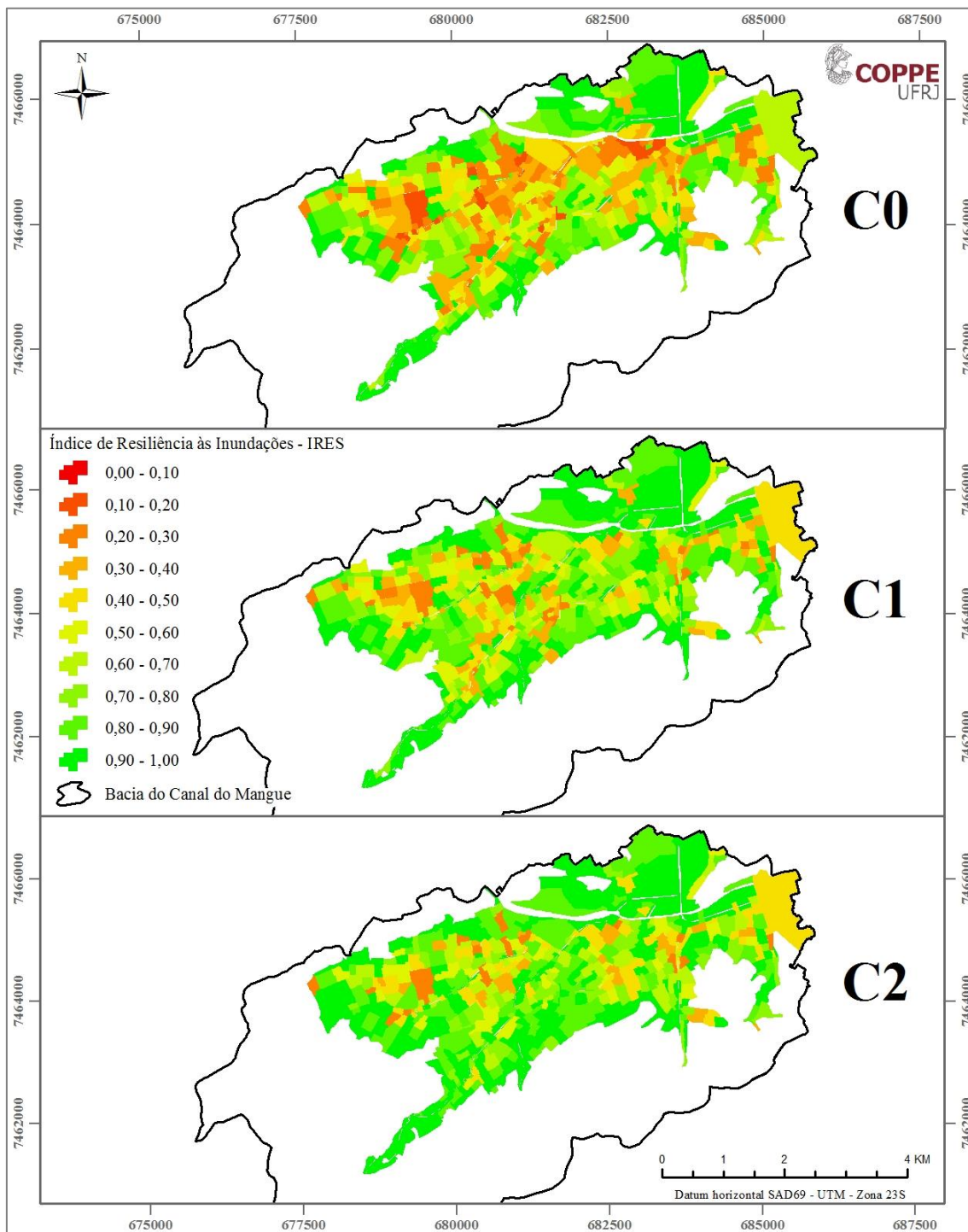
Figura 5.20 – Composição do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES.

A sobreposição do complemento dos subíndices de risco indica os locais que sofrem menos impactos decorrentes de um evento de inundação, considerando três importantes pilares da resiliência: a *resistência*; a *capacidade de recuperação*; e a *manutenção do funcionamento*.

O resultado da composição final apresenta uma excelente resposta do sistema após implementação das obras de controle de inundações, em ambos cenários simulados, como pode ser visto na Figura 5.21. Conforme percebido em outros indicadores, a diferença entre os cenários se dá exatamente no maior potencial de abrangência dos efeitos positivos das intervenções, quando consideradas medidas distribuídas sobre a bacia (cenário C2).

A permanência de muitos locais ainda com baixa ou média resiliência ( $IRES < 0,5$ ) indicam a criticidade dos problemas de inundações na bacia do Canal do Mangue, decorrentes, além da incapacidade hidráulica dos rios e canais principais, da ineficiência do sistema de microdrenagem. Por se tratar de uma bacia com área urbana localizada em baixa declividade, tal sistema já possui uma dificuldade imposta por condições fisiográficas, devendo haver, assim, uma busca por medidas de organização dos escoamentos superficiais oriundos da precipitação sobre as áreas urbanas. A consideração do uso de sistemas

de drenagem com pavimentos permeáveis aponta para um caminho nesta direção, sendo possível notar o impacto de sua adoção no sistema, reduzindo lâminas de alagamento baixas, porém persistentes.



**Figura 5.21 – Espacialização do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas (*IRES*), para os três cenários de simulação, sem intervenções (C0) e com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2). TR25.**



## 5.2 Aplicação do critério de cenários futuros

A estimativa da resiliência com base no critério de cenários futuros considera um valor médio do IRES para toda a bacia, tomado como base para cálculo das duas parcelas que constituem a Escala de Resiliência (ver item 3.3.1, pág. 91).

Para tal estimativa, é considerado o evento pluviométrico com 25 anos de tempo de recorrência, compatível com exigências técnicas para o funcionamento de redes de macrodrenagem. A partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica dos cenários de simulação com as três condições de rede de macrodrenagem (**C0**, **C1** e **C2**), são calculados os valores médios do IRES para cada um deles.

O IRES médio é calculado como uma média aritmética direta, aplicada sobre todas as células do domínio de interesse. A Tabela 5.1 apresenta os valores de IRES médio para cada cenário, antes das intervenções e após implantação das obras propostas, considerando as condições climáticas atuais e possíveis alterações em um cenário futuro, com aumento do nível médio das marés (NMM) e do volume de chuvas intensas.

**Tabela 5.1 – Valores de IRES médio para a bacia do Canal do Mangue, nas condições climáticas atuais e futuras, para cada condição da rede de macrodrenagem simulada (C0, C1 e C2).**

Cenário	IRES	
	Atual	Futuro
<b>C0 – Sem intervenções</b>	0,65	0,60
<b>C1 – Com intervenções concentradas</b>	0,73	0,68
<b>C2 – Com intervenções distribuídas</b>	0,78	0,73

Com a entrada destes valores nas equações da Escala de Resiliência, é estimado, então, o valor da resiliência da bacia frente a possíveis mudanças futuras no padrão de funcionamento da drenagem, neste caso, nas forçantes representadas pelas chuvas, que originam os escoamentos superficiais, e pela maré, que oferece uma resistência aos escoamentos.

Os resultados da aplicação da Escala de Resiliência são apresentados nas equações (5.1), (5.2) e (5.3), para os cenários com a condição **C1** (com intervenções concentradas), e nas equações (5.4), (5.5) e (5.6), para os cenários com a condição **C2** (com intervenções distribuídas).

- Escala de Resiliência para o Cenário C1 – Com intervenções concentradas:

$$P1 = 1 - \frac{(IRES_{Projeto}^{Presente} - IRES_{Projeto}^{Futuro})}{IRES_{Projeto}^{Presente}} = 1 - \frac{(0,73 - 0,68)}{0,73} = 0,93 \quad (5.1)$$

$$P2 = \frac{IRES_{Projeto}^{Futuro} - IRES_{Sem Projeto}^{Futuro}}{IRES_{Projeto}^{Futuro}} = \frac{0,73 - 0,65}{0,73} = 0,12 \quad (5.2)$$

$$ER = P1^a \cdot P2^b = 0,93^{0,5} \cdot 0,12^{0,5} = 0,33 \quad (5.3)$$

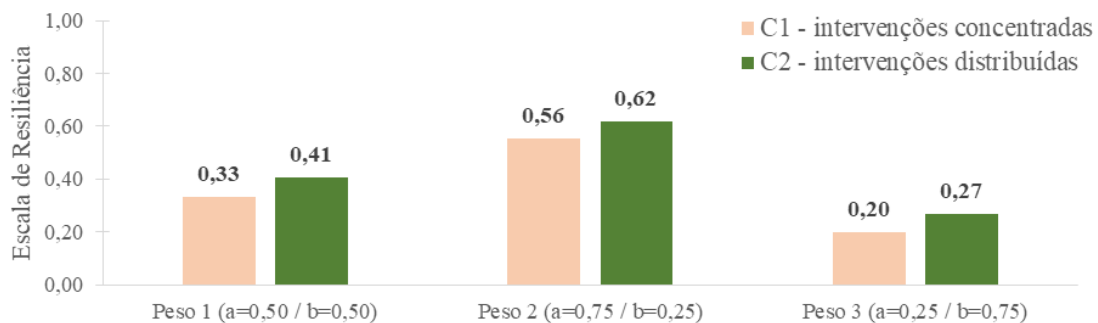
- Escala de Resiliência para o Cenário C2 – Com intervenções distribuídas:

$$P1 = 1 - \frac{(IRES_{Projeto}^{Presente} - IRES_{Projeto}^{Futuro})}{IRES_{Projeto}^{Presente}} = 1 - \frac{(0,78 - 0,73)}{0,78} = 0,94 \quad (5.4)$$

$$P2 = \frac{IRES_{Projeto}^{Futuro} - IRES_{Sem Projeto}^{Futuro}}{IRES_{Projeto}^{Futuro}} = \frac{0,78 - 0,65}{0,78} = 0,18 \quad (5.5)$$

$$ER = P1^a \cdot P2^b = 0,94^{0,5} \cdot 0,18^{0,5} = 0,41 \quad (5.6)$$

O resultado tem relação sensível aos pesos definidos para as parcelas, havendo uma maior distinção para a condição que assume uma solução mais distribuída, quanto maior o peso da parcela P2, relativa ao incremento da resiliência alcançado pela implantação do projeto. Esse padrão pode ser visualizado no gráfico da Figura 5.22, que apresenta a diferença na Escala de Resiliência entre os dois projetos, considerando três critérios para o peso das parcelas.



**Figura 5.22 – Estimativa da Escala de Resiliência na bacia do Canal do Mangue.**

### 5.3 Aplicação do critério multieventos

A partir das três condições da rede de macrodrenagem, sem quaisquer intervenções (C0), com intervenções concentradas (C1) e distribuídas (C2), são simulados eventos hidrológicos com 8 tempos de recorrência distintos, com a finalidade de cobrir desde chuvas ordinárias, que podem afetar o dia a dia da cidade, até chuvas extremas, que tendem a provocar graves problemas e grandes prejuízos, independente das condições do sistema de drenagem. Neste trabalho, são utilizadas chuvas com tempos de recorrência de 1, 5, 10, 25, 50, 100, 500 e 1000 anos.

A avaliação integrada da resiliência, com base no critério multieventos, é realizada a partir da integração da função do IRES parcial (resultante dos eventos com determinados tempos de recorrência) em relação à probabilidade de ocorrência de cada evento (ver Figura 3.11, pág. 95). Para a espacialização do IRES na bacia do Canal do Mangue, foi aplicado este processo a cada célula, as quais possuem um valor de IRES para cada evento hidrológico, resultando no mapa de resiliência integralizado.

A Figura 5.23 apresenta o resultado do IRES integralizado de forma distribuída na bacia do Canal do Mangue, resultante das simulações dos eventos hidrológicos com a condição da rede de drenagem segundo o cenário C0 – sem intervenções. Os locais com menor resiliência estão concentrados próximos aos eixos dos principais rios e na região da Praça da Bandeira e do Maracanã, onde há uma forte tendência para a concentração das águas de cheia. Analogamente, a Figura 5.24 também apresenta o resultado do IRES integralizado, para a condição da rede de drenagem segundo o cenário C1 – com intervenções concentradas. O resultado permite observar uma melhora sensível na região da Praça da Bandeira, devido à retirada de volumes ocasionada pela implantação dos reservatórios e, principalmente, pelo desvio do rio Joana e transposição do rio Maracanã. Como as intervenções se concentram mais na parte baixa da bacia, há pouco impacto positivo nas áreas mais a montante, mesmo com a previsão de implantação do reservatório de retenção no rio Jacó, formador do rio Joana. Grande parte dos alagamentos se dá pela insuficiência hidráulica das galerias de médio e grande porte localizadas a montante das obras, as quais não recebem benefícios da implantação dos reservatórios. Tais problemas acabam sendo reduzidos pelas intervenções do cenário C2 – com intervenções distribuídas, o qual propõe pequenos reservatórios descentralizados e uso de pavimentos permeáveis. Na Figura 5.25 é apresentado o resultado para o cenário C2.

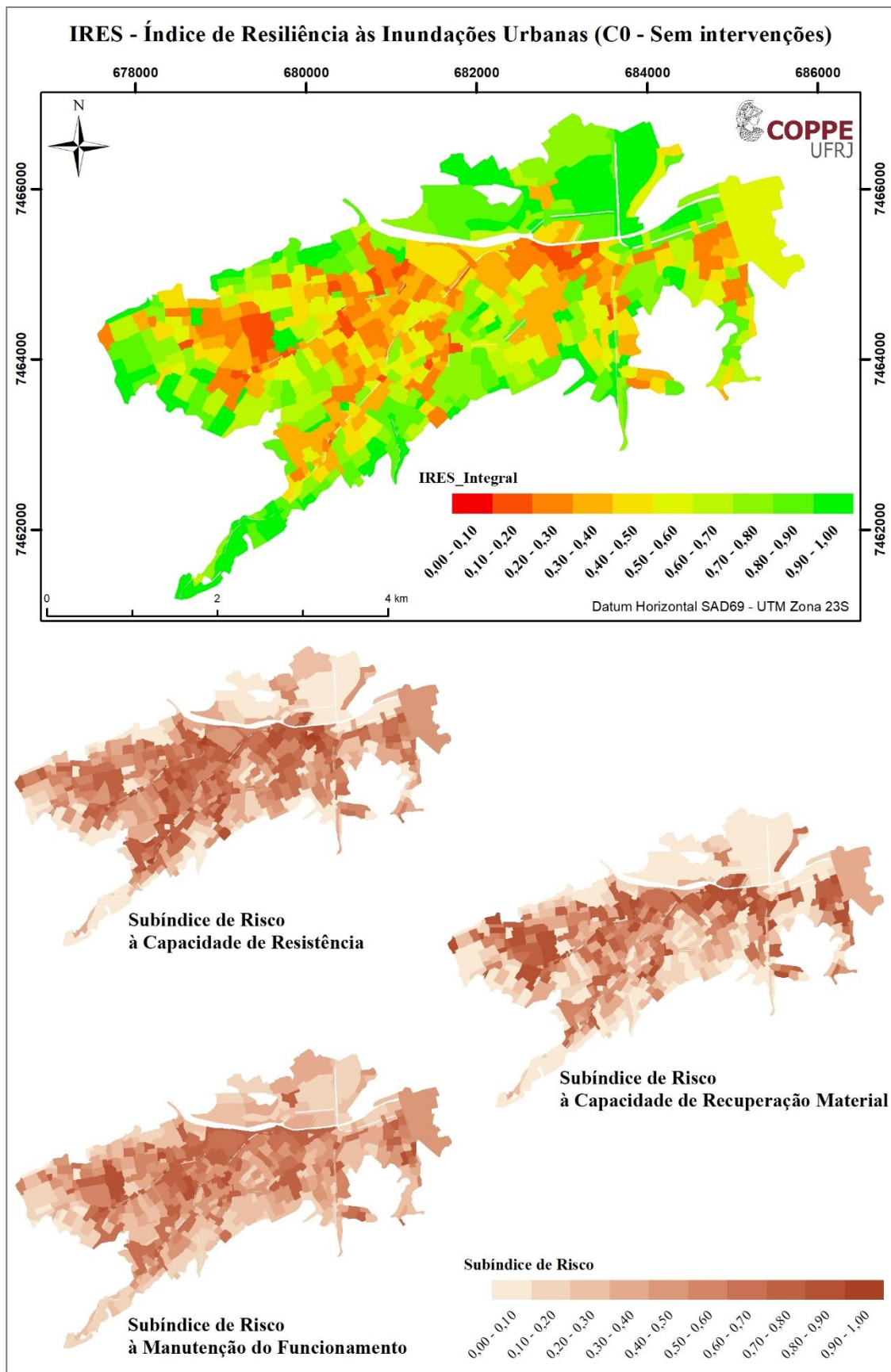
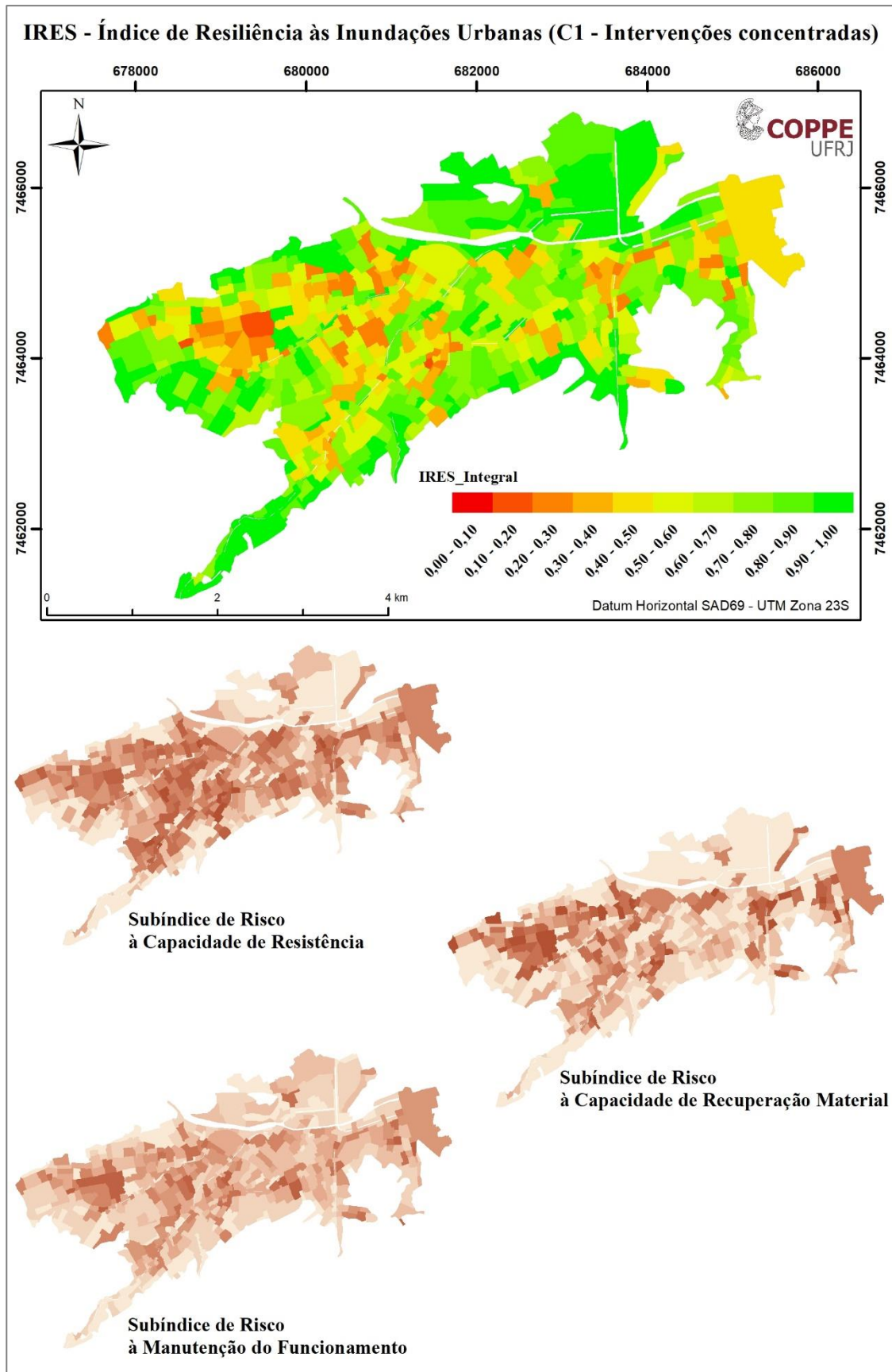
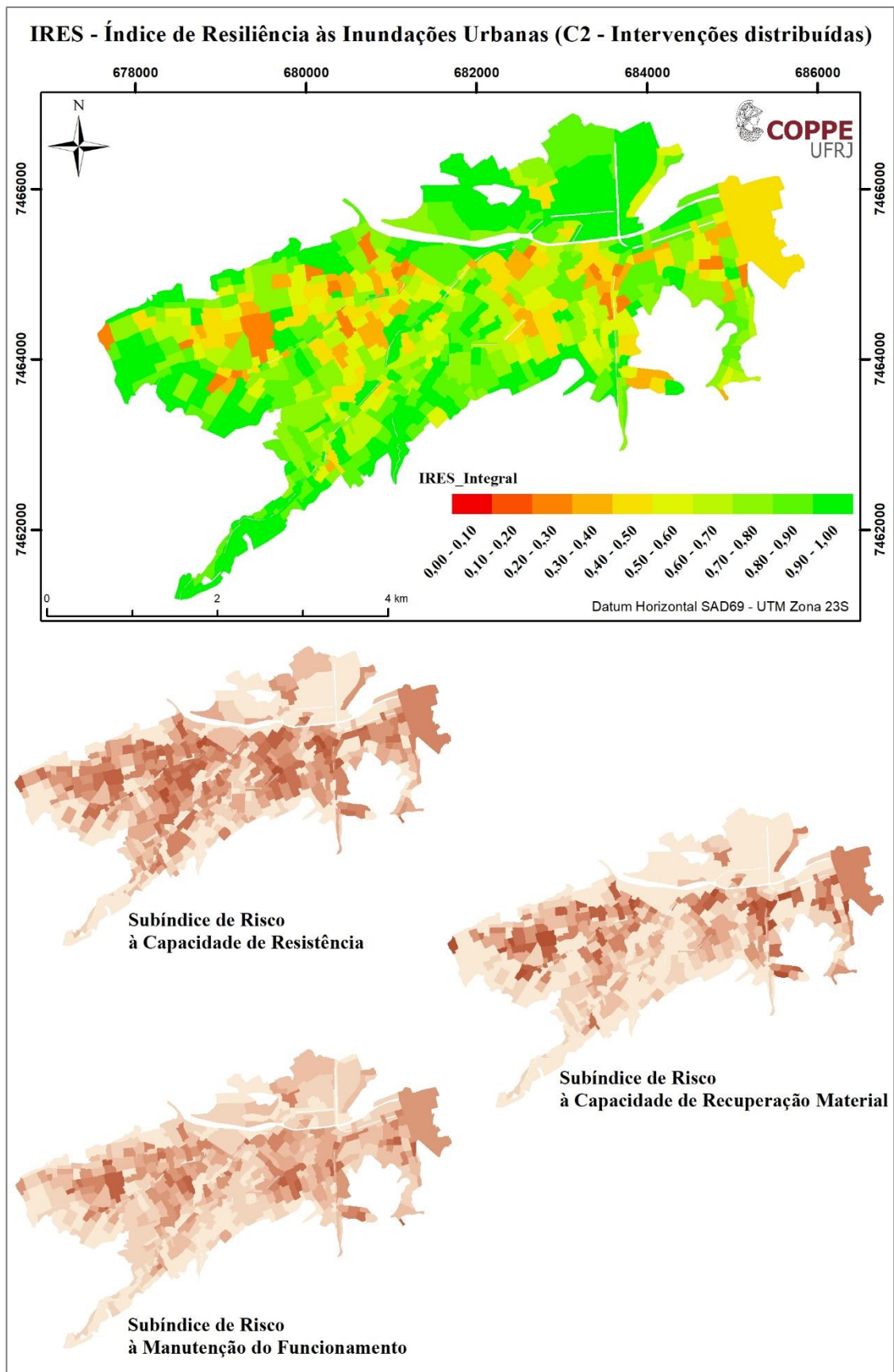


Figura 5.23 – Composição do IRES integralizado, para a condição C0 – sem intervenções.



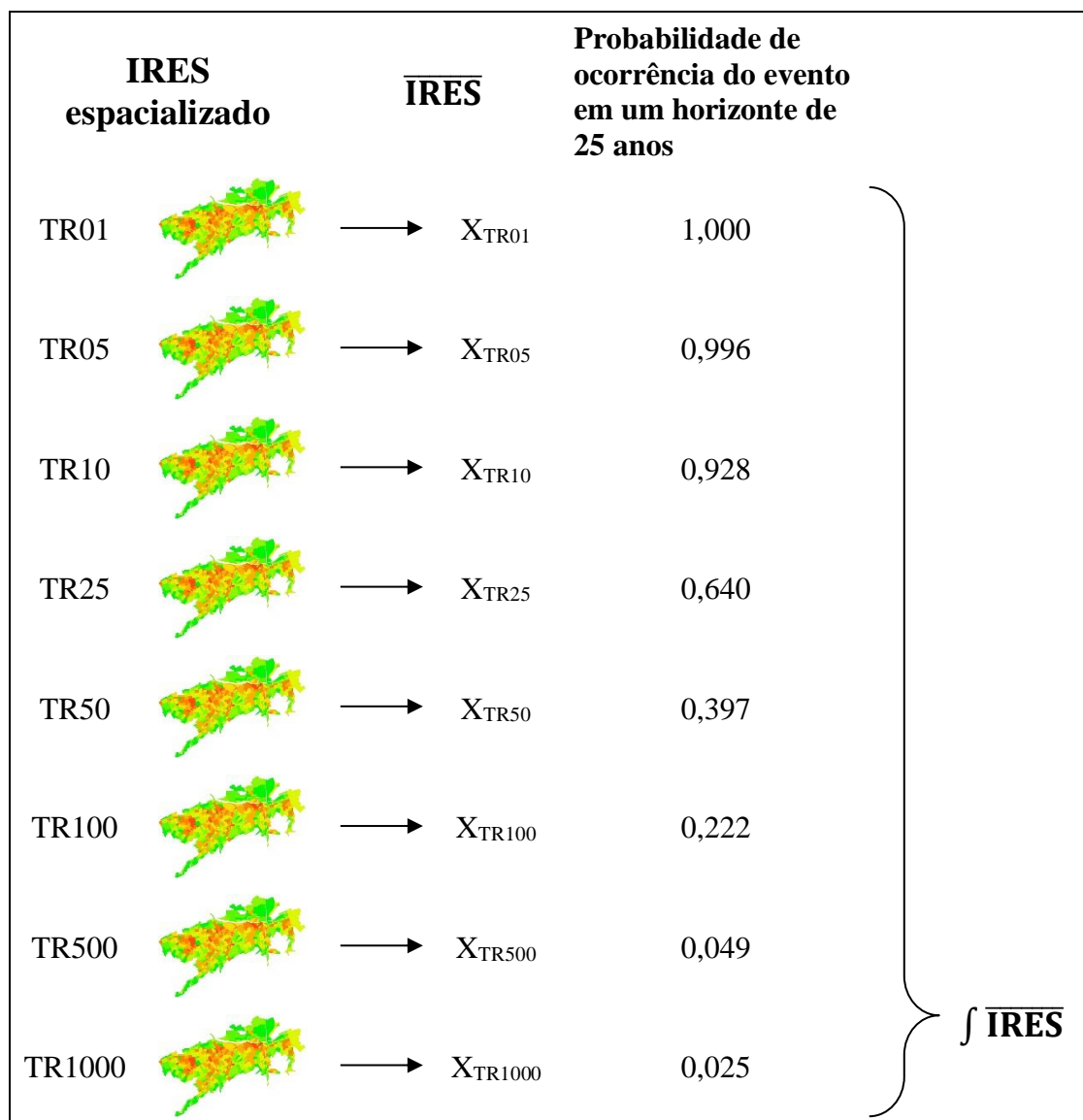
**Figura 5.24 – Composição do IRES integralizado, para a condição C1 – com intervenções concentradas.**



**Figura 5.25 – Composição do IRES integralizado, para a condição C2 – com intervenções distribuídas.**

De forma a simplificar a avaliação final e fornecer um valor único para subsidiar uma tomada de decisão mais rápida, é integralizado o IRES também espacialmente, resultando em um valor único para a bacia, em cada uma das condições simuladas (C0, C1 e C2).

Inicialmente, para cada cenário hidrológico, é calculado o  $\overline{\text{IRES}}$  (média ponderada sobre a área de cada célula em relação à área total do domínio de interesse). Assim, cada condição do sistema de drenagem possui 8 valores de  $\overline{\text{IRES}}$ , os quais, posteriormente, são plotados em um gráfico em função da probabilidade de ocorrência de cada evento em um horizonte de 25 anos. Esta função é integralizada, resultando no valor  $\int \overline{\text{IRES}}$ . A Figura 5.26 apresenta um esquema de aplicação do procedimento para estimativa do IRES integralizado para a bacia hidrográfica.



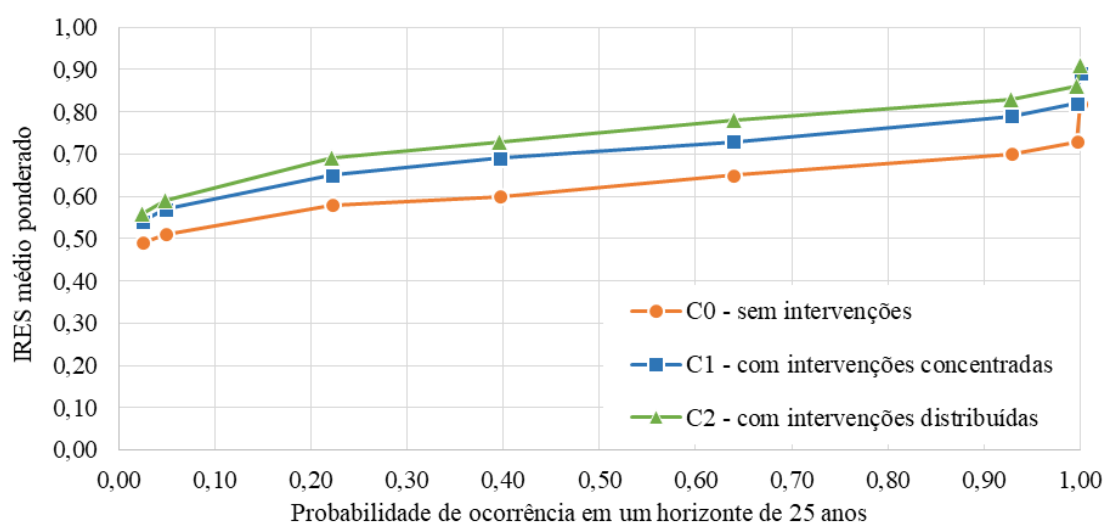
**Figura 5.26 – Esquema de cálculo do IRES integralizado espacialmente, para uma dada condição do sistema de drenagem.**

Os valores resultantes de cada uma das condições simuladas, sem e com intervenções (C0, C1 e C2), para todas as chuvas de projeto, assim como a probabilidade de ocorrência de cada evento no horizonte de 25 anos, são apresentadas na Tabela 5.2, a qual também mostra o valor final da integralização do IRES.

O gráfico da Figura 5.27 apresenta os valores do IRES médio ponderado em função da probabilidade de ocorrência de cada um dos eventos pluviométricos simulados. A integral destas funções resultam no IRES integralizado.

**Tabela 5.2 – Valores integralizados do IRES, para as condições do sistema de drenagem na bacia do Canal do Mangue simuladas.**

TR	$\overline{\text{IRES}}$			Probabilidade de ocorrência (25 anos)	$\int \overline{\text{IRES}}$		
	C0	C1	C2		C0	C1	C2
1	0,82	0,89	0,91	1,000			
5	0,73	0,82	0,86	0,996			
10	0,70	0,79	0,83	0,928			
25	0,65	0,73	0,78	0,640	<b>0,61</b>	<b>0,69</b>	<b>0,73</b>
50	0,60	0,69	0,73	0,397			
100	0,58	0,65	0,69	0,222			
500	0,51	0,57	0,59	0,049			
1000	0,49	0,54	0,56	0,025			



**Figura 5.27 – IRES médio ponderado em função da probabilidade de ocorrência das chuvas de projeto, para as condições do sistema de drenagem na bacia do Canal do Mangue (C0, C1 e C2).**



## 5.4 Análise comparativa entre os cenários simulados

Uma avaliação comparativa dos resultados finais do mapeamento do IRES na bacia pode ser realizada por meio da análise do potencial de redução de áreas com baixa resiliência e incremento de áreas com alta resiliência. Para ilustração da análise, foi realizada a contabilização de áreas em diferentes faixas de resiliência, na escala do IRES, separando-o em cinco faixas, conforme apresentado na Figura 5.1.

Tabela 5.3 – Faixas de resiliência

Resiliência	Faixa de valores - IRES		
<b>muito baixa</b>	0,00	a	0,25
<b>baixa</b>	0,25	a	0,49
<b>média</b>	0,50	a	0,69
<b>alta</b>	0,70	a	0,89
<b>muito alta</b>	0,90	a	1,00

A partir desta classificação, foram contabilizadas as áreas mapeadas dentro de cada uma das cinco faixas de resiliência, para cada cenário de simulação, considerando o IRES integralizado no tempo, resultante da aplicação do critério multieventos. Com esta avaliação, é possível observar um sensível impacto das intervenções na **redução da área com muito baixa resiliência** (8,1% no cenário sem intervenções para 1,3% no cenário com medidas distribuídas) e no **incremento das áreas com alta e muito alta resiliência** (41,1% no cenário sem intervenções para 60,4% no cenário com medidas distribuídas). O gráfico da Figura 5.28 apresenta a distribuição das faixas de resiliência em percentagem de área da bacia, considerando o domínio de interesse (ver item 4.6.3, pág. 164).

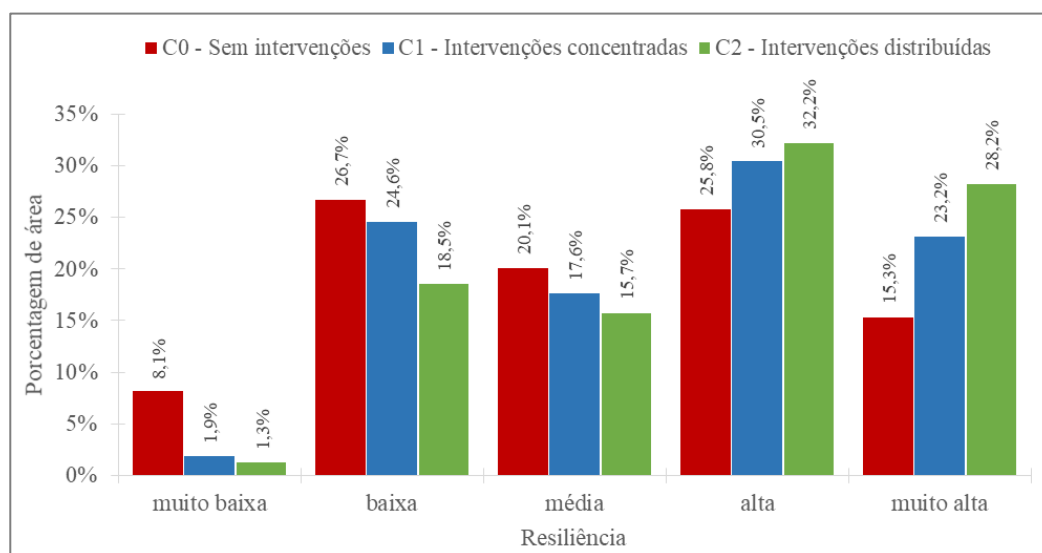


Figura 5.28 – Distribuição por área na bacia das faixas de resiliência, para cada condição simulada.

## 6 Considerações finais

O trabalho desenvolvido ao longo desta pesquisa busca indicar um caminho alternativo para a avaliação de planos de redução de riscos de inundações, assumindo a inversão da lógica direta do objetivo de redução de danos e, assim, criando uma abordagem com foco no aumento da resiliência às inundações do sistema urbano.

Esta inversão na abordagem do problema de inundações tem impacto na concepção inicial das intervenções a serem propostas. O planejamento das intervenções urbanas para redução de danos baseado no gerenciamento tradicional de risco conduz à proposição de medidas de controle de enchentes com soluções estruturais de grande porte, as quais, em um primeiro momento, proporcionam bons resultados hidráulicos para o sistema, considerando um evento hidrológico de referência. Porém, ao internalizar o risco residual, a concentração das soluções em grandes estruturas pode reduzir a resiliência do sistema, o colocando em risco diante de incertezas que podem estressar as medidas defensivas, como a ocorrência de eventos de maior magnitude, falhas estruturais dos dispositivos de drenagem, variações no padrão de urbanização da bacia ou alterações nos padrões climáticos não previstas.

A abordagem baseada na resiliência prioriza medidas adaptativas que buscam harmonizar a relação entre cidade e o ciclo de cheias, uma vez que o próprio conceito de resiliência se apoia não só na capacidade responsiva do sistema, mas também em sua habilidade de absorção e convivência com os impactos negativos das inundações.

Além disso, a abordagem sobre o conceito de resiliência:

1. Permite uma avaliação holística de potenciais perigos em sistemas antrópico-naturais.
2. Enfatiza a habilidade do sistema em lidar com o perigo, absorvendo ou se adaptando ao distúrbio.
3. Ajuda a explorar opções estratégicas para lidar com a incerteza, com possíveis mudanças futuras, sendo uma abordagem prospectiva, voltada para o futuro.

Desta forma, ao inverter a lógica do planejamento de risco, o conceito de resiliência incentiva a busca por medidas de adaptação no sistema urbano que extrapolam as intervenções hidráulicas. Assim, soluções que tornam a cidade mais preparada para conviver com as inundações passam a fazer parte da concepção inicial do plano de intervenções, deixando de ser sugestões secundárias.

Em sistemas hídricos com alta complexidade e interdependência de funcionamento, diversos conjuntos de intervenções se apresentam como boa solução para redução dos danos potenciais dos eventos de inundação. Desta forma, é necessária uma metodologia de análise capaz de subsidiar processos de decisão que priorizem ações de aumento da resiliência da bacia. Como objetivo deste trabalho, é apresentada uma proposta metodológica para avaliação da resiliência às inundações em bacias urbanas, por meio da aplicação do Índice de Resiliência às Inundações em Bacias Urbanas – IRES.

A aplicação do IRES possibilita demonstrar resultados tanto espacialmente distribuídos, subsidiando a definição de alocação de recursos de investimentos em intervenções que sejam estratégicas para redução de risco em locais mais vulneráveis da bacia, quanto consolidados para toda a bacia, facilitando a avaliação de cenários múltiplos de intervenção e fornecendo uma base comparativa de fácil apresentação e compreensão.

As principais vantagens da medição por meio de índices e indicadores são:

- transformar um grande grupo de dados em informações relevantes
- reduzir a complexidade e trazer clareza para o processo de decisão
- agrupar informações complexas em uma forma utilizável para a política pública

A elaboração do IRES tem por princípio o adensamento de informações relevantes para o processo de decisão, como apresentado na Figura 6.1, quanto ao gerenciamento do risco de inundações em uma escala única, capaz de fornecer, de forma direta, uma base de comparação entre possíveis cenários.

Esta composição possibilita incorporar, em uma única escala, fatores relacionados ao perigo, representado em suas três manifestações – profundidade; velocidade; e tempo – e aos danos potenciais, tanto em relação à vulnerabilidade do meio físico, quanto do meio social.



Figura 6.1 Hierarquia de composição de indicadores e índices, a partir do adensamento de informações.

O IRES é capaz de representar, portanto, os impactos positivos de uma determinada intervenção, não só na forma de medidas estruturais, mas também soluções adaptativas do meio urbano, que visem melhorar o convívio com o ciclo das enchentes, como, por exemplo, medidas de proteção às edificações para torná-las “a prova de inundações” ou relocações de moradias em áreas de risco. Tais ações terão impacto no aumento da resiliência às inundações da bacia e serão observadas no incremento do valor do IRES.

Porém, como citado, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação de um processo metodológico para avaliação da resiliência, extrapolando a simples estimativa de um índice para a bacia. São propostos dois critérios de análise, um para avaliar a capacidade de manutenção dos riscos às inundações frente a mudanças e incertezas futuras, e outro para avaliar o risco residual no sistema pós implantação das intervenções, frente à possibilidade de ocorrência de eventos superiores ao evento de projeto. Tais critérios são denominados, respectivamente: *critérios de cenários futuros* e *critério multieventos*.

No primeiro caso, o critério de cenários futuros foi capaz de apresentar os resultados de variação da resiliência em consequência de mudanças no regime hidrológico e no nível médio do mar provocadas por alterações climáticas potenciais.

Esta avaliação, considerando dois possíveis conjuntos de intervenções, um com medidas concentradas e outro distribuídas, mostra que há vantagem na adoção de soluções distribuídas, as quais refletiram em um valor de resiliência superior em 24%, quando comparada ao resultado obtido para o conjunto de soluções concentradas.

Ao fornecer apenas um valor para toda a bacia, este critério possibilita a comparação entre cenários de intervenção, considerando a sua capacidade adaptativa, frente às incertezas futuras, sendo, assim, um bom recurso para avaliação da resiliência de forma mais rápida, quando há interesse em analisar múltiplas possibilidades de intervenção na bacia. Portanto, tal critério se apresenta como uma boa opção para uma avaliação preliminar de conjuntos de intervenções, permitindo a comparação dos impactos positivos globais para toda a bacia em um único valor. Poderá ser aplicado para a avaliação de projetos de intervenção que não apresentem muita variação espacial das intervenções.

Após definição dos cenários de projeto com melhores impactos positivos sobre a resiliência da bacia, análises mais detalhadas devem ser realizadas, para permitir uma observação sistêmica dos resultados de cada conjunto de intervenção. Para isto, é necessária uma abordagem capaz de avaliar espacialmente as mudanças no comportamento da inundação ocasionadas pela implantação das intervenções propostas em cada cenário de projeto. O critério multieventos oferece essa possibilidade por meio da apresentação, como resultado final, do mapa de resiliência da bacia.

Uma grande vantagem deste critério é a internalização do risco residual no processo de decisão, uma vez que o mapa de resiliência resulta da integração dos resultados do IRES para todos os tempos de recorrência simulados, incorporando, portanto, o impacto de eventos superiores ao evento de projeto.

Outra vantagem, relacionada com a utilização de indicadores e índices é a possibilidade de representação de diversas características de um dado sistema em uma escala única comparável. Em um primeiro momento, o índice de resiliência proposto no presente trabalho, o IRES, se apresenta com um grande número de indicadores, tornando um pouco complexa a sua aplicação e com forte dependência da disponibilidade de muitas informações, as quais, em parte, não são de fácil acesso em qualquer região.

Porém, ao se tratar de uma composição científica, o IRES subsidia estudos posteriores para construção de índices mais simples, que não devem perder o potencial de avaliação

multicritério. A compactação das informações em indicadores e índices caminha em direção à sua melhor aplicação para tomada de decisões e disseminação pública, como demonstrado na Figura 6.2.



**Figura 6.2 – Objetivos da representação de informações em indicadores, para diferentes escalas de adensamento (SHIELDS *et al*, 2002).**

Apesar do grande número de informações, foram priorizados dados de acesso público, disponíveis em órgãos responsáveis pelo planejamento urbano, como o Instituto Pereira Passos – IPP, do Rio de Janeiro, ou por levantamento nacional, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Tais informações devem estar disponíveis de forma espacializada, para uma melhor aplicação do índice proposto neste trabalho.

O adensamento dos dados, para simplificar a aplicação da metodologia apresentada, deve preservar a representação de características diversas do sistema urbano e do processo de enchente, possibilitando a representação das três parcelas da resiliência, relacionadas com a resistência do sistema, sua capacidade de recuperação e a manutenção da sua funcionalidade. Desta forma, aspectos relativos à exposição, aos danos potenciais de acordo com a tipologia das edificações expostas, à mobilidade na bacia durante a ocorrência do evento e à capacidade de recuperação da população afetada diretamente devem estar presentes

na formulação do índice. A aplicação do IRES à bacia do Canal do Mangue possibilitou a análise da variação da resiliência, tanto de forma espacial, quanto em valor único para toda a bacia. Porém, a avaliação considerou apenas duas concepções de projeto distintas, ambas baseadas no conceito de aumento da capacidade de reservação da bacia com uso de medidas estruturais, para redução das vazões de pico do escoamento superficial, decorrentes de chuvas intensas.

Os resultados demonstraram uma melhoria na resposta da bacia quanto mais distribuídas forem as intervenções. A possibilidade de observações dos resultados de forma espacial, no critério multieventos, permite que decisões de investimento para intervenções no sistema de drenagem sejam melhor direcionadas, priorizando regiões mais vulneráveis, não só em aspectos físicos, mas também sociais. A incorporação do indicador de danos relativos retira o viés econômico, que acaba por priorizar áreas com maior concentração de renda, quando comparados apenas danos potenciais diretos. Cenários diversos de projeto, considerando também medidas de adaptação urbana ao ciclo natural das cheias devem ser avaliados em um estudo futuro, de forma a testar a potencialidade da ferramenta para outros casos.

O mapeamento da resiliência pode ser utilizado como ferramenta de apoio para hierarquização de intervenções, definindo os locais que produzem maiores impactos positivos ao sistema como um todo, abordando, dessa forma, a avaliação sistêmica. De forma mais abrangente, o critério de avaliação proposto permite concretizar a avaliação ecossistêmica, que tem como princípio avaliar a capacidade de sistemas em resistir aos impactos produzidos pelas modificações antrópicas no meio natural, diante de usos potenciais distintos. Com uso dos critérios propostos nesta tese, diferentes cenários com composições distintas de projeto podem ser avaliados, permitindo a avaliação tanto de usos potenciais do espaço, quanto de intervenções estruturais no sistema de drenagem.

O sistema de pesos aplicado ao arranjo dos indicadores foi realizado de forma homogênea, devendo ser realizada, em estudo posterior, avaliação de sensibilidade dos termos da composição geral do índice. Tal estudo poderá indicar fragilidades e/ou potencialidades de indicadores no resultado final.

O trabalho não esgota a discussão sobre a resiliência às inundações em bacias urbanas, se restringindo à análise infraestrutural da cidade, porém, abre caminho para a incorporação da abordagem sobre resiliência no gerenciamento de risco às inundações.

Para realização de estudos posteriores, é indicada a incorporação das seguintes atividades:

- Validação dos indicadores e índices para diferentes bacias.
- Realização de testes de sensibilidade em todas as escalas dos indicadores.
- Integração ao longo do tempo, considerando também incertezas quanto a possíveis falhas estruturais do sistema de proteção – risco residual mais completo.



## Referências Bibliográficas

ABEP, 2012, *Critério de Classificação Econômica Brasil*. Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa. Disponível em: <<http://www.abep.org/criterio-brasil>>. Acessado em 31/10/2017.

ALVES, J.E.D.; CAVENAGHI, S., 2012, *Tendências demográficas, dos domicílios e das famílias no Brasil*. In: Aparte Inclusão Social em Debate. Disponível em: <<http://www.ie.ufrj.br/aparte>>. Acessado em 15/01/2014.

AMEC Earth and Environmental, 2001, *Georgia Stormwater Management Manual*, Volume 2 Technical Handbook. Prepared for the Atlanta Regional Commission.

ARONICA, G. T., APEL, H., BALDASSARRE, G. D. e SCHUMANN, G. J.-P., 2013, *HP – Special Issue on Flood Risk and Uncertainty*. Hydrol. Process., 27: 1291. doi: 10.1002/hyp.9812

BARA C., BRÖNNIMANN G., 2011, *Risk Analysis: Resilience – Trends in Policy and Research*. Crisis and Risk Network (CRN), Center for Security Studies (CSS), Zurique, Suíça. Disponível em: <<https://goo.gl/EEedDFU>>. Acessado em 30/10/2017.

BARBOSA, A.E., FERNANDES, J. N. e DAVID, L. M., 2012. *Key issues for sustainable urban stormwater management*. Water Research. In Press, Corrected Proof.

BATICA J., 2015, *Methodology for food resilience assessment in urban environments and mitigation strategy development*. Tese de D.Sc., Université Nice Sophia Antipolis, Nice, França.

BERKES, F., 2007, *Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking*. Natural hazards, 41(2), 283-295. DOI: 10.1007/s11069-006-9036-7

BERTILSSON, L., WIKLUND, K., 2015. *Urban Flood Resilience: A case study on how to integrate flood resilience in urban planning*. Dissertação (Mestrado em Division of Water Resources Engineering) - Lund University, Suécia.

BOSHER, L. (Ed.), 2008. *Hazards and the built environment: attaining built-in resilience*. Routledge.

BRASIL, 2001 – Lei Federal 10.257 de 10 de julho de 2001, *Estatuto da Cidade*, Senado Federal.

BRASIL, 2007 – Lei Federal 11.445 de 05 de janeiro de 2007, *Lei do Saneamento*, Disponível em <<https://goo.gl/Bt55F>>. Acessado em 04/03/2018.

BRASIL, 2012 – Ministério das Cidades, 2012. *Manual para apresentação de propostas para sistemas de drenagem urbana sustentável e de manejo de águas pluviais*. Programa 2040 - Gestão de riscos e resposta a desastres. Brasília, DF. Disponível em: <<https://goo.gl/Pab6Zs>>. Acessado em 06/11/2017.

BRITTO, A. L. N. P. 2012. *Rainwater in two city plans for rio de janeiro in the XX century: between hygienism and sustainability*. In: 15th International Planning History Society Conference, 2012, São Paulo. 15th International Planning History Society Conference. São Paulo: International Planning History Society.

BRUNEAU, M. *et al*, 2003. *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*. Earthquake spectra, v. 19, n. 4, p. 733-752.

BUCKLE, P. *et al*. 2000. *New approaches to assessing vulnerability and resilience*. Australian Journal of Emergency Management, The, v. 15, n. 2, p. 8.

BURIAN, S.J. *et al.*, 1999. *Historical Development of wet-weather flow management*. Journal of Water Resources Planning and Management, 125 (1): 3-11.

CANHOLI, A.P., 2005. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, São Paulo. 304 p.

CETESB, 2011, Norma CETESB P4.261 – *Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de risco*, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo.

CIRIA, 2007, *The SUDS Manual*, C697. Disponível em: < <https://goo.gl/Cd5oSM> >. Acesso em: 25 de outubro de 2017.

CIRIA, 2010, *Flood resilience and resistance for critical infrastructure*, C688, Project RP913, Londres, 130p.

CIRIA, 2013, *Water Sensitive Urban Design in the UK –Ideas for built environment practitioners*. Publication C723, Londres.

CLUBE DE ENGENHARIA, 2011, *Praça da Bandeira: Uma dívida histórica da falta de planejamento urbano*. In: Engenharia em Revista, Ano I, nº1, p. 16-23. Disponível em: <portalclubedeengenharia.org.br>, acessado em 24/08/2014.

COFFMAN, L.S., CHENG, M., WEINSTEIN, N., CLAR, M., 1998, *Low-Impact Development Hydrologic Analysis and Design*. In: Proceedings of the 25th Annual Conference on Water Resources Planning and Management, Nova York, USA.

COPPETEC, 2000. *Execução de concepção e de projetos de obras civis e ações de controle das enchentes na Bacia Hidrográfica do Canal do Manguê*. Rio de Janeiro, 257 p.

COPPETEC, 2003, *Modelagem Matemática de Cheias Urbanas, Através de Células de Escoamento, como Ferramenta na Concepção de Projetos Integrados de Combates às Enchentes: Detalhamento das Obras Propostas para a Bacia do Rio Joana*. Relatório VI - PEC 4221 – Projeto CT-Hidro/GBH nº 520093/2003-8.

CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2015, *The human cost of weather related disasters 1995-2015*. UNISDR - UN Office for Disaster Risk Reduction.

CUMMING, G.S. et al, 2005. *An exploratory framework for the empirical measurement of resilience*. Ecosystems, v. 8, n. 8, p. 975-987. DOI: 10.1007/s10021-005-0129-z

D'ALTÉRIO, C.F.V., 2004, *Metodologia de Cenários Combinados para Controle de Cheias Urbanas com Aplicação à Bacia do Rio Joana*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ELLIS, J.B. 2013. Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 56, n. 1, p. 24-41.

EMBRAPA, 2004. *Mapeamento Pedológico e Interpretações Úteis ao Planejamento Ambiental do Município do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, 331p.

FABER, R., 2006. *Flood risk analysis: Residual risks and uncertainties in an Austrian context*. Tese de Doutorado. University of Natural Resources, Viena, Áustria.

FLETCHER, T.D. *et al.*, 2015. *SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. Urban Water Journal, v. 12, n. 7, p. 525-542.

FREEMAN, P.K., 2000. *Infrastructure, Natural Disasters and Poverty*. In: Managing Disaster Risk in Emerging Economies. KREIMER, A., ARNOLD, M., (Comp.), Washington D.c.: The World Bank, 2000. Cap. 5, p. 55-61. (Disaster Risk Management).

GODSCHALK, D.R., 2003. *Urban hazard mitigation: creating resilient cities*. Natural hazards review, v. 4, n. 3, p. 136-143, 2003. <https://goo.gl/7sTXjp>

GUNDERSON, L.H.; HOLLING, C., 2001. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press.

HALE, R. L., 2016. *Spatial and temporal variation in local stormwater infrastructure use and stormwater management paradigms over the 20th century*. Water, 8(7), 310. DOI:10.3390/w8070310.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. *Censo Demográfico 2010*.

IPCC, 2013. *Summary for Policymakers*. In: Climate Change, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JHA, A.K.; JESSICA, R.B., 2012, *Cidades e inundações. Um guia para a gestão integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI - Um Resumo para os Formuladores de Políticas*. Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento.

KARNIB, A.; AL-HAJJAR, J. e BOISSIER, D., 2002. *An expert system to evaluate the sensitivity of urban areas to the functioning failure of storm drainage networks*. Urban Water, 4 (2002) 43–51.

KEELEY, M. *et al.*, 2013. *Perspectives on the use of green infrastructure for stormwater management in Cleveland and Milwaukee*. Environmental management, v. 51, n. 6, p. 1093-1108.

KIRBY, A., 2005. *SuDS – Innovation or a Tried and Tested Practice?* Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Municipal Engineer*, 158 (2), 115–122.

LAMOND, J.E.; PROVERBS, D.G., 2009. *Resilience to flooding: lessons from international comparison*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning, v. 162, n. 2, p. 63-70.

LEOPOLD, L.B., 1968, *Hydrology for Urban Planning – A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use*. USGS circ. 554.

LIAO, K.H., 2012. *A Theory on Urban Resilience to Floods – A Basis for Alternative Planning Practices*. *Ecology and society*, v. 17, n. 4, p. 48.

MAGALHÃES, C.R., 2013. *Bacia Hidrográfica como Referência de Planejamento e Expansão urbana para as Cidades no século XXI*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2013.

MALE, S., 2009, *Resilience Infrastructure*, Leeds asset management forum, Institute for Resilient Infrastructure, University of Leeds, 12 de Maio de 2009.

MAMEDE, B.B. *et al.*, 2015, *Análise de macrodrenagem em áreas urbanas: soluções e propostas para a sub-bacia do Canal do Mangue*. *Cadernos do Desenvolvimento Fluminense*, n. 6, p. 117-134.

MARENGO, J.A., NOBRE, C.A., SALATI, E., AMBRIZZI, T., 2007. *Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, Brasil.

MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G., 1994, *Modelação de Grandes Planícies de Inundação por um Esquema de Células - Aplicação ao Pantanal de Mato-Grosso*. *Revista Brasileira de Engenharia (RBE)*, Caderno de Recursos Hídricos, v.12, n.2.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G., 1998, *Modelação de Cheias Urbanas Através de um Esquema de Células de Escoamento*. IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande/PB, Brasil, novembro de 1998.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; CAMPOS, R.O.G., 2000, *Aplicação de Um Modelo de Células para Avaliação de Diferentes Soluções Para o Problema de Enchentes Urbanas: Estudo de Caso do Rio Maracanã/RJ*. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste .Natal/RN, Brasil, novembro de 2000.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; 2002. *Urban Flood Control through a Mathematical Cell*. In: Water International Resources, Vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Junho 2002; Illinois, E.U.A.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G.; MAGALHÃES, L.P.C. de; PRODANOFF, J.H.A., 2005, *On-site stormwater detention as an alternative flood control measure in ultra-urban environments in developing countries*. IAHS-AISH Publication, v. 293, p. 196-202.

MATTOS, R.A.A, 2004, *A gestão sustentável de recursos hídricos. Experiência e desafios regionais: o caso do controle das enchentes da bacia hidrográfica do rio Joana - Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

MELBOURNE WATER, 2004, *Water-sensitive urban design*, in: Essential Facts, Victorian Government. Disponível em: <melbournewater.com.au>, acessado em 25/10/2017.

MIGUEZ, M., G., MASCARENHAS, F.C.B. *Modelação Matemática de Cheias Urbanas Através de um Esquema de Células de Escoamento*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v.4, n.1, p. 119-140, ISSN 1414-381X, janeiro a março de 1999.

MIGUEZ, M.G., 2001, *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M.G., MAGALHÃES, L.P.C., 2010, *Urban Flood Control, Simulation and Management: an Integrated Approach*. In: A. C. Pina Filho, A. C. de Pina. (Org.). *Methods and Techniques in Urban Engineering*. 1ed.Viena: INTECH Education and Publishing, v. 1, p. 131-160.

MIGUEZ, M.G., VERÓL, A.P., REZENDE, O.M., 2016, *Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. Elsevier Brasil.

NAGEM, F.R.M., 2008, *Avaliação Econômica dos Prejuízos Causados Pelas Cheias Urbanas*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NEAL, J., KEEF, C., BATES, P., BEVEN, K. e LEEDAL, D., 2013, *Probabilistic flood risk mapping including spatial dependence*. Hydrol. Process., 27: 1349–1363. doi: 10.1002/hyp.9572

PAIVA, O. V. 2017. *Rio Trapicheiros: Requalificação do Percurso Heitor Beltrão - Gabriela Prado Maia Ribeiro*. Trabalho Final de Graduação (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - UFRJ. Rio de Janeiro.

PBMC, 2016. *Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas* [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.

PDMAP, sem ano, *Relatório Síntese*. Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 258 p.

PDMAP, 2010, *Diagnóstico do Sistema de Drenagem e Plano Diretor Preliminar da Bacia Hidrográfica do Canal do Manguê*. Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 74 p.

PDMAP, 2011, *Memorial descritivo das intervenções para controle de inundações na bacia hidrográfica do Canal do Manguê – Reservatórios de Detenção*. Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 59 p.

PENDER, G., NÉELZ, S., 2007, *Use of computer models of flood inundation to facilitate communication in flood risk management*. Environmental Hazards 7 (2007) 106–114. DOI: 10.1016/j.envhaz.2007.07.006

PLATE, E.J., 2002, *Flood risk and flood management*. Journal of Hydrology 267, 2–11. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00135-X

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. Duque de Caxias/RJ. Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 149-163.

RIO DE JANEIRO, 2010 – Subsecretaria de gestão de bacias hidrográficas - Rio-Águas. *Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana*. 1ª. Versão - Dezembro 2010. RIO-ÁGUAS, Secretaria Municipal de Obras, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RIO DE JANEIRO, 2011 – Secretaria Municipal de Urbanismo do município do Rio de Janeiro – SMU. Lei Complementar nº 111, de 1º de fevereiro de 2011, *Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro*. Disponível em <<https://goo.gl/QemnYn>>, acessado em: 04/03/2018.

ROY, A.H., et al., 2008. *Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States*. Environmental Management, 42, 344–359.

SALGADO, J.C.M., 1995, *Avaliação Econômica de Projetos de Drenagem e de Controle de Inundações em Bacias Urbanas*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 100 f.

SAMUELS, P.; GOULDBY, B., 2009. *Language of Risk – Project Definitions (Second Edition)*. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies, FLOODSite. Disponível em: <[www.floodsite.net](http://www.floodsite.net)>

SANTOS, R.T.F., 2017. *Efeitos da subida do nível do mar na inundação costeira na costa leste do Brasil devido às mudanças climáticas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SAYERS, P.; LI Y.; GALLOWAY, G.; PENNING-ROWSELL, E.; SHEN, F.; WEN, K., CHEN, Y. e LE QUESNE, T., 2013. *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. Paris, UNESCO.

SUFRI – Strategies of Urban Flood Management, 2011. *SUFRI Methodology for pluvial and river flooding risk assessment in urban areas to inform decision-making – Report*. Research Institute of Water and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Valencia.



TEBALDI, I., MIGUEZ, M. G., BATTEMARCO, B. P., REZENDE, O. M., VERÓL, A. P., 2015. *Índice de resiliência a inundações: Aplicação para a sub-bacia do rio Joana, Rio de Janeiro, RJ*. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-SBRH, 2015, Brasília, DF/Brasil. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-SBRH. Bento Gonçalves, RS/Brasil: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

TE CHOW, V., 1959, *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.

TINGSANCHALI, T., 2012, *Urban flood disaster management*, Procedia Engineering 32, p. 25 - 37. Ed. Elsevier Ltd. (doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1233).

TOBIN, G.A. 1999. *Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning?* Environmental Hazards 1:13-25.

TUCCI, C.E.M.; DA SILVEIRA, A.L.L.; *et al*, 2004, *Hidrologia: ciência e aplicação*, 3 ed., primeira reimpressão, Ed. UFRGS/ABRH, Porto Alegre.

TUCCI, C.E.M., 2005. *Gestão das Águas Pluviais Urbanas: Saneamento para todos*. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília, DF. 197 p.

TUCCI, C.E.M., 2007. *Inundações Urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA. 393 p.

UNISDR, 2009, *Terminology on Disaster Risk Reduction*, United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction. Disponível em: <<https://goo.gl/oyfVun>>. Acessado em: 30/10/2017.

UNISDR, 2012, *Introducing Disaster Risk Reduction and Resilience*, United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction, Regional Office for Arab States. Disponível em: <[http://youtu.be/iugLHrcs\\_fm](http://youtu.be/iugLHrcs_fm)>, acessado em: 20/08/2014.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT, 1999. *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, Vol. 3 - Best Management Practices, Revisão 2008, Urban Drainage and Flood Control District, Denver

VERÓL, A.P., 2013. *Requalificação Fluvial Integrada ao Manejo de Águas Urbanas para Cidades mais Resilientes*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

WANG, C.; BLACKMORE, J.M., 2009. *Resilience concepts for water resource systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 135, n. 6, p. 528-536.

WARD, P.J.; PAUW, W.P.; VAN BUUREN, M.W.; MARFAI, M.A., 2013, *Governance of flood risk management in a time of climate change: the cases of Jakarta and Rotterdam*, Environmental Politics. v.22, n.3, pp.518-536.

ZANETTI, V.B., DE SOUSA JUNIOR, W.C.; DE FREITAS, D.M., 2016. *A climate change vulnerability index and case study in a Brazilian coastal city*. Sustainability, v. 8, n. 8, p. 811. Disponível em: <<https://goo.gl/gLhPm2>>. Acessado em 06/11/2017.

ZEVENBERGEN, C.; GERSONIUS, B. 2007. *Challenges in urban flood management*. R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, and Zevenbergen, editors. Advances in urban flood management. Taylor & Francis, New York, New York, USA. <http://dx.doi.org/10.1201/9780203945988>. ch1, p. 1-11.

ZHOU, Q. 2014. *A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts*. Water, v. 6, n. 4, p. 976-992.

ZONENSEIN, J., 2007, *Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 105 p.